

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

APLICAÇÃO DE DADOS DE SINCRÓFASORES DO SIN PARA A OBTENÇÃO DE INDICADORES DE AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

ALESSANDRA NAZI ULIANA; IGOR WAGNER WILK; ILDEMAR CASSANA DECKER; DIEGO ISSICABA;
ANTONIO FELIPE DA CUNHA DE AQUINO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados da aplicação de dados de sincrofases para a obtenção de indicadores de afundamentos momentâneos de tensão. O desenvolvimento teve como base o Sistema de Medição Sincronizada de Fasores MedFasee Baixa Tensão, cuja infraestrutura avança em direção ao conceito da convergência de diferentes tipos dados. Foram utilizados dados de eventos registrados em diferentes regiões do SIN, com o intuito de estabelecer uma análise comparativa entre indicadores obtidos via dados de medidores de qualidade de energia e via *Phasor Measurement Units* (PMU), das classes P e M.

PALAVRAS-CHAVE

Medição Sincronizada de Fasores; Qualidade de Energia Elétrica; Variação de Tensão de Curta Duração; Indicadores de Afundamento de Tensão.

1.0 INTRODUÇÃO

A preocupação com a aceleração das mudanças climáticas intersecta diversos setores da sociedade, inclusive o setor elétrico. No que tange aos ciclos envolvidos na produção e oferta de energia elétrica, vivencia-se uma forte expansão de fontes e recursos renováveis conectadas ao sistema elétrico por meio de inversores, como usinas eólicas, fotovoltaicas, veículos elétricos e seus correspondentes terminais de abastecimento. Essa tendência vai ao encontro das ações para minimizar os impactos ao meio ambiente associados à indústria de energia elétrica. No contexto brasileiro, destaca-se a forte participação de fontes renováveis na capacidade instalada de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN), quantificada em torno de 80% (1) quando são consideradas as usinas hidrelétricas, eólicas e fotovoltaicas. Observa-se que a expansão da geração renovável no SIN, verificada na última década, está associada principalmente a empreendimentos de geração eólica. Não obstante, para os próximos anos está previsto um forte crescimento da geração fotovoltaica no SIN, por meio de usinas conectadas ao sistema de transmissão, bem como da geração distribuída da microgeração conectadas aos sistemas de distribuição.

No Brasil e no mundo, o cenário de crescente participação de fontes de geração conectadas por inversores impulsiona as ações destinadas à modernização dos sistemas elétricos, no sentido de garantir segurança elétrica, flexibilidade operacional e uso econômico dos recursos. De fato, há desafios técnicos específicos que decorrem da forma de conexão e da característica distribuída das fontes de geração eólica e fotovoltaica, com potenciais impactos nos processos de planejamento e operação do sistema elétrico. Neste contexto da modernização dos sistemas elétricos, sistemas de proteção, monitoração e automação com componentes e equipamentos dedicados para cada funcionalidade tendem a ser substituídos por dispositivos únicos (2), ensejando novas aplicações e a ampliação da monitoração dos sistemas. No que tange à qualidade de energia (QEE), espera-se a gradativa substituição dos medidores convencionais de QEE, outrora dedicados, por dispositivos eletrônicos inteligentes (IED) com funcionalidades compartilhadas com outras áreas de aplicação. Para o caso dos sistemas de transmissão, por exemplo, os dispositivos com função de PMU são vistos como um dos principais equipamentos a compartilhar funcionalidades relacionadas ao acompanhamento da QEE (3).

No âmbito do SIN, a expansão dos Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) para as linhas de transmissão de tensão nominal igual ou superior à 345 kV (4)-(5) oferece um cenário oportuno de exploração da infraestrutura de medição e aquisição de dados para a monitoração de outros fenômenos, permitindo a composição de ações adicionais à monitoração sistêmica sincronizada em tempo real. Não obstante, apesar da implementação do SMSF ainda não substituir diversos sistemas relacionados a operação e coordenação da rede, identifica-se um cenário de disponibilidade de múltiplas fontes de dados para um mesmo fenômeno observado. Em especial para o

caso da QEE, se fazem acessíveis registros relativos ao mesmo evento, mas oriundos de dispositivos dedicados à medição e análise de QEE, como também de PMUs dos SMSF.

Sob esta ótica, o presente trabalho busca explorar, a partir de uma infraestrutura composta por medidores de QEE convencionais e por PMUs, a aplicação de dados de sincrofasores para a estimação de indicadores de afundamento momentâneo de tensão, com o objetivo de contribuir com o aperfeiçoamento dos processos metodológicos, de acompanhamento e de avaliação da QEE sob o ponto de vista da operação. A conceituação do contexto de convergência de dados, o detalhamento da infraestrutura, obtenção e processamento dos dados utilizados são abordados na seção 2. As bases metodológicas do processo de estimação são descritas na seção 3. Apoiados nas discussões da seção 3, os resultados provenientes da estratégia de estimação são apresentados e discutidos na seção 4, seguidos das conclusões, as quais são sumarizadas na seção 5.

