UM MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA PMUS UTILIZANDO FILTRO SAVITZKY-GOLAY

Renato Ribeiro Aleixo*, Leandro Rodrigues Manso Silva*, Carlos Augusto Duque*, Max Mateus Luiz*, Guilherme Gaudereto Sena*, Paulo Fernando Ribeiro[†]

> * Universidade Federal de Juiz de Fora Minas Gerais, Brasil

[†]Universidade Federal de Itajubá Minas Gerais, Brasil

Emails: renato.ribeiro@engenharia.ufjf.br, leandro.manso@engenharia.ufjf.br, carlos.duque@ufjf.edu.br, max.luiz@engenharia.ufjf.br, guilherme.gaudereto@engenharia.ufjf.br, pfribeiro@ieee.org

Abstract— This work presents the implementation of a method for phasor and frequency estimation applicable at electrical energy distribution, in steady or dynamic state conditions. The proposed method is based on the Discrete Fourier Transform (DFT) and applies the Savitzky-Golay (S-G) filter for differentiating the phase signal and estimate the frequency under off-nominal and variant conditions. The focus of the work is the application of the method in Phasor Measurement Units (PMUs) and shows that the method comply with the IEEE standards for Phasor Measurement Unit (C37.118.1-2011 and C37.118.1a-2014) requirements .

Keywords— method, frequency estimation, DFT, Savitzky-Golay, PMU, C37.118.1-2011, C37.118.1a-2014

Resumo— Este trabalho apresenta a implementação de um método para estimação de fasor e frequência a ser aplicado ao sistema de distribuição de energia elétrica, em condições de estado dinâmico ou permanente. O método proposto é baseado na Transformada Discreta de Fourier (DFT) e aplica o filtro Savitzky-Golay (S-G) para diferenciação do sinal de fase e estimação da frequência sob condições variantes e *off-nominal*. O foco deste trabalho é a aplicação do método em Unidades de Medição Fasorial (PMUs) e mostrar que o mesmo está em conformidade com os requisitos estabelecidos pelo IEEE para PMU (C37.118.1-2011 e C37.118.1a-2014).

Palavras-chave estimação de frequência, DFT, Savitzky-Golay, PMU, C37.118.1-2011, C37.118.1a-2014

1 Introdução

As condições do Sistema Elétrico de Potência (SEP) estão mudando continuamente devido à variabilidade da demanda de energia elétrica, o que necessariamente afeta a geração de forma a garantir a manutenção da estabilidade do sistema. Consequentemente, tensões, correntes e fluxos de potência estão em constante mudança. Um dos maiores desafios do gerenciamento de um SEP é garantir a segurança do sistema, mantendo as condições de operação sempre dentro de limites seguros, mesmo em condições de contingência. Uma das tecnologias mais promissoras no campo de sistemas de controle de grande escala é a medição síncrona, normalmente realizada pela Unidade de Medição Fasorial (PMU) (Phadke, 1993).

A PMU tem sido amplamente utilizada para monitoramento, proteção e controle de sistemas elétricos, fornecendo medidas fasoriais síncronas de diferentes pontos do sistema em altas taxas. O desenvolvimento de técnicas de medição sincronizada teve início há menos de 30 anos e hoje com o crescimento das gerações distribuídas, essas técnicas são um dos principais elementos para uma melhor avaliação do estado dos grandes sistemas de energia.

As medições fasoriais síncronas e a estimação de frequência da rede são as principais funcionalidades das PMUs. A norma C37.118.1-2011 (*IEEE Standard for Synchrophasors Measurement for Power Systems*, 2011) contém as definições de sincrofasores, os requisitos mínimos exigidos em estado permanente e em condições dinâmicas. Na verdade, os padrões do IEEE referem-se apenas a aplicação de PMUs ao nível de transmissão de energia elétrica. Normas para medidas fasoriais síncronas no âmbito de distribuição ainda não foram desenvolvidas.

