

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE SINCRONISMO COM A REDE ELÉTRICA

MARIELLE J. SILVA, CARLOS A. R. JÚNIOR, SÍLVIA C. FERREIRA, DANTON D. FERREIRA, LEONARDO M. BARBOSA, VINÍCIUS M. PACHECO

*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
vinicius.pacheco@deg.ufla.br*

Abstract— The synchronism algorithms play an important role about the interconnection of distributed generation (DG) systems with the main grid or the microgrid. Moreover, the demand of the DG to remain connected in the grid, even with grid disturbances, is growing. This work presents a comparison between three synchronism algorithms commonly used in power electronic converters. They were carried out for different power grid disturbances. The algorithms based on synchronous reference frame (SRF) and adaptive filters (ANF) with LMS law presented slowly dynamic response when compared to an adaptive filter with frequency estimation. It occurred due to SFR and ANF loop control dependency of the PI parameters, even though they were optimized by a TLBO (Teaching-learning-based optimization) genetic algorithm. Conversely, the synchronism algorithm based on adaptive filter with frequency estimation presented better dynamic response, with small variations in steady state. Nevertheless, all compared algorithms were able to track grid variations satisfactorily and partially reject grid disturbances.

Keywords— Distributed generation, microgrid, synchronism algorithms, power electronic converters, power quality.

Resumo— Os algoritmos de sincronismo desempenham um papel fundamental na interconexão de sistemas de geração distribuída (GD) com a rede elétrica ou com uma microrrede. Além disso, existe uma grande exigência para a capacidade das unidades GD em se manterem conectadas durante os distúrbios presentes na rede. Dessa forma, este trabalho propõe comparar três tipos de algoritmos de sincronismo para conversores de microrrede, testando-os em diferentes condições de distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Os algoritmos baseado na referência síncrona e o utilizando filtros adaptativos com LMS apresentaram uma resposta dinâmica mais lenta se comparado ao algoritmo utilizando filtros adaptativos com estimador de frequência, devido a dependência dos parâmetros do controlador PI. Apesar dos valores dos parâmetros terem sido otimizado por meio do algoritmo genético TLBO (*Teaching-learning-based optimization*), estes PLL's não conseguiram apresentar uma resposta mais rápida, devido a suas próprias limitações. Já o algoritmo utilizando filtros adaptativos com estimador de frequência apresentou respostas dinâmicas mais rápidas, para todos os casos analisados. No entanto, este algoritmo apresenta algumas oscilações em regime permanente. Apesar disto, todos os algoritmos se mostraram capazes de acompanhar variações e rejeitar, mesmo que parcialmente, os distúrbios na tensão da rede elétrica.

Palavras-chave— Geração distribuída, microrrede, algoritmos de sincronismo, conversores eletrônicos, qualidade de energia.

1 Introdução

As microrredes são caracterizadas por um conjunto de cargas alimentadas por uma ou mais fontes de geração distribuída (GD). As microrredes podem operar isoladas ou conectadas ao Sistema Elétrico de Potência (SEP). Em ambas condições, deseja-se o mínimo de interrupções no fornecimento de energia às cargas locais (Solanki et al., 2017).

Para operar conectados ao SEP, os sistemas de geração distribuída, precisam ser controlados corretamente. Para tal, a tensão da fonte de energia distribuída da microrrede precisa estar em sincronismo com a tensão do SEP, possuindo mesma fase, amplitude e frequência.

Os métodos de sincronização, utilizados em conversores eletrônicos, podem ser classificados como *Phase-Locked Loop* (PLL) e *Frequency-Locked Loop* (FLL). Os PLL's extraem a fase da rede, sendo por isto denominados por malha de controle de fase. Já os FLL's extraem a frequência da rede, sendo assim, são denominados malha de controle de frequência (Blanco et al., 2013). Ambos os mecanismos de sincronização

devem operar de forma adequada tanto na condição nominal quanto na presença de distúrbios do sinal de tensão da rede.

Idealmente, a forma de onda da tensão deveria se comportar com uma senóide com amplitude, fase e frequência constantes. No entanto, devido a nova característica do sistema elétrico, como a presença de cargas não-lineares conectadas a este sistema, esta situação não ocorre na prática. Sendo assim, existem diversos distúrbios presentes na forma de onda da tensão, como: variação na amplitude do sinal, presença de componentes transitórias, variação na frequência do sistema e, presença de componentes harmônicas e interharmônicas.

O principal desafio associado aos algoritmos de sincronização, considerando a sua utilização em conversores conectados à microrredes, é estimar, com precisão e em tempo real, a frequência e a fase de um sinal de tensão quando este apresenta distúrbios (Misra and Nayak, 2016)

Existem diversos algoritmos de sincronização que são empregados nas microrredes, dentre estes destacam-se os baseados na referência síncrona e os que utilizam filtros adaptativos, seja utilizando filtros do

tipo *Finite Impulse Response* (FIR) ou *Infinite Impulse Response* (IIR). Diversos autores avaliaram o desempenho dos principais algoritmos de sincronismos utilizados em microrredes, em diferentes condições de distúrbios na rede, dentre eles destacam-se os trabalhos de da Silva et al. (2007), Subramanian and Kanagaraj (2015) e Shitole, Suryawanshi and Sathyan (2015).