2.0 AMBIENTE DE CONVERGÊNCIA DE DADOS UTILIZADO

Conforme (1), observa-se uma tendência de expansão das fontes de geração eólica e fotovoltaica, com conexão nos sistemas de transmissão e distribuição, o que impacta em como os sistemas de monitoração, proteção e operação foram concebidos e operam atualmente. Neste cenário, juntamente com as tecnologias relacionadas às *smart grids*, há um crescente interesse na convergência das infraestruturas de comunicação e informação, e de redes elétricas (6), (7). Como características de interesse, a convergência de dados possibilita a criação de uma rede confiável e interdependente, de forma a buscar sinergia a partir do compartilhamento de infraestruturas e recursos (7).

Se tratando de convergência de redes ou infraestruturas, elementos comuns da arquitetura dos sistemas convergentes são utilizados para dar origem a uma plataforma. Muitas vezes esta plataforma pode ser planejada, a partir da escolha de quais funcionalidades serão implementadas; ou esta pode apenas encontrar-se acessível, contendo os dados e recursos existentes. A plataforma é considerada como o ponto de interdependência dos sistemas convergentes, sendo utilizada como recurso de sinergia para o desenvolvimento de inovações (7). Uma das preocupações que emergem relacionadas a este processo é a disponibilidade de um grande volume de dados.

Desta forma, espera-se a disponibilização de diversos tipos de dados, provenientes dos variados sistemas automatizados que monitoram e que realizam intervenção na rede elétrica. Geralmente, estes dados estão relacionados ao estado operacional das etapas de produção, transmissão e utilização, além da própria caracterização da energia. Cada tipo de dado tem uma aplicação e um valor associado, de modo que o objetivo não é identificar qual classe de dado é a melhor, mas compreender os tipos de dados disponíveis e buscar agregar valor a eles. Isto pode ser realizado a partir da identificação das situações e requisitos associados, quando se busca a utilização de classes de dados específicas para a caracterização e/ou resolução das situações (7).

Entre as classes de dados abordadas em (7), destacam-se no contexto deste trabalho aquelas relacionadas à telemetria e à oscilografia. Dados de telemetria, como aqueles obtidos por PMUs e no padrão SCADA, têm como características de destaque a transmissão contínua de dados no tempo, o que resulta em um grande volume de dados. A tecnologia empregada nestes tipos de sistemas geralmente envolve um número considerável de pontos de monitoração. Em relação aos dados de oscilografia, os mesmos se referem a registros capturados a partir de um evento, geralmente responsável pelo disparo da gravação, quando limiares configurados nos medidores são ultrapassados. Esses registros buscam armazenar dados sobre formas de onda em um período de tempo especificado, geralmente tendo em conta uma alta taxa de amostragem, para posterior aplicação em estudos sobre eventos e fenômenos de interesse.

Neste trabalho, buscou-se implementar a estimação de indicadores de afundamentos de tensão utilizando o ambiente de convergência de dados em desenvolvimento no projeto MedFasee Baixa Tensão (BT), mantido pelo LabPlan/UFSC. Neste ambiente, há dados de PMUs e de oscilografias disponíveis para terminais de medição existentes em diferentes regiões do SIN. A descrição da infraestrutura utilizada relativa ao sistema, bem como o processo de obtenção de dados são assuntos explorados nos itens a seguir.

2.1 Infraestrutura de medição e aquisição de dados utilizada

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de registros de tensões trifásicas relativas a eventos de afundamentos de tensão registrados nos terminais de medição do SMSF MedFasee BT. Estes terminais consistem em equipamentos registradores digitais de falta (DFR) que também possuem função de PMU classe de medição (M), conectados em pontos de BT. A localização dos terminais e a abrangência nacional do MedFasee BT está ilustrada na Figura 1.

Os dados de sincrofasores são enviados dos respectivos terminais para o concentrador de dados fasoriais (PDC) e servidores localizados no LabPlan/UFSC (Florianópolis/SC). O acesso aos dados históricos é realizado a partir da aplicação MedPlot Histórico, uma interface para realização de consultas e análises de dados de sincrofasores, com resoluções disponíveis nas taxas de 1, 10, 30 e 60 fasores por segundo (fps). Similarmente, o acompanhamento do sistema em tempo real é realizado a partir da aplicação MedPlot *RealTime*, possibilitando a monitoração a partir das

mesmas taxas (fps) do MedPlot Histórico. Ambos os aplicativos foram desenvolvidos para o SMSF no contexto do Projeto MedFasee.

