

Plataforma para Ensino de Proteção, Automação e Controle com IEDs Físicos e Virtuais Padrão IEC 61850

Claudivan D. Freitas * Ruth P.S. Leão * Raimundo F. Sampaio *
Lucas S. Melo * Giovanni C. Barroso ** Luís L.P. Martins ***
Alice S. Freitas *

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do
Ceará (UFC), CE, (e-mail: claudivandfreitas@gmail.com,
rleao@dee.ufc.br, rfurtado@dee.ufc.br, lucasmelo@dee.ufc.br,
alicedsfreitas@gmail.com).

** Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará (UFC), CE,
(e-mail: gcb@fisica.ufc.br)

*** Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), (e-mail:
laigl@ch esf.gov.br)

Abstract:

The advent of the IEC 61850 standard and its extensions has caused a tremendous impact on the substation automation protection and control (PAC) systems. New breakthroughs are taking place supported by the IEC 61850 that consider the virtualization of the Intelligent Electronic Devices (IEDs). In view of these technological advances, a modern PAC laboratory is essential for education and training of professionals and students of engineering and technology. This paper presents a PAC platform, implemented in the Electrical Engineering Department of the Federal University of Ceara, Brazil, to promote the understanding, technical knowledge, and tools in power system digital protection. The PAC platform aims to offer a hands-on and interactive training environment to facilitate the learning and foster analytical skills, critical thinking, and self-confidence on power system protection. The learning platform includes physical and virtual IEDs, notebooks and a relay test set connected to a Local Area Network (LAN). The design of a Virtual IED (VIED) is presented, and validation tests of the instantaneous overcurrent function are performed. Test results have shown horizontal GOOSE communication between physical IED and VIED. Thus, VIEDs were used instead of physical IEDs to build a PAC learning platform. The VIEDs provide a new effective means for training qualified personnel in the state-of-the-art in power system protection and for application on smart substation.

Resumo: A promulgação da norma IEC 61850 e suas atualizações causaram tremendo impacto nos sistemas de proteção automação e controle (PAC) de subestações. Novos avanços estão ocorrendo com suporte da IEC 61850, como a virtualização de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED, na sigla em inglês). Diante desses avanços tecnológicos, é essencial um moderno laboratório de Proteção Automação e Controle um laboratório moderno de PAC para a formação e capacitação de profissionais e estudantes de engenharia e tecnologia. Este artigo apresenta uma plataforma PAC, implementada no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Brasil, para promover a compreensão, conhecimento técnico e ferramentas em proteção digital de sistemas de potência. A plataforma PAC visa oferecer um ambiente prático e iterativo que facilita a aprendizagem e fomenta a capacidade de análise, o pensamento crítico e a autoconfiança no domínio de proteção de sistemas de potência. Compõem a plataforma IEDs físicos e virtuais (VIED), *notebooks* e uma mala de testes de relés conectados à rede local (LAN). O projeto dos VIEDs são apresentados, bem como sua validação por meio de testes em situação de falta e atuação da função de sobrecorrente instantânea. Os resultados mostraram uma comunicação GOOSE horizontal entre o IED físico e o VIED. Portanto, o VIED foi utilizado na comunicação em lugar de um IED físico para construir a plataforma de aprendizagem PAC. Os VIED possibilitam um novo meio efetivo para treinamento de pessoal qualificado no estado da arte em proteção de sistemas elétricos de potência e aplicação em subestações inteligentes.

Keywords: Automation; Power System Protection; IED; Virtualization; IEC 61850; Training Platform.

Palavras-chaves: Automação; Proteção de Sistemas de Potência; IED; Virtualização; IEC 61850; Plataforma de treinamento.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, as subestações (SEs) elétricas têm evoluído, e a maioria das novas instalações estão equipadas com tecnologia digital. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED, na sigla em inglês), a exemplo de relés, UTRs, CLPs etc., que compõem as modernas SEs, são capazes de executar funções de Proteção, Automação, Controle (PAC) e comunicação. Nas modernas SEs, a comunicação entre equipamentos migrou do meio físico com fiação elétrica (cobre) para *links* de fibra ótica e os protocolos proprietários foram substituídos por protocolos padronizados internacionalmente (Schumacher et al., 2007). A rede *Ethernet* contribuiu para o avanço da automação das SEs por sua capacidade de agregar novas tecnologias em uma comunicação compartilhada por um único cabo para todos os dispositivos da rede. Isso permite que a rede se expanda para acomodar novos dispositivos sem ter de modificar os dispositivos antigos. Por um cabo *Ethernet* podem trafegar toda uma série de protocolos de comunicação: TCP/IP, Modbus, DNP3, IEC 60870-5-101 e protocolos proprietários, como, por exemplo, o Mirrored Bits da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) (SEL, 2013). De maneira geral, a diversidade de protocolos de comunicação pode dificultar a integração entre dispositivos de fabricantes distintos.

A fim de solucionar a dificuldade de interoperabilidade entre dispositivos, um novo padrão internacional de comunicação baseado em *Ethernet*, para comunicação em instalações de geração de energia e subestações, foi promulgado pela série IEC 61850. O objetivo deste padrão é integrar todas as funções de proteção, controle, medição e monitoramento dentro de uma subestação e fornecer os meios para aplicações de proteção de subestação de alta velocidade, intertravamento e seletividade lógica. A IEC 61850 usa métodos orientados a objetos para fornecer comunicações lógicas entre subestações, equipamentos de processo primário e dispositivos secundários. Usando conceitos orientados a objetos, a IEC 61850 abstrai os modelos de informação dos detalhes da comunicação. Também define o processo de engenharia e os testes de conformidade.

