

APLICAÇÃO DE FILTROS ADAPTATIVOS PARA A ESTIMAÇÃO DA FREQUÊNCIA E DA AMPLITUDE DE INTER-HARMÔNICOS CAUSADOS POR FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

MARIELLE J. SILVA, CARLOS R. JÚNIOR, SÍLVIA C. FERREIRA, DANTON D. FERREIRA, LEONARDO M. BARBOSA,
DANIEL F. LEITE

*Laboratório de Eletricidade, Depto. de Engenharia, Universidade Federal de Lavras
Caixa Postal 3037, 37200-000, Lavras, MG*

*E-mails: mariellejordane@hotmail.com, carlos.rufinoj@gmail.com,
silvia.ferreira@deg.ufla.br, danton@deg.ufla.br, leomaia.eco@gmail.com
daniel.leite@deg.ufla.br*

Abstract— This paper presents a new method to quantify inter-harmonics, caused by voltage fluctuations, in terms of frequency and amplitude. The frequencies of the fundamental and fluctuation component are also estimated, which allows the application of the algorithm in the presence of frequency and amplitude variations. The proposed methodology uses adaptive notch filters with frequency estimators combined with demodulation techniques and moving average filters. Frequency and amplitude estimation results were reasonable, with small errors, in all scenarios, which supports the feasibility of the proposed method for time-varying inter-harmonic estimation.

Keywords— Frequency estimation, amplitude estimation, voltage fluctuation, inter-harmonics, power quality.

Resumo— Este trabalho apresenta um novo método para quantificar a frequência e amplitude dos inter-harmônicos resultantes da flutuação de tensão. Além disso, também são estimados a frequência da fundamental e da flutuação da tensão, o que permite a aplicação do algoritmo em condições de variação das mesmas. A metodologia proposta utiliza filtros adaptativos sintonizados com estimadores de frequência, e técnicas de demodulação e filtros de médias móveis como algoritmos auxiliares. Os resultados obtidos foram satisfatórios na estimação da amplitude e da frequência da componente fundamental e dos inter-harmônicos, para todos os casos analisados. Os erros apresentados foram pequenos mesmo com variações da frequência e da amplitude dos sinais analisados, mostrando que o algoritmo é uma boa opção para estimação de inter-harmônicos variantes no tempo.

Palavras-chave— Estimação da frequência, estimação da amplitude, flutuação de tensão, inter-harmônicos, qualidade de energia.

1 Introdução

A crescente demanda por energia elétrica, bem como a preocupação com o meio ambiente tem motivado a busca por outras fontes de energia, principalmente as renováveis. Sendo assim, a fim de suprir essas necessidades, surgiu o conceito de microrrede, que é caracterizada como um grupo de cargas alimentadas por uma ou mais fontes de energia distribuída, podendo possuir ou não um sistema de armazenamento de energia (Solanki et al., 2017; Olivares et al., 2014; Palma-Behnke, Reyes and Jimenez-Estevez, 2012).

Devido a intermitência das fontes de energia presentes em uma microrrede, tais como, solar e eólica, existe uma constante preocupação com a Qualidade da Energia (QEE) nestes cenários, principalmente em relação à tensão. A flutuação da tensão, por exemplo, pode provocar aumento nas perdas de energia, danificar os dispositivos eletrônicos, causar cintilação luminosa, entre outros.

Os efeitos da flutuação de tensão são ainda maiores quando uma microrrede está operando desconectada do sistema elétrico, por causa da alta impedância de saída dos conversores eletrônicos. Portanto, a mitigação e quantificação da flutuação da tensão são consideradas questões importantes neste contexto (Hashempour and Lee, 2017).

Uma das maneiras de quantificar as flutuações de tensão é através da avaliação dos inter-harmônicos

presentes no sinal. De fato, as principais técnicas utilizadas para este fim são baseadas em modulação da amplitude ou na correlação com os inter-harmônicos (Eidson and Halpin, 2016).

Neste contexto, várias técnicas têm sido propostas na literatura relacionadas à estimação da frequência de inter-harmônicos, tais como: Filtro de Kalman, Transformada Rápida de Fourier (FFT), Redes Neurais, entre outras (Chen and Chen, 2014). Algumas técnicas, como a FFT por exemplo, podem apresentar desvios na obtenção de frequências desconhecidas ou variantes no tempo. De modo geral, espera-se que os métodos de estimação dos inter-harmônicos sejam adaptáveis às variações de frequência e possuam estruturas simples, robustas e adequadas às aplicações práticas em microrredes.

Visando encontrar essas características, Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai, (2010) propuseram uma nova topologia de filtro adaptativo capaz de obter as frequências harmônicas e inter-harmônicas presentes em um sinal. Essa metodologia utiliza uma cascata de filtros sintonizados e estimadores de frequência. Os resultados mostraram boa resposta dinâmica e precisão (Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai, 2010). Entretanto, os autores não focam o trabalho na estimação de inter-harmônicos causados pela flutuação de tensão. Isso se deve ao fato de que o par de inter-harmônicos causado pela flutuação pode estar muito próximo da frequência principal, dificultando a estimação adequada da amplitude do sinal.

Desta forma, este trabalho apresenta uma técnica baseada nos filtros adaptativos sintonizados propostos por Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai (2010) para a detecção de inter-harmônicos resultantes da flutuação de tensão. O objetivo principal é contribuir com uma nova metodologia para a estimação tanto da amplitude quanto da frequência dos inter-harmônicos presentes na flutuação de tensão.

