

Impacto da interpolação de sinais de unidades de medição sincronizada de fasores

Francisco Damasceno Freitas
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Distrito Federal, Brasil
Email: ffreitas@ene.unb.br

Pedro Elias W. D. Amaral
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Distrito Federal, Brasil
Email: pedroeliasamaral@gmail.com

Resumo—This paper presents an investigation concerning the data interpolation on phasor measurement units (PMU) signals subject to incomplete information due to data failure during its synchronized transmission to a PMU data concentrator (PDC). The methodology is discussed considering illustrations with practical data obtained from the PDC. The techniques based on linear interpolation and piecewise cubic Hermite interpolating polynomial (PCHIP) are evaluated. Experiments with and without interpolation are carried out with the main purpose of demonstrating the impact of data failure on a real signal. The test results illustrate how important is to consider an adequate interpolation technique when data failure exists on a PMU signal.

Index Terms—PMU, data interpolation, Hermite interpolating polynomial, Medfasee.

I. INTRODUÇÃO

As informações contidas no conteúdo do ângulo de fase de fasores de tensão nodal de barras têm sido de grande interesse em sistemas elétricos de potência [1]. Sabe-se que o fluxo de potência ativa em uma interligação é uma aproximação da função do seno da diferença angular entre as duas barras terminais da interligação. Assim, medições associadas às tensões nodais e, conseqüentemente, estimativa de seus fasores em tempo real são de grande interesse para avaliação dinâmica dos sistemas elétricos.

Uma das áreas que tem recebido atenção de pesquisadores ultimamente é a voltada para o tratamento de dados precisos e confiáveis, coletados nas denominadas unidades de medição fasorial, mais conhecidas como PMUs.

Aplicações típicas em sistemas elétricos de potência que fazem uso de PMUs incluem, a estimação de frequências de oscilações eletromecânicas, a estabilidade de tensão, a estimação de estado em tempo real, etc.

A interpretação e o uso correto de dados deve ser um dos aspectos a ser considerado ao se avaliar sinais de PMUs visando identificação de sinais em tempo real. A presença de erros grosseiros de medidas podem gerar resultados indesejados, devendo esses casos serem identificados prontamente [2]. Além do erro de quantificação

intrínseco à medida em si, o sinal capturado na PMU deve ser transmitido através de canal dedicado e rápido, em tempo real, como por exemplo, a Internet. Evidentemente, esse canal está sujeito a falhas que podem gerar a interrupção de dados momentaneamente. Ainda que em curto intervalo de tempo, a princípio imperceptível, a perda de informação pode redundar em deterioração do sinal real e assim tornar-se um dado impreciso quando o alvo for a identificação de processo.

Vários trabalhos abordam o tema relativo à interpolação de sinais [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Em [3] a finalidade é a inserção de pseudo-medidas correspondendo a pontos adicionais entre duas medidas efetivas. Trabalhos similares utilizam a mesma abordagem [4], [5]. Em [6], é proposta metodologia com a finalidade de auto-correções dos sinais nos instantes em que há falha de transmissão de dados. A técnica é baseada em abordagem no domínio da frequência de sinais com elevada excursão (*ringdown*). Em [7], também no domínio da frequência, é apresentado um algoritmo de estimação de fasores sincronizados baseado na transformada de Fourier discreta (DFT) interpolada. Ainda neste artigo, é proposto processo de correção devido à presença de harmônicos. O algoritmo foi completamente implementado em FPGA. No trabalho [8], o problema da interpolação é implementado considerando abordagem do tipo linear para sinais no domínio do tempo. Conforme é mostrado nos exemplos mais adiante, dependendo da quantidade de dados a interpolar, este tratamento está sujeito a erro acentuado. No entanto, ao conhecimento que se tem, os artigos deixam de lado e omitem o detalhamento com relação ao processo de interpolação.

Este artigo apresenta estudo no qual detalham-se processos de interpolação de sinais de PMUs com falhas de dados. A metodologia é exemplificada com ilustrações de dados práticos obtidos de PMUs que integram o projeto Medfasee [9]. São implementados testes enfatizando a investigação da forma de interpolação de sinais por meio da técnica linear e da interpolação por parte através de polinômios interpolantes cúbicos de Hermite (PCHIP). Simulações com e sem interpolação são realizadas com o objetivo de mostrar o impacto sobre sinais sujeito a severa falha de dados.