Sendo assim, este trabalho propõe comparar três algoritmos de sincronismo, cujos parâmetros foram obtidos por meio de um algoritmo de otimização, testando-os em diferentes condições de distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Para todos os algoritmos serão verificados a resposta dinâmica e em regime permanente em diferentes condições de distúrbio, como presença de harmônicos, variação de frequência e variação de fase.

2 PLL baseado na referência síncrona

O PLL baseado na referência síncrona (SRF-PLL) foi proposto inicialmente por Kaura and Blasko (1996), e desde então foi amplamente utilizado para sincronismo de conversores eletrônicos com a rede elétrica, tais como nos trabalhos de da Silva, et al. (2007), Youssef and Mohammed (2013) e Subramanian and Kanagaraj (2015).

No esquema do PLL baseado na referência síncrona, o sinal trifásico abc é inicialmente representado por um sistema de coordenadas bifásicos correspondidos pelos eixos α e β .

Os valores das tensões podem ser obtidos no sistema de coordenadas $\alpha\beta$, por meio da matriz da Transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde v_0 , v_α e v_β representam os sinais de tensão no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ e v_a , v_b e v_c são os sinais de tensão no sistema de coordenadas abc.

Após a aplicação da Transformada de Clarke, é realizada a Transformada de Park, a fim de criar uma referência síncrona rotativa, onde os dois vetores ortogonais rotacionam de acordo com a frequência da rede

A matriz de conversão de $\alpha\beta$ para dq é dada por (da Silva et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde v_d e v_q são os sinais de tensão de eixo direto e em quadratura, respectivamente, no sistema de referência dq (síncrono).

Ao transformar um sinal de tensão trifásico balanceado e livre de harmônicos para o sistema de referência síncrono, as expressões da componente do eixo de quadratura (v_q) e do eixo direto (v_d) são descritas por (Filho, Seixas and Cortizo, 2006)

$$v_q = -V \sin(\omega t - \hat{\omega} t), \quad (3)$$

$$v_d = V \cos(\omega t - \hat{\omega} t), \quad (4)$$

sendo V a amplitude das tensões de entrada, ωt o ângulo de fase e $\hat{\omega} t$ é o ângulo de fase fornecido pelo seno e cosseno unitário da matriz de Transformação de Park.

Assim, quando $\omega t = \hat{\omega} t$, o sinal v_q será igual a zero e a componente v_d será equivalente ao valor de pico da tensão da rede.

A malha de controle do PLL baseado na referência síncrona, desenvolvido neste trabalho, é apresentada na Figura 1.

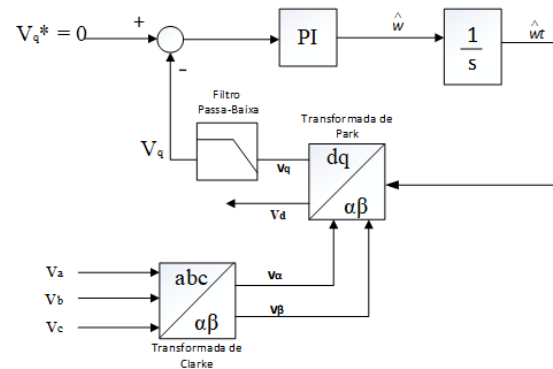


Figura 1. Diagrama do PLL baseado na referência síncrona

Para completar a malha de controle, a componente v_q é filtrada por um filtro passa-baixa, resultando no sinal V_q . Este procedimento é necessário tendo em vista que as tensões da rede podem ser desequilibradas e possuir harmônicos.

Em seguida, a variável V_q é utilizada na malha de controle do PLL. A diferença entre V_q e o sinal de referência V_q^* , constitui o erro, o qual é utilizado como entrada no controlador PI. A saída do PI é a frequência estimada ($\hat{\omega}$) do sinal de tensão trifásico de entrada (V_{abc}). Esta frequência é integrada a fim de obter a fase estimada ($\hat{\omega}t$) e completar a malha de controle.

A dinâmica deste algoritmo de sincronização está intimamente relacionada à frequência de corte de seu filtro passa-baixa. Sendo assim, um filtro com frequência de corte baixa produzirá uma saída muito filtrada e estável, mas com um tempo de sincronização mais longo. Por outro lado, um *design* para dinâmicas rápidas produzirá uma saída capaz de sincronizar rapidamente com a entrada, mas as distorções no sinal de entrada não serão completamente atenuadas pelo filtro e se tornarão parte do sinal de saída.

Sendo assim, a fim de melhorar a dinâmica do PLL baseado na referência síncrona foi utilizado o algoritmo genético TLBO (*Teaching-learning-based optimization*), para a estimação da frequência de corte (f_c) do filtro passa baixa. Além deste parâmetro também foram otimizados os ganhos do PI, proporcional (k_p) e integrativo (k_i), uma vez que estes ganhos determinam a velocidade de resposta e o nível de rejeição de perturbação nos algoritmos de sincronismo.

Para a implementação deste algoritmo de otimização foi gerada uma população inicial de 50 indivíduos de forma aleatória. Em seguida, a combinação destes indivíduos foi utilizada a fim de obter os melhores valores dos ganhos, o qual foi avaliado por meio do desempenho do algoritmo de otimização.

