



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/11
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA -
GPC**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DE PMU
FRENTE A TESTES DA NORMA IEEE C37.118.1-2011**

**Marcelo Agostini (*) Adriano Pires Marcelo Dalmas Sérgio Zimath José Eduardo Alves Junior
Reason Tecnologia Eletrobrás Cepel**

RESUMO

Com o crescimento do número de PMUs no sistema elétrico, a discussão e o entendimento dos requisitos de desempenho requeridos na norma IEEE C37.118.1-2011 e no seu adendo IEEE C37.118.1a-2014, é de fundamental importância para a especificação de futuras instalações e a correta operação e manutenção do SMSF-SIN. Neste trabalho é apresentada uma análise de dois algoritmos distintos de cálculo de sincrofasores frente aos testes e limites propostos na norma. Resultados são apresentados usando-se uma plataforma híbrida de simulação, na qual os algoritmos foram implementados em uma PMU real.

PALAVRAS-CHAVE

PMU, Medição Fasorial, Ensaios de PMU, IEEE C37.118

1.0 - INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade operacional dos sistemas de energia elétrica tem demandado o aprimoramento constante dos seus instrumentos de monitoração e controle, tanto em tempo real quanto off-line. Esta demanda tem levado ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras, cenário no qual se destaca a Medição Fasorial Sincronizada. Os sistemas de medição sincronizada de fasores (SMSF) são formados, basicamente, por unidades de medição fasorial (PMU) instaladas em subestações, medindo sincrofasores de tensão e de corrente, e enviando-os a sistemas de concentração de dados (PDCS) instalados normalmente em centros de operação. As PMUs são sincronizadas a partir de uma base de tempo comum a todos os equipamentos, utilizando o sistema GPS, de forma que os sincrofasores medidos por todos os equipamentos, em um mesmo instante de tempo, refletem um ponto de operação instantâneo do sistema elétrico. Taxas de medição da mesma ordem de grandeza da frequência do sistema elétrico permitem a monitoração da dinâmica destes sistemas.

Os SMSF encontram-se em desenvolvimento em diversos países. No Brasil, encontra-se em implantação um sistema de medição sincronizada de fasores no Sistema Interligado Nacional, denominado SMSF-SIN. Este processo vem sendo liderado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Outras iniciativas de implantação de SMSF podem ser identificadas nas redes elétricas de agentes de transmissão e de geração, em diferentes estágios de desenvolvimento. Constata-se, ainda, o desenvolvimento pioneiro do Projeto MedFasee, liderado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com a participação da Reason Tecnologia, no qual um SMSF foi instalado no sistema elétrico de baixa tensão em 23 universidades parceiras do projeto, cobrindo as cinco regiões geográficas do país.

Em paralelo às diversas iniciativas que tratam do desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial, tanto em relação aos equipamentos quanto às aplicações dos dados fasoriais na monitoração e na operação dos sistemas elétricos, algumas questões a respeito de precisão e exatidão destas medidas têm sido foco de discussões. O uso

(*) Rua Delminda Silveira, 855 – Agrônômica – Florianópolis, SC – CEP 88.025-500
Tel: (48) 2108-0300 – E-mail: marcelo.agostini@reason.com.br

do conceito de fasor, uma representação de uma onda senoidal com frequência constante (regime permanente) em situações de operação real dos sistemas elétricos, quando a frequência do sistema não é constante, suscita discussões em torno da qualidade e da aplicabilidade dessas medidas para a representação dos sistemas elétricos. Discute-se, por exemplo, a comparabilidade e a interoperabilidade entre PMUs de diferentes fabricantes, tendo em vista possíveis interpretações divergentes sobre o processo de cálculo dos sincrofasores.

O tema medição fasorial é tratado na norma IEEE C37.118. Em 2011 esta norma passou por uma revisão, sendo dividida em duas partes, C37.118.1-2011 e C37.118.2-2011. A primeira parte trata da medição dos sincrofasores em si, e a segunda da comunicação de dados entre equipamentos em um sistema de medição fasorial. Na primeira parte adicionou-se, ainda, um conjunto de testes de regime permanente e dinâmico, com a definição de limites de erro para a verificação de conformidade de PMUs. Alguns destes limites, bem como alguns procedimentos de teste foram revisados recentemente, sendo ajustados no adendo IEEE C37.118.1a-2014.

Com o crescimento do número de PMUs instaladas no sistema elétrico, a discussão e o entendimento do desempenho requerido na nova versão da norma, bem como no seu adendo recente, é de fundamental importância para a especificação adequada e a correta operação e manutenção dos SMSF nas empresas do setor elétrico brasileiro. Alguns testes propostos possuem limites de desempenho que competem entre si, limitando de forma significativa as faixas de resposta permitidas para as PMUs, e por consequência exigindo desempenho acurado dos algoritmos internos de cálculo de sincrofasores. PMUs que possuem um desempenho adequado em um certo conjunto de testes podem não repetir o mesmo desempenho em outros tipos de teste.

