

Estimação da Frequência Fundamental de Sinais de Tensão Corrompidos por Distúrbios de Qualidade de Energia

João Vitor Dutra Fonseca¹, Mariana Geny Moreira², Adriano Silva Vale Cardoso³

Universidade Federal de São João del Rei

¹joaovitor Dutra_f_8@hotmail.com, ²marianageny@ufsj.edu.br, ³adrianosvc@gmail.com

Resumo—Um grande esforço vem sendo feito para melhorar a qualidade da energia elétrica nos últimos anos. Cada vez mais os estudos se direcionam para técnicas e métodos para aprimorar sistemas de monitoramento. Um dos principais se dá na estimação da frequência fundamental, especialmente na presença de harmônicos. Este artigo foca-se na precisa estimação da frequência em sinais elétricos corrompidos por ruído branco, harmônicos, SAG's e SWELL's por meio do método dos mínimos quadrados (LMS – *Least Mean Square*). Os efeitos dos harmônicos e interharmônicos, SAG's e SWELL's são estudados num extenso conjunto de resultados obtidos através de simulações. Os resultados demonstram a viabilidade do uso do método LMS para a estimação da frequência fundamental em sinais corrompidos.

Palavras Chave—LMS, processamento digital de sinais, qualidade de energia, estimação de frequência.

I. INTRODUÇÃO

A grande utilização de eletrônicos de potência em sistemas distribuídos de geração tem permitido um controle flexível da energia, mas também vem corrompendo o sinal de tensão de frequência nominal de 60-/50-Hz, com outras componentes, tais como os harmônicos e interharmônicos.

A frequência da rede elétrica é um parâmetro essencial, portanto é constantemente monitorado e controlado [1], [2]. Este requisito é necessário no contexto do desenvolvimento de tecnologias modernas, como as microrredes, a fim de manter a potência ativa equilibrada [3], [4]. Desta forma, para proteção contra perda de sincronismo, retransmissão de baixa frequência, monitoramento da qualidade da energia, e estabilização do sistema elétrico, a estimação da frequência fundamental é obrigatória [5], [6]. Deste modo, rapidez e precisão na estimação da frequência na presença de distúrbios são requisitos essenciais para o controle e proteção de sistemas de geração distribuída [7], [8].

Diversas são as técnicas de estimação de frequência encontradas na literatura. A análise por meio da transformada de Fourier (DFT) é amplamente utilizada por se tratar de um método clássico [9]. Técnicas baseadas no filtro de Kalman (KF) são complexas e computacionalmente exigentes para implementações em tempo real [10]. Um método simples como o de detecção de passagem por zero, apresenta uma incorreta estimação na presença de ruído [11]. Outros métodos incluem métodos *phase-locked loop* (PLL), método do fil-

tro notch adaptativo, métodos de Taylor, Prony, Newton, demodulação, entre outros [2], [6], [8], [12], [13].

O método dos mínimos quadrados também já foi citado e apresentou resultados razoáveis na estimação da frequência fundamental [7], [14]–[16]. Porém, como foi reconhecido e apontado em vários artigos, condições rigorosas são requeridas para garantir a convergência do método em casos onde o sinal está contaminado com componentes não fundamentais de frequência. Isto leva à ausência de um estimador de frequência baseado no algoritmo LMS para sinais corrompidos. Desta forma, este artigo reporta a viabilidade e performance da estimação da frequência fundamental de redes contaminadas utilizando-se da técnica dos mínimos quadrados.

II. ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA BASEADO NO LMS

Como apresentado em [15], método dos mínimos quadrados funciona de acordo com o diagrama da Fig. 1, onde $X_k =$

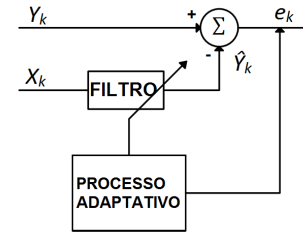


Fig. 1. Diagrama estrutural do filtro [15].

