

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. A principal contribuição deste trabalho é a não utilização de controladores Proporcional+Integral (*PI*) por *PLLs* para estimar o ângulo de fase da rede. Os resultados obtidos em uma bancada experimental validam o método proposto.

Palavras-chave – Filtro de Fourier de Um Ciclo, Modelo de Controle Preditivo, *PLL*, *PLL* Integrador Generalizado de Segunda Ordem, referencial- $\alpha\beta$, referencial-*dq*.

SOGI-PLL enhanced by one-cycle Fourier algorithm and finite state control

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, Model Predictive Control, *PLL*, *SOGI-PLL*, $\alpha\beta$ -frame, *dq*-frame.

NOMENCLATURA

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

Manuscript received 11/09/2021; first revision 12/27/2021; accepted for publication 05/02/2022, by recommendation of Editor Marcelo Lobo Heldwein. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2022.2.0045>.

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 *DHT*, 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

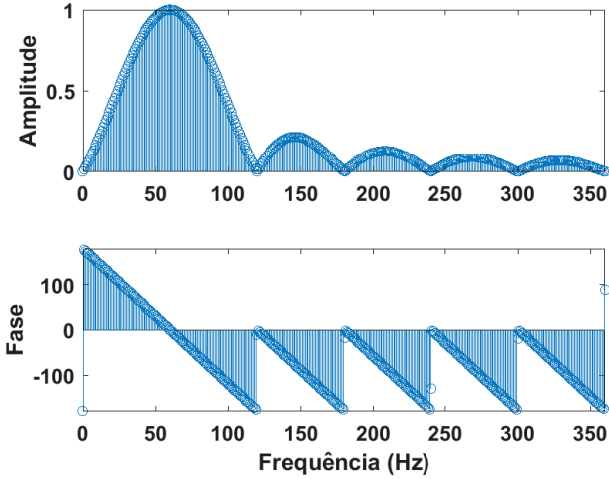


Fig. 1. Diagrama de Bode para o filtro de Fourier de um ciclo.

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.

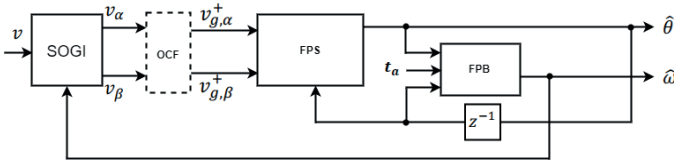


Fig. 2. Diagrama do *OCF-FPS-PLL* com emprego das técnicas *OCF* e *FPS*.

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:

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

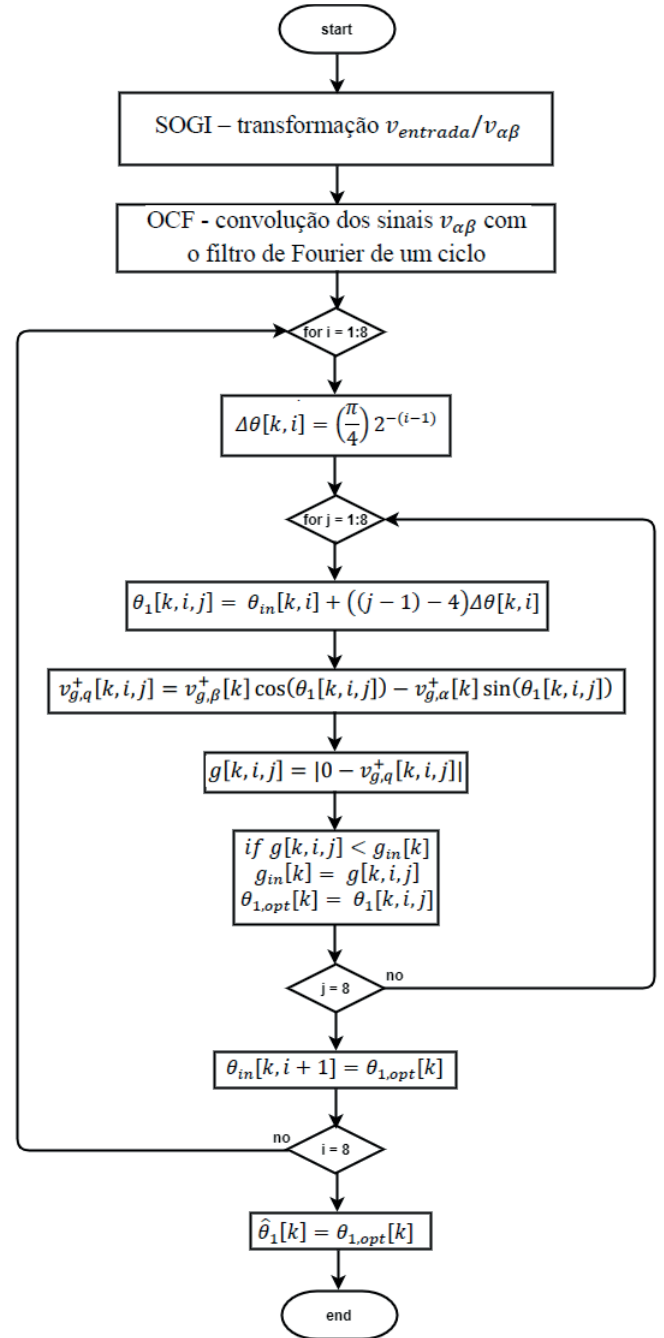


Fig. 3. Fluxograma da proposta *OCF-FPS-PLL*.

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*.

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

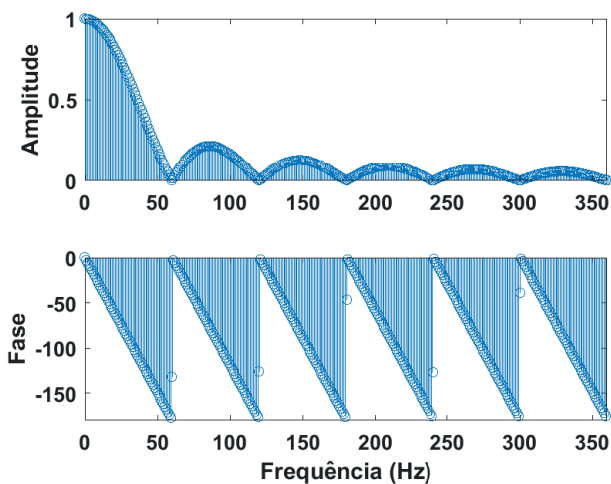


Fig. 4. Diagrama de Bode para o filtro de média móvel.

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 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.

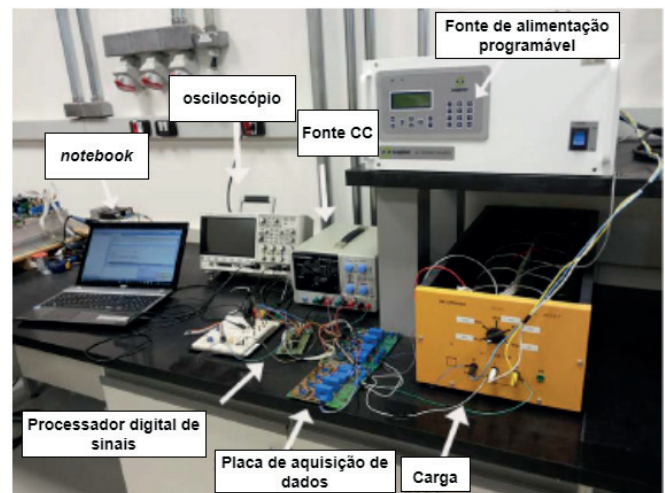


Fig. 5. Sistema experimental construído no LEPS da UFABC - [19].