A continuação do texto do artigo prossegue da seguinte forma: a Seção II foi inserida a fim de ilustrar o quão problemático é considerar sinais com elevada quantidade de dados falhos. Nas Seções III e IV, aborda-se o problema de correção de sinais com base em interpolação. Com esta finalidade, são apresentadas duas formas de interpolação, comparando-se o desempenho de ambas. A Seção V apresenta uma avaliação geral sobre os resultados encontrados a partir dos testes, mas levando em conta também o efeito da filtragem do sinal interpolado. Por fim, a Seção VI conclui o artigo.

II. EXPOSIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, destaca-se o problema de sinal no tempo com característica de ruído ambiente. Considera-se que todos os dados são armazenados, de forma sincronizada, em um PDC. Portanto, as informações de sinais compreendem dados reais medidos nas PMUs e transmitidos ao PDC. Para melhor ilustrar o problema, utiliza-se dados de duas PMUs do Projeto Medfasee [9]. As duas PMUs estão instaladas na UnB (Universidade de Brasília) e na UFAC (Universidade Federal do Acre). Somente informações relativas à fase A são consideradas, uma vez que os resultados obtidos para as demais fases são similares.

Os sinais medidos em cada PMU são transmitidos via Internet para o PDC que fica localizado na UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina). No entanto, todos os dados utilizados para análise são acessados *off line* do PDC. Os mesmos são baixados para arquivos e tratados de forma conveniente para os fins que se almeja neste artigo.

Além das duas PMUs (a da UnB e da UFAC), existem outras localizadas também em laboratórios de algumas universidades de todas as regiões geográficas do Brasil. Os sinais nessas universidades são todos medidos no lado de baixa tensão, ou em 220 V ou 127 V (para maiores informações, consultar [9] e diversos outros trabalhos sobre o Projeto Medfasee). São disponibilizados no PDC, além de tensão (magnitude e ângulo de fase), também frequência. Neste trabalho, consideram-se apenas os sinais de ângulo de fase. Todas as informações referem-se a dados colhidos no dia 14 de outubro de 2014, no período de 20h00 às 21h00, hora local de Brasília. Durante este período, não foi observado nenhum distúrbio significativo no sistema. Desta forma, assume-se que as informações são do tipo dados de ruído ambiente [10].

Em função da transmissão para o PDC, pode ocorrer perda de dados, por alguma razão. Este processo pode levar à perda de muito poucas amostras de dados ou a uma longa janela. Esta última, podendo ser severa para os dados da PMU a ser analisada.

O uso dos dados medidos em PMUs tem sido intenso, principalmente, para a análise modal visando a detecção de parâmetros que possam caracterizar a presença de oscilações eletromecânicas no sistema elétrico. Portanto, amostras dos sinais devem ser confiáveis a fim de que a

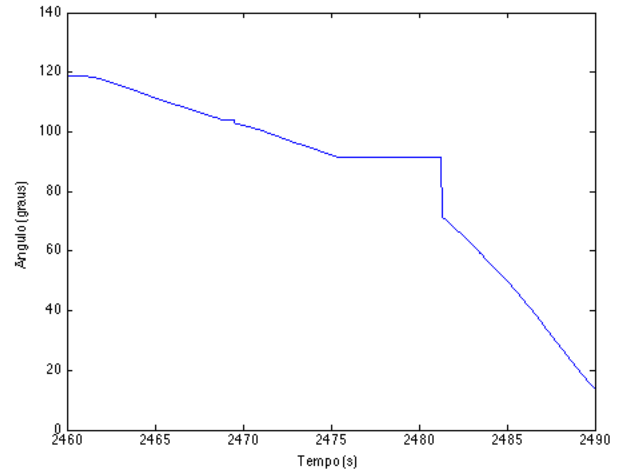


Fig. 1. Ângulo da fase A de sinal de tensão da PMU da UnB em função do tempo e observado em um PDC. No intervalo entre 2475 s e 2481 s ocorre falha de transmissão do sinal para o PDC.

análise tenha reduzida incidência de erro. Assim, evita-se a ocorrência de resultados distorcidos.