$[X_{0k} \ X_{1k} \ \dots \ X_{N-1k}]^T$ é o vetor de entrada ao K – ésimo instante de tempo, Y_k representa o sinal desejado, $\hat{Y}_k$ é o sinal estimado. O sinal pode ser estimado corretamente pelo filtro com um valor adequado do coeficiente W_k , que é obtido minimizando o quadrado do erro e_k . Deste modo, o sistema aprende a partir do seu ambiente, caracterizando-se como um filtro adaptativo, onde os coeficientes são ajustados de forma recursiva em relação a seus valores ótimos [15].

A cada iteração, o vetor peso é calculado segundo a fórmula

$$W_{k+1} = W_k + \mu(-\nabla_k) \quad (1)$$

onde μ é o parâmetro de adaptação, $W_k = [w_{0k} \ w_{1k} \ \dots \ w_{N-1k}]^T$ são os coeficientes do filtro, e

∇_k é o gradiente da performance do erro a respeito dos coeficientes do filtro W_k que pode ser encontrado segundo

$$\hat{\nabla}_k = -2e_k X_k \quad (2)$$

A recursão (1) é o que chamamos de algoritmo LMS e é inicializado igualando todos os coeficientes em zero. Então o algoritmo prossegue calculando primeiramente o erro e_k que será utilizado para calcular e atualizar os coeficientes. O processo se repete até atingir a estabilidade, que é controlada pela adaptação do parâmetro μ que deve satisfazer a condição (3),

$$0 < \mu < \frac{2}{\text{potência total de entrada}} \quad (3)$$

onde a potência de entrada se refere à soma do valor quadrático médio da entrada. Quando μ é pequeno, o algoritmo LMS demora mais para processar o erro mínimo do valor quadrático médio da entrada e vice e versa. Deste modo, prefere-se um μ variando a cada iteração para uma melhor convergência [15].

Para a estimação da frequência fundamental por este método foi utilizado um modelo trifásico da rede elétrica que pode ser descrito por:

$$\begin{aligned} V_{ak} &= V_m \cos(\omega k \Delta T + \phi) + \epsilon_{ak} \\ V_{bk} &= V_m \cos(\omega k \Delta T + \phi - \frac{2\pi}{3}) + \epsilon_{bk} \\ V_{ck} &= V_m \cos(\omega k \Delta T + \phi + \frac{2\pi}{3}) + \epsilon_{ck} \end{aligned} \quad (4)$$

onde V_m é a amplitude da componente fundamental, ω é a frequência angular do sistema e pode ser representado por $\omega = 2\pi f$ onde f é a frequência fundamental do sinal de tensão, k é o instante de amostragem, ΔT é o período de amostragem, e ϵ_k é a componente do ruído.

O método proposto se baseia na forma complexa do método LMS [15], portanto o sinal trifásico amostrado é submetido à transformada $\alpha\beta$ descrita abaixo

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha k} \\ V_{\beta k} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ak} & V_{bk} & V_{ck} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

O sinal complexo (V_k), que será aplicado ao método, ficará na forma

$$V_k = V_{\alpha k} + jV_{\beta k} \quad (6)$$

O algoritmo em sua forma complexa atualiza o valor estimado da tensão de acordo com o erro do valor estimado anteriormente, como representado no diagrama da figura 1. O erro (e_k) é encontrando como

$$e_k = V_k - \hat{V}_k \quad (7)$$

onde V_k é o vetor contendo os valores desejados e $\hat{V}_k$ é o vetor estimado. O sinal estimado é obtido por

$$\hat{V}_k = W_{k-1} V_{k-1} \quad (8)$$

onde W_k é inicializado como $W_k = e^{j\hat{\omega}_{k-1}\Delta T}$, $\hat{\omega}$ é a frequência angular e é definida como $\hat{\omega} = 2\pi f_1$, onde f_1 é escolhido arbitrariamente.

