Plataforma de análise de perturbações em sistemas de potência baseada na convergência de dados de sincrofasores e oscilografias

Guido R. Moraes*†, Lucas Lorensi*†, Renan D. Pires*†, Gabriel V. S. Lopes†, Diego Issicaba*†, Antonio F. C. Aquino*†, Daniel Dotta**† e Ildemar C. Decker*†**

**Departamento de Eng. Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina,* Florianópolis, *Brasil.* Contato: *guido.moraes@posgrad.ufsc.br.*
*** Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.*
†INESC P&D Brasil, Santos, Brasil.

Abstract: The increasing deployment of Intelligent Electronic Devices (IEDs) for obtaining synchrophasors and recording oscillographies in Electric Power Systems (EPS) has enhanced system operation, enabling monitoring, control, and protection applications. However, the growing number of IEDs makes managing the large flow of data (from different sources and of different natures) a challenge for the system operator. This article presents an infrastructure and proposes a solution, based on the convergence of synchrophasor and oscillography data, for the analysis of disturbances in an EPS. The infrastructure includes an event detection module based on power system frequency data, a module that captures oscillographies recorded by the IEDs, and a module that identifies events with high systemic impact (based on predefined criteria) and retrieves the corresponding data, focusing the system operator's analysis effort on disturbances of greater interest.

Resumo: A crescente aplicação de *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) para realizar medição sincrofasorial e registro de oscilografias em Sistemas de Energia Elétrica (SEE) tem permitido maior acompanhamento da operação do sistema, possibilitando aplicações de monitoramento, controle e proteção. No entanto, a expansão do número de IEDs instalados constitui um desafio para o operador de sistemas, em face da necessidade de gerenciar o grande fluxo de dados correspondentes (de fontes e de natureza diferentes). Neste artigo apresenta-se uma infraestrutura e propõe-se uma solução, baseada na convergência de dados de sincrofasores e de oscilografia, para a análise de perturbações em um SEE. A infraestrutura conta com um módulo de detecção de eventos a partir de dados da frequência elétrica, um módulo de captura de oscilografias registradas pelas IEDs, e um módulo que identifica eventos de maior impacto sistêmico (a partir de critérios pré-definidos) e busca os dados correspondentes, reduzindo o tempo de análise do operador de sistemas, com foco em perturbações de maior interesse.

Keywords: Synchrophasors; Oscillographs; Data convergence; PMU; IED; event analysis.

Palavras-chaves: Sincrofasores; Oscilografias; Convergência de dados; PMU; IED; Análise de eventos.

1. INTRODUÇÃO

A operação de SEEs tem passado por profundas transformações, marcadas por uma complexidade crescente que desafia os paradigmas anteriormente estabelecidos em sistemas de menor porte e geração por fontes convencionais. A convergência de vários fatores, como a crescente demanda por energia elétrica concomitantemente com a busca por matrizes energéticas mais sustentáveis levou a soluções tecnológicas que demandam ações de controle e proteção sofisticadas, desafiando a operação do sistema como um todo. Em contrapartida, o desenvolvimento da tecnologia de medição sincronizada de fasores vem possibilitando o monitoramento da dinâmica de SEEs, bem como aplicações de controle e proteção, de suma importância para a operação de SEEs modernos. Neste contexto, constituem-se os *Wide Area Measurement, Control and Protection Systems* (WAMPACS).

Um dos exemplos de aplicação de WAMPACS para melhoria da operação é o processo de análise de perturbações. Dados sincronizados de tensão, corrente, potência e frequência permitem a detecção online de ocorrências na rede, bem como o diagnóstico e localização de falhas. Esta linha de pesquisa vem sendo bastante explorada na literatura (Vahidi, 2023). Em (Vaz, 2021) e (Lopes, 2022), trabalhos anteriores, adaptou-se uma metodologia de detecção online de eventos a partir de dados de sincrofasores captados em pontos de medição localizados na rede de baixa tensão, condizentes a universidades parceiras do Projeto MedFasee (INESC P&D Brasil, 2023). O Projeto MedFasee constitui um observatório independente da dinâmica do Sistema Interligado Nacional (SIN), capitaneado por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

No passado, as primeiras unidades de medição de sincronizada de fasores (*Phasor Measurement Units* - PMUs) foram desenvolvidas a partir da adaptação de relés e equipamentos de medição. Hoje, diferentes fabricantes oferecem *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) capazes de executar a função de PMU, bem como de outras funções de interesse no âmbito da análise do desempenho do SEE, como cálculo de Distorção

Harmônica Total (DHT), transmissão de sinais digitais de controle e registro de oscilografias, conjuntamente a outros Registradores Digitais de Perturbações (RDPs) instalados no sistema. Desta forma, toda esta variedade de fontes de dados permite estudos mais amplos de perturbações, mas traz desafios para a gestão do grande volume de dados originados em sistemas de grande porte como o Sistema Interligado Nacional (SIN), com muitas IEDs, PMUs e RDPs.

Neste contexto, faz-se útil desenvolver uma estratégia de convergência de dados, a fim de selecionar, entre todos os dados disponíveis, o que é de interesse para o estudo de uma perturbação em foco. Enquanto dados sincrofasoriais já são sincronizados temporalmente e organizados por *Phasor Data Concentrators* (PDCs), para oscilografias é necessário utilizar softwares dedicados para coleta dos dados e estratégias como Sistemas Especialistas para processamento e organização (Moreto, 2010). Em (McCollum, 2018), apresenta-se uma solução para coleta de oscilografias de diferentes fontes, associada a processamento para alinhamento temporal dos dados e localização da falta. Em (Ferreira, 2021), propõe-se o uso de técnicas de clusterização para agrupar e classificar oscilografias.

