

Predição das Componentes de Clarke via Interpolação Polinomial de 1^o Grau com Base Newtoniana Aplicada na Estimação Digital de Frequência

Fábio K. Schons* Eduardo M. Dos Santos* Chrystian D. L. da Silva*
Eduardo D. Kilian* Fabiano A. De Oliveira* Luana B. Severo*
Luccas Dos S. Durlo* Igor Da Rocha*

* Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal do Pampa, RS (e-mails: fabioschons.aluno@unipampa.edu.br, eduardosantos@unipampa.edu.br, chrystiansilva@unipampa.edu.br, eduardokilian.aluno@unipampa.edu.br, fabianoaguilar.aluno@unipampa.edu.br, luanasevero.aluno@unipampa.edu.br, luccasdurlo.aluno@unipampa.edu.br, igorrocha.aluno@unipampa.edu.br).

Abstract: The electrical frequency is a parameter of great importance for the full functioning of the Electric Power Systems (EPS), influencing the operation of the equipment and the power quality supplied. This work presents an innovative method for estimating digital frequency in EPS. The estimation technique is based on the analysis of the network voltage waveforms, which are decomposed into their components α and β through the Clarke Transform. The future values of the α and β components are predicted through 1st degree polynomial interpolation with Newton's base. From these values, the frequency of the network is then estimated as a function of the angle resulting from the product between the signal of the Clarke complex and that given by the prediction of the components α and β . The proposed method was tested for voltage signals with step, ramp, exponential and damped sinusoidal frequency variations. Cases were also tested for signals with amplitude variation. The methodology was evaluated in terms of convergence time and minimum and maximum errors before and after convergence, showing that the proposed technique has great precision and robustness for the simulated situations.

Resumo: A frequência elétrica é um parâmetro de grande importância para o pleno funcionamento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), influenciando a operação dos equipamentos e a qualidade da energia fornecida. Este trabalho apresenta um método inovador para estimação de frequência digital em SEP. A técnica de estimação baseia-se na análise das formas de onda de tensão da rede, que são decompostas em suas componentes α e β por meio da Transformada de Clarke. Os valores futuros das componentes α e β são previstos através de interpolação polinomial de 1^o grau com base de Newton. A partir desses valores, a frequência da rede é então estimada em função do ângulo resultante do produto entre o sinal complexo de Clarke e aquele dado pela predição das componentes α e β . O método proposto foi testado para sinais de tensão com variações em degrau, em rampa, exponencial e amortecida de frequência. Também, foram testados casos para sinais de tensão com variação de amplitude. A metodologia foi avaliada em termos de tempo de convergência e erros mínimos e máximos antes e após a convergência, mostrando que a técnica proposta possui grande precisão e robustez frente às situações simuladas.

Keywords: Digital frequency estimation; Protection of electrical power systems; Clarke's transform; Polynomial interpolation based on Newton; Performance indices.

Palavras-chaves: Estimação digital de frequência; Proteção de sistemas elétricos de potência; Transformada de Clarke; Interpolação polinomial com base de Newton; Índices de desempenho.

1. INTRODUÇÃO

A estimação da frequência elétrica é de grande importância para o Sistema Elétrico de Potência (SEP). Na proteção, controle e operação do sistema, distúrbios nos sinais de tensão e variações na frequência fundamental podem causar danos aos equipamentos e à qualidade da energia elétrica fornecida, bem como causar restrições operacionais do SEP e sistemas industriais.

A frequência fundamental está relacionada com a qualidade de energia elétrica, onde, idealmente, esta tem valores constantes em 60Hz. Em regime permanente, a frequência pode oscilar entre $\pm 0,5\text{Hz}$.

Frequências fora desses limites podem indicar a ocorrência de falhas ou sobrecargas no sistema, conforme mencionado em Thomas *et al.* (2001). Além disso, variações de frequência podem causar danos aos equipamentos conectados à rede elétrica, como geradores, transformadores, motores, bancos de capacitores e linhas de transmissão, prejudicando a estabilidade do SEP (Barbosa *et al.*, 2008).

Nesse contexto, para manter a qualidade da energia elétrica e mitigar danos no SEP, é necessário estimar a frequência elétrica através de técnicas computacionais. Várias metodologias para este fim foram apresentadas na literatura especializada, como as propostas por Thomas *et al.* (2001), Barbosa *et al.* (2008), Santos *et al.* (2015), Begovic *et al.* (1993) e Schons *et al.* (2022). No entanto, deve-se ressaltar que nenhum método proposto até então é capaz de ser preciso em todas as condições operacionais do SEP.

Assim, o presente trabalho apresenta um novo método para estimação de frequência, o qual é fundamentado na predição das componentes α e β dos sinais de tensão da rede, usando interpolação polinomial de 1º Grau com base de Newton. A técnica proposta foi testada para casos envolvendo variações de frequência em degrau, em rampa, exponencial e amortecida. Também, foram testados casos para sinais de tensão com variação de amplitude. Nos testes, foi verificado que a metodologia possui grande precisão e robustez para estimação de frequência, alcançando o critério de convergência em todos os casos analisados.

