



ESTUDO DE TÉCNICAS CONVENCIONAIS E APERFEIÇOADAS DE PLL PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS

Ênio C. Resende*¹, Marcus E. T. Souza Jr. ¹, Fernando C. Melo¹, Gustavo B. de Lima¹, Luiz C. G. de Freitas¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia
Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP)
Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU)
Uberlândia, MG, Brasil 38400-902

Resumo – Com a crescente expansão da Geração Distribuída utilizando energias renováveis, tais como eólica e fotovoltaica, faz-se necessária a implementação de técnicas robustas de sincronização à rede elétrica por parte dos inversores. Desse modo, o principal objetivo do presente artigo é estudar as técnicas Convencionais e Aperfeiçoadas de PLL para sistemas de Geração Distribuída conectados à rede via conversor, tanto monofásicos quanto trifásicos, para sistemas de baixas e altas potências, respectivamente. Assim, será realizada uma abordagem teórica dessas quatro técnicas cujos resultados computacionais alcançados, além de corroborar a teoria exposta, orientam o projetista a selecionar o melhor método para a sua aplicação.

Palavras-Chave – Geração Distribuída (GD), Monofásico, PLL Convencional, PLL Aperfeiçoado, Trifásico.

STUDY OF CONVENTIONAL AND ENHANCED PLL TECHNIQUES FOR SINGLE AND THREE-PHASE SYSTEMS

Abstract – The increasing expansion of Distributed Generation using renewable energy such as wind and photovoltaic, requires the implementation of robust inverter synchronization techniques to the grid. Thus, the main objective of this paper is to study the Conventional and Enhanced PLL techniques for both single-phase and three-phase Distributed Generation systems with low and high power capacities, respectively. Therefore, a theoretical approach of these four techniques were performed and the achieved results corroborate the exposed theory and guide the designer for selecting the best method for its applications.

Keywords – Conventional PLL, Distributed Generation (DG), Enhanced PLL, Single-Phase, Three-Phase.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos operam sob parâmetros elétricos específicos. Deste modo, a conexão de quaisquer equipamentos, sejam eles de consumo ou de produção de energia elétrica, que estejam dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos reguladores, estarão aptos a trabalhar com altos níveis de confiabilidade e qualidade. Um dos requisitos mais importantes é que as tensões e as correntes sejam senoidais CA com baixo conteúdo harmônico. Mais ainda, a amplitude, a frequência e a fase das tensões devem estar dentro dos limites estabelecidos. Preenchê-los, garante ao menos o funcionamento apropriado dos dispositivos, que geralmente são construídos para estes valores. Outra exigência se dá pelo modo como as redes elétricas foram desenvolvidas, isto é, reside na quantidade de fases que elas possuem. Na grande maioria dos casos, os sistemas podem ser monofásicos ou trifásicos. Consequentemente, os aparelhos elétricos devem estar dentro de uma destas duas categorias, carregando consigo suas respectivas particularidades.

As tecnologias de Geração Distribuída (GD) têm, todavia, características muito variadas entre si e mesmo diferentes daquelas que o sistema elétrico demanda. Cada uma delas pode produzir energia elétrica de saída CA ou CC, com baixas ou altas frequências, de magnitudes abaixo ou acima dos limites da rede, podem ser variáveis e intermitentes ou despacháveis e de pequeno, médio ou grande portes [1]. Compreende-se que, para a conexão ao sistema elétrico, os dispositivos precisam de adequação das tensões geradas. Estas adaptações são feitas com o emprego da eletrônica de potência (EP) entre a fonte primária de produção de eletricidade e a rede elétrica. A EP é o caminho natural para tanto, já que o conjunto de seus equipamentos foram criados para resolver tais impasses, além de trazer diversos outros benefícios operacionais [2]. Para qualquer tipo de GD, pode ser elaborado um conversor próprio que possibilite a conexão adequada com o sistema elétrico.