A função de custo utilizada para avaliar o desempenho do algoritmo foi a MSE (*Mean Squared Error*), cuja equação é apresentada:

$$c = \sum_{k=0}^{k=n} \frac{1}{n} [e(t)^2], \quad (5)$$

onde c representa a função custo, a qual é utilizada a fim de modificar as variáveis otimizadas; $e(t)$ é o erro entre o valor de referência (V_q^*) e V_q . O número de interações utilizadas para a execução do algoritmo de otimização é representado por n . Neste caso, o valor de n utilizado foi 10.

Assim, após a implementação do algoritmo genético foi possível determinar os valores dos ganhos, sendo: $f_c=38$; $k_p=85$ e $k_i=3200$.

3 Filtro Adaptativo Sintonizado com Algoritmo LMS

Widrow et al., (1975) propôs a estrutura do filtro adaptativo sintonizado utilizando o algoritmo *Least Mean Square* (LMS) com o objetivo de extrair uma interferência senoidal de um determinado sinal. Assim, objetivo do filtro adaptativo é aproximar $y(n)$ do sinal de entrada $d(n)$, acompanhando continuamente as variações deste sinal. Esta estrutura é composta por um deslocador de fase de 90° e um filtro adaptativo com dois coeficientes, sendo estes w_1 e w_2 . A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos deste filtro.

Neste algoritmo, os valores dos coeficientes, w_1 e w_2 , são modificados por um algoritmo de adaptação LMS. Assim, caso a fase ($\hat{\omega}t$) coincida com a fase do sinal de entrada, $d(n)$ (fase de referência da tensão da rede) então o coeficiente w_2 , converge para zero. Por esse motivo, o coeficiente w_2 é utilizado como variável de controle, a fim de ser comparado com o valor de referência, Ref.

A diferença entre o valor de w_2 e a referência Ref resulta no erro de entrada do controlador PI. A fase ($\hat{\omega}t$) é utilizada para obter um seno e um cosseno unitários, os quais multiplicados pelos valores dos coeficientes, w_1 e w_2 e somados, obtém-se o sinal de saída $y(n)$. Este sinal $y(n)$ é comparado com o sinal de entrada $d(n)$ a fim de verificar se estão em fase.

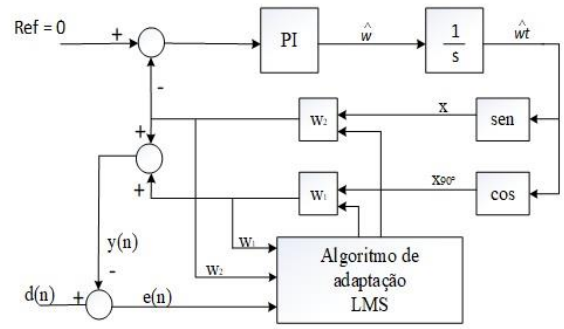


Figura 2. Diagrama do PLL utilizando filtro adaptativo sintonizado com algoritmo LMS

Os coeficientes do filtro adaptativo sintonizado (FAS) ajustados por meio do algoritmo LMS são representados pelas seguintes equações:

$$y(n) = w_1(n) x(n) + w_2(n) x_{90^\circ}(n), \quad (6)$$

$$e(n) = d(n) - y(n), \quad (7)$$

$$w_1(n+1) = w_1(n) + \mu e(n) x(n), \quad (8)$$

$$w_2(n+1) = w_2(n) + \mu e(n) x_{90^\circ}(n), \quad (9)$$

em que μ representa o passo de adaptação do algoritmo, ou seja, este parâmetro controla a taxa de convergência do algoritmo e sua precisão. $e(n)$ representa o erro, $x(n)$ corresponde a um sinal senoidal com a mesma frequência do sinal de entrada, $x_{90^\circ}(n)$ representa o sinal $x(n)$, porém defasado de 90° .

Uma das vantagens deste filtro adaptativo sintonizado é que ele possui apenas dois parâmetros para adaptar, w_1 e w_2 , o que resulta em uma configuração mais simples e fácil para a extração do conteúdo harmônico ou da componente fundamental.

Assim como no PLL baseado na referência síncrona, os valores dos ganhos do controlador PI, bem como do passo de adaptação deste algoritmo, μ , foram obtidos por meio do algoritmo genético TLBO, resultando em: $k_p=1,038$, $k_i=10,27$ e $\mu=0,0067$.

4 Filtro Adaptativo Sintonizado Baseado na Estimação de Frequência

Diferentemente dos PLL's, nos algoritmos de sincronismo denominados *Frequency-Locked Loop* (FLL) a malha de controle é baseada na frequência (Blanco et al., 2013). Dentro dos algoritmos FLL's existem os que utilizam filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência (ANF-FE), o qual foi originalmente proposto por Regalia (1991).

A sua estrutura inicial foi modificada por Mojiri e Bakhshai (2004) a fim de garantir a convergência para qualquer sinal periódico, não necessariamente senoidal, ou seja, um sinal que possua natureza não estacionária e ruídos.

A estrutura do filtro para o processamento deste sinal consiste em uma cascata de filtros adaptativos sintonizados de segunda ordem, e um estimador de

frequência para a frequência fundamental, conforme apresentado na Figura 3 (Mojiri, Karimi-Ghartemani and Bakhshai, 2007). Caso seja necessário a extração de mais de uma frequência é imprescindível a utilização de sub-filtros.

