

SOGI-PLL aprimorado por algoritmo de Fourier de um ciclo e controle de estados finitos

Fernando Lino¹, Bruna Neves de Andrade², Rogério Vani Jacomini³, Claudionor Francisco do Nascimento⁴, Alfeu Joãozinho Sguarezi Filho⁵, Fabiano Fragoso Costa⁶,

^{1,5}Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, Brasil

³Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo, Hortolândia-SP, Brasil

⁴Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil

^{2,6}Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, Brasil

e-mail: f.lino@ufabc.edu.br, brunana@ufba.br, jacomini@ifsp.edu.br, claudionor@ufscar.br, alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br, fabiano.costa@ufba.br

Resumo – Este trabalho apresenta um método para estimar o ângulo de fase da tensão da rede baseado em um conjunto finito de ângulos - na condição de problemas de qualidade da energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão, como afundamentos de tensão simétricos e assimétricos, desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de frequência - para sistemas monofásicos. O método é composto pelo filtro de Fourier de um ciclo (OCF) em conjunto com a técnica de posições finitas (FPS), e é chamado de PLL (Phase-Locked Loop) com Filtro de Fourier de Um Ciclo com Controle de Estados Finitos (OCF-FPS-PLL). O OCF-FPS-PLL usa um procedimento de decomposição do vetor de tensão síncrono no quadro $\alpha\beta$ estacionário da estrutura SOGI. O desempenho deste procedimento é aprimorado por meio do filtro de Fourier de um ciclo (OCF). A tensão extraída desse filtro é então tratada por um algoritmo que é implementado por um conjunto de posições finitas (FPS) para estimar o ângulo de fase. Além disso, a estrutura SOGI utilizando o PLL no quadro de referência síncrono (SRF-PLL), a estrutura SOGI utilizando o filtro de média móvel (MAF) e a estrutura SOGI usando o filtro de Fourier de um ciclo (OCF), ambos também utilizando o PLL no quadro de referência síncrono, são comparadas. Os resultados obtidos em uma bancada experimental validam o método proposto. A principal contribuição deste trabalho é a não utilização de controladores Proporcional+Integral (PI) por PLLs para estimar o ângulo de fase da rede.

Palavras-chave – Filtro de Fourier de Um Ciclo, PLL, Modelo de Controle Preditivo, referencial- $\alpha\beta$, referencial-dq, SOGI-PLL.

Abstract – This work presents a method to estimate the phase angle of the mains voltage - based on a finite set of angles - in the condition of failures in distribution systems, such as symmetric and asymmetric voltage sags, unbalances, harmonic distortions and frequency variations - for single-phase systems. The method is composed by the One Cycle Fourier Filter (OCF) together with the finite position technique (FPS), and it is called PLL with One Cycle Fourier Filter with Finite State

Control (OCF-FPS-PLL). It uses a synchronous voltage vector decomposition procedure on the stationary $\alpha\beta$ frame of the SOGI structure. The performance of this procedure is improved by means of a one-cycle Fourier filter (OCF) where the voltage extracted from this filter is then treated by an algorithm that is implemented by a set of finite positions (FPS) to estimate the phase angle. In addition, comparisons are made between the structure SOGI using the PLL in the synchronous reference frame (SRF-PLL), the structure SOGI using the moving average filter (MAF) and the structure SOGI using the one-cycle Fourier filter (OCF), both also using the PLL in the synchronous reference frame. The results obtained in an experimental bench validate the proposed method, considering the non-use of Proportional+Integral (PI) controllers by PLLs as a contribution to estimate the phase angle of the network.

Keywords – One-Cycle Fourier Filter, PLL, Model Predictive Control, $\alpha\beta$ -frame, dq-frame, SOGI-PLL.

NOMENCLATURA

DFT	Discrete Fourier Transform
DHT-THD	Distorção Harmônica Total-Total Harmonic Distortion
DOSGI	Dual Second Order Generalized Integrator
DSP	Digital Signal Processor
FPS	Finite Position Set
LP	Loop Filter
LPF	Low Pass Filter
MAF	Moving Average Filter
MPC	Model Predictive Control
OCF	One-cycle Fourier Filter
PD	Phase Detector
PLL	Phase-Locked Loop
PMSG	Permanent-Magnet Synchronous Generators
QSG	Quadrature Signal Generator
SOGI	Second Order Generalized Integrator
SRF	Synchronous Reference Frame
THD	Total Harmonic Distortion
VCO	Voltage Controlled Oscillator

I. INTRODUÇÃO

Os *PLLs* (*Phase-Locked Loops*) têm sua maior utilização em sistemas de comunicação [1]. Com o desenvolvimento de novas tecnologias em semicondutores e eletrônica de potência, os mesmos passaram também a ser utilizados na sincronização com as redes elétricas. Além disso, os *PLLs* são essenciais e também amplamente utilizados em conversores de energia conectados à rede, como geração distribuída, compensadores síncronos estáticos [2], fontes de alimentação ininterruptas [3] e filtros ativos de potência [4].

Uma técnica amplamente aplicada em sistemas trifásicos emprega *PLLs* no referencial síncrono (*SRF-PLL*) [5], [6]. Para sistemas monofásicos, os autores de [7], [8] e [9] apresentam a estrutura em detalhes dos componentes do *PLL*, que são o *PD*, o *LF* e o *VCO*.

As técnicas *QSG* apresentadas em [10], [11] e [12] são aplicadas ao *SRF-PLL* com filtro adaptativo *SOGI*.

Uma proposta de *PLL* monofásico é apresentada em [13], empregando dois *SOGIs*, com um deles inserindo integradores no referencial *dq*. Uma estrutura *SOGI* utilizando a transformada discreta de Fourier para cálculo da frequência de operação é apresentado em [14] para um *PLL*, onde é extraída a componente fundamental da tensão da rede. O artigo [15] apresenta um *PLL* monofásico empregando a transformada de Fourier deslizante com a tensão de rede contaminada com harmônicas. Os artigos [16], [17] e [18] utilizam esta transformada de forma recursiva para a geração de sinais em quadratura para um *PLL*.

Os artigos [19] e [20] (sistemas monofásicos) apresentam a técnica de Fourier de um ciclo como mais uma alternativa de filtragem para aprimorar o desempenho do *SOGI-PLL*. Consequentemente emprega-se o *SOGI* para os cálculos das componentes em quadratura e em conjunto com o *OCF* operando como filtro. Essa técnica apresenta uma característica de ganho unitário para a frequência fundamental e ganho nulo para frequências harmônicas. Portanto, permite diminuir a oscilação na componente fundamental da frequência da tensão da rede sob várias condições de distúrbios devido às componentes harmônicas ou afundamentos de tensão, diferentemente do uso somente do *SOGI-PLL*.