No que se refere à convergência de dados, os equipamentos terminais também enviam arquivos de oscilografias, no formato COMTRADE, referentes a eventos observados por estes terminais. Para a captura destes eventos, os equipamentos são configurados para disparo das gravações com os limiares de tensão e tempos de interesse. Além desta configuração, os equipamentos também são especificados com uma taxa de amostragem (f_s) de 15360 Hz, o que equivale a uma resolução de 256 amostras por ciclo (N) da frequência nominal (f_0), 60 Hz.

Uma vez que os eventos são registrados pelos terminais, os arquivos COMTRADE são enviados aos servidores do MedFasee BT. O acesso aos registros de oscilografia é viabilizado pela aplicação openXDA, da *Grid Protection Alliance* (GPA), a qual gerencia e organiza os arquivos recebidos de todos os terminais do SMSF. Além disto, a aplicação também possibilita a integração com outras soluções da GPA, tais como a dashboard de visualização dos terminais habilitados, PQDashboard, e a aplicação de visualização e processamento das formas de onda, openSEE. A ferramenta PQDashboard possibilita uma rápida visualização dos eventos a partir da disponibilização de informações iniciais como a classificação do tipo de evento (afundamento, elevação, transitório), duração, fases afetadas e magnitude das tensões. Para cada evento de interesse, há ainda a possibilidade da *dashboard* redirecionar os dados do mesmo para a aplicação openSEE, com a finalidade de realização de análises mais detalhadas dentro do escopo disponível deste aplicativo.

2.2 Descrição do processo de coleta e organização de dados

No contexto da infraestrutura apresentada, foram selecionados cerca de 130 eventos de afundamentos de tensão registrados nos terminais indicados na Figura 2, durante o período de junho de 2020 a março de 2021. Os registros obtidos referem-se a 20 terminais de medição onde estão instalados DFRs com função PMU da classe M. Em 4 destes terminais há ainda equipamentos DFR com função PMU da classe de proteção (P) instalados, o que possibilitou a obtenção de dados sincrofasoriais e registros oscilográficos de eventos a partir dos mesmos. Esses terminais estão apresentados em destaque na Figura 2.

O fluxo de trabalho para a seleção dos eventos inicia-se na coleta dos eventos classificados como afundamentos de tensão pelo aplicativo PQDashboard. Por meio do recurso de visualização rápida fornecido por esta dashboard, avaliam-se as características resumidas do evento selecionado, como magnitude, fases e duração.

Em seguida, é realizada a busca dos dados de sincrofasores correspondentes ao evento em questão, utilizando a aplicação MedPlot Histórico, com uma taxa de 60 fps. O resultado da busca é disponibilizado por meio de um arquivo em formato texto, cujo conteúdo inclui os instantes inicial e final da busca no formato *Second of Century* (SOC), valores de módulo e ângulo das tensões, além da frequência e taxa de variação de frequência.

Uma vez selecionados os eventos, os correspondentes arquivos COMTRADE são obtidos a partir do acesso ao servidor e à pasta da aplicação openXDA onde os mesmos estão armazenados. Esses arquivos são copiados para uma nova pasta, a fim de centralizar o processamento de todos os arquivos. Um procedimento semelhante é realizado com os arquivos resultantes das consultas aos sincrofasores realizadas no PDC, a partir da cópia dos arquivos em formato texto para uma pasta neste ambiente.



FIGURA 1 – SMSF MedFasee BT.



FIGURA 2 – Terminais do SMSF MedFasee BT utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.0 ESTRATÉGIA DE ESTIMAÇÃO DE INDICADORES DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD) BASEADA EM SINCROFASORES

A estratégia foi desenvolvida a partir de um levantamento do processo de caracterização e cálculo de indicadores de afundamentos de tensão, com destaque para aqueles do tipo momentâneo, estabelecidos no contexto brasileiro em (8) e (9), e no contexto internacional, em (10) e (11). Foi realizado um estudo das normativas referentes ao processamento de sinais envolvidos na medição de eventos de QEE, sobretudo relacionados ao tipo de evento de interesse. Entre as normativas estudadas, destacam-se a referência (12), a qual descreve os métodos de medição para instrumentos medidores convencionalmente utilizados no contexto de monitoramento de QEE da classe A; e a referência (13), relativa ao processamento de sinais das PMUs da classe M e P. Para fins de análise, os indicadores calculados a partir das rotinas implementadas foram: instante inicial, instante final, duração e magnitude do evento. Esses indicadores foram inicialmente calculados para cada fase acometida por eventos de cada terminal.

São descritas a seguir, considerações relacionadas aos equipamentos de origem dos registros, no que tange à relação entre o processamento de sinais e a estratégia de estimação de indicadores de VTCD. Além disto, também são detalhados os algoritmos desenvolvidos para a implementação da estratégia.

