

UM ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL QUE UTILIZAM PLL'S TRIFÁSICOS DIGITAIS

¹ ²JOSÉ R. COZZOLINO, ¹JOSÉ A. SANTISTEBAN, ²JOSÉ E. ALVES JR.

¹*Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEEET-UFF), Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, CEP – 24210-240.*

²*Laboratório de Medição Fasorial – Lab PMU, Departamento de Tecnologias de Distribuição – DTD, Avenida Horácio Macedo, 354, Cidade Universitária, Ilha do Fundão - Rio de Janeiro, RJ, CEP – 21941-911.*

E-mails: joserics.bolsista@cepel.com; jasantisteban@vm.uff.br; alves@cepel.br

Abstract— An accurate frequency estimation is essential for the operation of Electric Power System regarding protection and control. Synchronized Phasor Measurement Systems - SPMS are based on a network composed by Phasor Measurement Units (Phase Measurement Unit - PMU). Two important parameters measured by the PMUs are the frequency and the frequency rate of change. This paper presents the results of a comparative study of frequency estimation algorithms within synchronized phasor measurement context. The reference model proposed in by IEEE C37.118 standard was compared with three different algorithms based on PLLs (Phasor Locked Loop). The evaluations were performed based on the compliance requirements described in IEEE C37.118. It was also found that the PLLs models have superior performance than model reference for P PMU suggested by Standard. Regarding the reference model for PMU M, there is a need to implement anti-aliasing filters for the standard inter-harmonics tests. After that, it was observed that the dynamic performances of PLLs studied at work are compatible with the algorithms suggested by the standard for the PMU M.

Keywords— Phase-locked loop, Phasor Measurement Unit, Digital filters.

Resumo— A estimação correta de frequência é essencial para a operação de diversos equipamentos de proteção, regulação e controle, os quais são necessários para a operação adequada do Sistema Interligado Nacional. A tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (Synchronized Phasor Measurement Systems - SPMS), baseia-se em uma rede de Unidades de Medição Fasorial (Phase Measurement Unit - PMU). Duas grandezas importantes medidas pelas PMUs são a frequência e a taxa de variação da frequência. Este trabalho apresenta o resultado de estudo comparativo de algoritmos de estimação de frequência no âmbito de medição fasorial sincronizada. Foram avaliados os modelos propostos originalmente pela norma IEEE C37.118, por seu documento de alteração (IEEE Std. C37.118.1a-2014 Amendment), além de três diferentes tipos de algoritmos baseados em PLLs (Phasor Locked Loop). As avaliações foram executadas com base nos testes descritos na norma IEEE C37.118 e seus respectivos requisitos de conformidade. Verificou-se ainda que os modelos de PLLs são superiores aos algoritmos sugeridos pela Norma para PMUs do tipo P. Em relação aos modelos de PLLs em comparação a PMUs do tipo M, verificou-se a necessidade de se implementar filtros anti-aliasing para os testes de inter-harmônicos. Uma vez aplicado o filtro aos PLLs, o desempenho dinâmico dos PLLs estudados no trabalho são compatíveis com os algoritmos sugeridos pela Norma para PMUs do tipo M.

Palavras-chave— Malha de Sincronismo de Fase (PLL), Unidade de Medição Fasorial, Filtros Digitais.

1 Introdução

A operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) depende de diversos fatores (valores de tensão e potência, estabilidade, por exemplo) os quais devem ser constantemente regulados sobre os limites pré-estabelecidos para que o mesmo não entre em risco, podendo assim ocasionar oscilações de grande amplitude, queima de grandes equipamentos e até o colapso. Ela demanda um gerenciamento adequado, onde as medidas de diferentes pontos do sistema possam ser avaliadas. Isto é realizado através de sistemas de supervisão e controle contínuos denominados SCADA/EMS (Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management Systems). Estes sistemas fornecem as informações sobre o estado do SIN com uma taxa de emissão de 2s a 10s. Normalmente, o sincronismo das informações está limitado a esta taxa de tempo. Neste contexto, a tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial

Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement Systems* – SPMS), constituída a partir de uma rede de Unidades de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit* – PMU), mostra vantagens sobre Sistemas SCADA tradicionais, permitindo o monitoramento do sistema com sincronismo da ordem de microssegundos e, assim, proporcionando uma melhora na sua qualidade e segurança (Decker et al, 2006, 2011). Duas grandezas importantes medidas pela PMUs são a frequência e a taxa de variação da frequência. Como os dados obtidos pelo SPMS são sincronizados, estes podem então ser correlacionados por meio dos Concentradores de Dados Fasoriais - PDC (*Phasor Data Concentrator*), tornando possíveis novas aplicações de monitoramento e análise pós-eventos do Sistema Elétrico de Potência, como, por exemplo, o monitoramento da frequência para o controle da estabilidade do sistema.

A Norma IEEE C37.118.1 (2011) foi desenvolvida com o intuito de definir padrões de

desempenhos para as PMUs comerciais. Para isso, foram estipulados testes para avaliar o desempenho das PMUs. Em seu apêndice C, são sugeridos algoritmos para estimação da frequência (*Reference signal processing models*), baseados na própria medição de sincrofasores da PMU. O cálculo da frequência baseia-se na derivada do fasor calculado. Por sua vez, o cálculo da taxa de variação da frequência baseia-se na derivada da frequência. Publicou-se ainda uma alteração da Norma em 2014 (IEEE Standard C37.118.1a-2014, 2014), onde foram modificados alguns parâmetros de desempenho e, sobretudo, um modelo de algoritmo de estimação de frequência aprimorado foi proposto. Identificaram-se na literatura vários algoritmos de estimação de frequência (Lobos, 1997; Quinn, 1994 e Jacobsen, 2003). Eles devem ser avaliados de forma a verificar a sua conformidade com relação às aplicações previstas com base na medição de frequência de PMUs. Oliveira (2012) sugere um algoritmo de PLL para estimação de frequência visando PMUs. Este algoritmo apresentado não foi comparado com os algoritmos sugeridos pela Norma ou outros métodos.

Este trabalho apresenta o resultado de estudo comparativo de algoritmos de estimação de frequência no âmbito de medição fasorial sincronizada. Foram avaliados os modelos propostos originalmente pela norma IEEE C37.118, por seu documento de alteração (IEEE Std. C37.118.1a-2014 Amendment), além de três diferentes métodos baseados em PLLs (*Phasor Locked Loop*). As avaliações foram executadas com base nos testes descritos na norma IEEE C37.118 e seus respectivos requisitos de conformidade.

2 Princípios de Medição Fasorial

2.1 Conceito de Sincrofasores

O conceito de Sincrofasor ou Fasor Sincronizado é definido pela norma IEEE C37.118 (2011) como sendo uma extensão do princípio de fasor no qual utiliza uma base de tempo única para a referência angular. A base de tempo toma como referência a relação do fuso horário da região a partir do padrão de Tempo Universal Coordenado (UTC). O sinal de referência angular é definido como uma função cosseno de frequência igual a fundamental do sistema sincronizado com o UTC, onde a referência angular é tomada usando-se o sinal do GPS denominado Pulso Por Segundo (PPS). Define-se frequência de reportagem ou frequência de emissão de sinal (f_s) à taxa de emissão de fasores a cada segundo.

2.2 Descrição e Desenvolvimento da Norma IEEE

O desenvolvimento das normas referentes à PMU se deu em paralelo com o processo de desenvolvimento dos equipamentos de medição fasorial. A última versão da Norma contempla ensaios estáticos e dinâmicos, estes últimos devido à

necessidade da aplicação de medições fasoriais em condições de distúrbio na rede, o IEEE lançou em 2011 uma nova versão revisada da norma, a IEEE C37.118 (2011). A partir desta norma, passou-se a definir requisitos de medição da frequência e da taxa de variação de frequência do sistema. Importante destacar também que foram definidas as classificações das PMU segundo dois grandes grupos, as do tipo M para Medição e as do tipo P para Proteção. A diferença principal entre os dois tipos está na filtragem diferente, de maior ordem nas PMUs do tipo M. São sugeridos modelos de algoritmos em seus diversos detalhes, tais como: o comprimento de janela de amostras a ser utilizada, a frequência de corte para o filtro, o método de estimação de frequência, latência do tempo de resposta, etc. Foi publicado ainda documento de alteração desta norma, o IEEE Std. C37.118.1a-2014 Amendment. Foram reavaliadas diversas restrições além de serem sugeridos novos modelos de algoritmos de PMUs e de estimação de frequência.