Dentre as adequações necessárias, a equivalência das frequências e das fases da GD com as da rede elétrica é de elevada relevância e é chamada de método de sincronização.

Existem diferentes técnicas de sincronização, todas aplicadas diretamente no controle dos conversores. As três mais comuns usadas são o método de detecção de passagem por zero, a filtragem das tensões da rede e os métodos de *Phase-Locked Loop* (PLL) [3]. A primeira se baseia apenas, como o nome indica, na detecção de passagens da tensão por zero para definir a sincronização. É a mais simples das três, mas apresenta resultados inconsistentes, principalmente quando a rede possui distorções consideráveis. A segunda extrai a fase da rede, sendo superior à primeira técnica. Apesar disso, dois problemas surgem: a técnica não responde bem às variações da rede e pode introduzir um atraso de fase. Ambos são obviamente inadequados para sincronização de fontes de GD.

A terceira e última técnica é a mais utilizada atualmente e a que mais possui vantagens. Os métodos PLL eliminam os problemas anteriormente encontrados nas outras duas técnicas. Além disso, a partir do PLL Convencional foram desenvolvidas outras estruturas mais robustas que aprimoram ainda mais a sincronização. Para demonstrar e elucidar o comportamento destes métodos para as tecnologias de GD conectadas à rede, este trabalho apresenta e compara o PLL Convencional e o PLL Aperfeiçoado em suas versões monofásicas e trifásicas. Tais estudos permitem que engenheiros, cientistas e projetistas possam aprender a escolher a técnica mais adequada para suas necessidades.

O artigo foi dividido da seguinte forma. Nas duas primeiras seções, a teoria geral sobre os métodos PLL Convencional e Aperfeiçoado é apresentada, sendo a primeira para o caso monofásico e a segunda para o trifásico. Em seguida, uma seção é dedicada aos resultados de simulações computacionais de todas as técnicas discutidas. A metodologia empregada é detalhada para cada caso e os resultados comparativos entre os sistemas monofásicos e trifásicos são abordados.

II. MÉTODOS PLL MONOFÁSICOS

Serão abordados neste trabalho duas técnicas PLL monofásicas: PLL Convencional e Aperfeiçoado.

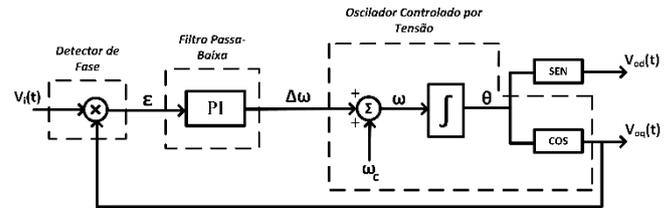
A. PLL Monofásico Convencional

O PLL Convencional monofásico foi um dos primeiros a serem desenvolvidos e utilizados, sendo, assim, a base para as outras técnicas. A Figura 1 ilustra sua estrutura. Como pode ser visto, o Detector de Fase (DF) é composto por um multiplicador simples. Nota-se que, o Filtro Passa-Baixa (FPB) é constituído de um compensador Proporcional-Integral (PI) de primeira ordem, enquanto o Oscilador Controlado por Tensão (OCT, também conhecido como VCO – *Voltage-Controlled Oscillator*) recebe a frequência de centro (para rede de 60 Hz, a frequência de referência é 377 rad/s) e possui um integrador, para se obter o ângulo de fase, e um oscilador, gerando formas de ondas senoidal e cossenoidal. Salienta-se que a principal vantagem dessa técnica é a sua simplicidade de implementação [4].