Embora possam ser encontradas diversas soluções para gerenciamento independente de dados sincrofasoriais e oscilografias, pouco se encontra sobre soluções integradas para gerenciar centralizadamente os dados, a partir da busca por um parâmetro em específico, seja data, horário, ocorrência de uma perturbação, medidor envolvido ou critério de severidade. Em (Rodrigues, 2012), é descrita a infraestrutura de coleta de registros de oscilografia e de medição fasorial nas subestações relacionadas ao agente Furnas Centrais Elétricas, porém não é apresentada estratégia para concatenar dados. Em (Nakafuji, 2017), é apresentado o sistema utilizado pela Hawaii Electric Light Company, que coleta e organiza oscilografias pela etiqueta de tempo do registro, e disponibiliza dados de sincrofasores em uma janela temporal próxima. Estas opções podem ser satisfatórias localmente, mas não apresentam soluções para o problema de alto volume de registros de oscilografia em sistemas de grande porte, como o SIN. Desta forma, neste artigo, pretende-se apresentar uma lógica reversa ao implementado em (Nakafuji, 2017). Ao invés de buscar dados de sincrofasores associados ao instante de registro de oscilografias, propõe-se uma solução para análise de convergência de dados que busca registros de oscilografia relacionados a eventos detectados a partir da análise de sincrofasores. Desta forma, é possível valer-se do uso de estratégias para identificar eventos de maior impacto sistêmico (Vaz, 2021), (Silva, 2023), permitindo ao usuário da plataforma de análise se ater aos dados de maior interesse, em detrimento do alto volume de dados de eventos de menor impacto.

Neste artigo pretende-se apresentar uma solução que tem sido testada com dados reais coletados via IEDs instalados na rede de baixa tensão (BT), no âmbito do Projeto MedFasee. Ambiciona-se servir de projeto piloto para aplicações no sistema AT, seja para apoiar o desenvolvimento de sistemas especiais de proteção (Mantuano Filho, 2021), (Mantuano Filho, 2022), seja para apoiar o monitoramento de sistemas de corrente contínua de alta tensão, que sofrem com falhas de comutação, e que podem ser monitoradas por sistemas sincrofasoriais e oscilografias (Silva, 2023). A solução é baseada no uso de softwares abertos para a coleta, armazenamento e visualização de sincrofasores, analogamente para oscilografias, software de desenvolvimento próprio para processamento de dados sincrofasoriais e detecção de eventos (*MedPlot_RT*, Pereira, 2020), e desenvolvimento de um script com estratégia implementada para análise de dados convergentes, relacionados a perturbações de interesse, e para emissão de um boletim diário com as informações mais importantes.

2. INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS SINCROFASORIAIS

A infraestrutura de medição de dados de sincrofasores do MedFasee BT é constituída por um módulo de coleta e armazenamento de dados, um módulo de processamento e um módulo de disponibilização e visualização de resultados.

2.1 Coleta e armazenamento de dados

Para a coleta dos dados, foram utilizados os conjuntos de dados dos MedFasee BT Brasil, que hoje conta com 28 pontos de medição, distribuídos pelas regiões geoelétricas do SIN (Projeto MedFasee, 2024). Os equipamentos instalados nas universidades brasileiras são IEDs do tipo RPV-311 e DR60 (GE Vernova, 2024), capazes de realizar medição sincrofasorial e registro de oscilografias, o que constitui um ambiente propício para exploração de soluções para convergência de dados, em uma escala menor ao sistema de medição do SIN, gerido pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No Projeto MedFasee, os IEDs são utilizados para realizar medições de tensão (módulo e fase), frequência e calcular DHT. Em seguida, recebe a estampa de tempo por parte do GPS (RT 420/430) e envia os dados processados espontaneamente pela internet aos servidores do projeto que atuam como *Phasor Data Concentrator* (PDC), a partir da utilização do software *openPDC* (GPA, 2022d). Associado ao *openPDC*, utiliza-se o software *openHistorian2* (GPA, 2022c) para armazenamento em base de dados.

2.2 Processamento e visualização de dados e resultados

A partir do recebimento dos dados por parte do PDC, é encaminhado um fluxo espontâneo para outro servidor, onde é executado continuamente em tempo real o software *MedPlot_RT* (Pereira, 2020). Neste software foi implementada a metodologia de detecção de eventos sistêmicos apresentada em (Vaz, 2021) e (Lopes, 2022), e, a partir de dados de frequência elétrica coletados na rede do MedFasee BT, realiza-se a detecção de eventos sistêmicos como perdas de carga ou geração, ou aberturas de linha de transmissão. As particularidades relativas ao estudo de eventos sistêmicos a partir de dados de BT são abordadas nos trabalhos de referência.

A metodologia implementada no *MedPlot_RT* é baseada na aplicação da transformada *Wavelet* para cálculo da energia do sinal de entrada, e utiliza-se um limiar empiricamente pré-

ajustado para realizar a detecção de uma variação abrupta. Estratégias para aumentar a robustez quanto a ruídos na rede de BT, descarte de eventos locais e agregação de múltiplas detecções de um mesmo evento foram adotadas, conforme apresentado em (Lopes, 2022).

A cada detecção, um arquivo de saída é gerado, com informações como instante de detecção do evento, PMUs com grandezas elétricas cujo limiar energético foi ultrapassado em uma janela de tempo pré-determinada (aqui referenciadas como "PMUs sensibilizadas", para facilidade), mínima e máxima frequência, mínima e máxima tensão registrada na janela. Com isto, é possível adotar critérios preliminares para identificação de perturbações de maior impacto no sistema, como o número de PMUs sensibilizadas, por exemplo. Quanto maior esse número, pode-se inferir que houve uma maior propagação dos efeitos da perturbação nos sinais de frequência captados pelos medidores distribuídos pelas regiões geoelétricas do SIN.

Além disso, desenvolveu-se uma rede neural para filtragem de falsos positivos (Lopes, 2022). Enquanto os parâmetros do *MedPlot_RT* foram ajustados para que eventos de possível interesse não deixem de ser detectados, como reportado em (Vaz, 2021), a rede neural foi treinada apenas com perturbações de impacto significativo no SIN, descartando-se casos em que, embora os critérios implementados no *MedPlot_RT* tenham sido atingidos, o impacto na frequência não tenha sido significativo ou a propagação dos efeitos não tenha sido extensa pelas regiões geoelétricas do SIN. Esta escolha tem o objetivo de destacar eventos de maior impacto, mais raros, em detrimento de eventos de menor importância, que ocorrem com maior recorrência e tomariam muito tempo de análise do operador.

