



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS**

**PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO IEC 61850 ORIENTADA À  
APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS**

**FORTALEZA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F936p Freitas, Claudivan Domingos de.  
Plataforma de proteção, automação e controle de sistemas elétricos com IEDs físicos e virtuais padrão IEC 61850 orientada à aprendizagem baseada em projetos / Claudivan Domingos de Freitas. – 2023.  
165 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Ruth Pastora Saraiva Leão.

Coorientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

1. Relés digitais. 2. Proteção de sistemas elétricos. 3. Virtualização. 4. IEC 61850. 5. Capacitação. I.  
Título.

CDD 621.3

---

CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS

PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO IEC 61850 ORIENTADA À  
APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas de Potência

Orientadora: Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão

Coorientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio

FORTALEZA

2022

CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS

PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO IEC 61850 ORIENTADA À  
APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas de Potência

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Roberto Feliciano Dias Filho (UPE)  
Universidade de Pernambuco

---

Prof. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida  
Universidade Federal de Goiás (UFG)

A Raimundo Batista de Freitas (*in memoriam*),  
meu querido pai, que dedicou a vida a sua família. Suas mãos calejadas permitiram que eu pudesse estudar e não partilhar dos mesmos sofrimentos que teve quando jovem. Ele foi meu melhor amigo e sou feliz por ser seu filho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, em quem ponho minha fé, por ter me sustentado por toda a minha vida, e em específico no período de mestrado, durante o qual me vieram tristezas, mas seu consolo e alegria superabundaram.

A minha esposa, Jéssica, que me acompanhou em toda trajetória até aqui. Sua companhia tornou os dias mais alegres e foi essencial para que eu pudesse superar os desafios.

A minha mãe, Aurinete, minha primeira e constante professora, que, juntamente com meu pai, Raimundo Batista (*in memorian*), me educaram e me ensinaram as coisas da vida.

A meus irmãos, Júnior e João, que cresceram comigo e agora também partilham comigo desta alegria. A minhas irmãs Cláudia, Paula e Manuela, que sempre incentivaram a concluir este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFC, e em especial aos meus orientadores, professora Ruth Pastôra Saraiva Leão e professor Raimundo Furtado Sampaio, pela paciência, ensinamentos, orientações e pelo excelente exemplo de educadores.

A minha amiga Alice Freitas, que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho nos testes de laboratório e na dedicação de tempo em busca de conhecimento. Aos meus amigos Matheus Monteiro, Gesiel Gonçalves e Marina Alves, que somaram seus esforços e também contribuíram neste trabalho.

Ao Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI), em especial a equipe de automação e proteção. Ao MEC e ao CNPQ pelo período de apoio financeiro de bolsa de mestrado.

“Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.”

(Bíblia Sagrada. Romanos 8:28)

## RESUMO

O avanço tecnológico dos equipamentos das Subestações Elétricas (SE) tem proporcionado melhorias significativas na confiabilidade dos sistemas de Proteção, Automação e Controle (PAC) dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). A publicação da norma IEC 61850 e suas atualizações têm promovido impactos positivos na comunicação entre os dispositivos dos níveis hierárquicos dos sistemas PAC das subestações, com significantes benefícios como padronização de protocolos, interoperabilidade, menor custo de integração, menor custo de instalação e manutenção, dentre outros. A IEC 61850 abriu o caminho para a realização de SE Digitais que consistem essencialmente em dispositivos eletrônicos inteligentes ou IEDs (do inglês, Intelligent Electronic Devices) que operam em modernas tecnologias de rede com comunicação digital. Nas SE Digitais, a tecnologia de IEDs Virtuais pode ser utilizada. O modelo virtualizado de dispositivos lógicos, nós lógicos, Interface de Serviço de Comunicação Abstrata (ACSI) e Classes de Dados Comuns (CDCs) permite a definição dos dados, serviços e comportamento dos dispositivos a serem definidos, além dos protocolos usados para definir como os dados são transmitidos pela rede. Com o desenvolvimento dessas novas tecnologias e a padronização dos protocolos de comunicação, é necessário que profissionais de proteção de sistemas elétricos sejam capacitados para acompanhar as evoluções tecnológicas. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta uma plataforma para aprendizagem de sistemas de proteção, automação e controle de subestações e redes elétricas inteligentes. O objetivo da plataforma é oferecer um ambiente prático que facilite a aprendizagem e fomente a capacidade de análise, o pensamento crítico e a autoconfiança no domínio do conhecimento em PAC. A plataforma é constituída basicamente de IEDs físicos e IEDs virtuais (VIED) interligados em uma rede de comunicação. Neste trabalho são apresentados o conceito, o desenvolvimento, os testes e a validação dos VIEDs e são feitas aplicações em situações de seletividade lógica, com e sem falha de disjuntor, e na utilização da função de proteção diferencial de transformador, com vistas à capacitação de pessoal qualificado no estado-da-arte em PAC. A validação do VIED consistiu em mostrar que o dispositivo virtual se comunica por meio de mensagens *Manufacturing Message Specification* (MMS), *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Values* (SV) e que se comporta de forma semelhante a um IED físico que faz parte da plataforma. Além disso, foram feitos testes de integração entre o VIED e o IED físico a um *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA). Portanto, foi demonstrada a contribuição do IED virtual para aplicação

em laboratórios de ensino, pesquisa e inovação e em futuras subestações, e o grande valor da plataforma PAC na formação e recapacitação de profissionais qualificados.

**Palavras-chave:** relés digitais; proteção de sistemas elétricos; virtualização; IEC 61850; SCADA; capacitação.

## ABSTRACT

The technological advance of the Electric Power Systems (SE) has featured significant improvements in the reliability of the Protection, Automation and Control (PAC) systems of the Electric Power Systems (SEP). The publication of the IEC 61859 standard and its updates have promoted positive impacts on communication between devices of the hierarchical levels of substations PAC systems and significant benefits such as standardization protocols, interoperability, lower cost of integration, lower cost of installation and maintenance. IEC 61850 opened up the way for the implementation of Digital SEs, which essentially consist of intelligent electronic devices (IEDs) that operate on modern network technologies with digital communication. Virtual IEDs technology can be used in Digital SEs. The virtualized model of logical devices, logical nodes, Abstract Communication Service Interface (ACSI) and Common Data Classes (CDCs) allows the definition of the data, services and behavior of the devices that are defined, in addition to the protocols used to define how the data is transmitted over the network. As these new technologies and the standardization of communication protocols are developed, it is necessary that protection of SEP professionals are trained to keep up with technological evolution. Within this context, this dissertation presents a platform for learning digital electrical protection, automation and control of substations and smart grids. The purpose of the platform is to offer a practical environment that facilitates learning and fosters analytical skills, critical thinking and self-confidence in the field of PAC. The platform basically consists of physical IEDs and virtual IEDs (VIED) interconnected in a communication network. The concept, development, testing and validation of VIEDs are presented and applications are made in situations of logic selectivity, with and without breaker failure, and use of the transformer differential protection function, with a view to training of qualified personnel in the state-of-the-art in the protection of electrical systems. The VIED validation consisted of showing that the virtual device communicates through Manufacturing Message Specification (MMS), Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) and Sampled Values (SV) messages and that it behaves similarly to the physical IED that is part of the platform. In addition, integration tests were performed between the VIED and the physical IED to a Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). Therefore, it was demonstrated the contribution of the virtual IED for application in teaching, research and innovation laboratories and in future substations, and the great value of the PAC platform in the training and retraining of qualified professionals.

**Keywords:** digital relay; electrical system protection; virtualization; IEC 61850; SCADA; training.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da Plataforma. . . . .	34
Figura 2 – Diagrama geral da Plataforma com padrão IEC 61850. . . . .	35
Figura 3 – Exemplo de mapeamento ASCII nas camadas dos protocolos de rede de computadores. . . . .	40
Figura 4 – Modelo de dados da ACSI de um IED. . . . .	41
Figura 5 – Árvore de informações do LN XCBR apresentado no módulo 7 da norma IEC 61850. . . . .	42
Figura 6 – Modelo de referência de uma informação com padrão IEC 61850. . . . .	42
Figura 7 – Modelo para troca de informação entre dispositivos com padrão IEC 61850. . . . .	43
Figura 8 – Funcionalidades Cliente-Servidor da norma IEC 61850. . . . .	44
Figura 9 – Visão geral dos protocolos e seus tipos. . . . .	45
Figura 10 – Camadas OSI de comunicação e perfis IEC 61850. . . . .	45
Figura 11 – Comunicação vertical MMS. . . . .	46
Figura 12 – Comunicação horizontal GOOSE. . . . .	47
Figura 13 – Retransmissão de mensagens GOOSE. . . . .	48
Figura 14 – Comunicação SV no padrão IEC 61850-9-2. . . . .	50
Figura 15 – Estrutura de um APDU. . . . .	51
Figura 16 – PDU capturada por um analisador de rede. . . . .	51
Figura 17 – Diagrama geral. . . . .	54
Figura 18 – Curva de proteção da Função 87T. . . . .	58
Figura 19 – Arquitetura da API - Servidor. . . . .	65
Figura 20 – Arquivos necessários para criar uma instância servidora da libIEC61850. . . . .	66
Figura 21 – Pilha de serviços da funcionalidade Cliente da libIEC61850. . . . .	67
Figura 22 – Pastas com exemplos para aplicação da biblioteca . . . . .	69
Figura 23 – Arquivos na pasta Diss_Seletividade_Assinante. . . . .	69
Figura 24 – Habilitando o VIED para mensagens GOOSE na seletividade lógica. . . . .	70
Figura 25 – LN utilizados para o VIED. . . . .	70
Figura 26 – Diagrama lógico da função 50 com seletividade lógica. . . . .	71
Figura 27 – Variáveis da corrente de um transformador no código do VIED com a função 87T. . . . .	72
Figura 28 – Diagrama lógico da função 87T (sem corrente de restrição). . . . .	73

Figura 29 – Lógica de comparação das correntes de linha para a função 87T. . . . .	74
Figura 30 – Esquema de conexões da LAN da Plataforma. . . . .	77
Figura 31 – Tela principal do <i>software</i> Manual da mala de testes. . . . .	78
Figura 32 – Tela principal do <i>software</i> Wireshark. . . . .	79
Figura 33 – VIED com funcionalidade de servidor inicia/finaliza conexão para envio de mensagens MMS. . . . .	81
Figura 34 – <i>Report</i> recebido pelo cliente. . . . .	82
Figura 35 – Tráfego de rede MMS. . . . .	82
Figura 36 – VIED com funcionalidade de editor inicia conexão para envio de mensagens GOOSE. . . . .	83
Figura 37 – Mensagens GOOSE recebidas pelo assinante. . . . .	83
Figura 38 – Tráfego de rede GOOSE. . . . .	84
Figura 39 – Tela do terminal do publicador de mensagens SV. . . . .	85
Figura 40 – Mensagens SV recebidas pelo assinante. . . . .	85
Figura 41 – Tráfego de rede para mensagens SV. . . . .	85
Figura 42 – Tela do <i>software</i> Manual para a situação de sobrecorrente do IED. . . . .	87
Figura 43 – Tráfego de rede para teste de validação da função 50. . . . .	87
Figura 44 – Situação de falha de disjuntor com o IED programado com a função 50. . . . .	88
Figura 45 – SEL 751 - Operação da função 50. . . . .	89
Figura 46 – Tela do <i>software</i> Manual para a situação de sobrecorrente do VIED. . . . .	89
Figura 47 – Tráfego de rede para teste de validação da função 50 do VIED. . . . .	90
Figura 48 – Tráfego de rede para situação de falha com VIED programado com a função 50. . . . .	91
Figura 49 – VIED - Mensagens na tela do terminal para a operação da função 50 sem falha de disjuntor. . . . .	91
Figura 50 – VIED - Mensagens na tela do terminal para a operação da função 50 sem falha de disjuntor. . . . .	91
Figura 51 – Diagrama base para experimentos de validação de seletividade lógica. . . . .	92
Figura 52 – Tela do <i>software</i> Manual para a situação de seletividade lógica com dois IEDs. . . . .	94
Figura 53 – Painel frontal dos IEDs após situação de falta sem falha de disjuntor (seletividade lógica). . . . .	94
Figura 54 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com dois IEDs na situação sem falha de disjuntor. . . . .	95

Figura 55 – Tela do <i>software</i> Manual para a situação de seletividade lógica com falha e dois IEDs. . . . .	96
Figura 56 – Painel frontal dos IEDs após situação de falta com falha de disjuntor (seletividade lógica). . . . .	96
Figura 57 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com dois IEDs na situação de falha de disjuntor. . . . .	97
Figura 58 – Mala de testes para seletividade com VIED assinante sem falha de disjuntor.	98
Figura 59 – Mensagem apresentada pelo VIED assinante no terminal do Ubuntu na situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor. . . . .	98
Figura 60 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com IED e VIED na situação sem falha de disjuntor. . . . .	99
Figura 61 – Mala de testes para seletividade com VIED assinante com falha de disjuntor.	100
Figura 62 – Mensagem apresentada pelo VIED assinante no terminal do Ubuntu na situação de seletividade lógica com falha de disjuntor. . . . .	100
Figura 63 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com IED e VIED na situação com falha de disjuntor. . . . .	100
Figura 64 – Mala de testes para seletividade com VIED editor sem falha de disjuntor. . .	101
Figura 65 – Diagrama para o teste da Função 87T. . . . .	102
Figura 66 – Mensagem de tela do VIED ao perceber uma diferença de corrente maior que 30%. . . . .	103
Figura 67 – Tráfego de rede para teste de validação da função 87T. . . . .	104
Figura 68 – Mensagem de tela do VIED para corrente do lado de baixa nula. . . . .	104
Figura 69 – Mensagem de tela do VIED para fluxo reverso de corrente. . . . .	105
Figura 70 – Máquina Virtual. . . . .	106
Figura 71 – Tráfego de rede para dois VIEDs. . . . .	106
Figura 72 – Diagrama unifilar da subestação do <i>campus</i> do Pici. . . . .	107
Figura 73 – Diagrama unifilar da rede de distribuição do <i>campus</i> do Pici. . . . .	108
Figura 74 – Mapeamento dos dispositivos e Driver IEC 61850. . . . .	109
Figura 75 – IED e VIED escolhidos para seletividade lógica. . . . .	110
Figura 76 – Associação dos IED e VIED aos dispositivos do diagrama unifilar na situação de falha de disjuntor. . . . .	110
Figura 77 – Associação dos IED e VIED aos dispositivos do diagrama unifilar. . . . .	111

Figura 78 – Rede Pici e indicação do local de falta . . . . .	112
Figura 79 – Mapeamento dos dispositivos e Driver IEC 61850. . . . .	112
Figura 80 – Associação do VIED aos disjuntore 21L1 e 11T1 do diagrama unifilar. . . . .	113
Figura 81 – Abertura dos disjuntores 12L1 e 11T1 após atuação da função 87T. . . . .	113
Figura 82 – Plataforma PAC montada para a aula prática. . . . .	120
Figura 83 – Alunos assistindo à aula no laboratório (momento de preenchimento do formulário). . . . .	120
Figura 84 – Tela inicial do site da libIEC61850. . . . .	132
Figura 85 – Download da versão mais atual libIEC61850. . . . .	133
Figura 86 – Subpastas com arquivos da libIEC61850. . . . .	133
Figura 87 – Comando make no terminal do Ubuntu. . . . .	134
Figura 88 – Comando para gerar arquivos do modelo estático do VIED. . . . .	134
Figura 89 – Arquivo ASSINANTE.CID e arquivos static gerados. . . . .	134
Figura 90 – Respostas a primeira pergunta do formulário pré-aula. . . . .	154
Figura 91 – Respostas a segunda pergunta do formulário pré-aula. . . . .	155
Figura 92 – Respostas a terceira pergunta do formulário pré-aula. . . . .	155
Figura 93 – Respostas a quarta pergunta do formulário pré-aula. . . . .	156
Figura 94 – Respostas a quinta pergunta do formulário pré-aula. . . . .	156
Figura 95 – Respostas a sexta pergunta do formulário pré-aula. . . . .	157
Figura 96 – Respostas a sétima pergunta do formulário pré-aula. . . . .	157
Figura 97 – Respostas a oitava pergunta do formulário pré-aula. . . . .	158
Figura 98 – Respostas a primeira pergunta do formulário pós-aula. . . . .	158
Figura 99 – Respostas a segunda pergunta do formulário pós-aula. . . . .	159
Figura 100–Respostas a terceira pergunta do formulário pós-aula. . . . .	159
Figura 101–Respostas a quarta pergunta do formulário pós-aula. . . . .	159
Figura 102–Respostas a quinta pergunta do formulário pós-aula. . . . .	160
Figura 103–Respostas a sexta pergunta do formulário pós-aula. . . . .	160
Figura 104–Respostas a sétima pergunta do formulário pós-aula. . . . .	161
Figura 105–Respostas a oitava pergunta do formulário pós-aula. . . . .	161