Porém, pode se observar que sua principal desvantagem é a utilização de um multiplicador simples para efetuar a detecção de fase. O resultado (ε), o qual é proveniente da multiplicação entre o sinal de entrada $V_i(t)$ e a saída do bloco cosseno $V_{os}(t)$, é um nível CC com oscilações no dobro da frequência do sinal de entrada. Essas oscilações são propagadas até o sinal de saída, o qual pode apresentar um erro de fase em

regime permanente, após possíveis variações na frequência do sinal de entrada que, nesse caso, é a tensão da rede elétrica. Isso pode acarretar na operação insatisfatória do sistema e em erros na medição da frequência da tensão da rede [5], [6]. Para resolver esse problema, são necessárias configurações de DF mais avançadas [7], como o utilizado no PLL monofásico Aperfeiçoado, o qual se baseia em um filtro *notch* adaptativo, como será abordado no próximo tópico.

Figura 1: Diagrama esquemático do PLL Convencional monofásico.

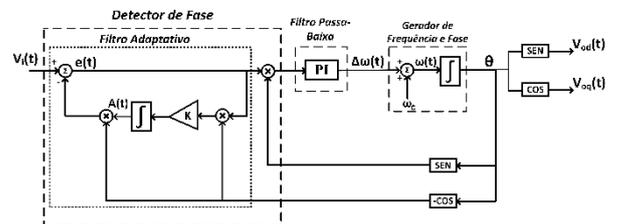


B. PLL Monofásico Aperfeiçoado

O PLL Convencional apresenta resultados satisfatórios de sincronização entre o inversor e a rede. No entanto, como foi visto, sua operação está intrinsecamente associada a grandes imprecisões na determinação do valor da frequência do sistema. Desta forma, o monitoramento feito a partir do PLL, que pode ser uma de suas funções, é prejudicado com menor precisão.

A necessidade de corrigir os problemas operacionais do PLL Convencional, conferindo-lhe maior robustez e precisão, norteou a evolução da pesquisa acadêmica sobre as técnicas de sincronismo. Nesse contexto, foi proposto o PLL Aperfeiçoado (Figura 2) [8] que se objetiva à mitigação da oscilação de frequência através da implementação de um filtro adaptativo de primeira ordem que exerce a função de um detector de fase. É necessário ressaltar que filtros adaptativos são definidos por algoritmos com parâmetros variáveis, capazes de se auto ajustar em virtude das variações que ocorram em seu sinal de entrada. Dessa forma, a inserção da filtragem adaptativa em técnicas PLL confere maior robustez à operação da malha PLL, seja em relação à variação de parâmetros internos, seja em relação à distorção harmônica externa ao sistema [9], [10].

Figura 2: Diagrama esquemático do PLL Aperfeiçoado monofásico.



O comportamento das variáveis do PLL Aperfeiçoado pode ser descrito por (1) [11]:

$$\begin{cases} e(t) = v(t) - y(t) \\ \frac{dA(t)}{dt} = Ke(t)\sin(\theta(t) - \frac{\pi}{2}) \\ \frac{d\omega'(t)}{dt} = K_i e(t)\sin(\theta(t)) \\ \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) + \frac{K_p}{K_i} \cdot \frac{d\omega'(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

onde $\omega(t)$ é a velocidade angular de operação; $\theta(t)$ é a fase do sinal de entrada; $e(t)$ é o erro de fase; $A(t)$ é a amplitude do sinal de entrada; K é o ganho que controla a convergência do valor de amplitude; K_i controla a convergência de frequência; K_p controla a convergência de fase.

Segundo [12], o PLL Aperfeiçoado apresenta resultados aprimorados de sincronização em virtude de sua filtragem adaptativa, da sua capacidade de determinar vários parâmetros do sinal de entrada (amplitude, fase e frequência) e da geração de uma componente em quadratura com o sinal de entrada que pode ser aplicada ao cálculo e controle do nível de potência reativa na saída do inversor, por exemplo.

III. MÉTODOS PLL TRIFÁSICOS

Nesta seção serão apresentadas as técnicas de PLL Convencional e Aperfeiçoada para sistemas de GD trifásicos.