Uma vez que os sinais em um nível de distribuição contêm mais harmônicos e normalmente são corrompidos por ruídos, os algoritmos de estimação devem ser adaptados para funcionar de forma adequada neste cenário. Outro ponto importante é o alto custo de uma PMU convencional ser implementada em larga escala. Entretanto, dispositivos de medição fasorial síncrona como os Gravadores de Distúrbios de Frequência (FDRs) (Wang et al., 2007) e as micro-PMUs (μ PMU) (Von Meier et al., 2014), tornam esse monitoramento possível, devido ao baixo custo do hardware necessário.

A frequência e os fasores do sistema de potência são normalmente extraídos de amostras da forma de onda da tensão. Os métodos mais comumente utilizados nesse processo são os baseados em *curve-fitting* (Zhan and Liu, 2014), filtro de Kalman (Kamwa et al., 2013) ou algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier (DFT) (Zhan et al., 2015), sendo esta última a metodologia mais utilizada. Algoritmos que utilizam a DFT clássica para estimação possuem baixo custo computacional. No entanto, sua precisão se torna menor em condições de frequência *off-nominal* e dinâmicas, tais como variação de frequência em rampa e modulação de fase (Macii et al., 2012).

A maior contribuição deste artigo é o uso do filtro Savitzky-Golay (S-G) (Schafer, 2011) no algoritmo de estimação de frequência da PMU. O artigo de Savitzky e Golay (Savitzky and Golay, 1964), publicado em 1964, foi descrito em 2000, pelos editores do jornal *Analytical Chemistry*, como número cinco entre os dez melhores artigos já publicados neste mesmo jornal (Riordon et al., 2000). Savitzky e Golay estavam interessados em suavizar e diferenciar dados ruidosos obtidos de analisadores de espectro químico. Neste artigo, o filtro S-G é usado para diferenciar o sinal de fase e estimar a frequência. O método foi implementado em *hardware* e testes sugeridos pelos padrões IEEE para PMUs foram realizados.

O restante do artigo é organizado como segue. Na Seção 2 é colocada uma visão geral sobre o método implementado. A Seção 3 descreve a implementação em *hardware*. Já na Seção 4 os testes para validar o cumprimento dos padrões e seus resultados são mostrados. Finalmente, a seção 5 apresenta as conclusões.

2 Método de Estimação

É sabido que o espectro de frequências referente a um sinal de tensão do um sistema de distribuição de energia, apresenta uma grande presença de ruído e componentes harmônicas (Zhan et al., 2015). Portanto, o algoritmo para estimação fasorial deve ser robusto o suficiente para manter sua precisão frente a tais condições.

O método proposto é baseado na DFT, e para obter o sinal de frequência, o sinal de fase é derivado usando um filtro Savitzky-Golay (S-G) (Schafer, 2011), depois disso é realizado um processo de decimação utilizando um filtro *antialiasing*, por último um filtro passa-baixas de Resposta ao Impulso Infinita (IIR) é utilizado, com o intuito de suavizar o sinal. Através desse processo, a frequência é obtida. Os métodos de estimação fasorial e estimação de frequência são descritos nas subseções a seguir e ilustrados por Fig. 1 e Fig. 2, respectivamente.

2.1 Estimação Fasorial:

O padrão IEEE especifica os parâmetros e sugere a DFT para obter a estimação do fasor fundamental de um sistema de potência. A equação (1) é aplicada para calcular a estimação fasorial.



Figura 1: Diagrama de blocos do método de estimação usado.

$$X[i] = \frac{\sqrt{2}}{\sum_{k=-N/2}^{N/2} W[k]} \times \sum_{k=-N/2}^{N/2} x[i+k]W[k]e^{-j[i+k]\Delta t\omega_0}$$
(1)

Note que x[i] é a amostra de tensão no tempo $i\Delta t$ e X[i] representa o fasor estimado. A magnitude e fase são obtidas através do calculo do módulo e do ângulo, respectivamente, do número complexo X[i]. O vetor W[k] representa os coeficientes calculados com as equações (2) ou (3), dependendo da classe de performance do equipamento, em que h[k] é a janela de Hamming.