Um projeto universitário de grande extensão, o Projeto Medfasee (2016), envolve a medição de PMUs, sobretudo, em baixa tensão, onde a medição da frequência e de sua derivada assumem papéis importantes. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2016), está promovendo a aquisição de unidades de concentradores de fasores e também aplicativos para serem implementados em seus Centros de Controle. Em paralelo a isso, a ANEEL promoveu no primeiro semestre de 2016 audiências públicas para a adição de um submódulo 11.8 aos Procedimentos de Rede do ONS, abordando a implementação das PMUs no SIN.

3 Algoritmos de Estimação de Frequência aplicados às PMUs

3.1 Considerações Gerais

O monitoramento da frequência do Sistema de Potência teve início por meio do processo de verificação da velocidade de rotação dos geradores, a qual está diretamente relacionada com a frequência do sinal de tensão gerado. No entanto, esta medida só está disponível nas estações geradoras, havendo necessidade de medir a frequência do sistema de potência em pontos distantes das fontes, situados ao longo das linhas de transmissão. Com o desenvolvimento de sistemas SCADA, a medição de frequência em diferentes pontos do sistema é uma medida básica para o gerenciamento do sistema.

Um dos primeiros algoritmos aplicados neste âmbito foi o algoritmo por passagem por zero, o qual se baseava no cálculo do intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas por zero de um sinal, onde a frequência é obtida através do inverso do período calculado. Esse algoritmo não apresenta resultados satisfatórios para condições ruidosas e na presença de harmônicos. Mais adiante, outros

métodos foram desenvolvidos com base no estudo no espectro de frequência da forma de onda do sistema obtida através da Transformada Discreta de Fourier (DFT). Dentre estes métodos, podem-se citar os apresentados por Lobos (1997), Quinn (1994) e Jacobsen (2003). Estes métodos utilizam a técnica de janela retangular deslizante (*Sliding Window*).

Com o advento da Medição Fasorial Sincronizada, foram desenvolvidos métodos de estimação de frequência a partir do cálculo dos fasores. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos genérico dos algoritmos internos de PMUs, segundo a proposição da norma IEEE. O algoritmo baseia-se no cálculo da frequência a partir da variação do ângulo do fasor medido.

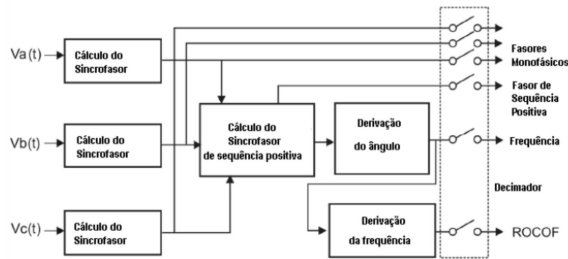


Figura 1. - Diagrama de Blocos do Algoritmo Interno a PMU (IEEE, 2011).

Outra linha importante é a estimação de frequência utilizando PLLs. O diagrama de blocos, ilustrado na Figura 2, apresenta a linha utilizada. Verifica-se que o algoritmo do PLL não depende do cálculo dos sincrofasores, operando como um módulo individual.

