

Uma Avaliação Crítica do Desempenho de Metodologias Para Estimação de Frequência Sob Condições Transitórias

Marcel da Cruz Stalter, Eduardo Machado dos Santos, John Jefferson Antunes Saldanha, Alex itczak,
Arian Rodrigues Fagundes, Fernando Guilherme Kaehler Guarda
Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA
marcelstalter@gmail.com

Resumo — Em sistemas elétricos de potência (SEPs), uma característica importante é a frequência elétrica do sinal de tensão fornecido, a qual deve ser constante, pois ela influencia diretamente no funcionamento dos equipamentos do sistema e na qualidade dos processos industriais. Realizada de forma ágil e precisa, a estimação do valor da frequência auxilia na proteção, controle e monitoramento da qualidade da energia elétrica, de maneira a assegurar a plenitude do sistema. Sendo assim, este trabalho apresenta uma avaliação de metodologias de estimação de frequência. Tais técnicas são comparadas através de índices como o tempo de convergência, a sobre-elevação e erro transitório da estimação, de maneira a verificar qual apresenta o melhor desempenho.

Palavras-chaves — Controle, frequência, qualidade da energia, proteção, sistemas elétricos de potência.

I. INTRODUÇÃO

A estimação de frequência é de suma importância para a proteção e controle dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), em consequência de crescentes distúrbios no sinal de tensão e variações da frequência fundamental [1]. Consequentemente, é essencial a precisão e a agilidade na detecção de anomalias, de forma que estas sejam eliminadas para que o sistema retorne a operar normalmente.

Em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), a frequência é um parâmetro fundamental conexo à qualidade de energia elétrica, de modo que, para obtenção de uma energia com qualidade boa, os valores eficazes das tensões e a frequência de operação da rede devem ser constantes. Além disso, as formas de onda das tensões não devem apresentar distorções harmônicas. Ainda, ressalta-se que, em regime permanente, admitem-se variações de frequência entre $\pm 0,5\text{Hz}$ em torno da frequência industrial para a operação normal do sistema. [2]. Oscilações fora dos limites estabelecidos podem apontar momentos de falta ou sobrecarga do sistema [3].

No entanto, se a variação da frequência não atender os limites determinados para a sua operação normal, danos aos equipamentos conectados à rede elétrica podem ocorrer, além de prejudicar a estabilidade do SEP [3]. Deve-se ressaltar que com a evolução tecnológica e a elevada aplicação de sistemas eletrônicos em máquinas e equipamentos, aumentaram-se os cuidados com as oscilações de frequência no sistema, uma

vez que esses novos componentes possuem maior vulnerabilidade a esta espécie de perturbação. Desta forma, para uma operação adequada do SEP, faz-se necessário aperfeiçoar cada vez mais as técnicas utilizadas para estimação de frequência [1].

Apesar da existência de diversas técnicas de estimação de frequência, nenhuma se consolidou absolutamente. Normalmente, os métodos mais utilizados são os mais simples, como o de detecção da passagem do sinal por zero [1]. Atualmente, novos trabalhos vêm demonstrando que é difícil estimar adequadamente a frequência sob diferentes condições de operação do sistema elétrico [3].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar cinco metodologias: Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro (APSSP), Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), Método do Laço Fechado de Fase Digital (DPLL), Método baseado na Transformada Discreta de Fourier de Jacobsen (TDFJ) e Método de Prony (MP).

II. GENERALIDADES

A energia elétrica é de suma importância para o desenvolvimento da sociedade e, com isso, a expansão do SEP é inevitável. Portanto, cada vez mais se faz necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias, as quais garantam a confiabilidade e segurança para manutenção do fornecimento de energia nas mais diversas condições de operação da rede elétrica. Sendo assim, é necessário que o SEP opere com a máxima eficiência, de forma que o sistema se mantenha protegido [4], uma vez que é vulnerável a defeitos oriundos de diversas naturezas (curtos-circuitos, sobrecargas, sobre tensões, entre outras), os quais podem causar grandes prejuízos, como perda de equipamentos, interrupção do processo de produção, incêndios, etc.

