



# Estudo sobre Sistemas PLL Aplicados a Conversores Empregados em Microrredes e Geração Distribuída

## Study About PLL Systems Applied in Converters Applied to a Microgrid and Distributed Generation

Felipe Massami Hamamoto<sup>1</sup>, Vinícius Dário Bacon<sup>2</sup>

### RESUMO

Este trabalho tem o intuito de estudar os PLL e fazer uma comparação entre dois algoritmos de PLL, sendo o Adaptive Filter - Phase Locked Loop (AF-PLL) filtro adaptativo e o Time Delay - Phase Locked Loop (TD-PLL), ou atraso de tempo. Os PLLs tem como função monitorar e atracar em uma fase e frequência de um sistema de distribuição, com fins de sempre manter a sincronia do sistema, para ajudar no monitoramento e a qualidade energética. Para isto é necessário o uso de algum método de controle neste estudo foi usado o controlador do tipo Proporcional Integral (PI), em uma malha fechada, isto para ambos algoritmos, a diferença entre eles são os métodos que serão usados. O AF-PLL usam filtros para lidar com os ruídos proveniente da rede e assim fazer a detecção da fase. O TD-PLL usa o atraso de tempo para auxiliar na detecção de fase. A comparação entre os dois será feito de dois métodos de avaliação, sendo a variação na frequência e outro na fase do sistema, com isso será possível analisar o comportamento da rede e se o PLL está apto acompanhar tais variações, e quais vantagens um tem sobre o outro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Atraso de Tempo; Filtro Adaptativo; PLL; Qualidade de Energia; Sistema de Controle.

### ABSTRACT

On this work has the objective to study about PLL, and make comparison between two algorithm of PLL, one being a Adaptive Filter - Phase Locked Loop, and the other a Time Delay- Phase Locked Loop. PLL is used for monitoring and tracking a phase and frequency of a system and trying to always maintain synchrony between the two, as such improving the signal of a power grid and quality of the energy that is being distributed. This method consist of using Proportional Integrative Control System, in a closed loop for both algorithm, the difference is the application method. The method using AF use a filter to clear noise that is innate to the grid, and to do the phase detection. A TD-PLL use the signal delayed to do the phase detection. The comparison between them will be done by two methods of evaluation one varying frequency and by a jump of phase, and analyze how PLL is going to react by variation and which is better.

**KEYWORDS:** Time Delay; Adaptative Filter; PLL; Energy Quality; Control System.

### INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência tem se tornado cada vez maiores e mais complexos, sendo cada vez mais suscetível a distúrbios como variação de carga, curto-circuitos e falha de operação. Isso acaba gerando desequilíbrio na tensão, geração de harmônicas e variação na frequência, ou seja, agrava a qualidade de energia. (ZHAN; BOLLEN, 2000)

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: felipemassamiamamoto@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5334732071527597.

<sup>2</sup> Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: viniciusbacoon@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0702667817086590.



Para um desempenho adequado dos UPS(fonte de alimentação ininterrupta), retificador controlado entre outros, é necessário a qualidade e precisão das informações de frequência e ângulo de fase obtidas da tensão medida na rede elétrica. Nesse contexto, os sistemas Phase Locked-Loop (PLL) são utilizados para detecção de frequência e ângulo de fase da rede elétrica. (OLIVEIRA DA SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008)

Os PLLs não são apenas usados como monitoração mas também podem ser usados como um método de sincronismo da saída rede de distribuição, onde é método muito usado para manter os sistemas fotovoltaicos em sincronia com o resto do sistema de distribuição. (NAGLIERO et al., 2010)

Então o intuito desse trabalho é fazer uma comparação entre duas estruturas de PLL, sendo o PLL-TD ou p-PLL dependendo da referência, e o AF-PLL, e analisar as vantagens que cada um possui. E futuramente tentar aplicar em uma sistema fotovoltaico, para que seja mantido.

## TEORIA E MÉTODOS

O p-PLL ou PLL-TD é derivada da teoria da potência reativa instantânea. Tinha como princípio usar filtros ativos de potência como método de compensar as potências reativas e os problemas das harmônicas.(AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984) Apesar de ser usada normalmente por sistemas trifásicos, porém é possível fazer uma modificação para ser aplicada a sistemas monofásicas. (LIU; YANG; WANG, 1999)

Então para o estudo monofásico, é criado um sistema fictício de duas fases, porém defasadas em  $90^\circ$ , assim desta forma podendo aplicar a teoria da potência reativa instantânea para analisar o sistema.