$$P \ class: \ W[k] = \left(1 - \frac{2}{N+2}|k|\right)$$
 (2)

$$M \ class: \ W[k] = \frac{\sin(2\pi \frac{2F_{fr}}{f_{samp}}k)}{2\pi \frac{2F_{fr}}{f_{samp}}k}h[k]$$
(3)

onde h[k] é a janela de Hamming. Os parâmetros utilizados foram: N = 96, frequência de amostragem $f_{samp} = 1440 \ Hz$ e frequência de referência do filtro passa-baixas $F_{fr} = 10320 \ Hz$ (para uma taxa de reporte de $F_S = 60 \ Hz$). Estes valores estão tabelados em (*IEEE Standard for Synchrophasors Measurement for Power Systems*, 2011). Nessa implementação foram utilizados os parâmetros da classe M.

A norma IEEE define que a classe P possui foco em aplicações que requerem computação rápida e não necessitam de processos complexos de filtragem, como aplicações de proteção. Por outro lado, a classe M tem como foco aplicações onde o sinal requer maior processamento e não exige uma computação extremamente rápida, como medições analíticas.

2.2 Estimação de frequência

Com o objetivo de estimar a frequência, o próximo passo é derivar a sequência de ângulo de fase estimados no tempo. Para atenuar o efeito de ruído no processo de estimação, após esse procedimento é realizada ainda uma suavização adicional da frequência estimada. Um fluxograma da estimação de frequência é apresentado na Fig. 2.



Figura 2: Diagrama de blocos da estimação de frequência.

Como mencionado anteriormente, a estimação dafrequência utiliza um fildiferenciador Savitzky-Golay (S-G), tro possui \mathbf{OS} seguintes coeficientes 0 qual : $[22 - 67 - 58 \ 0 \ 58 \ 67 \ -22] \times 1/252.$ А resposta em frequência de um filtro diferenciador ideal e do filtro diferenciador S-G é apresentada na figura 3.



Figura 3: Resposta em frequência do filtro S-G.

A redução do efeito do ruído pode ser compreendida a partir da resposta em magnitude do filtro derivativo, apresentada na figura 3. Em baixas frequências, o filtro diferenciador S-G segue a resposta em frequência de um diferenciador ideal. Entretanto, enquanto o diferenciador ideal amplifica o ruído, o filtro diferenciador S-G atenua as altas frequências, e consequentemente o ruído.

A sequência formada pelos valores dos ângulos de fase estimados, sob condições de frequência *off-nominal*, apresentam descontinuidade quando seu valor excede π ou $-\pi$. Esse comportamento requer um processamento mais complexo, devido a

transitórios que serão gerados no filtro S-G. Com o intuito de contornar esta questão, dois filtros S-G foram utilizados, onde é aplicada uma correção no sinal de entrada de um dos filtros, e suas saídas multiplexadas. Quando uma descontinuidade é detectada, através da comparação da diferença entre os valores estimados da fase atual e a fase anterior, o algoritmo executa um processo de *un*wrap (soma-se ou subtrai-se π) nos valores de entrada de um dos filtros, enquanto o outro filtro S-G o passa pelo transitório gerado pela descontinuidade. O multiplexador escolhe a saída do filtro S-G que não está passando por um transitório, resultando assim em uma frequência estimada sem oscilações. A figura 4 ilustra a lógica de funcionamento do multiplexador dada as saídas de cada um dos filtros de S-G.



Figura 4: Funcionamento do Mux.

Como o sinal aquisitado possui 24 pontos por ciclo, e a taxa de reporte é igual a 60Hz, não é necessário calcular a saída para cada amostra adquirida. Então a decimação é aplicada reduzindo para 8 valores estimados por ciclo. Antes de sub-amostrar o sinal, um filtro *anti-aliasing* é utilizado. Ao fim do processo, um filtro passabaixas IIR é aplicado para garantir que os valores de RFE(erro na taxa de variação de frequência) sejam menores que os limites estabelecidos nos padrões. As respostas na frequência dos filtros *antialiasing* e IIR são apresentadas nas figuras 4 e 5, respectivamente. O filtro *anti-aliasing* possui fase linear em sua banda passante.



Figura 5: Resposta em frequência do filtro *antialiasing*.