Neste trabalho são apresentados dois algoritmos distintos de cálculo de sincrofasores. São descritos e discutidos alguns aspectos relacionados aos testes e limites propostos na norma IEEE C37.118.1-2011 e no seu adendo IEEE C37.118.1a-2014, em especial quanto à resposta em frequência da PMU. Discute-se a complementaridade entre testes, relacionando-se características de desempenho de algoritmos específicos de cálculo de sincrofasores a cada tipo de teste. Resultados são apresentados usando-se uma plataforma híbrida de simulação, na qual os algoritmos foram implementados em um equipamento real de PMU.

2.0 - REJEIÇÃO DE BANDA E MODULAÇÃO

Considerando-se a resposta em frequência da PMU, na norma IEEE C37.118.1-2011 são propostos os testes de rejeição de banda (*out-of-band interference*, ou OOB) e de modulação (*measurement bandwidth*). O primeiro objetiva verificar a capacidade da PMU rejeitar sinais fora da faixa de frequência de medição, que poderiam causar *aliasing* nas medições. Defini-se como banda passante os sinais cuja frequência f é dada por:

$$|f - f_N| < \frac{F_S}{2} \quad (01)$$

onde f_N é a frequência nominal, F_S é a taxa de envio de sincrofasores, e $\frac{F_S}{2}$ a frequência de Nyquist respectiva. Por exemplo, na taxa de 60 FPS, a banda passante situa-se entre 30 Hz e 90 Hz. Sinais fora desta faixa, abaixo de 30 Hz ou acima de 90 Hz devem ser rejeitados pela PMU.

Já o teste de modulação objetiva verificar a capacidade da PMU de medir corretamente oscilações de baixa frequência, que representam oscilações eletromecânicas no sistema elétrico. Neste teste, modulam-se as amplitudes (módulos) e as fases (ângulos) dos sinais de entrada na PMU, em certas faixas de frequências baixas, de acordo com cada taxa de transmissão de fasores, verificando se os sinais modulantes estão presentes corretamente nos sincrofasores medidos pela PMU.

Considerando-se um sinal de entrada com frequência nominal $f_N = 60$ Hz, modulações de módulo e/ou de ângulo com frequência $f_{mod} = 0,7$ Hz ou $f_{mod} = 1,2$ Hz, por exemplo, produzem componentes espectrais em $\pm(f_N - f_{mod})$ (59,3 Hz e 60,7 Hz, ou 58,8 Hz e 61,2 Hz, respectivamente). Isto é equivalente a se ter sinais de interferência com frequências $\pm(f_N - f_{mod})$ no sinal de entrada, conforme observado na Figura 1.

Observando seus efeitos no domínio da frequência, os testes de OOB e de modulação podem ser considerados complementares. O primeiro exige que a PMU rejeite sinais cujas componentes espectrais situem-se abaixo de $(f_N - \frac{F_S}{2})$ e acima de $(f_N + \frac{F_S}{2})$, ao mesmo tempo que o segundo exige que os sinais de modulação com componentes espectrais $\pm(f_N - f_{mod})$, com f_{mod} dependente da taxa de transmissão, sejam medidos pela PMU com erros baixos. Na Tabela 1 são apresentados os valores da "banda de corte" entre as faixas de frequência dos testes de OOB e de modulação, considerando-se a frequência nominal $f_N = 60$ Hz.

Observa-se que a banda de corte diminui consideravelmente a medida em que a taxa de transmissão de fasores é reduzida. Isto demonstra que a seletividade do algoritmo da PMU deve ser maior quanto menor a taxa de transmissão.

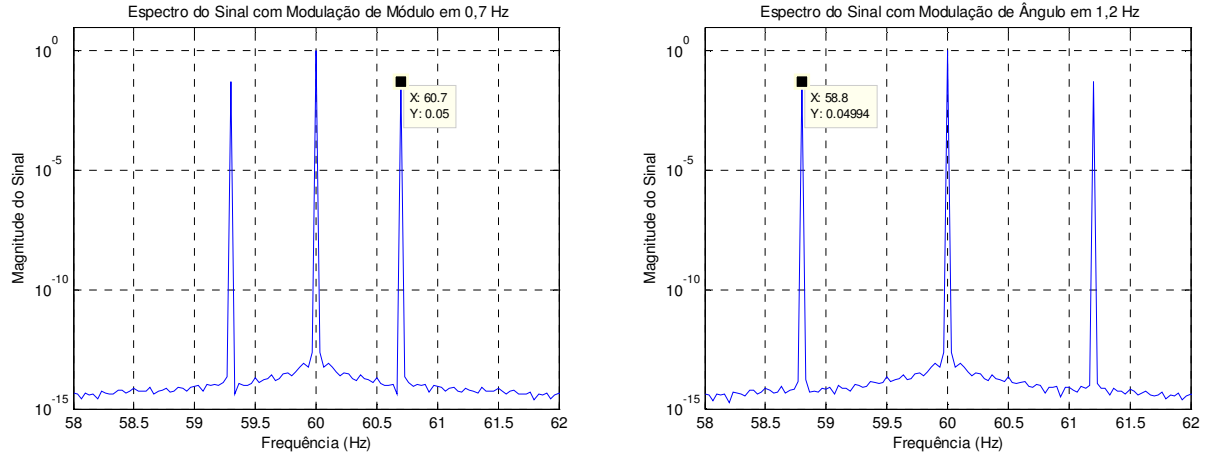


FIGURA 1 – RELAÇÃO ENTRE MODULAÇÃO E ESPECTRO DO SINAL MODULADO

TABELA 1 – BANDA DE CORTE ENTRE OOB E MODULAÇÃO ($f_N = 60$ Hz)