Este artigo está dividido em 6 seções. As seções 2 e 3 apresentam um referencial sobre os inter-harmônicos, as flutuações de tensão e a técnica utilizada para a realização deste trabalho, a qual consiste nos filtros adaptativos sintonizados. A seção 4 apresenta a metodologia proposta para a realização deste trabalho. Na seção 5 são apresentados os resultados e discussões. E, por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões.

2 Correlação entre Inter-harmônicos e Flutuação de Tensão

Os padrões internacionais, tais como a norma IEC 61000-4-7, definem requisitos de medição e emissão da flutuação de tensão. No entanto, este tipo de distúrbio é geralmente quantificado em relação à cintilação luminosa.

Buscando propor novas metodologias, Eidson and Halpin, (2016) quantificaram as flutuações de tensão em função dos inter-harmônicos. Isto porque estas podem ser modeladas conforme:

$$u(t) = \frac{U_1 \sin(w_1 t)}{u_1(t)} \cdot (1 + \frac{U_m \sin(w_m t + \varphi_m)}{u_m(t)}) \quad (1)$$

onde, $u(t)$ representa um sinal de tensão com flutuação, sendo que $u_1(t)$ corresponde ao sinal fundamental e $u_m(t)$ corresponde à flutuação de tensão. U_1 e w_1 são a amplitude e a frequência da fundamental. Já, U_m , w_m e φ_m são a amplitude, a frequência e a fase, da modulação, respectivamente. Além disso, $w_1 = 2\pi f_1$, e $w_m = 2\pi f_m$. A equação (1) pode ser reescrita como:

$$u(t) = U_1 \sin(w_1) + \frac{U_m}{2} \sin((w_1 - w_m)t - \varphi_m) + \frac{U_m}{2} \sin((w_1 + w_m)t + \varphi_m) \quad (2)$$

Assim, a flutuação de tensão reflete no espectro harmônico como um par de inter-harmônicos de frequência $w_1 - w_m$ e $w_1 + w_m$, em torno da frequência fundamental (Eidson and Halpin, 2016).

Nos sistemas elétricos de potência, é comum encontrar esse tipo de inter-harmônico. Em turbinas eólicas, por exemplo, a variação da velocidade do vento causa mudanças na amplitude da tensão, o que, consequentemente, causa os inter-harmônicos (Lin, 2014). Outras cargas, tais como fornos a arco e máquinas de solda, também podem causar este tipo de distúrbio na tensão, em maior ou menor escala.

Os métodos mais comuns de estimação de inter-harmônicos são baseados na Transformada Discreta

de Fourier (DFT). Entretanto, como as frequências dos inter-harmônicos são em sua maioria desconhecidas e dependentes do ciclo de funcionamento da carga, a utilização de técnicas no domínio da frequência pode gerar imprecisões (Lin, 2015).

3 Filtro Adaptativo Sintonizado baseado na Estimação de Frequência

A estrutura do Filtro Adaptativo Sintonizado (FAS) capaz de estimar a frequência de um sinal periódico foi proposta por Mojiri and Bakhshai, (2004). Esta estrutura consiste em uma cascata de filtros sintonizados, e um estimador de frequência para a frequência fundamental, conforme apresenta a Figura 1.

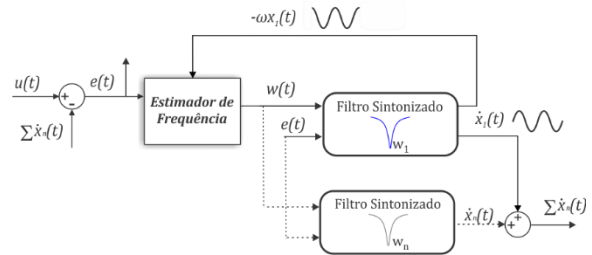


Figura 1. Estrutura do Filtro Adaptativo Sintonizado

Nesta estrutura é possível extrair mais de uma frequência presente no sinal a partir da utilização de sub-filtros. Cada sub-filtro é responsável pela extração de uma frequência múltipla da frequência fundamental (Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai, 2007). As equações diferenciais do estimador e do filtro para a frequência fundamental são dadas por:

$$\dot{w}_1(t) = -\gamma w_1(t) x_1(t) e_1(t) \quad (3)$$

$$\dot{x}_1(t) = 2\zeta w_1(t) e_1(t) - w^2(t) x_1(t) \quad (4)$$

$$e_1(t) = u(t) - \hat{x}_1(t) \quad (5)$$

onde $w_1(t)$ representa a frequência fundamental, $e_1(t)$ é o erro, $u(t)$ é o sinal utilizado como entrada do filtro adaptativo sintonizado. Ao convergir, $\hat{x}_1(t)$ será a variável de estado que irá representar o sinal fundamental após a extração das componentes indesejadas. Este filtro possui apenas dois parâmetros de ajuste, o fator de amortecimento (ζ), que determina a banda de passagem do filtro sintonizado, e o ganho adaptativo (γ), que determina a convergência do algoritmo de estimação (Ferreira et al., 2013).

Devido a capacidade do algoritmo em estimar diferentes frequências, este método fornece flexibilidade para a utilização em diversos projetos. Além disso, esta técnica apresenta bons resultados quando o sinal possui variação de frequência e amplitude (Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai, 2007).