2. TÉCNICA PROPOSTA PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Para analisar o desempenho do método de Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial de 1º Grau das Componentes de Clarke (EIPCC), os resultados foram avaliados em termos de índices de desempenho, como tempo de convergência, intervalo de convergência e erros mínimos e máximos antes e depois da convergência.

O EIPCC baseia-se na obtenção das Componentes de Clarke de sinais de tensão trifásicos, através da Transformada $\alpha\beta$, conforme (1), onde n representa a amostra atual.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(n) \\ V_\beta(n) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

O sinal complexo resultante é dado por (2).

$$u(n) = V_\alpha(n) + jV_\beta(n) \quad (2)$$

O método aqui proposto utiliza a interpolação polinomial de 1º grau com base de Newton para estimar os valores futuros dos sinais α e β .

Assim, segundo Recktenwald *et al.* (2000), a forma de Newton de um polinômio interpolador de grau n para estimar os pontos futuros de um sinal é dada por (3).

$$P_n(x) = c_1 + c_2(x - x_1) \quad (3)$$

Onde o polinômio da base de Newton é dado por (4).

$$1, (x-x_1), (x-x_1)(x-x_2), (x-x_1)(x-x_2)(x-x_3), \dots \quad (4)$$

Onde c_i são coeficientes a serem encontrados exigindo que $P_n(x_i) = f(x_i)$ para $i = 1, \dots, n + 1$.

A forma de Newton é mais eficiente computacionalmente do que a interpolação de polinômios escritos em bases monomiais ou de Lagrange. Também, tem boas propriedades numéricas e é muito útil para análise teórica de esquemas de interpolação e métodos de integração numérica (Recktenwald *et al.*, 2000).

Considerando um polinômio de 1º grau passando por (x_i, y_i) , $i = 1, 2$, expresso em termos das funções de base de Newton, tem-se (5):

$$P_2(x) = c_1 + c_2(x - x_1) \quad (5)$$

Aplicando a Eq. 5, respectivamente, sobre os sinais V_α e V_β em função do tempo e fazendo a devida manipulação algébrica, obtêm-se os sistemas de equações expostos em (6) e (7), e, suas formas matriciais, os quais interpolam pontos consecutivos dos respectivos sinais por uma reta.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(n) \\ V_\alpha(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & dt \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{1\alpha} \\ c_{2\alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} V_\beta(n) \\ V_\beta(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & dt \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{1\beta} \\ c_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Em (6) e (7), dt representa o intervalo de amostragem, dado em função da frequência fundamental do sistema de potência (f_{fund}) e da taxa de amostragem N , em amostras por ciclo, conforme (8).

$$dt = \frac{1}{f_{fund} N} \quad (8)$$

A resolução dos sistemas de equações expostos em (6) e (7) retorna os valores dos coeficientes $c_{1\alpha}$, $c_{2\alpha}$ e $c_{1\beta}$ e $c_{2\beta}$, respectivamente. De posse desses valores, pode-se estimar valores futuros para os sinais α e β , segundo (9) e (10). A Figura 1 ilustra esse processo.

$$V_{\alpha est}(n+1) = c_{1\alpha} + c_{2\alpha} \times dt \quad (9)$$

$$V_{\beta est}(n+1) = c_{1\beta} + c_{2\beta} \times dt \quad (10)$$

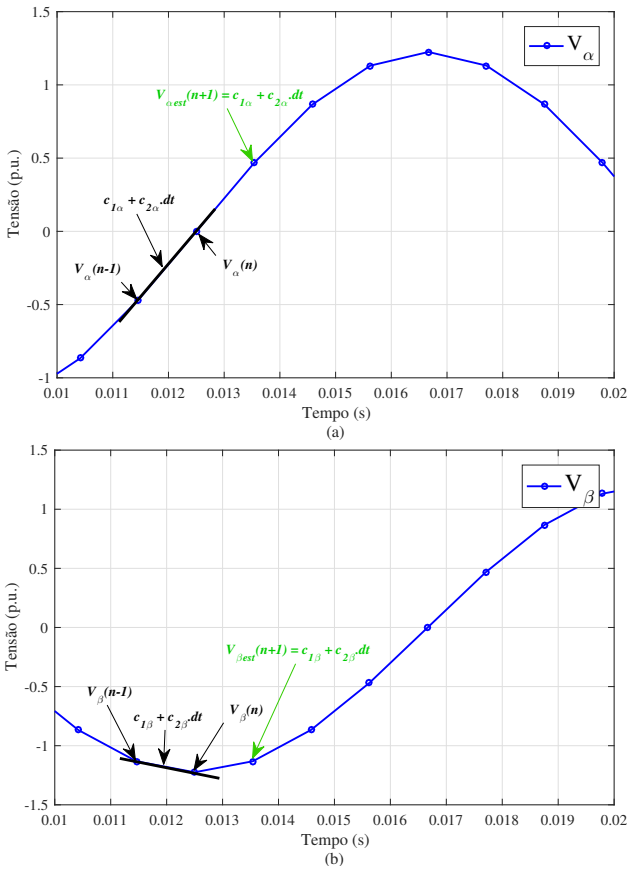


Figura 1. Interpolação polinomial de 1º grau aplicada sobre os sinais V_α e V_β . (a) Interpolação em V_α . (b) Interpolação em V_β .