Os modelos de dados abstratos definidos na IEC 61850 podem ser mapeados para vários protocolos como MMS (*Manufacturing Message Specification*), GOOSE (*Generic Object Oriented System Event*), SV (*Sampled Values*) ou SMV (*Sampled Measured Values*), e para *Web Services* (IEC, 2013). Esses protocolos podem ser executados em redes TCP/IP ou LANs de subestações usando *Ethernet* comutada de alta velocidade para obter os tempos de resposta necessários abaixo de quatro milissegundos para relés de proteção.

Um passo futuro no processo de modernização de SE, como argumentado em Hunt et al. (2019), é a substituição do atual modelo de SE com proteção e automação baseados em *hardware* por um sistema definido por *software*. Essa

mudança surge da necessidade de adaptação das SEs à realidade de fontes renováveis de energia, armazenamento de energia elétrica e veículos elétricos, que afetam diretamente os requisitos de operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP), o fluxo de potência, a tensão elétrica e as funções de proteção. Assim, diante de novos cenários que proporcionam características dinâmicas no comportamento do SEP, as SEs necessitam de um sistema de proteção mais flexível e adaptável. No que diz respeito à comunicação, Hunt et al. (2019) afirmam que a IEC 61850 provê as ferramentas necessárias para se ter subestações digitais.

Os IEDs, equipamentos primordiais para a proteção de SEs, devem ser aprimorados para garantir a evolução da proteção e da automação de SEs. Wojtowicz et al. (2018) tratam sobre a tecnologia de virtualização, que pode ser usada para criar uma nova geração de IEDs, e fazem análises de possíveis cenários com implementação dessa técnica. O conceito de virtualização apresentada pelos autores diz respeito à união de várias funções de proteção em um único *hardware* dedicado, o que atualmente é feito utilizando diversos IEDs, a depender da configuração de uma SE. Dessa forma, com o conceito baseado fortemente em *software* concentrado em um *hardware* com redundância, é possível integrar diferentes funções de proteção em um servidor. Os testes de laboratório mostraram que é possível que uma Máquina Virtual (MV) programada para operar como um IED se comunique via IEC 61850. Foi percebido que existe um atraso de tempo na troca de mensagens GOOSE e que é crucial que estudos e testes futuros possam trabalhar com o objetivo de reduzir esses tempo (Wojtowicz et al., 2018).

Em um trabalho mais recente, Wojtowicz et al. (2021) desenvolveram uma plataforma de testes de dispositivos virtuais baseada em uma solução com *Data Centers* para testes de larga escala. Foram feitos testes utilizando-se três servidores computacionais físicos com um total de 64 Máquinas Virtuais (MV), dentre as quais existiam diversos IEDs virtuais (VIED, na sigla em inglês). Os resultados mostraram que o sistema de proteção virtual utilizando a arquitetura de hardware proposta pelos autores tem potencial e poder computacional suficiente para implementar a função de sobrecorrente para uma SE.

Diante desses avanços tecnológicos da PAC de SEs, torna-se necessário que haja treinamento para capacitação de profissionais e, principalmente, formação de alunos de graduação, futuros engenheiros de proteção. Vislumbrando essa necessidade, Brahma et al. (2009) apresentaram uma discussão e levantaram sugestões de métodos e temas a serem aplicados nas disciplinas de Proteção de SEP nas universidades. Dentre os mecanismos de ensino, os autores propõem sessões de laboratórios com o mínimo de horas necessárias (9 horas), nas quais os alunos devem praticar a parametrização de relés e serem feitos estudos de casos,

como situações de sobrecorrente, proteção diferencial, dentre outras, considerando um diagrama unifilar proposto.

Thomas et al. (2011) projetaram e desenvolveram um laboratório para testes de automação de subestações utilizando IEDs com suporte para IEC 61850. Eles trabalharam com IEDs dos fabricantes Siemens e SEL para demonstrar a possibilidade de comunicação, dentre os quais estavam: Siprotec4 7SJ64, Siprotec4 7UT6, Siprotec4 7SA6 e SEL-451. Foi necessário utilizar um conversor de protocolos, pois os IEDs utilizavam comunicação padrão IEC 61850, mas o centro de comando com o *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) possuía suporte apenas para o protocolo *ModBus*. O laboratório foi aberto a alunos de graduação, que puderam realizar testes e verificar a comunicação dos dispositivos, principalmente as que utilizavam mensagens GOOSE.

Labonne et al. (2021) propuseram um laboratório de testes de redes inteligentes para estudantes e profissionais utilizando o padrão da IEC 61850. Sua aplicação proporcionou aos alunos: fazer uso e entender a capacidade e a semântica da IEC 61850; programar diferentes IEDs; e analisar e interpretar o tráfego da rede de comunicação de um sistema elétrico.

A contribuição deste trabalho é uma Plataforma de Ensino de PAC para aprendizagem de proteção de SEP composta de IEDs e VIEDs padrão IEC 61850 visando o treinamento em tecnologias já consolidadas e em uso há décadas, bem como em novas tecnologias, como a virtualização de dispositivos de proteção. O objetivo do trabalho é validar os VIEDs que compõem a Plataforma de Ensino de PAC por meio de teste comparativo do seu funcionamento com a operação de um IED físico, estando ambos diante de uma mesma situação de falta trifásica que exige a atuação da função de proteção de sobrecorrente instantânea, e por meio da sua atuação conjunta com os demais dispositivos da Plataforma.