Em sistemas trifásicos, os artigos [21], [22] e [23] fazem uso da mesma técnica citada no parágrafo anterior, ou seja, emprega o *SOGI* para os cálculos das componentes em quadratura e em conjunto com o *OCF* operando como filtro. Os autores de [24] apresentam a técnica *FPS* para *PMSGs* de ímã permanente montados em superfície em turbinas eólicas de velocidade variável.

O principal objetivo deste trabalho é propor o uso do algoritmo de Fourier de um ciclo juntamente com a técnica *MPC*, tendo esta como característica a eliminação de controladores *PI*, através do uso da técnica *FPS*; ou seja, a tensão extraída do *OCF* é tratada por um algoritmo que é implementado por um conjunto de posições finitas para estimar o ângulo de fase. A estrutura composta pelo *OCF* em conjunto com o *FPS* é chamada *PLL* com Filtro de Fourier de Um Ciclo com Controle de Estados Finitos (*OCF-FPS-PLL*).

O restante deste trabalho está estruturado em 4 seções.

A seção II faz uma descrição das técnicas *OCF* e *FPS*. A seção III descreve a estrutura em blocos desta proposta. A seção IV descreve a estrutura para a realização do experimento com os equipamentos utilizados e apresenta os resultados de 3 experimentos com os *PLLs* submetidos a sinais com afundamento e também contaminados com harmônicas e com *THD*, fazendo comparações entre o *SOGI-PLL* (*SOGI* no *SRF*), o *SOGI-MAF* (filtro de média móvel - *Moving Average Filter*), o *SOGI-OCF* e o *OCF-FPS-PLL*. Com o objetivo de se fazer uma análise da dinâmica do *OCF-FPS-PLL* para um desvio de frequência, um último teste com resultados de simulação em Matlab/Simulink é também apresentado e a conclusão do artigo é apresentada em V.

II. TÉCNICAS OCF E FPS

O equacionamento para a obtenção do filtro de Fourier de um ciclo para se obter tensão v_α , produzida por uma estrutura *SOGI*, é mostrado em (1), assumindo a componente de tensão v_α contaminada por componentes harmônicas e *CC*. O mesmo se aplica para a componente de tensão v_β .

$$v_\alpha(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k^c \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} X_k^s \sin(k\omega t). \quad (1)$$

onde X_0 representa o componente *CC* e as outras componentes senoidais do sinal são obtidas para $k = 1, 2, \dots, \infty$. A aplicação do algoritmo de Fourier com o filtro (3) garante a extração da componente fundamental $v_{\alpha f}$, expresso por:

$$v_{\alpha f} = X_1^c \cos(\omega t) + X_1^s \sin(\omega t). \quad (2)$$

Com isso, as componentes harmônicas e *CC* são completamente suprimidas no processo de filtragem.

Embora existam outras alternativas de estruturas de *PLLs*, como mostrado em [25], [26] e [27], a técnica *SOGI* ainda é muito empregada. Existem outras técnicas usando *SOGI* que mostraram um bom desempenho nos trabalhos apresentados em [28], [29] e [30].

A técnica utilizando o filtro *OCF* pode ser vista em (3). A resposta em frequência para este filtro é mostrada na Figura 1, onde foram tomados 512 pontos para a *DFT*.

$$h_F = W_N [1 \quad e^{j2\pi/N} \quad e^{j2\pi2/N} \quad \dots \quad e^{j2\pi(N-1)/N}]. \quad (3)$$

Pode-se observar que este filtro em 60 Hz tem ganho unitário e atraso de fase nulo, além de ganho nulo para as frequências harmônicas e componentes *CC*.

Já a técnica *FPS* [24] foi baseada no conceito de modelo de controle preditivo, acima referenciada, onde um número finito de posições do rotor é usado para estimar a força contra-eletromotriz do *PMSG*. Em seguida, a posição estimada do rotor, que minimiza uma determinada função de custo, é selecionada para ser a posição ideal do rotor.

III. MÉTODO OCF-FPS-PLL

A seguir é apresentada a proposta deste trabalho, onde uma representação esquemática detalhada da implementação da técnica *OCF-FPS-PLL* é mostrada na Figura 2, onde foi

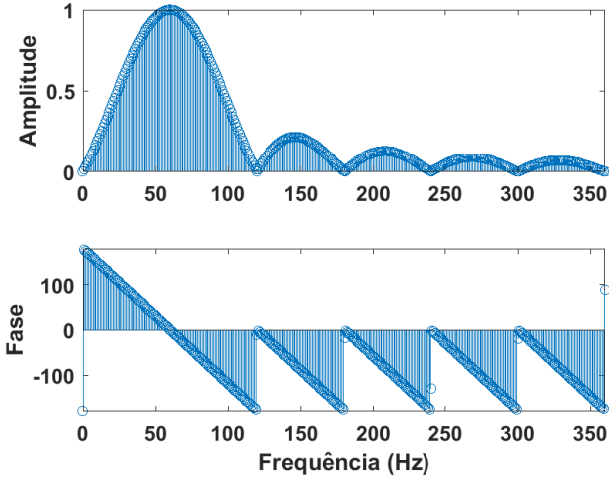


Fig. 1. Diagrama de Bode para o filtro de Fourier de um ciclo.

tomado como referência o artigo [31] utilizado em sistemas trifásicos. Cabe notar que esta técnica somente foi utilizada na sincronização de redes utilizando *PLL* pelo referido artigo.

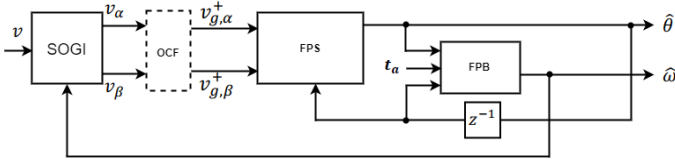


Fig. 2. Diagrama do *OCF-FPS-PLL* com emprego das técnicas *OCF* e *FPS*.

A técnica *OCF* está representada neste bloco pela linha tracejada na Figura 2.

As tensões de saída do bloco *SOGI*, v_α e v_β , são então tomadas como entrada para o filtro *OCF* - equação (3), resultando nas tensões $v_{g,\alpha}^+$ e $v_{g,\beta}^+$.