Para a visualização dos dados de sincrofasores e DHT, são utilizados dois softwares. Para a visualização do fluxo de dados recebido em tempo real, utiliza-se tanto o *MedPlot_RT* quanto o software *Grafana*, que permite também a consulta ao *openHistorian2* para visualização de dados históricos.

A partir desta estrutura básica, quando um evento sistêmico é detectado via *MedPlot_RT*, há a possibilidade de, a partir do instante de detecção, consultar a base de dados para visualizar quaisquer grandezas de interesse, a fim de realizar o estudo e análise da perturbação em questão. Neste artigo, propõe-se uma solução de automatização para estes procedimentos (apresentada na Seção 5).

3. INFRAESTRUTURA DE COLETA E PROCESSAMENTO DE REGISTROS DE OSCILOGRAFIA

A infraestrutura de coleta e processamento de registros de oscilografia é organizada de maneira semelhante àquela utilizada para processamento de sincrofasores, como apresentado a seguir.

3.1 Coleta e armazenamento de registros

Assim como para o processamento de sincrofasores, é utilizado o seguinte conjunto de equipamentos: relógio GPS, firewall e IED, porém com base na função Registrador de Perturbações (RDP), e não com a função PMU. Para a aquisição dos registros de oscilografia são definidos gatilhos, como limiares de frequência, tensão de sequência positiva, DHT de tensão, tensão trifásica e desequilíbrio de tensão. Uma vez que algum limiar é ultrapassado, é iniciado o registro de uma oscilografia, com duração de 10s (registrando 2 segundos antes e 8 segundos após o limiar ser ultrapassado), na taxa de 256 pontos por ciclo.

Após a geração de um registro de oscilografia, ocorre o armazenamento em um diretório do próprio IED. Estes registros são coletados a cada 15 minutos por uma rotina executada através do software *WinSCP* (WinSCP, 2024), em protocolo *Secure Socket Shell* (SSH), que funciona em um servidor dedicado, instalado no LabPlan (UFSC). Na sequência, os arquivos são encaminhados para o diretório do software *openXDA* (GPA, 2022a), que, assim que recebe arquivos novos, espontaneamente os direciona para armazenamento em um banco de dados do tipo *Microsoft SQL server* (SQL Server 2022, 2024), e posteriormente os processa.

3.2 Processamento de dados e visualização dos registros

A classificação realizada pelo *openXDA* é realizada de acordo com os gatilhos pré-definidos no equipamento RPV-311 e outros adicionais que podem ser configurados. Para este artigo, utilizou-se as classificações descritas no diagrama esquemático representado na Figura 1. Na figura, as caixas em azul representam gatilhos exclusivos do RPV-311, as caixas em verde representam gatilhos comuns com o RPV-311 e o *openXDA*, e as caixas amarelas representam limiares configurados no próprio *openXDA*. É possível configurar outros gatilhos, relacionados à corrente, por exemplo, mas que não estão sendo adotados neste projeto.

É importante observar que as caixas azuis e verdes indicam gatilhos responsáveis por gerar o registro de oscilografias. Já as caixas amarelas não são capazes de gerar registros, pois fazem parte da etapa de processamento das oscilografias, posterior a sua geração. Desta forma, tais gatilhos estão ativados apenas para gerar classificações adicionais que ajudam no diagnóstico de eventos. Por exemplo, se uma oscilografia foi registrada após a violação do limiar de frequência mínima ser ultrapassado, e concomitantemente houve violação do gatilho de Tensão<0,1 pu, a classificação como interrupção no ponto de medição se torna mais esclarecedora.

Dentre os gatilhos azuis, o gatilho indicado como "Desb." indica desbalanço, relativo à tensão em qualquer uma das fases. As duas caixas azuis levam a um bloco de tomada de decisão, que avalia a diferença de pontos consecutivos (*P1 a P3*) em relação um limiar, para classificar o registro de oscilografia como 'transitório' ou como 'outro'. A classificação do tipo 'outro' é utilizada para caracterizar oscilografias que foram disparadas após a violação de um dos limiares de frequência, mas cujo *Rate of Change of Frequency* (RoCoF) não viola o limiar pré-definido. Na prática, o uso no âmbito do MedFasee BT apontou que esta classificação costuma agrupar grande número de falsos positivos, oscilografias cujo registro foi disparado por algum gatilho

momentâneo da IED que, ao ser verificado novamente pelo *openXDA*, não resulta em nenhuma das demais classificações.

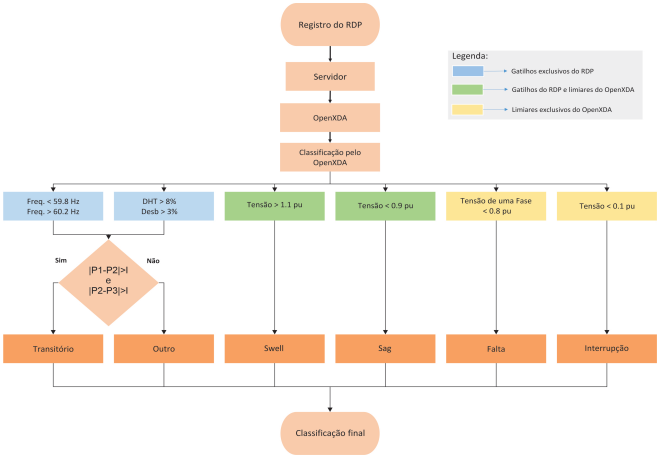


Figura 1 - Fluxograma de classificação dos eventos no openXDA

Para a visualização dos registros, é utilizado o software *openSEE* (GPA, 2022b), que permite também realizar cálculos como valor Root Mean Square (RMS), componentes simétricas, realizar filtragem, calcular o espectro harmônico, entre outras funções.