Após a obtenção dos valores futuros de V_α e V_β através do polinômio interpolador, estes são atribuídos ao valor do sinal complexo estimado (u_{est}), conforme (11).

$$u_{est}(n) = V_{\alpha est}(n+1) + jV_{\beta est}(n+1) \quad (11)$$

Com os valores $u(n)$ e $u_{est}(n+1)$, calcula-se $\gamma(n)$, conforme a Equação (12).

$$\gamma(n) = u_{est}(n+1) \times u(n)^* \quad (12)$$

Em (12), $u(n)^*$ representa o conjugado complexo de $u(n)$.

Por fim, a estimação de frequência do sistema é dada conforme (13).

$$f_{est}(n) = \frac{f_s}{2\pi} \times \tan^{-1} \left\{ \frac{Im[\gamma(n)]}{Re[\gamma(n)]} \right\} \quad (13)$$

Em (13), Re e Im representam, respectivamente, as partes real e imaginária de $\gamma(n)$ e f_s é a frequência de amostragem. O fluxograma desta metodologia pode ser visto na Figura 2.

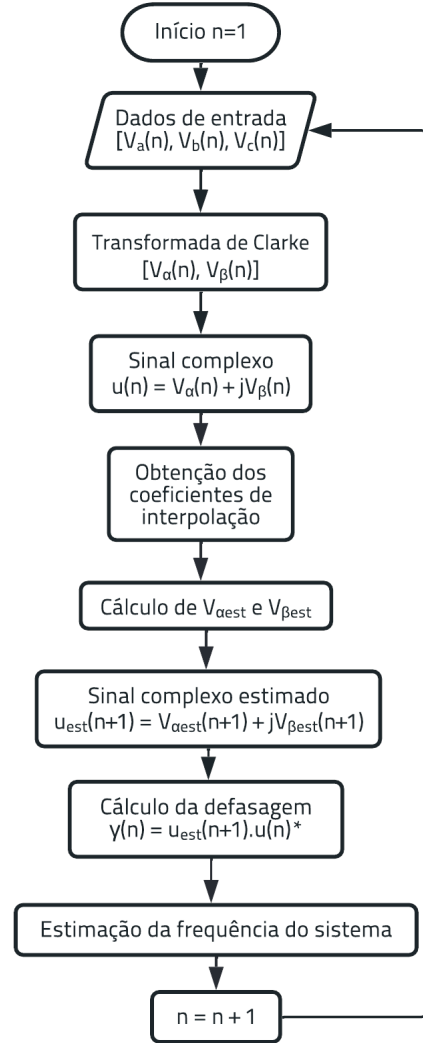


Figura 2. Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial de 1º Grau com Base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC).

A técnica proposta foi testada para sinais gerados computacionalmente, para sinais de tensão com diferentes tipos de variações de frequência e de amplitude.

O EIPCC foi implementado e, em cada caso, verificou-se a resposta para o método baseando-se nos índices de desempenho apresentados na Seção 3.

3. ÍNDICES DE DESEMPENHO

Para validar a qualidade da estimação de frequência da metodologia proposta (EIPCC), foram analisados os se-

4. RESULTADOS

guintes índices de desempenho: tempo de convergência, intervalo de convergência, erro máximo antes da convergência, erro mínimo antes da convergência, erro máximo após a convergência e erro mínimo após a convergência.

3.1 Tempo de Convergência (TC)

O Tempo de Convergência (TC) é dado pelo instante em que o valor absoluto do erro de estimação é menor que 0,0052 Hz por 3 ciclos após a primeira estimação que atende a essa condição. Quando um erro de estimativa é menor que 0,0052 Hz, o algoritmo salva o instante e conta o número de estimações com erros menores que 0,0052 Hz, até o equivalente a três ciclos (48 cálculos de erro consecutivos para 16 amostras por ciclo, por exemplo). Então, o instante salvo é considerado o tempo de convergência. Se o erro absoluto da estimação for maior que 0,0052 Hz antes que o contador atinja três ciclos, o valor salvo é descartado e um novo instante é salvo caso a condição inicial seja novamente satisfeita. Além disso, se o erro absoluto não atender ao critério de convergência estabelecido, a resposta do método é considerada não convergente.

3.2 Intervalo de Convergência (IC)

O Intervalo de Convergência é o intervalo entre o Tempo de Convergência (TC) e o Instante de Variação de frequência (IV), conforme indicado em (14).

$$IC = TC - IV \quad (14)$$

Para fins de proteção, é desejável que a resposta dos estimadores de frequência tenha o menor tempo de convergência possível. Assim, quanto menor o TC, melhor o desempenho do estimador de frequência, conforme Begovic *et al.* (1993).