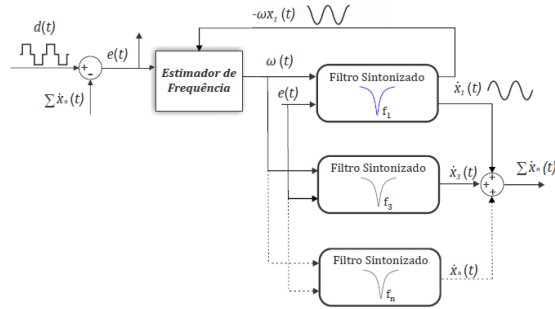


Figura 3. Diagrama do PLL utilizando filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência

As equações diferenciais deste filtro podem ser representadas da seguinte forma (Mojiri and Bakhshai, 2004):

$$\ddot{x}_1(t) = 2\zeta\omega(t)e(t) - \omega^2(t)x_1(t), \quad (10)$$

$$e(t) = d(t) - \hat{x}_1(t), \quad (11)$$

onde $\omega(t)$ é a frequência fundamental estimada, $e(t)$ é o erro, $d(t)$ é o sinal utilizado como entrada do filtro adaptativo sintonizado. $\hat{x}_1(t)$ representa a variável de estado, a qual é obtida quando o algoritmo converge.

Já, a equação do estimador de frequência é representada por (Mojiri and Bakhshai, 2004):

$$\dot{\omega}(t) = -\gamma\omega(t)x_1(t)e(t), \quad (12)$$

Este filtro possui dois parâmetros de ajuste, o fator de amortecimento, representado por ζ , e o ganho adaptativo, representado por γ . O ζ determina a banda de passagem do filtro ressonante, enquanto que γ influencia na convergência do algoritmo (Ferreira et al., 2013).

Neste trabalho, os valores de ζ e γ utilizados foram: 0,7 e 1,5, respectivamente. Estes valores não foram obtidos pelo algoritmo genético uma vez que este filtro possui a função de transferência previamente já definida. Dessa forma, não é necessário a utilização de inteligência computacional para a determinação destes parâmetros. Assim, o critério de decisão dos ganhos foi feito buscando encontrar a melhor resposta dinâmica sem comprometer o erro em regime permanente, de acordo com o trabalho de Ferreira et al., (2014). Neste trabalho são apresentados os valores dos ganhos que fornecem melhor desempenho para o filtro em questão.

5 Sistema Teste e Condições de Comparação

Para verificar o desempenho dos algoritmos de sincronismo, foi necessária a simulação de um sistema teste, cujo esquema está apresentado na Figura 4. A

fase A do sinal de tensão V_s foi utilizado como entrada em todos os algoritmos, a fim de que estes realizem a sincronização com esta variável.

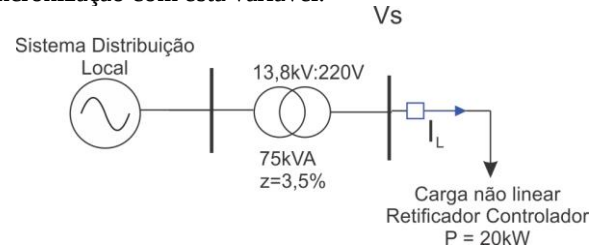


Figura 4. Sistema teste para avaliação dos algoritmos de sincronismo

Em um algoritmo de sincronismo é essencial que resposta dinâmica seja rápida, uma vez que para conectar os conversores de microrrede no sistema elétrico de potência, a estimativa dos parâmetros da rede deve ser feita em tempo real. Sendo assim, o tempo de resposta consiste em um parâmetro de análise dos algoritmos.

A fim de avaliar como as condições de distúrbios, que ocorrem no sistema elétrico, influenciam na resposta dinâmica e em regime permanente dos algoritmos de sincronismo desenvolvidos, foram analisados diferentes casos:

- **Caso 1 - Harmônicos:** foi inserido ao sinal de tensão um harmônico de 5ª ordem, com amplitude 5% do valor nominal da tensão da rede.
- **Caso 2 - Variação de frequência:** foi implementada uma variação de frequência de 2 Hz, de 60 para 62 Hz;
- **Caso 3 - Variação de fase:** foi aplicada uma variação de fase de 30°.

6 Resultados

A fim de verificar e comparar o desempenho dos algoritmos de sincronismos apresentados, foram simuladas no ambiente Matlab/Simulink as condições descritas anteriormente. Os distúrbios foram impostos ao sistema no instante 0,5 segundos. O tempo de resposta dos algoritmos, bem como suas condições em regime permanente foram analisados para cada condição.

6.1 Caso 1: Harmônicos

O primeiro caso a ser analisado consiste na presença de harmônicos. Assim, foi inserido ao sinal fundamental um harmônico de 5ª ordem, com amplitude de 5% do valor da tensão nominal. Esta condição de operação visa verificar a capacidade dos algoritmos diante da rejeição harmônica, uma vez que para um algoritmo de sincronismo esta característica é de grande relevância.

A Figura 5 apresenta os sinais estimados da frequência de cada um dos algoritmos implementados, referência síncrona (RS), filtro adaptativo sintonizado

com LMS (LMS) e filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência (Estimador), na respectiva ordem.