Para o funcionamento ideal do SEP, faz-se necessário o fornecimento energia elétrica com boa qualidade, na qual as magnitudes de tensão e frequência sejam preservadas, bem como as formas de onda senoidais não devem ser distorcidas [6]. Nesse contexto, a interligação dos sistemas auxilia na redução da amplitude das oscilações de frequência na rede. No sistema interligado brasileiro, as oscilações ficam por volta de $\pm 0,02\text{ Hz}$ em torno da frequência fundamental, sendo verificadas oscilações acima desse valor, para situações de

contingência como curtos-circuitos, desligamentos ou entradas de grandes blocos de carga, além da conexão ou desconexão de uma grande fonte geradora.

Dessa forma, a qualidade de energia é afetada, pois os reguladores de velocidade podem não ser capazes de compensar as variações de carga em curtos intervalos de tempo [7]. Também, ressalta-se que as oscilações de frequência fora das margens estabelecidas, podem afetar a operação do SEP, danificando os equipamentos ligados à rede [8], além de prejudicar a continuidade dos processos industriais.

Nesse contexto, faz-se necessário eliminar os problemas no menor tempo possível e, para isso, são utilizados os sistemas de proteção, os quais têm por objetivo desligar rapidamente qualquer componente do sistema ou eliminar a anomalia detectada de forma a evitar danos aos equipamentos ou mesmo a interferência nas demais operações realizadas pelo SEP [5]. Assim, relés são dispositivos capazes de detectar as perturbações que ocorrem no sistema, além de realizar comandos para a abertura de disjuntores, com a intenção de conservar a plenitude da rede [3].

Portanto, uma das grandezas a ser monitorada por esses dispositivos é a frequência elétrica, sendo isto possível graças aos avanços tecnológicos dos relés digitais numéricos, os quais utilizam algoritmos de pré-processamento de sinais, além de executar as funções básicas de proteção. Vale ressaltar que diversos estudos vêm sendo realizados no sentido de desenvolver novas metodologias, bem como para melhorar o desempenho das técnicas existentes para estimação da frequência [8]. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de cinco métodos destinados a este fim, os quais foram propostos na literatura especializada. Tais métodos foram comparados em termos de índices de desempenho, os quais são descritos na Seção IV.

III. MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Foram analisados cinco métodos de estimação de frequência, sendo estes o Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro (APSSP), o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), o Método do Laço Fechado de Fase Digital (DPLL), o Método baseado na Transformada Discreta de Fourier de Jacobsen (TDFJ) e o Método de Prony (MP). A seguir, são descritos cada um dos métodos estudados.

A. Método de ajuste de pontos para um sinal senoidal puro (APSSP)

Segundo [9], para o desenvolvimento dessa metodologia, foram empregadas algumas relações trigonométricas de modo a determinar o valor da frequência, com base em três amostras consecutivas de um sinal de tensão (V_k, V_{k-1}, V_{k+1}). Como os valores de tensão são obtidos em uma frequência constante e a mesma também é constante no sistema, a diferença de argumento entre duas amostras ($\Delta\varphi$) também é constante. Desta forma, a frequência é obtida a partir de (1):

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos\left(\frac{V_{k-2} + V_k}{2V_{k-1}}\right) \quad (1)$$

B. Método dos mínimos quadrados (MMQ)

Conforme apresentado em [10], o método dos mínimos quadrados (MMQ) tem como característica principal sua

simplicidade, pois não utiliza cálculo de matrizes inversas e de correlação, além de ser de fácil implementação e apresentar uma grande competência computacional e robustez. A frequência segundo esta técnica é obtida através de (2):

$$f_k = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin(I_m(W_k)) \quad (2)$$

Onde Δt representa o inverso da frequência de amostragem. I_m é denominada pelo valor da corrente de disparo ajustada. E W_k , valor obtido através do vetor.

C. Método do laço fechado de fase digital (DPLL)

Proposta por [11], a metodologia DPLL estima a frequência de um sinal complexo ($r[n]$). Essa técnica utiliza um laço formado por um detector de erro de fase ($e[n]$), composto por um multiplicador complexo e uma função arco-tangente. Além disso, contém um filtro representado pela função de transferência $D(z)$, dada por (3). Também conta com um Oscilador Controlado Numérico (OCN), o qual é equivalente ao oscilador controlado por tensão, dado por $V(z)$, conforme (4) e a Fig. 1.