O vetor de pesos W é corrigido seguindo a fórmula

$$W_k = W_{k-1} + \mu_k e_k \hat{V}_k^* \quad (9)$$

onde $*$ representa o complexo conjugado do valor e μ é o fator de controle de convergência. O parâmetro μ , segundo [17] deve variar no tempo para uma melhor convergência. Para o caso complexo, [15] apresenta um meio de calcular μ como

$$\mu_{k+1} = \lambda \mu_k + \gamma p_k \hat{p}_k^* \quad (10)$$

onde p_k representa a autocorrelação entre e_k e e_{k-1} , e é calculado como

$$p_k = \rho p_{k-1} + (1 - \rho) e_k e_{k-1} \quad (11)$$

onde $0 < \rho < 1$, $0 < \lambda < 1$ e $\gamma > 0$.

A frequência fundamental do sinal pode então ser calculada segundo

$$\hat{f}_k = \frac{1}{2\pi\Delta T} \text{sen}^{-1}[\text{Im}(W_k)] \quad (12)$$

onde $\text{Im}()$ retorna a parte imaginária de um número [15].

III. RESULTADOS

O algoritmo descrito acima foi aplicado para a estimação da frequência fundamental de sistemas de energia sob várias condições que causam distúrbios na forma de onda. As simulações foram realizadas no ambiente de programação MATLAB.

A. Simulações para Casos Estacionários

Os casos 1 e 2 foram feitos para testar a precisão da estimação em sistemas sem distúrbios com frequência de 50Hz e 60Hz, respectivamente. O caso 3 tem propósito de testar o método na presença de harmônicos e interharmônicos. O caso 4 verifica o efeito do ruído. E o caso 5 testa o método na presença de harmônicos e interharmônicos com amplitude variável.

Caso 1: O modelo utilizado foi o seguinte: $x(t) = \cos(2\pi f_1 t)$, onde f_1 é a frequência fundamental, e foi definida de 42.5 a 57.5 Hz com um passo de 0.1 Hz. A frequência de amostragem utilizada foi de 3200Hz. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ foram definidos, respectivamente como 0.3, 0.0001, 0.97, 0.99, 0.1 e 0. O erro da frequência estimada esta representado na fig. 2.

Observa-se que o método estima com precisão a frequência do sinal para esta faixa de frequências. O maior erro observado foi de $5.979 \cdot 10^{-7}\%$. Para este caso, o método leva, no máximo, 5 ms para convergir para a frequência estimada.

Caso 2: O modelo utilizado para o caso 2 foi o mesmo utilizado no caso 1, porém f_1 agora foi definida de 51 a 69Hz e a frequência de amostragem foi definida como 3840 Hz. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ foram mantidos iguais aos utilizados no caso 1. O gráfico com o erro da frequência estimada esta representado na fig. 3

Assim como no caso anterior, o método estima com grande precisão a frequência fundamental do sistema. O erro percentual máximo encontrado foi de $1.189 \cdot 10^{-6}\%$. O tempo de resposta, assim como o caso 1, não ultrapassa 5 ms.

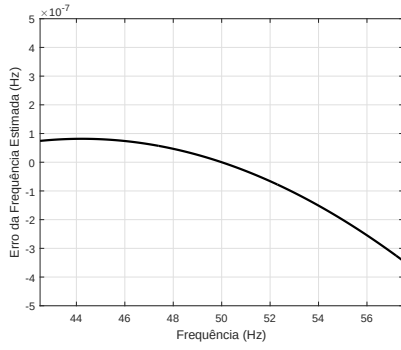


Fig. 2. Erro da frequência estimada no caso 1.

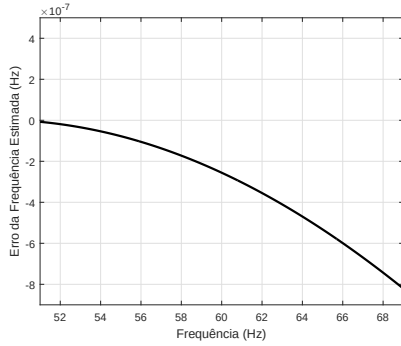


Fig. 3. Erro da frequência estimada no caso 2.

