Contribuição ao tratamento da dessincronização de dados no process bus: Dessincronização por erro de medição ⋆

Msc. Diomar A. C. Lima * **Dr. Daniel Pinheiro Bernardon** **
Msc. Wagner S. Hokama *** **Dr. Adriano P. Morais** ****
Dr. Aécio L. Oliveira † **Msc. Ângelo F. Sartori** ‡

* *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil, (e-mail: diomar.lima@acad.ufsm.br).*
** *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil, (e-mail: dpbernardon@ufsm.br).*
*** *CPFL Energia, Campinas 13088-900, SP, Brasil, (e-mail: whokama@cpfl.com.br)*
**** *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil, (e-mail: adriano@ctism.ufsm.br).*
† *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil, (e-mail: aecioeng@gmail.com).*
‡ *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil, (e-mail: sartori.af@gmail.com).*

Abstract: The article compares two techniques for estimating the frequency of sampled signals to address data desynchronization in differential protection based on the Process Bus according to IEC 61850. The first technique uses the Matrix Pencil (MP), while the second uses the Traditional Fourier method. After estimating the frequency, desynchronization compensation is performed, applying the compensated signals to the protection function. The study provides a detailed analysis of frequency estimation techniques in simulated scenarios, considering power system noise, amplitude variation, and harmonic components. Additionally, it evaluates the frequency estimation times, desynchronized signal compensation, and the resulting behavior of differential protection.

Resumo:O artigo compara duas técnicas de estimação de frequência para tratar a dessincronização de dados na proteção diferencial baseada no Process Bus conforme a IEC 61850. A primeira técnica utiliza a Matriz Pencil (MP) e a segunda, o método de Fourier Tradicional. Após a estimação da frequência, realiza-se a compensação da dessincronização, aplicando os sinais compensados à função de proteção. O estudo analisa detalhadamente as técnicas em cenários simulados, considerando ruídos do sistema de potência e componentes harmônicas, além de avaliar os tempos de estimação da frequência e o comportamento da proteção diferencial.

Keywords: Desynchronization; process bus; differential protection; IEC61850; frequency estimation.

Palavras-chaves: Dessincronização; barramento de processo; proteção diferencial; IEC61850; estimação da frequência.

1. INTRODUÇÃO

A introdução da interface IEC 61850 nos sistemas de automação de subestações (SAS) cria o *Process Bus*, um novo barramento de comunicação que conecta o nível de processo ao nível de *bay*. Essa arquitetura oferece benefícios em custos, confiabilidade, rapidez e interoperabilidade, viabilizando a proteção diferencial de barras em subestações de distribuição. A sincronização precisa dos dispositivos do SAS com um servidor de tempo, alinhado a um *Global Navigation Satellite System* (GNSS), é essencial para o correto funcionamento do SAS. Protocolos como *Network Time Protocol* (NTP), *Simple Network Time Protocol* (SNTP) e *Precision Time Protocol* (PTP) são utilizados para distribuir a sincronização do tempo, com precisões variando de 1 a 10 ms e 1 µs, respectivamente. A dessincronização pode causar erros na proteção diferencial, resultando em disparos indevidos ou bloqueios. Este artigo compara duas técnicas de estimação de frequência para tratar a dessincronização: Matriz Pencil (MP) e Fourier Tradicional (FT). Simulações foram realizadas para avaliar o desempenho dessas técnicas, considerando ruídos, variação de amplitude e componentes harmônicas.

⋆ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001. Ou "This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Finance Code 001.