A fim de sinalizar a falta de dados em um sinal, no espaço das amostras correspondentes, alguns aplicativos preenchem os dados faltantes com o resultado transmitido da última amostra. Este procedimento garante a continuidade do processo de amostragem constante do sinal. Todavia, os dados preenchidos não deve ser levado em conta na análise, já que os mesmos servem apenas para sinalizar falha. Para ilustrar este processo, apresenta-se na Fig. 1 um exemplo no qual há uma janela de dados no tempo estendendo de 2460 s a 2490 s correspondente a sinal obtido na PMU da UnB. Porém, no intervalo de 2475 s a 2481 s, identifica-se que houve falha de transmissão de dados entre a PMU e o PDC. Esta constatação é comprovada em função da repetição da amostra na janela a partir do instante 2475 s. A grandeza utilizada é o sinal de ângulo de fase da tensão.

Com o objetivo de atenuar a distorção provocada pela perda de amostras, como no sinal da Fig. 1, propõe-se utilizar adequado recurso de interpolação de dados. Neste caso, as amostras corrompidas (parte do sinal com dados não transmitidos ao PDC) devem ser substituídas por valores intermediários e inseridos como parte do sinal entre as amostras adjacentes efetivamente medidas. Inicialmente, investiga-se o impacto da interpolação linear, conforme seção a seguir.

III. INTERPOLAÇÃO LINEAR

Quando o número de amostras corrompidas é reduzido, a interpolação linear é uma solução direta que pode ser adotada, culminando em perda irrelevante de informação. Entretanto, em algumas situações no qual uma quantidade alta de amostras é perdida, a interpolação linear pode ser insuficiente para atenuar a distorção do sinal, carecendo,

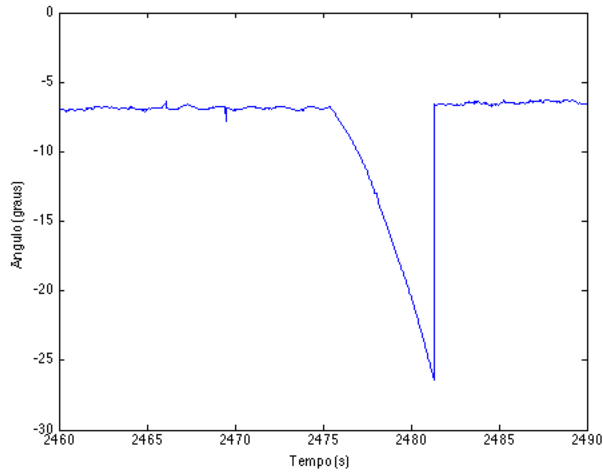


Fig. 2. Diferença angular de tensão da fase A entre os sinais das PMUs da UnB e da UFAC, havendo falha de transmissão de dados na PMU da UnB para o PDC no intervalo entre 2475 s e 2481 s.

assim, de se implementar interpolação mais complexa. Para tornar mais clara estas informações, investiga-se a influência da interpolação por meio de um estudo de caso.

Ao se analisar sinais de diferença angular de tensão entre PMUs, a magnitude dos sinais será pequena, ao se considerar sinais de baixa magnitude (ruído ambiente). Seja este o tipo de sinal tratado neste artigo. Nestes casos, a falta de interpolação, ou se a mesma for realizada de forma inadequada, o sinal de diferença angular de tensão entre PMUs tende a ficar distorcido. Efetivamente, com alguns valores muito superiores aos adjacentes, comprometendo os resultados da análise desejada. A Fig. 2 ilustra a diferença angular de tensão entre os sinais de PMUs da UnB e da UFAC. Neste caso, não foi utilizada nenhuma técnica de interpolação. Sabe-se apenas que os dados originais da PMU da UnB encontram-se corrompidos, devido à falha de transmissão verificada no intervalo já mencionado na Fig. 1.

Conforme já observado, a existência de dados corrompidos provoca a duplicação da última amostra conhecida, gerando distorções nos sinais de diferença angular de tensão. Note-se que este procedimento de repetição da última amostra válida até a próxima deve ser interpretado apenas como um indicador de falha de dados naquela janela. No caso da distorção ilustrada pelas Figs. 1 e 2, foram registradas 354 amostras corrompidas, totalizando 5,9 segundos de dados em um sinal com taxa de amostragem de 60 amostras por segundo.