4 Método Proposto

O algoritmo proposto tem como objetivo estimar a frequência e a amplitude da flutuação de tensão, e consequentemente dos inter-harmônicos. Para tanto, foi simulado no Matlab/Simulink um sinal de tensão com flutuação. Os sinais foram amostrados com uma frequência de $f_s = 40080 \text{ Hz}$, e os filtros sintonizados foram discretizados utilizando o método de Euler, como descrito e justificado por Ferreira et al., (2013).

A metodologia de estimação dos inter-harmônicos pode ser dividida nas seguintes etapas:

- **Etapa 1:** Estimação da frequência fundamental e da envoltória da flutuação de tensão;
- **Etapa 2:** Demodulação e estimação da frequência da flutuação e dos inter-harmônicos;
- **Etapa 3:** Estimação da amplitude da flutuação e dos inter-harmônicos.

4.1 Etapa 1: Estimação da frequência fundamental e da envoltória da flutuação de tensão

A estimação da frequência fundamental consiste em uma etapa importante deste algoritmo, uma vez que esta frequência pode apresentar oscilações em torno de 60 Hz, principalmente no caso de microrredes e fontes renováveis de energia. De acordo com a norma ANBT NBR 16149, por exemplo, os inversores de interface de sistemas fotovoltaicos devem ser capazes de operar em até 62Hz entregando 40% de potência nominal (ABNT, 2013).

Dessa forma, para a estimação da frequência fundamental foi implementado um filtro adaptativo sintonizado (FAS) com os seguintes parâmetros: $\gamma = 0,8$ e $\zeta = 0,707$. Estes parâmetros influenciam diretamente na dinâmica e precisão do filtro. Sendo assim, estes foram definidos minuciosamente a fim de proporcionar um melhor desempenho para o filtro em questão, de acordo com a metodologia apresentada por Mojiri, M., Karimi-Ghartemani, M. and Bakhshai, A. (2010). A Figura 2 apresenta o diagrama desta etapa.

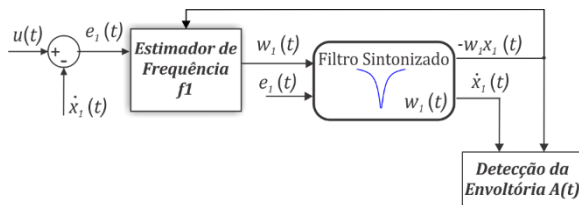


Figura 2. FAS para a estimação da frequência fundamental

O sinal utilizado como entrada neste filtro consiste em um sinal de tensão com flutuação, conforme:

$$u(t) = 127\sqrt{2} \text{sen}(w_1 t) \cdot (1 + 0,2 \cdot \text{sen}(w_m t)) \quad (6)$$

onde w_1 representa a frequência fundamental e w_m representa a frequência da flutuação de tensão.

Além da frequência estimada f_1 , após a utilização deste filtro foi possível extrair o sinal fundamental do

sinal de entrada. Portanto, o sinal de erro, $e_1(t)$, contém de forma majoritária os componentes dos inter-harmônicos. Por meio deste filtro também é possível obter a amplitude do sinal de entrada, $A(t)$, a qual corresponde a envoltória da flutuação de tensão. A amplitude foi obtida por meio da seguinte equação:

$$A(t) = \sqrt{\dot{x}_1(t)^2 + (w_1(t) x_1(t))^2} \quad (7)$$

4.2 Etapa 2: Demodulação e estimação da frequência da flutuação e dos inter-harmônicos

Para a estimação da frequência da flutuação de tensão e, consequentemente, dos inter-harmônicos, foi necessário a realização do processo de demodulação. Em seguida, este sinal foi utilizado como entrada em um segundo FAS. A metodologia utilizada nesta etapa está representada na Figura 3.

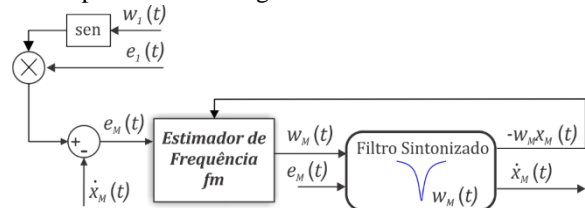


Figura 3. Estimação da frequência da flutuação e dos inter-harmônicos

Para a realização do processo de demodulação, o sinal do erro $e_1(t)$ foi multiplicado por um seno de amplitude unitária e com frequência igual a fundamental $w_1(t)$. Este procedimento foi necessário para que o sinal apresentado em (2) pudesse ser revertido em (1), de forma a obter o valor de $w_m(t)$.

O filtro adaptativo sintonizado implementado nesta etapa possui os seguintes parâmetros: $\gamma = 80$ e $\zeta = 0,8$. Dessa forma, após a estimação da frequência da flutuação, w_m , é possível obter a frequência dos inter-harmônicos presentes no sinal de entrada $u(t)$. Isto ocorre devido ao fato que, conforme mostra (2) as frequências dos inter-harmônicos causados por flutuação de tensão são obtidas a partir de $w_1 \mp w_m$.

4.3 Etapa 3: Estimação da Amplitude da flutuação e dos inter-harmônicos

Por fim, após estimados os valores das frequências da flutuação e dos inter-harmônicos, foi realizado a estimação da amplitude desses componentes. Para a realização deste procedimento foi necessário a utilização de um filtro de médias móveis adaptativo e um novo FAS. A Figura 4 apresenta o esquema implementado nesta etapa.