Figura 6: Resposta em frequência do filtro IIR.

3 Implementação em Hardware

A maioria das PMUs compartilham alguns aspectos. São eles: Uma fonte de sincronismo para adquirir as amostras do sinal ao mesmo tempo em diferentes localizações geográficas, um circuito para condicionamento do sinal analógico, conversores analógico para digital, comunicação com um concentrador de dados e uma unidade de processamento capaz de lidar com todos os periféricos e algoritmos de processamento.

A fonte de sincronismo mais utilizada para PMUs é o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Normalmente, os módulos de GPS fornecem um sinal de pulso por segundo (PPS) com alta precisão, que pode ser usado no disparo da aquisição do sinal e para corrigir o ângulo de fase estimado. O recente estudo apresentado em (Lu et al., 2017) usa o protocolo de tempo da internet (NTP) e redes 4G LTE como uma alternativa ao sinal de sincronização do GPS, contudo o GPS ainda se mostra como a melhor opção como fonte de sicronismo para PMUs.

Como o reporte do fasor é feito através de seus valores de magnitude e fase, uma correção computada através da diferença entre a taxa de amostragem ideal e a taxa de amostragem real do hardware, é aplicada a fase reportada. Sem essa correção, mesmo que o sinal de entrada possuísse exatamente 60Hz, o fasor iria girar em uma taxa correspondente a diferença entre as taxas de amostragem. Essa correção é computada usando um dos timers do microcontrolador e o PPS fornecido pelo GPS.

O protótipo é composto por um microprocessador ARM TM4C1294; um módulo GPS U-Blox Neo-6M e um circuito condicionador analógico. O microprocessador possui 120MHz de frequência de *clock*, um conversor A/D de 12 bits e controlador Ethernet interno. Como a taxa de amostragem utilizada é 1440Hz, um dos desafios encontrados na implementação foi realização de todos os cálculos necessários pelo algoritmo de processamento do sinal em menos de 694.4 μs . Continuamente enviar *frames* de dados via TCP/IP com o mesmo processador foi outro desafio.

Enquanto um único *frame* de dados é enviado, diversas amostras devem ser adquiridas pelo ADC. Aliando o aumento da complexidade do gerenciamento de *tasks* ao requisito de velocidade, um sistema operacional de tempo real (RTOS) foi utilizado, mais especificamente o TI-RTOS. A Fig. 7 mostra o *hardware* utilizado na implementação do algoritmo e testes, onde uma fonte Omicron CMC 256 foi usada para gerar os sinais necessários para os testes.



Figura 7: Hardware usado para validar o algoritmo de estimação

O padrão IEEE C37.118.2-2011 (IEEE Standard for Synchrophasors Data Transfer for Power Systems, 2011) é responsável por especificar a comunicação entre dispositivos de medição de dados fasoriais, tais como PMUs e PDCs. Todos os quatro tipos de frames (dados, configuração, cabeçalho e comando) definidos na norma só são aplicados a dispositivos operando em condições de transmissão de dados em tempo real, por exemplo quando a aquisição e o processamento do dado ocorrem de forma simultânea à transmissão das medições. Cada tipo de frame possui diversos campos de tamanho definido, onde não há nenhum caractere separador e sendo enviados sequencialmente. Esses quatro tipos de mensagem compartilham alguns campos em comum, tais como o tamanho do *frame*, estampa de tempo e qualidade da medição. Os dois bytes no final de todas as mensagens são o CRC-CCITT, usado para validar a integridade dos dados.

O *frame* de dados contém todas as medições que devem ser reportadas durante uma execução normal do algoritmo, sendo necessário apenas o envio do *frame* de configuração uma única vez assim que o equipamento de medição é ligado. Além dos campos comuns descritos anteriormente, o *frame* de dados também possui mais seis campos. O primeiro consiste de uma palavra de bits chamada STAT, a qual é responsável por fornecer informações sobre o dado e a qualidade da referência de tempo. Em sequência, o segundo campo contém os valores dos fasores, os quais possuem formato definido no *frame* de configuração. O valor do terceiro campo representa o desvio de frequência do valor nominal, medido em milihertz. Em seguida, no quarto campo está o ROCOF, o qual é medido em hertz por segundo vezes 100. O quinto campo contém informação analógica dos dados, como o valor de pico e o rms da onda de entrada. Por fim, o sexto campo contém uma palavra digital de status, que pode representar *flags* ou bits de status mapeados.