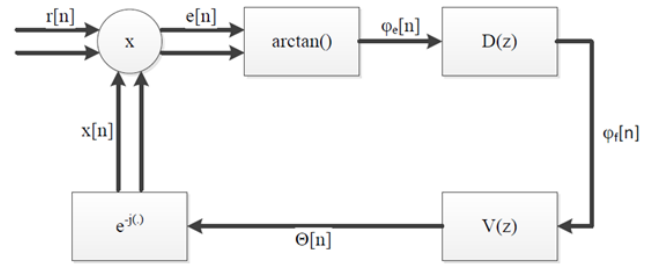


Fig. 1. Malha DPLL.

$$D(z) = \frac{az}{z - (1 - a)} \quad (3)$$

$$V(z) = \frac{k}{z - 1} \quad (4)$$

A obtenção da variável a é dada por (5).

$$a = \frac{4k}{k^2 + 2k + 2} \quad (5)$$

Assim, a frequência estimada para o sinal é dada por (6).

$$f(t) = \frac{k}{2\pi N \Delta T} \sum_{n=1}^{l+N} \varphi f(n) \quad (6)$$

Para efeitos de cálculo, considera-se $k = 1$ e $N = 0,1$, os quais são valores tabelados em [11]. Já o $\varphi f(n)$ é dado pelo valor de fase do sinal.

D. Método baseado na transformada de Fourier de Macleod (TDFM)

De acordo com [6], essa técnica tem como objetivo reduzir o erro médio da estimação e para isso utiliza as três componentes superiores do espectro ($A_{m\acute{a}x}, A_{m\acute{a}x-1}, A_{m\acute{a}x+1}$). A Equação (7) é utilizada para obter a frequência fundamental, onde o parâmetro δ é dado conforme (8).

$$f(t) = \frac{(k_{m\acute{a}x} + \delta)fa}{N} \quad (7)$$

Onde $k_{m\acute{a}x}$ é o valor que possui maior amplitude no espectro das frequências, e fa representa o valor da frequência aparente.

$$\delta = \frac{\sqrt{1 + 8\gamma^2} - 1}{4\gamma} \quad (8)$$

De forma que a variável γ é obtida através de (9).

$$\gamma = \frac{\text{Real}(A_{m\acute{a}x-1}A_{m\acute{a}x} - A_{m\acute{a}x+1}A_{m\acute{a}x})}{\text{Real}(2|A_{m\acute{a}x}|^2 + A_{m\acute{a}x-1}A_{m\acute{a}x} + A_{m\acute{a}x+1}A_{m\acute{a}x})} \quad (9)$$

E. Método de Prony (MP)

Conforme [12], esse método utiliza a Transformada Discreta de Fourier (TDF) de modo a filtrar a componente fundamental da tensão, de acordo com (10).

$$g_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{k+n-N+1} \cos n\omega T \quad (10)$$

O parâmetro v_k representa o valor de tensão amostrado no instante k .

Para melhorar o desempenho de tal metodologia, é utilizada uma janela de Blackman, a qual influencia de forma diferente para cada amostra processada pelo filtro de Fourier. O comprimento da janela de Blackman (MPB) é dado por (11), na qual N representa a taxa de amostragem. Para o cálculo da frequência, é utilizada (12), a qual, foi testada com diferentes valores de M e N , concluindo-se que o melhor desempenho, utilizando a janela de Blackman, é obtido quando, segundo [12], $M=15$, o que justifica o uso desse valor para nesse estudo.

$$\omega_B = 0,42 - 0,5 \cos \frac{2\pi n}{N-1} + 0,08 \cos \frac{4\pi n}{N-1} \quad (11)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi T} \cos^{-1} \left\{ \frac{\sum_{m=2}^{M-1} (g_{m-1} + g_{m+1})^2}{2 \sum_{m=2}^{M-1} g_m (g_{m-1} + g_{m+1})} \right\} \quad (12)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os desempenhos das metodologias estudadas são apresentados nesta Seção. Para se obter uma análise mais detalhada, os estimadores de frequência em questão foram testados para diferentes condições de variação da frequência fundamental (exponencial e amortecida) dos sinais de tensão. Também, as respectivas metodologias tiveram seus desempenhos avaliados para um caso de oscilação estável de potência, bem como para situações envolvendo distorção harmônica e sub-harmônica nos sinais tensão. Tais técnicas foram avaliadas através de índices de desempenho como a sobre-elevação, o tempo de convergência e o erro transitório da estimação da resposta. Ressalta-se que, tanto as técnicas estimadoras de frequência, quanto os referidos índices de desempenho foram implementados no *software* Matlab[®],

assim como os sinais testados foram gerados no mesmo *software*.