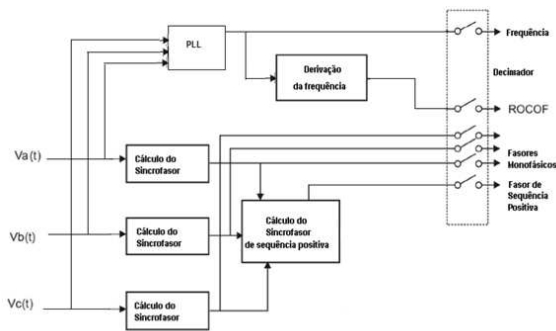


Figura 2. - Diagrama de Blocos de um modelo de PMU com um módulo de PLL integrado

3.2 Cálculo do ângulo por PMUs

Uma vez que o algoritmo da Norma depende do cálculo do ângulo do fasor, serão apresentados os algoritmos para PMUs do tipo M e P, conforme IEEE (2014). O algoritmo de estimação do fasor da PMU do tipo P proposto pela norma faz uso de uma janela triangular de largura de dois períodos na frequência fundamental. Para o modelo tipo M de PMUs houve uma preocupação em relação aos erros causados pelo fenômeno *Aliasing*, o qual se dá pela influência de sinais ruidosos com frequência não múltipla da frequência fundamental, denominados de inter-

harmônicos. Neste âmbito, a norma estipula um modelo de filtro digital *Anti-Aliasing* para esta classe de PMUs, onde são definidas as características de atenuação do espectro de frequência em torno da frequência fundamental.

3.3 Estimação de Frequência segundo a Alteração da Norma

Os algoritmos sugeridos pela Norma têm como base a definição de frequência a seguir.

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = f_0 + \Delta f(t), \quad (1)$$

onde:

$f(t)$ = frequência no instante t ,

f_0 = frequência nominal,

$\psi(t)$ = ângulo no instante t ,

O desenvolvimento exato para o cálculo da variação de frequência em função da fase do sincrofasor apresenta-se através da equação a seguir:

$$\Delta f(t) = \frac{[\theta(t+1) - \theta(t-1)]}{4\pi} \cdot f_0. \quad (2)$$

onde $\theta(t)$ é o ângulo estimado no instante t e $\theta(t-1)$ é o ângulo estimado no ciclo anterior, e assim por diante.

A taxa de variação de frequência, ROCOF, é então calculada a partir dos dois últimos valores estimados de $\Delta f(t)$:

$$ROCOF = [\Delta f(t) - \Delta f(t-1)] \cdot f_0 \quad (3)$$

O modelo sugerido pela norma IEEE Standard C37.118.1a-2014 (2014) apresenta a seguinte equação para estimar a frequência:

$$\Delta f(t) = \frac{[\theta(t+1) - \theta(t-1)]}{4\pi} \cdot f_0. \quad (4)$$

A equação para o cálculo do ROCOF sugerida pela mesma norma (IEEE Standard C37.118.1a-2014, 2014) apresenta-se a seguir:

$$ROCOF(t) = \frac{[\theta(t+1) + \theta(t-1) - 2 \cdot \theta(t)]}{2\pi} f_0^2 \quad (5)$$

3.4 Estimação de Frequência por PLLs

A maioria das estruturas de PLL trifásicos possui seu sistema de estimação de fase baseada numa transformação de coordenadas ortogonais ($\alpha\beta/dq$ ou Clarke-Park). No caso deste trabalho, optou-se por utilizar o algoritmo dqPLL devido ao seu bom desempenho com relação aos critérios: tempo de resposta e grau de tolerância a distúrbios, conforme descritos em (Marchesan 2013). Na Figura

3, apresenta-se o diagrama de blocos da estrutura dqPLL.

O sistema dqPLL é desenvolvido a partir da transformação aplicada sobre as tensões trifásicas v_A , v_B e v_C onde, tomando como referência os eixos estacionários $\alpha\beta$, se geram duas tensões em quadratura, V_α e V_β , que oscilam na frequência fundamental (Santos, 2006,2008). A partir disso a fase estimada é usada como ângulo de referência na transformação $\alpha\beta/dq$, gerando assim as componentes V_d e V_q . Caso a componente V_q esteja em fase com v_A , a componente V_d será zero, indicando coincidência entre o ângulo estimado $\hat{\theta}$ e o ângulo real θ .