3.3 Erro Absoluto

É dado pelo módulo da diferença entre a frequência estimada (f_{est}) para a amostra atual (n) e a frequência de referência para o mesmo instante (f_{ref}), de acordo com (15).

$$error(n) = |f_{est}(n) - f_{ref}(n)| \quad (15)$$

A partir do erro absoluto, são determinados os valores máximo e mínimo dos erros absolutos da resposta do método do estimador de frequência, antes e depois de sua respectiva convergência, determinando os demais índices de desempenho considerados neste estudo, que são, respectivamente: Erro Absoluto Máximo Antes da Convergência (EAACmáx), Erro Absoluto Mínimo Antes da Convergência (EAACmín), Erro Absoluto Máximo Depois Convergência (EADCmáx) e Erro Absoluto Mínimo Depois Convergência (EADCmín). Para evitar que um relé de frequência opere incorretamente durante um estado transitório de frequência, é desejável que o EAAC seja o menor possível, de acordo com Santos *et al.* (2013). Além disso, é desejável que o erro de estimação da frequência seja o menor possível durante todo o processamento do sinal, pois este parâmetro indica a precisão da metodologia antes e depois da convergência. Quanto menores os valores desses erros, melhor o desempenho do método.

A metodologia proposta para estimação de frequência foi testada para diferentes sinais de tensão gerados computacionalmente, que simulam diferentes tipos de variações de frequência. Em todos os casos, a frequência fundamental de 60 Hz foi assumida como a frequência inicial e a amplitude inicial como 1 p.u. Além disso, nos casos com variação de frequência em degrau, rampa ou exponencial, o desvio de frequência inicia em 0,5 segundo, enquanto para os casos com variação de frequência senoidal amortecida o desvio ocorre a partir de 0,2 segundo. Todos os casos foram simulados para 16, 32, 64, 96, 128 e 256 amostras por ciclo.

Neste trabalho, os melhores resultados foram observados em 96, 128 e 256 amostras por ciclo. No entanto, não foram verificadas diferenças significativas entre as respostas do estimador para essas amostragens. Sendo assim, são apresentados apenas os resultados obtidos para 256 amostras/ciclo.

Em cada caso, a resposta do estimador foi obtida e avaliada quantitativamente pelos índices de desempenho, cujos valores, para cada caso, são apresentados nas tabelas do Apêndice A.

Todos os sinais de tensão foram gerados conforme (16) a (18), onde $f(n)$ representa o sinal de frequência que possui uma equação particular para cada tipo de desvio, de acordo com Marchesan *et al.* (2013).

$$V_A(n) = A \times \cos[2\pi \times f(n) \times t(n)] \quad (16)$$

$$V_B(n) = A \times \cos \left[2\pi \times f(n) \times t(n) - \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (17)$$

$$V_C(n) = A \times \cos \left[2\pi \times f(n) \times t(n) + \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (18)$$

4.1 Caso 1: sinais com variação de frequência em degrau

Neste caso, os sinais de tensão foram gerados de forma similar aos sinais com frequência única de acordo com as Equações (16) a (18), mas a frequência fundamental muda subitamente de 60Hz para 55Hz.

Os resultados obtidos para este caso são apresentados na Figura 3. Para variações de frequência em degrau menores ou maiores o método funcionou do mesmo jeito. É importante ressaltar que o método atingiu TC igual a 0,550065 s, IC igual a 0,0500651 s, enquanto o maior Erro Absoluto registrado foi antes da convergência (5,0 Hz), exatamente no instante em que acontece o degrau de frequência. Já, o menor Erro Absoluto foi nulo. Os valores dos índices de desempenho obtidos para este caso podem ser visualizados na Tabela A.1 do Apêndice A.

4.2 Caso 2: sinais com variação de frequência em rampa

Para este tipo de variação, o desvio do sinal de frequência é dado por (19). No caso apresentado, a variação foi de 60 para 65 Hz, com passo de 0,01 Hz por amostra.