A estrutura do restante do artigo é constituída das seguintes seções: Seção 2 apresenta os conceitos básicos da IEC 61850 e seus protocolos de comunicação; Seção 3 define VIEDs, mostra seus benefícios e discorre sobre seu projeto; Seção 4 descreve a Plataforma de Ensino; Seção 5 mostra os resultados experimentais por meio de testes; Seção 6 fornece as considerações finais sobre o trabalho.

2. IEC 61850 E SEUS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA SUBESTAÇÕES

2.1 IEC 61850

A norma IEC 61850 é resultado do trabalho coletivo entre pesquisadores e fabricantes de IEDs para facilitar a automação de subestações e padronizar os protocolos. Ela é composta de 10 (dez) módulos, dos quais os seis primeiros apresentam os conceitos gerais e a linguagem de configuração dos IEDs. O sétimo módulo detalha o sistema de comunicação, apresentando toda a linguagem padronizada, bem como lança luz sobre os protocolos MMS, GOOSE e SV, detalhados em módulos posteriores (oitavo, nono e décimo).

A IEC 61850 considera cada IED de uma SE como um dispositivo físico (PD), que é composto por um ou mais

dispositivo lógico (LD). Os LDs podem estar associados a diversas funções dos IEDs, como proteção, lógica de atuação e outras. Cada LD é composto por subfunções, chamadas de nós lógicos (LN), que podem indicar, por exemplo: a leitura de uma corrente elétrica (MMXU), a sensibilização da função de proteção instantânea de sobrecorrente (PIOC) e o comando de abertura de disjuntor (CSWI). Além disso, existem LNs que podem representar dispositivos físicos da camada do nível de processo de uma SE, como um disjuntor (XCBR), um transformador de corrente (TCCT) e um transformador de potencial (TVTR).

A padronização feita proporciona maior integração entre os dispositivos da subestação, visto estarem eles conectados em uma rede de comunicação digital e estarem utilizando uma linguagem comum. Isso facilita a utilização de equipamentos de diferentes fabricantes em uma mesma SE e também ações manutenção e reestruturação.

2.2 Protocolos de Comunicação

São três os protocolos abordados neste trabalho: MMS, GOOSE e SV. O MMS é um protocolo da camada de aplicação do modelo OSI escolhido pelo comitê de desenvolvimento da IEC 61850 como a melhor opção para a comunicação vertical entre um IED e aplicações do nível de estação de uma SE. O MMS é um padrão internacional tanto para troca de mensagens em tempo real como para aquisição de dados e envio de comandos que utiliza a arquitetura Cliente-Servidor. O modelo de dados definido pela *Abstract Communication Service Interface* (ACSI) da IEC 61850 é mapeado no protocolo MMS a fim de que os dispositivos possam ter um padrão de envio e aquisição de dados (MELO, 2015).

As mensagens GOOSE possibilitam uma distribuição rápida e confiável dos dados, têm alta prioridade no barramento de dados e possuem limitações de tempo máximo no seu envio. Estão associadas à camada de enlace do modelo OSI e seguem uma arquitetura Editor-Assinante, trocadas em um tipo de comunicação horizontal entre os dispositivos.

O protocolo *Sampled Values* (SV) é utilizado para o envio de amostras de sinais analógicos digitalizados, como tensão e corrente para o barramento de processo de uma SE. Em alguns aspectos, o SV é semelhante às mensagens GOOSE, pois é um protocolo da camada de enlace do modelo OSI e utiliza o padrão de comunicação Editor-Assinante. Entretanto, o SV possui requisitos específicos de sincronização de tempo, de taxa de amostragem e de *datasets*. Para que esse protocolo seja aplicado, é necessário que sejam feitas modificações no nível de processo das subestações em comparação com a forma que é largamente aplicada no dia a dia por conta da amostragem dos dados. A digitalização dos dados pode ser feita por meio de dispositivos chamados *Merging Unit* (MU). De forma geral, esses equipamentos recebem o sinal analógico, os convertem em sinais digitais e os enviam ao barramento de processos. Ainda existe outra possibilidade, que é a utilização de Transformador de Corrente Ótico (TCO) e Transformador de Potencial Ótico (TPO). Eles são equipamentos elétricos que já podem ter um conversor Analógico/Digital (A/D) embutido no seu corpo físico e

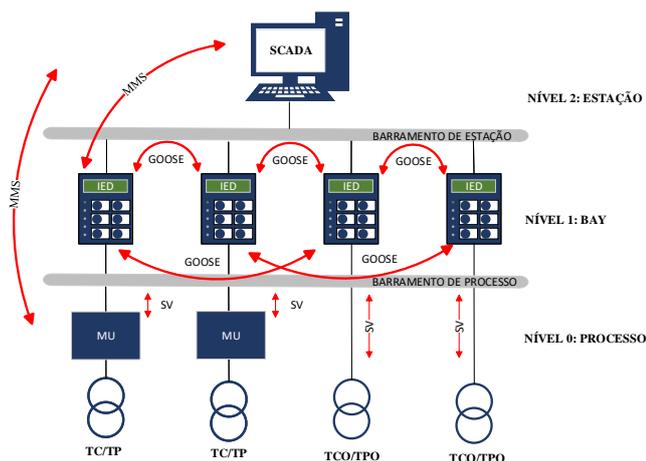


Figura 1. Comunicação MMS, GOOSE e SV no padrão IEC 61850.

enviar os sinais ao barramento de processo por meio de fibra ótica.