A. PLL Trifásico Convencional

O método mais utilizado de PLL para inversores de geração distribuída operando em sistemas trifásicos [13] é implementado pelo princípio da Referência Síncrona (SRF-PLL - *Synchronous Reference Frame*). Essa estratégia converte a matriz de tensões trifásicas abc (referência natural) pela transformada de Park para a referência dq [T_θ] [13], como mostra a Figura 3 e as equações (2) e (3). A posição angular dessa referência dq é controlada por uma malha de realimentação que regula a componente q para zero. No regime permanente, a componente d retrata a amplitude da tensão de entrada senoidal de sequência positiva V^{+1} e o respectivo ângulo de fase é determinado pela saída da malha realimentada (θ'). As componentes d e q podem ser obtidas por (4) e (5).

$$[T_\theta] = [T_{dq}] \cdot [T_{\alpha\beta}] \quad (2)$$

$$[T_\theta] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta') & -\sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = [T_\theta] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \cos(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta') & -\sin(\theta' - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta' + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

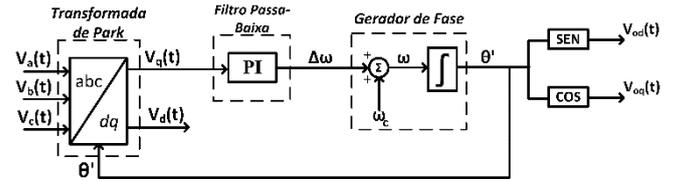
Pode-se observar que é implementada uma malha de realimentação a qual controla a componente em quadratura q . Utiliza-se o compensador PI como FPB, de modo a anular o erro de regime permanente. O PI recebe o sinal $V_q(t)$ gerando a variação da frequência angular $\Delta\omega$, o qual entra no bloco de gerador de fase, resultando no ângulo θ' .

Essa estrutura clássica é utilizada no DSOGI-PLL e DDSRF-PLL para gerar as saídas de fase e frequência [14], [15]. A principal vantagem desse método é sua simplicidade de implementação em microcontroladores, como o processador digital de sinais, comparados a outros métodos,

tal como o PLL Aperfeiçoado trifásico, o qual será apresentado no próximo tópico.

Além disso, em condições ideais de rede elétrica, i.e., sem distorções harmônicas ou desequilíbrio, um SRF-PLL com realimentação com elevada largura de banda promove uma detecção rápida e precisa da fase e amplitude da tensão da rede elétrica. Todavia, esta estrutura pode não ser adequada em aplicações que requerem elevada precisão e boa resposta dinâmica, como quando submetido a tensões desequilibradas [16].

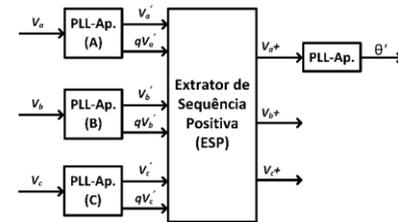
Figura 3: Diagrama esquemático do PLL Convencional trifásico.



B. PLL Trifásico Aperfeiçoado

O PLL Aperfeiçoado trifásico é composto por: um grupo de três estruturas PLL monofásicas responsável pela geração de um sistema de sinais trifásicos em quadratura com a entrada, um extrator de sequência positiva e, por fim, um quarto PLL Aperfeiçoado responsável pela determinação das informações de fase e frequência do componente de sequência positiva extraído para determinada fase. O diagrama de blocos deste esquema é ilustrado na Figura 4 [17].

Figura 4: Diagrama esquemático do PLL Aperfeiçoado trifásico.