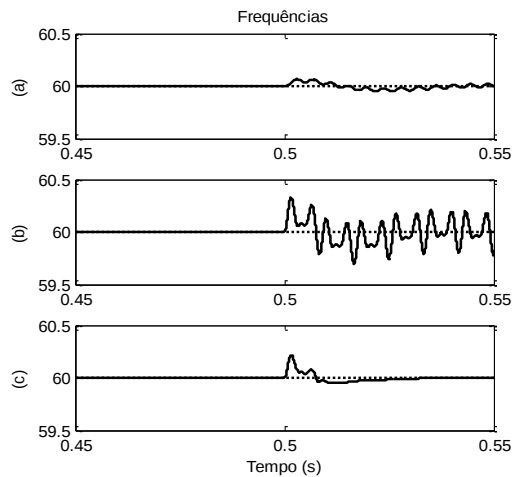


Figura 5. Frequências estimadas pelos algoritmos de sincronismo e frequência de referência (linha pontilhada), após a presença de harmônicos no sinal de tensão, para: (a) RS, (b) LMS e (c) Estimador

Nota-se que após a inserção do conteúdo harmônico no sinal de tensão de referência (fase A da tensão da rede) os algoritmos RS e LMS não foram capazes de rejeitar completamente este conteúdo, apresentando um pequeno erro na estimação de frequência. O LMS foi o que apresentou maior erro, cerca de $\pm 0,2$ Hz em condições de regime. Já o algoritmo RS apresentou um erro de $\pm 0,01$ Hz. O Estimador conseguiu rejeitar completamente este conteúdo harmônico, e após 0,03s a frequência estimada por este algoritmo apresentou um valor constante de 60 Hz. Esta completa rejeição do conteúdo harmônico baseou-se na existência de sub-filtros para a frequência de 300 Hz, a fim de filtrar corretamente a frequência fundamental. O sub-filtro do 5º harmônico foi inserido tendo em vista que, em sua maioria, as tensões da rede elétrica apresentam este componente harmônico.

O erro na estimação de frequência de cada algoritmo implementado está apresentado na Figura 6. Nota-se que após a presença do conteúdo harmônico no sinal de tensão (V_d), o algoritmo LMS foi o que apresentou maiores oscilações no valor da frequência estimada, devido a sua incapacidade de rejeição completa dos harmônicos. O RS apresentou pequenas oscilações, as quais estão dentro dos limites aceitáveis. Já o Estimador não apresentou nenhuma oscilação em regime permanente.

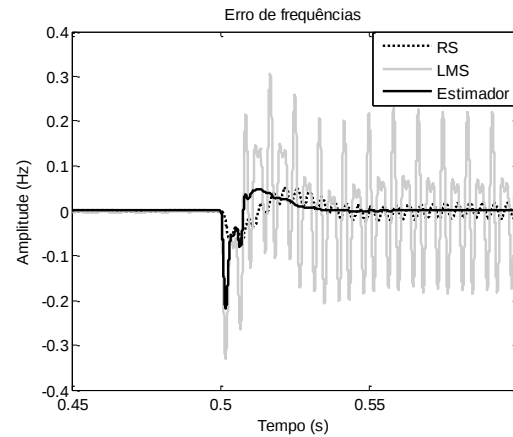


Figura 6. Erro obtido na estimação das frequências estimadas pelos algoritmos de sincronismo, após a presença de harmônicos no sinal de tensão de entrada

Em seguida, foi verificada a estimação do ângulo de fase do sinal da tensão. A Figura 7 apresenta o erro de fase apresentado por cada algoritmo.

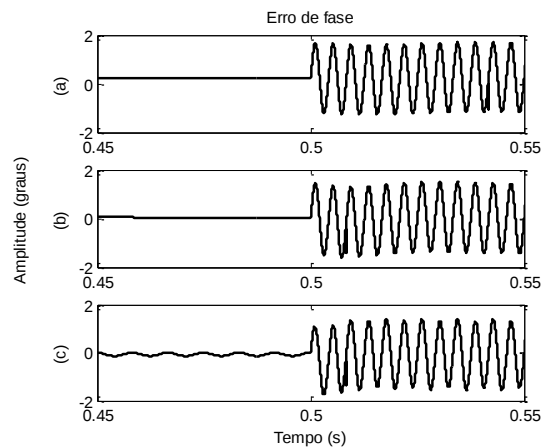


Figura 7. Erro obtido na estimação do ângulo de fase estimado pelos algoritmos de sincronismo, após a presença de harmônicos no sinal de tensão da rede, para: (a) RS, (b) LMS e (c) Estimador

Nota-se que após a ocorrência do distúrbio simulado, o erro na estimação da fase obteve um aumento, sendo que, aproximadamente, todos os algoritmos apresentam a mesma variação de erro, cerca de 1,5 graus.

6.2 Caso 2: Variação na frequência fundamental, de 60 Hz para 62 Hz

Posteriormente, o desempenho dos algoritmos de sincronismo foi avaliado perante uma variação na frequência fundamental. Dessa forma, foi aplicada uma variação de 60 para 62 Hz, no instante 0,5s. A finalidade foi analisar a resposta dinâmica dos algoritmos após esta variação, bem como o comportamento em regime permanente.

A Figura 8 apresenta os sinais estimados da frequência de cada um dos algoritmos implementados, RS, LMS e Estimador, na respectiva ordem.