$$f(n) = f_0 + \Delta f \times t(n) \quad (19)$$

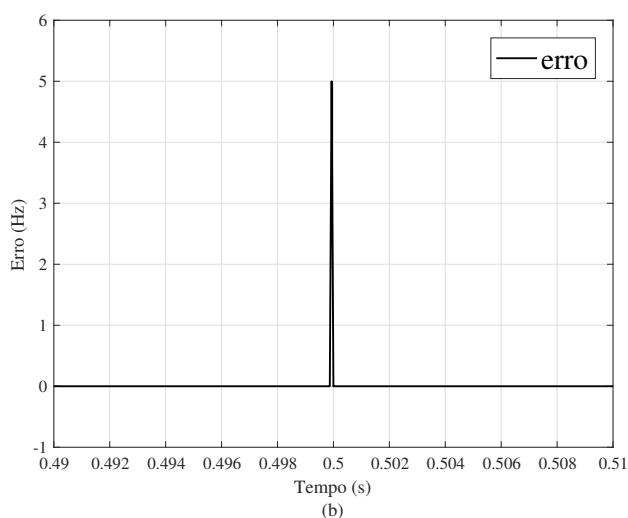
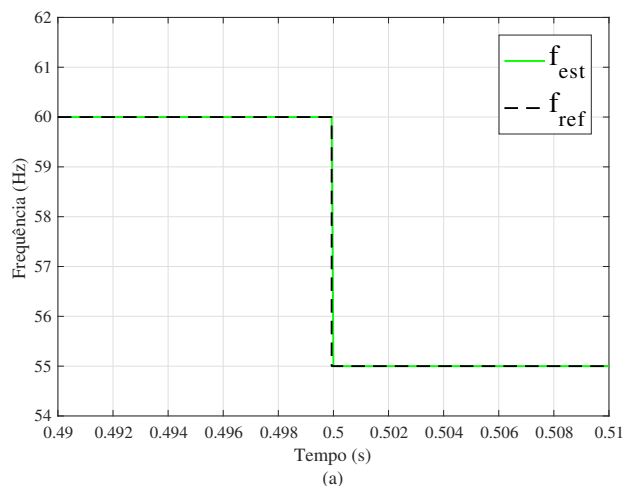


Figura 3. Resposta do EIPCC para variação de frequência em degrau (60 para 55 Hz, 256 amostras por ciclo). (a) Frequência estimada e frequência de referência. (b) Erro absoluto da estimação.

Em (19), f_0 representa a frequência inicial, Δf a variação da frequência, $t(n)$ o instante de tempo para a amostra n .

Para variações menores ou maiores de frequência em rampa o método funcionou do mesmo jeito. Para o caso de variação de frequência em rampa foram obtidos TC igual a 0,582487 s, IC igual a 0,0824870 s e o maior Erro Absoluto também foi verificado antes da convergência (0,01 Hz). Este erro ocorre no instante em que a variação de frequência inicia. Além, disso, o menor Erro Absoluto também ocorre antes da convergência, sendo este igual a 2,02505E-12 Hz. Após a convergência, o Erro Absoluto Mínimo foi de 7,55591E-11 Hz. Os índices de desempenho para este caso também podem ser vistos na Tabela A.1

4.3 Caso 3: sinais com Variação Exponencial de Frequência

Neste caso, em (16) a (18) a frequência varia de acordo com (20) de 60 Hz a valores maiores ou menores de forma exponencial, conforme o valor de Δf .

$$f(n) = f_0 + \left(\Delta f \times 1 - e^{-\frac{t(n)}{\tau}} \right) \quad (20)$$

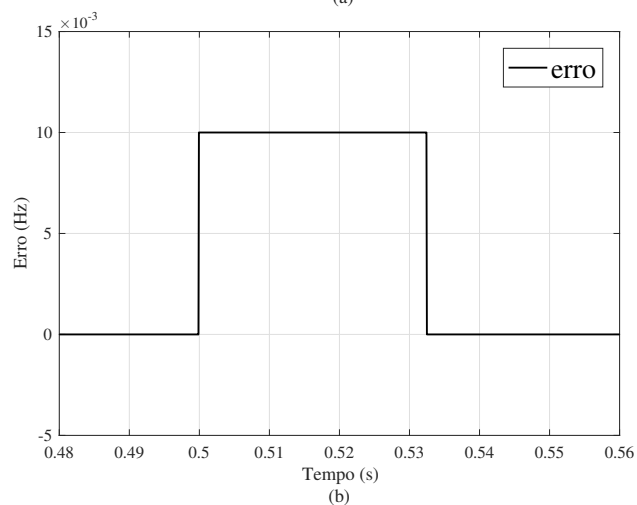
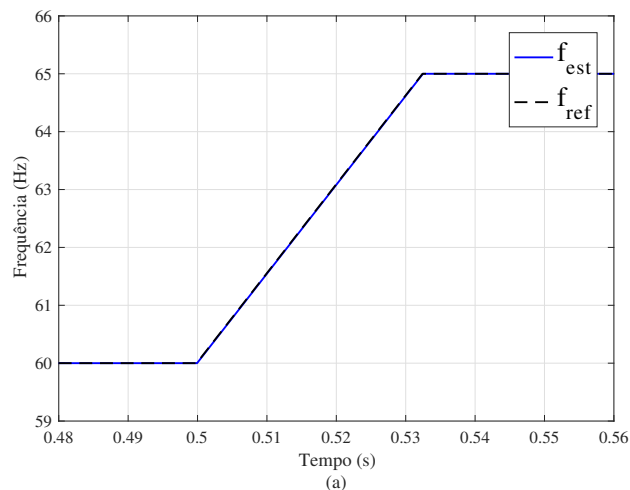


Figura 4. Resposta do EIPCC para variação de frequência em rampa (60 para 65 Hz, passo 0,01 Hz/amostra, 256 amostras por ciclo). (a) Frequência estimada e frequência de referência. (b) Erro absoluto da estimação.

Em (20), f_0 representa a frequência inicial, Δf é a amplitude de variação da frequência e τ é a constante de tempo da função exponencial.

