

# Estudo comparativo entre técnicas de estimação de componentes senoidais: Filtro de Kalman e PLL

D. A. Shayani, M. V. Ribeiro, J. M. T. Romano

**Resumo**—O monitoramento da qualidade de energia elétrica é um amplo nicho de pesquisa por causa do crescente uso de cargas eletrônicas em plantas residenciais, comerciais e industriais. Objetivando a análise da qualidade da energia elétrica e seus impactos no sistema elétrico, este trabalho se concentra no primeiro passo do monitoramento: estimação inicial dos parâmetros senoidais para posterior análise do tipo de distúrbio encontrado. O uso do filtro de Kalman e do *Phase-locked Loop* são analisados e comparados na estimação das amplitudes e das fases das componentes harmônicas e da frequência da componente fundamental do sinal.

**Palavras-Chave**—Monitoramento da qualidade de energia, filtro de Kalman, *Phase-locked Loop*.

**Abstract**—The power quality monitoring is a vast research area due to the increasing electronic load use in residential, commercial and industrial plants. Aiming the analysis of the power quality and its impacts on the electrical system, this work concentrates in the first step of the monitoring process: initial estimation of the sinusoidal parameters for posterior analysis of the disturbance. The use of the Kalman filter and the *Phase-locked Loop* is analyzed and compared on the estimation of the harmonic components phase and amplitude and the signal fundamental frequency.

**Keywords**—Power quality monitoring, Kalman filter, *Phase-locked Loop*.

## I. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

O interesse em pesquisas sobre qualidade de energia vem aumentando nas últimas décadas, graças a vários fatores. Entre eles, está o aumento considerável de cargas não lineares na rede elétrica. Ao mesmo tempo, os usuários de energia elétrica tornaram-se cada vez mais exigentes em relação à qualidade da energia fornecida e as empresas distribuidoras passaram a competir em um mercado desregulamentado.

Os prejuízos causados por problemas de qualidade de energia somam cifras altas, no mundo inteiro. Por isso, estudos de técnicas de monitoramento e resolução de problemas se tornaram um foco de pesquisas em sistemas de energia elétrica.

A proposta em [1] de um monitoramento descentralizado da qualidade de energia abrange as seguintes etapas: estimação de parâmetros senoidais do sinal monitorado; detecção de distúrbios; classificação de distúrbios; compressão de dados para envio a uma central; localização e identificação de fontes geradoras de distúrbios.

Os autores estão com o Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, E-mails: shayani@fee.unicamp.br, mribeiro@ieee.org, romano@fee.unicamp.br. Este trabalho foi financiado pela FAPESP (03/07689-2).

O objetivo deste trabalho é a comparação entre duas técnicas recentemente aplicadas para a realização da primeira etapa, a estimação senoidal: filtro de Kalman e *Phase-locked Loop*.

## II. FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman é uma poderosa ferramenta matemática que tem sido amplamente empregada para a solução de problemas de detecção, estimação e rastreamento, em diversas aplicações.

O algoritmo recursivo do filtro de Kalman pode ser descrito como um filtro de estimação de estados baseado na teoria probabilística. Seu critério é a minimização da norma da matriz de covariância do vetor de estados estimados.

Para a estimação da frequência fundamental de um sinal de monitoramento, utilizamos o modelamento em espaço de estados em [2] e, para a estimação das amplitudes e fases, usamos o modelamento em [3].

## III. PHASE-LOCKED LOOP

*Phase-locked Loop* (PLL) é um tipo de sistema amplamente utilizado em equipamentos de telecomunicações, instrumentação, sistemas de controle, etc. Sua base é a geração de um sinal senoidal que seja de mesma frequência, amplitude e fase da componente fundamental do sinal de entrada.

A estrutura de um PLL é constituída de três partes: um esquema de detecção de fase, um filtro de *loop* (controlador proporcional e integral) e um oscilador VCO (*voltage-controlled oscillator*) que integra a frequência para a geração de um sinal senoidal puro.

Para implementação da estimação de frequência e amplitude, utilizamos o Enhanced PLL (EPLL) [4], apresentado na Fig. 1.

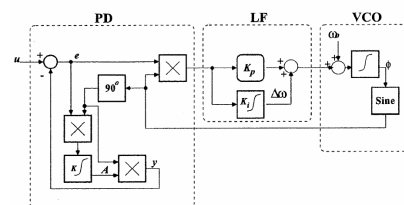


Fig. 1. Enhanced PLL.

## IV. RESULTADOS E ANÁLISE

Ambas as técnicas de estimação foram submetidas a diferentes condições de simulação de forma a evidenciar o desempenho das mesmas frente ao problema de estimação da frequência, da amplitude e da fase de sinais senoidais.