Os mesmos estudos de caso de 1 e 2 foram utilizados em [8]. Nota-se que o método proposto neste artigo comportou-se de forma linear após a convergência do método. Os estimadores presentes em [8] apresentaram oscilações na resposta final.

Caso 3: O modelo do sinal de teste foi seguinte:

$$\begin{aligned} x(t) = & \cos(\omega_1 t) + 0.1\cos(3\omega_1 t) + 0.5\cos(5\omega_1 t + \pi) \\ & + 0.1\cos(7\omega_1 t) + 0.05\cos(13\omega_1 t) \\ & + 0.05\cos(25\omega_1 t) + 0.05\cos(29\omega_1 t) \\ & + 0.01\cos(2\pi 175t) + 0.01\cos(2\pi 375t) \end{aligned}$$

onde $\omega_1 = 2\pi f_1$, e $f_1 = 60\text{Hz}$. O sinal possui 10% do 3º e 7º harmônico, 5% do 5º, 13º, 25º e 29º, e dois interharmônicos com frequências de 175 e 375 Hz. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ foram definidos, respectivamente como 0.005, 0, 0.95, 0.95, 0.001 e 0. A frequência de amostragem foi mantida em 3840 Hz. A fig. 4 nos mostra os sinais estimado e desejado.

O tempo de resposta para este caso foi de aproximadamente 40 ms. Um tempo de resposta maior que o dos casos anteriores já era esperado devido ao elevado nível de distúrbios. A partir do momento em que o algoritmo começa a convergir o erro percentual fica próximo de 0.05%

Caso 4: Para testar a eficiência do método na presença de ruído foi adicionado ruído branco gaussiano a uma relação sinal-ruído de 60 dB ao sinal do caso 3. Os coeficientes μ_{max} ,

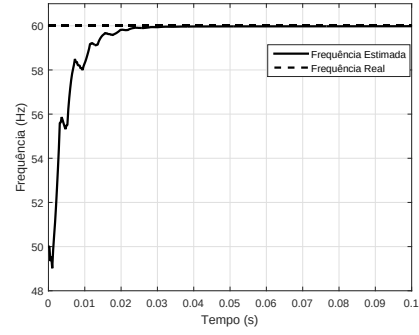


Fig. 4. Frequência estimada para o caso 3.

μ_{min} , λ , ρ , γ , $p_{inicial}$ e a frequência de amostragem foram mantidas iguais às do caso 3. A fig. 5 nos mostra os sinais desejado e estimado no caso 4.

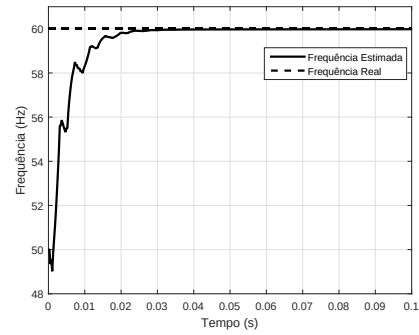


Fig. 5. Frequência estimada para o caso 4.

A resposta do algoritmo para este sinal é muito próxima da resposta para o caso anterior, concluindo-se então que o ruído branco não influencia significativamente no funcionamento do método.

Caso 5: Para testar a eficácia do método na presença de harmônicos e interharmônicos com amplitude variável, foi utilizado o seguinte sinal de teste:

$$\begin{aligned} x(t) = & \cos(\omega_1 t) + 0.1\cos(7\omega_1 t) + 0.05\cos(13\omega_1 t) \\ & + 0.05\cos(25\omega_1 t) + 0.05\cos(29\omega_1 t) \\ & + 0.1[1 + 0.1\cos(2\pi t)]\cos(3\omega_1 t) + \\ & + 0.05[1 + 0.1\cos(2\pi t)]\cos(5\omega_1 t + \pi) + \\ & + [1 + 0.1\cos(2\pi t)]0.01\cos(2\pi 175t) + \\ & + [1 + 0.1\cos(2\pi t)]0.01\cos(2\pi 375t) \end{aligned}$$