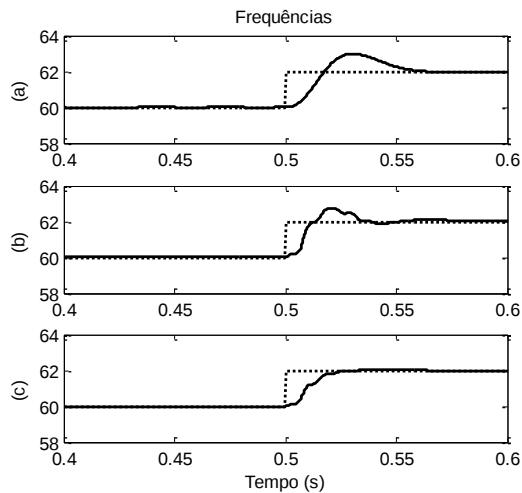


Figura 8. Frequências estimadas pelos algoritmos de sincronismo e frequência de referência (linha pontilhada), após uma variação na frequência da tensão de entrada, para: (a) RMS, (b) LMS e (c) Estimador

Nota-se que os três algoritmos implementados conseguiram estimar a frequência do sinal da tensão perante a presença do distúrbio de variação de frequência. Observa-se que o algoritmo LMS apresentou uma pequena variação 0,03 Hz, após atingido o regime permanente, com tempo de resposta de 0,08s. Já os algoritmos RS e Estimador estimaram corretamente o valor da frequência, sem nenhuma variação em seu valor. O RS apresentou um tempo de resposta de 0,09 s, enquanto o Estimador foi cerca de 0,05s.

O erro na estimação de frequência de cada algoritmo implementado está apresentado na Figura 9. Nota-se que apenas o algoritmo LMS não apresenta um erro nulo. No entanto, o erro apresentado por este algoritmo é praticamente insignificante, cerca de 0,02 Hz. Além disso, nota-se que o degrau de resposta apresentados por todos os algoritmos implementados foi praticamente o mesmo, cerca de 2 Hz, no momento em que ocorre o distúrbio.

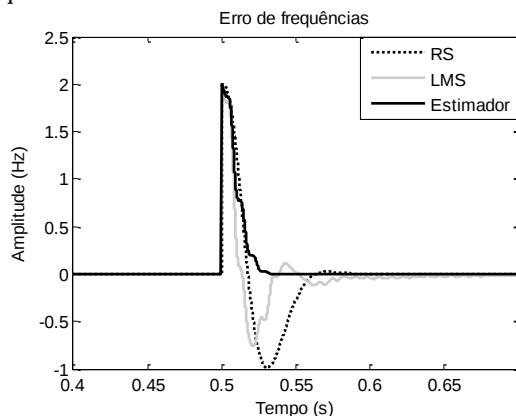


Figura 9. Erro obtido na estimação das frequências após uma variação na frequência do sinal de tensão da entrada

Na Figura 10 apresentam-se os erros de fase obtidos por cada algoritmo implementado. Nota-se que os algoritmos RS e LMS foram os que apresentaram maiores erros na estimação da fase. Já o Estimador não apresentou erros significantes. No entanto, conforme

observado, na Figura 10, a fase estimada pelo algoritmo Estimador apresenta pequenas oscilações, cerca de $0,1^\circ$. Isso porque um FLL não garante erro nulo de fase, apresentando um erro sempre oscilatório, em regime permanente. No entanto, esta oscilação é considerada insignificante, não alterando o desempenho deste algoritmo. Além disso, nota-se que o algoritmo RS apresentou um erro constante de $0,25^\circ$, após o tempo de estabilização, cerca de 0,1 s. O algoritmo LMS foi o que apresentou um tempo de resposta maior, cerca de 0,3s, sendo somente após este tempo que este algoritmo apresentou um erro de fase equivalente a $0,1^\circ$.

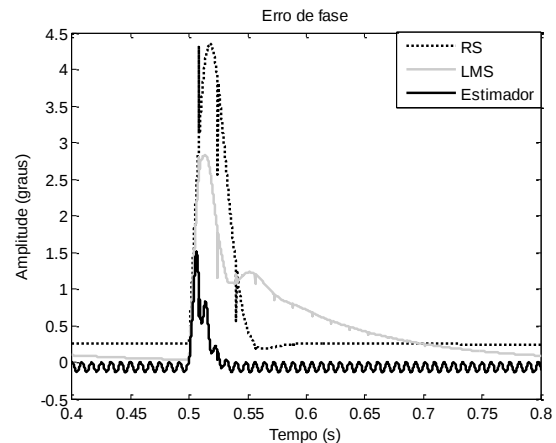


Figura 10. Erro obtido na estimação do ângulo de fase estimado após uma variação na frequência do sinal de tensão da entrada

6.3 Caso 3: Variação na fase da tensão de entrada em 30°

Por fim, foi analisado o comportamento dos algoritmos mediante uma variação de 30° na fase da tensão da rede, imposta no instante 0,5s.

Na Figura 11 são apresentados os resultados de estimação da frequência de cada um dos algoritmos implementados, RS, LMS e Estimador, nesta ordem.