4. PLATAFORMA PARA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE DADOS E IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE INTERESSE

As estruturas apresentadas para coleta, armazenamento e análise de dados de sincrofasores e oscilografias permitem realizar estudos de perturbações e seus efeitos na dinâmica do sistema elétrico. Caso o analista tenha o interesse de estudar uma perturbação em específico, de ocorrência conhecida, pode consultar os arquivos de saída e as plataformas de visualização de dados para realizar uma análise ampla.

No entanto, as estruturas apresentadas são pouco práticas caso a pretensão seja estudar o desempenho diário, semanal ou mensal do sistema, ou ainda, receber a notificação de uma perturbação significativa recente, aliada a dados qualificados, para análise imediata. Para estas necessidades, propõe-se uma plataforma para análise de convergência de dados e identificação de eventos de interesse.

Na Figura 2 é apresentado o esquema geral da solução, tal que a coloração de cada bloco é dada de acordo com a função, entre medição/registros, recebimento e coleta de dados, armazenamento, processamento e visualização, indicadas na legenda. As linhas cheias representam fluxos espontâneos de dados, como o conjunto de dados enviados por IEDs executando a função de PMU ao servidor que executa o software *openPDC*. Neste fluxo, são enviados dados de sincrofasores, dados de DHT, sinais digitais, etc. Os dados são armazenados no *openHistorian2*, com acesso para visualização via *Grafana*, e enviados em paralelo para o *MedPlot_RT*, para processamento (neste caso, detecção de eventos). O resultado das detecções é armazenado em um diretório em formato de arquivos de saída do tipo 'txt'. As linhas tracejadas indicam o sentido de consultas ou coletas de dados, como o que ocorre a partir do *WinSCP*, que executa a rotina de coleta de oscilografias nos IEDs, na função RDP. As oscilografias são coletadas e armazenadas em um diretório, e tão logo chegam ao diretório, o *openXDA* espontaneamente as processa, armazenando os resultados no *Microsoft SQL Server*, acessível pelo *openSEE*. No diagrama, ainda são representados o *MedPlot* e o *PQ Dashboard*, softwares alternativos de visualização de dados.

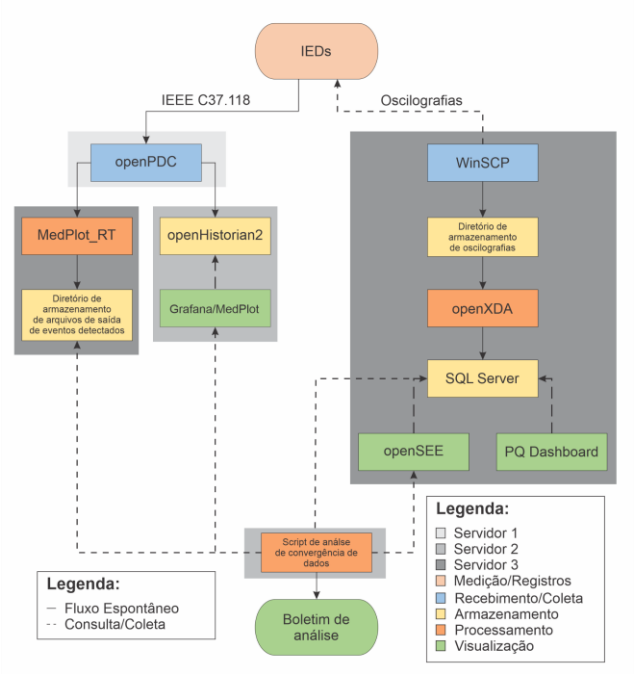


Figura 2 – Diagrama esquemático geral da plataforma de análise de dados de sincrofasores e oscilografias

Como indicado na figura, foi desenvolvido um script em linguagem *Python* que acessa os dados coletados pelas plataformas relacionadas a sincrofasores e a oscilografias, analisa dados convergentes e emite o boletim com os resultados de interesse. O fluxograma implementado pode ser visto em detalhes na Figura 3.

Inicialmente, define-se a data para qual o script realizará as consultas às bases de dados e as análises. Primeiramente, consulta-se o diretório onde estão armazenados os arquivos de saída referentes aos eventos detectados pelo *MedPlot_RT* (diretório '*/dir_ev*'), e contabiliza-se o número *n* de arquivos de saída gerados na data em questão. Em seguida, inicializa-se o índice *i*, relativo ao arquivo de saída acessado (de 1 a *n*), e inicializa-se o contador n_{val}, que contabiliza o número de arquivos de saída com eventos validados como positivos pela rede neural.

Caso o evento relacionado ao arquivo *i* tenha sido validado, incrementa-se n_{val} e analisa-se os limiares de frequência elétrica pré-determinados. Estes limiares foram definidos com o intuito de selecionar eventos de maior impacto no sistema. De fato, o sinal de frequência elétrica medido pela PMU constitui um bom sinalizador de ocorrência de eventos, mesmo daqueles envolvem apenas variações de tensão, sem

desequilíbrios significativos entre carga e geração. Caso algum dos limiares tenha sido ultrapassado, faz-se $flag_1[i] = 1$, indicando que este é um evento de interesse e que o script posteriormente deverá reportá-lo com destaque no boletim de saída.