A Figura 1 apresenta de forma geral o diagrama de comunicação entre dispositivos de um Sistema de Automação de Subestação (SAS) padrão IEC 61850. Uma SE pode ser dividida em três níveis: Nível 0, ou nível de processo, no qual estão dispositivos, como Transformadores de Corrente (TC), Transformadores de Potencial (TP), TCO, TPO e a MU; Nível 1, ou nível de bay, onde estão os IEDs; e Nível 2, ou nível de estação, de onde é feita a supervisão, controle e aquisição de dados por meio de um SCADA. Existem dois barramentos de comunicação de dados. Um primeiro entre os níveis 0 e 1 há o barramento de processos e entre os níveis 1 e 2 há o barramento de estação. O protocolo SV é utilizado para enviar dados de comunicação dos sinais digitalizados das grandezas elétricas medidas no nível 0 para os IEDs no nível 1. O protocolo GOOSE é utilizado em uma comunicação horizontal entre IEDs no nível 1 em situações, como por exemplo, de seletividade lógica. O protocolo MMS é utilizado para comunicação vertical entre dispositivos do nível 1 e do nível 2.

3. IED VIRTUAL (VIED)

O VIED proposto neste trabalho é baseado no conceito apresentado por Wojtowicz et al. (2018), que propõe uma centralização de funções de proteção de SEP e um único servidor. A configuração das SEs, ao invés de ser composta por diversos IEDs, é formada por um servidor que abrange as diversas aplicações de proteção, o chamado IED virtual. É chamado virtual por ter sua estrutura fortemente baseada em *software*, e não em diversos *hardwares*.

Atuar com VIEDs gera diversos benefícios, tanto na sua aplicação direta em SEs, quanto na sua utilidade acadêmica. Pensando em SEs totalmente digitais, eles podem centralizar a proteção em um único computador, mas com possibilidade de redundância, e permitir o acesso remoto diretamente às suas configurações por meio de aplicativos. Isso facilita a implementação de novas funções para se adaptar a situações que vão surgindo, como geração distribuída, e facilita as manutenções preventivas e corretivas. Além disso, no que diz respeito a SEs convencionais, é possível fazer testes de operação de IEDs com o auxílio

de VIEDs em um ambiente controlado antes de serem feitas manutenções ou atualizações propriamente ditas em campo. Desta forma, visto que os VIEDs se comportam de maneira semelhante a um IED de *hardware* dedicado e podem emular as suas mesmas funções e comportamentos, é possível testar um IED específico juntamente com um VIED que emule de maneira concentrada as diversas e complexas proteções do sistema.

Os VIEDs também apresentam vantagens acadêmicas. Por serem dispositivos criados por *software* e que podem centralizar diversas funções em um único *hardware*, acabam por reduzir os custos de implementação, favorecendo a prática em laboratórios educacionais. Eles podem ser desenvolvidos por alunos e professores, o que pode quebrar a barreira de *softwares* proprietários e contribuir para o avanço da ciência. Tem-se uma outra vantagem ao instigar o desenvolvimento de VIEDs, que é o constante contato do aluno-desenvolvedor com conceitos da IEC 61850 e, portanto, a sua maior familiarização com a comunicação digital de SEs.

Os VIEDs utilizados neste trabalho foram desenvolvidos por meio de códigos computacionais na linguagem de programação C. Para isso, foi utilizado como base o suporte de programação fornecido pelo projeto libIEC61850 (Zillgith, 2022a). A biblioteca libIEC61850 proporciona uma *Application Programming Interface* (API) com uma biblioteca de código aberto que implementa os protocolos MMS, GOOSE e SV da norma IEC 61850 (Zillgith, 2022b).

O desenvolvimento dos VIEDs partir da biblioteca libIEC61850 permite que eles ofereçam serviços durante a sua operação, dentre os quais pode-se citar o envio e o recebimento de mensagens MMS, GOOSE e SV. Além disso os VIEDs possuem funcionalidades que os possibilitam solicitar alguns serviços de outros dispositivos, como o estabelecimento/encerramento de uma conexão para recebimento de mensagens MMS, a aquisição do modelo de dados de um outro VIED ou IED, a leitura de dados analógicos ou digitais que trafegam a rede e o acesso a relatórios de operações. Um VIED pode tanto ter funcionalidades que o permitem ofertar serviços, como funcionalidade que o permite solicitá-los, operando simultaneamente..

A criação de uma instância servidora de serviços pode ser feita de duas maneiras distintas. Uma torna toda a estrutura interna do servidor estática, ou seja, os LD e LN não podem ser alterados pelo fato de eles serem extraídos de um arquivo .CID de um IED pré-existente. A outra forma é dinâmica e o programador que se apropria da libIEC61850 é que deve fazer todo o processo de criação dos LN, LD, datasets, e outras funções.