2. DESSINCRONIZAÇÃO DE DADOS NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL

A sincronização de dados em SAS é obtida pela sincronização do clock interno dos *Intelligent Eletronic Devices* (IEDs) ao *clock* mestre da subestação. Cada dispositivo conectado ao *process bus* é equipado com um *clock* interno e possui um sinal de referência externo, que mantém a sincronização com o relógio mestre na subestação. Para garantir que todos os dispositivos realizem a amostragem no mesmo instante, adota-se um sistema de 1pps que transmite o pulso de amostragem uma vez por segundo. A distribuição do sinal de sincronização em um process bus normalmente é realizada pelos protocolos SNTP ou PTP, sendo o PTP o mais amplamente utilizado devido à sua alta precisão e capacidade de utilizar várias fontes de tempo como referência.
Ao receber o sinal de pulso, a amostragem é realizada considerando a frequência do *clock* interno, e cada amostra recebe um valor de contagem, o *sample counter* (SmpCnt). Este valor é incrementado a cada nova coleta de amostra e inserido no *frame Sample Values* (SV), sendo resetado a cada segundo, conforme a Figura 1. Assim que o IED, com interesse em determinada amostra, receber o pacote, poderá, a partir do SmpCnt, alinhar novamente as amostras no tempo e reconstituir o sinal.

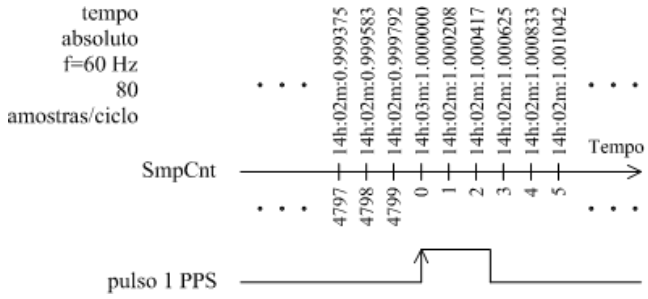

Figura 1. Exemplo de sinal Sample Values.
Fonte: Adaptada de Igarashi and Santos (2012).

A distribuição do sinal de sincronização pela rede traz muitos ganhos em comparação à distribuição ponto a ponto, como a melhora na capacidade de compartilhamento de informações e baixos requisitos para instalações de *hardware*. No entanto, entre os problemas enfrentados, pode-se citar a perda do sinal do GNSS. O desempenho da comunicação entre o receptor do sinal e o próprio GNSS depende da qualidade do oscilador interno e da visibilidade dos satélites. O receptor é vulnerável a interferências de radiofrequência, como multipercurso devido a reflexões ou difrações experimentadas quando os satélites estão em ângulos de baixa elevação, ou ataques cibernéticos causados pelo bloqueio ou falsificação deliberada ou inadvertida dos sinais de satélite (Han and Crossley, 2019). Além disso, situações como a imprevisibilidade do atraso na transmissão, congestionamento da rede, competição de serviço e perda de mensagens podem resultar em falha de sincronização entre o relógio mestre e o relógio escravo (Xin et al., 2016). As situações acima apresentadas podem causar dessincronização, resultando na falha de operação do SAS.
A sincronização de osciladores locais torna possível confrontar valores amostrados em diferentes pontos da subestação. O IED requer um sistema de sincronização de tempo de alta precisão para garantir a sincronização e a precisão na aquisição, processamento e transmissão de dados (Liu et al., 2019). Desta forma, a operação e precisão do SAS estão intrinsecamente ligadas à sincronização de dados.

2.1 Sincronização de frequência

A sincronização de dois sinais de corrente está diretamente ligada à sincronização dos relógios internos dos dispositivos que farão a amostragem do sinal. O erro de sincronização de frequência é definido como a diferença entre a frequência real gerada pelo *clock* de um relógio escravo e a frequência gerada pelo *clock* do relógio mestre.
No exemplo apresentado na Figura 2, ambos os períodos de oscilação t_1 e t_2 representam a duração do período de oscilação do mestre, que é igual ao período t_2 do escravo, e, consequentemente, as frequências são iguais.

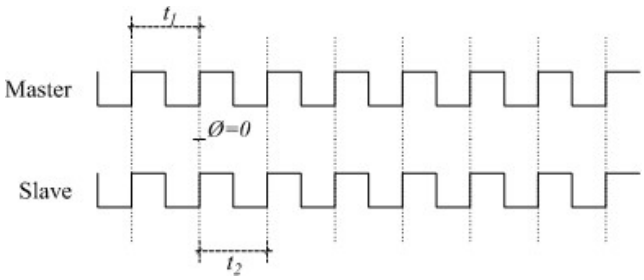

Figura 2. Sincronização da frequência entre dois sinais t_1=t_2, ϕ=0. .
Fonte: Adaptado de Santos (2012).