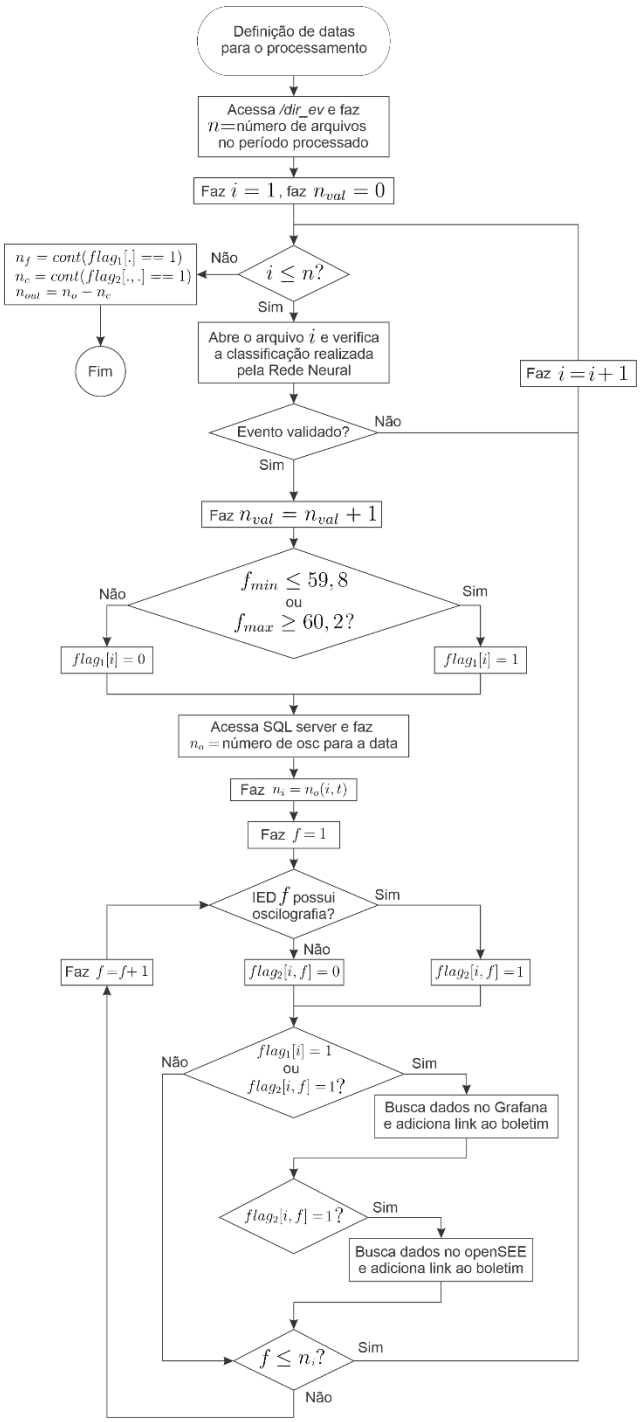


Figura 3 - Fluxograma de execução do script responsável por verificar a convergência entre os dados da plataforma

No entanto, caso $flag_1[i] = 0$, não se descarta diretamente a análise. É possível que o evento em questão possua oscilografias relacionadas, passando a ser considerado como de interesse mesmo que os limiares de frequência pré-definidos não tenham sido ultrapassados. Desta forma, em seguida o script verifica se de fato existem oscilografias geradas pelas mesmas IEDs envolvidas na detecção do evento baseada em sincrofasores. Para isto, contabiliza o número de oscilografias registradas na data selecionada (n_o), e identifica as n_i oscilografias registradas pelos IEDs indicados no arquivo de saída *i* como sensibilizados na detecção, durante um intervalo *t*, definido como 1s, centrado no instante de detecção do evento registrado no arquivo *i* (ou seja, considera-se 0,5s antes e depois da detecção). Em seguida, inicializa-se *f* para avaliar cada uma das n_i oscilografias, e adota-se $flag_2[i,f] = 1$ caso de fato exista oscilografia que cumpra os critérios.

O próximo passo consiste em analisar os resultados obtidos após as condicionais aplicadas. Se $flag_1[i] = 1$ ou $flag_2[i,f] = 1$, entende-se que o evento é de interesse e consulta-se o banco de dados de sincrofasores via *Grafana*, obtendo-se um link de visualização dos gráficos a ser inserido no boletim. Além disso, para o caso específico em que $flag_2[i,f] = 1$, consulta-se o banco de dados do *SQL Server* e emite-se o link de visualização da oscilografia via *openSEE*. Após os testes destes novos condicionais, incrementam-se os contadores que iteram em número de arquivos e número de oscilografias a serem analisados até que se atinjam os limites identificados no início da execução do script.

Ao final, contabiliza-se o número n_f de arquivos em que o limiar de frequência foi ultrapassado, o número n_c de oscilografias que foram consideradas relacionadas aos eventos detectados pelo *MedPlot_RT* e contabiliza-se n_{out}, o número de outras oscilografias registradas na base de dados na data. Então, gera-se o boletim com as informações coletadas.

5. RESULTADOS OBTIDOS COM A PLATAFORMA PROPOSTA

Implementou-se a plataforma apresentada e a solução de análise de convergência de dados proposta no âmbito do MedFasee-BT. Apresentam-se os resultados obtidos durante os dias 5 e 11 de março de 2024, com o intuito de validar a proposta e estudar as limitações encontradas.

5.1 Quanto à parametrização do detector de eventos e dos registradores de perturbação

Quanto à parametrização da metodologia de detecção de eventos a partir de sincrofasores, utilizou-se o mesmo ajuste apresentado em (Vaz, 2021), com rede neural treinada segundo o apresentado em (Lopes, 2022). Ressalta-se que foi utilizada a configuração no *MedPlot_RT* de que um evento só é registrado se a energia calculada dos sinais de frequência elétrica de três PMUs ultrapassar o limiar pré-estabelecido dentro de uma janela de 90 amostras (1,5s, a 60fps). Esta configuração é utilizada no âmbito do MedFasee BT para registrar apenas eventos que tenham causado impacto em uma região mais ampla do SIN, descartando-se assim registros locais.

A parametrização dos RDPs se deu de acordo com o indicado nos blocos azuis e blocos verdes da Figura 2. Além disso, configurou-se que os limiares de frequência deveriam ser ultrapassados por no mínimo 0,5s para que fosse ativado o registro da oscilografia. De maneira semelhante, os limites de

DHT, Desbalanço, Sag e Swell deveriam ser ultrapassados por no mínimo 0,05s, 0,1s, 0,02s e 0,02s, respectivamente. Antes que o script fosse executado, optou-se por descartar todas as oscilografias que foram classificadas como "outro", por serem casos de falso positivo.

5.2 Resultados obtidos

Na Tabela 1 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos, de acordo com as variáveis indicadas na Figura 5.