Os VIEDs utilizados neste trabalho foram criados da forma estática, a partir de dados de um IED existente na plataforma, a fim de validar o seu funcionamento em passos futuros. A Figura 2, mostra os arquivos utilizados para a criação da instância servidora de serviços. A partir de um IED real, extrai-se o seu arquivo de dados .CID. A partir da API, é possível criar dois arquivos, *my_model.c* e *my_model.h*, que têm como entrada de dados todos os LD e LN do arquivo .CID. A partir desses dois arquivos gerados funcionam como biblioteca para o código do VIED, que, portanto, possui a mesma estrutura interna do IED real. A funcionalidade responsável por solicitar os serviços, por

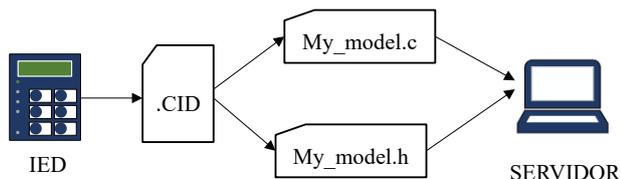


Figura 2. Arquivos necessários para uma instância servidoras de serviços da libIEC61850.

outro lado, é totalmente programável, pois não necessita da estrutura interna composta de LD e LN.

4. PLATAFORMA DE ENSINO

Visando o ensino de proteção de SEP, o VIED foi utilizado, juntamente com outros componentes, para montar uma Plataforma de PAC por meio da qual fosse possível realizar práticas, como mostra a Figura 3. A Plataforma faz parte da bancada de Estudos de Proteção do Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus do Pici. A bancada possui os seguintes componentes:

- (1) *Notebook* ACER com processador AMD Ryzen 5, frequência de 2 GHz, 12 GB de memória RAM e dois sistemas operacionais: Windows 10 Home Single Language e Ubuntu 20.04.3 LTS. Este *hardware* também é equipado com uma SSD de 240 GB;
- (2) *Notebook* Samsung Expert X30 com processador Intel core i5 8265U, clock de 1.60 até 3.90 GHz, memória RAM de 8GB, placa de vídeo NVIDIA MX110 2GB e dois sistemas operacionais: Windows 10 Home Single Language e Ubuntu 20.04.3 LTS. Este *hardware* também é equipado com uma Unidade de Estado Sólido SSD de 240 GB;
- (3) Computador industrial SEL 3354;
- (4) Dois IED SEL-751 da fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories* com suporte para IEC 61850;
- (5) Testador Universal Hexafásico e Analisador de Energia Microprocessado com protocolo GOOSE IEC 61850 (Mala de Testes de Relés Hexafásica) CE-6006 da fabricante Conprove.
- (6) *Switch* Gerenciável com 24 portas SEL-2730M;
- (7) Acessórios: cabos ethernet RJ-45, USB, de fibra ótica e de cobre para conexões elétricas da mala de testes.

Além dos *hardwares*, também foram utilizados os seguintes *softwares*:

- (1) *AcSElarator Architect*, por meio do qual se configura a comunicação padrão IEC 61850 dos IED SEL 751 e fornece os arquivos de extensão .CID;
- (2) *AcSElarator QuickSet*, que permite a parametrização de funções de proteção dos IEDs SEL 751;
- (3) CET 850, que configura a comunicação padrão IEC 61850 dos IEDs da Schneider e fornece os arquivos de extensão .CID;
- (4) Wireshark, para análise do tráfego de rede da LAN;
- (5) CTC, que contempla um conjunto de outros *softwares* da mala de testes, dos quais os mais utilizados foram o "Manual" e o "Fonte Auxiliar";

- (6) Visual Code Studio, versão 1.63.0 para Ubuntu 64 bits, pelo qual se faz a programação dos VIEDs;
- (7) SCADA Elipse.



Figura 3. Comunicação MMS, GOOSE e SV no padrão IEC 61850.

Os computadores ACER e Samsung podem exercer a mesma função, que são: ser hospedeiro do VIED, capturar dados de tráfego de rede por meio do *software* Wireshak e operar os *softwares* da mala de testes. O computador industrial é equipado com os *softwares* de parametrização dos IEDs SEL e um sistema SCADA. A conexão entre os IEDs SEL e o *switch* gerenciável foi feita por meio de cabos de fibra ótica, enquanto os demais *hardwares* foram conectados ao *switch* por meio de cabos ethernet RJ-45. A mala de testes foi conectada aos *notebooks* ACER e Samsung via cabo USB. Na Figura 4 é apresentado o esquema de ligação dos componentes da bancada, formando uma rede local. Conforme supracitado, foram utilizados IEDs reais e VIEDs para que os alunos possam ter contato com as tecnologias já há tempos estabelecidas, bem como com as novas.

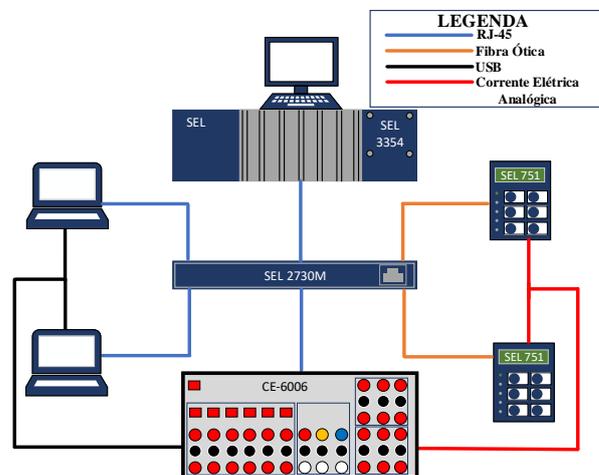


Figura 4. Esquema de conexões da rede local da Plataforma.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram feitos dois testes para validação do VIED da Plataforma, nos quais foi explorada a mesma situação de seletividade lógica com falha de disjuntor. Dois relés próximos são sensibilizados pela função de proteção instantânea de sobrecorrente (50) devido a uma falta trifásica. O primeiro teste foi feito com dois IEDs físicos SEL a fim de observar o seu comportamento. O segundo teste foi feito com um