A. Índices de desempenho

De maneira a facilitar a análise dos algoritmos, foram calculados os índices de desempenho para cada método. Tais índices estão relacionados ao tempo de convergência e aos erros da estimação de frequência, sendo que, dentre estes, o tempo de convergência é considerado o índice mais relevante, uma vez que está associado à atuação dos dispositivos de proteção e controle do sistema.

1) *Tempo de convergência (TC)*: Este índice é dado pelo intervalo de tempo entre o instante em que ocorre a variação de algum parâmetro no sinal e o instante em que a resposta converge para o valor de regime da frequência (IC), conforme (13). Esse instante ocorre quando o erro transitório da resposta permanece durante 10 ciclos, entre mais ou menos 0,05 *Hz* da frequência de referência. Vale ressaltar que para sinais sem variação de parâmetros, o tempo de convergência coincide com o instante de convergência, uma vez que este é tomado em relação ao instante $t = 0$ s. Para este índice, quanto menor o tempo de convergência, melhor o desempenho da metodologia [3].

$$TC = IC - I_{variação} \quad (13)$$

2) *Erro médio (E_{med})*: O erro médio após a convergência da estimação é dado pelo valor absoluto médio dos erros das estimativas de frequência após a convergência. Esse índice é dado por (14) e quanto menor for o seu valor, melhor o desempenho do estimador de frequência [3].

$$E_{med} = \frac{\sum_{n=I_{conv}}^k \text{erro}(n)}{k} \quad (14)$$

Na Equação (14), k representa o número de amostras processadas a partir do instante de convergência.

3) *Overshoot (OS)*: É dado pelo maior valor de erro positivo da estimação antes da convergência da resposta. Conhecer o *overshoot* de cada estimador de frequência é relevante para evitar atuações indevidas da proteção durante a convergência do mesmo [3]. Quanto maior o *overshoot*, pior o desempenho do estimador.

B. Casos analisados

1) *Sinal com variação exponencial*: Neste caso, o sinal senoidal de tensão sofre variação exponencial da frequência a partir do instante 0,5 segundos, até que a frequência atinja o valor de 55 *Hz*. A Equação (15) descreve a variação da frequência no tempo.

$$f(n) = f_{fund} + \Delta f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t(n)}{\tau}}\right) \quad (15)$$

Onde $f_{fund} = 60$ *Hz*, Δf representa a amplitude da variação e τ representa a taxa de variação da frequência. Na Tabela I, são mostrados os valores para os índices de desempenho obtidos pelas respostas de cada estimador de frequência. Nessas condições, a técnica fundamentada na TDF não atingiu o critério de convergência, sendo considerada

ineficiente para essa situação. Já a metodologia do MMQ destacou-se pelo baixo tempo de convergência, enquanto a técnica DPLL possui convergência mais lenta. Contudo, o MMQ apresenta o menor erro médio e menor *overshoot*, enquanto que o DPLL apresenta valores maiores para os mesmos índices. Sendo assim, pode-se concluir que, para este tipo de variação, a técnica do MMQ apresenta uma melhor eficiência em estimar a frequência dentre as metodologias analisadas. Fig. 2 apresenta as respostas das técnicas MMQ e TDFM, onde pode-se notar o bom desempenho obtido pelo MMQ, contrário do observado para TDFM, que não apresenta convergência da resposta.

TABELA I. DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM VARIAÇÃO EXPONENCIAL.

	TC [s]	E_{med} [Hz]	OS [Hz]
APSSP	1,9149E-01	3,4264E-02	2,0400E+00
MMQ	1,7361E-04	2,8361E-02	1,4995E-02
DPLL	2,1719E-01	4,9868E-02	1,6947E-02
TDFM	Não convergiu	Não convergiu	Não convergiu
MPB	1,5677E-01	4,9450E-02	5,5146E-01

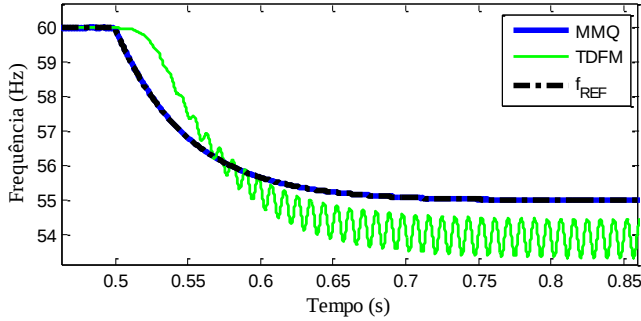


Fig. 2. Resultados para um sinal com variação exponencial.