Tabela 1 - Síntese dos resultados coletados

Data	n	n_{val}	n_f	n_c	n_{out}
05/03/2024	52	19	5	6	29
06/03/2024	34	4	1	0	15
07/03/2024	27	6	2	1	16
08/03/2024	58	17	2	1	18
09/03/2024	57	20	6	3	17
10/03/2024	92	22	4	1	25
11/03/2024	45	7	1	0	6

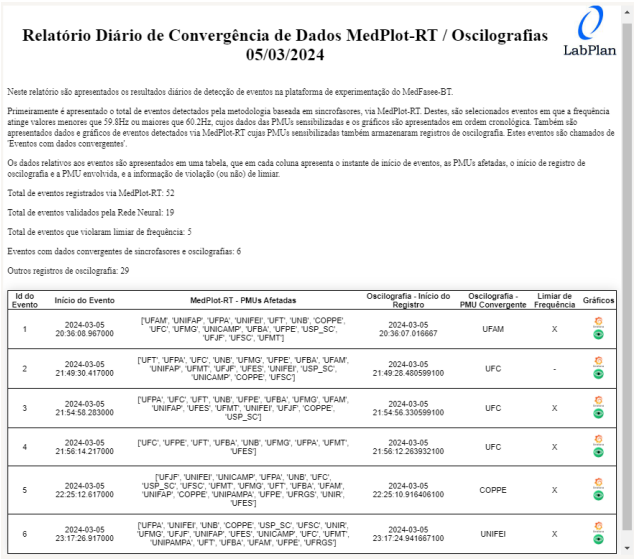
Analisando-se primeiramente os resultados obtidos no dia 05/03/2024, observa-se que foram detectados 52 eventos via *MedPlot_RT*. Destes, 19 foram validados pela rede neural, e os demais foram descartados como falsos positivos ou de pouco interesse. Destes 19 eventos, 5 violaram os limiares de frequência pré-determinados. Paralelamente, dos 19 eventos validados, 6 possuíam dados de oscilografia, registradas pelas mesmas IEDs, considerando o intervalo de tempo de 1s centrado no instante da detecção do evento obtido pelo *MedPlot_RT*. Foram registradas outras 29 oscilografias neste dia.

Analisando estes resultados, observa-se uma alta taxa de rejeição das detecções por parte da rede neural. Isto acontece pois os parâmetros do detector de eventos implementado no *MedPlot_RT* foram ajustados para que nenhum evento de interesse deixe de ser capturado, o que acarreta a obtenção de falsos positivos, de eventos relacionados a detecções locais concomitantes, e eventos que, embora tenham de fato atingido a área monitorada por 3 ou mais PMUs, não impactaram a o desempenho do sistema de forma significativa para ser de interesse reportá-los no boletim. É o caso da detecção realizada às 22h28m58s (UTC), em que foram registrados spikes de frequência que atingiram 60,08Hz (máximo) e 60,03Hz (mínimo) nos sinais captados na COPPE, primeira PMU sensibilizada (posteriormente foram sensibilizadas as PMUs da UNIFEI e UFJF). A detecção foi descartada pela rede neural pois o treinamento da rede foi realizado com eventos de maior variação abrupta na frequência dos barramentos monitorados. Embora haja o interesse em analisar eventos sistêmicos que não resultem em variações tão significativas de frequência elétrica nos barramentos, a metodologia implementada não está apta até o momento para diferenciá-los de eventos locais de pouco interesse. Pretende-se, no futuro, incluir limiares de tensão para evitar o descarte de tais detecções.

Para se ter uma referência do desempenho da rede neural em validar eventos reais e descartar falsos positivos, estudou-se as perturbações reportadas em (ONS, 2024). Em seus relatórios, o ONS reporta ocorrências caracterizadas pelo desligamento forçado de um ou mais componentes, que acarrete quaisquer das seguintes consequências: corte de carga, desligamento de outros componentes do sistema, danos em equipamentos ou violação de limites operativos. Foram reportadas 13 perturbações, das quais 3 não foram detectadas pelo *MedPlot_RT*, e 1, embora detectada, não foi validada pela rede neural. Entre as três perturbações não detectadas, duas são referentes a curtos-circuitos ocorridos na LT 230kv Tomé-Açu/Vila do Conde, no Pará, e sensibilizaram apenas a PMU da UFPA. A terceira é uma perda de geração na usina hidroelétrica APM Manso, com influência na frequência também local. Ou seja, perturbações que causaram desligamentos intempestivos, mas que pelo baixo impacto sistêmico foram descartados pela metodologia adotada. Já o evento detectado, mas descartado pela rede neural, corresponde a um curto-circuito na linha LT 230kv Itumbiara/Rio Verde, que sensibilizou as PMUs da UFMT, UNB e UFJF, mas o alto ruído apresentado pela PMU da UFJF no momento da detecção interferiu na validação.

Quanto às 8 outras detecções realizadas, que não correspondem a eventos relatados em (ONS, 2024), observou-se comportamento de eventos físicos, caracterizados de spikes na frequência com afundamentos na magnitude de tensão, típico de curtos-circuitos, em 7 delas. Na restante, observou-se comportamento de perda de carga de baixa magnitude. Não obstante, entende-se que a solução proposta detectou e identificou efetivamente as 7 perturbações mais significativas ocorridas no dia, 6 delas contando também com oscilografias. O resultado pode ser visto no boletim apresentado na Figura 4.

Destacam-se, por exemplo, as perturbações ocorridas às 21h49m, às 21h54m e 21h56m (UTC), na LT 500 kV Parnaíba III / Tianguá II C2, que liga o Piauí ao Ceará. Em (ONS, 2024), reportou-se a ocorrência do desligamento automático da linha após curto-circuito bifásico, provocado por descarga atmosférica, às 21h49m e às 21h54m, e curto-circuito monofásico por descarga atmosférica às 21h56m. Os *spikes* de frequência causados pelas três perturbações podem ser vistos na Figura 5, e uma quarta perturbação, com menor variação abrupta de frequência também pode ser vista aos 21h56m06s, que também foi detectada pelo MedPlot_RT, sendo a PMU da COPPE a primeira sensibilizada, indicando que o evento pode ter ocorrido próximo ao Rio de Janeiro. Para os desligamentos ocorridos após curto-circuito bifásico, registrou-se oscilografias do tipo *Sag* pela IED instalada na UFC, das quais a oscilografia obtida às 21h49m pode ser vista na Figura 6.