2.2 Dessincronização de dados

Existem diferentes níveis de requisitos de precisão de sincronização do tempo, ou *Time Synchronization* (TS), para diversas funções de proteção. Para a marcação de tempo de amostras sincronizadas, a IEC61850-5 (2013) define a classe T5, com precisão do erro de sincronização de 1 µs. A sincronização com precisão inferior para a respectiva aplicação resulta na dessincronização dos dados/medidas. Segundo Son et al. (2019), a análise dos resultados de simulações mostra que o erro de sincronização de tempo é um fator causador de erros na proteção, podendo resultar em detecção errônea de faltas e estimativa incorreta de localização de falta.

Dessincronização de dados por erro de tempo de medição
Este tipo de dessincronização ocorre devido a problemas na sincronização da frequência entre os dispositivos responsáveis pela aquisição das amostras, ou seja, é causado quando as fontes de dados são atualizadas em instantes diferentes. Quando ocorre a perda de sincronismo dos dispositivos, como a MU, por exemplo, isso acarreta em erro de tempo de medição. A Figura 3 apresenta os valores instantâneos obtidos durante a dessincronização por erro de tempo de medição.

Onde:
T_S – Representa o tempo de leitura entre as amostras do sinal sincronizado;
T'_S – Representa o tempo de leitura entre as amostras do

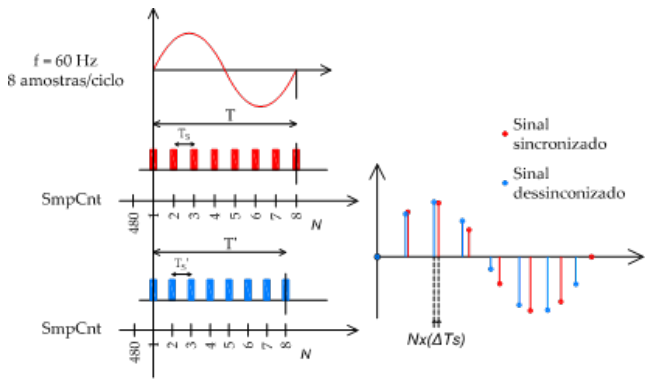

Figura 3. Dessincronização por erro de tempo de medição.

sinal dessincronizado;
ΔT_S – Representa diferença entre os tempos leituras das amostras do sinal sincronizado e dessincronizado;
N – Representa o número da amostra.

2.3 Problemas da dessincronização de dados na proteção diferencial de barras

A proteção diferencial compara as correntes de entrada e saída de um determinado nó, barramento ou equipamento elétrico. Se houver uma diferença significativa entre elas, um sinal de *trip* é enviado para a abertura do respectivo disjuntor.
Entre os problemas que podem ser ocasionados pela dessincronização de dados na proteção diferencial, pode-se citar, falsos disparos do sistema de proteção, o que pode causar interrupções no fornecimento de energia elétrica e até mesmo danificar equipamentos. Além disso, quando a proteção diferencial não detecta uma condição de falha real, o equipamento pode ficar desprotegido.

3. COMPENSAÇÃO DO ERRO DE TEMPO DE MEDIÇÃO

Uma etapa importante no tratamento da dessincronização por erro de tempo de medição está relacionada à qualidade e ao tempo de identificação da frequência do sinal. A seguir, são apresentadas duas técnicas para estimação da frequência utilizadas na compensação da dessincronização: Matriz Pencil e Fourier Tradicional.