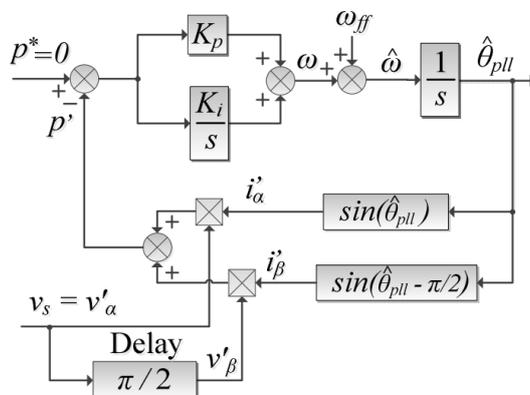
Os AF-PLL usam um princípio parecido em questão de usar uma entrada e usar o mesmo sinal para que seja defasada  $90^\circ$ , porém é usado um filtro adaptativo para poder extrair os componente fundamental da tensão possibilitando a rejeição de harmônicas. (WIDROW et al., 1975)

## TEORIA DO PLL-TD

Na aplicação do algoritmo PLL-TD, um sistema monofásico com uma tensão  $v_s$  de entrada junto de um sistema fictício, na qual o  $v'_\beta$  é defasado  $90^\circ$  em relação ao  $v'_\alpha$  com o intuito de cancelarem oscilações no cálculo da potência fictícia  $p'$ . Para isso é necessário que as correntes  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  estejam em ortogonais em relação as tensões  $v'_\alpha$  e  $v'_\beta$  respectivamente.



**Figura 1 – Estrutura do p-PLL**



Fonte: (SILVA et al., 2013)

A equação que define as entradas fictícias de tensão, corrente e potência são determinadas pelas equações 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Onde  $v_s$  é a tensão de entrada do monofásico, e  $V_p$  é o pico de tensão da entrada.

$$v'_\alpha = v_s = V_p \sin \theta \tag{1}$$

$$v'_\beta = V_p \sin \theta - \pi/2 \tag{2}$$

$$i'_\alpha = \sin \hat{\theta} \tag{3}$$

$$i'_\beta = \sin \hat{\theta} - \pi/2 \tag{4}$$

$$p' = v'_\alpha i'_\alpha + v'_\beta i'_\beta \tag{5}$$

Assim substituindo na equação 5 as equações 1, 2, 3 e 4 obtém a equação 6, considerando a equação 7.

$$p' = V_p \cos (\theta - \hat{\theta}) = V_p \cos (\theta - \theta') \tag{6}$$

$$\hat{\theta} = \theta' + \pi/2 \tag{7}$$

Então usando a Expansão de Taylor, pode ser obtida a variável de potência no ponto de operação. No final obtém a equação 8:

$$\Delta p' = V_{p0} \cos (\theta_0 - \theta'_0) \Delta \theta - V_{p0} \cos (\theta_0 - \theta'_0) \Delta \theta' + \sin (\theta_0 - \theta'_0) \Delta V_p \tag{8}$$

Pelo modelo do PLL sabe se que a potência fictícia é dada pela soma entre a potência do filtro com a parte alternada do sistema.. Considerando que a parte alternada é igual a zero. Com estas considerações obtém a equação 9.



$$\Delta p' \left( \frac{k_i}{s} + k_p \right) = \Delta \omega = s \Delta \theta \quad (9)$$