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura da norma IEC 61850. . . . .	38
Tabela 2 – Definição da mensagem GOOSE. . . . .	49
Tabela 3 – Parâmetros do Bloco de Controle GOOSE mapeado em MMS. . . . .	49
Tabela 4 – Parâmetros do Bloco de Controle SV, Multicast(M) ou Unicast (U), mapeado em MMS. . . . .	52
Tabela 5 – Módulos e submódulos pertencentes à libIEC61850. . . . .	64
Tabela 6 – Endereços IP dos dispositivos da Plataforma. . . . .	77
Tabela 7 – Dados de Placa do Transformador 01T1. . . . .	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

.SSD	<i>System Specification Description</i>
A/D	Analógico/Digital
ACSI	<i>Abstract Communication Service Interface</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APDU	<i>Application Protocol Data Unit</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
API-C	API - Cliente
API-S	API - Servidor
ASDU	<i>Application Service Data Unit</i>
CC	Corrente Contínua
CDC	<i>Common Data Classes</i>
CID	<i>Configuration IED Description</i>
DA	<i>Data Attribute</i>
DPC	<i>Controllable Double Point</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FC	<i>Functional Constraint</i>
GoCB	<i>GOOSE Control Block</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GREI	Grupo de Redes Eléctricas Inteligentes
GSSE	<i>Generic Substation Status Event</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
IC	Instância Cliente
ICD	<i>IED Capability Description</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IS	Instância Servidor
LAN	<i>Local Area Network</i>
LD	<i>Logical Device</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>

LN	<i>Logical Node</i>
MAABP	Metodologia Ativa de Aprendizagem Baseada em Projetos
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	Metropolitan Area Network
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
MSVCB	<i>Multicast Sampled Values Control Block</i>
MU	<i>Merging Unit</i>
MV	Máquina Virtual
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PAC	Proteção, Automação e Controle
PD	<i>Physical Device</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAS	Sistema de Automação de Subestações
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SCD	<i>Substation Configuration Description</i>
SCL	<i>Substation Configuration Language</i>
SCM	<i>Specific Communication Service Mapping</i>
SCSM	<i>(Specific Communication Service Mapping</i>
SE	subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SO	Sistema Operacional
SSD	Unidade de Estado Sólido
SV	<i>Sampled Values</i>
TC	Transformador de Corrente
TCO	Transformador de Corrente Ótico
TP	Transformador de Potencial
TPAA	<i>Two Party Application Association</i>
TPO	Transformador de Potencial Ótico
UCS	Unidade de Controle de Subestação

UFC	Universidade Federal do Ceará
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USVCB	<i>Unicast Sampled Values Control Block</i>
VIED	<i>Virtual Intelligent Electronic Device</i>
WAN	Wide Area Network
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivações</b>	<b>24</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
<b>1.2.1</b>	<i>Objetivo Geral</i>	<b>25</b>
<b>1.2.2</b>	<i>Objetivos Específicos</i>	<b>25</b>
<b>1.3</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>Contribuições Científicas</b>	<b>31</b>
<b>1.5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>32</b>
<b>1.5.1</b>	<i>Materiais da Plataforma PAC</i>	<b>32</b>
<b>1.5.2</b>	<i>Realização dos Testes e Análise dos Resultados</i>	<b>34</b>
<b>1.6</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>35</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E</b>	
	<b>CONTROLE</b>	<b>37</b>
<b>2.1</b>	<b>IEC 61850</b>	<b>37</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Estrutura da norma IEC 61850</i>	<b>37</b>
<b>2.1.2</b>	<i>Modelo de representação da informação</i>	<b>40</b>
<b>2.1.3</b>	<i>Modelo de Troca de Informações</i>	<b>43</b>
<b>2.1.4</b>	<i>Protocolos de Comunicação</i>	<b>44</b>
<b>2.1.4.1</b>	<i>MMS</i>	<b>46</b>
<b>2.1.4.2</b>	<i>GOOSE</i>	<b>47</b>
<b>2.1.4.3</b>	<i>SV</i>	<b>49</b>
<b>2.1.5</b>	<i>Linguagem SCL</i>	<b>53</b>
<b>2.2</b>	<b>Proteção de Sistemas Elétricos de Potência</b>	<b>53</b>
<b>2.3</b>	<b>Funções ANSI 50, 87T e a Seletividade Lógica</b>	<b>54</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Proteção Instantânea de Sobrecorrente: ANSI 50</i>	<b>55</b>
<b>2.3.2</b>	<i>Seletividade Lógica</i>	<b>55</b>
<b>2.3.3</b>	<i>Proteção Diferencial de Transformador: ANSI 87T</i>	<b>56</b>
<b>2.4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>58</b>
<b>3</b>	<b>CONCEITO E DESENVOLVIMENTO DO IED VIRTUAL</b>	<b>60</b>
<b>3.1</b>	<b>IED Virtual</b>	<b>60</b>

3.1.1	<i>libIEC61850</i> . . . . .	61
3.1.2	<i>Visão Geral da API da libIEC61850</i> . . . . .	63
3.1.2.1	<i>API - Servidor e API - Cliente</i> . . . . .	65
3.2	<b>Desenvolvimento do VIED</b> . . . . .	67
3.2.1	<i>VIED com Função de Proteção Instantânea de Sobrecorrente (50) e Seletividade Lógica</i> . . . . .	68
3.2.2	<i>VIED com Função Diferencial de Transformador (87T)</i> . . . . .	71
3.3	<b>Conclusão</b> . . . . .	74
4	<b>DESENVOLVIMENTO, TESTE E VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE (PAC)</b> . . . . .	76
4.1	<b>Plataforma de Sistema PAC Digital</b> . . . . .	76
4.1.1	<i>LAN da Plataforma PAC</i> . . . . .	76
4.1.2	<i>Mala de Testes (Testador Hexafásico)</i> . . . . .	77
4.1.3	<i>IEDs Físicos e VIED</i> . . . . .	78
4.1.4	<i>Tráfego de Rede - Wireshark</i> . . . . .	79
4.1.5	<i>Merging Unit - MU</i> . . . . .	80
4.2	<b>Resultados para Validação da Comunicação dos VIEDs</b> . . . . .	80
4.2.1	<i>Mensagens MMS</i> . . . . .	81
4.2.2	<i>Mensagens GOOSE</i> . . . . .	82
4.2.3	<i>Mensagens SV</i> . . . . .	84
4.2.4	<i>Função ANSI 50: Sobrecorrente Instantânea</i> . . . . .	86
4.2.4.1	<i>Operação do IED</i> . . . . .	86
4.2.4.2	<i>Operação do VIED</i> . . . . .	88
4.2.5	<i>Seletividade Lógica</i> . . . . .	92
4.2.5.1	<i>Operação dos IEDs na seletividade lógica</i> . . . . .	93
4.2.5.2	<i>Operação do VIED na seletividade lógica</i> . . . . .	97
4.2.5.3	<i>VIED assinante na seletividade lógica sem falha de disjuntor</i> . . . . .	97
4.2.5.4	<i>VIED assinante na seletividade lógica com falha de disjuntor</i> . . . . .	99
4.2.5.5	<i>VIED editor na seletividade lógica sem falha de disjuntor</i> . . . . .	101
4.2.6	<i>Função ANSI 87T: Diferencial de Transformador</i> . . . . .	102
4.2.7	<i>Utilização de mais de um VIED</i> . . . . .	105
4.3	<b>Resultados de Integração dos VIED e IED a um sistema SCADA</b> . . . . .	106

4.3.1	<i>Seletividade Lógica integrada ao SCADA</i> . . . . .	109
4.3.2	<i>Recomposição Manual</i> . . . . .	111
4.3.3	<i>Função ANSI 87T: Diferencial de Transformador</i> . . . . .	113
4.4	<b>Considerações Finais</b> . . . . .	114
5	<b>METODOLOGIA ATIVA APLICADA AO APRENDIZADO DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE</b> . . . . .	115
5.1	<b>Metodologias de Ensino</b> . . . . .	115
5.2	<b>Aula Expositiva com a Plataforma PAC</b> . . . . .	118
5.2.1	<i>Formulário Pré-Aula</i> . . . . .	118
5.2.2	<i>Exposição dos conceitos da IEC 61850, apresentação da Plataforma PAC e Prática</i> . . . . .	119
5.3	<b>Formulário Pós-Aula</b> . . . . .	121
5.4	<b>Proposta de Projetos Utilizando a Plataforma PAC</b> . . . . .	121
5.4.1	<i>Metodologia</i> . . . . .	121
5.4.2	<i>Descrição dos Projetos Propostos</i> . . . . .	122
5.4.3	<i>Avaliação</i> . . . . .	123
5.5	<b>Conclusão</b> . . . . .	124
6	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	125
6.1	<b>Trabalhos Futuros</b> . . . . .	126
6.2	<b>Trabalhos Publicados</b> . . . . .	127
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	128
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	132
	<b>APÊNDICE A–DOWNLOAD DA LIBIEC61850 E CRIAÇÃO DE ARQUIVOS NA LINGUAGEM C</b> . . . . .	132
	<b>APÊNDICE B–CÓDIGO-FONTE VIED COM FUNÇÃO 50 ASSINANTE EM SELETIVIDADE LÓGICA</b> . . . . .	135
	<b>APÊNDICE C–CÓDIGO-FONTE VIED COM FUNÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR</b> . . . . .	143
	<b>APÊNDICE D–FORMULÁRIOS APLICADOS NA REALIZAÇÃO DE AULA EXPOSITIVA UTILIZANDO A PLATAFORMA PAC</b> . . . . .	154
D.1	<b>Formulário Pré-Aula</b> . . . . .	154

<b>D.2</b>	<b>Formulário Pós-Aula . . . . .</b>	<b>158</b>
	<b>APÊNDICE E–PLANO DE PROJETOS DA DISCIPLINA SUPERVI- SÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA . . . . .</b>	<b>162</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As subestações de energia elétrica (SE) são nó central para operação e controle do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Atualmente, SEs inteligentes digitais e padronizadas têm sido construídas com importante papel para a aplicação das redes elétricas inteligentes. Relés eletromecânicos deram lugar a dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), que possibilitaram a implementação de comunicação digital. Os *Intelligent Electronic Device* (IED)s das SEs Digitais se interligam em rede de comunicação local - do inglês *Local Area Network* (LAN) - baseada em tecnologia *Ethernet*, que fornece um *backbone* de comunicação simplificado para controle e monitoramento local e remoto ((SCHUMACHER *et al.*, 2007). Protocolos de comunicação legados foram desenvolvidos com o duplo objetivo de fornecer as funções necessárias exigidas pelos sistemas elétricos de potência (SEP) enquanto minimizam o número de bytes usados pelos protocolos. A variedade de protocolos proprietários trouxe problemas para integração de dispositivos de diferentes fabricantes. Com o objetivo de solucionar o problema causado pela variedade de protocolos e contribuir para o avanço tecnológico das SEs, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) lançou em 2003 a primeira edição da norma IEC 61850 (atualmente já está na segunda edição), que propõe protocolos universais para a comunicação de IEDs de SEs, a saber: *Manufacturing Message Specification* (MMS), *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Values* (SV) (IEC/TR 61850-1, 2013).

No contexto atual, o SEP possui uma parcela de tecnologias baseadas em inversores, os quais são utilizadas por fontes de energias renováveis e geração distribuída. Os inversores podem afetar o fluxo de potência, a tensão do sistema e as funções de proteção, exigindo rápidas atualizações e adaptações, visto que veículos elétricos, baterias e fontes distribuídas de energia solar e eólica podem ser conectadas em qualquer parte do SEP. Hunt *et al.* (2019) apontam que o futuro das subestações frente às mudanças do SEP está em deixar de lado o atual modelo de proteção baseada em *hardware*, com um propósito único e estático de proteção em si, e passar para um modelo adaptável por meio de *software* e que permita a comunicação coordenada entre os dispositivos das fontes de energia distribuída e melhor gerenciamento por parte dos operadores. O modelo de dispositivos de controle e proteção baseados em *software* diz respeito a aplicativos que podem ser rapidamente alterados, desenvolvidos e testados, o que pode aumentar a confiabilidade dos processos e as melhores condições de manutenções. Com uma configuração baseada em *software*, as SEs podem ter seus serviços constantemente atualizados sem necessidade de troca de dispositivos físicos e de forma rápida, automática e

remota, envolvendo baixos riscos e menores custos financeiros. Um contraponto para o modelo de SEs digitais utilizando dispositivos conectados em LAN é a questão da cibersegurança, a qual precisa ser forte para evitar ataques por invasores com objetivo de prejudicar o sistema elétrico. As configurações dos relés de proteção no modelo de subestação (SE)s digitais devem ser mais dinâmicas e contemplar os diferentes tipos de rede elétrica com variadas configurações que melhor se adequam às mudanças atuais no SEP.

Uma tecnologia que pode ser utilizada diante da necessidade de dinamicidade é a dos *Virtual Intelligent Electronic Device* (VIED)s (WOJTOWICZ *et al.*, 2018). Os VIEDs são desenvolvidos por *software* para executar funções de proteção do SEP e permitir a comunicação padrão IEC 61850 em uma LAN. Os VIEDs possuem como característica trabalhar com sinais digitais, o que é desejável para a evolução das subestações no que diz respeito à comunicação de seus dispositivos. Além disso, os VIEDs, mesmo após serem desenvolvidos para uma situação específica, podem ser modificados e adaptados para uma nova realidade de configuração do SEP sem, necessariamente, trocar o seu *hardware*. Funcionalidades de acesso remoto dos VIEDs podem ser implementadas para acesso por operadores conectados em uma Metropolitan Area Network (MAN) ou uma Wide Area Network (WAN), contribuindo para as manutenções e para o gerenciamento do sistema elétrico.

Diante dos avanços tecnológicos do SEP, torna-se necessário profissionais capacitados para operar os equipamentos e garantir o bom funcionamento do sistema elétrico. Treinamentos em tecnologias já implementadas e consolidadas no mercado, bem como em novas tecnologias que se mostram promissoras, são essenciais para a formação de um bom profissional. Engenheiros, técnicos ou outros colaboradores que trabalham na operação do SEP e estudantes em processo de formação, em específico os que operam as subestações, precisam ser capacitados para se adequarem às transformações e inovações na área de proteção, automação e controle de SEs.

## 1.1 Motivações

A principal motivação para esse trabalho está na necessidade de se trabalhar com IEDs de proteção mais dinâmicos que funcionem por meio de *softwares* que possam ser modificados e atualizados para se adaptarem às necessidades do SEP à medida que o sistema vai se transformando, a fim de contribuir para a evolução da proteção, automação e controle de SEs e para as redes elétricas inteligentes. Além disso, é de extrema importância prover mecanismos de

capacitação de pessoal para domínio de novas tecnologias digitais de Proteção, Automação e Controle (PAC) do SEP.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e testar VIEDs em uma plataforma de PAC composta por IEDs físicos e virtuais padrão IEC 61850 orientada à aprendizagem baseada em projetos.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Desenvolver e implementar VIEDs por meio de *softwares* que sejam capazes de se comunicar em uma LAN utilizando os protocolos da IEC 61850;
- Testar em uma bancada experimental de laboratório os VIEDs desenvolvidos e comparar os resultados de seu funcionamento com os resultados obtidos por IEDs físicos da bancada;
- Promover a integração dos VIEDs desenvolvidos com o *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) da plataforma de PAC;
- Planejar a aplicação da plataforma no ensino de alunos de graduação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC).