O modelo de testes do caso 5 é similar ao utilizado no caso 3, porém, no caso 5 a amplitude do terceiro e quinto harmônico e dos dois interharmônicos varia no tempo. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ utilizados foram, respectivamente, 0.0264, 0, 0.95, 0.95, 0.01 e 0. A fig. 6 mostra os sinais desejado e estimado para o caso 5.

Para o caso 5, o tempo de resposta não se diferencia muito dos casos 3 e 4, ficando entre 30 e 40 ms. O erro percentual

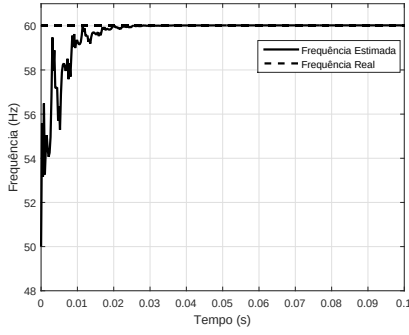


Fig. 6. Frequência estimada para o caso 5.

apresentado foi de aproximadamente 0.03%, portanto insignificante.

Os casos de 3 a 5 apresentaram um valor de erro máximo próximos aos vistos no método proposto em [8], e menores que o método baseado na DFT também apresentado em [8], porém o estimador proposto neste artigo mostrou-se mais estável, apresentando um erro linear.

B. Simulações para Variações na Frequência

Nesta seção são estudados os efeitos da variação da frequência no método. O caso 6 testa o método para uma variação linear na frequência fundamental, já o caso 7 analisa os efeitos de uma mudança repentina na frequência.

Caso 6: O sinal de teste utilizado foi o seguinte:

$$x(t) = \cos(2\pi f_1 t) + \sum_{k=5,7,11,13} 0.5 \sin(2\pi k f_1 t)$$

onde f_1 varia linearmente de 59 a 61 Hz. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ utilizados foram, respectivamente, 0.00046, 0, 0.95, 0.95, 0.000036 e 0. A frequência estimada é vista na fig. 7.

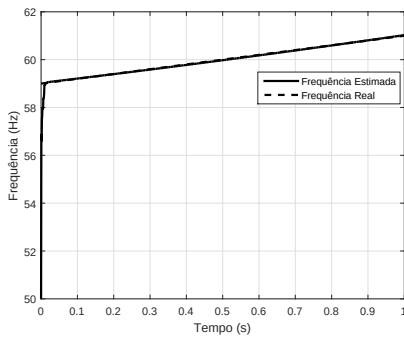


Fig. 7. Frequência estimada para o caso 6.

Neste caso o tempo de resposta observado foi inferior a 20ms, e o erro percentual ficou próximo a 0.04%, indicando uma alta precisão para o método.

Ao se comparar o presente método com os métodos analisados em [8] observa-se que, para o caso 6, o método proposto apresenta uma oscilação menor no resultado final, resultando em melhor precisão para método.

Caso 7: Para testar o método em um sinal com uma variação abrupta de frequência foi aplicado ao método um sinal senoidal $x(t) = \sin(2\pi f_1 t)$ onde f_1 se inicia em 60 Hz e sofre uma variação repentina para 58 Hz. Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ utilizados foram, respectivamente, 0.18, 0.05, 0.97, 0.99, 0.01 e 0. A frequência estimada é apresentada na fig. 8.

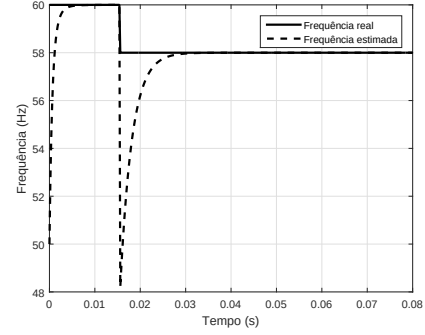


Fig. 8. Frequência estimada para o caso 7.