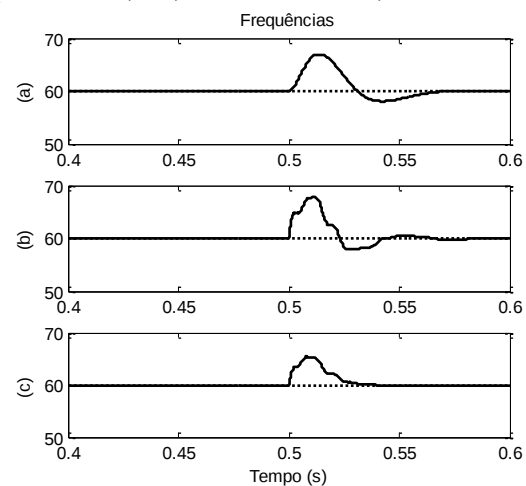


Figura 11. Frequências estimadas pelos algoritmos de sincronismo e frequência de referência (linha pontilhada) na presença de variação de fase, para: (a) RMS, (b) LMS e (c) Estimador

Nota-se que todos os algoritmos implementados conseguiram estimar corretamente o valor da frequên-

cia, sendo que a presença da variação de fase não influenciou no resultado da estimação. Além disso, nenhum dos algoritmos apresentou erro em regime permanente.

Os algoritmos RS e LMS apresentaram um tempo de resposta de aproximadamente 0,1s. Já, o algoritmo com Estimador apresentou uma resposta dinâmica de cerca de 0,03s.

O erro na estimação de frequência dos algoritmos implementados está apresentado na Figura 12. Nota-se que após o instante de 0,6s todos os algoritmos apresentam um erro nulo na estimação da frequência. Além disso, nota-se que o degrau de resposta apresentado pelo algoritmo LMS foi maior, cerca de 8 Hz. Enquanto que o algoritmo RS e o Estimador apresentaram, aproximadamente, o mesmo degrau, cerca de 6 Hz, no momento em que ocorre o distúrbio.

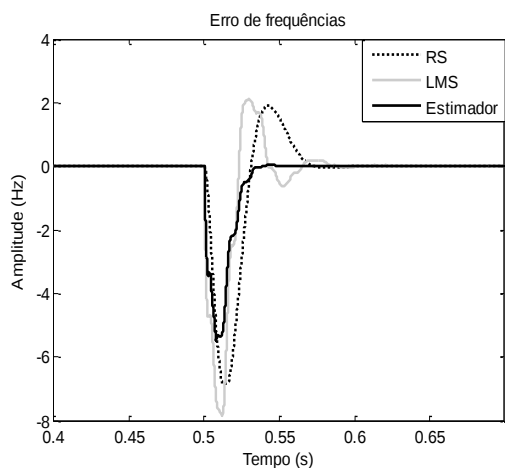


Figura 12. Erro obtido na estimação das frequências estimadas após a uma variação de fase

A Figura 13 apresenta o erro de fase apresentado por cada algoritmo implementado. Nota-se o algoritmo RS apresenta um erro de fase associado mesmo antes da presença do distúrbio, sendo este equivalente a $0,25^\circ$. Após o distúrbio, o algoritmo levou um tempo de, aproximadamente, 0,1s para se estabilizar. O algoritmo LMS apresentou, praticamente, a mesma dinâmica, apresentando o mesmo tempo. Já o Estimador apresentou uma resposta dinâmica bem mais rápida, cerca de 0,05s. No entanto, assim como nos casos anteriores, este algoritmo apresenta oscilações em seu valor da estimação da fase, devido a uma característica de sua estrutura, a qual não garante erro nulo de fase, apresentando um erro, apesar de bastante baixo, sempre oscilatório.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos para os três algoritmos analisados, RS, LMS e Estimador. Apesar dos tempos de resposta destes algoritmos serem considerados relativamente longos, se comparado com outros trabalhos da literatura, como por exemplo, o de da Silva et al., (2007) e Subramanian and Kanagaraj (2015), cujo tempo de resposta do PLL baseado na referência síncrona foi de, aproximadamente, 10,6ms e 30ms, respectivamente, os algoritmos apresentados neste trabalho possuem

boa sincronização em diversas condições de distúrbios presentes no sinal de tensão. Já, os trabalhos dos autores em questão apresentam erros de sincronização quando o sinal de tensão da rede apresenta variação na frequência fundamental.

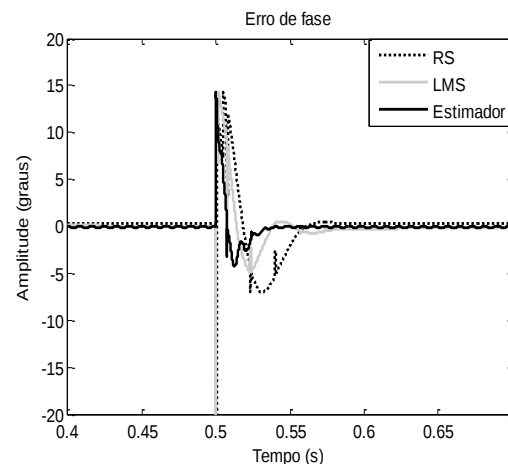


Figura 13. Erro obtido na estimação do ângulo de fase após uma variação na fase do sinal de tensão de entrada

Além da sincronização em diversas condições de distúrbios, estes algoritmos são considerados imunes a ruídos, visto que todos apresentam filtros que realizam a filtragem do sinal de tensão de entrada, em torno de 60 Hz. Desta forma, altas frequências não influenciam no desempenho dos mesmos.

Tabela 1 - Comparação de desempenho dos algoritmos de sincronismo.