A Figura 3 apresenta o mesmo gráfico da Fig. 1 acrescido da curva com os dados obtidos por meio de interpolação linear. É possível perceber pequena distorção no ângulo do sinal da PMU da UnB ao se usar a interpolação linear. Porém, com qualidade de resultado muito superior que sem interpolação de dados. Essa distorção fica mais evidente ao se avaliar a diferença angular entre o ângulo da tensão da

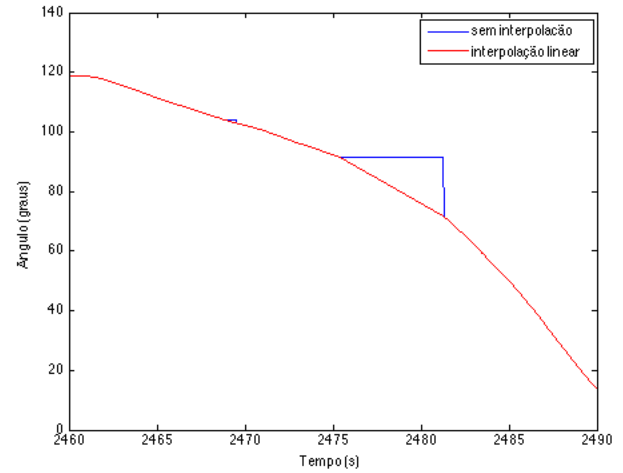


Fig. 3. Ângulo de fase do sinal corrompido, sem interpolação e com interpolação linear

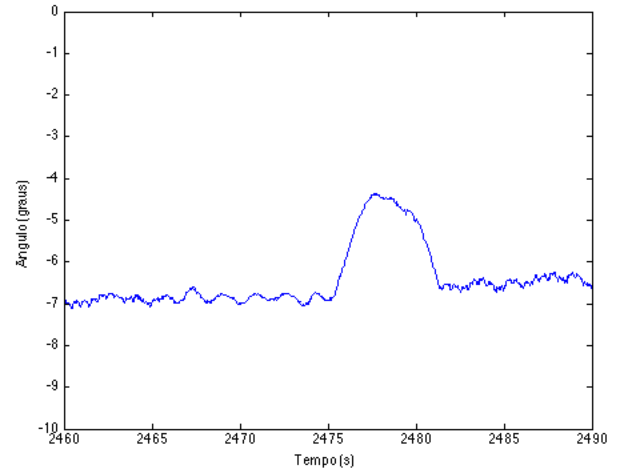


Fig. 4. Diferença angular de tensão entre as PMUs da UnB e da UFAC na situação em que a interpolação linear é utilizada

PMU da UnB e da PMU da UFAC. A Fig. 4 ilustra um sinal dessa diferença angular. Na forma de onda resultante mostrada na figura, constata-se que a PMU da UnB é a que apresenta dados com falhas em um determinado intervalo. Somente este fato já é suficiente para distorcer o sinal resultante, apesar dos dados sem falhas da PMU da UFAC no mesmo intervalo da medição.

Observa-se que, no trecho entre 2475 s e 2481 s, a diferença angular é muito maior que nos demais trechos do sinal resultante, evidenciando o impacto do sinal com falha sobre o sinal de diferença angular resultante.

Os gráficos da Fig. 5 referem-se a valores de ângulos das PMUs da UFAC e da UnB. Nesta figura, o ângulo de fase da PMU da UnB é apresentado após interpolação linear. Já o ângulo de fase da PMU da UFAC tem dados normais, sem qualquer tratamento por interpolação.

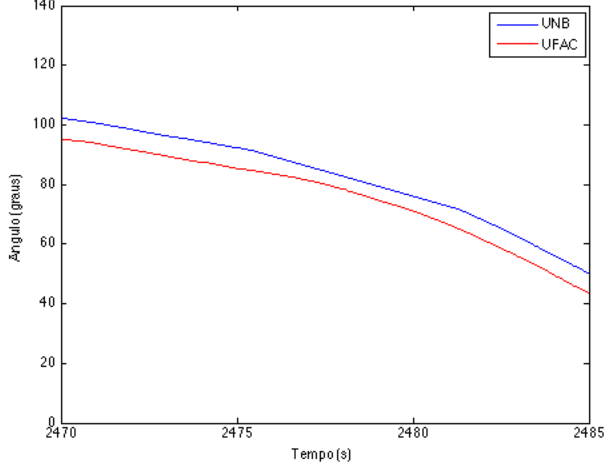


Fig. 5. Ângulo de tensão da PMU da UnB após interpolação linear e ângulo da tensão da PMU da UFAC,mas este último sem interpolação.