3.1 Considerações sobre o processamento de sinais de medidores de QEE e as PMUs

No que tange às técnicas de mensuração, caracterização e avaliação de afundamentos de tensão, aquelas de maior interesse são as que resultam em grandezas de tensão e ângulo no tempo (14). Partindo destas informações, é possível avaliar características dos eventos, como instante inicial e final do evento, estimar a duração e a magnitude do afundamento de tensão, bem como o desvio de ângulo. De acordo com (14), há diversas técnicas que podem ser implementadas para obtenção destas características, como o cálculo do valor eficaz de tensão em um ciclo (RMS) com taxas de atualização de um ou meio ciclo, a obtenção da componente fundamental da tensão e a tensão de pico. A técnica mais implementada, e recomendada por (11) e (12), é a do cálculo do valor RMS em função do tempo. Para equipamentos de medição pertencentes a classe A de (12), os quais são os mais comuns e aceitos para campanhas de medição (15), por exemplo, o valor RMS é calculado em uma janela de um ciclo, atualizado a cada meio ciclo.

Como o trabalho dispõe de registros de DFRs com função PMU M e P, fez-se necessário o aprofundamento dos estudos relacionados às diferenças no processamento de sinais de cada classe de PMU. Este processo também foi apoiado em testes realizados com um simulador de PMUs, codificado em MatLab, implementado no âmbito do projeto SEP-PMU com o ONS **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Ambos os tipos de PMUs implementam filtros baseados em Resposta ao Impulso Finita (FIR), juntamente ao processo de estimação fasorial, que comumente é baseado na Transformada Discreta de Fourier (DFT). A característica deste tipo de filtro é produzir uma resposta de fase linear, mas com um atraso no tempo. Em síntese, a PMU da classe P tem sua aplicação indicada para situações em que se faz necessária a obtenção de uma resposta rápida (13), sem requisitos explícitos ou adicionais de filtragem. Já a PMU M é indicada para aplicações de monitoração, sem necessidade de obtenção de respostas rápidas e cujos efeitos de sinais sobrepostos no sinal de entrada da PMU possam ser críticos na obtenção das medidas (13).

3.2 Descrição da estratégia e implementação do algoritmo

A estratégia de estimação dos indicadores de VTCD com base em dados de sincrofases obtidos no SMSF MedFasee BT consiste no processamento e cálculo dos indicadores selecionados, utilizando tais dados como insumo para a produção dos resultados. Esses indicadores são comparados com aqueles gerados a partir das oscilografias. Para isto, foi desenvolvido um processamento para os arquivos de oscilografia o qual busca reproduzir, dentro do possível, as condições de implementação real nos medidores de qualidade de energia. Esta reprodução foi realizada a partir de um algoritmo desenvolvido em linguagem Python. Este algoritmo é responsável pela leitura dos arquivos COMTRADE, processamento, e cálculo dos indicadores implementando as técnicas em (12), relativos a: detecção pela tensão deslizante ou fixa, ao cálculo do valor RMS, a duração e a identificação dos instantes inicial e final dos eventos.

Os dados referentes às consultas dos eventos registrados nos terminais do SMSF pelos DFRs com função PMU são processados por um outro algoritmo, também desenvolvido com base na linguagem Python. O processamento inicial deste arquivo consiste em extrair as medidas relacionadas ao módulo da tensão trifásica, tensão de base declarada do terminal cujo arquivo se refere, e estampas de tempo associada a cada medida. O processo de detecção e cálculo dos indicadores ocorre de forma similar à implementada para os arquivos de oscilografia. As etapas do algoritmo implementado para o processamento das oscilografias são as seguintes, para cada canal de medição:

1. *Importação do registro COMTRADE;*

2. Conversão do formato COMTRADE para formato numérico;
3. Retenção dos valores referentes de tensão de fase e das estampas de tempo;
4. Extração da componente fundamental da tensão;
5. Identificação do cruzamento por zero da componente fundamental da tensão;
6. Cálculo do valor RMS relativo aos 12 ciclos mais recentes, utilizando como marcador das janelas de cálculo o cruzamento em zero da componente fundamental. Este cálculo é realizado caso a detecção dos eventos seja a partir da tensão de referência deslizante;
7. Cálculo da tensão de referência (deslizante ou fixa);
8. Detecção dos valores RMS abaixo do limiar relativo à tensão de referência (deslizante ou fixa);
9. Cálculo dos indicadores de duração e magnitude do evento, com base nos valores identificados na etapa anterior;
10. Compilação dos resultados com as seguintes informações:
 - Terminal;
 - Fase;
 - Duração, em milissegundos;
 - Profundidade (em porcentagem da tensão de referência deslizante);
 - Instante inicial;
 - Instante final;
 - Arquivo de origem (PMU M, PMU P ou Oscilografia);
 - Data do registro.