As amostras das tensões obtidas na saída do *OCF*, $v_{g,\alpha}^+$ e $v_{g,\beta}^+$, são então transformadas nas tensões $v_{g,q}^+$ e $v_{g,d}^+$, de acordo com a equação (4):

$$\begin{aligned} v_{g,q}^+[k,i,j] &= v_{g,\beta}^+[k] \cos \theta_1[k,i,j] - v_{g,\alpha}^+[k] \sin \theta_1[k,i,j], \\ v_{g,d}^+[k,i,j] &= v_{g,\alpha}^+[k] \cos \theta_1[k,i,j] + v_{g,\beta}^+[k] \sin \theta_1[k,i,j] \end{aligned} \quad (4)$$

Os passos abaixo de 1 a 6, conforme [31], apresentam a técnica *FPS* (Figura 2), para um melhor entendimento:

1. A estratégia é baseada em um número finito de posições (oito posições para cada iteração) devido ao fato de que a fase da tensão da rede muda entre 0 e 2π rad. Portanto, definindo a posição inicial $\theta_{in}[k,i]$, a fim de obter um número finito de ângulos, através do uso de dois loops de iteração aninhados com índices i e j , um número finito de posições para o componente q da rede pode ser obtido. A posição angular discretizada pode ser expressa como:

$$\theta_1[k,i,j] = \theta_{in}[k,i] + [(j-1) - 4]\Delta\theta[k,i], \quad (5)$$

onde:

$$\Delta\theta[k,i] = \left(\frac{\pi}{4}\right) 2^{-(i-1)} \quad (6)$$

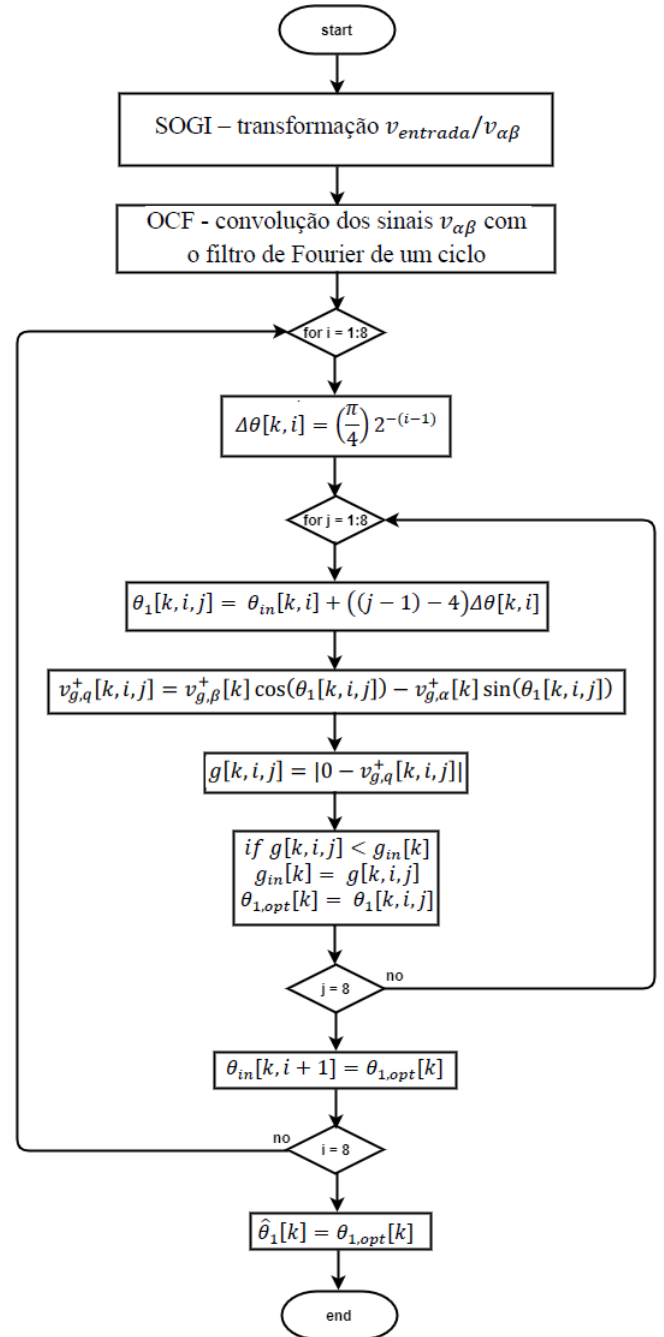


Fig. 3. Fluxograma da proposta *OCF-FPS-PLL*.

2. Agora, uma função custo é definida com o objetivo de selecionar uma posição angular estimada ótima:

$$g[k, i, j] = |0 - v_{g,q}^+[k, i, j]| \quad (7)$$

3. Assim, a posição angular que minimiza a função custo é obtida após 64 iterações. Consequentemente, $v_{g,q}^+[k, i, j]$ alcança seu valor mais próximo a zero.
4. Para entender como esta técnica funciona, suponha que $\theta_{in}[k, 1] = 0$ rad e $g_{in} = \infty$. Olhando a equação (6), na primeira iteração do laço, ($i = 1$) e $\Delta\theta[k, 1] = \frac{\pi}{4}$ rad, e usando a equação (5), os ângulos gerados são: $-\pi, -\frac{3\pi}{4}, -\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$ rad. Com cada um desses valores, $\theta_1[k, i, j]$ calcula-se a componente do eixo-q, $v_{g,q}^+$. A segunda iteração emprega o ângulo que permite minimizar a função custo $\theta_{in}[k, 2]$. Assim, a precisão desta técnica é aumentada por um fator de 2. Dessa forma, 8 novas posições angulares são obtidas usando a equação 5, sendo seus valores: $\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{8}$ rad. O algoritmo alcança a posição angular ótima da rede com o aumento do número de iterações. Continuando com as iterações, na última ($i = 8$), a posição angular ótima estimada é encontrada. Com isso, o algoritmo tem uma precisão de $\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} \times 2^{-7} = \frac{\pi}{1024} = 0.003$ rad. Para clarificar, suponha que $\frac{\pi}{2}$ seja o ângulo ótimo obtido na primeira iteração do laço. Assim, na segunda iteração ($i = 2$) e $\Delta\theta[k, 2] = \frac{\pi}{8}$ rad, e assim sucessivamente.
5. A velocidade angular estimada pode então ser calculada $\hat{\omega}_1[k]$, equação (8), como indicado na Figura 2, onde T_s é o período de amostragem.

$$\hat{\omega}_1[k] = \frac{\hat{\theta}_1[k] - \hat{\theta}_1[k-1]}{T_s} \quad (8)$$

onde $k-1$ e k são os valores nos instantes anterior e atual, respectivamente.

6. O fluxograma da Figura 3 ilustra o algoritmo da técnica *FPS*.

A equação (9) representa o filtro de média móvel, como delineado em [19], e sua resposta em frequência é mostrada na Figura 4, tomando da mesma forma 512 pontos para a *DFT*.

$$h_M = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]. \quad (9)$$

Para este filtro, o mesmo tem ganho unitário para componentes *CC* e ganho nulo nas frequências fundamental e harmônicas, tendo comportamento semelhante ao filtro de Fourier de um ciclo na resposta de fase.