## 1.3 Estado da Arte

A tecnologia de proteção digital tem evoluído nas últimas décadas. Os IEDs e as tecnologias de comunicação em rede facilitaram o monitoramento, o controle local e remoto e a proteção de subestações, que não poderiam ser facilmente realizados com dispositivos tradicionais de proteção e controle. No estudo de proteção de SEP, os IEDs de proteção têm sido definidos como dispositivos sinônimos de relés digitais ou numéricos baseados em microprocessadores (SAMPAIO, 2019). Para a realização da comunicação entre os IEDs das subestações, os fabricantes desenvolveram seus protocolos, os quais viabilizavam a troca de informações somente entre dispositivos do mesmo fabricante. Outros protocolos surgiram no

contexto de proteção, controle e automação de SEs, os quais ainda são amplamente utilizados, inclusive em áreas diversas do setor elétrico, como o *ModBus* e o DNP3. Para resolver a dificuldade de troca de informações entre os IEDs da subestação devido ao uso de diferentes IEDs de diferentes fabricantes e fornecer uma melhor padronização dos dados das SEs, IEEE e IEC desenvolveram juntos um padrão comum para comunicação de subestação, IEC61850 (WOJTOWICZ *et al.*, 2018). O advento da norma IEC 61850 possibilitou a utilização e a padronização de diversos recursos e trouxe muitos benefícios para o Sistema de Automação de Subestações (SAS). Ainda nos primeiros anos de sua implementação, apesar dos desafios, tinha-se grande expectativa dos avanços que ela poderia proporcionar (HOSSENLOPP, 2007). Dentre os principais recursos disponíveis ao se adotar a IEC 61850, estão: o modelo virtualizado de *Logical Device* (LD) e *Logical Node* (LN); nomeação de cada elemento de dados; serviços de alto desempenho, dos quais pode-se citar a comunicação via mensagens MMS, GOOSE e SV; e linguagem padronizada de todos os dados que trafegam na rede de comunicação. Dessa forma, a padronização eliminou a possibilidade de ambiguidade na aquisição de dados e solucionou o problema de protocolos de comunicação proprietários. Além disso, sua implementação possibilita a redução de custos de instalação dos SASs, de comissionamento das subestações, de integração entre os equipamentos e possibilita a implementação de outros serviços que não são possíveis ou são de difícil implementação quando se utiliza outros protocolos. A IEC 61850 abriu portas para a evolução das subestações e do seu sistema de automação (MACKIEWICZ, 2006).

Hunt *et al.* (2019) apresentam conceitos e requisitos necessários para as SEs diante dos avanços tecnológicos dos equipamentos e da penetração de fontes de energia renovável e da geração distribuída no SEP, ressaltando o papel fundamental da IEC 61850 nesse contexto. A proposta dos autores vai na direção de subestações digitais, nas quais torna-se necessária a digitalização de todas as informações das SEs e o tráfego destas numa rede de comunicação. À medida que as fontes renováveis e a geração distribuída se tornam parcelas consideráveis do SEP, e a partir do momento que cargas como veículos elétricos e baterias são cada vez mais utilizadas, os equipamentos de proteção precisam apresentar característica de dinamicidade de adaptação e acesso remoto coordenado por parte dos operadores. Os autores defendem que o atual modelo de dispositivos das subestações, os quais são chamados de "baseados em *hardware*", deve ser substituído por modelo chamado de "baseado em *software*" para uma melhor operação do SEP. Os modelos baseados em *hardware* são projetados para uma configuração específica e permitem pouca variação e adaptação diante de mudanças do SEP, podendo ser

necessária em alguns casos a constante troca de equipamentos. Dispositivos baseados em *hardware* não são necessariamente dispositivos eletromecânicos, mas podem ser IEDs, que possuem microprocessadores em sua composição física e permitem uma maior flexibilidade com relação a sua configuração. Entretanto, seu uso em SEs para proteger diversos setores requer em muitos casos uma grande quantidade de *hardwares*. O modelo baseado em *software*, por outro lado, oferece a possibilidade de redução no uso de *hardwares* ao integrar em uma menor quantidade de dispositivos físicos (em um número de dois, por exemplo, considerando a redundância) as diferentes funções de proteção para todos os setores de uma SE. O modelo baseado em *software* pode permitir, dessa forma, uma proteção centralizada ou em poucos *hardwares*, ainda que os setores das SEs sejam virtualmente protegidos por *softwares* específicos na máquina servidor. Essa redução de *hardwares* e a configuração de diferentes *softwares* de proteção (nesse sentido, pode-se dizer que são diferentes IEDs em um mesmo *hardware*) pode levar a uma maior flexibilidade para rearranjos topológicos da proteção, a uma maior variação das funções de proteção dos IEDs, a adaptação dos códigos de cada proteção, e acesso remoto via aplicativos, tornando mais prática e rápida a parametrização dos dispositivos para novas realidades que se configuram no sistema e de problemas que podem surgir, como é o caso da proteção cega e do falso *trip* das gerações distribuídas (SAMPAIO, 2017).

Apesar das vantagens das subestações digitais na comunicação e flexibilidade, há perigos no que diz respeito à segurança dos pacotes de dados transmitidos. Albarakati *et al.* (2019) apontaram alguns ataques de negação de serviço (do inglês *Denial of Service*) das mensagens GOOSE do protocolo IEC 61850, os quais estão relacionados à alteração de informações do pacote de dados e prejuízo na sincronização das mensagens pelo cliente e pelo servidor. Os autores propuseram uma detecção de anomalias baseada em *machine-learning*, a qual consiste em treinar o modelo por meio de dados prévios. Foram feitos testes para detecção de ataques cibernéticos, obtendo-se êxito no teste que enviava uma unidade dados não pertencentes à SE em estudo.

Um dos equipamentos primordiais para a proteção de subestações são os IEDs, que devem ser aprimorados para garantir a evolução da proteção e da automação de subestações. Uma forma de aprimoramento da proteção é a virtualização de IEDs, que, baseados em *software*, reduzem a necessidade de vários *hardwares*. 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 da virtualização. A virtualização consiste um sistema

operacional com uma Máquina Virtual (MV) instalada em um servidor físico, a qual executa as funções de um IED e envia mensagens padrão IEC 61850 em uma rede de comunicação. Seus testes de laboratório mostraram que é possível que uma 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 esse tempo de atraso.

Wojtowicz *et al.* (2022) avançaram em seu trabalho anterior e 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 MVs, dentre as quais existiam diversos VIEDs. Foram feitas análises do tempo de envio e recebimento das mensagens na rede de comunicação para a função de proteção de sobrecorrente. Para viabilizar seus testes, foram utilizados alguns outros *hardwares*, como uma mala de testes, dois *switchs* de rede e uma *merging unit* para envio de mensagens SV. Os resultados apresentaram melhor resposta no tempo de transmissão de mensagens GOOSE para o sistema operacional Linux do que para o Windows. O sistema de proteção virtual utilizando a arquitetura de *hardware* proposta pelos autores tem potencial suficiente e poder computacional para implementar a função de sobrecorrente para uma subestação. Os autores utilizaram o protocolo *Precision Time Protocol* (PTP), versão 2, nos *switches* de rede, o que proporcionou boa acurácia na sincronização das mensagens.

Diante dos avanços tecnológicos da proteção e do SAS, torna-se necessário que haja treinamento para adequação dos profissionais e, principalmente, de alunos de graduação, futuros engenheiros de proteção. Identificando a necessidade de treinamento e por conta da importância do tema, 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 realizados 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. Os autores 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 (um sistema 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.

Além da constante atualização com temas de engenharia, como a IEC 61850 e dispositivos digitais, os educadores também precisam dar atenção à forma de repassar o conhecimento e considerar novas técnicas de ensino, visto que a interação dos alunos com o mundo também muda ao longo dos anos. Aparelhos como *smartphones*, *notebooks* e *tablets*, os quais se conectam à internet e abrem muitas possibilidades de absorção de conteúdo, podem ajudar no processo de aprendizagem. A metodologia tradicional, na qual o professor expõe o conteúdo em sala de aula e o aluno absorve a matéria de forma passiva, tem suas vantagens, como baixo custo de implementação e fácil planejamento. Porém, a forma clássica de ensino apresenta barreiras no diálogo entre aluno e professor e o desinteresse do aluno, o que pode causar prejuízos na vida profissional (BUSS; MACKEDANZ, 2017).

Um conjunto de metodologias denominadas de Metodologias Ativas de Aprendizagem surgem como caminhos inovadores que podem ser tomados para auxiliar no aprendizado dos alunos. As metodologias ativas têm como objetivo tornar o aluno protagonista na busca de respostas, de soluções e torná-los cada vez mais interessados no conteúdo. O professor passa para a função de mediador, auxiliando os alunos no seu desenvolvimento e os estimulando na investigação teórica e prática de conteúdos (MORAN, 2017).

A Metodologia Ativa de Aprendizagem Baseada em Projetos (MAABP) é um tipo de metodologia que visa aplicar o conhecimento do aluno no desenvolvimento de projetos, instigando-os a conhecer na prática aquilo que foi visto na sala de aula e a desenvolver um senso crítico diante de situações que lhes poderão ocorrer quando no mercado de trabalho. Kyle *et al.* (2016) se utilizaram da metodologia ativa de ensino baseada em projeto para ministrar a alunos da disciplina de "Bioinstrumentação", fruto da parceria entre os Departamentos de Engenharia Elétrica e de Engenharia Biomédica da Universidade de Nova York, Estados Unidos. A MAABP utiliza a forma clássica de aula, mas vincula a ela a vivência prática dos conhecimentos adquiridos

por meio da elaboração e execução de um projeto. A disciplina de Bioinstrumentação trata do uso básico de dispositivos eletrônicos, ferramentas de aquisição e processamento de dados e programação computacional voltados para as necessidades biomédicas. Os alunos foram ensinados sobre marcapasso cardíaco, aquisição baseada em processadores e controle de resposta. Foi proposto que os alunos criassem e emulassem uma versão de marcapasso cardíaco. Ao final da disciplina, os alunos foram capazes de projetar, construir e testar o marcapasso. Os estudantes perceberam que a metodologia de ensino baseada em projeto aumentou o seu conhecimento de instrumentação, corroborado pelos exercícios feitos na criação do marcapasso. A opinião dos alunos foi que a forma como a disciplina foi ministrada, baseada em projeto, foi uma experiência educacional enriquecedora.

Zhang *et al.* (2016) aplicaram a MAABP na disciplina Eletrônica de Potência ofertada ao programa de mestrado da *Technical University of Denmark*. Os autores apresentaram o plano de aula, realizaram a aplicação da metodologia proposta em uma turma de 40 alunos no ano de 2013 e fizeram a comparação com o desempenho das notas finais com as turmas dos anos de 2012 e 2011 que receberam aulas no modo clássico. A avaliação dos alunos foi feita por meio de relatórios do desenvolvimentos dos projetos propostos pelo professor e de apresentações orais. As notas finais dos estudantes poderia variar de 0 a 12 pontos, sendo 7 a nota para classificar a aprovação, e 12 a nota da equipe reconhecida por excelente desempenho. Foi observado que 92,5% dos alunos da turma de 2013 obtiveram nota maior ou igual a 7, em contraste com 59,9% e 78% das turmas de 2012 e 2011, respectivamente.

No caminho de atualização diante de novas tecnologias e de utilização de Plataformas laboratoriais que podem ser aplicadas em projetos, seja por alunos de graduação, mestrado ou doutorado, ao longo dos últimos anos foram desenvolvidas pesquisas pelo Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) da UFC relacionadas à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação de Plataformas PAC. Magalhães (2019) desenvolveu uma plataforma para testes de comunicação com IEDs físicos por meio de mensagens MMS e GOOSE. A comunicação foi feita por meio de *software*, que permitia a leitura de dados e atributos de um *report* enviado via MMS e a troca de mensagens GOOSE com os dispositivos físicos. A contribuição do autor consistiu em criar algoritmos em *softwares* capazes de se comunicarem com dispositivos físicos utilizando dois protocolos básicos padrão IEC 61850. Freitas (2022) desenvolveu uma plataforma de proteção utilizando IEDs físicos e virtuais. O foco da autora consistiu em validar os dispositivos virtuais e realizar a sua integração a um sistema SCADA de licença livre. A contribuição da autora

consistiu na demonstração da operação do relés virtuais para a realização das comunicações MMS e GOOSE e na sua integração ao SCADA LAquis. Este trabalho demonstrou que os IEDs virtuais desenvolvidos pelo GREI ainda poderiam avançar em sua complexidade e ser aplicados ao ensino, enquanto plataforma PAC.

#### 1.4 Contribuições Científicas

Este trabalho contribui com o desenvolvimento de uma plataforma PAC composta por VIEDs e IEDs físicos padrão IEC 61850 orientada à aprendizagem baseada em projetos. Somado a isso, este trabalho contribui com o desenvolvimento, a implementação e testes de VIEDs para ensino e treinamento de tecnologias digitais no domínio da proteção, supervisão, automação e controle de subestações e redes elétricas inteligentes. A plataforma PAC foi concebida com enfoque na aprendizagem baseada em projeto, uma metodologia ativa que contextualiza o conhecimento e utiliza atividades ligadas à realidade prática e situações reais. A plataforma traz como componente distinto a integração de IEDs virtuais, os VIEDs, no sistema PAC de subestações de energia elétrica. Os VIEDs de proteção são integrados a IEDs físicos e ao SCADA da SE, com troca de informações no padrão IEC 61850.

A plataforma PAC proposta neste trabalho visa o ensino na graduação e a requalificação de profissionais no estado da arte em sistemas PAC. Foram agregadas novas funcionalidades aos VIEDs, em relação ao que já vinha sendo desenvolvido pelo GREI, e foram feitas aplicações utilizando a plataforma PAC digital, tais como:

- Desenvolvimento de VIEDs por meio de *software* que têm suporte para comunicação via mensagens SV;
- Validação dos VIEDs desenvolvidos e testados em diferentes situações, como sensibilização das funções de proteção *American National Standards Institute* (ANSI) 50 e 87T e de seletividade lógica;
- Utilização de mais de um VIED em um único *hardware*;
- Integração dos VIEDs desenvolvidos e dos IEDs físicos existentes na plataforma PAC com um SCADA comercial;
- Aplicação da plataforma PAC para aprendizagem ativa de proteção de sistemas de potência visando a formação de alunos de graduação da UFC e a requalificação de profissionais que atuam no mercado de trabalho..

## 1.5 Metodologia

Foi feito o desenvolvimento de VIEDs e realizados testes de seu funcionamento de forma experimental na Plataforma PAC composta por VIEDs e por IEDs. Os testes realizados foram denominados de Testes de Validação e Testes de Integração dos VIEDs e IEDs com um SCADA . Os Testes de Validação consistiram em:

- Observar as funcionalidades básicas do VIED para envio/recebimento de mensagens MMS, GOOSE e SV;
- Realizar testes da função de proteção de sobrecorrente instantânea e sua aplicação em situações de seletividade lógica. Primeiramente realizou-se os testes com IEDs físicos e, em seguida, os mesmos testes foram repetidos para os VIEDs a fim de avaliar a semelhança dos resultados obtidos;
- Operar e analisar um VIED programado com a função de proteção 87 (diferencial de transformador).

Os testes de integração ao SCADA consistiram em realizar testes no quais os IEDs e os VIEDs possuísem uma conexão por meio da LAN com o supervisor.