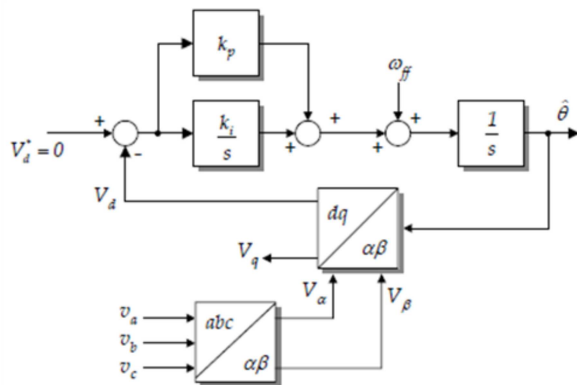


Figura 3. - Diagrama de Blocos da estrutura dq PLL (Santos, 2006)

Neste trabalho foram utilizados três configurações diferentes de dqPLLs que utilizam controladores de tipo proporcional integrativo, de onde resultam diferentes funções de transferência de malha fechada:

- A. Estrutura de Segunda Ordem: neste caso, os ganhos proporcionais e integrais estão baseados em Oliveira (2012), resultando na função de transferência mostrada na equação (6). Esta configuração proporciona uma rápida convergência da resposta, porém apresenta uma sensibilidade maior quanto a ruídos.

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = V \cdot \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{s^2} \quad (6)$$

- B. Estrutura de Segunda Ordem com Ganho Reduzido: para este caso, a função de transferência é a apresentada na equação (6), porém apresentando ganhos dez vezes menores, do que o caso A. O objetivo é reduzir a sensibilidade para sinais ruidosos, todavia apresentando uma resposta mais lenta.
- C. Estrutura de Terceira Ordem: neste caso é adicionado um bloco integrador ao controlador proporcional integrativo, de tal forma que se anula o erro de regime para a estimação de frequência no caso de acontecer mudanças de frequência em rampa. Este modelo apresenta uma menor dispersão dos erros de medição em relação aos outros modelos, contudo, seu tempo de resposta é maior. A equação (7) mostra a função de transferência resultante para este caso.

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta_e(s)} = V \cdot \frac{(s+z)^2}{s^3} \quad (7)$$

O ajuste dos ganhos dos controladores foi feito com auxílio do método dos lugar das raízes e do software Matab.

4 Resultados dos testes de Desempenho para os Algoritmos de Estimação de Frequência

Os testes podem ser divididos em dois subgrupos: os testes de regime permanente, onde os sinais de tensão e de corrente enviados a PMU não sofrem variações ao longo do teste, e os testes dinâmicos, onde há alteração de pelo menos um dos parâmetros do sinal avaliado (fase, amplitude ou frequência) ao longo do teste. Este trabalho utilizou como base os requisitos apresentados no documento *Amendment* (2014) da Norma IEEE. Cada teste apresenta um a tolerância definida segundo o tipo da PMU avaliada, tipo P ou tipo M, e sua taxa de exportação de fasores. Apresentar-se-ão resultados para os testes dinâmicos, comparando-se os resultados obtidos pelos três modelos de PLL e os algoritmos propostos pela norma para PMUs do tipo P e M. A frequência de exportação usada é de 60 fasores por segundo, sugerida na audiência pública da ANEEL (2016). A frequência de amostragem usada foi de 16 amostras por ciclo. A execução dos testes realizou-se no ambiente Simulink da plataforma Matlab (Mathworks, 2016). Para estes testes, a Norma define FE como erro de frequência (medida menos a verdadeira) e RFE como erro na derivada da frequência (derivada medida menos a verdadeira).

4.1 Testes de Inter-harmônicos

Os testes consistem no incremento de inter-harmônicos ao sinal da rede. Cada teste é efetuado com o incremento de apenas um inter-harmônico por vez com amplitude de 10% da onda fundamental da rede aplicada. O erro máximo tolerado (FE) para este teste, segundo a norma IEEE, é de 0,01Hz. Neste trabalho serão avaliados os inter-harmônicos das faixas de frequência de 30Hz e 90Hz. Apresentam-se na Tabela 4.1 os resultados obtidos. Observa-se que os PLLs não atendem aos requisitos da Norma.