Neste caso observa-se um bom tempo de resposta para estimar os 60Hz (aproximadamente 6 ms). Quando ocorre a mudança de frequência, o método atualiza-se para a nova frequência (58 Hz) em menos de 20 ms. Após convergir, o erro percentual não ultrapassa 0.008%.

C. Simulações na Presença de Distúrbios de Amplitude

Nesta seção o método é submetido a sinais contaminados com distúrbios de afundamento de tensão (*Sag*) e de elevação de tensão (*Swell*), respectivamente, nos casos 8 e 9.

Caso 8: Foi aplicado ao método um sinal contaminado por *Sag* como o da fig. 9.

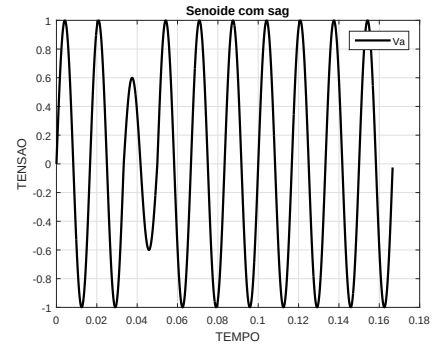


Fig. 9. Sinal contaminado por *Sag*.

Foram utilizados os coeficientes $\mu_{max} = 0.3$, $\mu_{min} = 0.09$, $\lambda = 0.97$, $\rho = 0.99$, $\gamma = 0.1$ e $p_{inicial} = 0$.

Como pode ser observado na fig. 10, o método estima a frequência, com um erro desprezível, em menos de 4 ms. Quando ocorre o distúrbio, a frequência estimada não converge. Logo após o término do distúrbio, o método volta a funcionar e estima, em menos de 10 ms, a frequência fundamental com erro desprezível.

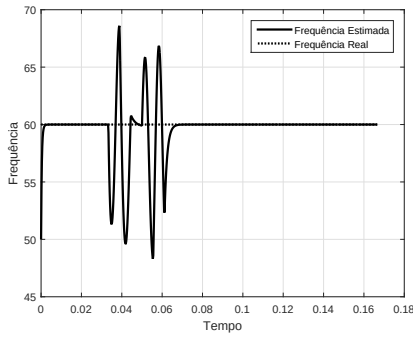


Fig. 10. Frequência estimada no caso 8.

Caso 9: Foi aplicado ao método um sinal corrompido por *Swell* como o da fig. 11.

Os coeficientes μ_{max} , μ_{min} , λ , ρ , γ e $p_{inicial}$ utilizados foram os mesmos utilizados no caso anterior.

Observa-se na fig. 12 que o resultado foi muito semelhante ao do caso 8. O método estima, com alta velocidade e precisão, a frequência fundamental a partir do momento em que o distúrbio termina.

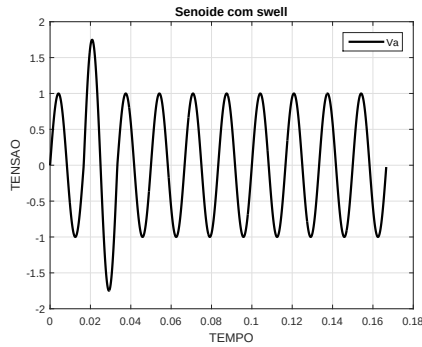


Fig. 11. Sinal contaminado por *Swell*.

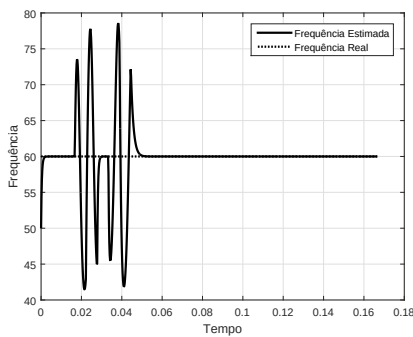


Fig. 12. Frequência estimada no caso 9.