Enquanto a técnica *MAF* é aplicada ao *SOGI* nas tensões estacionárias, pela transformação $\alpha\beta$ -*dq*, a técnica *OCF* é aplicada nas tensões síncronas v_α e v_β .

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O ambiente experimental foi o mesmo utilizado em [19]; ou seja, os sinais experimentais foram gerados por uma fonte de alimentação programável e os sinais de tensão foram adquiridos por meio de uma placa de aquisição de

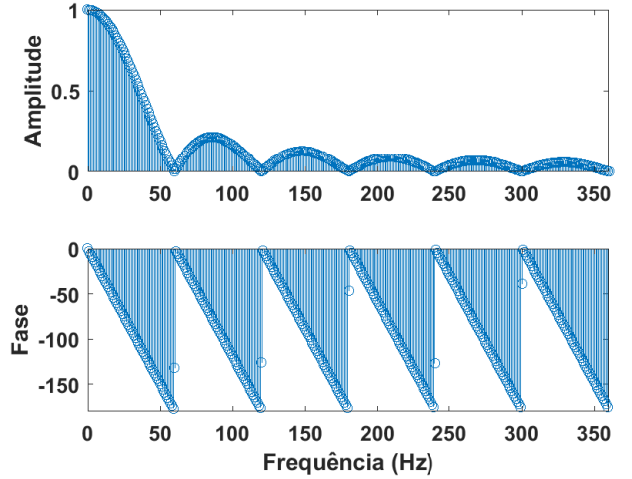


Fig. 4. Diagrama de Bode para o filtro de média móvel.

dados e condicionamento de sinais, implementado em um *DSP*, responsável pela execução do algoritmo da proposta deste artigo e cujos sinais foram monitorados através de um osciloscópio. O custo computacional incorpora o intervalo de tempo iniciando com o processo de medição da tensão da rede e finalizando com a obtenção do ângulo e frequência. A estrutura experimental montada é vista na Figura 5.

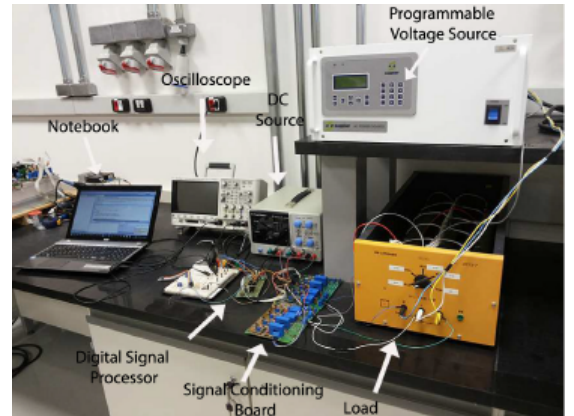


Fig. 5. Sistema experimental construído no LEPS da UFABC - [19].

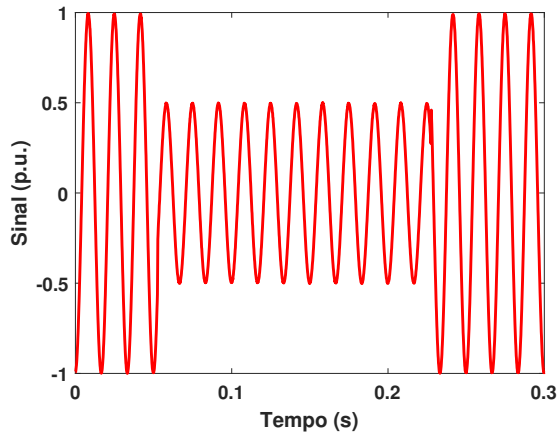
B. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar a técnica proposta, 3 grupos de resultados experimentais são aqui discutidos.

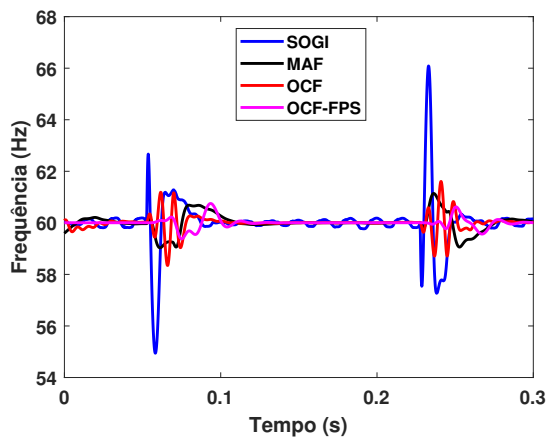
Foram realizados testes comparativos entre o desempenho da estrutura *SOGI* aprimorada com emprego do filtro *OCF* em conjunto com a técnica *FPS*, que é a proposta deste trabalho, com as técnicas da estrutura *SOGI*, *MAF* e *OCF*, estes 3 sendo aplicados no quadro de referência síncrono.

Os testes foram realizados com um sinal submetido nas seguintes condições de operação:

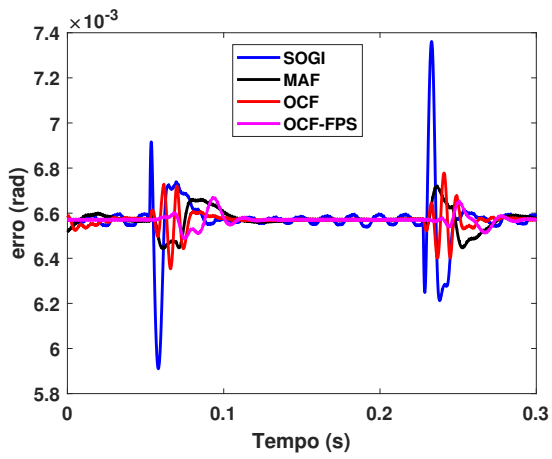
1. Afundamento de 50% em relação à amplitude da frequência fundamental;
2. Afundamento de 70% em relação à amplitude da frequência fundamental;
3. Com afundamento, com a presença de componente harmônica de 5ª ordem e com DHT de 7%.