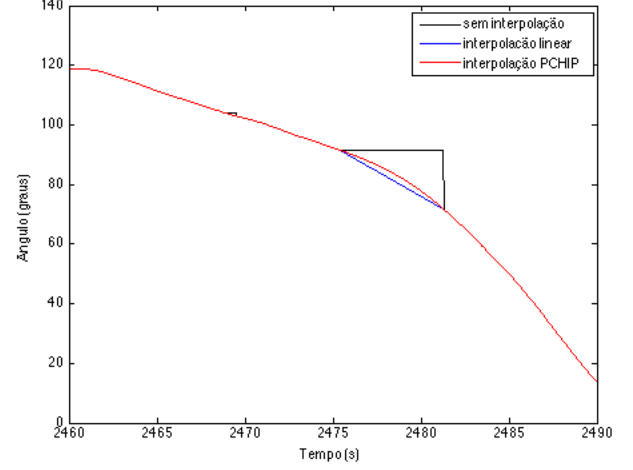


Fig. 6. Ângulo de tensão da PMU instalada na UnB com interpolação linear e interpolação PCHIP

Aparentemente, a aplicação da interpolação linear ao sinal da PMU com falha de dados teria corrigido os dados corrompidos. No entanto, conforme Fig. 4, este fato não ficou confirmado.

Em [8], a interpolação linear foi utilizada, mostrando-se adequada para os dados empregados. Entretanto, não se tem acesso às informações referentes à janela de dados em falha. Presumivelmente, trata-se de janela de dados corrompidos muito pequena. Pois, conforme verificado anteriormente, mesmo com interpolação linear e pequenas variações nos sinais, as distorções causadas pelas amostras corrompidas podem não ser satisfatoriamente atenuadas e corrigidas adequadamente ao se adotar interpolação linear.

Com o objetivo de melhor atenuar as distorções causadas por amostras corrompidas, optou-se então por estudar outro método de interpolação. Avaliou-se o efeito da interpolação pelo método *Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial* (PCHIP) [11], disponível no software *Matlab*.

IV. INTERPOLAÇÃO PCHIP

A interpolação PCHIP é um método de interpolação cúbica monotônica por partes que preserva o formato da curva localmente, mantendo a primeira derivada contínua [11].

Suponha que se queira interpolar uma função $f(x)$ em um intervalo $[a, a + n]$. A interpolação será considerada monotônica se $f(i) \leq f(i + 1)$, sendo $i \in [a, a + 1, a + 2, \dots, a + n - 1]$, ou $f(i) \geq f(i + 1)$, sendo $i \in [a, a + 1, a + 2, \dots, a + n - 1]$. Assim, o objetivo da interpolação PCHIP é gerar uma função cúbica $p(x)$ que seja monotônica no intervalo entre $f(a)$ e $f(a + n)$.

Em cada subintervalo $[f_i, f_{i+1}]$, $p(x)$ é um polinômio cúbico definido por:

$$p(x) = f_i H_1(x) + f_{i+1} H_2(x) + d_i H_3(x) + d_{i+1} H_4(x) \quad (1)$$

sendo que $d_i = p'(i)$.

As funções $H(x)$ são as funções cúbicas de Hermite, definidas da seguinte forma:

$$H_1(x) = \varphi\left(\frac{x_{i+1} - x}{h_i}\right) \quad (2)$$

$$H_2(x) = \varphi\left(\frac{x - x_i}{h_i}\right) \quad (3)$$

$$H_3(x) = -h_i \psi\left(\frac{x_{i+1} - x}{h_i}\right) \quad (4)$$

$$H_4(x) = h_i \psi\left(\frac{x - x_i}{h_i}\right) \quad (5)$$

sendo que $h_i = x_{i+1} - x_i$, $\varphi(t) = 3t^2 - 2t^3$ e $\psi(t) = t^3 - t^2$.

Assim, o algoritmo de interpolação PCHIP irá determinar as derivadas $d_i, d_{i+1}, \dots, d_{a+n}$, de tal forma que a interpolação seja monotônica, conforme detalhado em [11].