IV. CONCLUSÃO

O método LMS, devido à sua fácil implementação, é vastamente utilizado e, neste artigo, foi apresentada uma alternativa

à estimação de frequência utilizando-se do mesmo. O método apresentou resultados excelentes na estimação de frequência em sinais puros ou pouco corrompidos. Para os casos com elevada distorção estudados neste artigo, foram necessárias alterações nos parâmetros que controlam a convergência do método, sendo necessária uma calibração para cada caso específico.

A frequência estimada nos casos mais puros apresentou um erro mínimo, irrelevante. Os casos com alto índice de contaminação com harmônicos, interharmônicos, ruído, variações na frequência, *SAG's* e *SWELL's* apresentaram um erro não maior que 0.03 Hz. Um erro baixo, porém foram necessárias alterações, como explicitado anteriormente.

Outro ponto interessante do método é o seu tempo de resposta. Em todos os casos o algoritmo levou menos de 40 ms para convergir, não ultrapassando assim 2.5 ciclos do sinal fundamental.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Reza, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "Power system frequency estimation by using a newton-type technique for smart meters," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 3, pp. 615–624, 2015.
- [2] S. Reza, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "Single-phase grid voltage frequency estimation using teager energy operator-based technique," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1218–1227, 2015.
- [3] H. E. Brown, S. Suryanarayanan, S. A. Natarajan, and S. Rajopadhye, "Improving reliability of islanded distribution systems with distributed renewable energy resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2028–2038, 2012.
- [4] S. Hakimi and S. Moghaddas-Tafreshi, "Optimal planning of a smart microgrid including demand response and intermittent renewable energy resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2889–2900, 2014.
- [5] D. G. Photovoltaics, "Ieee application guide for ieee std 1547™, ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," 2009.
- [6] P. Roncero-Sanchez, X. del Toro Garcia, A. P. Torres, and V. Feliu, "Robust frequency-estimation method for distorted and imbalanced three-phase systems using discrete filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1089–1101, 2011.
- [7] C. J. Ramos, A. P. Martins, and A. S. Carvalho, "Frequency and phase-angle estimation using ordinary least squares," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, pp. 5677–5688, 2015.
- [8] H. Xue, M. Wang, R. Yang, and Y. Zhang, "Power system frequency estimation method in the presence of harmonics," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 1, pp. 56–69, 2016.
- [9] H. Wen, S. Guo, Z. Teng, F. Li, and Y. Yang, "Frequency estimation of distorted and noisy signals in power systems by fft-based approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 765–774, 2014.
- [10] A. Routray, A. K. Pradhan, and K. P. Rao, "A novel kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 3, pp. 469–479, 2002.
- [11] V. Friedman, "A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 6, pp. 1565–1569, 1994.
- [12] R. Arablouei, K. Doğançay, and S. Werner, "Adaptive frequency estimation of three-phase power systems," *Signal Processing*, vol. 109, pp. 290–300, 2015.
- [13] E. Dos Santos, J. J. Neto, G. Marchesan, and G. Cardoso, "Power system frequency estimation using morphological prediction of clark components," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 208–217, 2015.
- [14] T. Aboulnasr and K. Mayyas, "A robust variable step-size lms-type algorithm: analysis and simulations," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 45, no. 3, pp. 631–639, 1997.

- [15] A. Pradhan, A. Routray, and A. Basak, "Power system frequency estimation using least mean square technique," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1812–1816, 2005.
- [16] L. Li, W. Xia, D. Shi, and J. Li, "Frequency estimation on power system using recursive-least-squares approach," in *Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering*, pp. 11–18, Springer, 2013.
- [17] R. H. Kwong and E. W. Johnston, "A variable step size lms algorithm," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 40, no. 7, pp. 1633–1642, 1992.