Tabela 4.1 Resultados de FE(Hz) para o teste de Inter-Harmônicos

Frequências	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment
57Hz Sub Harm. 30Hz	1,91E+00	1,91E+00	1,95E+00	9,35E-04
57Hz Sub Harm. 90Hz	1,91E+00	1,91E+00	1,95E+00	4,17E-03
60Hz Sub Harm. 30Hz	3,11E-01	1,17E-01	9,55E-02	2,88E-03
60Hz Sub Harm. 90Hz	3,11E-01	1,17E-01	9,55E-02	1,76E-03
63Hz Sub Harm. 30Hz	1,91E+00	1,91E+00	1,96E+00	8,54E-04
63Hz Sub Harm. 90Hz	1,91E+00	1,91E+00	1,96E+00	1,74E-03

A norma IEEE prevê a implementação de um filtro *Anti-Aliasing*. Foi então aplicado um filtro do tipo *Butterworth* passa-baixa de quarta ordem aos PLLs, aplicados na saída do sinal de estimação de frequência (Figura 3). Observa-se, na Tabela 4.2,

que os algoritmos de PLLs atendem a Norma com a presença do filtro, com relação ao erro de frequência FE.

Tabela 4.2 Resultados de FE(Hz) para o teste de Inter-Harmônicos com a presença do filtro para PLL

Frequências	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment
57Hz Sub Harm. 30Hz	1,93E-03	1,86E-03	1,87E-03	9,35E-04
57Hz Sub Harm. 90Hz	1,92E-03	1,86E-03	1,87E-03	4,17E-03
60Hz Sub Harm. 30Hz	6,27E-04	8,32E-04	8,23E-04	2,88E-03
60Hz Sub Harm. 90Hz	6,29E-04	8,34E-04	8,28E-04	1,76E-03
63Hz Sub Harm. 30Hz	1,48E-03	1,51E-03	1,50E-03	8,54E-04
63Hz Sub Harm. 90Hz	1,48E-03	1,50E-03	1,49E-03	1,74E-03

Com relação ao erro na derivada da frequência (ROCOF) o documento de Alteração da Norma suspendeu a avaliação deste erro para testes de inter-harmônicos.

4.2 Testes de Modulação de Fase

O teste foi aplicado com modulação de fase de 1Hz, 3Hz e 5Hz. Observa-se a partir das Tabelas 4.3 e 4.4 que para frequências de modulação 5Hz os PLLs apresentam comportamento melhor que os algoritmos sugeridos pela Norma com relação ao RFE. As tolerâncias em relação ao FE e ao RFE apresentadas pela norma, para estes testes, são, respectivamente: 0,03Hz e 14,0Hz/s para as PMUs do tipo M e, 0,06Hz e 2,3Hz/s para as do tipo P.

Tabela 4.3 Resultados de FE(Hz) para o teste de Modulação de Fase com a presença do filtro para PLL

Frequências	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
1Hz	6,53E-04	5,00E-04	1,00E-03	2,78E-04	2,81E-04
3Hz	1,58E-03	1,61E-03	1,25E-03	5,24E-03	7,52E-03
5Hz	1,85E-02	1,75E-02	1,41E-02	2,32E-02	3,42E-02

Tabela 4.4 Resultados de RFE(Hz/s) para o teste de Modulação de Fase com a presença do filtro para PLL

Frequências	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
1Hz	2,29E-02	2,45E-02	2,46E-02	3,29E-02	3,29E-02
3Hz	6,09E-02	6,04E-02	6,03E-02	8,81E-01	8,81E-01
5Hz	5,96E-01	5,53E-01	5,48E-01	4,02E+00	2,01E+00