IED físico na função de editor e um VIED na função de assinante, e os resultados foram comparados aos valores obtidos no primeiro teste. O VIED foi criado a partir de um arquivo .CID do IED SEL. Dessa forma, foi possível realizar a comparação entre os resultados dos dois testes para analisar o funcionamento do VIED. O VIED foi programado no sistema operacional Ubuntu, estando os IEDs e o VIED já devidamente parametrizados para a operação na situação proposta. Assim, serão analisados nos testes somente os aspectos de comunicação dos IEDs e VIEDs que dizem respeito ao padrão IEC 61850.

A mala de testes da bancada foi usada para aplicação de corrente elétrica trifásica e, portanto, representou o SEP. Essas correntes foram aplicadas diretamente ao módulo de aquisição de corrente dos IEDs físicos e, por isso, possuíam baixa amplitude. Entretanto, essas correntes foram interpretadas como sendo de diferente valor RMS devido à parametrização interna dos dispositivos e a relação de transformação de seus Transformadores de Corrente (TC) internos. Os bornes auxiliares de saídas binárias da mala, em combinação com a sua fonte auxiliar interna, representam um disjuntor no que diz respeito a permitir ou não a continuidade do circuito elétrico, sendo essenciais para a correta interpretação pelos IEDs do sistema elétrico proposto. Visto que estava conectada à LAN, a mala conseguia observar as mensagens GOOSE que por ela trafegavam, característica essa utilizada como critério de parada dos testes. Assim, ao perceber determinada mensagem GOOSE, como o sinal de TRIP, a mala interrompia o fornecimento de corrente elétrica.

O tráfego de rede dos IEDs e dos VIEDs foi capturado pelo *software* Wireshark, que mostra os dados de tempo e protocolos utilizados pelas mensagens enviadas/recebidas. Os dados de tempo das mensagens foram agrupados em gráficos para melhor visualização e entendimento. A seguir são apresentados os resultados experimentais da aplicação da plataforma. A Figura 5 apresenta o diagrama unifilar proposto para a realização dos testes. Os componentes desse diagrama são: transformador (01T1) cujo lado de alta é 69 kV e o lado de baixa 13,8 kV; dois TCs (91Z1 e 91Z2); um disjuntor de barramento (11T1) que protege o barramento (01B1); um disjuntor de linha (11L1); e dois relés, um editor (SEL 751) e outro assinante (SEL 751 ou VIED). Destaca-se que 01T1, 11T1, 11L1, 91Z1 e 91Z2 utilizados no teste não eram equipamentos comerciais, mas suas funções foram desempenhadas pela mala de testes.

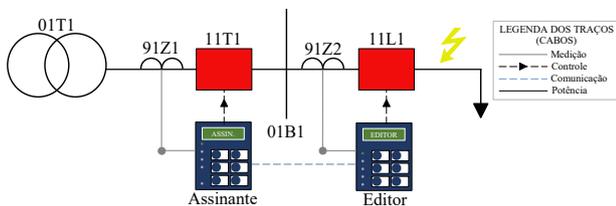


Figura 5. Diagrama unifilar proposto para os testes de seletividade lógica.

5.1 Teste 1: Seletividade Lógica com Falha de Disjuntor-Dois IEDs Reais

Neste primeiro teste, o IED assinante passou a comandar 11T1, e o IED editor, 11L1, que possui defeito que o

impede de abrir seus contatos. A mala de testes iniciou a injeção de corrente elétrica trifásica, quando, em determinado momento, ocorreu uma falta trifásica na linha, como mostra o destaque amarelo da Figura 6. O destaque em verde mostra as mensagens GOOSE que a mala estava observando na LAN, que são: sinal de TRIP, função 50, mensagem de falha de disjuntor do IED editor; sinal de TRIP do IED assinante. O destaque vermelho mostra que o critério de parada da emulação era a mensagem TRIP do assinante e que, após 536 ms, a mala de testes parou de injetar corrente, finalizando o teste.

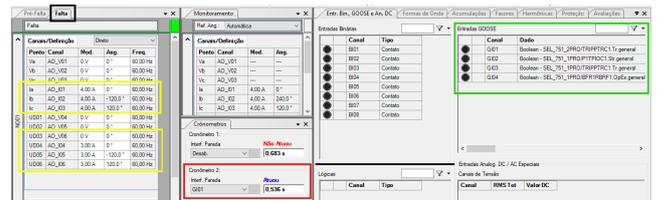


Figura 6. Tela do *software* da mala de testes para o Teste 1.

A Figura 8 mostra as mensagens GOOSE capturadas pelo *software* Wireshark. No tempo de 23 ms após o início do Teste 1, a mala de testes iniciou a aplicação da corrente de falta. A função 50 e o sinal de TRIP do editor foram sensibilizados. O IED assinante também sensibilizou a função 50, porém, apenas por 3 ms, não sendo esse tempo suficiente para abrir 11T1. O curto tempo de sensibilização da função 50 do assinante se deve à configuração de seletividade lógica, pois, ao perceber que o editor havia sensibilizado a função 50 e o sinal de TRIP, entendeu que não deveria atuar. Visto que a falta persistiu, já que 11L1 não abriu, o IED editor enviou a mensagem de falha de disjuntor após 500 ms (valor pré-definido na parametrização). Percebendo a mensagem de falha de disjuntor, o IED assinante envia o sinal de TRIP a 11T1 no tempo 536 ms, eliminando, assim, a falta. O tempo de 536 ms é exatamente o tempo em que a mala de testes parou a injeção de corrente, como pode ser visto na Figura 6, destaque vermelho.