Relatório Diário de Convergência de Dados MedPlot-RT / Oscilografias
05/03/2024

LabPlan

Neste relatório são apresentados os resultados diários de detecção de eventos na plataforma de experimentação do MedFasee-BT.

Primeiramente é apresentado o total de eventos detectados pela metodologia baseada em sincrofasores, via MedPlot-RT. Destes, são selecionados eventos em que a frequência atinge valores menores que 59.5Hz ou maiores que 60.2Hz, cujos dados das PMUs sensibilizadas e os gráficos são apresentados em ordem cronológica. Também são apresentados dados e gráficos de eventos detectados via MedPlot-RT cujas PMUs sensibilizadas também armazenaram registros de oscilografia. Estes eventos são chamados de 'Eventos com dados convergentes'.

Os dados relativos aos eventos são apresentados em uma tabela, que em cada coluna apresenta o instante de início de eventos, as PMUs afetadas, o início de registro de oscilografia e a PMU envolvida, e a informação de violação (ou não) de limiar.

Total de eventos registrados via MedPlot-RT: 52

Total de eventos validados pela Rede Neural: 19

Total de eventos que violaram limiar de frequência: 5

Eventos com dados convergentes de sincrofasores e oscilografias: 6

Outros registros de oscilografia: 29

Id do Evento	Início do Evento	MedPlot-RT - PMUs Afetadas	Oscilografia - Início do Registro	Oscilografia - PMU Convergente	Limiar de Frequência	Gráficos
1	2024-03-05 20:36:08.967000	['UFAM', 'UNIFAP', 'UFPA', 'UNIFEI', 'UFT', 'UNB', 'COPPE', 'UFC', 'UFMG', 'UNICAMP', 'UFBA', 'UFPE', 'USP_SC', 'UFJF', 'UFSC', 'UFMT']	2024-03-05 20:36:07.016667	UFAM	X	
2	2024-03-05 21:49:30.417000	['UFT', 'UFPA', 'UFC', 'UNB', 'UFMG', 'UFPE', 'UFBA', 'UFAM', 'UNIFAP', 'UFMT', 'UFJF', 'UFES', 'UNIFEI', 'USP_SC', 'UNICAMP', 'COPPE', 'UFSC']	2024-03-05 21:49:28.480599100	UFC	-	
3	2024-03-05 21:54:58.283000	['UFPA', 'UFC', 'UFT', 'UNB', 'UFPE', 'UFBA', 'UFMG', 'UFAM', 'UNIFAP', 'UFES', 'UFMT', 'UNIFEI', 'UFJF', 'COPPE', 'USP_SC']	2024-03-05 21:54:56.330599100	UFC	X	
4	2024-03-05 21:56:14.217000	['UFC', 'UFPE', 'UFT', 'UFBA', 'UNB', 'UFMG', 'UFPA', 'UFMT', 'UFES']	2024-03-05 21:56:12.283932100	UFC	X	
5	2024-03-05 22:25:12.617000	['UFJF', 'UNIFEI', 'UNICAMP', 'UFPA', 'UNB', 'UFC', 'USP_SC', 'UFSC', 'UFMT', 'UFMG', 'UFT', 'UFBA', 'UFAM', 'UNIFAP', 'COPPE', 'UNIPAMPA', 'UFPE', 'UFRGS', 'UNIR', 'UFES']	2024-03-05 22:25:10.916406100	COPPE	X	
6	2024-03-05 23:17:26.917000	['UFPA', 'UNIFEI', 'UNB', 'COPPE', 'USP_SC', 'UFSC', 'UNIR', 'UFMG', 'UFJF', 'UNIFAP', 'UFES', 'UNICAMP', 'UFC', 'UFMT', 'UNIPAMPA', 'UFT', 'UFBA', 'UFAM', 'UFPE', 'UFRGS']	2024-03-05 23:17:24.941667100	UNIFEI	X	

Figura 4 - Reprodução do boletim referente a 5/3/2024

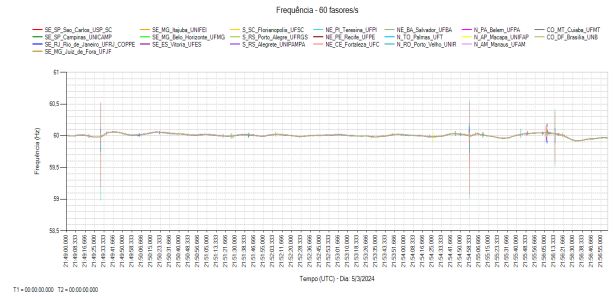


Figura 5 - Dados de frequência referente às perturbações ocorridas em 5/3/2024

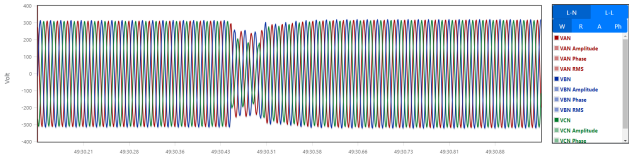


Figura 6 - Oscilografia registrada às 21h49 (UTC) pela IED da UFC

Dentre as oscilografias classificadas como n_{out} na data em questão, verificou-se que 13 corresponderam a sags registrados pela IED da UJFJ, indicando uma possível condição local fora da normalidade no dia avaliado. Das demais, 8 foram classificadas como sags, 6 foram classificadas como interrupção e 2 como transitório, em outras localidades.

Analisando-se os demais resultados obtidos ao longo da semana de estudo, observou-se uma média de 52,15 detecções diárias, das quais 13,6 validadas por dia. Destas, em média 3 perturbações violaram os limiares de frequência pré-especificados. Dentre as oscilografias, foram registradas em média 18 por dia, das quais 1,7 convergente com alguma das perturbações validadas pela rede neural. Ou seja, a solução proposta permitiu reduzir a enorme quantidade de dados a ser analisada para poucas perturbações diárias, das quais 3 (em média) de impacto mais significativo na frequência do SIN, e possivelmente de maior interesse.

7. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma proposta de infraestrutura para coleta, processamento e análise de dados de sincrofasores e oscilografias, bem como uma metodologia para análise de convergência de dados, visando possibilitar uma análise completa de perturbações ocorridas no SIN, com foco em eventos sistêmicos de maior impacto no desempenho do sistema.

Foram apresentados resultados obtidos a partir de dados de IEDs instalados em universidades parceiras do Projeto MedFasee, em pontos de BT. Com os resultados, demonstrou-se que as soluções propostas permitem identificar perturbações de maior interesse, segundo critérios pré-especificados, e acessar dados obtidos por PMUs e RDPs relacionados com facilidade, reduzindo-se a grande quantidade de dados que um operador necessitaria verificar diariamente. Neste artigo, foi utilizado um limiar de frequência, e em trabalhos futuros pretende-se desenvolver outros indicadores.

A solução proposta serve ainda como piloto para possíveis outras aplicações no SIN, seja para gerência de dados relacionados a perturbações sistêmicas observadas por IEDs instalados em redes de alta tensão, seja para ensejar o desenvolvimento ou aprimoramento de sistemas especiais de proteção, seja para gerência de dados para análise de falhas de comutação, a partir de sincrofasores e oscilografias.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “Aplicação de Metodologia para identificação de Falhas de Comutação em configuração Multi-infeed” (OC-0001786-0), com o suporte do ONS. Tece-se também agradecimentos ao ONS pela parceria no âmbito do Projeto Medfasee BT.

REFERÊNCIAS

Ferreira, V.H.; Pinho, A.d.C.; de Souza, D.S.; Rodrigues, B.S. A New Clustering Approach for Automatic Oscillographic Records Segmentation. Energies 2021, 14, 6778. https://doi.org/10.3390/en14206778.

GE Vervona. Automation & Protection. Measurement, Recording & Time Sync. Reason RPV311. Disponível em: https://www.gevernova.com/grid-solutions/measurement_recording_timesync/catalog/rpv311.htm. Acesso em: 5/4/2024.

Grid Protection Alliance. Data Analysis - Analyze Data from PQ meters, DFRs, Relays and Auxiliary Data Sources. Disponivel em: https://www.gridprotectionalliance.org/pq-Analysis.html. Acesso em 5/4/2024.

Grid Protection Alliance. Data Visualization - Analyze Visualize PQ Data and PQ Data Analysis Results. Disponivel em: https://www.gridprotectionalliance.org/pq-Visualization.html. Acesso em 5/4/2024.

Grid Protection Alliance. openHistorian. Efficient, low-cost storage of time-series data. Disponível em:

https://www.gridprotectionalliance.org/phasor-Historian.html. Acesso em: 5/4/2024.

Grid Protection Alliance. openPDC –A high performance data concentrator. Disponível em: https://www.gridprotectionalliance.org/phasor-PDC.html. Acesso em 4/4/2024.

INESC P&D Brasil. Energia Elétrica. Projeto MedFasee. Disponível em: https://inescbrasil.org.br/projetos/projeto-medfasee/. Acesso em: 5/4/2024.

Lopes, G. V. S., Moraes, G. R., Issicaba, D. e Dotta, D. WAMS-based two-level robust detection methodology of power system events. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 31, 2022, 100689, ISSN 2352-4677. https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100689.

McCollum, E., Bestebreur, J., Town, J. and Gould, A. Correlating protective relay reports for system-wide, post-event analysis. 2018 *71st Annual Conference for Protective Relay Engineers* (CPRE), College Station, TX, USA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPRE.2018.8349786.

Mantuano Filho, S., et al. Aplicação piloto de sincrofasores em sistemas especiais de proteção. Em XV STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2021.

Mantuano Filho, S., et al. Desenvolvimento de Sistema Especial De Proteção baseado em Sincrofasores para a UHE Belo Monte. Em *XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2022.

Moreto, M. and Rolim, J. G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. *SBA Controle & Automação*. 2010. Vol. 21(4):347-362.

Nakafuji, D., Rogers, L., Bestebreur, J., Rourke, M. and Zweigle, G. Integrating synchrophasors and oscillography for wide-area power system analysis. 2017 *70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, USA, 2017, pp. 1-10, doi: 10.1109/CPRE.2017.8090033.

ONS – Operador Nacional do Sistema. *Relatório de Síntese Gerencial – Perturbações Ocorridas no Sistema Interligado Nacional. Período: 04/03/2024 a 10/03/2024*. 2024.

Pereira, J. e Decker, I.C. Identificação de oscilações eletromecânicas: Estudos de aplicação em dados de ambiente de sistemas de grande porte. Em *XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. 2020. 10.48011/asba.v2i1.1445.

Projeto MedFasee – Monitoração do SIN em tempo real. Disponível em: http://www.medfasee.ufsc.br/brasil/. Acesso em 16/04/2024.

Rodrigues, M. A. M., Villela, D. A. M., Ramos, M. A. F., Farizele, R. and Silva Fo. J. E. Digital Fault Recordings: practices and perspectives for automated data retrieval, information management and analysis in a large Brazilian utility. Em: *Cigré Session*, 2012, Paris. Proceedings of Cigre 2012, 2012.

Silva, D. S., et al. Monitoramento dos Efeitos de Perturbações na Transmissão de Potência dos Elos HVDC do SIN a partir de Indicadores de Severidade Sistêmicos e Dados de Sincrofasores. Em: *XXIV SNPTEE - Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica*, 2023.

SQL Server 2022. Disponível em: https://www.microsoft.com/pt-br/sql-server/sql-server-2022. Acesso em 16/04/2024.

Vahidi, S. et al. Security of Wide-Area Monitoring, Protection, and Control (WAMPAC) Systems of the Smart Grid: A Survey on Challenges and Opportunities. In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1294-1335, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3251899.

Vaz, R., et al. Event detection and classification through wavelet-based method in low voltage wide-area monitoring systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 130, 2021, 106919, ISSN 0142-0615, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106919.

WinSCP. Free SFTP, SCP, S3 and FTP client for Windows. Disponível em: https://winscp.net/eng/index.php. Acesso em 5/4/2024.