2) *Sinal com variação amortecida*: Para esse caso, foi feita uma variação amortecida na frequência nominal de um sinal senoidal, a qual se inicia no instante 0,4 segundos e é dada por (16).

$$f(n) = f_{fund} - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t(n)) \cdot e^{-\frac{t(n)}{\tau}} \quad (16)$$

Em (16), Δf representa a amplitude da oscilação e τ , a taxa da variação da frequência.

A Tabela II, apresenta os índices de desempenho obtidos pelas respostas de cada estimador de frequência para uma variação amortecida. De forma geral, todas as metodologias conseguiram estimar a frequência de forma satisfatória. Dentre as técnicas analisadas, o estimador MMQ apresentou os melhores índices de desempenho. Entretanto, a metodologia DPLL apresentou o pior tempo de convergência. O maior erro médio e o maior *overshoot* foram verificados para o estimador APSSP, sendo este considerado o pior método para esse tipo de variação. Na Fig. 3 são mostrados os sinais de frequência obtidos a partir do método do MMQ, o qual obteve os melhores índices de desempenho. Além disso, é apresentado o comportamento da resposta do APSSP, que apresenta demasiadas oscilações, justificando os piores índices frente ao desempenho das demais técnicas analisadas.

TABELA II. DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM VARIAÇÃO AMORTECIDA

	TC [s]	E_{med} [Hz]	OS [Hz]
APSSP	4,3229E-01	2,2982E-01	3,1438E+00
MMQ	1,7361E-04	3,6610E-02	0,0000E+00
DPLL	5,5104E-01	1,0797E-01	1,1996E+00
TDFM	5,4167E-01	1,3889E-01	2,2627E+00
MPB	4,3524E-01	8,5497E-02	2,1516E-01

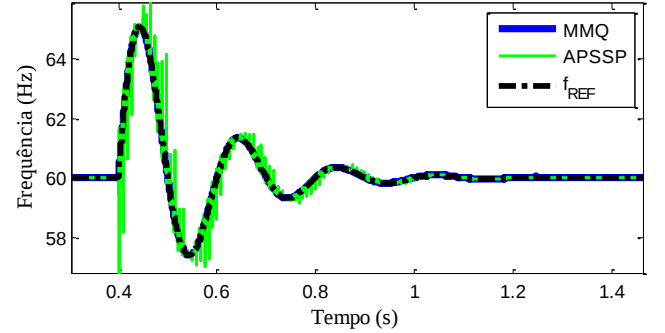


Fig. 3. Resultados para um sinal com variação amortecida.

3) *Oscilação de potência*: Oscilações de potência são fenômenos transitórios, os quais ocorrem devido a fatores como mudanças de carga, curtos-circuitos, dentre outros. Nessas situações, o sistema deve se reajustar de maneira a equilibrar, novamente, a proporção entre carga e geração. Para este caso, foi gerado um sinal de tensão com oscilação de potência de 5 Hz, cuja forma de onda resultante é mostrada na Fig. (4).

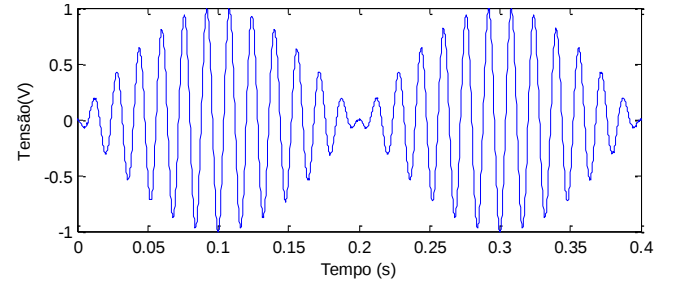


Fig. 4. Oscilação de potência de 5 Hz.