### 1.5.1 Materiais da Plataforma PAC

A Plataforma de PAC utilizada para realização dos testes foi composta por *hardwares* e *softwares*, a qual é apresentada na Figura 1 e no diagrama da Figura 2. Os *hardwares* utilizados foram:

- *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 Unidade de Estado Sólido (SSD) de 240 GB. Dispositivo utilizado nos testes para ser o *hardware* dos VIEDs, para configurar o testador hexafásico e a *Merging Unit* e para analisar do tráfego de rede;
- *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. Dispositivo utilizado nos testes para configurar o testador

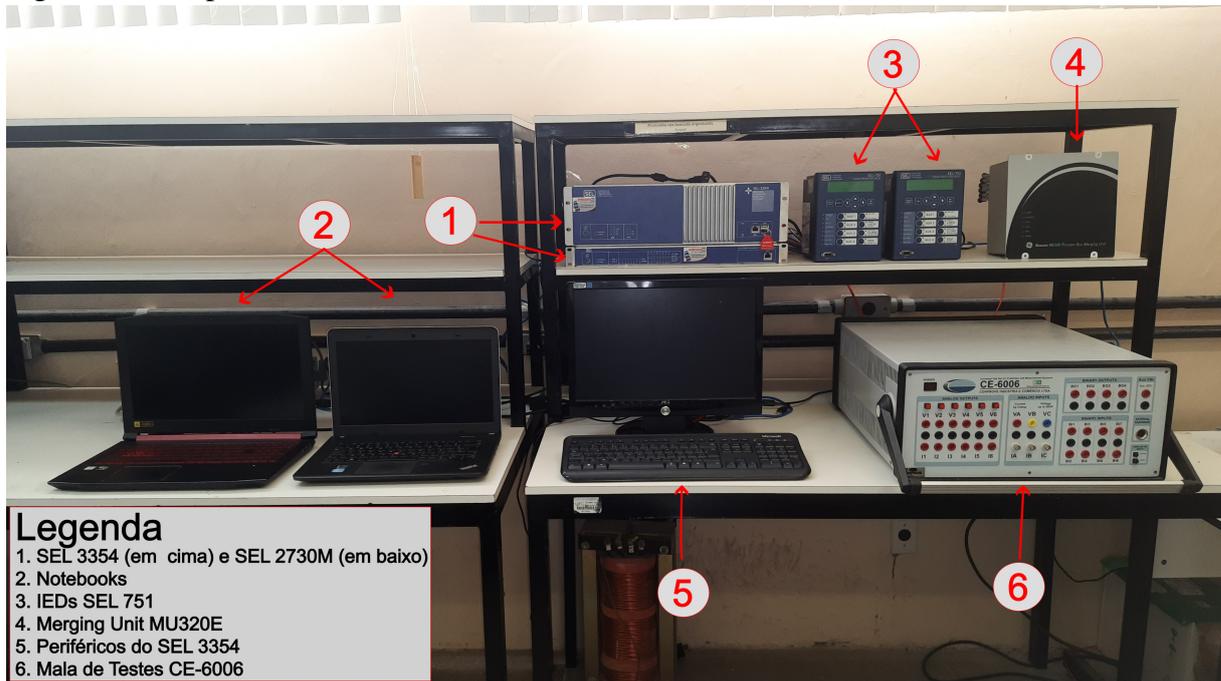
hexafásico, configurar a *Merging Unit* e analisar o tráfego de rede;

- Computador industrial SEL 3354, utilizado para configuração dos IEDs físicos SEL-751 e operar o SCADA da bancada;
- Dois IEDs SEL-751 da fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories* com suporte para IEC 61850 com proteção de instantânea de sobrecorrente utilizados nos testes;
- Testador Universal Hexafásico e Analisador de Energia Microprocessado com protocolo GOOSE IEC 61850 (Mala de Testes de Relés Hexafásica) CE-6006 da fabricante Conprove. Esse dispositivo foi utilizado para aplicar correntes elétricas e analisar determinadas mensagens GOOSE que trafegavam na LAN da bancada, de acordo com os testes executados.
- *Switch* Gerenciável com 24 portas SEL-2730M, utilizado para conectar em uma LAN os dispositivos da bancada;
- Acessórios: cabos ethernet RJ-45, *Universal Serial Bus* (USB), de fibra ótica e de cobre para conexões elétricas da mala de testes;
- *Merging Unit* (MU) modelo MU320E da fabricante General Electric, responsável por digitalizar as correntes analógicas aplicadas pelo testador hexafásico e as enviar à LAN.

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

- *AcSELarator Architect*, por meio do qual se configura a comunicação padrão IEC 61850 dos IEDs SEL 751 e fornece os arquivos de extensão *.Configuration IED Description* (CID);
- *AcSELarator QuickSet*, que permite a parametrização de funções de proteção dos IEDs SEL 751;
- CET 850, que configura a comunicação padrão IEC 61850 dos IEDs da Schneider e fornece os arquivos de extensão *.CID*;
- Wireshark, para análise do tráfego de rede da LAN;
- CTC, que contempla um conjunto de outros *softwares* da mala de testes, dos quais os mais utilizados foram o "Manual" e o "Fonte Auxiliar";
- Visual Code Studio, versão 1.63.0 para Ubuntu 64 *bits*, pelo qual se faz a programação dos VIEDs;
- SCADA Elipse.

Figura 1 – Componentes da Plataforma.



Fonte: Próprio Autor.

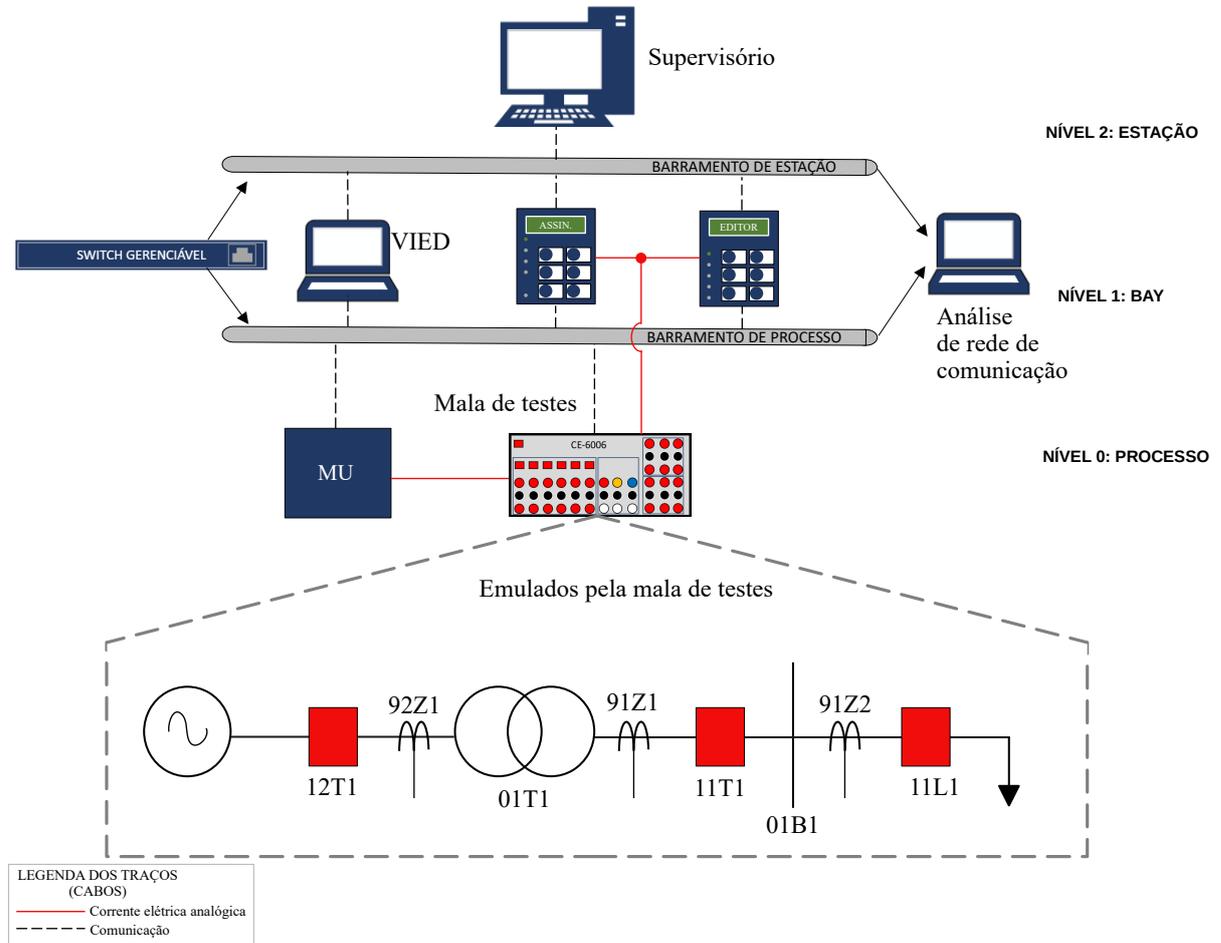
### 1.5.2 Realização dos Testes e Análise dos Resultados

Equipamentos do nível de processo como Transformador de Corrente (TC), Transformador de Potencial (TP), disjuntor, transformador e outros, foram emulados pela mala de testes de relés (testador hexafásico), a qual também foi utilizada para aplicar corrente elétrica, exercendo o papel da rede elétrica. A corrente elétrica foi aplicada diretamente aos IEDs físicos em seus painéis traseiros e, ao mesmo tempo, nos bornes de entrada de corrente da MU, a qual digitalizou os valores de corrente e os enviou no barramento de processos da LAN. Os dados de corrente digitalizada foram utilizados pelo VIED. Desta forma, tinha-se o a mesma leitura de corrente pelo IED físico e pelo VIED.

A análise dos resultados experimentais consistiu em verificar os tempos de atuação dos IEDs e do VIED fornecidos pelo *software* de trabalho da mala de testes. Também foram feitas análises das comunicações de rede que utilizaram os protocolos MMS, GOOSE e SV por meio do *Wireshark*. Os dados de tempo e de rede foram essenciais para fazer a comparação do funcionamento entre os relés físicos e virtuais e chegar a conclusões sobre a capacidade de operação dos VIEDs.

Foi utilizado um sistema supervisor para representar a subestação e a rede elétrica do *campus* do Pici da UFC. O sistema SCADA, responsável por automatizar o monitoramento e o controle da SE e rede elétrica, teve o papel de trocar informação tanto com o IED quanto

Figura 2 – Diagrama geral da Plataforma com padrão IEC 61850.



Fonte: Próprio Autor.

com o VIED através da rede de comunicação. Testes foram realizados considerando situações de falta em alguns trechos de linha.

Visando uma aplicação didática da plataforma, foi feita uma proposta para sua utilização nas disciplinas da grande área de proteção e automação ofertadas pelo curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFC. A proposta consistiu em um modelo para aulas práticas de laboratório e de projetos finais de disciplina.

## 1.6 Estrutura do Trabalho

Os próximos capítulos do trabalho estão definidos como se segue.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre proteção e automação de subestações. São apresentados conceitos de automação de subestações baseados na norma IEC 61850, com abordagem da estrutura, protocolos, funções de proteção de sobrecorrente e diferencial e seletividade lógica, segundo a IEC 61850.

No Capítulo 3 se discorre sobre os relés virtuais. É apresentado o conceito de VIED e o processo para o seu desenvolvimento.

No Capítulo 4 são expostos os resultados experimentais de validação e integração dos VIEDs com IEDs físicos e SCADA. São feitas análises que identificam a viabilidade de se utilizar os VIEDs e o comportamento dos dispositivos virtuais frente a operação dos IEDs físicos que fazem parte da bancada.

O Capítulo 5 trata sobre a metodologia ativa de aprendizagem baseada em projeto. É apresentada uma aplicação da plataforma PAC em laboratório com alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFC. É feita uma proposta de utilização da Plataforma PAC por meio de projetos na disciplina Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência da UFC utilizando a metodologia ativa de aprendizagem baseada em projetos.

No Capítulo 6 são feitas as conclusões do trabalho e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Este capítulo apresenta os principais conceitos e características dos sistemas PAC de subestações. A norma IEC 61850 é sucintamente discutida, sendo apresentada sua estrutura, modelos de representação de dados e de troca de informação, protocolos de comunicação e funções de proteção.

### 2.1 IEC 61850

Com a evolução do SAS, diversos protocolos de comunicação foram surgindo, como *Modbus*, DNP3, IEC 60870-5-101, além de protocolos proprietários, como o *Mirrored Bits* da SEL (SEL, 2013). A variedade de protocolos de comunicação tornou mais difícil a interoperabilidade de dispositivos de fabricantes diferentes, já que cada fabricante escolhe qual protocolo utilizar ou adota protocolos proprietários tendo controle sobre suas definições e operações. A troca de algum IED de proteção do sistema PAC de uma SE com protocolos legados envolve alto custo na conversão de protocolo ou a empresa concessionária de energia fica dependente da compra de IEDs do mesmo fabricante do sistema de automação da SE. Esta falta de padronização acarreta problema para as empresas concessionárias de energia e fabricantes.

Diante disso, pesquisadores e fabricantes de IEDs aplicaram esforços para padronizar os protocolos utilizados na comunicação entre relés de proteção e o sistema de automação da SE. Foi, então, concebida a IEC 61850, que foi desenvolvida em conjunto pelo comitê técnico 57 (TC57) do IEC e pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI), após unirem esforços em 1997 (MACKIEWICZ, 2006). No ano de 2003 foi lançada a primeira edição da norma IEC 61850 (IEC/TR 61850-1, 2013).

A segunda edição da IEC 61850 foi lançada no ano de 2010. A versão mais atual permitiu aumentar o nível de confiabilidade das comunicações, diminuindo a probabilidade de erros, promoveu aprimoramentos no aspecto de sincronismo da rede e permitiu a comunicação entre diferentes subestações. Além disso, sua aplicação foi estendida, englobando plantas de geração de energia a partir das fontes hidráulica, solar e eólica (KHAVNEKAR *et al.*, 2015).

#### 2.1.1 Estrutura da norma IEC 61850

A norma IEC 61850 está dividida em 10 módulos, apresentados na Tabela 1, nos quais são abordados aspectos importantes da comunicação de subestações, como: sintaxe,

pois utiliza protocolos padrão; e semântica, uma vez que trabalha com significados definidos das mensagens enviadas (LEÓN, 2015). Enquanto os protocolos anteriores trabalhavam com comunicação do tipo mestre-escravo, a IEC 61850 adotou uma linguagem orientada a objetos, uma arquitetura cliente-servidor para comunicação entre níveis hierárquicos de um SAS via protocolo MMS e arquitetura do tipo editor-assinante para comunicação horizontal por meio de mensagens GOOSE.

Tabela 1 – Estrutura da norma IEC 61850.

Módulo	Descrição
IEC 61850-1	Introdução e Visão Geral
IEC 61850-2	Glossário
IEC 61850-3	Requisitos Gerais
IEC 61850-4	Gerenciamento de Sistema e Projeto
IEC 61850-5	Requisitos de Comunicação para Modelos de Funções e Dispositivos
IEC 61850-6	Linguagem de Configuração para IED de subestações
IEC 61850-7	Estrutura de Comunicação Básica para Equipamentos de Subestações e Alimentadores
IEC 61850-7-1	Princípios e Modelos
IEC 61850-7-2	Serviços de Comunicação Abstratos (ACSI)
IEC 61850-7-3	Classes de Dados Comuns
IEC 61850-7-4	Classes de Nós Lógicos e de Dados Compatíveis
IEC 61850-8	SCM- Mapeamento para MMS (Manufacturing Message Specification) (International Organization for Standardization)-ISO 9506-1 e ISO 9506-2) e a ISO/IEC 8802-3.
IEC 61850-9-1	<i>Specific Communication Service Mapping (SCSM)</i> -Sampled Values conexão serial unidirecional ponto-a-ponto.
IEC 61850-9-2	<i>Specific Communication Service Mapping (SCSM)</i> -Sampled Values baseados na ISO/IEC 8802-3.
IEC 61850-10	Testes de Conformidade.

Fonte: (IEC/TR 61850-1, 2013)

Os cinco primeiros módulos tratam de aspectos gerais da norma IEC 61850. Eles apresentam os requisitos gerais e de aspectos dos sistemas de comunicação. São discutidos conceitos e é feita a abstração das funções de dispositivos presentes em uma subestação, como a definição dos dispositivos lógicos -LD- e do tipo das mensagens que são escopo da norma. Além disso, são tratados requisitos de desempenho necessários para que o sistema opere bem ao utilizar os protocolos propostos (LEÓN, 2015).

No sexto módulo da norma é apresentada a linguagem de configuração dos IEDs de subestações, a *Substation Configuration Language (SCL)*, que é uma linguagem baseada no padrão *eXtensible Markup Language (XML)*, e descreve o IED e a sua relação com outros dispositivos da subestação. Os arquivos gerados também descrevem, além dos IEDs, a subestação e as funções de comunicação (MELO, 2015). Os tipos de arquivos gerados com linguagem SCL estão descritos na seção 2.1.5.