Para o caso das PMUs, os objetos de análise para identificação dos eventos de afundamentos de tensão são os módulos dos fasores de tensão trifásica. Esses valores são obtidos diretamente pelo carregamento do arquivo de consulta dos dados de sincrofasores. A tensão de referência é obtida da mesma forma, sendo ela a tensão declarada do terminal. Deste modo, a detecção de um evento é feita pelo acompanhamento do módulo de tensão do fasor em relação aos limiares indicados em (12). Para o cálculo da duração do evento, uma vez identificados os limiares de início e final do evento, a partir da magnitude, é realizada uma interpolação para inferir o instante de tempo relativo ao valor de 0.9 pu, como limiar inicial, e o instante final referente ao valor de 0.90 pu acrescido da histerese de 2%, conforme indicado em (12). A Figura 3 visa ilustrar o processo de interpolação a partir de fasores de tensão disponíveis e dos limiares estabelecidos.

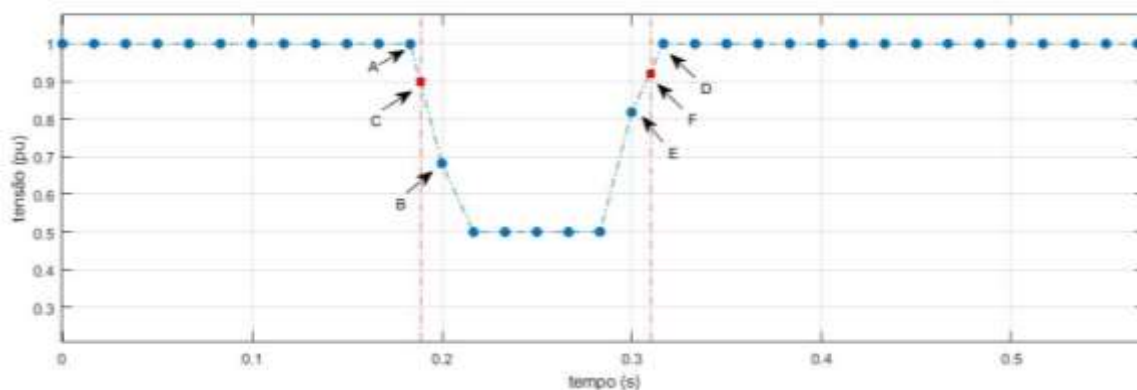


FIGURA 3 – Representação da interpolação realizada para identificar os instantes de tempo inicial e final dos afundamentos de tensão, a partir do módulo de tensão dos dados de sincrofasores.

Neste processo de interpolação, os fasores hipotéticos “C” e “F” representados na Figura 3, possuem magnitude conhecida, igual a 0.9 pu e 0.92 pu, respectivamente. Já os fasores “A”, “B”, e “E”, “D” são fasores representativos daqueles que se encontram disponíveis nos arquivos de consulta. Deste modo, de forma a melhor estimar a duração dos eventos, e conhecendo-se os módulos de tensão dos fasores citados, além do passo de integração de (1/60) segundos (s) entre cada fasor representativo, calcula-se o instante de tempo correspondente ao fasor hipotético “C”, também estendido para o fasor “F”.

Desta forma, as etapas do algoritmo implementado para o cálculo dos indicadores a partir dos dados de sincrofasores, seguem a ordem descrita abaixo, considerando cada canal de medição:

1. Importação das consultas;

2. *Conversão das consultas para formato numérico;*
3. *Retenção dos valores referentes a tensão de fase e das estampas de tempo;*
4. *Deteção dos valores dos módulos dos fasores de tensão abaixo do limiar estipulado;*
5. *Cálculo dos indicadores de duração e magnitude do evento, com base nos valores identificados na etapa anterior, para cada canal;*
6. *Compilação dos resultados com as seguintes informações:*
 - *Terminal;*
 - *Fase;*
 - *Duração, em milissegundos;*
 - *Profundidade (em porcentagem da tensão de referência declarada no terminal);*
 - *Instante inicial;*
 - *Instante final;*
 - *Arquivo de origem (PMU M, PMU P ou Oscilografia);*
 - *Data do registro.*

Ao final do processamento dos arquivos de oscilografia e sincrofases, são gerados arquivos com as tabelas resultados ampliados, contendo os indicadores de afundamentos de tensão detalhados por fase, calculados a partir de oscilografias, com tensão de referência fixa e deslizante, e os indicadores calculados a partir dos sincrofases. Adicionalmente, são geradas tabelas resultados agregadas por fase e tempo, conforme em (8) e (9), a partir da tabela detalhada. Com base nestes resultados gerados, são discutidos na próxima seção as análises realizadas.

4.0 RESULTADOS

Para a análise e discussão dos resultados obtidos, a partir da implementação da estratégia de estimação, foi selecionado um conjunto de eventos relativos à oito terminais do SMSF MedFasee BT, com abrangência em todas as regiões do país. O processo de detecção foi realizado utilizando a mesma tensão de referência, sendo a tensão declarada do terminal. Os eventos, bem como os indicadores calculados estão detalhados na Tabela 1.

TABELA 1- Resultado do cálculo dos indicadores de eventos de afundamentos de tensão de curta duração.