C	Desempenho	RS	LMS	Estimador
1	Resposta Fase	60 ms	54 ms	20 ms
	Dinâmica Freq.	80 ms	60 ms	40 ms
	Máximo Fase	$1,67^\circ$	$1,53^\circ$	$1,39^\circ$
	Pico Freq.	60,07 Hz	60,33 Hz	60,21 Hz
	Erro de fase	$1,7^\circ$	$1,5^\circ$	$1,4^\circ$
	Erro de frequência	0,01 Hz	0,02 Hz	0,0002 Hz
2	Resposta Fase	110 ms	300 ms	30 ms
	Dinâmica Freq.	80 ms	80 ms	30 ms
	Máximo Fase	$4,35^\circ$	$2,83^\circ$	$1,49^\circ$
	Pico Freq.	63 Hz	62,75 Hz	62 Hz
	Erro de fase	$0,25^\circ$	$0,12^\circ$	$0,05^\circ$
	Erro de frequência	0 Hz	0,03 Hz	0 Hz
3	Resposta Fase	100 ms	200 ms	100 ms
	Dinâmica Freq.	90 ms	90 ms	60 ms
	Máximo Fase	$14,18^\circ$	$14,31^\circ$	$14,32^\circ$
	Pico Freq.	66,85 Hz	67,83 Hz	65,35 Hz
	Erro de fase	$0,24^\circ$	$0,12^\circ$	$0,13^\circ$
	Erro de frequência	0,02 Hz	0,03 Hz	0 Hz

7 Conclusão

Uma comparação entre os algoritmos de sincronismo baseado na referência síncrona e filtros adaptativos sintonizado com LMS e com estimador de frequência foi apresentada neste trabalho.

A partir dos resultados obtidos é importante ressaltar algumas limitações dos algoritmos implementados. Os algoritmos baseado na referência síncrona e o utilizando filtros adaptativos com LMS apresentaram uma resposta dinâmica mais lenta se comparado ao algoritmo utilizando filtros adaptativos com estimador de frequência. Isto porque estes algoritmos apresentam uma malha de controle fechada com um controlador PI. A dependência deste controlador ocasiona um atraso na resposta dinâmica, para qualquer tipo de condição analisada. Apesar dos valores dos ganhos deste controlador terem sido otimizados por meio do algoritmo genético TLBO, estes algoritmos de sincronismo não conseguiram apresentar uma resposta mais rápida devido às suas próprias limitações.

Já o algoritmo utilizando filtros adaptativos com estimador de frequência, por ser um algoritmo em malha aberta e não possuir a dependência do controlador PI, apresentou respostas dinâmicas mais rápidas para todos os casos analisados.

Em contrapartida, em todos os algoritmos implementados a resposta em regime permanente pode ser melhorada, principalmente quando o sinal de tensão apresenta harmônico. Neste caso, os sinais da estimação de frequência, bem como da fase, obtidos pelos algoritmos de sincronismo apresentaram oscilações em seus valores.

Apesar das limitações apresentadas, todos os algoritmos se mostraram adequados para aplicações em conversores eletrônicos, pois mesmo apresentando pequenos erros são capazes de acompanhar as variações na tensão da rede.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

Blanco, C., Reigosa, D., Briz, F., Guerrero, J. M. (2013). Synchronization in highly distorted three-phase grids using selective notch filters, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2641-2648.

da Silva, C., Pereira, R., da Silva, L., Lambert-Torres, G. and Silva, V. (2007). DSP Implementation of Three-Phase PLL using Modified Synchronous Reference Frame. *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.1697-1701.

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. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.2264-2269.

Ferreira, S., Pereira, R., Gonzatti, R., da Silva, C., da Silva, L., Lambert-Torres, G. and Pereira, R. (2014). Adaptive notch filters: Comparison and applications in power conditioning. *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.

Filho, R. M. dos S., Seixas, P. F., Cortizo, P. C., A. (2006). Comparative study of Three phase and Single phase PLL algorithms for Grid connected systems, *Proc. INDUSCON Conference*, 2006.

Kaura, V., Blasko, V. (1996). Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. *Proceedings of Applied Power Electronics Conference*.

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.

Misra, B. and Nayak, B. (2016). Performance analysis of second order adaptive filter using Matlab Simulink. *2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, pp. 336-340.

Regalia, P. (1991). An improved lattice-based adaptive IIR notch filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39(9), pp.2124-2128.

Solanki, B., Raghurajan, A., Bhattacharya, K., Canizares, C. (2017). Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*.

Subramanian, C. and Kanagaraj, R. (2015). Rapid Tracking of Grid Variables Using Prefiltered Synchronous Reference Frame PLL. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 7, pp.1826-1836.

Widrow, B., Glover, J., McCool, J., Kaunitz, J., Williams, C., Hearn, R., Zeidler, J., Eugene Dong, J. and Goodlin, R. (1975). Adaptive noise cancelling: Principles and applications. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 63, No. 12, pp.1692-1716.

Youssef, T. and Mohammed, O. (2013). Adaptive SRF-PLL with reconfigurable controller for Microgrid in grid-connected and stand-alone modes. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5.

Shitole, A. B., Suryawanshi, H. M. and Sathyan, S. (2015). Comparative evaluation of synchronization techniques for grid interconnection of renewable energy sources. *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1436-1441.