3.1 Matriz Pencil

A Matriz Pencil, ou Matriz-Pencil de Moore-Penrose, é uma ferramenta matemática usada para representar operadores lineares entre dois espaços vetoriais, permitindo o cálculo da pseudoinversa da matriz correspondente. Suas aplicações incluem soluções de sistemas lineares, análise de sistemas dinâmicos e teoria de controle.
Ao considerar o sinal amostrado, sua resposta no tempo (t=(T_Sk)) pode ser expressa conforme (1).

$$y(T_s k) = x(T_s k) + n(T_s k) \approx \sum_{i=1}^{M} R_i e^{k} + n(T_s k) \qquad (1)$$

k = 0, . . . , N-1, $\quad z_i = e^{s_i T_s} = e^{(-\alpha + j\omega_i)T_s}, \quad i = 1, \ldots, M$
Onde :
$y(\mathrm{T}_s\mathrm{k})$ – Resposta no domínio do tempo;
$\mathrm{n}(T_s\mathrm{k})$ – Ruído presente no sinal amostrado;
$\mathrm{x}(T_s\mathrm{k})$ – Sinal amostrado;
R_i – Resíduo ou amplitude complexa da senoide i;
s_i – Pólos complexos (-α+jω_i);
α_i – Fator de amortecimento da senoide i;
ω_i– Velocidade angular;
N – Número de pontos de amostragem;
M – Ordem do sinal;
O método MP tem como objetivo estimar R_i e z_i. A partir do conhecimento da matriz contendo os valores de z_i, a frequência do sinal é então obtida a partir de (2).

$$f_i = \frac{Im(\ln z_i)}{2\pi T_s}, \quad i = 1, 2, \ldots, M \qquad (2)$$

3.2 Fourier Tradicional

O segundo método utilizado para estimação da frequência é a Transformada Fourier Tradicional. Esta técnica é baseada na medida da velocidade angular dos fasores de tensão. A partir de uma janela de amostras, calcula-se o fasor que as representa no instante "k". Este fasor é dado por (3) e (4).

$$V_{\mathrm{Re}}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n] \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \qquad (3)$$

$$V_{\mathrm{Im}}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[k-n] \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \qquad (4)$$

Onde:
V_{Re} – Representa a parte real do fasor;
V_{Im} – Representa a parte imaginária do fasor;
N - É a quantidade de amostras por ciclo;
k - É o instante de tempo;
n – representa o número da amostra.
O fasor é calculado para cada nova amostra de tensão inserida na janela de dados. Em seguida, procede-se ao cálculo da velocidade angular instantânea do fasor. Para isso, calcula-se o argumento dos fasores, conforme (5) (Marchesan, 2013).

$$\arg(\overline{V}) = \arctan\left(\frac{V_{\mathrm{Im}}(k)}{V_{\mathrm{Re}}(k)}\right) \qquad (5)$$

A frequência angular é dada pela diferença angular entre dois fasores consecutivos, divididos pelo período de amostragem, conforme (6).

$$f_k = \frac{\arg(\overline{V}_{k+1}) - \arg(\overline{V}_k)}{2\pi T} \qquad (6)$$

Onde M é o período do sinal.

3.3 Interpolação de Lagrange

A partir da obtenção da frequência do sinal, realiza-se a comparação com a referência (60 Hz), atribuindo-se assim um erro dependendo da sua própria frequência. O valor do erro obtido a partir de (7) será utilizado para a compensação do sinal por meio da Interpolação de Lagrange.

$$\epsilon_i = |f_R - f_i| \qquad (7)$$

Onde:
ϵ_i – Erro sincronização em Hertz;
f_R – Frequência de referência;
f_i – Frequência calculada do sinal dessincronizado.

A interpolação de Lagrange é um método utilizado para obter um polinômio que passa por um conjunto de pontos conhecidos. Dessa forma, pode-se encontrar valores intermediários entre pontos conhecidos e estimar valores para funções que não possuem expressão analítica.
A interpolação polinomial de Lagrange é representada por um polinômio de grau n-1, onde n é o número de pontos conhecidos. O polinômio é dado por (8).

$$P(x) = \sum_{i=0}^{n} L_i(x) f(x_i) \tag{8}$$

Onde:
P(x) - É o polinômio interpolador que passa por todos os pontos conhecidos;
f(x_i) - É o valor da função no ponto x_i;
L_i (x) - É o polinômio de Lagrange correspondente ao ponto x_i, a equação geral é dada por (9).