O extrator de sequência positiva (ESP) recebe de cada uma das estruturas PLL Aperfeiçoadas dois sinais em quadratura e fornece, em sua saída, a componente de sequência positiva relativa a suas entradas. Conforme descrito em [12], os componentes de sequência positiva de um sinal podem ser extraídos a partir da seguinte equação:

$$v_{abc}^+ = [T_+] \cdot v_{abc}$$

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (6)$$

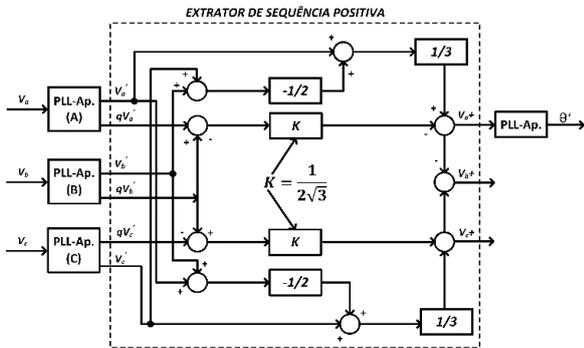
onde:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

O diagrama de blocos do extrator de sequência positiva é mostrado na Figura 5. Este método promove uma estimativa acurada do ângulo de fase de operação do sistema mesmo em condições de rede profundamente distorcidas ou

desequilibradas. Além disso em [17], por exemplo, o desempenho desta estratégia alcançou resultados qualitativamente superiores do que alguns outros métodos de sincronização trifásica já existentes, tais como o baseado no filtro de Kalman estendido e o filtro de vetor de estados para operação sob condições de rede desbalanceada e/ou com altas taxas de distorção harmônica.

Figura 5: EPLL Trifásico com extrator de sequência positiva.



IV. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Todas as técnicas PLL apresentadas tiveram suas funcionalidades validadas através de simulações computacionais. Os resultados obtidos foram analisados e comparados, embasando a teoria exposta.

A. Resultados das técnicas PLL Monofásicas

Para demonstrar a operação dos métodos PLL monofásicos e compará-los de forma justa, ambos foram submetidos às mesmas condições de rede e, para os dois, foram usados os mesmos parâmetros de PI para a correção do erro de fase. A rede é monofásica senoidal ideal com 127 Vrms de tensão e 60 Hz de frequência.

Foram feitos dois testes diferentes para as técnicas PLL Convencional e Aperfeiçoada em conjunto. Na primeira simulação, foram aplicadas variações de frequência à fonte ideal. A frequência foi reduzida de 60 para 57 Hz em 0,5 s (Figura 6) e, depois, a mesma frequência fundamental 60 Hz, sofreu um aumento de 3 Hz passando para 63 Hz em 1,5 s (Figura 7). Já no segundo teste, o parâmetro alterado foi a fase da rede que teve uma variação de +90° em 0,5 s (Figura 8) e outra de -90° em 1,5 s (Figura 9). Em todos os resultados são ilustrados gráficos da rede ideal, das saídas senoidais de cada PLL e as mudanças na frequência de referência e a medição de frequência obtida por cada método PLL.

Pode ser observado que, para qualquer situação, mesmo ideal, de variação de frequência ou fase, o PLL Convencional apresenta oscilações em 120 Hz. Este problema é consequência do uso de um simples multiplicador de duas senoides para seu funcionamento. Apesar de determinar, com considerável exatidão, o valor médio da frequência de operação do sistema, estas variações podem impactar negativamente sistemas que dependem de precisão. Uma vez que as técnicas PLL são usadas também para extração de informações da rede, como acontece em certos métodos de anti-ilhamento para inversores solares e suas respectivas proteções [18], é fundamental que oscilações sejam as mínimas possíveis. Este impasse é superado pelo uso do PLL

Aperfeiçoado que, como se vê, tem oscilações nulas para a rede ideal e muito pequenas para situações graves de variações de frequência e de fase.

Figura 6: Resultados de queda de frequência.

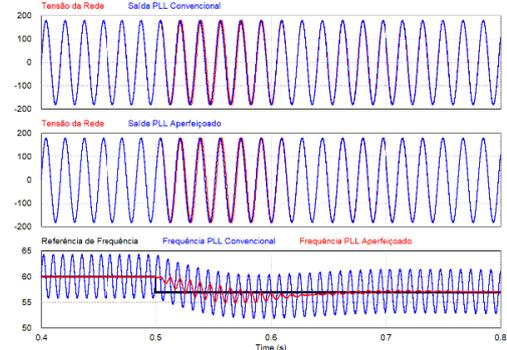


Figura 7: Resultados de elevação de frequência.