F_S (FPS)	$f_{mod\ máx}$ (Hz)	$\left[f_N - \frac{F_S}{2}\right]$ (Hz) (rejeitar abaixo de)	$[f_N - f_{mod\ máxima}]$ (Hz) (aceitar acima de)	$\left[\frac{F_S}{2} - f_{mod\ máx}\right]$ (Hz) (Banda de corte)
60	5	30	55	25
30	5	45	55	10
20	4	50	56	6
15	3	52,5	57	4,5
12	2,4	54	57,6	3,6
10	2	55	58	3

3.0 - ALGORITMOS PARA O CÁLCULO DE SINCROFASORES

Neste trabalho foram considerados dois algoritmos distintos para o cálculo de sincrofases, ambos baseados na Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*, ou DFT). A distinção básica entre os algoritmos é a estratégia de janela de dados.

3.1 Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é representada pela equação (02):

$$\bar{X}_h = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left(\cos \frac{2\pi h f_0 n}{f_{acq}} - i \sin \frac{2\pi h f_0 n}{f_{acq}} \right) \quad (02)$$

onde:

$\bar{X}_h \rightarrow$ fasor relativo ao harmônico de ordem h

$N \rightarrow$ tamanho da janela, dado em número de amostras

$x_n \rightarrow$ enésima amostra

$f_0 \rightarrow$ frequência fundamental da DFT

$f_{acq} \rightarrow$ frequência de aquisição

Normalmente em PMU, a f_{acq} é fixa e sincronizada, garantindo que os fasores medidos possuem a mesma base de tempo. Também é relevante observar que a f_{acq} é um múltiplo inteiro M da frequência nominal do sistema elétrico f_N , e essa relação é dada em “pontos por ciclo” (ppc). Por exemplo, uma PMU operando com $f_N = 60$ Hz e $M = 256$ ppc possui $f_{acq} = 15.360$ Hz. É conveniente utilizar janelas com tamanho múltiplo do tamanho do ciclo, $N = kM$. A relação entre f_{acq} e o tamanho da janela N determina f_0 , conforme a equação (03).

$$f_0 = \frac{f_{acq}}{N} = \frac{f_N M}{k M} = \frac{f_N}{k} \quad (03)$$

Para o cálculo dos fasores em um sistema elétrico somente f_N é de interesse, e como $f_h = h f_0$, então é necessário calcular somente os fasores do componente \bar{X}_h para $h = k$.

É necessário observar que a frequência instantânea do sistema elétrico não é igual à frequência nominal. Esse desvio na frequência ocorre devido à ação constante dos controladores na busca pelo equilíbrio entre a carga e a geração. Como o período da forma de onda medida não é exatamente igual ao tamanho da janela da DFT, ocorre o fenômeno chamado vazamento espectral, que compromete a acurácia da estimação do fasor. Para mitigar as consequências do vazamento espectral, normalmente são utilizadas janelas de dados, as quais visam atribuir diferentes distribuições de pesos para os dados a serem utilizados na DFT.

3.2 Janelas de Dados

Neste trabalho utilizaram-se dois tipos de janelas de dados: Hann e Flat Top. Na janela de Hann, os pesos w_n de cada amostra x_n na DFT são dados por (04):

$$w_n = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{N} \right) ; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (04)$$

Já no caso da janela tipo Flat Top, os pesos são dados por (05):

$$w_n = \sum_{j=0}^J a_j \cos \frac{2\pi j n}{N} ; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (05)$$

com $J = 4$ neste trabalho (Flat Top de 5 termos) e coeficientes a_k dados em [05].

Na Figura 2 pode-se observar uma comparação entre as janelas de Hann e Flat Top 5, fazendo-se $h = k = 1$ e $f_N = f_0 = 60$ Hz. Na janela Flat Top são priorizadas as amostras mais ao centro da janela, de forma que seu espectro de frequências apresenta um perfil de ganho mais plano próximo da frequência do harmônico de interesse ($f_h = 60$ Hz), com o corte de ganho do primeiro lóbulo no quinto bin ($f_h + 5 f_0$). Este corte na janela de Hann acontece no segundo bin ($f_h + 2 f_0$). A atenuação do segundo lóbulo em diante é maior na janela Flat Top que na Hann (Figura 2.b), evidenciando sua maior seletividade.