Para efeito de comparação, a Fig. 6 apresenta uma comparação das curvas apenas do ângulo de tensão da PMU da UNB utilizando a interpolação linear e a interpolação PCHIP. Observa-se que a interpolação PCHIP é mais suave do que a interpolação linear e preserva a curvatura do gráfico nas proximidades do trecho com amostras corrompidas. Os autores que desenvolveram este método dizem que a curva interpolada via PCHIP é “visualmente agradável” (*visually pleasing*).

A comparação entre os sinais de diferença angular entre as PMUs da UnB e da UFAC obtidos utilizando dados nos quais realizou-se interpolação linear e PCHIP pode ser avaliada através da Fig. 7.

Conforme pode ser inferido a partir da Fig. 7, o sinal de diferença angular utilizando a interpolação PCHIP

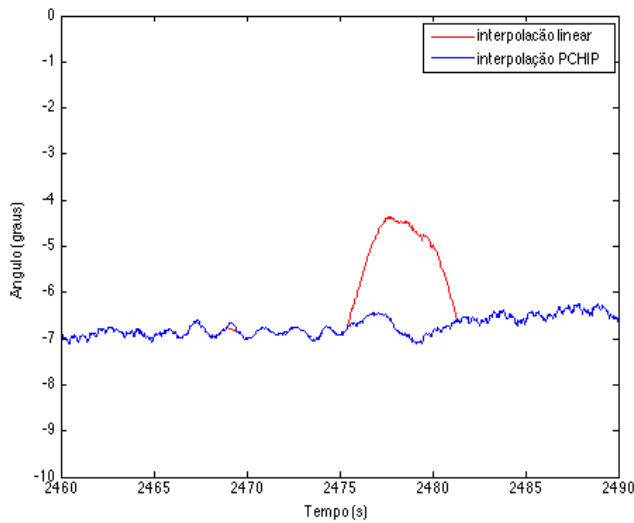


Fig. 7. Diferença angular de tensão entre as PMUs instaladas na UnB e na UFAC utilizando interpolação linear e PCHIP

comporta-se de maneira semelhante ao sinal na parte sem perda de dados. Esta aproximação é mais razoável, tomando como base a amplitude do sinal onde não houve perda de dados, introduzindo a sensação de dados normais na janela de dados corrompidos presentes no sinal de PMU da UNB.

V. INFLUÊNCIA DO EFEITO DA INTERPOLAÇÃO SOBRE A FILTRAGEM

As Figuras 8 e 9 ilustram o resultado de filtragem do sinal de diferença angular para atenuação das frequências inferiores a 0,1 Hz, considerando a interpolação linear e PCHIP. Ilustra-se aqui o procedimento de filtragem passa-alta. Avaliação similar pode ser efetuada para filtragem passa-baixa ou para passa-faixa.

Percebe-se que a filtragem do sinal em que foi feita a interpolação linear gera uma pequena oscilação no sinal filtrado. No caso da filtragem do sinal em que foi feita a interpolação PCHIP esta diferença é praticamente imperceptível, se comparada ao sinal nas janelas de dados em que não houve perda de dados.

Apesar dos resultados positivos encontrados utilizando a interpolação PCHIP, em alguns casos, quando há a perda de uma quantidade muito grande de amostras consecutivas, a interpolação PCHIP, e tampouco a linear, são apropriadas para correção do sinal falho. Para exemplificar este fato, considere a Fig. 10, a qual ilustra um trecho do sinal de ângulo de tensão da PMU localizada na UFRGS (Universidade federal do Rio Grande do Sul). Nesta situação ocorreram, consecutivamente, 2 844 amostras corrompidas. Aproximadamente 47,4 s de dados para sinais com taxa de amostragem de 60 amostras por segundo.

Observa-se na Fig. 10 que as interpolações realizadas não foram adequadas para preencher as amostras corrom-