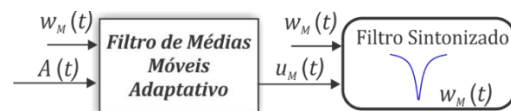


Figura 4. Estimação da amplitude da flutuação e dos inter-harmônicos

O filtro de médias móveis adaptativo foi utilizado a fim de retirar o nível CC contido no sinal da envoltória $A(t)$. Isto se dá devido ao fato que este sinal possui um nível CC elevado e de amplitude muito maior que a flutuação. Assim, esta componente levaria o FAS a convergir para uma frequência de 0 Hz. Além disso, a adoção deste filtro em versão adaptativa se baseou no fato de que, como os sinais avaliados possuem frequências variantes no tempo, o filtro de média móvel também precisa se adaptar a essas variações.

As equações do filtro média móvel adaptativo implementado são apresentadas abaixo:

$$u_m(t) = \sum_{k=0}^{k=n} A(t)/k \quad (8)$$

onde $u_m(t)$ representa o sinal da flutuação de tensão, $A(t)$ é a envoltória e n representa o número de amostras contidos em cada ciclo deste sinal. Dessa forma, como a frequência do sinal $u_m(t)$ pode apresentar variações, o valor de n também pode variar. Assim, o número de amostras n , o qual consiste em um número inteiro, é obtido a partir da relação entre a frequência de amostragem e a frequência estimada da flutuação a partir de:

$$n = \frac{f_s}{f_m} \quad (9)$$

Assim, após a extração do nível CC presente no sinal da envoltória $A(t)$, tem-se o sinal da flutuação de tensão $u_m(t)$. Este sinal, juntamente com sua frequência w_m , previamente determinada na etapa 2, foi inserido em um novo FAS a fim de estimar o valor da sua amplitude $U_m(t)$.

5 Resultados

A fim de comprovar a eficácia do método proposto para a estimação da frequência e amplitude dos inter-harmônicos causados por flutuação de tensão, três diferentes condições foram simuladas no ambiente Matlab/Simulink:

- **Caso 1:** Frequência fundamental em 60 Hz com flutuação de tensão em 5 Hz;
- **Caso 2:** Variação na frequência fundamental, de 60 Hz para 62 Hz, mantendo a flutuação em 5 Hz;
- **Caso 3:** Frequência fundamental constante em 60 Hz com variação na frequência da flutuação, de 5 Hz para 7 Hz.

Nos casos 2 e 3 a variação de frequência foi simulada no instante de 1 segundo. O tempo de resposta do algoritmo e sua eficácia na estimação dos parâmetros, frequência e amplitude, foram analisados para cada condição.

Caso 1: Frequência fundamental em 60 Hz e flutuação de 5 Hz

O primeiro caso a ser analisado consiste na condição de frequência nominal da rede, com a presença de uma flutuação de tensão constante em 5 Hz. Esta condição de operação visa validar a capacidade do algoritmo em estimar adequadamente as variáveis propostas: frequência e amplitude da flutuação e dos inter-harmônicos.

A Figura 5 apresenta o sinal de tensão avaliado $u(t)$. Este sinal foi utilizado como entrada do algoritmo FAS para realizar a estimação da frequência fundamental e, além disso, separar o sinal fundamental dos inter-harmônicos presentes.

De acordo com (2), é possível observar que o sinal $u(t)$ apresenta dois inter-harmônicos, 55 Hz e 65 Hz, conforme apresenta o espectro em frequência, mostrado na Figura 6.

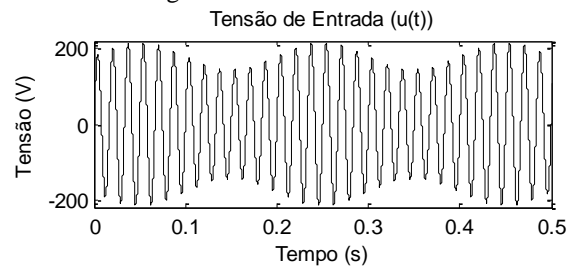


Figura 5. Sinal de entrada com flutuação de tensão de 5 Hz.

Para obtenção deste espectro, a FFT foi implementada com uma resolução de 5 Hz, conforme define a norma IEC 61000-4-7 (Eidson and Halpin, 2016). É possível observar que a amplitude dos inter-harmônicos representa cerca de 10% da amplitude da frequência fundamental. Isso ocorre já que foi inserido, no sinal de entrada, uma flutuação de tensão com amplitude de 20% (U_m) da amplitude da fundamental (U_1). No entanto, conforme verificado em (2), a amplitude de cada inter-harmônico corresponde a $\frac{U_m}{2}$.

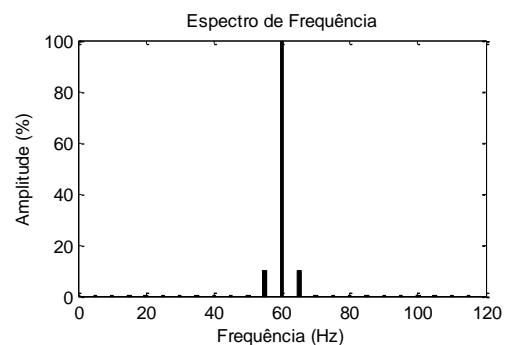


Figura 6. Espectro de frequência do sinal de entrada.

Inicialmente, foi aplicado um FAS para a estimação da frequência fundamental, f_1 . Esta etapa é muito importante, visto que no caso das microrredes esta frequência pode apresentar variações, não sendo necessariamente fixa em 60 Hz. Além da frequência fundamental, apresentada mais a frente na Figura 9, obteve-se também a envoltória do sinal de entrada, de acordo a equação (7). O sinal de entrada $u(t)$ e sua envoltória $A(t)$ são ilustrados na Figura 7.