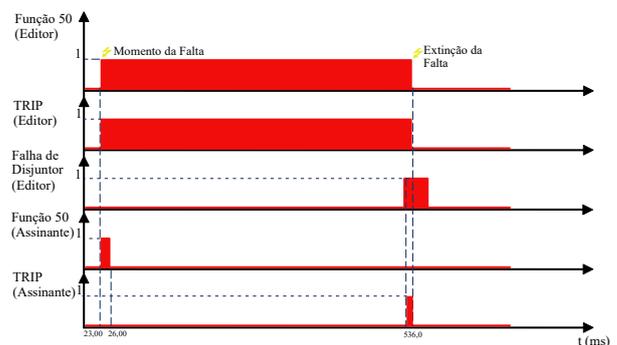


Figura 7. Gráfico com mensagens GOOSE do Teste 1.

A Figura apresenta o IED editor à direita e o IED assinante à esquerda. O editor acendeu os LEDs de TRIP, da função 50 e da mensagem de falha de disjuntor. O assinante, por sua vez, apenas acendeu o LED de TRIP e apresentou a mensagem *Remote Trip* no seu painel, o que significa que o sinal de TRIP foi enviado devido à seletividade lógica.



Figura 8. IEDs após o fim do Teste 1.

5.2 Teste 2: Seletividade Lógica com Falha de Disjuntor - VIED Assinante

O Teste 2 é semelhante ao Teste 1, porém, o VIED assumiu a função do assinante. A mala de testes, semelhantemente ao que ocorreu no Teste 1, aplicou a falta trifásica capaz de sensibilizar tanto o IED editor quanto o VIED assinante. A Figura 9 apresenta em destaque verde que a mala estava observando a mensagem GOOSE de TRIP do VIED. O VIED possuía o mesmo nome do LN do IED SEL assinante do Teste 1 por conta da sua forma de criação, explicado na seção 3. Em vermelho pode-se ver que o critério de parada do Teste 2 foi a mensagem de TRIP do VIED, o que ocorreu no tempo de 535 ms.

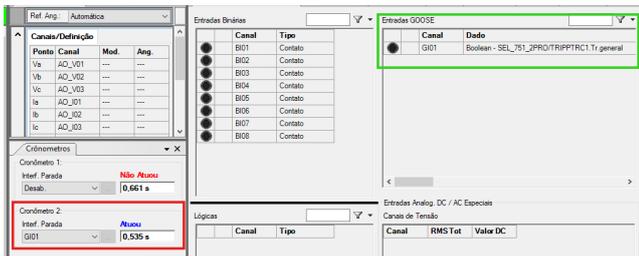


Figura 9. Tela do software da mala de testes para o Teste 2.

A Figura 10 mostra as mensagens GOOSE capturadas pelo software Wireshark. No tempo de 22,33 ms após o início do Teste 1, a mala de testes iniciou a aplicação da corrente de falta. A função 50 e o sinal de TRIP do IED foram sensibilizados. O VIED também sensibilizou a função 50, porém, apenas por 1 ms, não sendo esse tempo suficiente para abrir 11T1. O curto tempo de sensibilização da função 50 do assinante se deve à configuração de seletividade lógica, pois, ao perceber que o IED editor havia sensibilizado a função 50 e o sinal de TRIP, entendeu que não deveria atuar. Visto que a falta persistiu, já que 11L1 não abriu, o IED editor enviou a mensagem de falha de disjuntor após 500 ms (valor pré-definido na parametrização). Percebendo a mensagem de falha de disjuntor, o VIED envia o sinal de TRIP a 11T1 no tempo 535 ms, eliminando, assim, a falta. O tempo de 535 ms é exatamente o tempo em que a mala de testes parou a injeção de corrente, como pode ser visto na Figura 9, destaque vermelho.

A Figura 11 mostra a mensagem em tela apresentada pelo VIED. No primeiro momento, ele percebe a falta,

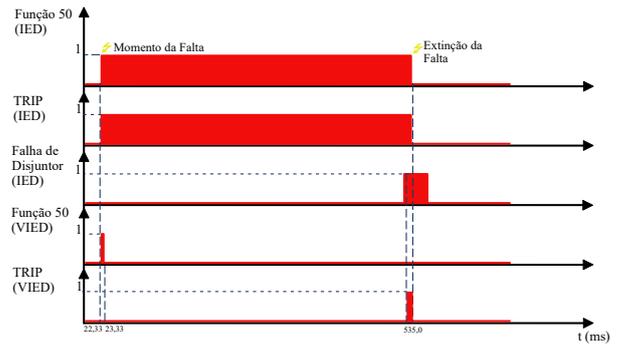


Figura 10. Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com IED e VIED com falha de disjuntor.

mas não atua devido à configuração de seletividade lógica. Entretanto, perceber a situação de falha por meio da mensagem do IED, ele envia o sinal de TRIP e 11T1 é aberto.

```
Using GOOSE interface: enp2s0
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
```

Figura 11. Mensagem apresentada pelo VIED assinante no terminal do Ubuntu na situação de seletividade lógica com falha de disjuntor.