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \tag{9}$$

A partir das frequências calculadas pode-se obter o intervalo entre as amostras (T_s) de cada sinal, conforme (10).

$$\Delta T_s = \frac{\left(\frac{1}{f_R} - \frac{1}{f_c}\right)}{AMC} \tag{10}$$

Onde:
ΔT_s – Representa a diferença entre os instantes das amostras;
f_R – Frequência de referência;
f_c – Frequência calculada do sinal dessincronizado;
AMC– Quantidade de amostras por ciclo.
O ponto a interpolar é obtido a partir (11).

$$x = x_i + (i \cdot \Delta T_s) \tag{11}$$

Onde:
x – Ponto a aplicar a interpolação de Lagrange;
x_i – Instante da amostra dessincronizada;
i – Número da amostra dessincronizada.
A partir do valor obtido (11) aplica-se (9). Após a compensação da amostra atualiza-se o buffer do sinal.

4. SISTEMA DESSINCRONIZADO

Os testes referentes ao desempenho das técnicas foram realizados utilizando um software de cálculo numérico. Foram considerados dois sinais de tensão e corrente, representando o secundário dos TCs e TPs de uma proteção diferencial de transformador. Um dos sinais foi considerado como referência, ou seja, em 60 Hz. Foram realizadas simulações para compensação dos erros de tempo de medição; para isso, foram considerados sinais dessincronizados com erros de 25 µs, dessincronizados com ruído característico do sistema elétrico de potência de 50 dB (Djurić and Djurišić, 2008) e dessincronizados contendo 1% de harmônica de 2ª ordem.

4.1 Erro de sincronização de 25 µs

A Figura 4 apresenta o sinais dessincronizados para o erro de sincronização de 25 µs, foram considerados ainda nas simulações o sinal dessincronizado com ruído de 50 dB e distorção harmônica. Na sequência, as Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam o resultado da compensação utilizando as referidas técnicas de estimação da frequência.

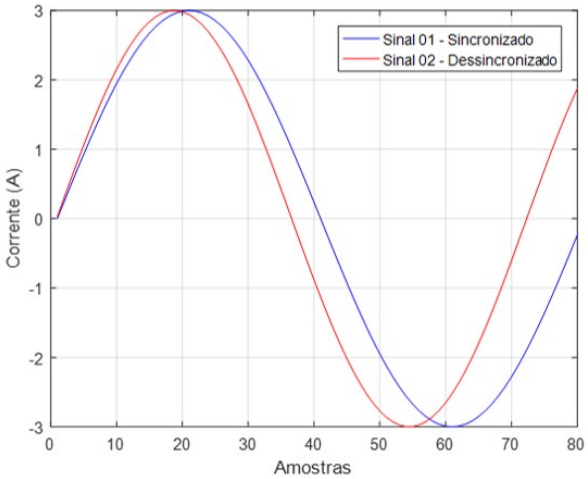

Figura 4. Sinais dessincronizados 25μs.

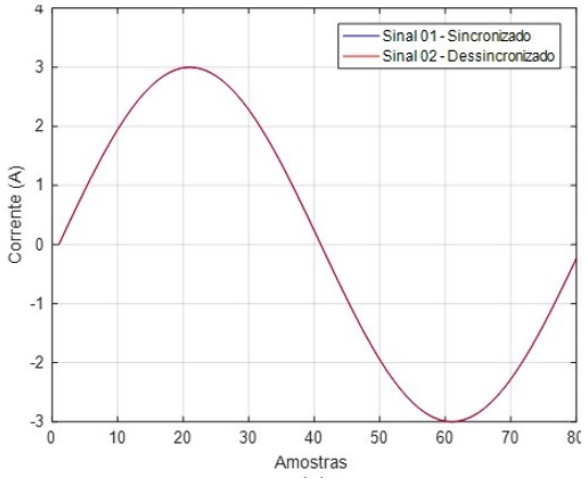

Figura 5. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs – Técnica matriz Pencil