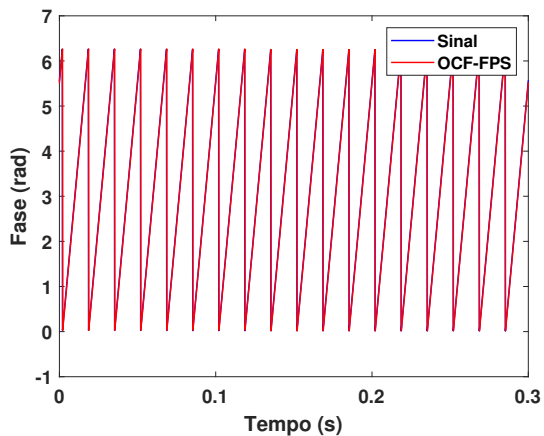
(a)



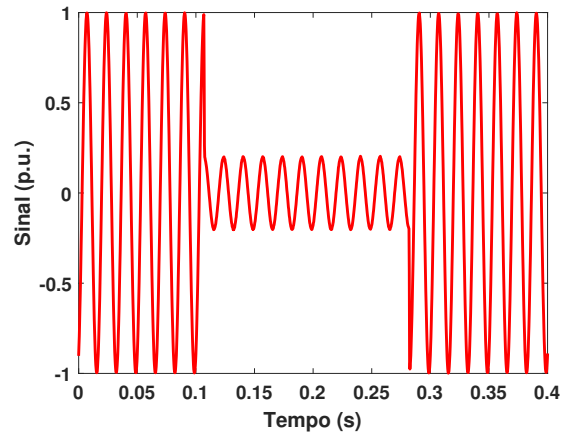
(b)



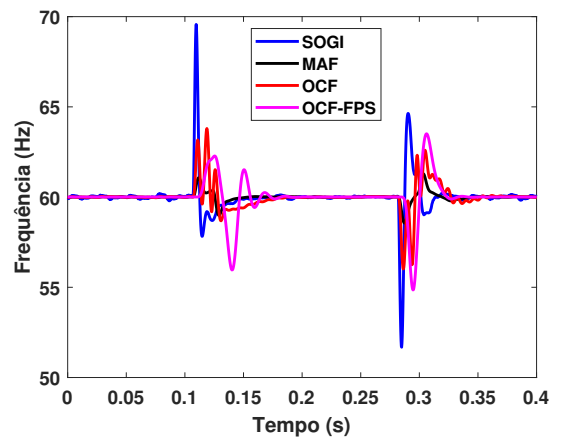
(c)



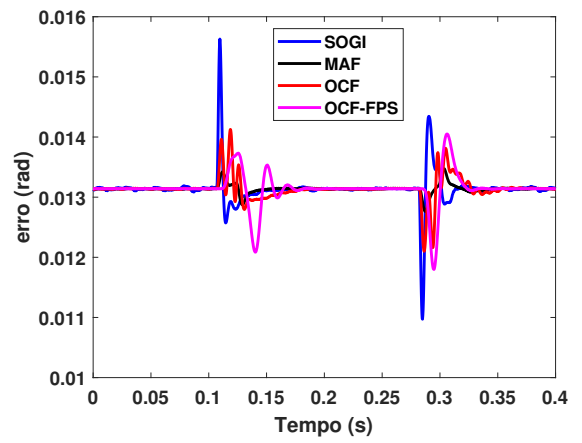
(d)



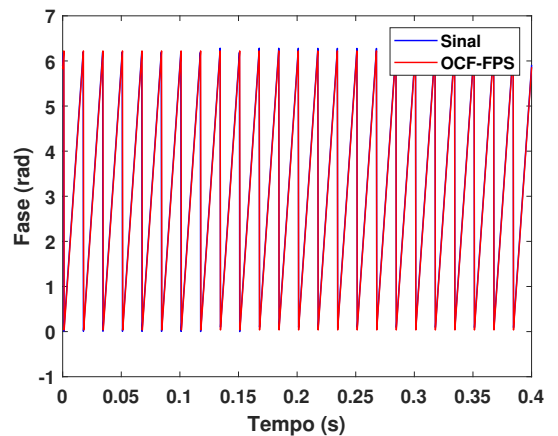
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Testes realizados com um sinal com afundamento em amplitude de 50% relativamente à amplitude da freq. fund.

Fig. 7. Testes realizados com um sinal com afundamento em amplitude de 70% relativamente à amplitude da freq. fund.

As Figuras 6.a-c e 7.a-c mostram a tensão no domínio do tempo, a estimativa dos *PLLs* para a frequência e o erro de fase produzido pelas técnicas desses *PLLs*, para afundamentos de 50% e 70%, respectivamente, em relação à amplitude da frequência fundamental. Verifica-se que o *SOGI* convencional tem maiores valores de ultrapassagem (*undershoot/overshoot*) com relação à frequência fundamental nessa transição, além de maiores oscilações nas amplitudes das frequências em regime permanente. Em relação à ultrapassagem, o *OCF-FPS* foi o que apresentou menor valor quando submetido a 50% de afundamento, ao passo que o *MAF* para o caso com afundamento de 70% teve melhor resultado; porém, no que se refere ao ruído e às oscilações em regime permanente, as técnicas que utilizam *OCF* apresentaram melhor resultado em ambos os casos.

As Figuras 8.a-c mostram a tensão no domínio do tempo, a estimativa dos *PLLs* para a frequência e o erro de fase produzido pelas técnicas desses *PLLs*, para afundamento com a presença de componente harmônica de 5ª ordem e com DHT de 7%. Observa-se que a técnica *MAF* foi a que apresentou melhor valor de ultrapassagem. No entanto, em regime estacionário a técnica *OCF-FPS* - por apresentar uma melhor filtragem - foi a que apresentou melhor resultado no que se refere ao ruído e às oscilações, assim como melhor tempo de acomodação, superando as outras técnicas.

C. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para testar a melhoria introduzida pelo uso do filtro *OCF-FPS* no *SOGI-PLL* para rastrear mudanças de frequência, foi realizado uma simulação em Matlab/Simulink, pela aplicação de um sinal de tensão sintético, onde é realizado em um dado momento um desvio de frequência de 60 para 65 Hz. No sinal embutiu-se harmônicas de 5ª (1/5 da amplitude fundamental) e 7ª (1/7 da fundamental) ordens. Este teste foi realizado por simulação, dado que a fonte programável empregada não permite a programação com variação de frequência de operação.

A Figura 9.a mostra a resposta ao degrau de 60 para 65 Hz para as 4 técnicas, *SOGI*, *MAF*, *OCF* e *OCF-FPS*.

Através de simulação no Matlab/Simulink, pode-se verificar que tanto a técnica *MAF*, bem como a técnica *OCF-FPS* apresentaram melhores valores de ultrapassagem (*undershoot/overshoot*) com relação à frequência fundamental nessa transição. Com relação ao tempo de acomodação, as 3 técnicas, *MAF*, *OCF* e *OCF-FPS*, apresentaram valores praticamente idênticos. Aqui também foi observado que o *OCF-FPS* apresentou maiores oscilações em regime estacionário nessa comparação.