	Tensão Residual (% Tensão de Referência)	Duração (ms)	Instante Inicial Relativo (ms)	Instante Final Relativo (ms)	Fase	Terminal	Data
OSC	42.65	150.65	0.00	0.00	A	UFAM (Manaus/AM)	15/09/2020 17:38:21
PMU M	42.78	174.23	-17.83	5.75			
PMU P	43.92	136.86	-16.98	-30.77			
OSC	73.39	66.08	0.00	0.00	C		
PMU M	77.03	85.60	-17.15	2.37			
PMU P	74.88	84.02	-17.82	0.12			
OSC	83.02	150.33	0.00	0.00	C	UNIFAP (Macapá/AP)	03/09/2020 10:10:06
PMU M	82.56	157.02	-11.86	-5.23			
PMU P	82.83	159.77	-12.94	-3.49			
OSC	77.88	83.33	0.00	0.00	A	UFSC (Florianópolis/SC)	03/09/2020 4:47:18
PMU M	77.96	91.99	-16.33	-7.67			
PMU P	78.75	96.22	-16.14	-3.26			
OSC	79.94	558.20	0.00	0.00	A	UNICAMP (Campinas/SP)	07/01/2021 21:26:25
PMU M	79.58	577.12	-15.87	3.05			
PMU P	80.39	573.82	-15.58	0.03			

	Tensão Residual (% Tensão de Referência)	Duração (ms)	Instante Inicial Relativo (ms)	Instante Final Relativo (ms)	Fase	Terminal	Data
OSC	83.61	557.55	0.00	0.00	C	UNICAMP (Campinas/SP)	07/01/2021 21:26:25
PMU M	83.55	564.76	-17.10	-9.89			
PMU P	84.66	560.35	-16.19	-13.39			
OSC	74.75	108.20	0.00	0.00	A	UFJF (Juiz de Fora/MG)	01/02/2021 20:00:19
PMU M	74.31	124.25	-15.69	0.36			
OSC	89.44	33.40	0.00	0.00	B	UFMA (São Luís/MA)	17/03/2021 17:18:02
PMU M	88.46	47.74	-12.52	1.82			
OSC	78.31	167.19	0.00	0.00	A	UFPE (Recife/PE)	03/12/2020 11:32:17
PMU M	78.31	167.02	-7.40	-7.57			
OSC	75.63	175.07	0.00	0.00	C		
PMU M	75.69	172.98	-8.59	-10.67			
OSC	88.21	66.80	0.00	0.00	C	UnB (Brasília/DF)	04/12/2020 19:37:53
PMU M	88.50	66.47	-2.49	-2.82			

Os dados da Tabela 1 estão organizados com os valores dos indicadores de magnitude e duração, bem como as informações de instantes inicial e final relativos, os quais têm como referência os instantes identificados pelas oscilografias. Ou seja, os instantes inicial e final identificados pelas PMUs P e M são dados pela diferença entre o instante identificado pela PMU e o identificado pela oscilografia em análise; valores negativos indicam instantes de detecção anteriores àqueles obtidos com base nas oscilografias. A magnitude do evento é expressa pela Tensão Residual, cujo reporte para este indicador foi realizado como sugerido em (12), e é indicado quando há a utilização da tensão de referência fixa como método de detecção, geralmente no contexto de sistemas de baixa tensão.

Com base nos valores da Tabela 1, observa-se que, para os terminais e eventos relacionados, os valores de magnitude são bastante aderentes, com diferenças de até 1.3% entre PMUs P e oscilografia. Entre a tensão residual obtida pelas PMUs M e oscilografias, a maior diferença é de 3.64%, no caso da UFAM, fase C. Observa-se também valores de tensão residual, calculados por PMUs M, são menores para alguns casos. Isto pode ser explicado pela característica de *undershoot*, consequência de transições de degrau na magnitude da tensão de entrada da PMU (13). Observa-se esse fenômeno mais acentuado em PMUs do tipo M, nos quais o projeto do filtro deve atender critérios mais exigentes de seleção de banda do que o filtro digital da PMU P.

Em relação às durações dos eventos, notam-se diferenças entre aquelas calculadas pelas PMUs, e pelas oscilografias. Isto é especialmente evidente para casos cuja duração do afundamento é inferior a 100 ms, apesar de também ocorrer para eventos mais longos, conforme mostrado pelos dados da Tabela 1. Para estes casos, a diferença máxima entre as durações foi de aproximadamente 20 ms. Já para os casos com duração maior que 100 ms, a diferença entre as durações foi de até 1 ciclo.