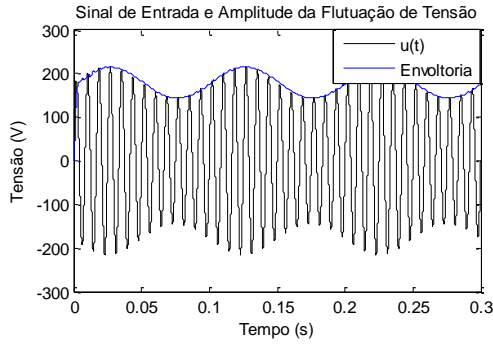


Figura 7. Sinal de entrada e sua Envoltória

Em seguida, o sinal de erro do primeiro FAS, $e_1(t)$, foi demodulado e empregado para estimar a frequência da flutuação. Para tanto, utilizou-se um novo FAS. O resultado é apresentado na Figura 8. O algoritmo realizou esta estimação satisfatoriamente, sendo que o tempo gasto foi menor que 0,2 segundos.

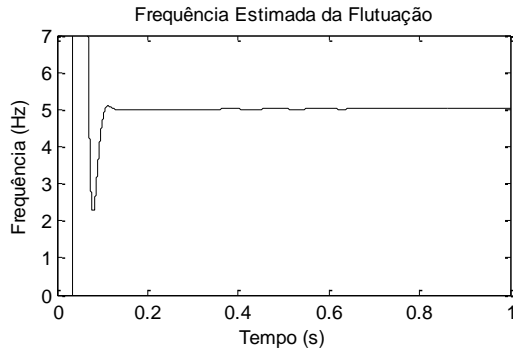


Figura 8. Frequência da flutuação de tensão.

Assim, conhecendo o valor da frequência da flutuação, f_m , e da frequência fundamental, f_1 , foi possível obter as frequências dos inter-harmônicos, f_{inter1} e f_{inter2} . De acordo com (2), estas frequências são definidas como $f_1 - f_m$ e $f_1 + f_m$. O resultado da estimação destas frequências é apresentado na Figura 9.

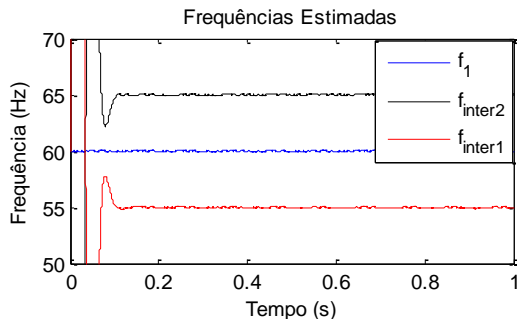


Figura 9. Frequência da fundamental e dos inter-harmônicos

Posteriormente, a fim de determinar a amplitude dos inter-harmônicos, foi implementado um filtro adaptativo sintonizado na frequência da flutuação. Para isto, utilizou-se a envoltória do sinal de entrada $u(t)$ e o filtro de médias móveis adaptativo. A flutuação de tensão no domínio do tempo, $u_m(t)$, e sua amplitude, U_m , são mostradas na Figura 10.

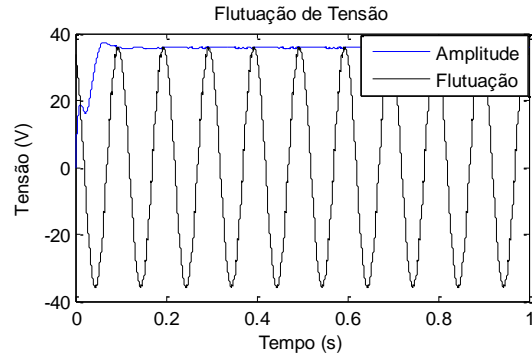


Figura 10. Amplitude e flutuação de tensão

A Tabela 1 apresenta os valores de amplitude da tensão fundamental, da flutuação de tensão e dos inter-harmônicos. Esses valores foram obtidos utilizando o algoritmo proposto e a FFT.

Tabela 1. Determinação da amplitude através da FFT e do FAS

	U_1 (V)	U_m (V)	U_{inter1} (V)	U_{inter2} (V)
Real	179,61	35,92	17,96	17,96
FFT	179,61	-	17,96	17,96
FAS	179,6	35,8	17,9	17,9

Pode-se observar que a FFT não apresentou erros em relação aos valores reais de amplitude. Já o método FAS apresentou poucas variações, sendo que o maior erro obtido ocorreu na estimação da amplitude dos inter-harmônicos, cerca de 0,33%.

Já Tabela 2 apresenta os valores da frequência fundamental e dos inter-harmônicos, de ambos os métodos, FFT e FAS.

Tabela 2. Comparação da estimação da frequência utilizados os métodos FFT e FAS

	f_1 (Hz)	f_{inter1} (Hz)	f_{inter2} (Hz)
Real	60	55	65
FFT	60	55	65
FAS	$60 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$	$65 \pm 0,1$

Pode-se observar que a FFT consegue detectar de forma adequada as frequências fundamental e dos inter-harmônicos. Isso ocorre já que ambas são múltiplas inteiras de 5 Hz (resolução da FFT). Já o método FAS apresentou um erro em torno de 0,2% em cada estimação realizada. Como se trata de um método no domínio do tempo é possível verificar que a frequência oscila ligeiramente em torno de 0,1 Hz.