Em todas as simulações, foi utilizada a taxa de amostragem de 64 amostras por ciclo. Dois casos são analisados: i) sinal senoidal com componentes harmônicas dado por

$$x(n) = \sum_{k=1,3,5,7,9,11} A_k \sin\left(\frac{2\pi f_0 k}{f_s} n + \theta_k\right) + \nu(n) \quad (1)$$

onde  $x(n)$  é o sinal monitorado,  $A_k$  é a amplitude da componente,  $f_s$  é a frequência de amostragem do sinal,  $\theta_k$  é a fase da  $k$ -ésima componente harmônica e  $\nu(n)$  é o ruído aditivo, branco e Gaussiano,  $\mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$ ; e ii) sinal dado pela Fig. 2.

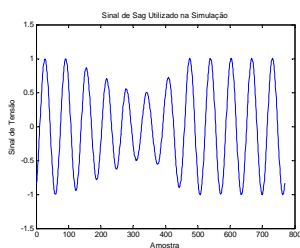


Fig. 2. Sinal com um afundamento de tensão (sag).

A Fig. 3 mostra o MSE (*Mean square error*) obtido entre o valor da frequência da fundamental e o valor estimado com o filtro de Kalman e o EPLL. Note que apenas o filtro de Kalman foi capaz de estimar a frequência da fundamental quando a  $SNR > 30$ dB. A Fig. 4 ilustra o desempenho de ambas aplicadas para a estimação da amplitude e o uso do filtro de Kalman para a estimação da fase. Conforme é observado, o filtro de Kalman apresenta melhores resultados que o EPLL.

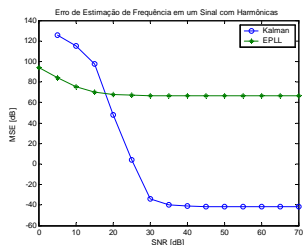


Fig. 3. Estimação da frequência da componente fundamental do sinal (i).

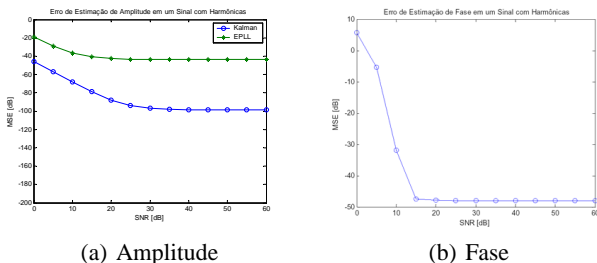


Fig. 4. Estimação de amplitude e fase fundamental do sinal (i).

As Figs. 5 e 6 mostram o desempenho de ambas as técnicas quando aplicadas para a estimação da frequência e a amplitude da componente fundamental do sinal mostrado na Fig. 2. Novamente pode ser observado que o filtro de

Kalman apresenta superior desempenho para uma ampla faixa de valores da SNR.

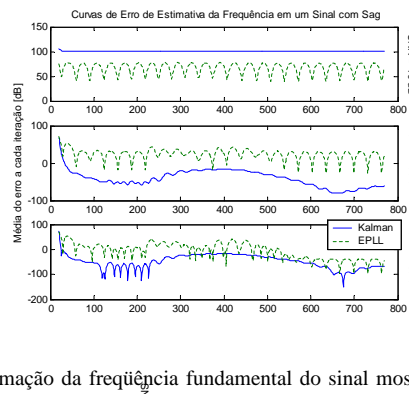


Fig. 5. Estimação da frequência fundamental do sinal mostrado na Fig. 2.

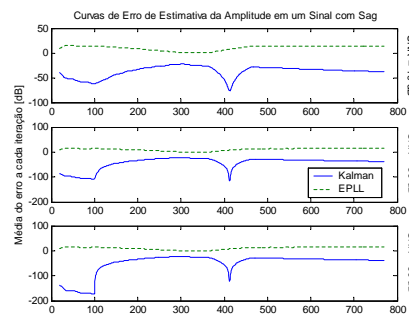


Fig. 6. Estimação da amplitude fundamental do sinal mostrado na Fig. 2.

## V. CONCLUSÕES

Na comparação entre as duas técnicas sendo utilizadas, o filtro de Kalman se sobressaiu em relação à sua rapidez de convergência e precisão. Em apenas poucos casos, onde a potência do ruído era elevada, o desempenho do Filtro de Kalman foi pior que aquele obtido com EPLL.

Concluimos que para uma aplicação no monitoramento da qualidade da energia elétrica, o filtro de Kalman é a ferramenta mais indicada quando questões de precisão finita não são levadas em consideração. Estas questões serão tratadas nos futuros desenvolvimentos deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. V. Ribeiro, *Técnicas de processamento de sinais aplicadas para a transmissão de dados via rede elétrica e o monitoramento da qualidade de energia*, Tese de Doutorado, UNICAMP, Abril, 2005.
- [2] A. Routay, A. K. Pradham, K. P. Rao, "A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 3, junho, 2002, pags. 469-479.
- [3] S. Liu, "An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals," *IEEE Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP Greece*, outubro, 1998, pags. 636-640.
- [4] M. K. Ghartemani, M. R. Iravani, "A signal processing module for power system applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, n° 4, outubro, 2003, pags. 1118-1126.