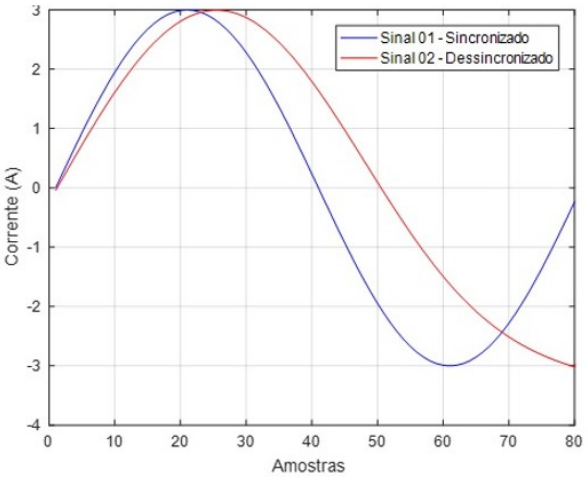

Figura 6. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs – Técnica Fourier Tradicional

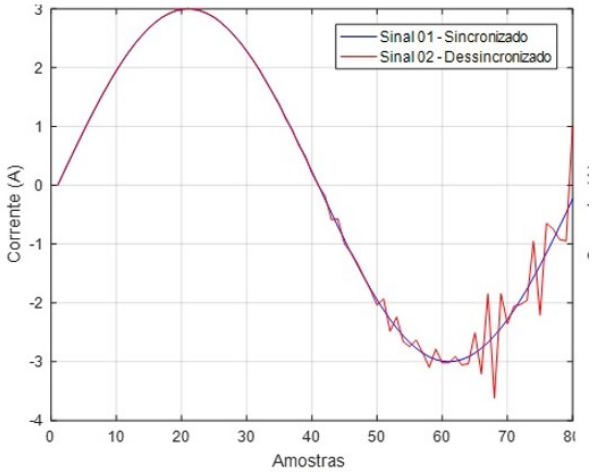

Figura 7. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs e ruído de 50 dB - Técnica matriz Pencil

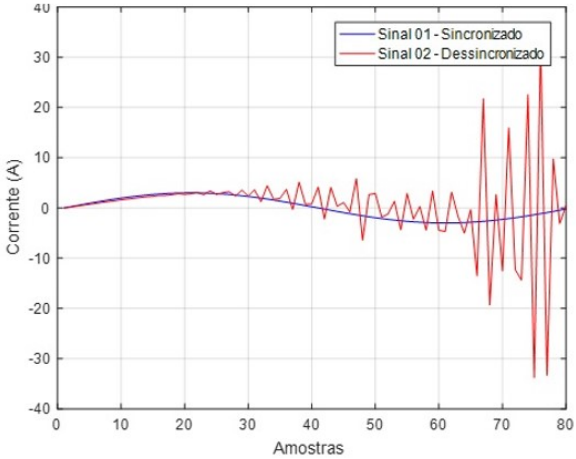

Figura 8. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs e ruído de 50 dB - Técnica Fourier Tradicional

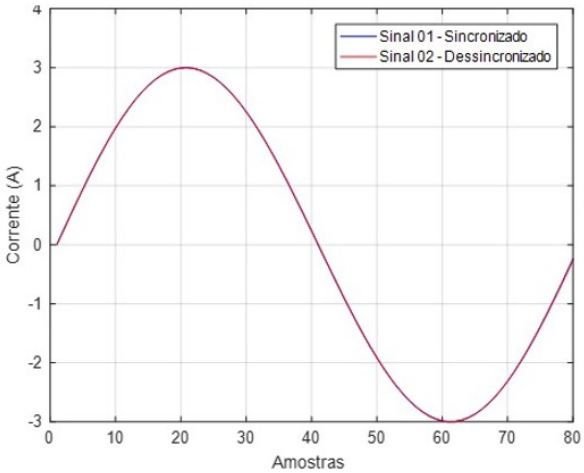

Figura 9. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs e distorção harmônica - Técnica matriz Pencil