Caso 2: Variação na frequência fundamental, de 60 para 62 Hz, e frequência da flutuação em 5 Hz

Posteriormente, o desempenho do algoritmo foi validado perante uma variação na frequência fundamental. Dessa forma, foi aplicada uma variação de 60 para 62 Hz, no instante de 1 segundo. A finalidade foi analisar o tempo de convergência do algoritmo após esta variação. Neste caso, a frequência da flutuação permaneceu fixa em 5 Hz.

O espectro de frequência do sinal de entrada, $u(t)$, está apresentado na Figura 11. Nota-se que não

é possível identificar os inter-harmônicos de forma individual e sim através de um grupo de frequências, conforme definido na IEC 61000-4-7. Entretanto, esta norma não leva em consideração desvios na frequência fundamental, que neste caso está influenciando diretamente no grupo de inter-harmônicos.

A Figura 12 apresenta a estimação da frequência da flutuação utilizando o FAS. Nota-se que a variação na frequência fundamental não provocou alteração na estimação da frequência da flutuação, conforme é possível analisar após instante o de 1 segundo.

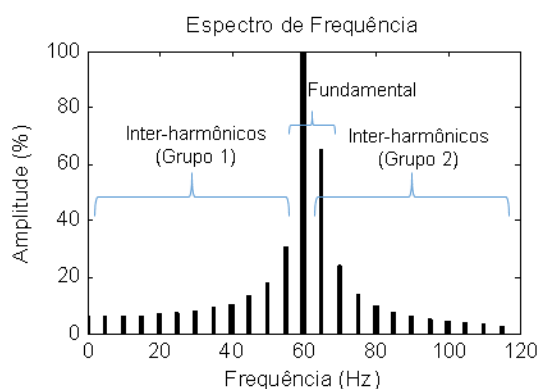


Figura 11. Espectro de frequência do sinal de entrada com variação da frequência fundamental

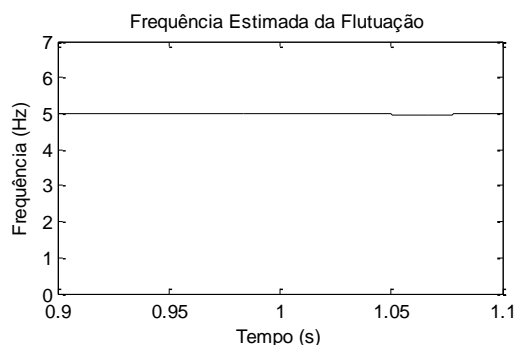


Figura 12. Frequência da flutuação de tensão com variação na frequência fundamental

O tempo de resposta para a estimação da frequência fundamental, bem como dos inter-harmônicos foi considerado satisfatório, cerca de 0,02 segundos, conforme apresenta a Figura 13.

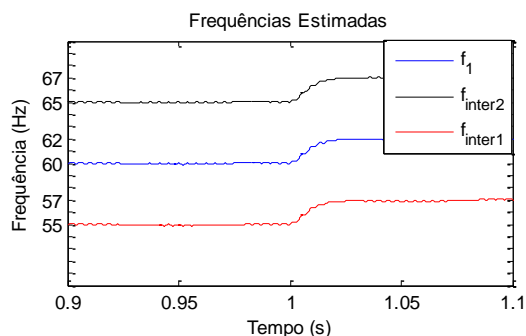


Figura 13. Frequência fundamental e dos inter-harmônicos, com variação na frequência fundamental

Como a amplitude da flutuação também permaneceu constante não houve variação na amplitude dos inter-harmônicos e os resultados permaneceram iguais aos apresentados na Figura 10.

A Tabela 3 apresenta a comparação entre os valores obtidos pela FFT e pelo método proposto. Estes valores são obtidos após a ocorrência da variação da frequência, a fim de verificar o comportamento de cada método mediante a este tipo de distúrbio.

Tabela 3. Comparação da estimação da amplitude utilizados os métodos FFT e FAS com variação na frequência fundamental

	U_1 (V)	U_m (V)	U_{inter1} (V)	U_{inter2} (V)
Real	179,61	35,92	17,96	17,96
FFT	138,27 (60 Hz)	-	42,74 (55 Hz)	90,18 (65 Hz)
FAS	179,6	35,8	17,9	17,9

Nota-se que a FFT apresentou limitações ao estimar a amplitude da fundamental e dos inter-harmônicos. Devido a resolução de 5Hz, a presença de frequências não múltiplas (57, 62 e 67 Hz) resultam no fenômeno conhecido como espriamento (“leakage”). O desvio na frequência fundamental influenciou diretamente na amplitude dos inter-harmônicos (Grupo 1 e 2), o que pode comprometer o cálculo da flutuação de tensão de acordo com a IEC 61000-4-7. O FAS por sua vez, estima a amplitude desses sinais no domínio do tempo, apresentando um erro máximo de 0,33% na estimação dos inter-harmônicos.

Em termos de frequência, os resultados da estimação feita pelo FAS e pela FFT são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Comparação da estimação da frequência utilizados os métodos FFT e FAS com variação na frequência fundamental

	f_1 (Hz)	f_{inter1} (Hz)	f_{inter2} (Hz)
Real	62	57	67
FFT	60~65	Grupo1	Grupo2
FAS	62±0,1	57±0,1	67±0,1

Pelos resultados apresentados pela FFT é difícil afirmar que a frequência fundamental varia de 60 para 62Hz. Além disso, os inter-harmônicos resultantes da flutuação passam a ser quantificados pelas componentes de frequência presentes no Grupo 1 e Grupo 2, como apresentado na Figura 11. Já o FAS apresenta resultados análogos aos anteriores, sendo capaz de identificar e estimar com acurácia as frequências presentes no sinal (oscilação de 0,1 Hz).