Em se tratando dos instantes inicial e final relativos, observa-se diferenças máximas, em módulo, de até 1 ciclo, para o instante inicial, e de até cerca de 2 ciclos para o instante final. Destacam-se também os eventos cujos instantes iniciais relativos são negativos, e os finais, positivos. Nestes casos, a identificação do evento pelas PMUs foi anterior à identificação pelas oscilografias, representado pelos valores negativos de instante inicial relativo. Já a identificação dos instantes finais pelos dados de sincrofasores, para esses casos, foi posterior à da oscilografia, conforme indicado pelos valores positivos. Isto é expressivo sobretudo para os casos de PMU M da Tabela 1. Uma possível explicação para isto é o fenômeno de *overshoot* da PMU, que assim como o *undershoot*, é causado por um degrau na grandeza de entrada da PMU (13). Novamente, a depender do projeto e das especificações do filtro da PMU M, este fenômeno tende a ser bem mais pronunciado do que na PMU P. Outra possível relação é a localização centralizada da estampa de tempo do fasor reportado na janela de estimação fasorial. Para as PMUs M em questão, a janela de estimação fasorial utiliza amostras de dez ciclos do sinal para estimação dos valores, sendo a estampa de tempo posicionada no centro desta janela. Deste modo, os valores de sincrofasores calculados são interferidos por amostras posteriores daquelas relacionadas à estampa de tempo reportada.

No geral, destaca-se também que para os casos das PMUs cujos instantes relativos foram aproximadamente de mesmo valor, as durações foram muito próximas às durações obtidas pelas oscilografias, como é o caso dos eventos

da fase C da Unicamp, das fases A e C da UFPE, e da fase C da UnB, da Tabela 1. A diferença máxima entre as durações, nestes casos, ficou de aproximadamente 3 ms. Isto é observado para o indicador de duração calculado a partir de dados de ambos os tipos de PMU.

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os resultados da utilização de dados de sincrofasores do SIN, obtidos por meio do SMSF MedFasee BT, para a geração de indicadores de VTCD, em especial de eventos de afundamentos momentâneos de tensão. Os resultados foram comparados e analisados com os indicadores calculados a partir da metodologia preconizada em (12), a qual é amplamente utilizada no contexto de medição de qualidade de energia. Para isto, os registros obtidos foram adquiridos por meio da utilização de plataformas de concentração dos dados de sincrofasores e de oscilografias que apresentam similaridade com plataformas esperadas em um contexto de convergência de infraestruturas dos sistemas automatizados de monitoração da rede elétrica.

Foi realizado um estudo referente ao processamento de sinais presente nos medidores convencionais de qualidade de energia, para, dentro das limitações existentes, buscar reproduzir o cálculo dos indicadores a partir dos registros de oscilografia. Esta reprodução teve como objetivo estabelecer uma referência comparativa para o cálculo dos indicadores implementados utilizando os dados de sincrofasores, a fim de produzir análises que buscassem avaliar a utilização de PMUs num contexto de monitoração e medição de alguns indicadores de qualidade de energia.

Observou-se ainda que o projeto do filtro digital das PMUs exerce influência nos resultados, conforme observado pelos valores obtidos pelos equipamentos da classe P e M, em relação àqueles obtidos via oscilografias. Uma das possíveis relações da diferença entre os valores de magnitude obtidos entre os dois tipos de dados é o fenômeno de *undershoot* e *overshoot*, que são esperados dentro dos requisitos definidos em (13). A outra é relacionada ao posicionamento das estampas de tempo na janela de estimação dos fasores, sobretudo para as PMUs da classe M. Apesar disto, os valores do indicador de tensão residual apresentaram diferenças inferiores a 4% (em geral) e a 1,5% no caso de PMU da classe P. Ressalta-se também que o indicador de duração dos eventos apresentou valores próximos, com diferenças de até 1 ciclo para eventos momentâneos com durações maiores que 100 ms. Este último resultado, em especial, foi confirmado como sendo um atraso máximo possível entre a duração calculada pela PMU em relação à calculada via oscilografia. Esta confirmação foi realizada a partir da implementação, via simulador, de uma adaptação do teste de *compliance* em regime dinâmico, o qual consiste na aplicação de um degrau no sinal de entrada da PMU, o qual busca observar os tempos de resposta e de atraso do equipamento.

Por fim, destaca-se que a metodologia aplicada para os eventos de afundamentos momentâneos de tensão pode ser estendida para a geração de indicadores de elevações momentâneas de tensão, uma vez que os métodos de medição descritos em (12) são similares para este tipo de VTCD. Além disto, esta análise abre perspectiva para o estudo da utilização e comparativo de outras grandezas disponíveis a partir de dados de sincrofasores, como o ângulo das tensões de fase e o desvio de ângulo ocasionado pelas VTCDs. Ressalta-se também que os indicadores foram obtidos em pontos de medição na baixa tensão, que estão submetidos a interferências oriundas de carga e conexões de transformadores, por exemplo, com distorção harmônica total superior a 3% em alguns terminais. Em um cenário de aplicação em sistemas de transmissão de alta tensão, a influência destes fatores nos sinais das grandezas monitoradas tende a ser reduzida, visto que a distorção harmônica total esperada nesse âmbito é menor do que a encontrada nas instalações na baixa tensão. Espera-se que isto tenha reflexo nas medidas sincrofasoriais a serem coletadas.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de aplicação de sincrofasores para a geração de indicadores de VTCDs e de desempenho da tensão, sobretudo num contexto de ampla expansão dos SMSF no SIN. Tal estratégia é de especial interesse no contexto da operação do SIN, pois possibilita a monitoração contínua destes indicadores em inúmeros barramentos da Rede Básica, com base na mesma infraestrutura prevista para o SMSF concebido pelo ONS, em complementação ao que está preconizado em (17).