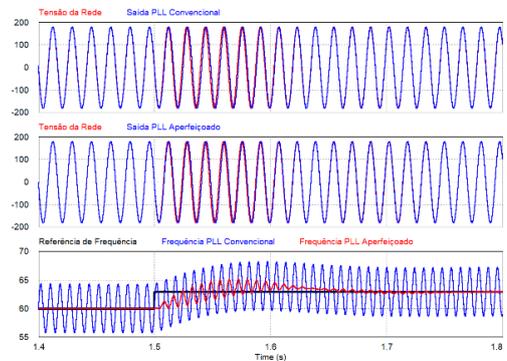


Figura 8: Resultados de variação de fase positiva.

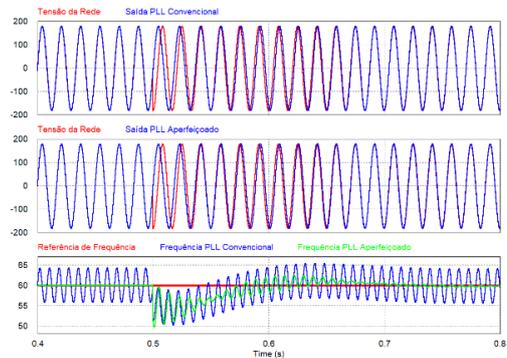
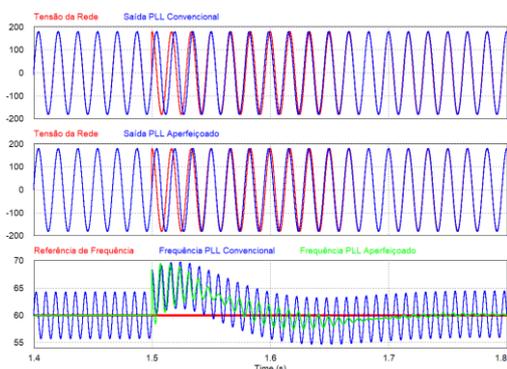


Figura 9: Resultados de variação de fase negativa.



B. Resultados das técnicas PLL Trifásicas

Os métodos PLL trifásicos aqui apresentados foram testados sob uma rede trifásica balanceada cujas fases apresentam frequência de 60 Hz e magnitude normalizada. É importante salientar que, na condição de rede balanceada, as variações de fase ou frequência não se configuram em grandes dificuldades para a operação das técnicas PLL trifásicas, uma vez que as oscilações em 120 Hz são inexistentes ou de pequena amplitude. Na técnica Convencional, por exemplo, não apresenta componentes de segunda ordem uma vez que não é verificada a multiplicação entre sinais periódicos de 60 Hz, conforme mostra a Figura 3. Por outro lado, verificam-se tais oscilações na técnica Aperfeiçoada, em virtude de seu detector de fase que realiza o produto entre sinais periódicos em quadratura, conforme descrito pela Figura 2. No entanto, essas distorções são devidamente mitigadas pelo seu algoritmo de filtragem adaptativo e, portanto, apresentam amplitudes diminutas.

Neste cenário, as técnicas trifásicas serão submetidas a um teste de desequilíbrio de rede ocasionado por um curto entre as fases B e C. Segundo [19] e [13], tal ocorrência promove um afundamento de tensão que é expresso por (8):

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 0.81 \angle -157^\circ \\ 0.48 \angle 127^\circ \end{bmatrix} \quad (8)$$