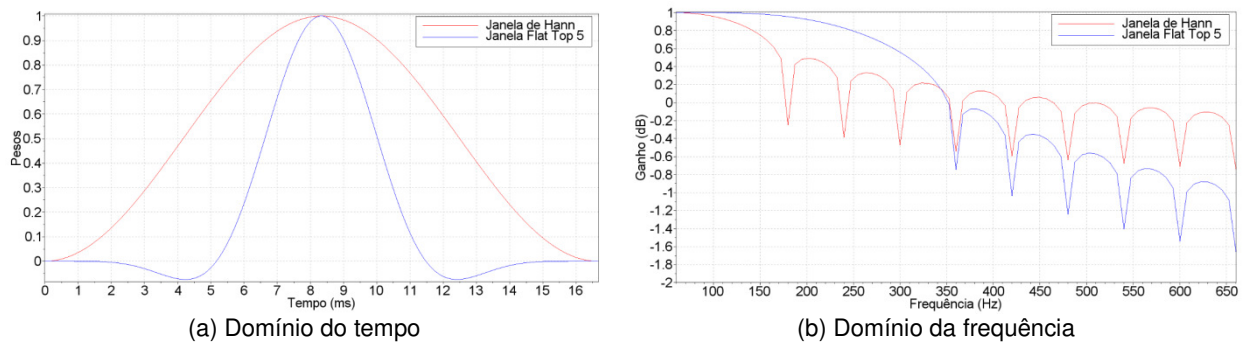


FIGURA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE JANELAS DE DADOS

3.3 Aplicação das Janelas de Dados nos Algoritmos

No algoritmo 1 considerado neste trabalho é aplicada a janela de dados do tipo Hann, tendo seu tamanho e a frequência fundamental da DFT f_0 ajustados de acordo com a frequência instantânea do sistema elétrico f_{in} . Estima-se a frequência a cada passo de cálculo, a partir da derivada do ângulo de tensão de sequência positiva dos sincrofasores calculados utilizando uma DFT de janela de dados de um ciclo e frequência fundamental igual à frequência nominal. A frequência estimada é usada para ajustar o tamanho da janela da DFT principal do algoritmo, que calcula os sincrofasores propriamente ditos. Um processo de reamostragem é usado para auxiliar o ajuste da janela. A frequência é recalculada posteriormente, a partir da derivada do ângulo de tensão de sequência positiva dos sincrofasores calculados.

Considerando-se $f_N = 60$ Hz e que $f_{in} \approx f_N$, projeta-se uma janela com $h = 4 \frac{f_N}{F_s}$ e $k = 4 \frac{f_{in}}{F_s}$, visando o correto posicionamento dos pontos de corte para o OOB. Na taxa $F_s = 60$ FPS, $h = 4$, $k \approx 4$, $f_0 \approx 15$ Hz e $f_h \approx 60$ Hz, posicionando-se assim as frequências de corte do primeiro lóbulo em ≈ 30 Hz e ≈ 90 Hz. Estes valores variam de acordo com cada taxa de transmissão, chegando a $h = 24$, $k \approx 24$, $f_0 \approx 2,5$ Hz e $f_h \approx 60$ Hz para $F_s = 10$ FPS, com os cortes em ≈ 55 Hz e ≈ 65 Hz. Pode-se dizer que a frequência do harmônico de interesse calculado pela

DFT é $f_h \approx f_{in}$, pois o tamanho da janela N deve ser arredondado para um número inteiro de amostras quando calculado por $N = kM$.

Com esta abordagem, a quantidade de pontos usados na DFT, a cada ciclo de cálculo, varia de acordo com a frequência instantânea do sistema elétrico. Também é necessário se recalculam os termos trigonométricos da DFT para cada frequência. Considerando a exigência em termos de desempenho computacional deste tipo de cálculo em sistemas embarcados, normalmente se utilizam tabelas com os valores dos senos e dos cossenos pré-calculados para uma faixa de variação de frequência esperada. Neste trabalho utilizou-se uma faixa de 10 Hz (55 Hz a 65 Hz), com passos de 0,0025 Hz (4000 tabelas).

No algoritmo 2 é aplicada a janela tipo Flat Top 5, com tamanho fixo sintonizado na frequência nominal do sistema elétrico. A frequência instantânea é estimada a cada passo de cálculo, usando uma DFT de janela de dados fixa e frequência nominal tal como no algoritmo 1. Os dados amostrados pelo equipamento são aplicados diretamente ao processo de montagem da janela, sem o uso de reamostragem ou recálculo dos termos trigonométricos da DFT. Após o cálculo dos fasores por meio da DFT, a frequência instantânea é usada para a correção destes fasores, por meio de um polinômio de 8ª ordem. A frequência é recalculada a partir da derivada do ângulo de tensão de sequência positiva dos sincrofasores corrigidos. Há uma correção linear da frequência a partir da taxa de variação de frequência instantânea para garantir a performance da medição sob regime dinâmico, mesmo com um número considerável de ciclos (k) na janela de dados da DFT.