A Tabela III demonstra os índices de desempenho obtidos por cada metodologia. A partir dessa Tabela, pode ser visto que apenas a metodologia DPLL atingiu a convergência frente a uma oscilação de potência, enquanto as demais técnicas não obtiveram convergência em suas respostas. A Fig. 5 indica a resposta da metodologia DPLL a qual apresenta o melhor desempenho e, para fins de análise, também exibe o comportamento da metodologia TDFM, a qual não apresentou convergência na sua resposta, assim como as demais metodologias analisadas.

TABELA III. DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA

	TC [s]	E_{med} [Hz]	OS [Hz]
APSSP	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
MMQ	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
DPLL	5,7986E-02	4,1069E-02	3,2210E-01
TDFJ	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
MPB	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu

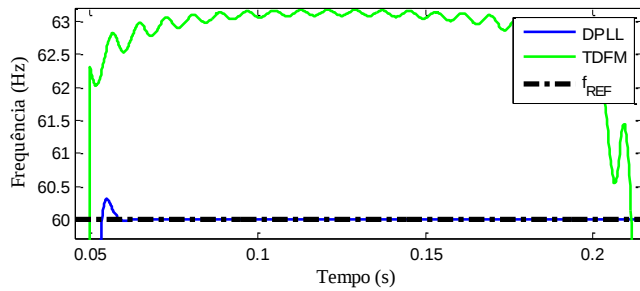


Fig. 5. Resultados para um sinal com oscilação de potência.

4) *Sinal senoidal com conteúdos harmônicos*: Para realização deste caso foi inserido conteúdo harmônico de ordem 3 com taxa total de distorção harmônica de 3% da amplitude do sinal fundamental. De acordo com a Tabela IV, pode-se observar que, na presença de harmônicas de ordem ímpar, que o método baseado em TDFM apresentou o melhor desempenho em todos os índices analisados, enquanto os estimadores APSSP, MMQ e MPB, não atingiram o critério de convergência. Vale ressaltar que, dentre os métodos que atingiram a convergência, o DPLL apresentou os piores índices de desempenho. Na Fig. 6, são apresentadas as respostas das estimções segundo a atuação das metodologias TDFM e DPLL, as quais tiveram resposta convergente para a estimação de frequência frente a esse tipo de variação.

TABELA IV. DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM CONTEÚDO HARMÔNICO

	TC [s]	E _{med} [Hz]	OS [Hz]
APSSP	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
MMQ	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
DPLL	5,7986E-02	4,1630E-02	3,2420E-01
TDFM	5,0000E-02	7,1054E-15	0,0000E+00
MPB	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu

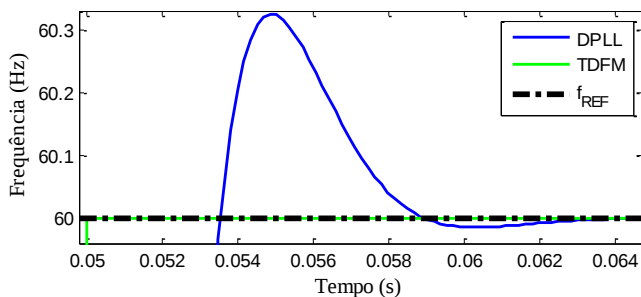


Fig. 6. Resultados para um sinal com conteúdo harmônico de 3º ordem.

5) *Sinal Senoidal com Sub-Harmônica*: De modo a testar o desempenho dos algoritmos processando sinais contendo distorção sub-harmônica, foi gerado um sinal com distorção sub-harmônica de 10 Hz com amplitude equivalente a 3% da fundamental. Nesse caso, as metodologias empregadas apresentaram dificuldades em estimar a frequência. De acordo com a Tabela V, apenas a metodologia TDFM obteve sucesso em realizar essa tarefa, apresentando resultados satisfatórios. A Fig. 7 apresenta o comportamento da resposta do TDFM e do DPLL, onde pode-se notar que ambas as respostas apresentam caráter oscilatório. Porém, a oscilação observada para a resposta do TDFM encontra-se dentro dos limites estabelecidos no critério de convergência.