O sétimo módulo apresenta o detalhamento do sistema de comunicação proposto pela norma. Existem quatro subdivisões nesse módulo, que são:

- Módulo 7-1: Introduz os princípios da comunicação dos dispositivos das subestações, apresentando uma visão geral do modelo de dados padrão IEC 61850. A comunicação entre IEDs é descrita diante de diferentes situações;
- Módulo 7-2: Descreve a *interface* de serviço de comunicação abstrata, ou *Abstract Communication Service Interface* (ACSI). São chamadas de *interfaces* abstratas porque independem do protocolo que é implementado. Assim, define troca de informações em subestações por meio dos serviços de leitura, escrita, controle/comando e relatório de monitoramento. (LEÓN, 2015).
- Módulo 7-3: Explora a modelagem orientada a objetos. São definidas as *Common Data Classes* (CDC) e os atributos de dados de um LN. As classes definidas são apresentadas na norma e possuem especificações como: nome da classe, atributo da classe, serviço de comunicação que suportam (os *Functional Constraint* (FC)), as condições da presença de cada atributo (se Obrigatório-M ou Opcional-O), entre outras.
- Módulo 7-4: Une os resultados das três subdivisões anteriores e padroniza os nomes e os atributos de diversos LN que representam as funções mais comuns do SAS. Tudo isso é descrito em forma de tabelas que apresentam as informações que devem estar contidas, de forma obrigatória ou não, nas instâncias disponibilizadas pelos IEDs por meio da ACSI.

Com o modelo de comunicação estabelecido, é feita sua associação a protocolos de comunicação que podem ser utilizados.

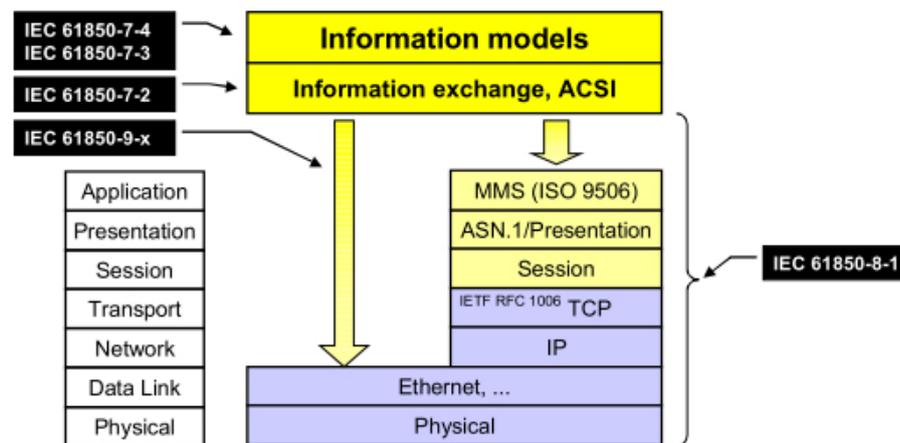
O oitavo módulo descreve o mapeamento por meio do protocolo MMS dos serviços que utilizam uma pilha de sete camadas de comunicação. O mapeamento é chamado de (*Specific Communication Service Mapping* (SCSM)). No mesmo módulo é apresentado o protocolo GOOSE, utilizado para comunicações mais rápidas, pois utiliza uma pilha de comunicação reduzida com padrão *Ethernet*.

O nono módulo descreve o protocolo SV, que é baseado no padrão *Ethernet* para transmissão de valores digitais de grandezas elétricas por meio do barramento de processos de uma subestação.

Por fim, o décimo módulo apresenta os testes de conformidade, que são testes que

devem ser feitos para determinar se o dispositivo se adequa ao padrão estabelecido na norma. Na Figura 3 são representados os mapeamentos feitos em uma pilha com sete camadas de protocolos de rede. A comunicação cliente/servidor promovida pelo protocolo MMS é feita na camada de aplicação. Os protocolos GOOSE e SV, que utilizam padrão *Ethernet*, estão mapeados na camada de enlace (*Data link*).

Figura 3 – Exemplo de mapeamento ASCII nas camadas dos protocolos de rede de computadores.



Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003)

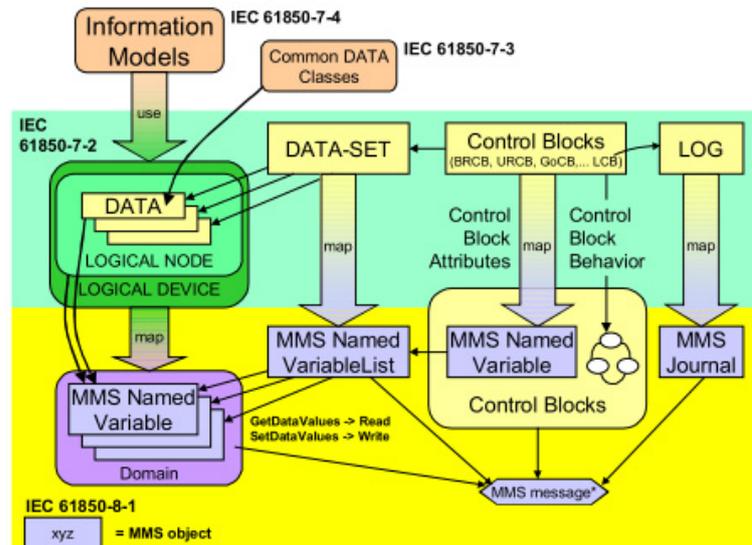
### 2.1.2 Modelo de representação da informação

Seguindo o padrão da IEC 61850, cada *Physical Device* (PD) é equivalente a um IED, ou seja, um dispositivo físico. Os PD representam *hardwares* que desempenham funções de proteção e/ou automação de uma subestação. Sua conexão é feita fisicamente a um barramento de dados, mais comumente a um barramento do tipo TCP/IP por meio de conexão *Ethernet*.

Na Figura 4 são apresentados os elementos que compõem uma ACSI acompanhados de uma legenda que mostra a subdivisão do módulo 7 da norma. A estrutura interna de um PD é composta por um ou mais LDs, que podem estar associados a diversas funções do IED, como proteção, lógica de atuação, entre outras. Um LD é composto por instâncias de dados menores, os LNs. Cada LD deve possuir, no mínimo, três LNs: o nó LLN0 (nó essencial, que é responsável pelo registro de mensagens GOOSE, *DataSets* e relatórios); o nó LPHD, que possui o registro das características físicas do dispositivo; e um outro nó qualquer. Cada LD possui serviços como as mensagens GOOSE, MMS e SV, que estão associadas diretamente ao nó LLN0. Os LN são subfunções do dispositivos 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 nós lógicos que podem representar dispositivos físicos, como um disjuntor (XCBR), um transformador de corrente (TCTR) e um transformador de potencial (TVTR).

Figura 4 – Modelo de dados da ACSI de um IED.



Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003)

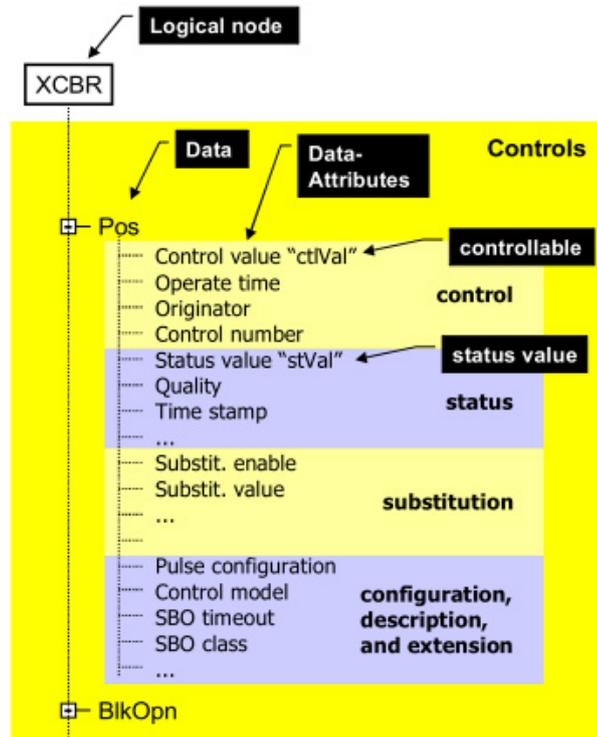
O modelo de dados definido pela ACSI é baseado no paradigma de orientação a objetos. Dessa forma, dentro de cada LN são encontrados componentes chamados de *Data*, ou dados, que representam instâncias de informação com atributos e pertencem a uma determinada CDC. Como exemplo, o LN XCBR de disjuntor possui um dado que é a posição dos seus contatos, chamado de *Pos* (abreviação do termo em inglês *position*). O dado *Pos*, por sua vez, pertence à CDC denominada de *Controllable Double Point (DPC)*, que é uma classe comum que fornece a informação da situação de condições que podem ser controladas, como o estado de disjuntor (aberto ou fechado) (IEC 61850-7-3, 2003).

O dado mais interno de um LN é o atributo de seu dado, o *Data Attribute (DA)*, que representa a informação propriamente dita. Utilizando ainda o exemplo do disjuntor e do dado *Pos*, um de seus atributos é o *Status Value (stVal)*, cujo atributo pode vir a ser "aberto", "fechado", "estado intermediário" ou "estado defeituoso", o que indica a condição do disjuntor (IEC 61850-7-3, 2003). Na Figura 5 é apresentado o nó XCBR e toda a árvore de informações contendo os dados e os atributos.

Um dado disponibilizado no padrão da norma IEC 61850 possui referência única, como visto na Figura 6. O PD, que é o IED, é identificado como SEL751; o LD é PRO, referindo-se a uma função de proteção assumida; o LN é o de *status* de disjuntor XCBR, também

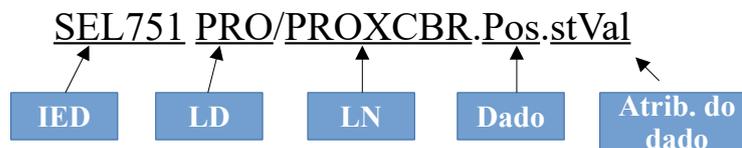
associado a uma função de proteção PRO; o dado enviado pela informação é o da posição do disjuntor Pos; e o atributo do dado é o stVal, que pode assumir diferentes valores, conforme citado anteriormente.

Figura 5 – Árvore de informações do LN XCBR apresentado no módulo 7 da norma IEC 61850.



Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003)

Figura 6 – Modelo de referência de uma informação com padrão IEC 61850.



Fonte: Próprio Autor.

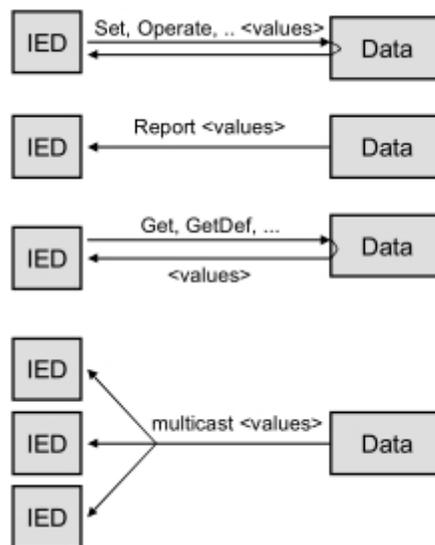
Por fim, destaca-se a possibilidade de se agrupar dados nos chamados *datasets*, permitindo ao projetista de um SAS criar conjuntos de dados DA e utilizá-los, por exemplo, para criar relatórios de operação (*log*). O agrupamento de atributos precisa de uma importante informação sobre os dados, as restrições funcionais (FC). As FCs que determinam os serviços de comunicação que podem ser aplicados para acessar a informação contida nos DAs. As FCs

podem ser dos tipos: informação de *status* (ST), medidas (MX), controle (CO), configuração (CF), descrição (DC) e definição estendida (EX).

### 2.1.3 Modelo de Troca de Informações

Além de padronizar a informação, a IEC 61850 também define como deve ser feita a troca das informações entre os dispositivos. O modelo ACSI fornece os métodos para a troca de informações, como apresentado na Figura 7. Existem dois tipos de associação entre dispositivos: associação bidirecional (*Two Party Application Association* (TPAA)), que é feita por meio de mensagens MMS, e associação difusa *Multicast*, feita por meio de mensagens GOOSE ou SV. O primeiro é conhecido como associação Cliente-Servidor e o segundo como associação Editor-Assinante. O TPAA é utilizado em serviços que necessitam de uma conexão entre as instâncias envolvidas (serviços de supervisão, configuração, etc.) e o *multicast* é utilizado na troca unidirecional de dados entre a fonte (editor) e os vários destinos (assinantes) (LEÓN, 2015).

Figura 7 – Modelo para troca de informação entre dispositivos com padrão IEC 61850.

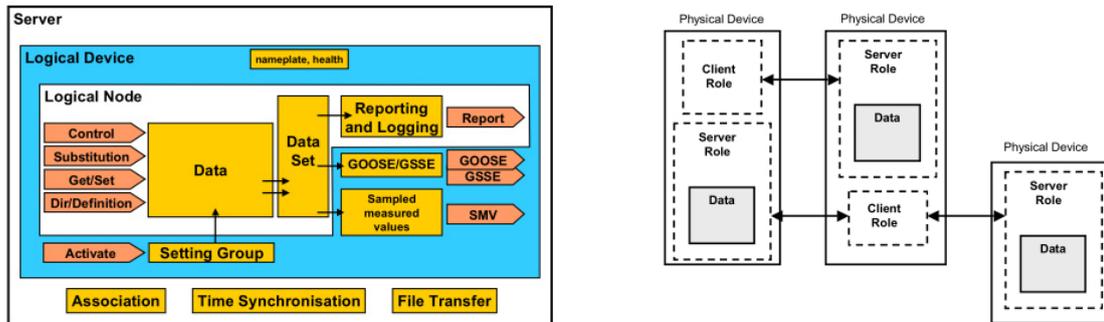


Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003)

A funcionalidade de servidor em um dispositivo permite o fornecimento de diversos serviços, como mostrado na Figura 8 a). Os serviços estão divididos em três modelos: 1- Associação, que possui mecanismos para estabelecer e manter uma conexão entre dois dispositivos; 2- Sincronização de tempo para serviços como envio de *reports*; 3- Transferência de arquivos, dentre os quais se utiliza os protocolos MMS, GOOSE, *Generic Substation Status Event* (GSSE),

SV. A funcionalidade servidor permite serviços como requisitar/receber dados e confirmar o estabelecimento de uma conexão. Como apresentado na Figura 8 b), um PD pode possuir tanto as funcionalidades cliente quanto servidor.

Figura 8 – Funcionalidades Cliente-Servidor da norma IEC 61850.



a) Pilha de funcionalidades de um servidor. b) PD com funcionalidades cliente e servidor.

Fonte: (IEC 61850-7-1, 2003).

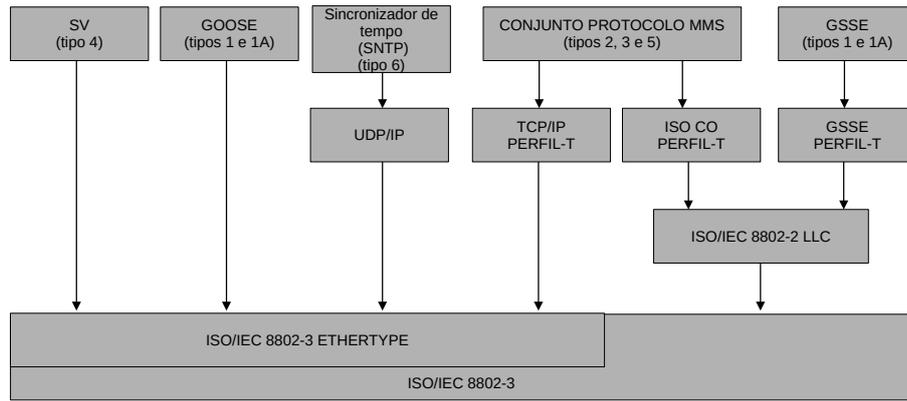
O serviço *Get/Set-Operate* visto na Figura 7 é disponibilizado por um servidor e possibilita a aquisição (*Get*) e a alteração ou o comando de um dispositivo *Set-Operate*. Também destaca-se o serviço de *reports*, que são relatórios gerados e enviados como pacotes de informações quando algum item de um *dataset* é alterado.