Assim substituindo a equação 9 em 8 e fazendo as devidas manipulações matemáticas obtém sistema, onde pode ser representado por um Espaço de Estado como mostra a 10.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta \omega' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_a k_i & -k_a k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta \omega' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_a k_p + \frac{k_a k_i}{s} & -(k_b k_i + k_b k_p s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta V_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sendo

$$k_a = -V_{p0} \cos(\theta - \theta') \quad (11)$$

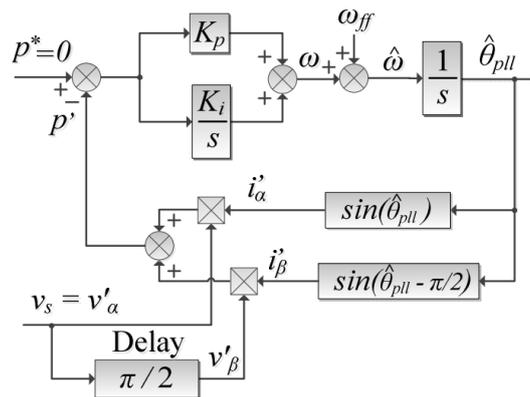
$$k_b = \sin(\theta - \theta') \quad (12)$$

Esse tipo de PLL são dependentes da estimação do  $\theta$  ao final de cada loop.

### TEORIA DO PLL COM FILTRO ADAPTATIVO

Os AF-PLL tem como objetivo tentar melhorar a questão do da rejeição de harmônicas, assim a função do filtro adaptativo seria usar como mitigação das harmônicas. (SILVA et al., 2013) O algoritmo de um AF usa o Filtro Digital de Resposta Impulsiva Infinita, FIR, de primeira ordem, e também são usado o algoritmo LMS (Least Mean Square). Tem-se a saída  $y(n)$  do filtro para onde irá para o PLL, e temos a entrada  $x(n)$  onde será conectado diretamente com o sistema monofásico, como pode ser vista na Figura 2. (SILVA et al., 2013)

**Figura 2 – Estrutura do AF-PLL**



Fonte: (DÁRIO BACON et al., 2017)

Os ganhos adaptativos  $w_1(n)$  e  $w_2(n)$  são calculados a partir do algoritmos LMS como está mostrado na equação 13,  $\mu$  é o parâmetro de tamanho de passo de adaptação e também é o fator que determina o quão rápido o filtro consegue resistir, ou seja determina a velocidade dinâmica de resposta do filtro,  $d(n)$  representa a distorção da entrada,  $e(n)$  representa as componentes harmônicas do  $d(n)$  pode ser obtida a partir da equação 14.

$$w_k(n+1) = w_k(n) + 2\mu e(n)x_k(n) \quad (13)$$



$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (14)$$

O sinal de referência  $x_1(n)$  e  $x_2(n)$  é a entrada do AF e determina a frequência de saída do mesmo. Significando que  $x_1(n)$  e  $x_2(n)$  tem que estar na mesma frequência fundamental que a distorção de entrada. O  $K_c$  é dependente do tempo de amostragem e  $\mu$ , logo  $K_c = \mu/T$ .

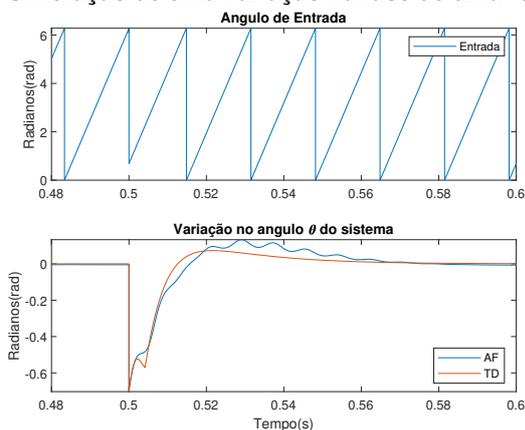
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram feitas em tempo contínuo usando as ferramentas do MATLAB/Simulink. O estudo de resultados para ambos os PLLs foram usados os mesmos valores dos ganhos do PI, sendo eles o ganho proporcional  $k_p = 247.59$  e ganho integral  $k_i = 10969$ .

Então será aplicado uma variação de frequência e um pulso de fase bem clara para fazer uma análise de um estado mais crítico que pode ser ocorrida.