TABELA V. DADOS OBTIDOS PARA OS TESTES COM CONTEÚDO SUB-HARMÔNICO

	TC [s]	E _{med} [Hz]	OS [Hz]
APSSP	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
MMQ	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
DPLL	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu
TDFM	5,6250E-02	6,5424E-02	0,0000E+00
MPB	Não Convergiu	Não Convergiu	Não Convergiu

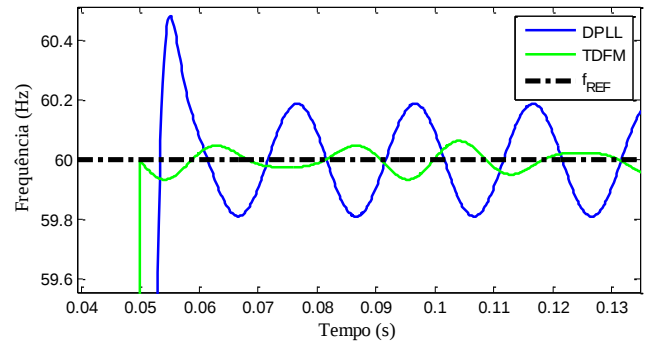


Fig. 7. Resultados para um sinal com conteúdo sub-harmônico.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou metodologias aplicadas em relés digitais, as quais têm por objetivo estimar a frequência do sistema elétrico. Tais metodologias foram testadas computacionalmente com o intuito de analisar seus índices de desempenho frente às várias situações as quais o sistema elétrico de potência é susceptível.

A avaliação de cada metodologia, sob diferentes tipos de variação, traz um melhor conhecimento das características de cada algoritmo testado, permitindo determinar qual método se adequa melhor a cada situação. Isso é conseguido a partir da análise dos referidos índices de desempenho, os quais auxiliam na escolha de qual metodologia deve ser aplicada, frente às diversas condições as quais os sistemas elétricos de potência estão sujeitos.

Por fim, concluiu-se que nenhum dos métodos analisados se consolidou como tendo desempenho absoluto, pois cada um possui características próprias, podendo ser impreciso e ineficiente frente a algum tipo de variação das condições operacionais do SEP. Vale ressaltar que algumas técnicas apresentaram vantagens sobre as demais em determinadas condições. Sendo assim, os estimadores de frequência devem ser escolhidos de modo a garantir o melhor desempenho do sistema para as situações mais recorrentes no trecho em que se pretende instalar dispositivos capazes de realizar esta tarefa, bem como evidencia-se a necessidade de mais estudos e desenvolvimentos acerca dos estimadores de frequência.

V. REFERÊNCIAS

- [1] D.W. P. Thomas and M. S. Woolfson, "Evaluation of frequency tracking methods", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, pp. 367–371, July 2001.
- [2] ONS, Procedimento de Rede, Submódulo 25.6. "Indicadores de qualidade de energia elétrica frequência e tensão", 2008.
- [3] G. Marchesan, "Estimadores de Frequência Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado, 2013.
- [4] A. R. Warrington, "Protective Relays: their Theory and Practice", Vol. 2. Chapman & Hall Ltd. London, 1969.
- [5] J. G. D. Lucariny, "Proteção de Equipamentos Elétricos", CNI. Rio de Janeiro, 1983.

- [6] J. A. B. Grimoni; L. C. R. Galvão; M. E. M. Udaeta; “Iniciação a Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo”, Edusp. 2004.
- [7] C. R. Dudan; F. M. Mcgranaghan; S. Santos; H. W. Beaty; “Electrical Power Systems Quality”, 2º ed. McGrawe-Hill, 2003.
- [8] D. Barbosa; R. M. Monaro; D. V. Coury; M. Oleskovicz; “Filtragem adaptativa para a estimação de frequência em sistemas elétricos de potência”, Revista controle & automação, São Paulo- SP, 2008.
- [9] E. Sorrentino; R. Carvalho; “Performance of three algorithms for frequency measurement under transient conditions”, Electric Power Systems Research, 2010.
- [10] M. D. Kwong; E. W. Johnston; “A variable step size LMS algorithm”, Signal e Processing, IEEE Transactions on, 1992.
- [11] K. Sithampanathan; “Digital-PLL assisted frequency estimation with improved error variance”, Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM, 2008.
- [12] T. Lobos; J. Rezmer; “Real-Time determination of power system frequency”, Instrumentation and Measurement, IEEE Transaction on, 1997.