### 2.1.4 Protocolos de Comunicação

O objetivo de interoperabilidade é alcançado quando dois ou mais IEDs, de mesmo ou diferentes fabricantes, trocam informações e as usam para a correta execução de funções específicas. Para se alcançar a interoperabilidade entre dispositivos, a IEC 61850 utiliza protocolos de comunicação de diferentes tipos e finalidades, obedecendo a outras normas de comunicação de dados, como é o caso da que estabelece o padrão para comunicações *ethernet*, conforme apresentado na Figura 9. Os tipos dos protocolos são mapeados como segue:

- Tipo 1: mensagem com velocidade rápida de transferência;
- Tipo 1A: sinal de *trip*;
- Tipo 2: velocidade média para transferência da mensagem;
- Tipo 3: velocidade baixa para transferência da mensagem;
- Tipo 4: mensagem bruta ou não processada;
- Tipo 5: função de transferência de arquivos;
- Tipo 6: mensagens de sincronização de tempo.

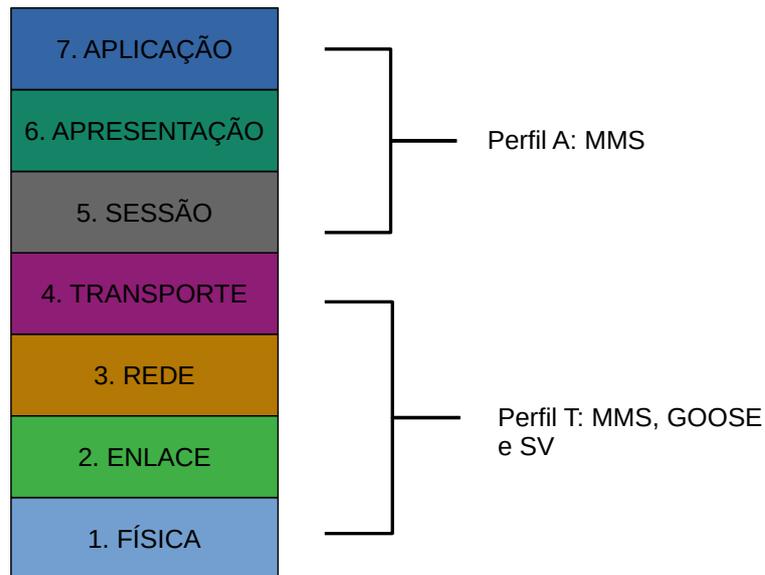
Figura 9 – Visão geral dos protocolos e seus tipos.



Fonte: Adaptado de (IEC 61850-8-1, 2003)

A IEC 61850 utiliza como modelo de comunicação o padrão da pilha *Open System Interconnection* (OSI), que é subdividido em dois grupos, o **Perfil-A** e o **Perfil-T** (LEÓN, 2015), como mostrado na Figura 10. O primeiro contém os protocolos que podem utilizar as três camadas superiores do modelo OSI (Aplicação, Apresentação e Sessão), enquanto o Perfil-T pode-se utilizar apenas das quatro primeiras camadas (Transporte, Rede, Enlace e Física). O protocolo MMS, por exemplo, está associado com as camadas do Perfil-A e do Perfil-T, enquanto os protocolos GOOSE e SV podem utilizar apenas os protocolos do Perfil-T, mas não necessariamente de todas as camadas (IEC 61850-8-1, 2003). A seguir, são abordados os princípios de três protocolos definidos na IEC 61850: MMS, GOOSE e SV.

Figura 10 – Camadas OSI de comunicação e perfis IEC 61850.

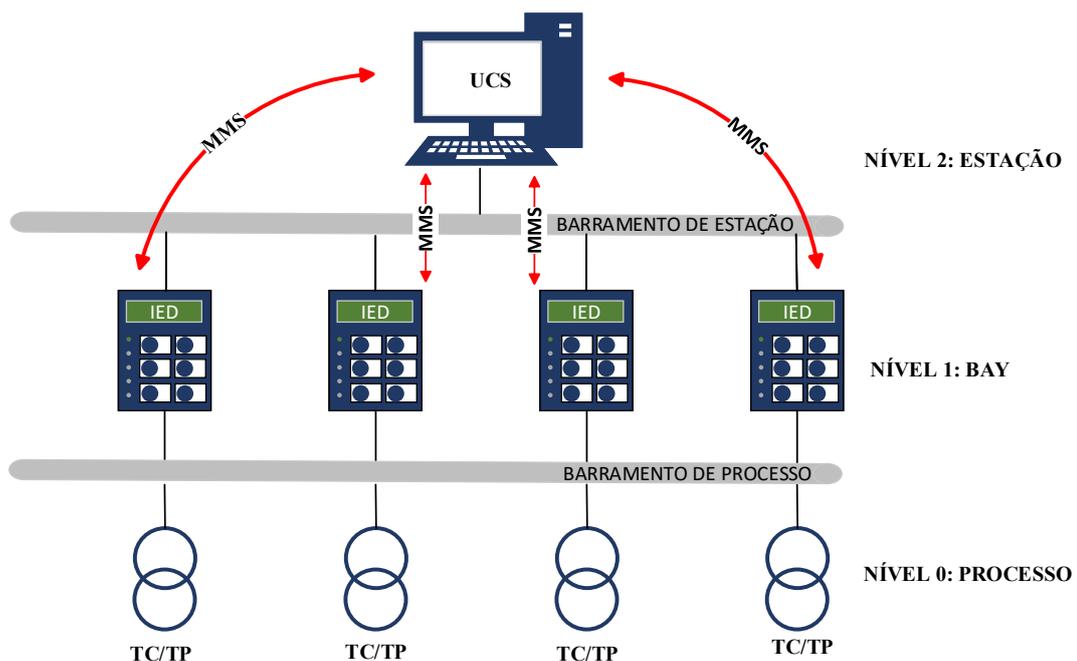


Fonte: Próprio autor.

### 2.1.4.1 MMS

O protocolo MMS está presente na camada de aplicação do modelo OSI e foi 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. 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 ACSI é mapeado no protocolo MMS a fim de que os dispositivos possam ter um padrão de envio e aquisição de dados (MELO, 2015). Na Figura 11 é ilustrada a comunicação vertical via mensagens MMS entre vários IEDs no nível de *Bay* de uma subestação e a Unidade de Controle de Subestação (UCS) no nível de estação.

Figura 11 – Comunicação vertical MMS.



Fonte: Próprio Autor.

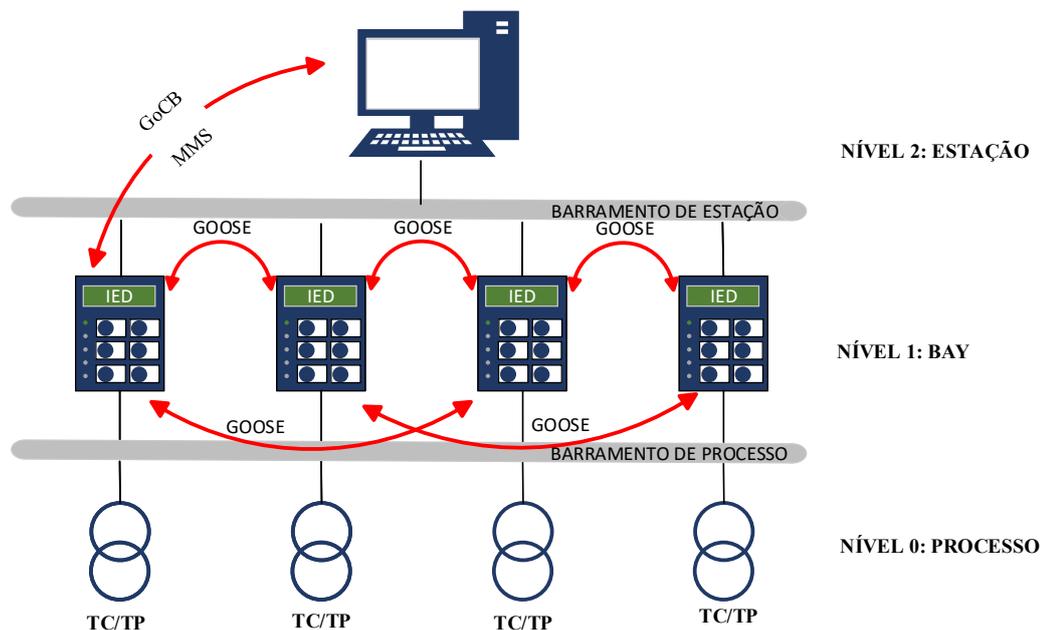
O serviço *Get* citado na seção 2.1.3 utilizado pelo MMS é um tipo de operação *pooling*, ou seja, os valores são capturados pelo sistema SCADA por meio de buscas periódicas. Entretanto, o *pooling* pode não ser a estratégia mais eficiente para supervisionar alguma grandeza elétrica. Por isso, existe a coleta ou envio de dados pelos IEDs sob demanda, na qual dados digitais são enviados quando mudarem de estado e dados analógicos são enviados quando a grandeza ultrapassar uma faixa de valores, chamada de banda morta. A supervisão é feita por

meio de relatórios, ou *reports*. Nos *reports* são enviadas as informações relacionadas a um determinado *dataset*. Por ser um protocolo que necessita de mais tempo para a sua comunicação, o MMS não é utilizado para enviar dados em que tempos muito pequenos são requisitos. A necessidade de mais tempo para comunicação utilizando o protocolo MMS é devido a sua prioridade em estabelecer conexões e diminuir a possibilidade de erros no envio da informação.

#### 2.1.4.2 GOOSE

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. As mensagens GOOSE seguem uma arquitetura Editor-Assinante e são trocadas em uma espécie de comunicação horizontal entre os dispositivos. Na Figura 12 é visto de forma geral a comunicação feita via mensagens GOOSE entre IEDs no nível de *Bay* de uma subestação.

Figura 12 – Comunicação horizontal GOOSE.



Fonte: Próprio Autor.

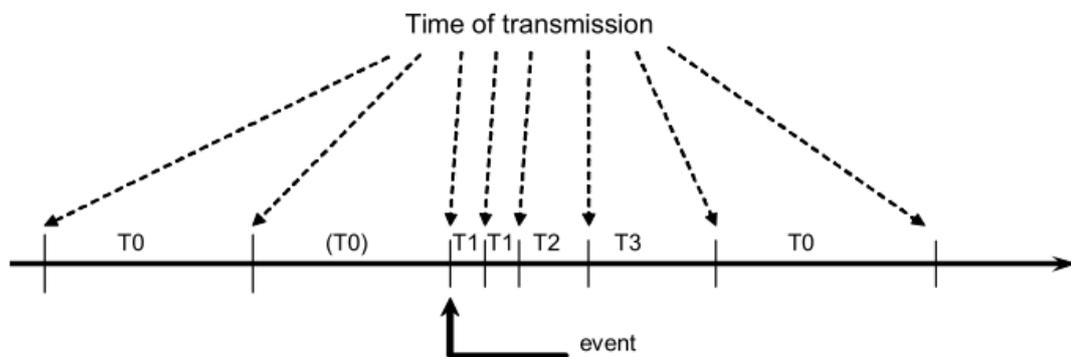
A rapidez necessária na transmissão de mensagens GOOSE se dá pelo motivo de seus dados levarem informações relacionadas à proteção da subestação. Por conta disso, o protocolo GOOSE está associado à camada de enlace do modelo OSI. O assinante da mensagem deve conhecer algumas características da mensagem que assina, como o endereço *Media Access Control* (MAC) da máquina do editor e a identificação da mensagem. As mensagens são enviadas

no barramento de dados de forma *multicast/broadcast*, ou seja, todos os dispositivos conectados à rede podem receber as mensagens, porém, somente quem for assinante é que, de fato, irá se utilizar dessas mensagens (MELO, 2015).

Devido o fato de o protocolo GOOSE estar na camada de enlace, não há estabelecimento de comunicação entre dispositivos editor e assinante e, portanto, não há garantias de que a mensagem chegou ao destino. Para solucionar esse problema, todas as mensagens GOOSE possuem o parâmetro chamado **tempo máximo**, ou *Time Allowed to Live*, que indica o tempo em condições normais de operação que o assinante deve esperar desde o recebimento de uma mensagem até a chegada da mensagem seguinte. Caso algum assinante não receba uma mensagem no tempo máximo, a falha de comunicação deve ser indicada.

Em casos de ocorrência de eventos que alterem algum dado associado à mensagem GOOSE, o tempo entre duas mensagens sucessivas diminui e volta a aumentar gradativamente até atingir novamente o tempo máximo. Na Figura 13 é ilustrado o envio das mensagens GOOSE em situação normal de operação e em caso de algum evento.

Figura 13 – Retransmissão de mensagens GOOSE.



T0: tempo de retransmissão em condições estáveis;  
 (T0): tempo de retransmissão antes da ocorrência de um evento e que pode ser encurtado;  
 T1: menor tempo de retransmissão;  
 T2, T3: tempos de retransmissão que retornam gradualmente até o tempo máximo.

Fonte: Adaptado de IEC 61850-8-1 (2003).

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros que compõem uma mensagem GOOSE. Além do valor dos dados propriamente ditos, alguns parâmetros servem para identificar a mensagem, seu *dataset* e sua referência. Os parâmetros são os vistos pelo assinante e também por algum analisador de tráfego de rede.

É importante ressaltar a existência dos *GOOSE Control Block (GoCB)*, ou blocos de controle GOOSE, os quais enviam e recebem informações no barramento de rede de forma diferente das mensagens GOOSE. Os GoCB são estruturas que possuem diversos parâmetros,

Tabela 2 – Definição da mensagem GOOSE.

Nome do Parâmetro	Tipo do Parâmetro	Valor/alcance do valor/explicação
DataSet	ObjectReference	Valor da instância GoCB
AppID	Visible String65	Valor da instância GoCB
GoCBRef	ObjectReference	Valor da instância GoCB
T	EntryTime	-
StNum 61850-5	INT32U	-
SqNum	INT32U	-
Test	Booleano	(TRUE) teste   (FALSE) sem teste
ConfRev	INT32U	Valor da instância GoCB
NdsCom	Booleano	Valor da instância GoCB
Value	(*)	Dado propriamente dito

(\*): Depende do tipo comum de dados definido.

Fonte: Adaptado de IEC 61850-7-2 (2003).

dos quais alguns são idênticos aos que são enviados na mensagem GOOSE, como apresentado na Tabela 4. GoCBs são responsáveis por coordenar todo o procedimento da comunicação e enviar alguns atributos com propriedade somente de leitura ou de leitura e escrita. Os GoCB são mapeados no protocolo MMS e seus parâmetros são acessados pelo modelo Cliente-Servidor, ou seja, uma conexão vertical, como pode ser visto a Figura 12 (IEC 61850-8-1, 2003). Uma das funções dos GoCBs é, por exemplo, permitir que um cliente habilite em um servidor o envio de mensagens GOOSE, como é feito com a função GoEna. A cada GoCB deve estar associado um *dataset* pré-definido. Uma das vantagens de se trabalhar com GoCBs é a possibilidade de um cliente (que pode ser um supervisor), durante o funcionamento normal de uma subestação, habilitar/desabilitar remotamente o envio de mensagens GOOSE de um IED servidor para se adequar a uma outra forma de operação.

Tabela 3 – Parâmetros do Bloco de Controle GOOSE mapeado em MMS.

Nome do Componente	Descrição do tipo MMS	Leitura(L)/Escrita(E)
GoEna	Booleano	LE
GoID	Visible string	L
DataSet	Visible string	L
ConfRev	INT32U	L
NdsCom	Booleano	L
DstAdress	(*)	L

(\*): Depende da instância pertencente a esse parâmetro.