Considerando-se $f_N = 60$ Hz, projeta-se uma janela com $h = k = 10 \frac{f_N}{F_S}$. Na taxa $F_S = 60$ FPS, $h = k = 10$, $f_0 = 6$ Hz e $f_h = 60$ Hz, posicionando-se as frequências de corte do primeiro lóbulo em exatos 30 Hz e 90 Hz. Estes valores variam de acordo com cada taxa de transmissão, chegando a $h = k = 60$, $f_0 = 1$ Hz e $f_h = 60$ Hz para $F_S = 10$ FPS, com os cortes em 55 Hz e 65 Hz.

O algoritmo 2 exige janelas maiores de dados que o algoritmo 1 para o posicionamento correto dos pontos de corte do primeiro lóbulo no espectro. Sua maior seletividade, porém, permite que a sua rejeição de banda seja mais eficaz que a do algoritmo 1. Esta característica pode ser observada na Figura 3, na qual são mostrados os espectros de frequência de ambas as janelas aplicadas aos algoritmos 1 e 2, respectivamente, nas taxas de 60 FPS e 10 FPS. Os ganhos foram normalizados para uma melhor comparação. É possível se observar o posicionamento das frequências de corte de cada algoritmo, em cada taxa, bem como a redução da banda de corte (Tabela 1) a medida em que a taxa de transmissão de fasores é reduzida.

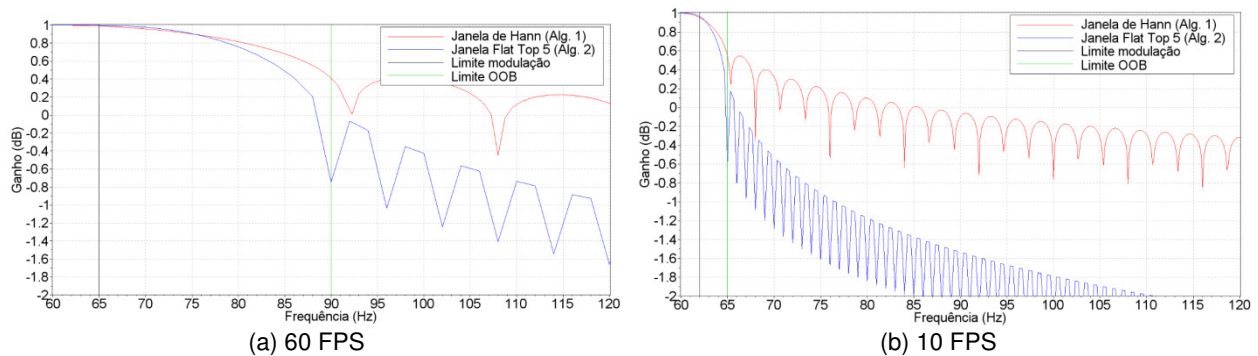


FIGURA 3 – APLICAÇÃO DAS JANELAS NOS ALGORITMOS DE CÁLCULO DE SINCRÓFASORES

4.0 - TESTES REALIZADOS E RESULTADOS

Foram realizados testes simulados de acordo com a norma IEEE C37.118.1-2011, e seu adendo IEEE C37.118.1a-2014. Para estes testes foi usada uma plataforma híbrida de simulação, conforme apresentado na Figura 4.

Os valores das amostras instantâneas dos sinais de referência (forma de onda), em cada teste, foram gerados no microcomputador e enviados à PMU. No equipamento, estes valores foram usados para o cálculo interno dos sincrofasores, como se fossem originados na sua etapa de aquisição. Os sincrofasores foram enviados de volta ao microcomputador, via rede Ethernet, através de mensagens no formato IEEE C37.118.2-2011. Os sincrofasores foram comparados com os valores de referência, calculando-se os erros TVE, FE e RFE.

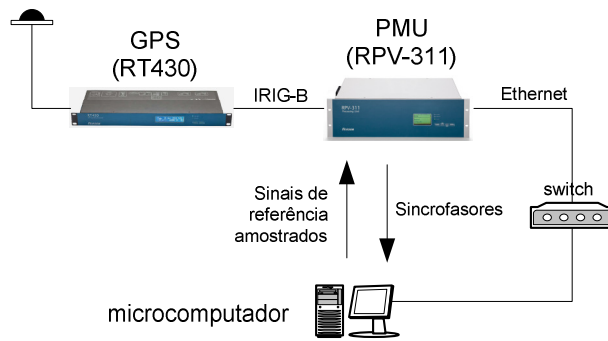


FIGURA 4 – PLATAFORMA HÍBRIDA DE SIMULAÇÃO

Foram realizados todos os testes propostos na norma, regimes estático e dinâmico, em todas as taxas de envio de sincronizadores, usando-se ambos os algoritmos descritos acima. Por simplicidade, neste trabalho é apresentado um subconjunto de resultados constando os testes nos quais se detectou alguma violação de limite, conforme a norma IEEE C37.118.1-2011 e seu adendo IEEE C37.118.1a-2014, e considerando-se apenas as taxas de 60 FPS e 10 FPS. Os testes não mostrados apresentaram resultados dentro dos limites em ambos os algoritmos.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados para os testes de rejeição de banda, de rampa de frequência, e de modulação para a taxa $F_S = 60$ FPS. Na Tabela 3, os mesmos testes para $F_S = 10$ FPS.