Caso 3: Frequência fundamental constante com variação na frequência da flutuação, 5 Hz para 7 Hz

Por fim, foi analisado o comportamento do algoritmo mediante variação na frequência da flutuação. Assim, a frequência fundamental foi mantida constante, e a frequência da flutuação modificada de 5 Hz para 7 Hz, no instante de 1 segundo.

O espectro de frequência do sinal $u(t)$ está apresentado na Figura 14. Assim como no caso anterior, a

FFT provocou variações nas amplitudes dos inter-harmônicos.

A Figura 15 apresenta a resposta do algoritmo na estimação da frequência da flutuação. Observa-se que o desempenho do algoritmo foi satisfatório, visto que este realizou a estimação de forma correta e em um tempo menor que 0,2 segundos.

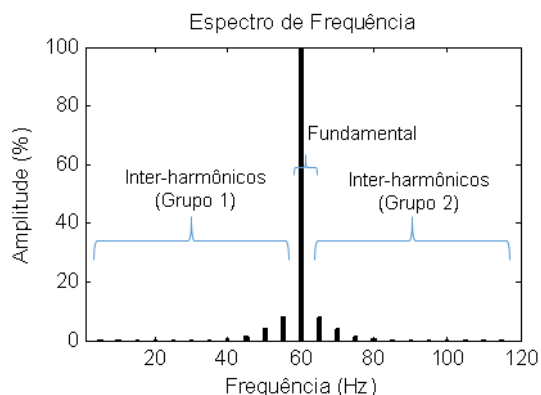


Figura 14. Espectro de frequência do sinal de entrada com variação da frequência da flutuação

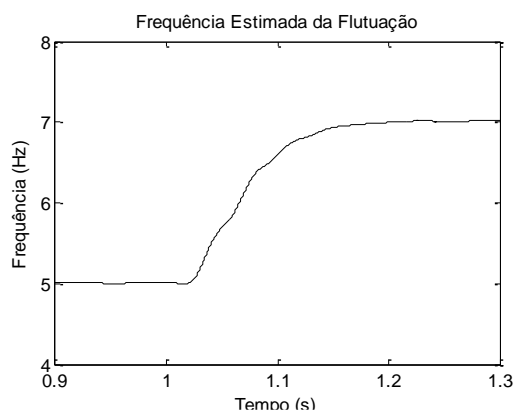


Figura 15. Variação na frequência da flutuação de tensão

Assim, como a frequência da flutuação sofreu uma variação em seu valor, as frequências dos inter-harmônicos também acompanham esta variação, conforme apresentado na Figura 16. Assim como w_m foi de 5 Hz para 7 Hz, as frequências dos inter-harmônicos são definidas como 55 Hz e 65 Hz, antes do instante de 1 segundo e, 53 Hz e 67 Hz, após o instante de 1 segundo. Já a frequência fundamental foi mantida constante em 60 Hz.

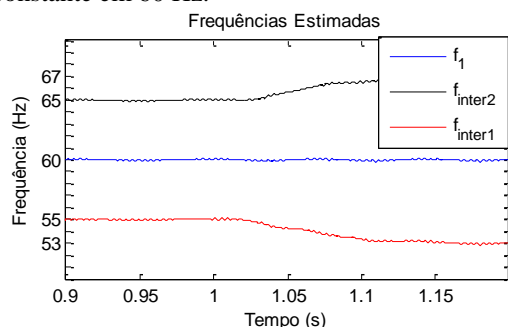


Figura 16. Frequência fundamental e dos inter-harmônicos, com variação na frequência da flutuação

A estimação da amplitude dos inter-harmônicos também não sofreu variação significativa em seu valor, conforme apresentado na Figura 17. No entanto, é possível observar que, como a frequência da flutuação foi modificada, a forma de onda da flutuação sofreu alterações em seu período, após o instante de 1 segundo.

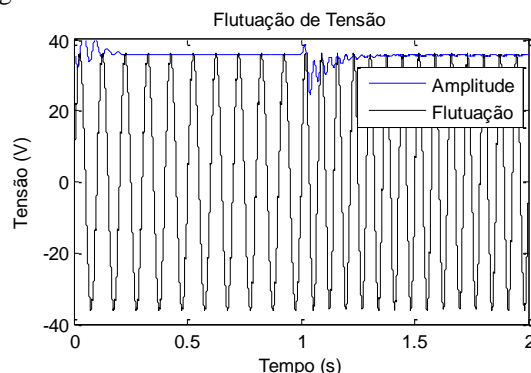


Figura 17 – Amplitude e Flutuação de tensão com variação na frequência da flutuação

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos pela FFT e pelo método proposto (FAS) para a condição de variação na frequência da flutuação. Pode-se observar que o fenômeno do espriamento das frequências da flutuação resulta em erros na determinação da amplitude da frequência fundamental e também na amplitude real dos inter-harmônicos. Os resultados apresentados pelo FAS, por sua vez, apresentam erros de pequena proporção, sendo que o maior erro apresentado na estimação da amplitude foi de 0,33%, amplitude dos inter-harmônicos.