B. Resultados Experimentais

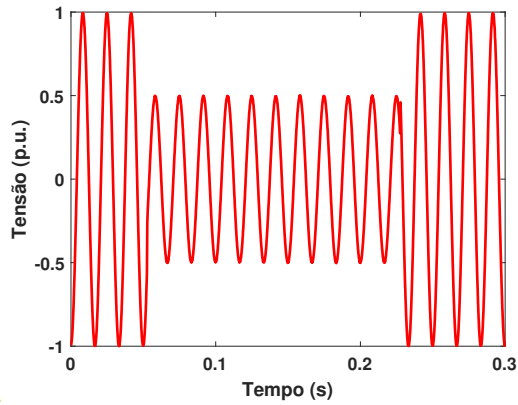
Para validar a técnica proposta, 3 grupos de resultados experimentais são aqui discutidos.

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.

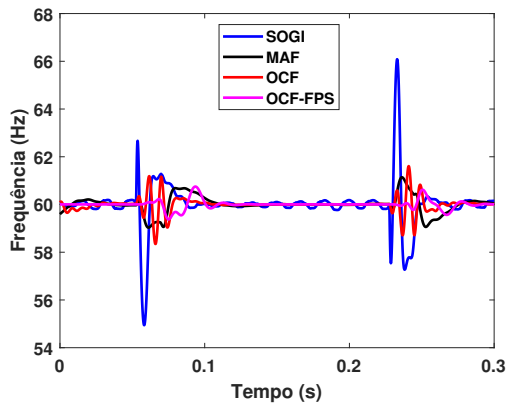
Os testes foram realizados com um sinal submetido nas seguintes condições de operação:

1. Afundamento de 50% em relação à amplitude da frequência fundamental;
2. Afundamento de 33% em relação à amplitude da frequência fundamental;
3. Com afundamento, com a presença de componente harmônica de 5ª ordem e com DHT de 7%.

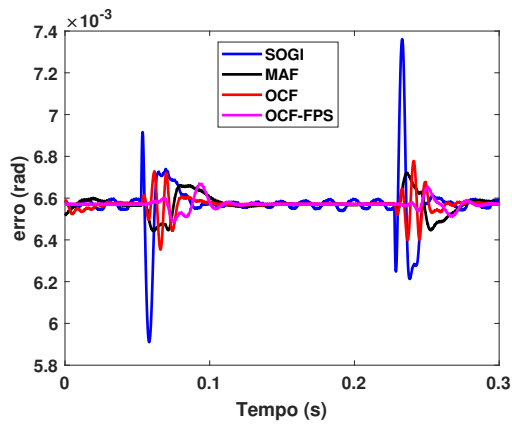
As Figuras 6.a a 6.c e 7.a a 7.c mostram a tensão no domínio do tempo, a estimativa dos *PLLs* para a frequência e o erro de fase produzido pelas técnicas desses *PLLs*, para afundamentos de 50% e 33%, respectivamente, em relação à amplitude da frequência fundamental. Verifica-se que o *SOGI* convencional 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*-



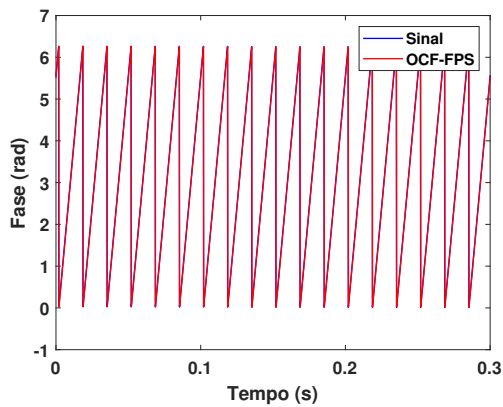
(a)