4 Resultados dos testes requeridos pelo padrão IEEE e outros sinais

Para determinar o quão robusto o método implementado é, esta seção apresenta os resultados dos testes propostos pelo padrão IEEE e outros sugeridos pelos autores. O objetivo é estressar o método e observar seu comportamento. O parâmetros principais usados para verificar a conformidade com o padrão são *Total Vector Error* (TVE), *Frequency Error* (FE) e *Rate of Change of Frequency Error* (RFE), os quais são obtidos de (4), (5) e (6), respectivamente.

$$TVE = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r X_r)^2 + (\hat{X}_i X_i)^2}{{X_r}^2 + {X_i}^2}}$$
(4)

Onde \hat{X}_r e \hat{X}_i são as sequências dos valores real e imaginário, respectivamente, referindo-se aos fasores estimados, e X_r e X_i são os valores teóricos.

$$FE = f - f_{estimada} \tag{5}$$

$$RFE = |(df/dt) - (df/dt)_{estimada}|$$
(6)

Note que f é a frequência teórica e $f_{estimada}$ é a frequência estimada.

O padrão IEEE C37.118.1 propõe alguns testes para validar a performance do algoritmo, como sinais de tensão com frequência fora da nominal, harmônicos, rampa de frequência, modulação em amplitude e modulação em fase. Os resultados do TVE, FE e RFE para estes sinais, e para os sinais com ruído e alta presença de harmônicos estão descritos na Tabela 1, mostram a eficiência do método de estimação proposto. Um hífen é usado na Tabela 1 quando o teste não é definido pela norma. Todos os testes foram realizados utilizando uma taxa de amostragem de 1440Hz e taxa de reporte de 60Hz. Para ilustrar, a estimação de frequência durante uma variação de frequência em rampa pode ser observada na Fig. 8.



Figura 8: Frequência estimada pelo protótipo de micro-PMU no teste de variação de frequência em rampa comparado aos valores esparados gerados no MATLAB.

Com o intuito de provar que o sincronismo é necessário em um sistema de medição de sincrofasores, a Fig 8 mostra a diferença de fase reportada por dois protótipos, quando o sinal de tensão de entrada para cada um deles foi gerado com 30 graus de diferença de fase. Pode-se afirmar que o sincronismo foi obtido, uma vez que a diferença entre os ângulos de fase estimados por dois protótipos de micro-PMU se mantém ao longo de todo o tempo.



Figura 9: Diferença de fase entre a estimativa fasorial feita por dois protótipos, mostrando o sincronismo ao longo do tempo.

5 Conclusões

Com o objetivo de estimar a fase e frequência, em sistemas de distribuição, este trabalho apresenta a implementação e teste de um método que segue os padrões normativos atuais para PMUs. Sinais em regime estacionário e com presença de ruído e harmônicos foram utilizados nos testes realizados. Os resultados ultrapassaram a mínima performance requerida pela norma, como exposto na Tabela 1.

Na estimação fasorial proposta, a diferença entre as taxas de amostragem real e ideal é utilizada para calcular a correção aplicada aos ângulos de fase estimados. Para estimar a frequência, um filtro diferenciador Savitzky-Golay, um processo de decimação e um filtro IIR foram aplicados. Uma característica importante é a fase da resposta em frequência do filtro IIR, que é não linear na banda passante. O efeito disso é observado no teste de modulação em fase, o qual apresenta