4.3 Testes de Rampa de Frequência

O teste de Rampa de Frequência tem como objetivo avaliar o desempenho dos estimadores de frequência sob uma variação linear de frequência. Para este caso, a norma especifica uma taxa de variação de frequência de $\pm 1\text{Hz/s}$. Para as PMUs do Tipo M, a faixa de frequência da rampa é definida entre 55Hz a 65Hz, enquanto que para o Tipo P o teste é executado na faixa entre 58Hz a 62Hz. Propôs-se ainda neste trabalho, realizar um teste de rampa adicional tomado como declividade uma taxa de 10Hz/s, com o objetivo de avaliar o algoritmo sob situações de variação de frequência maiores, próprias de oscilações sub-síncronas. A tolerância apresentada pela norma em relação ao FE para ambos os tipos de PMUs é de 0,01Hz. Em relação ao RFE, esta são de

0,2Hz/s para a PMU do tipo M e 0,4Hz/s para as PMUs do tipo P. Os resultados para este teste são apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6. Observa-se que para o PLL de terceira ordem, para a rampa de 10 Hz por segundo, o comportamento é melhor do que os outros algoritmos, inclusive os sugeridos pela Norma.

Tabela 4.5 Resultados de FE(Hz) para o teste de Rampa de frequência com a presença do filtro para PLL

Taxa de Frequência	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
1Hz/s	2,95E-04	1,23E-04	1,04E-04	1,57E-03	1,32E-03
10Hz/s	2,95E-03	1,23E-03	4,19E-03	9,48E-04	8,08E-03

Tabela 4.6 Resultados de RFE(Hz/s) para o teste de Rampa de frequência com a presença do filtro para PLL

Taxa de Frequência	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
1Hz/s	2,15E-02	1,89E-02	1,92E-02	1,00E-01	5,86E-02
10Hz/s	2,15E-01	1,92E-01	1,89E-01	9,99E-02	5,82E-01

4.4 Testes de Degrau de Fase

O teste de degra de fase consiste em uma alteração instantânea da fase do sistema em um dado momento em meio à simulação. O degra especificado pela norma é de $\pm 10^\circ$. Após a aplicação do degra é então verificado o tempo de resposta do sinal em relação à frequência e ROCOF estimados. O tempo de resposta é calculado como sendo o intervalo de tempo compreendido entre os instantes em que o sinal estimado sai da faixa de tolerância, tanto para o FE quanto para o RFE, e o instante em que o sinal retorna, acomodando-se dentro das faixas. A tolerância em relação ao tempo de resposta das PMUs do tipo M é de 0,233s, enquanto que para as PMUs do tipo P é de 0,1s.

Apresentam-se nas Tabelas 4.7 e 4.8 os resultados dos tempos de resposta, em segundos, obtidos para a configuração de PLLs com a presença do filtro citado. É possível observar que, com relação ao erro de frequência e erro de derivada de frequência, o algoritmo de PMUs do tipo P é bem superior aos demais.

Tabela 4.7 Resultados de FE para o teste de Degrau de Fase para os PLLs com filtro

Degra aplicado a Fase	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
10°	1,78E-01	1,98E-01	1,85E-01	1,72E-01	6,20E-02

Tabela 4.8 Resultados de RFE para o teste de Degrau de Fase para os PLLs com filtro

Degra aplicado a Fase	PLL 2º Ordem Ganho Padrão	PLL 2º Ordem Ganho Reduzido	PLL 3º Ordem	PMU M Amendment	PMU P Amendment
10°	1,14E-01	1,94E-01	1,18E-01	1,79E-01	6,40E-02

Segundo a Norma, a avaliação do efeito dos inter-harmônicos foi suspensa para PMUs do tipo P. Logo, o uso de PLLs sem o filtro é compatível com PMUs do tipo P. Nas Tabelas 4.9 e 4.10 são comparados os resultados dos testes com o PMU tipo P e o PLL sem filtro. Observa-se que os PLLs são superiores ao algoritmo PMU P tanto para FE como para RFE.