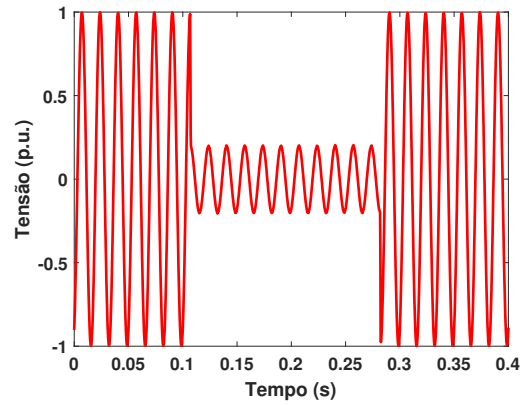
(b)



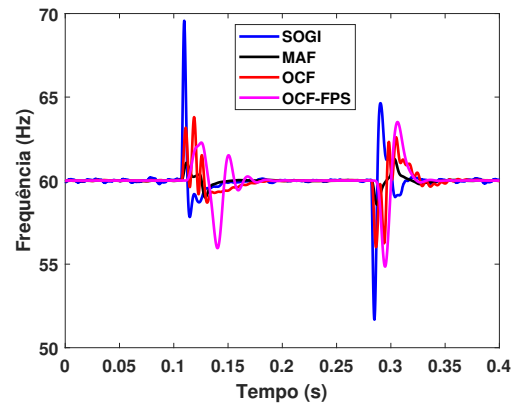
(c)



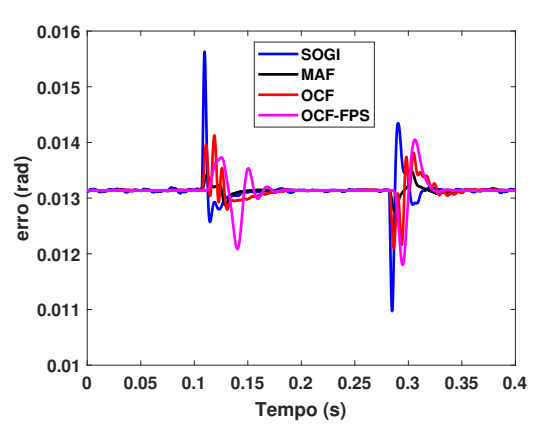
(d)



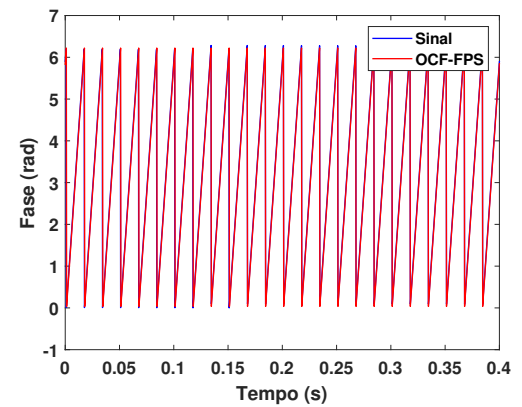
(a)



(b)



(c)



(d)

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

Fig. 7. Testes realizados com uma tensão com afundamento em amplitude de 33% relativamente à amplitude da freq. fund.

FPS foi o que apresentou menor valor quando submetido a 50% de afundamento, ao passo que o *MAF* para o caso com afundamento de 33% 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 a 8.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 percentagem de ultrapassagem (*undershoot/overshoot*); t_s é o tempo de acomodação em frequência (segunda coluna); a terceira coluna (oscilação) 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