A Figura 10 mostra o sistema de tensões trifásicas normalizadas e os resultados de sincronização de cada uma das fases, antes e após a falta fase-fase que ocorre em 1 segundo. A Figura 11 apresenta os resultados equivalentes para a técnica Aperfeiçoada. A Figura 12, por sua vez, apresenta os resultados na determinação de frequência dos dois métodos comparados à referência de 60 Hz. Os resultados corroboram a teoria, visto que, para a condição de rede equilibrada, o PLL clássico não apresenta oscilações em 120 Hz e o PLL Aperfeiçoado apresenta níveis pequenos de oscilação de frequência. Depois da ocorrência do curto entre B e C, no entanto, a técnica Convencional é marcada pela existência de grandes variações nos valores instantâneos de frequência que, conforme mencionado anteriormente, podem ocasionar a atuação indevida das proteções internas do inversor. A técnica Aperfeiçoada, por outro lado, consegue atenuar as oscilações de frequência mesmo após a ocorrência da falta.

Figura 10: Sincronização promovida pelo PLL Convencional.

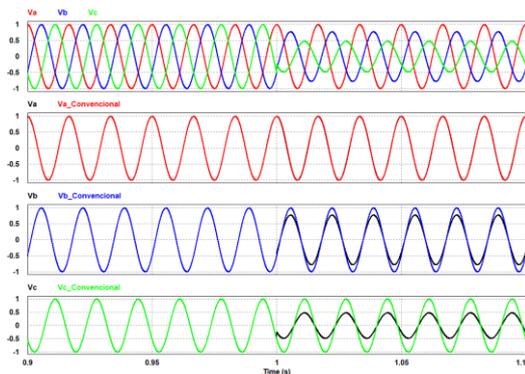


Figura 11: Sincronização promovida pelo PLL Aperfeiçoado.

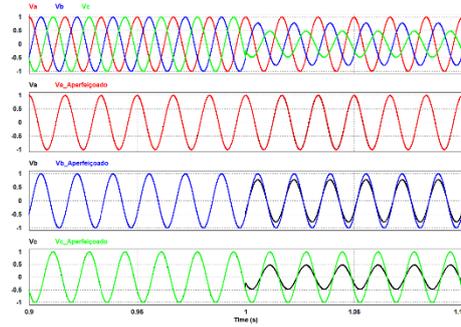
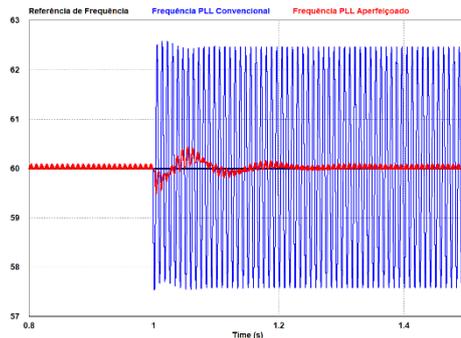
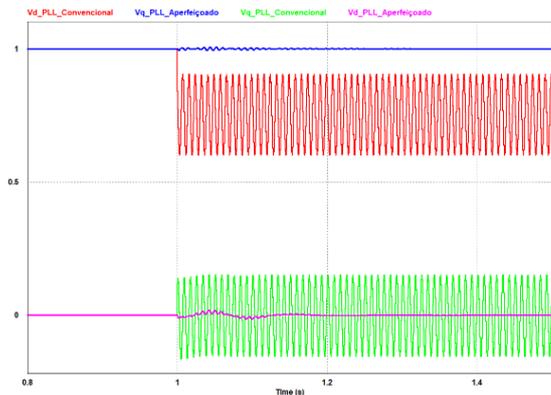


Figura 12: Resultados de Frequência



Por fim, a última comparação entre os esquemas de sincronismo trifásico diz respeito à precisão da determinação dos valores de Referência Síncrona, isto é, dos eixos direto (V_d) e de quadratura (V_q) de cada uma das técnicas [15]. É importante observar que o eixo direto é responsável pela determinação da amplitude do sinal de entrada e o eixo em quadratura pelo valor do erro de fase entre a entrada e a saída da malha PLL. Estes valores são obtidos através da aplicação da Transformada de Park sobre um sistema de tensões trifásicas. É importante considerar que, segundo o diagrama de blocos da Figura 1, estes valores são inerentes à atuação do PLL Convencional configurando-se em variáveis internas da operação desta técnica. A determinação destes valores para a estratégia Aperfeiçoada, no entanto, só é possível mediante a aplicação externa da Transformada de Park sobre seus sinais de saída, não afetando a dinâmica interna da malha PLL. A Figura 13 mostra os eixos direto e em quadratura das técnicas Convencional e Aperfeiçoada.