Tabela 4.9 Resultados de FE para o teste de Degrau de Fase para os PLLs sem filtro

Degrau aplicado a Fase	PLL 2° Ordem Ganho Padrão	PLL 2° Ordem Ganho Reduzido	PLL 3° Ordem	PMU P Amendment
10°	1,04E-03	3,68E-03	7,56E-03	6,20E-02

Tabela 4.10 Resultados de RFE para o teste de Degrau de Fase para os PLLs sem filtro

Degrau aplicado a Fase	PLL 2° Ordem Ganho Padrão	PLL 2° Ordem Ganho Reduzido	PLL 3° Ordem	PMU P Amendment
10°	1,06E-03	7,25E-03	2,54E-02	6,40E-02

5 Conclusão

Nos sistemas elétricos de potência, a estimação correta da frequência é essencial para a operação de diversos equipamentos de proteção, regulação e controle, de forma a se ter uma operação adequada do Sistema Interligado Nacional.

Neste sentido, a tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS) permite o monitoramento do sistema com sincronismo da ordem de microssegundos, mais rápidos que o SCADA tradicional. Além disso, para a estimação de frequência ainda podem ser usados algoritmos mais sofisticados do tipo PLLs.

Neste trabalho foram apresentados os resultados de um estudo comparativo de algoritmos de estimação de frequência no âmbito de medição fasorial sincronizada incluindo 3 modelos de PLLs. Utilizaram-se como base os testes descritos na norma IEEE C37.118 e seus respectivos requisitos de conformidade.

A partir dos resultados, conclui-se que os estimadores de frequência baseados em PLLs obtiveram desempenho superior àqueles baseados nos algoritmos sugeridos pelas Normas para PMUs do tipo P. Para os testes de inter-harmônicos, verificou-se a necessidade de implementar filtros *anti-aliasing* para que os PLLs tenham desempenho compatível com PMUs do tipo M.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte parcial de CNPq e do CEPEL.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, Processo: 48500.004749/2010-00 (2015), disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_arquivos/48500.004749-2010-00.pdf, Acessado em 01/04/2016
- Decker, I. C., Dotta, D., Agostini, M. N., Zimath, S. L. and Silva, A. S. (2006). "Performance of a synchronized phasor measurements system in the Brazilian power system," IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-8.

- Decker, I. C., Silva, A. S. and Prioste, F. B. (2011). "Monitoring Oscillations Modes of the Brazilian Interconnected Power System Using Ambient Data," IEEE Trondheim PowerTech.
- Gardner, F. M. (2005), "Phaselock Techniques" 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Golestan, S., Monfared, M., Freijedo, F. D., and Guerrero, J. M. (2013). "Advantages and Challenges of a Type-3 PLL". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no 11, pp. 4985-4997.
- IEEE Standard C37.118.1-2011, 2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
- IEEE Standard C37.118.1a-2014, 2014. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems - Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements.
- Jacobsen, E. and Lyons, R. (2003). "The sliding DFT," IEEE Signal Processing Magazine., vol. 20, no. 2, pp. 74-80.
- Lobos, T. and Rezmer, J. (1997). "Real-time determination of power system frequency". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no.4, pp. 877-881.
- Marchesan, G. (2013). "Estimadores de frequência aplicados aos sistemas elétricos de potência," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- MathWorks, Inc, "MATLAB - The Language of Technical Computing," disponível em: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Acessado em 01/04/2016.
- Oliveira, S. C. G. de. (2012). "Análise de Algoritmos Internos de Unidades de Medição Fasorial," Tese de doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2016, "Implantação do Sistema de Medição Sincronizada de Fasores", disponível em: http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/relatorios_anuais/2012/02-06-03-implantacao-sistema-medicao-sinc-fasores.html?expanddiv=02,02sub06, Acessado em 1/4/2016
- Projeto Medfasee (2016). Disponível em: <http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal/>, Acessado em 01/04/2016.
- Quinn, B. G. (1994), "Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, no. 5, pp. 1264-1268.
- Santos Filho, R. M., Seixas, P. F. and Cortizo, P. C. (2006), "A Comparative Study of Three-Phase and Single-Phase PLL Algorithms for Grid-Connected Systems", Proc. INDUSCON Conf.
- Santos Filho, R. M., Seixas, P. F., Cortizo, P. C., Torres, L.A.B. and Souza, A.F. (2008). "Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, no. 8, p. 2923-2932.