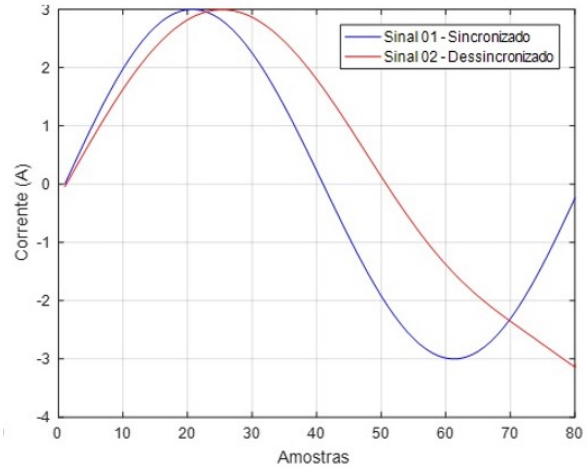

Figura 10. Sinal compensado, erro de sincronização de 25 μs e e distorção harmônica - Técnica Fourier Tradicional

A Tabela 1 apresenta o tempo de execução para a estimação da frequência de ambas as técnicas para os respectivos erros.

Tabela 1. Tempo de execução para estimação da frequência.

Descrição	Fourier Tradicional	Matriz Pencil
Erro de sincronização	$9.52\times10^{-5}s$	$8.15\times10^{-4}s$
Erro de sincronização + ruído	$4{,}69\times10^{-5}s$	$8.14\times10^{-4}s$
Erro de sincronização + distorção harmônica	$6{,}19\times10^{-5}s$	$8{,}83\times10^{-4}s$

Embora o método de Fourier Tradicional apresente tempos de execução menores, é importante destacar que o método Matriz Pencil se destaca pela sua maior precisão na estimação da frequência de sinais dessincronizados, mesmo em condições adversas como ruído e distorção harmônica.

4.2 Compensação aplicada na proteção diferencial

A seguir, são apresentados os resultados obtidos na aplicação dos sinais compensados por ambas as técnicas, alimentando a função de proteção diferencial. As Figuras 11, 12 e 13 representam a atuação da proteção diferencial frente aos sinais após o tratamento da dessincronização.

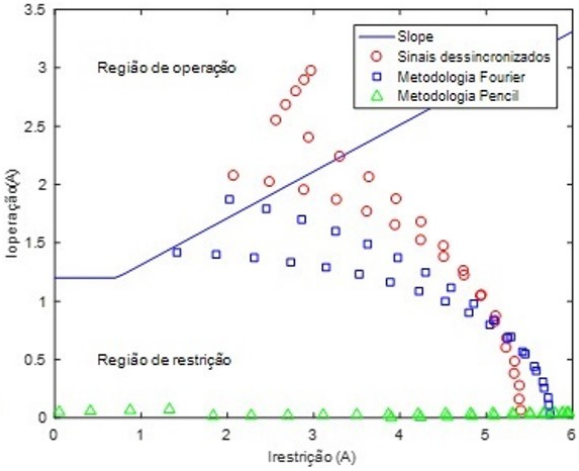

Figura 11. Proteção diferencial para sinais dessincronizados, amostras (3441 a 3520).

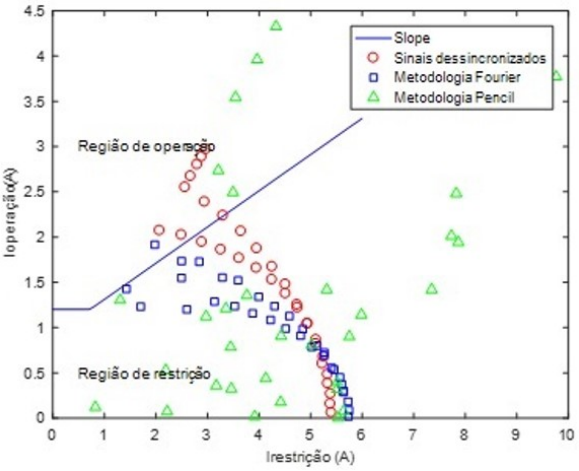

Figura 12. Proteção diferencial para sinais dessincronizados e ruído de 50 dB.