TABELA 2 – RESULTADOS DOS TESTES ($F_S = 60$ FPS)

Tipo de teste	Algoritmo 1			Algoritmo 2			Limites (IEEE C37.118.1-1a)		
	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)
Rejeição de banda (OOB)	0,98	169,0	-----	0,02	5,2	-----	1,20	10,00	-----
Rampa de frequência	0,32	11,0	0,35	0,10	0,1	0,01	1,00	10,00	0,20
Modulação	0,82	140,0	11,00	0,09	45,0	1,50	3,00	300,00	14,00

TABELA 3 – RESULTADOS DOS TESTES ($F_S = 10$ FPS)

Tipo de teste	Algoritmo 1			Algoritmo 2			Limites (IEEE C37.118.1-1a)		
	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (Hz/s)
Rejeição de banda (OOB)	0,71	17,0	-----	0,04	0,1	-----	1,20	10,00	-----
Rampa de frequência	2,50	50,0	0,01	0,39	4,1	0,12	1,00	10,00	0,20
Modulação	4,20	122,0	2,70	2,35	60,0	0,70	3,00	120,00	2,30

Os resultados dos testes de rejeição de banda apresentados nas tabelas acima são relativos à situação com frequência nominal deslocada: $f_N = 63,0$ Hz em $F_S = 60$ FPS; e $f_N = 60,5$ Hz em $F_S = 10$ FPS; sendo esta a pior situação encontrada.

Os valores mostrados em amarelo indicam violações de limites da norma. Observe-se que ocorreram mais violações para a taxa mais baixa (10 FPS) que para a taxa mais alta (60 FPS), confirmando a maior exigência em termos de seletividade no caso de taxas mais baixas de transmissão de sincronizadores. O algoritmo 1 atende o critério de TVE para o teste de rejeição de banda (OOB) em todas as taxas, confirmando sua adequação em relação à versão anterior da norma (IEEE C37.118-2005), na qual não eram propostos testes dinâmicos. Porém, sua seletividade não é suficiente para o atendimento dos testes dinâmicos, em especial no caso da modulação.

Na Figura 5 é mostrada uma comparação dos ganhos de ambos os algoritmos no limite superior de frequência do teste de modulação. Esta diferença de ganho de 0,95 dB (alg. 1) para 0,97 dB (alg. 2) é suficiente para que os erros de TVE, FE e RFE, no algoritmo 2, fiquem dentro dos limites, em toda a faixa de variação da frequência de modulação, em todas as taxas.

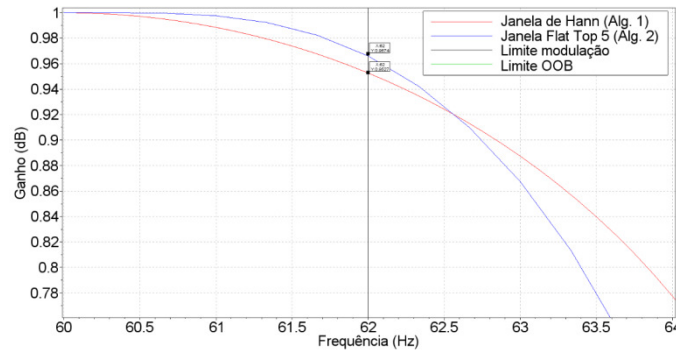
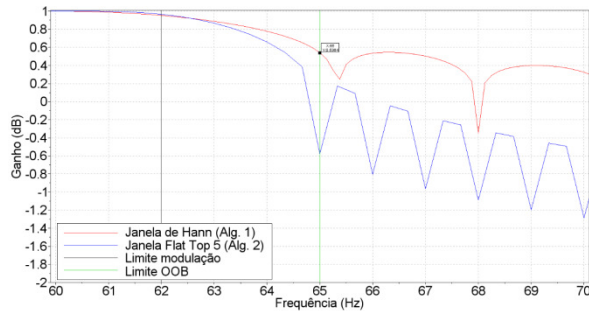


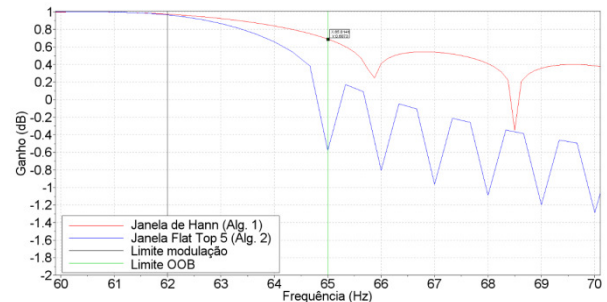
FIGURA 5 – COMPARAÇÃO DE GANHOS NO LIMITE DO TESTE DE MODULAÇÃO ($F_S = 10$ FPS)

Ao mesmo tempo, a maior atenuação que a janela Flat Top apresenta para as frequências acima do limite do teste de OOB, em comparação com a janela de Hann (Figura 3), garante o atendimento dos limites de TVE e FE neste teste (não há requisito de RFE para OOB).