6. APLICAÇÃO NO ENSINO DE ENGENHARIA

Foi feita uma aula expositiva de laboratório utilizando a Plataforma PAC para os alunos da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência do curso de Engenharia Elétrica da UFC, como pode ser visto na Figura 12. Foram realizados testes de seletividade lógica com VIEDs com o mesmo procedimento apresentado na seção 5. Foram feitos dois questionários para que os alunos respondessem, um antes e outro após a realização da prática. Dentre as respostas obtidas no questionário, os alunos indicaram que tiveram uma boa assimilação do conteúdo da IEC 61850, compreenderam o conceito de VIED.

7. CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados, foi possível observar o funcionamento do VIED operando em conjunto com o IED físico. Devido à sua criação ter como base o arquivo .CID de um IED SEL 751, comparou-se nos dois testes o funcionamento do VIED com o de um IED físico na situação de seletividade lógica com falha de disjuntor. Por meio dos dados do tráfego de rede e do tempo de operação, foi possível observar que o VIED operou satisfatoriamente em 535 ms, seguindo o padrão do IED, que foi de 536 ms.



Figura 12. Aplicação da plataforma PAC no ensino de engenharia.

Desta forma, o funcionamento do VIED foi validado para a operação em seletividade lógica para uma falta trifásica que sensibiliza a função 50 com falha de disjuntor.

Foi feita uma aplicação prática com os alunos do curso de Engenharia Elétrica da UFC por meio de uma aula expositiva utilizando a Plataforma PAC em laboratório de ensino. Formulários com perguntas direcionadas aos alunos foram feitos e as respostas demonstraram que os conteúdos relacionados à IEC 61850 e aos VIEDs foram compreendidos por meio da aula prática.

Diante da validação do VIED e da aula prática de laboratório, foi possível contribuir com a Plataforma de ensino PAC, adicionando um elemento que abre muitas possibilidades para aplicação no ensino. A Plataforma, portanto, reúne elementos de novas tecnologias, como o VIED, e elementos que já estão consolidados no mercado, como o IED. Sua aplicação no ensino abre margem para abordar temas de comunicação de SEs com padrão IEC 61850. Diferentes testes podem ser aplicados por meio da Plataforma PAC permutando a posição do VIED e do IED e também criando mais de um VIED para uma mesma situação. Por meio de diferentes cenários, é possível capacitar alunos e profissionais às novas realidades do mercado através de situações práticas e, assim, desenvolver maior pensamento analítico e autoconfiança.

Como passos futuros, indica-se a integração dos VIEDs a um sistema SCADA, a utilização de mensagens MMS e GOOSE e criação do VIED pelo modelo dinâmico.

REFERÊNCIAS

- Brahma, S., De La Ree, J., Gers, J., Girgis, A.A., Horowitz, S., Hunt, R., Kezunovic, M., Madani, V., McLaren, P., Phadke, A.G., Sachdev, M.S., Sidhu, T.S., Thorp, J.S., Venkata, S., and Wiedman, T. (2009). The education and training of future protection engineers: Challenges, opportunities, and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2), 538–544. doi:10.1109/TPWRD.2009.2014029.
- Hunt, R., Flynn, B., and Smith, T. (2019). The substation of the future: Moving toward a digital solution. *IEEE Power and Energy Magazine*, 17(4), 47–55. doi:10.1109/MPE.2019.2908122.
- IEC (2013). *IEC TR 61850-1: Standard for communication networks and systems for power utility automation-Part 1: Introduction and overview*. IEC.

- Labonne, A., Caire, R., Braconnier, T., Guise, L., Jardim, M., and Hadjsaid, N. (2021). Teaching digital control of substation and iec 61850 with a test bench validation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2), 1175–1182. doi:10.1109/TPWRS.2020.3010446.
- MELO, L.S. (2015). *Desenvolvimento de uma plataforma para implementação de sistemas multiagentes com aplicação para recomposição automática de sistemas de distribuição de energia elétrica* 2015. 120 f. Mestrado em engenharia elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Schumacher, M., Hoga, C., and Schmid, J. (2007). Get on the digital bus to substation automation. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(3), 51–56. doi:10.1109/MPAE.2007.365820.
- SEL (2013). *SEL-751 Feeder Protection Relay: Instruction manual*. [S.l.].
- Thomas, M.S., Kothari, D.P., and Prakash, A. (2011). Design, development, and commissioning of a substation automation laboratory to enhance learning. *IEEE Transactions on Education*, 54(2), 286–293. doi:10.1109/TE.2010.2053372.
- Wojtowicz, R., Kowalik, R., Rasolomampionona, D.D., and Kurek, K. (2021). Virtualization of protection systems part 2: Tests performed on a large environment based on data center solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1. doi:10.1109/TPWRD.2021.3128993.
- Wojtowicz, R., Kowalik, R., and Rasolomampionona, D.D. (2018). Next generation of power system protection automation—virtualization of protection systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 2002–2010. doi:10.1109/TPWRD.2017.2786339.
- Zillgith, M. (2022a). libiec61850 / lib60870. URL <https://libiec61850.com/>.
- Zillgith, M. (2022b). libiec61850 / lib60870 - api reference manual. URL <https://support.mz-automation.de/doc/libiec61850/c/latest/>.