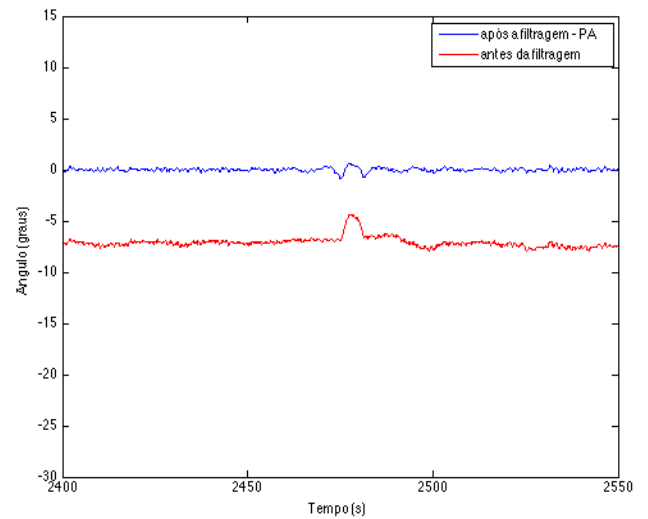


Fig. 8. Diferença angular de tensão entre as PMUs instaladas na UnB e na UFAC, utilizando interpolação linear, antes e após a filtragem passa-alta

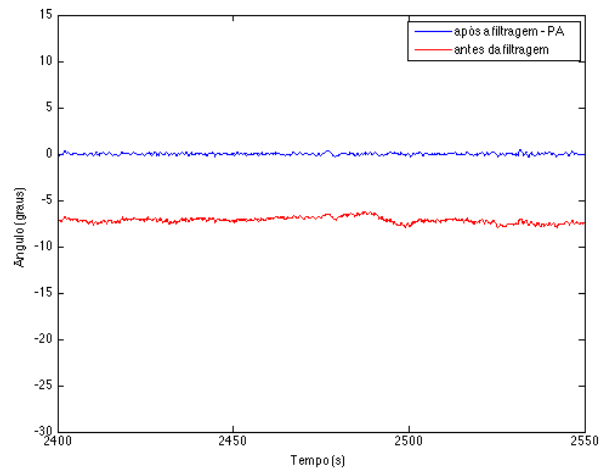


Fig. 9. Diferença angular de tensão da fase A entre os PMUs instalados na UnB e na UFAC, utilizando interpolação PCHIP, antes e após a filtragem passa-alta.

pidas. Neste trecho do sinal, percebe-se que deveria haver um vale, no entanto, toda a curvatura foi perdida devido às amostras faltantes. Isso fica mais evidente na Fig. 11, que mostra os sinais de ângulo de tensão da PMU da UFRGS juntamente com o sinal de ângulo de tensão da PMU da UnB.

É possível observar que o sinal da PMU da UFRGS, mesmo após a interpolação, não acompanha a curvatura do sinal da PMU da UNB. A partir desta análise, conclui-se que o uso da interpolação não produz efeito satisfatório à janela de dados corrompidos. Assim, outra estratégia para interpolação dos dados da PMU, ou mesmo a ex-

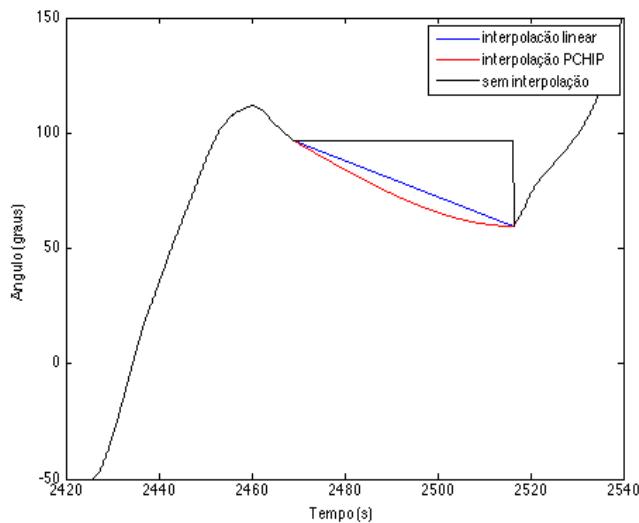


Fig. 10. Ângulo de tensão da fase A da PMU instalada na UFRGS sem interpolação, com interpolação linear e com interpolação PCHIP