6.0 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto de Cooperação Técnico-Científica ONS – FEESC/UFSC, Nº EGP-CT-101/19: Estudos da Aplicação de Dados de Medição Sincronizada de Fasores para a Análise de Desempenho do Sistema Interligado Nacional (SIN).

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 – Geração de Energia Elétrica. Brasil, 2015.
- (2) HUNT, R. et al. The Substation of the Future: Moving Toward a Digital Solution. IEEE Power & Energy Magazine. Estados Unidos, 2019.
- (3) CIGRE/CIREN JWG C4.112. Guidelines for Power Quality Monitoring – Measurement Locations, Processing and Presentation of Data. 2014.

- (4) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Edital de Leilão Nº 01/2021 - ANEEL: Anexo 2 – Especificações Técnicas Gerais. Características e Requisitos Técnicos Gerais das Instalações de Transmissão Objeto do Leilão Nº01/2021 – ANEEL. Brasil, 2021.
- (5) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.13: Requisitos mínimos para Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores. Brasil, 2021.
- (6) MARTINI, P., TAFT J. Value Creation Through Integrated Networks and Convergence. Estados Unidos, 2015.
- (7) TAFT, J. BECKER-DIPPMAN, A. The Emerging Independence of the Electrical Power Grid & Information and Communication Technology. Estados Unidos, 2015.
- (8) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 9.7: Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica. Brasil, 2021.
- (9) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Revisão 12. Brasil, 2021.
- (10) IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. IEEE Std 1564-2014: Guide for Voltage Sag Indices. Estados Unidos, 2014.
- (11) IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. IEEE Std 1159-2019: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Estados Unidos, 2019.
- (12) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Compatibilidade eletromagnética parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio – Métodos de medição de qualidade da energia – NBR IEC 61000-4-30. Brasil, 2011.
- (13) IEEE/IEC. International Standard – Measuring relays and protection equipment – Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements. Estados Unidos - Suíça, 2018.
- (14) BOLLEN, M. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. Estados Unidos, 2000.
- (15) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Lista de Equipamentos Certificados para uma Campanha de Medições de Harmônicos – Revisão 04. Brasil, 2021.
- (16) DECKER, I. C. et al. Desenvolvimento de projeto piloto de sistema especial de proteção (SEP) utilizando-se a tecnologia de sincrofasores. Relatório Técnico - Produto 1. Proj_ONS_EGP_CT_079_20. Brasil, 2020.
- (17) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.9: Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Brasil, 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



Alessandra Nazi Uliana é estudante do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com previsão de formatura para o final do semestre 2021/2. Foi estagiária e bolsista de iniciação científica no Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan), de Agosto de 2019 a Março de 2021, período em que participou das atividades relacionadas ao Projeto MedFasee. Atualmente é estagiária em desenvolvimento de *software server-side*.

(2) Diego Issicaba possui o título de doutor em sistemas sustentáveis de energia (2013) pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal), no âmbito do programa doutoral MIT Portugal, sob acolhimento do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto). Possui o título de graduação (2006) e mestre (2008) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica (EEL) da UFSC. Suas áreas principais de interesse são redes inteligentes, WAMS, sistemas multi-agentes, confiabilidade.

(3) Ildemar Cassana Decker é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Pelotas (1979), mestre (1984) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica (1993) pela Universidade Federal de Santa Catarina e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, respectivamente. Desde 1985 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, onde atua também como pesquisador e coordenador em diversos projetos de P & D, com ênfase no Projeto MedFasee. Suas áreas principais de interesse são análise e controle de sistemas de energia elétrica e o desenvolvimento de aplicações de PMU.

(4) Igor Wagner Wilk é graduando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente está vinculado ao Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan) atuando principalmente no tema Medição Fasorial Sincronizada.

(5) Antonio Felipe da Cunha de Aquino concluiu o curso de graduação em engenharia elétrica pela UFRJ em 1999 e o mestrado e o doutorado em engenharia elétrica pela COPPE/UFRJ em 2000 e 2012, respectivamente. Entre os anos 2000 e 2019 trabalhou no ONS. Foi relator coordenador do Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento do XXV SNPTEE. Atualmente é professor adjunto da UFSC, lotado no Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Suas áreas de maior interesse técnico são a dinâmica e o controle de sistemas de potência.