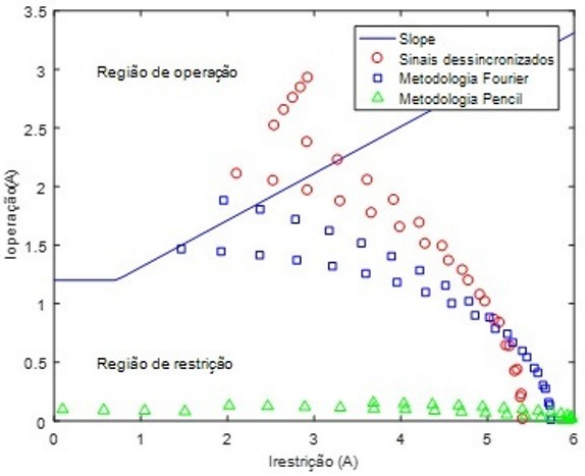

Figura 13. Proteção diferencial para sinais dessincronizados com distorção harmônica, amostras.

5. CONCLUSÃO

O artigo apresentou o comportamento de duas técnicas de estimação da frequência para compensação de sinais dessincronizados na proteção diferencial baseada na IEC 61850, utilizando o *Process Bus*. A técnica de Fourier tradicional teve um tempo de execução menor (0,84 ms para erros de sincronização de 25 µs) em comparação com a técnica Matriz Pencil. No entanto, a técnica Matriz Pencil demonstrou desempenho superior na compensação dos sinais dessincronizados, proporcionando maior estabilidade à proteção diferencial. Apesar do maior tempo de execução, a técnica Matriz Pencil mostrou-se promissora para a compensação de sinais dessincronizados, superando a técnica de Fourier tradicional em termos de estabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro fornecido pela CPFL Energia, ao Programa P&D ANEEL e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES/PROEX), pela oportunidade de desenvolver o projeto "PA3083 — Metodologia para Proteção Diferencial Centralizada de Barra com Uso Eficiente do Barramento de Processo (*Process Bus*) de acordo com a Norma IEC 61850"— Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

Djurić, M.B. and Djurišić, R. (2008). Frequency measurement of distorted signals using fourier and zero crossing techniques. *Electric Power Systems Research*, 78(8), 1407–1415. doi:10.1016/j.epsr.2008.01.008.

Han, M. and Crossley, P. (2019). Vulnerability of ieee 1588 under time synchronization attacks. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. doi:https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8973494.

IEC61850-5 (2013). *Communication networks and systems for power utility automation. Part 5, Communication requirements for functions and device models (Edition 2.0)*. International Electrotechnical Commission.

Igarashi, G. and Santos, J. (2012). Effects of loss of time synchronization in differential protection of transformers using process bus according to iec 61850-9-2. *EEE PES Innovative Smart Grid Technologies*.

Liu, S., Zhu, X., Zhao, G., Zhang, Y., and Wu, J. (2019). Abnormal time synchronization detection of substation ied based on frequency deviation. *IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference*. doi:https://doi.org/10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019515.

Marchesan, G. (2013). *Estimadores de frequência aplicados a sistemas elétricos de potência*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Santos, R.V. (2012). *Esquema para sincronizar relógios conectados por rede de comunicação por comutação de pacotes*. Doutorado em engenharia de sistemas, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.3.2012.tde-18062013-153427.

Son, K.J., Chang, T.G., and Kang, S.H. (2019). The effect of time synchronization error in lan-based digital substation. *Sensors (Switzerland)*. doi:https://doi.org/10.3390/s19092044.

Xin, D., Lu, Y., and Cui, X. (2016). A data synchronization method in smart substations based on characteristics of sampled values. *China International Conference on Electricity Distribution)*. doi:https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576080.