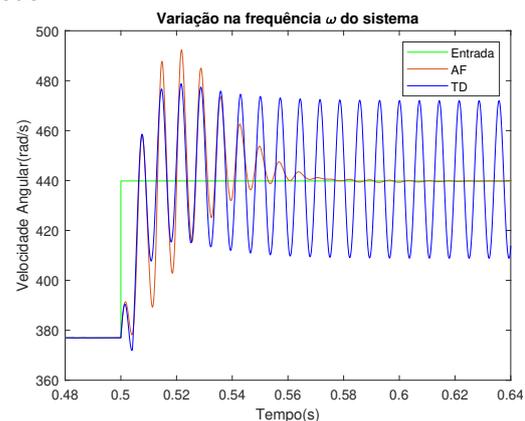
Na simulação a variação dos dois critérios fora aplicado no tempo de 0.5 segundo na simulação, após os PLLs já terem estabilizado após a iniciação, entra será analisado alguns milésimos anterior e posterior em consideração ao momento que foi feito o distúrbio. Na Figura 3a pode se notar que bem no momento 0.5 gráfico em azul que é o ângulo da entrada tem um comportamento de deslocação para a esquerda, que foi o pulso de fase de  $-40^\circ$ , e após essa variação poucos milésimos depois o PLL já conseguiu estabilizar o sistema conseguindo chegar no esperado de  $0^\circ$  de diferença entre a entrada e a saída. Pode ser notado que o tempo de estabilização do PLL-TD é mais rápida do que o PLL-AF.

(a) Simulação de uma variação na fase de uma rede



Fonte: Autoria Própria

(b) Simulação de uma variação na frequência de uma rede



Na Figura 3b pode ser visto que ao aplicar a perturbação pode ser visto que nitidamente que o PLL-TD não consegue estabilizar, diferentemente do PLL-AF.

## CONCLUSÃO

Pela comparação dos dois algoritmos fica nítido a vantagem dos PLL-TD em relação ao tempo de estabelecimento em relação à variação de fase. Apesar do PLL-AF demorar para estabilizar em



questão de fase, é nítido a vantagem que tem em relação a variação de frequência. Pois no algoritmo do PLL-TD tem que ser estipulado a frequência que o sistema irá trabalhar e colocá-lo um delay de acordo com atraso de tempo no seu algoritmo. Por isso dificulta qualquer variação na questão de frequência.

### Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer minha mãe, meu pai, e meus irmãos por apoiarem a minha vida tudo e incentivando para sempre continuar estudando. Gostaria de agradecer ao professor e orientador Vinícius Dário Bacon pelo todo o apoio técnico. Pela UTFPR Apucarana por proporciona o espaço de estudo.

### Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

### REFERÊNCIAS

- AKAGI, Hirofumi; KANAZAWA, Yoshihira; NABAE, Akira. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-20, n. 3, p. 625–630, 1984. DOI: [10.1109/TIA.1984.4504460](https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460).
- DÁRIO BACON, Vinícius et al. Influence of the PLL phase-angle quality on the static and dynamic performance of grid-connected systems, p. 1–6, 2017. DOI: [10.1109/COBEP.2017.8257425](https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257425).
- LIU, Jinjun; YANG, Jun; WANG, Zhaoan. A new approach for single-phase harmonic current detecting and its application in a hybrid active power filter. v. 2, 849–854 vol.2, 1999. DOI: [10.1109/IECON.1999.816519](https://doi.org/10.1109/IECON.1999.816519).
- NAGLIERO, A. et al. Monitoring and synchronization techniques for single-phase PV systems, p. 1404–1409, 2010. DOI: [10.1109/SPEEDAM.2010.5545057](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545057).
- OLIVEIRA DA SILVA, Sergio Augusto; NOVOCHADLO, Rhodolfo; MODESTO, Rodrigo Augusto. Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems, p. 4706–4711, 2008. DOI: [10.1109/PESC.2008.4592712](https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4592712).
- SILVA, Sérgio Augusto Oliveira da et al. An adaptive phase-locked loop algorithm for single-phase utility connected system, p. 1–10, 2013. DOI: [10.1109/EPE.2013.6631878](https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631878).
- WIDROW, B. et al. Adaptive noise cancelling: Principles and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 63, n. 12, p. 1692–1716, 1975. DOI: [10.1109/PROC.1975.10036](https://doi.org/10.1109/PROC.1975.10036).
- ZHAN, Lidong; BOLLEN, M.H.J. Characteristic of voltage dips (sags) in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 827–832, 2000. DOI: [10.1109/61.853026](https://doi.org/10.1109/61.853026).