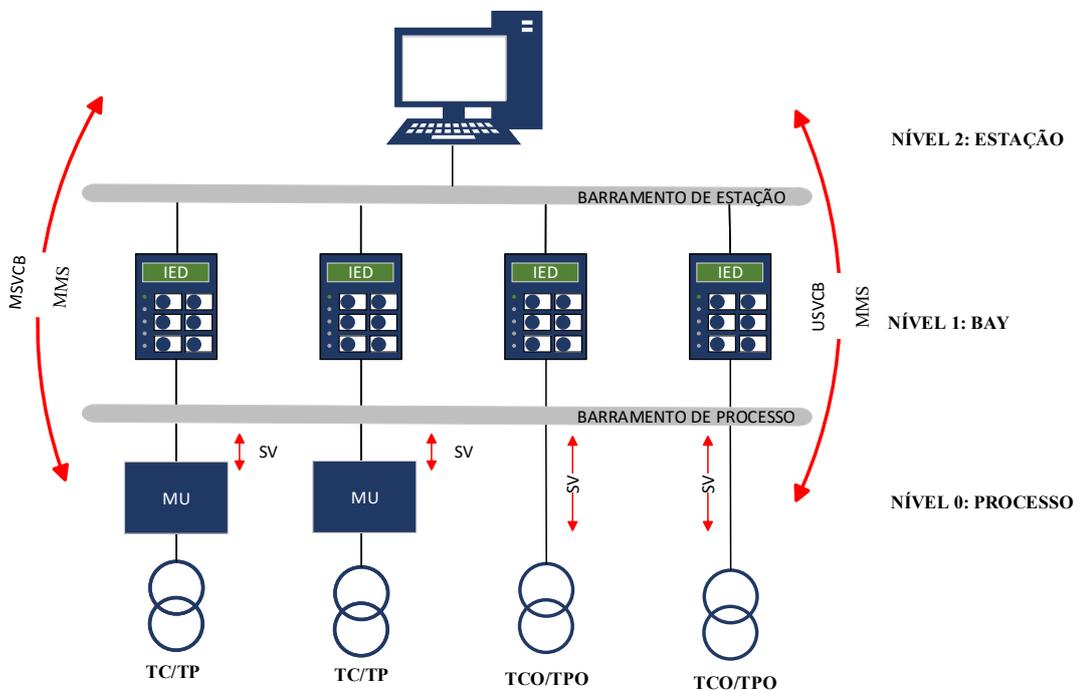
Fonte: Adaptado de IEC 61850-8-1 (2003).

### 2.1.4.3 SV

O SV, que tem sua comunicação ilustrada na Figura 14, é detalhado nos módulos 9-1 e 9-2 da IEC 61850. Por meio do protocolo SV é feito o envio de amostras de sinais analógicos

de tensão e/ou corrente elétricas. Há diferenças de implementação do protocolo apresentado nos dois módulos. O 9-1 aborda uma comunicação entre nível de *bay* e o nível de processo de forma serial unidirecional em um *link* ponto a ponto (IEC 61850-9-1, 2004). O módulo 9-2, por sua vez, não aborda a comunicação ponto a ponto, mas trata da comunicação de dados enviados ao barramento de processo. O módulo 9-2 aumenta as possibilidades da comunicação em relação ao O módulo 9-1, sendo uma evolução da comunicação por SV. Além de possuir um padrão mais exigente no que diz respeito aos requisitos de taxa de amostragem, o segundo módulo possui suporte para se trabalhar com mais de um *dataset* e definir a comunicação entre vãos da subestação e as aplicações de sincronização de tempo (IEC 61850-9-2, 2004).

Figura 14 – Comunicação SV no padrão IEC 61850-9-2.



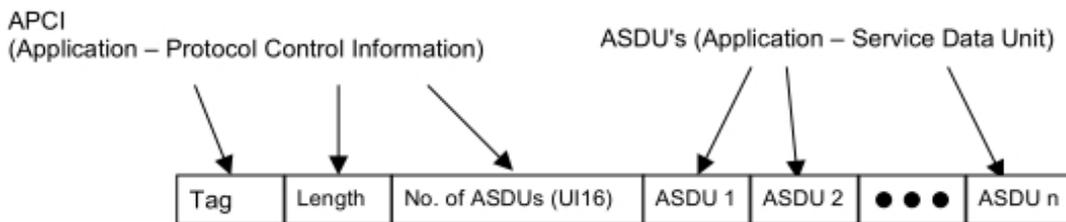
Fonte: Próprio Autor.

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*. Na Figura 14 é ilustrada a comunicação por mensagens SV padrão IEC 61850-9-2. Para que o protocolo SV seja aplicado, é necessário que sejam feitas adequações no nível 0 das subestações para se obter sinais digitalizados no barramento de processo. A digitalização dos dados pode ser feita por meio de dispositivos chamados *Merging Unit* (MU). De forma geral, as MUs 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 Óptico (TCO) e Transformador de Potencial Óptico (TPO), que são equipamentos elétricos que possuem um conversor Analógico/Digital (A/D) embutido no seu corpo físico e enviam os sinais ao barramento de processo por meio de fibra ótica.

A estrutura básica de dados é chamada de *Application Service Data Unit* (ASDU), que contém os dados amostrados e outras informações, como a identificação da mensagem (svID) e um contador de amostras (smpCnt), muito importante para a sincronização. Mais de um ASDU pode ser alocada em uma unidade chamada de *Application Protocol Data Unit* (APDU), que contém também outras informações necessárias no envio das mensagens SV, como se observa na Figura 15. Uma única unidade APDU pode ser armazenada nos *buffers* de transmissão ou de recepção da mensagem.

Figura 15 – Estrutura de um APDU.



Fonte: (IEC 61850-9-2, 2004)

Para que SVs sejam enviadas via *ethernet*, as mensagens são codificadas de acordo com a norma ISO/IEC 8802-3 em um *frame* com formato baseado na linguagem de descrição ASN.1. No *frame*, a APDU fica em uma região chamada *Ethertype Protocol Data Unit* (PDU), que também possui os dados de identificação da aplicação. Na Figura 16 são apresentados todos os parâmetros de uma PDU capturada pelo analisador de rede *Wireshark*. A transmissão das mensagens SV pode ser feita pelos métodos *Unicast* ou *Multicast*.

Figura 16 – PDU capturada por um analisador de rede.

```

IEC61850 Sampled Values
  APPID: 0x4000
  Length: 105
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  savPdu
    noASDU: 2
    seqASDU: 2 items
      ASDU
        svID: svpub1
        smpCnt: 80
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)
        seqData: c1f06ab2c2dba275430413f061c51d1594395800
      ASDU
        svID: svpub2
        smpCnt: 80
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)
        seqData: c2808669c39e82a243bea42761c51d1594395800
  
```

Fonte: Próprio Autor.

Apesar dos avanços da IEC 61850 9-2, o módulo não especificou detalhes de aplicação, como taxa de amostragem e outros. Dessa forma, a *UCA - International Users Group*, uma corporação sem fins lucrativos com foco em dar assistência a usuários e vendedores de equipamentos industriais, lançou um guia para implementação da IEC 61850-9-2 (UCA, 2004), conhecida como IEC 61850-9-2 *Light Edition*. Na *Light Edition*, apesar de não ser um documento da IEC, são especificadas taxas de amostragem de sinais elétricos de 80 amostras por ciclo para aplicações de proteção e 256 amostras por ciclo para aplicações de medição. Desta forma, para uma aplicação em que um sinal tenha frequência de 60 Hz, tem-se taxas de amostragem de 4.800 amostras por segundo e 15.360 amostras por segundo para proteção e medição, respectivamente. No ano de 2016, foi lançada a norma IEC 61869-9, a qual segue algumas especificações da *Light Edition* e trata com mais detalhes e especificações sobre o pacote de dados SV, quantidade de ASDUs e taxa de amostragem (IEC 61869-9, 2016). A IEC 61869-9 estabelece uma preferência para uma taxa de amostragem de 4.800 amostras por segundo em aplicações de proteção, independentemente da frequência do sinal analógico, quando o equipamento (TC ou MU) possui dois ASDUs.

Como pode ser visto na Figura 14, o módulo 9-2 da IEC 61850 permite que se trabalhe com blocos de controle que, a depender do método de transmissão das mensagens, pode ser chamado de: *Multicast Sampled Values Control Block (MSVCB)* ou *Unicast Sampled Values Control Block (USVCB)*. O funcionamento desses blocos é semelhante ao exposto na subseção 2.1.4.2 para as mensagens GOOSE, pois se trata de uma comunicação Cliente-Servidor. Na Tabela 4 é apresentada a definição das classes MSVCB e USVCB.

Tabela 4 – Parâmetros do Bloco de Controle SV, Muticast(M) ou Unicast (U), mapeado em MMS.

Nome do Componente MMS	Tipo MMS	Leitura(L)/Escrita(E)	Comentário
MsvCBNam/UsvCBNam	ObjectName	L	Nome do bloco
MsvCBRef/UsvCBRef	ObjectReference	L	referência do bloco
SvEna	Booleano	LE	TRUE=habilita   False=desabilita
MsvID/UsvID	Visible-string	L	identificação do bloco
DatSet	ObjectReference	L	<i>dataset</i> utilizado
ConfRev	Inteiro	L	revisão das mensagens
SmpRate	Inteiro	L	amostras por período
OptFlds	-	-	dados opcionais

Fonte: Adaptado de IEC 61850-9-2 (2004)

### 2.1.5 Linguagem SCL

É importante destacar que a SCL é a linguagem de programação dos arquivos fornecidos pelos dispositivos utilizados na comunicação nas subestações. A SCL é baseada em XML e é utilizada por arquivos de diferentes extensões, que são apresentadas a seguir (IEC 61850-6, 2004):

- *IED Capability Description (ICD)*: Arquivo gerado para troca de dados da ferramenta de configuração do IED para a ferramenta de configuração do sistema. O arquivo de ICD descreve de maneira genérica todas as capacidades de um IED, incluindo todos os seus LN. Este arquivo pode conter uma seção opcional da subestação, à qual são vinculadas as instâncias definidas;
- *System Specification Description (.SSD)*: Arquivo gerado para troca de dados da ferramenta de especificação do sistema para a ferramenta de configuração do sistema. É o arquivo que descreve o diagrama unifilar da subestação e os nós lógicos requeridos.
- *Substation Configuration Description (SCD)*: Arquivo gerado para troca de dados da ferramenta de configuração do sistema para a ferramenta de configuração dos IEDs. Contém todos os IEDs, uma seção de configuração da comunicação e uma seção de descrição da subestação.
- *CID*: Arquivo gerado pela ferramenta de configuração de um IED e enviado ao próprio IED para a sua configuração. O arquivo .CID descreve uma única instância de IED dentro de um projeto e define quais as informações, dentre as possibilidades da sua pré-configuração, que serão disponibilizadas na rede. É o arquivo resultado da parametrização das funções de comunicação do IED.

## 2.2 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

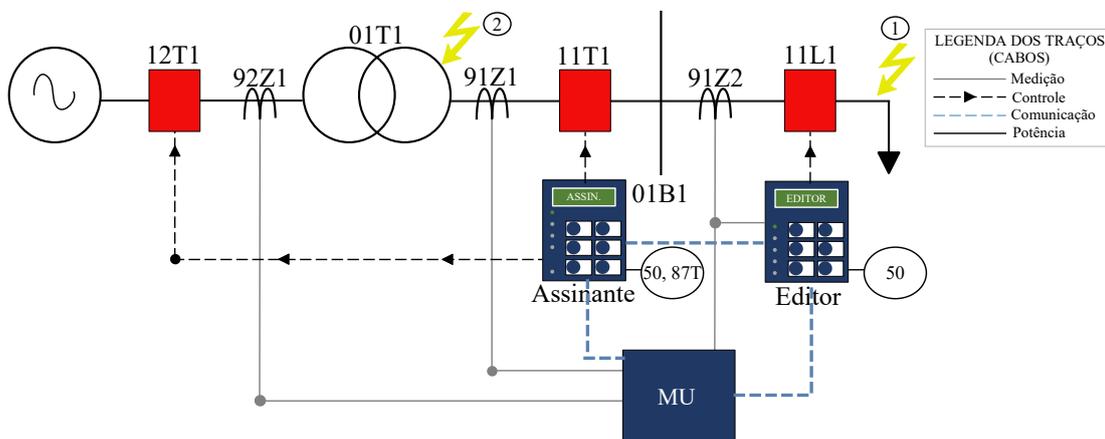
As funções de proteção de subestações são de suma importância para garantir a segurança do SEP, pois visam impedir que equipamentos sejam danificados e diversos danos sejam causados. A cada função de proteção, assim como definidas pelo ANSI, está associado um número, por exemplo, a função 67 indica a sobrecorrente direcional. Os IEDs são construídos para comportarem diversas funções, de acordo com a sua aplicação: proteção de transformador, proteção de linha, proteção de barra, etc.

É importante destacar que a utilização da IEC 61850 no SAS pode aumentar a eficiência e a confiabilidade de funções de proteção, pois, a informação digital, no caso de dados enviados via fibra ótica, não é alterada por interferências eletromagnéticas. Equipamentos como os TCOs possuem aspectos construtivos que os tornam mais robustos e menos suscetíveis a falhas e erros de medição, principalmente por utilizarem fibra ótica e serem imunes a diversos distúrbios eletromagnéticos. Porém, ainda existe um fator que associa erro no processo de medição das correntes: as reamostragens em IEDs não que não tem suporte para mensagens SV. São feitas 80 amostras por ciclo nas MUs para sistemas de proteção e as amostras sofrem uma segunda amostragem por parte dos IEDs, que é reduzida a 24 ou 48 amostras por ciclo, pois é necessário que seus dispositivos possam trabalhar com o sistema convencional de medição das subestações. Com a consolidação das subestações digitais e a adaptação de IEDs para receber mensagens SV, ou seja, sinais já discretos no tempo, a tendência é que não exista mais reamostragem. De qualquer forma, a utilização da IEC 61850 (mais especificamente, do protocolo SV) diminui consideravelmente o erro e proporciona melhores condições para a atuação das funções de proteção.

### 2.3 Funções ANSI 50, 87T e a Seletividade Lógica

A seguir são exploradas duas funções ANSI, a 50 e 87T, e a seletividade lógica de IEDs diante da ocorrência de uma falta que sensibilize a proteção 50 de dois IEDs próximos. Os LN citados tomam como base a estrutura da norma IEC 61850. Na Figura 17 é apresentado o diagrama geral que é utilizado para explicar as funções supracitadas. Os IEDs são considerados como tendo suporte para a IEC 61850.

Figura 17 – Diagrama geral.



Fonte: Próprio Autor.

### 2.3.1 *Proteção Instantânea de Sobrecorrente: ANSI 50*

A função de proteção ANSI 50 tem como denominação relé de sobrecorrente instantânea. Como o próprio nome já sugere, trata-se de um dispositivo que atua para correntes maiores que as ajustadas pelo operador após estudo de proteção e parametrização. Os relés com a função 50 são dispositivos que monitoram o sistema a partir de leitura das correntes e as comparam com as correntes pré-ajustadas. Ocorrendo alguma anomalia no sistema, de modo que as correntes ultrapassem o valor das correntes de ajuste, o relé atua. O tempo de atuação dos relés com a função deve ser, idealmente, instantâneo (KINDERMANN, 2005).

No que diz respeito aos IEDs padrão IEC 61850, existe a comunicação entre dispositivos conectados em uma LAN, de forma digital e com a linguagem definida e estruturada da norma. No caso do diagrama da Figura 17, quando da ocorrência da falta no local 1 que sensibilize a função de proteção 50, 91Z2 envia o valor da corrente analógica à MU, que por sua vez digitaliza o sinal. A MU envia os dados de corrente por meio de mensagens SV ao IED nomeado como Editor, e seu nó PIOC fica com valor lógico VERDADEIRO. No mesmo instante, o Editor leva o valor do seu nó *trip* para VERDADEIRO e envia o comando de abertura do disjuntor 11L1. Ao abrir, 11L1 elimina a falta. Após a abertura de 11L1, o valor de corrente enviado ao Editor tem valor nulo e, dessa forma, os valores dos nós PIOC e *trip* passarão a ser FALSO. Assim, a falta é eliminada.