Ainda em relação ao teste de OOB, ressalte-se que se deve variar a frequência nominal do sinal em $\pm 10\%$ da frequência de Nyquist da taxa de transmissão durante o teste. Em 60 Hz, na taxa de 60 FPS, o teste deve ser realizado com a frequência nominal entre 57 Hz e 63 Hz, e na taxa de 10 FPS, entre 59,5 Hz e 60,5 Hz. No algoritmo 1, no qual é realizado o ajuste do tamanho da janela da DFT a partir da frequência instantânea, a aplicação do teste de OOB em frequências acima da nominal faz com que o espectro de frequências do algoritmo tenha seu centro deslocado para a frequência usada no teste, alterando-se os ganhos nas frequências de corte do teste. Na Figura 6 é mostrada uma comparação entre os espectros com a frequência nominal em 60 Hz e deslocada para 60,5 Hz, no caso da taxa de 10 FPS.



(a) $f_N = 60$ Hz



(b) $f_N = 60,5$ Hz

FIGURA 6 – ESPECTRO EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS NOMINAIS PARA O TESTE DE OOB ($F_S = 10$ FPS)

O algoritmo 1 tem sua seletividade degradada com o ajuste da janela para a frequência instantânea. O ganho aumenta de 0,53 dB para 0,69 dB no limite do teste de OOB, diminuindo a sua capacidade de rejeição de banda. Já o algoritmo 2, com janela fixa e compensações de fasores, mantém sua seletividade inalterada, fazendo com que seus erros de TVE e FE permaneçam abaixo dos limites mesmo com a frequência nominal fora de 60 Hz.

No caso do teste de rampa de frequência, é importante observar que o tabelamento dos valores de senos e cossenos pré-calculados, usado devido ao processo de ajuste da DFT a partir da frequência instantânea, no algoritmo 1, também interfere na precisão dos resultados. Foram usadas 4000 tabelas na faixa entre 55 Hz e 65 Hz. Então, nas taxas de 20 FPS e de 10 FPS, existe um número inteiro de pontos nas tabelas para cada passo de medição dos sincrofases (20 pontos na taxa de 20 FPS, e 40 pontos na taxa de 10 FPS), sendo usados sempre valores exatos de frequência das tabelas durante a excursão da frequência do sinal de entrada no teste. Nas demais taxas (60, 30, 15 e 12 FPS), a quantidade de pontos nas tabelas é fracionária para cada passo de medição dos sincrofases, sendo necessário o uso de valores aproximados das tabelas. Isto gera variações significativas de valores consecutivos de frequência nas taxas de 60, 30, 15 e 12 FPS, provocando um RFE também significativo. O algoritmo 2, com janela Flat Top fixa na frequência nominal, não sofre esta influência.

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho objetivou-se a análise do desempenho dinâmico de PMU frente a testes e requisitos da versão mais recente da norma de sincrofasores. Foram analisados e implementados dois algoritmos, um (algoritmo 1) baseado na janela de dados tipo Hann, com ajuste de tamanho pela frequência instantânea do sistema elétrico, e outro (algoritmo 2) baseado na janela Flat Top 5, com tamanho fixo. Foram realizados testes usando-se uma plataforma híbrida de simulação, na qual os algoritmos foram implementados em uma PMU real. Cumpre destacar que esta plataforma é superior a uma abordagem somente teórica, uma vez que usa em parte algoritmos de uma PMU real.

Mostrou-se que o algoritmo 1, apesar de atender os requisitos dos testes da versão anterior da norma, com testes apenas de regime estático, não apresenta desempenho suficiente para o atendimento dos requisitos de regime dinâmico, propostos na versão recente da norma. O algoritmo 2, por sua vez, atende a todos os requisitos de desempenho propostos na norma IEE C37.118.1-2011 e seu adendo IEEE C37.118.1a-2014.

Os resultados indicaram que o processo de ajuste de tamanho de janela, bastante usado em algoritmos de cálculo de fasores baseados em DFT, associado a uma janela de dados do tipo Hann, pode ocasionar perda de desempenho do algoritmo em algumas situações específicas de operação do sistema elétrico. A técnica de se manter fixo o tamanho da janela no caso do algoritmo 2, compensando-se os módulos e os ângulos após o cálculo da DFT, mostrou-se mais adequada frente aos requisitos dinâmicos propostos na norma.