Sendo assim, a Figura 5 apresenta os resultados obtidos pelo EIPCC para um caso de variação exponencial de frequência, de 60 para 55 Hz, com $\tau = 0,01$ s, ressalta-se que para variações menores ou maiores de frequência em exponencial o método obteve bons desempenhos. Para o caso testado, alcançou TC igual a 0,568359 s, IC igual a 0,0683594 s e o maior Erro Absoluto foi verificado antes da convergência 0,0324464 Hz, ocorrido no instante em que a variação da frequência se inicia. Por outro lado, o menor valor para o Erro Absoluto é nulo, ocorrido após atingido o critério de convergência. A Tabela A.2 do Apêndice A mostra todos os índices de desempenho para este caso.

4.4 Caso 4: sinais com variação de amplitude

Para este tipo de variação, os sinais de tensão foram gerados com a frequência constante, porém, com a amplitude variando em degrau, de 1 para 1,5 p.u.

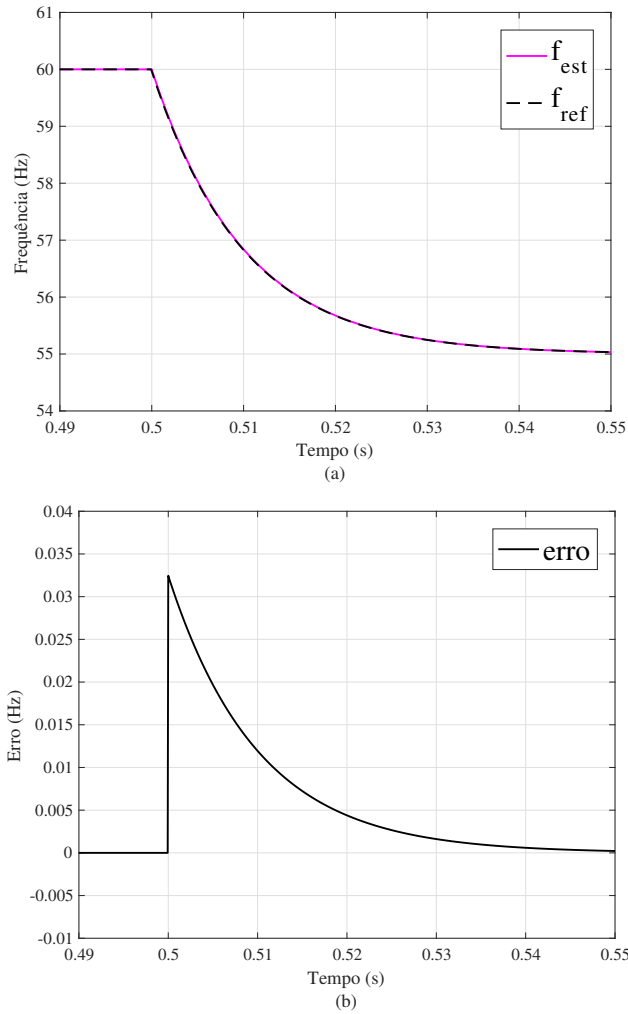


Figura 5. Resposta do EIPCC para variação exponencial de frequência (60 para 55 Hz, $\tau = 0,01$ s, 256 amostras por ciclo). (a) Frequência estimada e frequência de referência. (b) Erro absoluto da estimação.

Para este caso, os resultados são apresentados na Figura 6. Em variações menores ou maiores, o método obteve bons desempenhos. O EIPCC obteve TC igual a 0,550065 s, IC igual a 0,0683594 s e o maior Erro Absoluto ocorre antes da convergência (1,33326E-10 Hz). Ainda, o menor Erro Absoluto foi de 5,32907E-13 Hz, verificado antes da convergência. Vale ressaltar que o valor mínimo do erro absoluto após a convergência foi de 9,44453E-11 Hz, conforme mostrado na Tabela A.2 do Apêndice A.

4.5 Caso 5: sinais com variação senoidal amortecida de frequência

Esses sinais foram gerados usando de (16) a (18), onde a variação da frequência foi dada por (21).

$$f(n) = f_0 + \Delta f \sin\left(\omega_f \times t(n) \times e^{-\frac{t(n)}{\tau}}\right) \quad (21)$$

Em (21) f_0 representa a frequência inicial, Δf é a amplitude, ω_f é a frequência angular, e τ é a constante de tempo da senóide amortecida.