Tabela 5. Comparação da estimação da amplitude utilizados os métodos FFT e FAS

	U_1 (V)	U_m (V)	U_{inter1} (V)	U_{inter2} (V)
Real	179,61	35,92	17,96	17,96
FFT	187,05 (60 Hz)	-	15,52 (55 Hz)	15,55 (65 Hz)
FAS	179,6	35,8	17,9	17,9

A Tabela 6 apresenta os valores de frequência de ambos os métodos, FFT e FAS. De forma semelhante à anterior, os inter-harmônicos passam a ser identificados em dois grupos de frequência como apresentado na Figura 14. Como a frequência fundamental permanece em 60 Hz, esta foi estimada corretamente, entretanto não é possível determinar de forma exata as frequências em que ocorre a flutuação. Em contrapartida, o algoritmo proposto foi capaz de detectar, em aproximadamente 0,1 segundos, a frequência dos inter-harmônicos, apesar das pequenas oscilações ($\pm 0,1$ Hz).

Tabela 6. Comparação da estimação da frequência utilizados os métodos FFT e FAS

	f_1 (Hz)	f_{inter1} (Hz)	f_{inter2} (Hz)
Real	60	53	67
FFT	60	Grupo1	Grupo2
FAS	$60 \pm 0,1$	$53 \pm 0,1$	$67 \pm 0,1$

Considerações sobre o desempenho do método proposto

A partir dos resultados obtidos é importante ressaltar algumas limitações do algoritmo proposto. Por se tratar de uma técnica no domínio do tempo, o FAS se mostrou muito eficiente na estimação das frequências presentes na flutuação de tensão. Entretanto, estes resultados foram avaliados para uma flutuação de tensão periódica. O comportamento do algoritmo ainda não foi validado para condições de flutuação aleatórias, ou com variações muito rápidas na frequência da oscilação, menores que 0,1 segundos. Nestes casos específicos, a sua resposta dinâmica precisaria ser melhorada para acompanhar no tempo estas variações.

Além disso, o algoritmo tem o objetivo de contribuir como um novo método para quantificar a flutuação de tensão, a partir da estimação da frequência e da amplitude da mesma. Portanto, as oscilações de 0,1 Hz na estimação da frequência são aceitáveis. Caso este algoritmo fosse aplicado para outras condições, como o sincronismo com a rede elétrica, ou até mesmo para avaliar condições de estabilidade do sistema elétrico, essas variações não seriam aceitáveis. Portanto, os ganhos dos estimadores de frequência deveriam ser ajustados para melhorar a sua resposta em regime permanente. Em contrapartida, a resposta dinâmica do algoritmo ficaria mais lenta.

6 Conclusão

A estimação da frequência e da amplitude dos inter-harmônicos presentes na flutuação de tensão utilizando filtros adaptativos sintonizados foi apresentada neste artigo. A extração dos inter-harmônicos utilizando filtros sintonizados não é trivial, pois para frequências de flutuação pequenas, o par de inter-harmônicos resultante estará muito próximo da frequência principal, dificultando uma estimação adequada.

Entretanto, o método proposto mescla os conceitos de demodulação e detecção de inter-harmônicos, visando superar essas limitações. Os resultados mostram que o algoritmo foi capaz de estimar de forma satisfatória a amplitude e a frequência dos inter-harmônicos. Além disso, o método proposto se mostrou muito eficiente mesmo na presença de variações na frequência fundamental e na frequência dos inter-harmônicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPEMIG pelos recursos concedidos e à CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

Referências Bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). NBR 16149: Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 2013.
- Chen, C. and Chen, Y. (2014). Comparative Study of Harmonic and Interharmonic Estimation Methods for Stationary and Time-Varying Signals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp.397-404.
- Eidson, B. and Halpin, M. (2016). An Evaluation of the Extent of Correlation Between Interharmonic and Voltage Fluctuation Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, No. 2, pp.753-760.
- Ferreira, S., Gonzatti, R., Silva, C., Silva, L., Lambert-Torres, G. and Silva, L. (2013). Adaptive Notch filter applied to hybrid active var compensator under nonsinusoidal and unbalanced conditions. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2264-2269.
- Hashempour, M. and Lee, T. (2017). Integrated power factor correction and voltage fluctuation mitigation of microgrid using STATCOM. *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, pp.1215-1219.
- Lin, H. (2015). Development of leakage energy allocation approach for time-varying interharmonics tracking. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 9, pp. 798-804.
- Lin, H. (2014). Sources, Effects, and Modelling of Interharmonics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, pp.1-10.
- Mojiri, M. and Bakhshai, A. (2004). An Adaptive Notch Filter for Frequency Estimation of a Periodic Signal. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49, No. 2, pp.314-318.
- Mojiri, M., Karimi-Ghartemani, M. and Bakhshai, A. (2007). Time-Domain Signal Analysis Using Adaptive Notch Filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 55, No. 1, pp.85-93.
- Mojiri, M., Karimi-Ghartemani, M. and Bakhshai, A. (2010). Processing of Harmonics and Interharmonics Using an Adaptive Notch Filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 2, pp.534-542.
- Olivares, D., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A., Canizares, C., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jimenez-Estevez, G. and Hatziaargyriou, N. (2014). Trends in Microgrid Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp.1905-1919.
- Palma-Behnke, R., Reyes, L. and Jimenez-Estevez, G. (2012). Smart grid solutions for rural areas. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6.
- Solanki, B., Raghurajan, A., Bhattacharya, K. and Canizares, C. (2017). Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids. *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*.