Ressalta-se que o desempenho do algoritmo de cálculo de sincrofasores de PMU deve ser tanto melhor quanto menor a taxa de transmissão de fasores. Os limites dos testes de rejeição de banda (*out-of-band interference*, ou OOB) e de modulação são complementares, aproximando-se no domínio da frequência para taxas menores, exigindo maior seletividade do algoritmo. Neste sentido, cabe a reflexão em relação às exigências de desempenho colocadas à PMU em taxas de transmissão de fasores baixas, nas quais os benefícios da medição fasorial em si podem não ser aproveitados adequadamente. Atualmente já são encontrados equipamentos e sistemas operando a taxas mais elevadas que uma medida por ciclo de rede elétrica, tal como para a monitoração de ressonância sub-síncrona [12]. Em [13] relata-se que modos torsionais chegam a 46 Hz (faixa de frequências sub-síncrona), sendo necessárias PMUs com taxas superiores à 60 FPS para uma correta identificação destas frequências.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] AGOSTINI, M. N.; CRUZ, I. H.; FRANZEN, T. A. et al. Aplicação de Merging Unit para a Medição Sincronizada de Fasores. In: *XII Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Rio de Janeiro, RJ, Novembro de 2014.
- [02] AGOSTINI, M. N.; ZIMATH, S.; ALVES JR., J. E. R. et al. Ensaio de PMU de Acordo com a Norma IEEE C37.118.1-2011. In: *XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE*. Brasília, DF, Outubro de 2013.
- [03] ALVES JUNIOR, J. E. R.; OLIVEIRA, S. C. G.; WATANABE, E. H. Análise de Algoritmos Internos de Unidades de Medição Fasorial. In: *XI Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Florianópolis, Novembro de 2012.
- [04] HEINZEL, G.; RÜDIGER, A.; SCHILLING, R. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier Transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows. In: *Albert-Einstein-Institut*. Hannover, Fevereiro de 2002.
- [05] SALVATORE, L.; TROTTA, A. Flat-top windows for PWM waveform processing via DFT. *IEEE PROCEEDINGS*, vol. 135, Pt B, No 6, Novembro de 1988.
- [06] Projeto MedFasee. (2015) [On-line]. Disponível: <http://www.medfasee.ufsc.br/>
- [07] DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N.; DOTTA, D. et al. Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada no Sistema de Transmissão de 440 KV da CTEEP. In: *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE*. Florianópolis, SC, Outubro de 2011.
- [08] ROSCOE, A. J.; ABDULHADI, I. F.; BURT, G. M. P-Class Phasor Measurement Unit algorithms using adaptive filtering to enhance accuracy at off-nominal frequencies. *Smart Measurements for Future Grids (SMFG), IEEE International Conference on Digital*. doi: 10.1109/SMFG.2011.6125761. November, 2011.
- [09] IEEE Std. for Synchrophasor Measurements for Power Systems. IEEE Std C37.118.1-2011. December 2011.
- [10] IEEE Std. for Synchrophasor Measurements for Power Systems – Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements. IEEE Std C37.118.1a-2014. March 2014.
- [11] IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control. IEEE Std C37.242™-2013. March, 2013.
- [12] ZIMATH, S.; WILSON, D.; AGOSTINI, M. N. et al. Novel Sub-Synchronous Oscillation Early Warning System for the GB Grid. In: *Study Committee B5 Colloquium*. Nanjing, China, September, 2015.
- [13] PAL, B.; CHAUDHURI, B., Robust Control in Power Systems, Springer, 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Neujahr Agostini é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, 1996) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2002). Participa do Projeto MedFasee desde 2002, projeto pioneiro no desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial no Brasil. Áreas principais de interesse: medição fasorial sincronizada, modelagem e dinâmica de sistemas elétricos, modelagem orientada a objetos, engenharia de software e computação de alto desempenho aplicadas a sistemas elétricos.



Adriano Oliveira Pires é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC, 2013), e cursa atualmente o Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Trabalha na Reason Tecnologia desde 2013, responsável pelo desenvolvimento de firmware aplicado aos produtos Reason. Áreas principais de interesse: medição fasorial sincronizada, processamento de sinais e engenharia de software.



Marcelo Dalmas graduou-se em Engenharia de Controle e Automação em 2002 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tem trabalhado para Reason Tecnologia desde 2005 onde participou do desenvolvimento de diversos produtos, tais como Registrador Digital de Perturbações, relógios GPS, relés de proteção, Merging Units, entre outros.



Sérgio Luiz Zimath formou-se em Engenharia de Controle e Automação em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem trabalhado para Reason Tecnologia desde 1995 onde foi o responsável pelo desenvolvimento de diversos produtos, tais como RT1000 e RT2000 (relógios GPS), bem como do Registrador Digital de Perturbações RPIV, entre outros. Atualmente é o Diretor de Inovação, responsável pelo desenvolvimento de novos produtos, softwares e projetos de pesquisa de novas tecnologias.



José Eduardo da Rocha Alves Junior graduou-se em Eng. Elétrica pela UFRJ (1987), mestre em Eng. Elétrica pela COPPE-UFRJ (1991), doutor em Eng. Elétrica pela COPPE-UFRJ (1999). Professor na Universidade Federal Fluminense desde 1991. Pesquisador pelo CEPEL desde 1994. Áreas de atuação: Eletrônica de Potência, Medição de Energia e Medição Fasorial Sincronizada (PMU). *Senior member* do IEEE e membro da CIGRÉ.