Já a Figura 9.b apresenta o erro percentual em frequência para essa transição de 60 para 65 Hz. Pode ser observado que para as 3 técnicas, *MAF*, *OCF* e *OCF-FPS*, o erro em regime estacionário é zero.

D. TABELA RESUMO COMPARATIVO

A Tabela I apresenta um resumo comparativo e quantitativo da dinâmica entre as quatro técnicas, tanto para os resultados experimentais, bem como para os dados de simulação. Onde: M_p é a porcentagem de ultrapassagem (*undershoot/overshoot*); t_s é o tempo de acomodação em frequência (segunda coluna); a terceira coluna (oscilação)

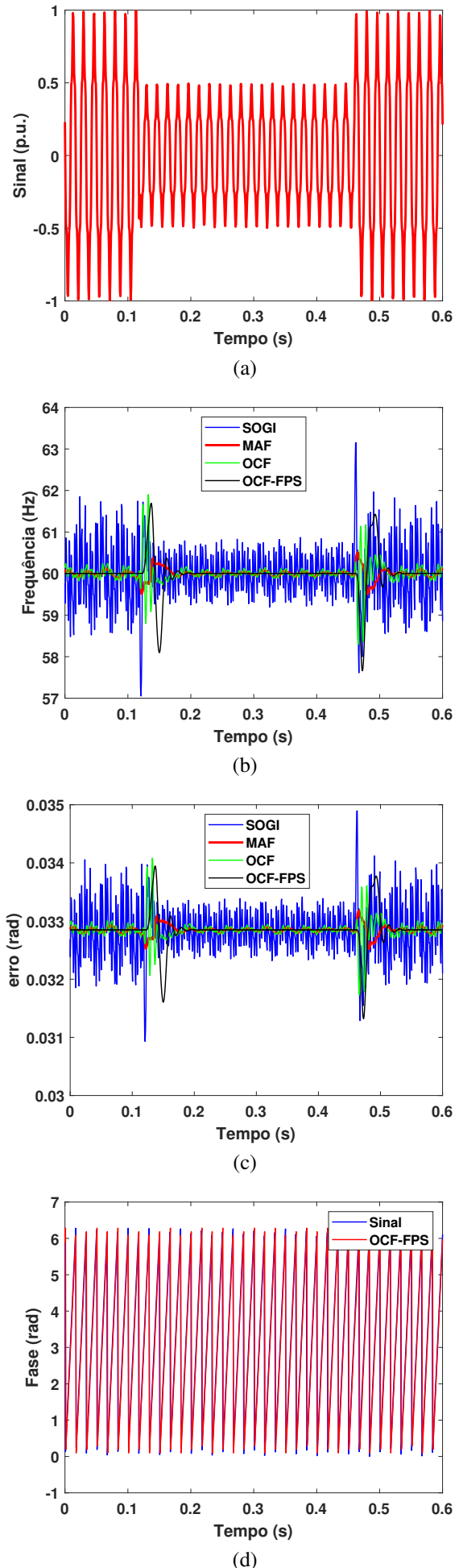
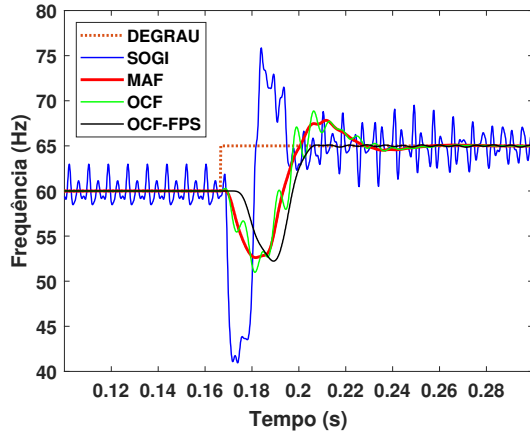
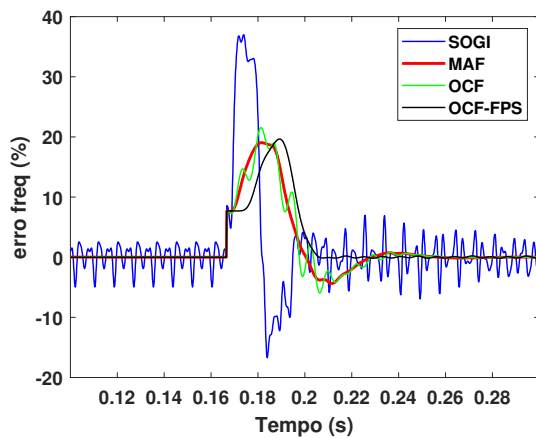


Fig. 8. Testes realizados com um sinal com afundamento e contaminado com harmônica de 5ª ordem e com DHT de 7%.



(a)



(b)

Fig. 9. Desempenho dinâmico para rastreamento de frequência: (a) frequência fundamental estimada pelo *SOGI* convencional, pelo *SOGI* com filtro *MAF*, pelo *SOGI* com filtro *OCF* e pelo *SOGI* implementado pela junção das técnicas *OCF* e *FPS*; b) erro em frequência produzido pelas técnicas desses *PLLs*.

mostra os limites nas amplitudes das frequências em regime permanente. Os dados apresentados evidenciam que a proposta do *OCF-FPS* tem um desempenho inferior ao *MAF* em percentagem de ultrapassagem, em todos os resultados; no entanto, em relação às outras técnicas o *OCF-FPS* apresenta melhor desempenho. Em relação ao tempo de acomodação, o *OCF-FPS* apresenta desempenho melhor ou igual às outras técnicas. Por fim, em relação aos limites nas amplitudes das frequências em regime permanente, o *OCF-FPS* apresenta uma vantagem em relação às outras técnicas, visto que a oscilação é praticamente nula para todos os resultados.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo, um novo *PLL* foi proposto, que usa o filtro de Fourier de um ciclo, *OCF*, aplicado nas tensões de saída $\alpha\beta$ da estrutura *SOGI*, eliminando componentes harmônicas presentes na tensão de entrada da rede monofásica. Além disso, esta proposta emprega os fundamentos do modelo de controle preditivo, onde as tensões de saída desse filtro *OCF* são então utilizadas como entrada nesse algoritmo, e com a obtenção de um conjunto finito de ângulos. Com esse conjunto finito de ângulos, uma estimativa da posição angular ideal