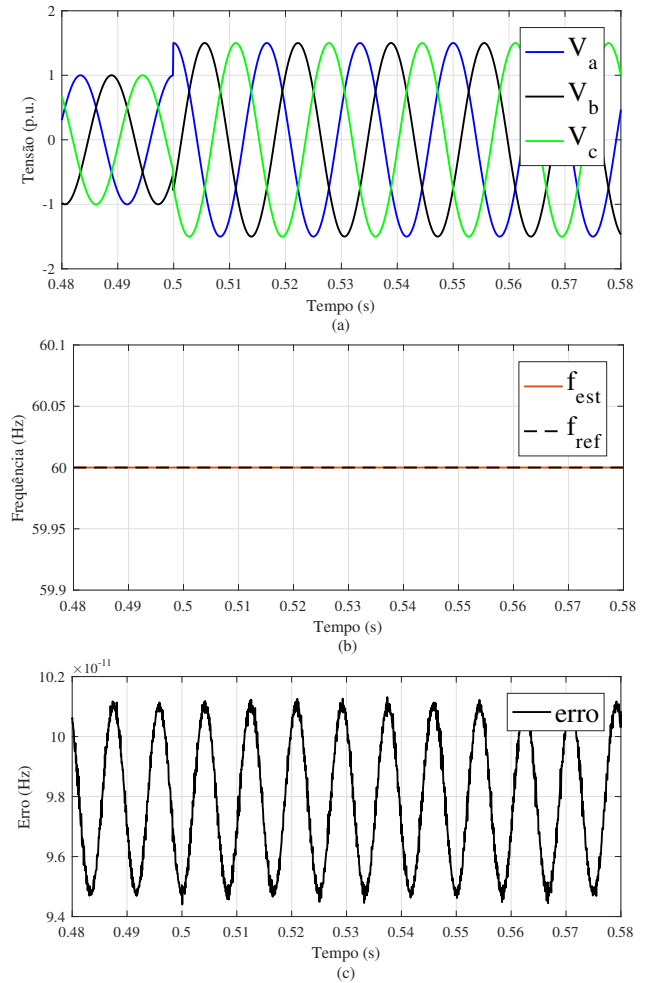


Figura 6. Resposta do EIPCC para variação de amplitude dos sinais de tensão (1 para 1,5 p.u., 256 amostras por ciclo). (a) Sinais de tensão da rede. (b) Frequência estimada e frequência de referência. (c) Erro absoluto da estimação.

O caso apresentado na Figura 6 foi gerado para $\Delta f = 5$ Hz, $\omega_f = 10\pi$, $\tau = 0,15$ s.

Para casos com variações de frequência menores ou maiores, o método funcionou do mesmo jeito. Neste caso, o EIPCC obteve TC igual a 0,250065 s e IC igual a 0,0500651 s. O maior erro absoluto foi 0,00269686 Hz, ocorrido antes da convergência, no instante em que a variação se inicia. Além disso, o menor erro absoluto também foi verificado antes da convergência, sendo este de 9,28822E-11 Hz. Ainda, cabe destacar que o menor erro absoluto depois da convergência foi de 1,01598E-08 Hz. Por fim, estes de desempenho podem ser visualizados na Tabela A.3 do Apêndice A.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propõe uma nova metodologia aplicável à relés digitais, que visa estimar a frequência do sistema elétrico, utilizando a predição das componentes de Clarke dos sinais de tensão da rede fundamentada na interpolação polinomial de 1º grau com base Newtoniana. Tal metodologia foi avaliada computacionalmente a fim de

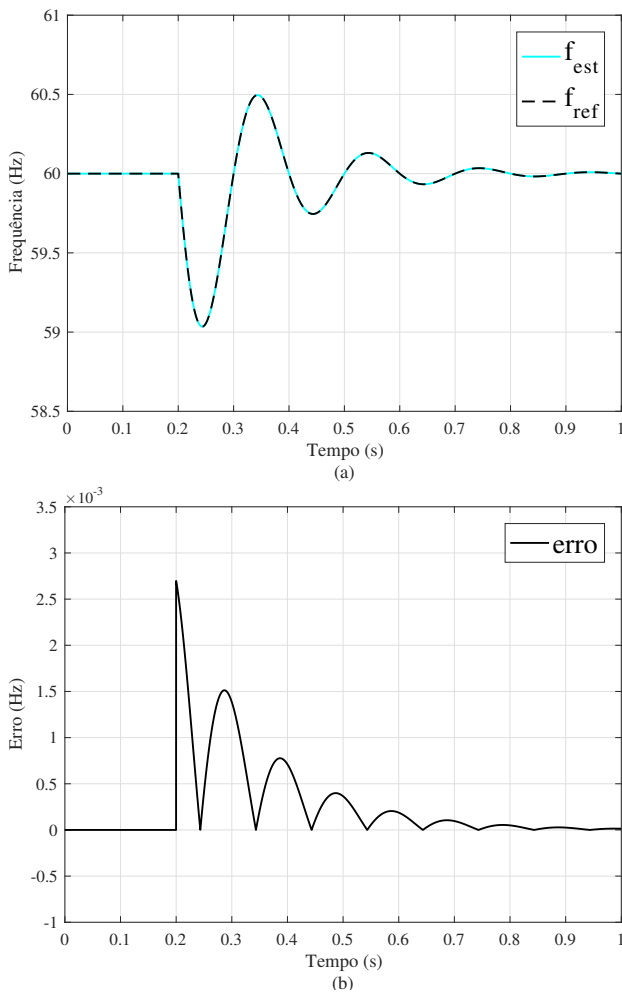


Figura 7. Resposta do EIPCC para variação de amortecida de frequência ($\Delta f = 5$ Hz, $\omega_f = 10\pi$, $\tau = 0,15$ s, 256 amostras por ciclo). (a) Frequência estimada e frequência de referência. (b) Erro absoluto da estimação.

analisar seus índices de desempenho nas diversas situações as quais o sistema elétrico de potência está sujeito. A avaliação da metodologia, sob diferentes tipos de variação de frequência e diferentes distorções a que as formas de onda estão expostas, traz um melhor conhecimento das características do algoritmo testado. Isso é definido a partir da análise dos índices de desempenho mencionados anteriormente, auxiliando na escolha de qual metodologia deve ser utilizada, dadas as diferentes condições a que os sistemas elétricos de potência estão sujeitos.