Teste		DFT - Savitzky-Golay - IIR			C37.118.1		
Sinal de Tensão		TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE
		(%)	(mHz)	(Hz/s)	(%)	(mHz)	(Hz/s)
Ruído	$cos(2\pi f_o t) + 50 \ dB \ ruido$	0.029	0.6	0.02	-	-	-
Frequência	$cos(2\pi ft)$	0.213	1.01	0.02	1	5	0.1
off-nominal	$55 \le i \le 65$						
Harmônicos	$cos(2\pi f_o t) + 0.1 cos(2\pi i f_o t)$	0.005	0.66	0.02	1	25	-
	$2 \le i \le 50$						
Rampa de	$\cos(2\pi(55+1t)t)$	0.215	1.09	0.04	1	10	0.2
frequência	$0 \le t \le 10$						
Modulação	$(1+0.1\cos(2\pi f_m t)) \times \cos(2\pi f_o t)$	0.018	0.862	0.02	3	300	14
em amplitude	$f_m = 1, 2, 3, 4, 5$						
Modulação	$\cos(2\pi f_o t + 0.1\cos(2\pi f_a t - \pi))$	0.334	125 21	4.94	3	300	14
em fase	$f_a = 1, 2, 3, 4, 5$	0.334	100.01	4.24	5	300	14
Sinal Artificial	$cos(2\pi59.95t) + \sum_{i=0}^{50} \frac{1}{-cos(2\pi i 59.95)}$	0.412	6.73	0.08	-	-	-
	$ \sum_{i=2}^{n} \frac{1}{i} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i} \sum_{$						
	+50 aD Fuido						

Tabela 1: Resultados dos testes propostos por IEEE C37.118.1

o maior erro de frequência (FE) dentre todos os testes realizados. Entretanto, este valor ainda é menor que o máximo estabelecido pelo padrão. O filtro IIR se faz necessário para que se atinja os requisitos de tempo de reporte das medições e de oscilação da frequência.

O reporte das medições foi feito seguindo o protocolo proposto pela IEEE C37.118.2, utilizando *frames* de dados e de configuração. Este fato possibilita a integração do protótipo desenvolvido com PDCs comerciais e *open-source*, como o openPDC.

Agradecimentos

Esse trabalho foi apoiado em parte por CNPq, CAPES e FAPEMIG.

Referências

- IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements (2014). C37.118.1a-2014.
- IEEE Standard for Synchrophasors Data Transfer for Power Systems (2011). C37.118.2-2011.
- IEEE Standard for Synchrophasors Measurement for Power Systems (2011). C37.118.1-2011.
- Kamwa, I., Samantaray, S. and Joos, G. (2013). Compliance analysis of pmu algorithms and devices for wide-area stabilizing control of large power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* 28(2): 1766–1778.
- Lu, H., Zhan, L., Liu, Y. and Gao, W. (2017). A microgrid monitoring system over mobile platforms, *IEEE Transactions on Smart Grid* 8(2): 749–758.
- Macii, D., Petri, D. and Zorat, A. (2012). Accuracy analysis and enhancement of dft-based

synchrophasor estimators in off-nominal conditions, *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement* **61**(10): 2653–2664.

- Phadke, A. G. (1993). Synchronized phasor measurements in power systems, *IEEE Computer Applications in power* **6**(2): 10–15.
- Riordon, J., Zubritsky, E. and Newman, A. (2000). Top 10 articles.
- Savitzky, A. and Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures., *Analytical chemistry* 36(8): 1627–1639.
- Schafer, R. W. (2011). What is a savitzky-golay filter?[lecture notes], *IEEE Signal processing* magazine 28(4): 111–117.
- Von Meier, A., Culler, D., McEachern, A. and Arghandeh, R. (2014). Micro-synchrophasors for distribution systems, *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2014 *IEEE PES*, IEEE, pp. 1–5.
- Wang, L., Burgett, J., Zuo, J., Xu, C. C., Billian, B. J., Conners, R. W. and Liu, Y. (2007). Frequency disturbance recorder design and developments, *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE, IEEE, pp. 1–7.
- Zhan, L. and Liu, Y. (2014). Improved wls-tf algorithm for dynamic synchronized angle and frequency estimation, *PES General Meeting Conference & Exposition, 2014 IEEE*, IEEE, pp. 1–5.
- Zhan, L., Liu, Y., Culliss, J., Zhao, J. and Liu, Y. (2015). Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level, *IEEE Transactions on Smart Grid* 6(4): 2013–2022.