TABELA I
Respostas do *SOGI-PLL*, *SOGI-MAF*, *SOGI-OCF* e *SOGI-OCF-FPS*

Parameters	Mp [%]	ts [s] (freq.)	osc. [Hz]
50% afundamento			
<i>SOGI-PLL</i>	8.47	0.0442	+/-0.20
<i>SOGI-MAF</i>	1.67	0.0547	+/-0.01
<i>SOGI-OCF</i>	2.82	0.0442	+/-0.01
<i>SOGI-OCF-FPS</i>	1.31	0.0547	0.00
70% afundamento			
<i>SOGI-PLL</i>	13.96	0.0408	+/-0.07
<i>SOGI-MAF</i>	2.69	0.0408	+/-0.03
<i>SOGI-OCF</i>	6.62	0.0635	+/-0.03
<i>SOGI-OCF-FPS</i>	8.98	0.0373	0.00
c/ afund., harm. ordem 5 TDH = 7%			
<i>SOGI-PLL</i>	4.89	0.0220	+/-0.84
<i>SOGI-MAF</i>	0.81	0.0580	+/-0.07
<i>SOGI-OCF</i>	3.14	0.0570	+/-0.09
<i>SOGI-OCF-FPS</i>	3.14	0.0435	+/-0.00
desvio de frequência			
<i>SOGI-PLL</i>	1.15	0.0740	+/-4.72
<i>SOGI-MAF</i>	1.03	0.0890	+/-0.01
<i>SOGI-OCF</i>	1.04	0.0890	+/-0.01
<i>SOGI-OCF-FPS</i>	1.03	0.0905	+/-0.01

ótima é obtida através de uma função de custo minimizada. Com essa técnica eliminou-se a necessidade da utilização de controladores *PI*, comumente utilizados em *PLLs* para sincronização de redes.

Nesse contexto, os resultados apresentados permitem respaldar a atuação da proposta. Como pode ser visto pelos resultados, a proposta *OCF-FPS-PLL* apresenta desempenho equiparável a soluções como as técnicas *MAF* e *OCF*, sendo que estas usam controladores *PI* no *SRF-PLL*, para os testes sob afundamento, queda de tensão balanceada sob a presença de harmônica de 5ª ordem e como *THD* de 7% e tensão de rede balanceada com desvio de frequência de 60 a 65 Hz.

Porém, pelo aumento do número de iterações na implementação do algoritmo *FPS*, a carga computacional pode se tornar elevada. Ou seja, para laços aninhados com índices n ($n \times n$), o erro é proporcional a $2^{-(n-1)}$, ocorrendo o inverso com o tempo de processamento.

Com este trabalho, duas melhorias puderam ser observadas na implementação do *PLL* proposto. Observando-se a Tabela I, apesar da técnica *MAF* apresentar um melhor *overshoot*, a técnica *OCF-FPS* apresenta um melhor tempo de acomodação, além de uma oscilação nula em regime estacionário. Em segundo lugar, o *FPS* implementado no *PLL* neste trabalho tem a vantagem de não utilização de controladores *PI*, que necessitam de ajustes para cada ponto de operação.

AGRADECIMENTOS

Merece aqui os agradecimentos dos autores pelo apoio financeiro recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto 447674/2014-5.

REFERÊNCIAS

- [1] B. B. Purkayastha, K. K. Sarma, *A Digital Phase Locked Loop based Signal and Symbol Recovery System for Wireless Channels*, 1^a ed., Springer, India, 2015.
- [2] N. F. Jamaludin, A. F. Abidin, “Phase-Locked Loop (PLL) controller for Distribution Synchronous static compensator (D-STATCOM) to mitigate voltage flicker”, in *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, Junho 2013.
- [3] C. A. Arbugeri, N. C. D. Pont, T. K. Jappe, S. A. Mussa, T. B. Lazzarin, “Control system for multi-inverter parallel operation in uninterruptible power systems”, *SOBRAEP-Eletrônica de Potência*, vol. 24, no. 1, pp. 37–46, Março 2019.
- [4] S. Agrawal, Y. K. Nagar, D. K. Palwalia, “Analysis and implementation of shunt active power filter based on synchronizing enhanced PLL”, in *International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, Agosto 2017.
- [5] P. Lamo, F. Lopez, A. Pigazo, F. J. Azcondo, “An Efficient FPGA Implementation of a Quadrature Signal-Generation Subsystem in SRF PLLs in Single-Phase PFCs”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 5, pp. 3959–3969, Maio 2017.
- [6] L. Tong, X. Zou, S. Feng, Y. Chen, Y. Kang, Q. Huang, Y. Huang, “An SRF-PLL-Based Sensorless Vector Control Using the Predictive Deadbeat Algorithm for the Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Generator”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 6, pp. 2837–2849, Junho 2014.
- [7] M. Karimi-Guartermani, *Phase-Locked Loop Structures for Power and Energy Applications*, 1^a ed., IEEE-Press-Wiley, Abril 2014.
- [8] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 3^a ed., IEEE-Press-Wiley, 2011.
- [9] S. Chung, “A phase tracking system for three phase utility interface inverters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 431–438, Maio 2000.
- [10] S. Golestan, M. Ramezani, J. M. Guerrero, M. Monfared, “DQ-frame cascaded delayed signal cancellation-based PLL: Analysis, design, and comparison with moving average filter-based PLL”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 3, pp. 1618–1632, Março 2015.
- [11] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, “A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator”, in *IEEE 37th Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1511–1516, Junho 2006.
- [12] F. Xiao, L. Dong, L. Li, X. Liao, “A Frequency-Fixed SOGI-Based PLL for Single-Phase Grid-Connected Converters”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 3, pp. 1713–1719, Março 2017.
- [13] M. Xie, H. Wen, C. Zhu, Y. Yang, “DC Offset Rejection Improvement in Single-Phase SOGI-PLL Algorithms: Methods Review and Experimental Evaluation”, *IEEE Access*, pp. 12810–12819, Junho 2017.
- [14] S. Reza, M. Ciobotaru, V. G. Agelidis, “Tracking of time-varying grid voltage using DFT based second order generalized integrator technique”, in *IEEE International Conference on Power System Technology*, Outubro-Novembro 2012.
- [15] O. M. Arafa, “High Performance Single-Phase PLL with Sliding Fourier Transform as a Phase Detector”, in *6th International Conference on Advanced Control Circuits and Systems*, Novembro 2019.
- [16] O. Barros, A. Frizzera, L. F. Encarnacao, “Desenvolvimento de um phase-locked loop a partir de um combinador linear de Fourier”, *Eletrônica de Potência*, vol. 22, no. 2, pp. 148–155, Novembro 2016.
- [17] F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez, C. Martinez-Penalver, “New algorithm for grid synchronization based on Fourier series”, in *European Conference on Power Electronics and Applications*, Setembro 2007.
- [18] H. Liu, Y. Sun, H. Hu, Y. Xing, “A new single-phase PLL based on discrete fourier transform”, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Março 2015.
- [19] F. Lino, B. N. Andrade, R. V. Jacomini, A. J. Sguarezi, F. Costa, “SOGI-PLL APRIMORADO POR ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO”, *SOBRAEP-Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 1, pp. 94–103, Março 2021.
- [20] B. N. Andrade, L. H. S. Silva, A. J. Sguarezi, F. F. Costa, “Enhanced SOGI-PLL by moving-average filter and one-cycle fourier algorithm”, in *IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Novembro 2017.
- [21] L. H. S. Silva, *PLL Baseado em Estimador de Sequência Positiva Adaptável à Variação de Frequência da Rede*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brasil, 2019.
- [22] L. H. S. Silva, A. J. Sguarezi, D. A. Fernandes, F. F. Costa, A. J. M. Cardoso, “A robust phase-locked loop against fundamental frequency deviations and harmonic distortions”, *ELSEVIER - Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 338–347, Outubro 2018.
- [23] L. H. S. Silva, R. B. A. Cunha, A. J. Sguarezi, J. A. T. Altuna, D. A. Fernandes, F. F. Costa, “EXTRAÇÃO DE COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA BASEADA EM MÍNIMOS QUADRADOS APLICADA À SINCRONIZAÇÃO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA”, *SOBRAEP-Eletrônica de Potência*, vol. 21, no. 4, pp. 255–265, Dezembro 2016.