Nos testes realizados, o critério de convergência era satisfeito quando o erro absoluto da estimação de frequência era menor do que 0,0052 Hz por 3 ciclos consecutivos, provando a precisão do método proposto, uma vez que o valor usual de erro para esta convergência é de 0,025 Hz. É importante ressaltar que a metodologia proposta foi testada para mais de 1400 casos, simulando diferentes condições operacionais do sistema que provocam diferentes tipos de variação de frequência, além de simulações envolvendo variação da amplitude dos sinais de tensão da rede. Em todos os casos, o EIPCC alcançou a convergência,

obtendo resultados satisfatórios frente aos diversos tipos de variação de frequência testados.

Por fim, conclui-se que o método proposto pode ser uma alternativa viável para aplicação em relés digitais, dada sua robustez e precisão frente aos diferentes casos analisados, bem como pela sua simplicidade de implementação.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, D., Monaro, R. M., Coury, D. V., Oleskovic, M. Filtragem adaptativa para a estimação de frequência em sistemas elétricos de potência. *Revista controle e automação*, São Paulo-SP, 2008.
- Begovic, M. M., Djuric, P. M., Dunlap, S., Phadke, A. G. *Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics. IEEE Trans. Power Delivery* 480–486, 1993.
- Marchesan, G., Santos, E. M. dos, Cardoso, G., Gomes, N. R., Mariotto, L. *Frequency Tracking Algorithms: A Contribution Considering Phase Unbalance, Step Variations, Noise, Harmonics, and Different Sampling Rates. Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2013.
- G. Recktenwald. *Numerical Methods with Matlab: implementations and applications*. Upper Saddle River, New Jersey, 538-540, 2000.
- E. M. dos Santos, G. Marchesan, J. P. J. Neto, G. Cardoso. *Power system frequency estimation using morphological prediction of Clarke components. Electric Power System Research*, 208-217, 2015.
- Sorrentino, E., Carvalho, R. *Performance of three algorithms for frequency measurement under transient conditions. Electric Power System Research*, 1191–1196, 2010.
- Thomas, D. W. P., Woolfson, M. S. *Evaluation of frequency tracking methods. IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, 367–371, 2001.
- Schons, Fábio K., Dos Santos, Eduardo M., Da Silva, Chrystian D. L., Kilian, Eduardo D., De Oliveira, Fabiano A., Severo, Luana B. *Performance Analysis of Clarke Components Prediction via Derivative-Functions of Different Orders Applied in Digital Frequency Estimation in Electric Power Systems 2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, 204-209, 2022.

Apêndice A. TABELAS

Tabela A.1. Índices de desempenho para os casos 1 e 2.

Índices de Desempenho	Varição de Frequência em Grau	Varição de Frequência em Rampa
TC (s)	5,50065E-01	5,82487E-01
IC (s)	5,00651E-02	8,24870E-02
EAA C _{máx} (Hz)	5,00000E+00	1,00000E-02
EAA C _{mín} (Hz)	0,00000E+00	2,02505E-12
EADC _{máx} (Hz)	6,00409E-12	8,28493E-11
EADC _{mín} (Hz)	0,00000E+00	7,55591E-11

Tabela A.2. Índices de desempenho para os casos 3 e 4.

<i>Índices de Desempenho</i>	<i>Variação Exponencial de Frequência</i>	<i>Variação de Amplitude</i>
<i>TC (s)</i>	5,68359E-01	5,50065E-01
<i>IC (s)</i>	6,83594E-02	5,00651E-02
<i>EAACmáx (Hz)</i>	3,24464E-02	1,33326E-10
<i>EAACmín (Hz)</i>	2,16716E-12	5,32907E-13
<i>EADCmáx (Hz)</i>	3,48622E-05	1,01416E-10
<i>EADCmín (Hz)</i>	0,00000E+00	9,44453E-11

Tabela A.3. Índices de desempenho para o caso 5.

<i>Índices de Desempenho</i>	<i>Variação Senoidal Amortecida de Frequência</i>
<i>TC (s)</i>	2,50065E-01
<i>IC (s)</i>	5,00651E-02
<i>EAACmáx (Hz)</i>	2,69686E-03
<i>EAACmín (Hz)</i>	9,28822E-11
<i>EADCmáx (Hz)</i>	1,51245E-03
<i>EADCmín (Hz)</i>	1,01598E-08