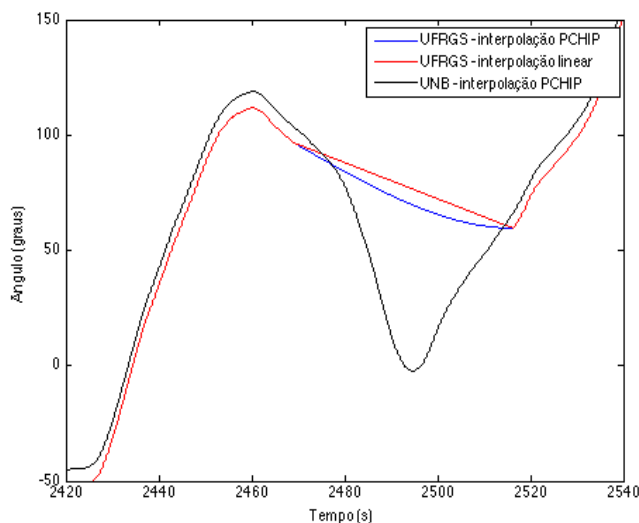


Fig. 11. Ângulo de tensão das PMUs instaladas na UFRGS e na UnB com interpolação linear e PCHIP.

clusão dessas informações, deve ser adotada. De forma mais direta, a última estratégia é sugerida. Isto é o mais apropriado, pois há outras PMUs no sistema elétrico e cujos dados, no mesmo intervalo de tempo podem não conter dados falhos. No entanto, esta pesquisa não foi verificada neste artigo.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou resultados da investigação sobre o impacto da falta de dados em um sinal de PMU e o efeito da correção, por meio da interpolação de dados. Foram avaliadas duas técnicas de interpolação. Uma delas, baseada em abordagem linear. A segunda, denominada

PCHIP, acessível diretamente através do *kernel* do Matlab.

Conclui-se que a interpolação PCHIP foi mais eficaz que a interpolação linear como forma de atenuar as distorções causadas por amostras corrompidas nos sinais coletados em PMUs. Neste trabalho, as investigações consideraram sinais de ruído ambiente, mais especificamente, de ângulos de fase de tensão.

Observou-se que, havendo janela com quantidade de amostras corrompidas muito grande, os resultados da interpolação PCHIP, assim como os da interpolação linear, tornam-se insatisfatórios. Esta observação era de se esperar, tendo em vista que, quanto maior a quantidade de amostras corrompidas, maior também será a perda de informações sobre o sinal em que essas amostras ocorrem. Nesta situação, recomenda-se descartar os dados da PMU durante esse intervalo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. G. Phadke e J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer, 2008.
- [2] M. Farrokhifard, M. Hatami e M. Parniani, *Novel approaches for online modal estimation of power systems using PMUs data contaminated with outliers*. Electric Power Systems Research. Num. 124, pp. 74-84, 2015.
- [3] N. Zhou, D. Meng, Z. Huang, e G. Welch, *Dynamic State Estimation of a Synchronous Machine Using PMU Data: A Comparative Study*. IEEE Trans. on Smart Grid, v. 6, n. 1, pp. 450-460, Jan. 2015.
- [4] Z. Huang, P. Du, D. Kosterev, e B. Yang, *Application of extended Kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration*. in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Calgary, AB, Canada, pp. 1-8, Jul. 2009.
- [5] Y. Huang, G. V. Reklaitis, e V. Venkatasubramanian, *A heuristic extended Kalman filter based estimator for fault identification in a fluid catalytic cracking unit*. Ind. Eng. Chem. Res., vol. 42, no. 14, pp. 3361-3371, May 2003.
- [6] E. Rezaei, L. Zhang e V. Venkatasubramanian, *Self-Correction Strategies for Frequency Domain Ringdown Analysis*. IEEE 48th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 2690-2699, 2015.
- [7] P. Romano, M. Paolone, J. Arnold e R. Piacentini, *An Interpolated-DFT Synchrophasor Estimation Algorithm and Its Implementation in an FPGA-based PMU Prototype*. IEEE, Conference ID 978-1-4799-1303-9/13/, pp. 1-6, 2013.
- [8] L. Vanfretti, S. Bengtsson e J. O. Gjerde, *Preprocessing synchronized phasor measurement data for spectral analysis of electromechanical oscillations in the Nordic Grid*. International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 25, num. 2, pp. 384-358, 2015.
- [9] Projeto Medfasee da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Disponível: <http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal/>.
- [10] T. P. Zielinski e K. Duda, *Frequency and damping estimation methods: an overview*. Metrology and Measurement Systems, Vol. XVIII, No. 4, pp. 505-528, 2011.
- [11] F. N. Fritsch e R. E. Carlson, *Monotone piecewise cubic interpolation*. SIAM Journal on Numerical Analysis. Vol. 17, num. 2, fls. 238-246, 1980.