- [24] M. Abdelrahem, C. M. Hackl, R. Kennel, “Finite Position Set-Phase Locked Loop for Sensorless Control of Direct-Driven Permanent-Magnet Synchronous Generators”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, pp. 3097–3105, Abril 2018.
- [25] Y. Yang, K. Zhou, F. Blaabjerg, “Exploitation of digital filters to advance the single-phase T=4 delay PLL system”, in *IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, pp. 1–6, Dezembro 2016.
- [26] M. Saitou, N. Matsui, T. Shimizu, “A Control Strategy of SinglePhase Active Filter Using a Novel d-q Transformation”, in *Proceedings of the Industry Applications Conference 2003*, pp. 1222–1227, Outubro 2003.
- [27] S. M. Silva, B. M. Lopes, B. J. C. Filho, R. P. Campana, W. C. Bosventura, “Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-Phase Grid-Connected Systems”, in *Proceedings of the Industry Applications Conference 2004*, pp. 2259–2263, Outubro 2004.
- [28] Y. Han, M. Luo, X. Zhao, J. M. Guerrero, L. Xu, “Comparative Performance Evaluation of Orthogonal-Signal-Generators Based Single-Phase PLL Algorithms-A Survey”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 5, pp. 3932–3943, Maio 2016.
- [29] A. Bouknadel, N. Ikken, A. Haddou, N. Tariba, H. E. Omari, “A new SOGI-PLL method based on fuzzy logic for grid connected PV inverter”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 2264–2273, Agosto 2019.
- [30] Z. Zheng, M. Guo, N. Yang, T. Jin, “Single-phase flexible arc suppression device based on BSC-SOGI-PLL method for distribution networks”, *Electrical Power and Energy Systems*, Abril 2020.
- [31] F. Lino, J. Assis, D. A. Fernandes, R. V. Jacomini, F. F. Costa, A. J. Sguarezi, “One-Cycle Fourier Finite Position Set PLL”, *MDPI-Energies*, vol. 14, no. 7, Março 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS

Fernando Lino, recebeu o título de Engenheiro Eletricista e o grau de Mestre em 1982 e 2008, pela FEC/UNICAMP e PUC-Campinas, respectivamente. Trabalhou durante 35 anos na iniciativa privada como engenheiro de desenvolvimento de HW/SW e como gerente de suporte técnico em equipamentos de telecomunicações. Desde 2012 é professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP). Seus interesses de pesquisa são: geradores de indução alimentados duplamente, energia eólica e modelagem e controle de sistemas.

Bruna Neves de Andrade, recebeu o título de Bacharel em Engenharia Elétrica e grau de Mestre em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal da Bahia - UFBA. Participou do Programa de Iniciação Científica pelo Instituto Federal da Bahia. Atuou como estagiária na empresa RCONSULT ENGENHARIA ELÉTRICA. Prestou consultoria em projetos fotovoltaicos durante dois anos na

Eco-Solis Energia. Atualmente, é professora dos cursos de Engenharia Elétrica, Civil, Mecânica, Produção e Gestão em Recursos Humanos da Faculdade Pitágoras de Vitória da Conquista - BA. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrotécnica.

Rogério Vani Jacomini, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela UNISAL, e os graus de Mestre e Doutor pela FEEC/UNICAMP em 2004, 2008 e 2012, respectivamente. Trabalhou como pesquisador na UFABC de 2012 a 2013 pelo programa de pós-doutorado da UFABC. Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP). Seus interesses de pesquisa são: acionamentos de máquinas elétricas, gerador de indução com dupla alimentação, controle de potência, redes inteligentes de energia elétrica e energia eólica.

Claudionor Francisco do Nascimento, Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE/CCET) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica de potência. Atua principalmente nos seguintes temas: filtros ativos de potência, sistemas inteligentes, redes neurais artificiais, qualidade da energia elétrica, harmônicos em sistemas elétricos de potência e conexão de fontes alternativas em sistemas de potência. É assessor da FAPESP. É membro do IEEE e da SOBRAEP.

Alfeu Joãozinho Sguarezi Filho, recebeu os graus de Mestre e Doutor pela UNICAMP, respectivamente em 2007 e 2010. É professor da Universidade Federal do ABC - UFABC, em Santo André, Brasil, lecionando nas áreas de Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos. Seus interesses de pesquisa são: acionamentos de máquinas, energia eólica e fotovoltaica, geradores de indução alimentados duplamente, controle de energia e sistemas de energia elétrica. É membro do IEEE e da SOBRAEP.

Fabiano Fragoso Costa, recebeu o título de Engenheiro Eletricista, o grau de Mestre e o de Doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente, pela Escola Politécnica da USP (1997), pela UFPB (2001) e pela UFCG (2005). Atualmente, é Professor Adjunto da Universidade Federal da Bahia junto ao Departamento de Engenharia Elétrica. Seus interesses de pesquisa se concentram nos tópicos de sincronização e controle em geração distribuída. Também possui interesses no desenvolvimento de técnicas de processamento digital de sinais aplicáveis ao processamento e monitoramento de energia da rede elétrica. Além disso, possui atuação em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento junto a concessionárias do setor elétrico. É membro do IEEE e da SOBRAEP.