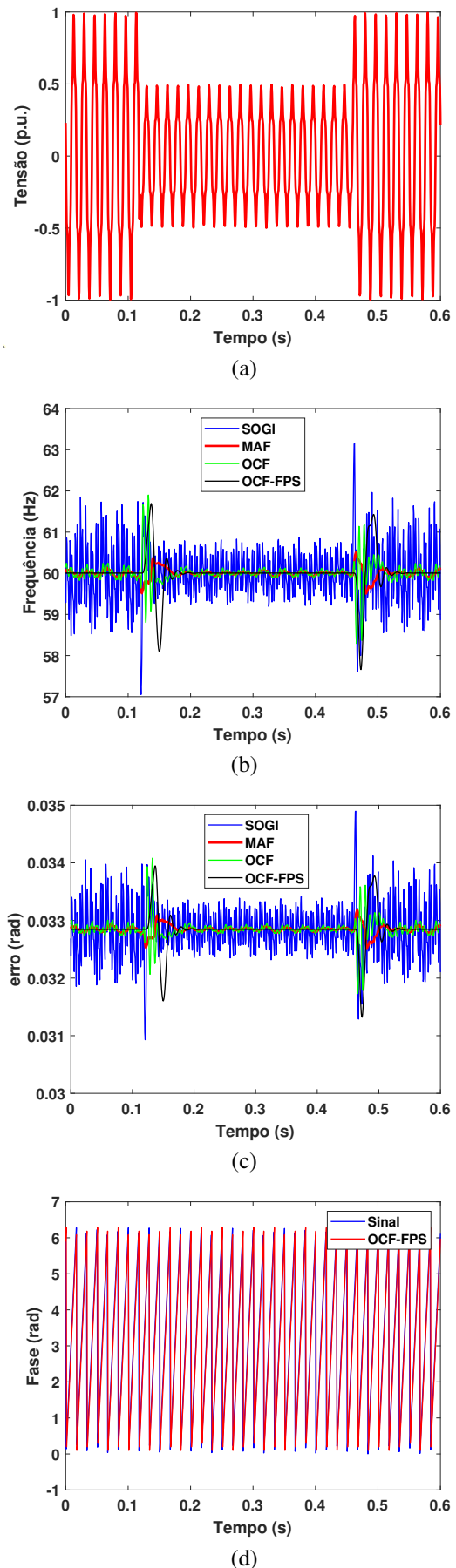
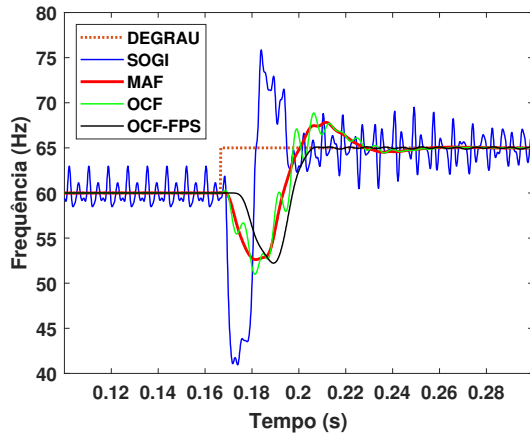
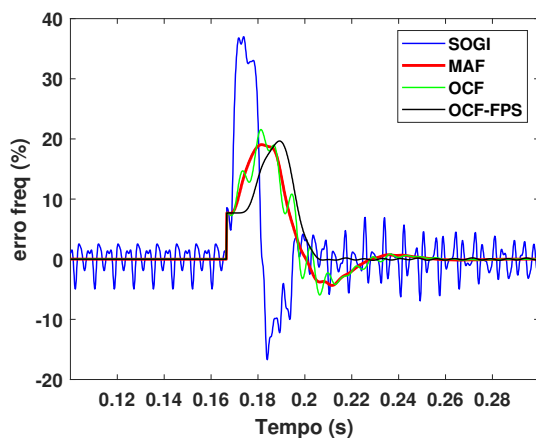


Fig. 8. Testes realizados com uma tensão com afundamento e contaminado com harmônica de 5ª ordem e com DHT de 7%.



(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*.

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 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

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
33% 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 DHT = 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

sob afundamento, queda de tensão balanceada sob a presença de harmônica de 5ª ordem e como *DHT* 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*, 1ª 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. Arbuseri, 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*, 1ª ed., IEEE-Press-Wiley, Abril 2014.
- [8] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, 3ª 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. Frizera, 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 Sothern 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 pelo Centro Salesiano Universitário de São Paulo - UNISAL, e os graus de Mestre e Doutor pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas - 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 Fragozo 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.