Figura 13: Sistema de Referência Síncrono do PLL Convencional



V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as técnicas PLL Convencional e Aperfeiçoada para sistemas monofásicos e trifásicos. Além de uma exposição teórica, foram realizados testes computacionais que corroboraram os conceitos discutidos. Para as estratégias monofásicas, o PLL Aperfeiçoado proporcionou melhor desempenho para todos os testes. Para as trifásicas, no entanto, o PLL Convencional exibiu resultados mais robustos sob condições de rede equilibrada. Já para sistemas desequilibrados, o PLL Aperfeiçoado obteve melhor performance visto que foi mais preciso que o primeiro.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001. Além disso, os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - FEELT, ao CNPq e à FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] M. E. T. Souza Jr., *Reflexões acerca da Geração Distribuída e suas Implicações no Sistema Elétrico, na Sociedade e no Meio Ambiente*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22352>
- [2] B. Kroposki, C. Pink, R. DeBlasio, H. Thomas, M. Simões, P. K. Sen, "Benefits of Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 901-908, Setembro 2010.
- [3] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Outubro 2006.
- [4] Guan-Chyun Hsieh, J. C. Hung, "Phase-locked loop techniques - A survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 6, pp. 609-615, Dezembro 1996.
- [5] S. Gao, M. Barnes, "Phase-locked loop for AC systems: Analyses and comparisons", in *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, Bristol, 2012, pp. 1-6.
- [6] R. J. Ferreira, R. E. Araújo and J. A. Peças Lopes, "A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids", in *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, Leiria, 2011, pp. 1-8.
- [7] S. Golestan, M. Monfared, F. D. Freijedo, J. M. Guerrero, "Dynamics Assessment of Advanced Single-Phase PLL Structures", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 6, pp. 2167-2177, Junho 2013.
- [8] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, "A new phase-locked loop (PLL) system", in *Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems*. MWSCAS 2001, Dayton, OH, EUA, 2001, pp. 421-424 vol.1.
- [9] S. C. Douglas, "Introduction to Adaptive Filtering", in *Digital Signal Processing Handbook*, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999.
- [10] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, "A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 617-622, Abril 2002.
- [11] R. J. Ferreira, R. E. Araújo, J. A. Peças Lopes, "A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids", in *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, Leiria, 2011, pp. 1-8.
- [12] P. Rodriguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions," *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, 2006, pp. 5173-5178.
- [13] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, "Grid Synchronization in Single-Phase Power Converters," in *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, New York: Wiley-IEEE Press, 2007, pp. 168-204.
- [14] Siyu Gao, M. Barnes, "Phase-locked loops for grid-tied inverters: Comparison and testing", in *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, Glasgow, 2016, pp. 1-6.
- [15] A. Nicastrì, A. Nagliero, "Comparison and evaluation of the PLL techniques for the design of the grid-connected inverter systems", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, 2010, pp. 3865-3870.
- [16] P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. P. Burgos, D. Boroyevich, "Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 584-592, Março 2007.
- [17] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, "A Method for Synchronization of Power Electronic Converters in Polluted and Variable-Frequency Environments", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1263-1270, Agosto 2004.
- [18] A. Yafaoui, B. Wu, S. Kouro, "Improved Active Frequency Drift Anti-islanding Detection Method for Grid Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2367-2375, Maio 2012.
- [19] M. H. J. Bollen, L. D. Zhang, "Different Methods for Classification of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults", *Electric Power Systems Research*, vol. 66, no. 1, pp. 59-69, Julho 2003.