### 2.3.2 *Seletividade Lógica*

A seletividade lógica torna-se necessária para casos de ocorrência de faltas capazes de sensibilizar a proteção instantânea de dois IEDs próximos. Quando a seletividade lógica não está configurada, uma falta como a descrita anteriormente acarretaria a abertura de mais disjuntores do que o necessário, desenergizando partes do sistema que estão sãs. Entretanto, com a seletividade lógica, a função 50 do IED mais próximo à falta atua, comanda a abertura do disjuntor ao qual está associado e o IED mais próximo, por meio da função seletividade lógica, envia mensagem GOOSE ou sinal elétrico para função seletividade lógica do IED de retaguarda realizar o bloqueio da função 50, evitando assim a descoordenação entre os dois IEDs de proteção.

Considerando a ocorrência de falta no local 1, como visto na Figura 17, o IED chamado de Editor é quem deve enviar o sinal de abertura para 11L1. Porém, como os IEDs estão

muito próximos, o Assinante tenderia a enviar o sinal de abertura para 11T1. Com a seletividade lógica projetada, entretanto, ao perceber que o LN PIOC do Editor possui valor VERDADEIRO, o assinante não atua, mesmo que sua função proteção instantânea de sobrecorrente seja sensibilizada. O Assinante espera um tempo pré-definido pelo projetista para que a falta seja eliminada. Isso ocorrendo, o Assinante não envia o sinal de abertura para 11T1 e somente o trecho em que ocorreu a falta é desenergizado.

Em caso de falha de disjuntor, ou seja, o Editor envia o sinal de abertura a 11L1, mas o disjuntor não obedece o comando, é necessário que haja a configuração de um terceiro nó, o de falha de disjuntor RBRF. Após enviar o sinal de *trip*, o Editor inicia uma contagem de tempo e, caso se supere o tempo pré-definido pelo projetista para atuação do disjuntor, o valor lógico de RBRF deve ir a VERDADEIRO. Sendo RBRF VERDADEIRO enviado pelo Editor percebido pelo Assinante, que inicialmente teve sua função 50 bloqueada, o Assinante envia um sinal de *trip* a 11T1 para que abra, eliminando, assim, a falta.

### 2.3.3 *Proteção Diferencial de Transformador: ANSI 87T*

A proteção diferencial tem como objetivo proteger algum equipamento ou componente do sistema elétrico. Seu princípio básico de funcionamento é a comparação entre as correntes de entrada e de saída em um setor determinado que pode compreender, por exemplo, transformadores, motores e barras. A função 87T é a função diferencial que visa proteger transformadores contra faltas internas, isto é, nos componentes que fazem parte de sua construção, e tem como distintivos em relação a outras funções diferenciais a necessidade de cálculo de relação de transformação e de defasagem angular. Quando as correntes de entrada e saída de um determinado setor são diferentes, considerando-as em um mesmo referencial, há a atuação do dispositivo de proteção. As correntes calculadas para proteção diferencial são apresentadas nas equações 2.1 e 2.2. A corrente de operação,  $I_{dif}$ , leva a atuação quando há diferença das correntes de entrada e saída. A corrente de restrição,  $I_{rest}$ , garante que falhas externas ao transformador não levem a atuação da proteção. A corrente de operação normalizada em relação a corrente nominal do sistema é apresentada na equação 2.3 (KINDERMANN, 2006).

$$I_{dif} = I_1 - I_2[A], \quad (2.1)$$

$$I_{rest} = \frac{|I_1 + I_2'|}{2} [A], \quad (2.2)$$

$$I_{ds} = \frac{I_{dif}}{I_{n1}} \times 100 [\%], \quad (2.3)$$

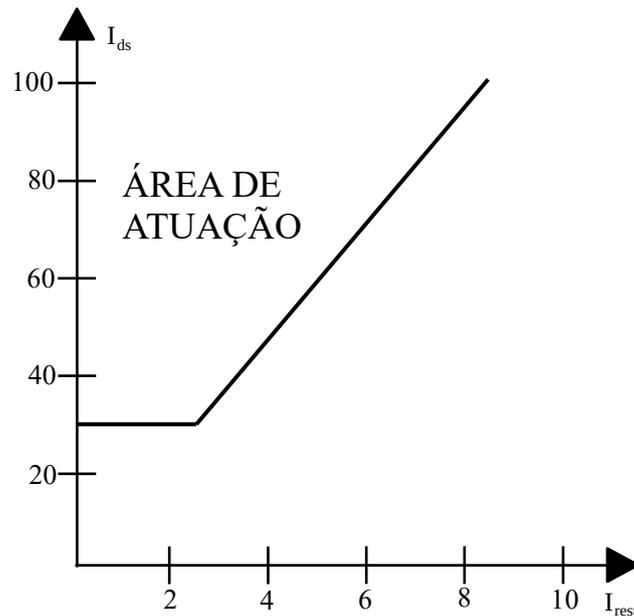
em que:

- $I_{dif}$  é a corrente diferencial;
- $I_{ds}$  é a corrente diferencial normalizada em relação à corrente nominal;
- $I_{rest}$  é a corrente de restrição;
- $I_1$  é a corrente nominal do lado de alta do transformador;
- $I_2'$  é a corrente nominal do lado de baixa do transformador refletida no primário;
- $I_{n1}$  é a corrente nominal do sistema.

As correntes de operação e de restrição se relacionam por uma constante "a" chamada de declividade, como apresentado na equação 2.4 (KINDERMANN, 2006). A curva da função 87T é apresentada na Figura 18. O início da curva possui inclinação nula com um valor inicial de  $I_{ds}$  que deve ser ajustado, o qual se mantém contante até determinado valor de  $I_{rest}$ . O patamar definido para  $I_{ds}$  pode variar de acordo com as especificações do fabricante e com a aplicação. A partir de determinado valor para  $I_{rest}$ , de acordo com o projetado, a curva assume uma inclinação, cujo ângulo é dado por  $\alpha = \arctg(a)$ . Para transformadores de potência a declividade pode ficar na faixa de 10 a 45% e quanto maior for o seu valor, menor a sensibilidade do relé (KINDERMANN, 2006).

$$I_{dif} = aI_{rest}, \quad (2.4)$$

Figura 18 – Curva de proteção da Função 87T.



Fonte: Adaptado de SCHNEIDER ELECTRIC (2009).

No que diz respeito aos dispositivos digitais IEDs, a proteção é feita por meio de processamento computacional e cálculos matemáticos. No diagrama da Figura 17, as correntes medidas por 92Z1 e 91Z1 são enviadas à MU, que as converte em sinais digitais e as envia por meio de SV ao IED. O conceito abordado para os relés eletromecânicos das correntes  $I_{dif}$  e  $I_{rest}$  também são aplicados para questões de processamento de cálculos matemáticos e consequente envio de trip, embora a abordagem seja digital e não exista um êmbolo. Uma falta no local 2 da Figura 17 provocará a atuação do IED com a função 87T e a abertura de 12T1 e 11T1. Devido ao erro de leitura associado aos equipamentos de medição, as leituras não são ideais, devendo-se considerar em projeto a possibilidade de as correntes não serem iguais e ainda assim não existir falta. Portanto, há um limite maior que zero para a diferença das correntes de alta e de baixa do transformador numa mesma base.

## 2.4 Conclusão

Neste capítulo foram mostrados os principais conceitos relacionados à norma IEC 61850. Sua utilização tem aprimorado o SAS e ainda possibilita mais melhorias ao se avançar rumo às subestações totalmente digitais. A norma possibilitou a integração entre dispositivos de

diversos fabricantes ao padronizar a comunicação em subestações.

Sua utilização na proteção é de grande importância e funções de proteção, como a 50 e 87T, são implementadas utilizando os conceitos de nós, *datasets* e outros. Além disso, a utilização do padrão IEC 61850 facilita a aplicação da seletividade lógica ao trabalhar com os nós específicos da proteção 50 e possibilitar a eliminação de faltas em situações de falha de disjuntor.

### 3 CONCEITO E DESENVOLVIMENTO DO IED VIRTUAL

Este capítulo traz a definição do IED Virtual utilizado neste trabalho e detalha o processo de sua criação e os serviços que podem ser oferecidos por meio de suas funções. As funcionalidades apresentadas neste capítulo são validadas no capítulo 4 e aplicadas em testes de laboratório.

#### 3.1 IED Virtual

O dispositivo aqui definido como IED Virtual, o VIED, é componente essencial da Plataforma de Ensino proposta nesse trabalho. O VIED possibilita, como uma de suas principais características, a utilização de uma proteção de sistemas elétricos com estrutura baseada em *software*, conforme apresentado na seção 1.3 (HUNT *et al.*, 2019). Ao dizer que uma estrutura é baseada em *software*, faz-se oposição a uma estrutura de sistema baseado fortemente em *hardware*. A estrutura fortemente baseada em *hardware* não é, necessariamente, composta por e/ou unicamente de equipamentos de proteção eletromecânicos, podendo possuir IEDs microprocessados. Entretanto, o modelo baseado em *hardware* exige em muitos casos uma grande quantidade de dispositivos para proteger diversos setores de uma SE. Os sistemas baseados em *hardwares* com IEDs permitem determinado nível de flexibilidade diante da necessidade de mudanças, porém, diante de novas tecnologias de geração de energia e novos arranjos topológicos do sistema elétrico, pode ser necessária a troca desses diversos *hardwares* para rearranjo da proteção. A estrutura baseada em *software*, por outro, possibilita a redução da quantidade *hardwares* ao integrar as funções de proteção para os diversos setores de uma SE, isto é, há a possibilidade de vários IEDs protegendo diferentes setores de uma SE, porém, concentrados em uma quantidade reduzida de *hardwares*. A configuração de um sistema baseado em *software* pode proporcionar maior flexibilidade para modificação da topologia da proteção, variação e adaptação em tempo real das funções de proteção dos IEDs, e acesso remoto via aplicativos, o que torna mais prática e rápida a parametrização dos dispositivos para novas realidades que se configuram no sistema elétrico.

O dispositivo VIED permite reunir diversas funções de proteção em um único *hardware* e proteger diferentes *bays* ou setores de uma SE, reduzindo a quantidade de *hardwares* utilizados e facilitando as manutenções preventivas e corretivas. Nessa situação, é possível se trabalhar com um computador servidor centralizado com todas as funções de proteção de uma

SE. O VIED trabalha com mensagens digitais e, devido a sua característica de aplicativo de *software*, pode ser acessado remotamente, facilitando o trabalho de operadores e a coordenação de sistemas mais complexos. O dispositivo virtual, em um contexto de transição do atual modelo de informações analógicas para SEs digitais, possibilita testes em larga escala para novas configurações do SEP, de parametrizações, dentre outras aplicações, em um ambiente controlado de laboratório antes da aplicação em campo.

Apesar das vantagens, é necessário se ter cuidado com ataque cibernéticos, pois os dados que trafegam em redes de comunicação podem ser acessados por pessoas mal intencionadas. Um sistema robusto e protegido contra ataques cibernéticos aumenta a confiabilidade na oferta de serviços elétricos. Além disso, torna-se necessário projetar um sistema de redundância em situações em que toda a proteção de uma SE ou de um setor esteja agrupada em um único *hardware*. Em casos de sinistros, um *backup* disponível é vital para a continuidade dos serviços prestados.

O VIED padrão IEC 61850 proposto é capaz de se comunicar em uma LAN por meio dos protocolos definidos na norma (MMS, GOOSE e SV), bem como processar internamente as informações das grandezas elétricas para tomar decisão, como enviar comando de abertura de disjuntor, operar corretamente em uma seletividade lógica, dentre outras. Em uma subestação totalmente digital, VIEDs de proteção são essenciais para o bom funcionamento da SE.

Os VIEDs também apresentam vantagens acadêmicas, uma vez que são projetados para trabalhar com a IEC 61850 e conseguem se comunicar com IEDs físicos de diferentes fabricantes. Isso possibilita o treinamento de alunos para se habituarem tanto com as tecnologias mais utilizadas de IEDs atualmente, quanto com VIEDs baseados em aplicativos de *software*. Além disso, o desenvolvedor dos códigos de proteção terá bastante contato com os conceitos da norma, o que o ajudará entender mais profundamente conceitos que à primeira vista podem parecer muito abstratos. A seguir são apresentados o projeto libIEC61850, o processo de criação dos VIEDs utilizados neste trabalho e suas funcionalidades

### **3.1.1 libIEC61850**

O projeto libIEC61850 (ZILLGITH, 2021a) é uma biblioteca de código aberto que implementa os protocolos MMS, GOOSE e SV da norma IEC 61850. A biblioteca tem suporte para a comunicação Cliente-Servidor através do protocolo MMS, e Editor-Assinante através dos protocolos GOOSE e SV. A *Application Programming Interface* (API) foi escrita inicialmente

na linguagem de programação C, mas já possui algumas funções e serviços nas linguagens C# e Python (ZILLGITH, 2021d). Para este trabalho, foi utilizada a **versão 1.5 em C**, por ser esta a linguagem nativa e possuir todas as funcionalidades. A biblioteca funciona nos sistemas operacionais Microsoft, MacOS e *Linux*, sendo este último o escolhido para se trabalhar por ser um sistema operacional livre e que possui melhor suporte a desenvolvedores de *software*. Dentre os recursos da biblioteca, pode-se citar:

- Pilha completa de protocolos ISO sobre TCP/IP;
- Implementação estática do modelo IED pela geração de código C a partir do arquivo SCL;
- Criação dinâmica do modelo de IED por chamadas de API ou por arquivo de configuração;
- Serviço de associação (com autenticação de senha);
- Serviços de leitura e gravação para variáveis MMS simples e complexas;
- API de cliente e servidor IEC 61850;
- Serviço de relatórios com e sem *buffer*;
- Todos os modelos de controle IEC 61850 são suportados por servidor e cliente;
- Código de editor e assinante GOOSE que também pode ser usado de forma independente;
- Código de editor e assinante IEC 61850-9-2 SV que pode ser usado de forma independente;
- Ferramenta de conversão para traduzir arquivos SCL para modelos estáticos de IED;
- API de cliente C# para aplicativos executados em .NET e Mono pronto para a certificação UCA dos dispositivos da edição 1 e edição 2.

A biblioteca também fornece um conjunto de exemplos de implementação. Foram utilizados como base os exemplos de código computacional que tratam da simples comunicação entre dispositivos utilizando os protocolos da IEC 61850, realizando-se adaptações necessárias nos códigos para a sua adequação às funções de proteção e às comunicações exploradas neste trabalho. Existem aplicações que a biblioteca permite realizar que não foram abordados nesse trabalho, devido o objetivo de validação de funções simples de comunicação. Entretanto, funções mais elaboradas podem ser utilizadas, como autenticação de usuário por meio de senha, que torna-se necessária num contexto cada vez mais digital e diante da possibilidade de ataques

cibernéticos. Além disso, com o suporte da biblioteca para outras linguagens de programação além da C, como a C#, é possível que desenvolvedores criem de maneira mais prática *interfaces* gráficas e tornem a utilização pelos usuários mais intuitivas.

Para tornar a libIEC61850 utilizável em um computador com sistema operacional Linux, basta dar o comando "*make*" no terminal dentro do diretório da pasta, que está disponível para *download* no site oficial da biblioteca (ZILLGITH, 2021c). Existem outras formas de "construir" a biblioteca. No *Windows*, por exemplo, é possível utilizar uma ferramenta chamada WSL, que permite que funções de um sistema Linux sejam feitas no sistema da Microsoft. Como dito anteriormente, escolheu-se utilizar o Linux por questões de praticidade e suporte a desenvolvedores e a biblioteca foi construída por meio do comando *make*.

No projeto da libIEC61850 são definidas as funcionalidades nível Cliente e nível Servidor, conforme ilustrado na Figura 8. As funcionalidades, dentro de cada nível, possuem diversas funções. Na Tabela 5 são apresentados os módulos e submódulos pertencentes à libIEC61850.

A comunicação suportada pela biblioteca pode ser do tipo ponto a ponto ou *multicast*. O primeiro tipo é utilizado no caso de comunicação utilizando o protocolo MMS que tem modelo Cliente-Servidor. Já o segundo tipo é relativo às mensagens GOOSE e SV.

### **3.1.2 Visão Geral da API da libIEC61850**

A biblioteca libIEC61850 possui uma API de alto nível, na qual o programador precisa se ater apenas em utilizar os serviços de comunicação fornecidos e programar códigos fim. Dessa forma, não é necessário que o usuário-programador desenvolva todas as rotinas utilizadas em seu código, mas aproveite as que já são fornecidas pela API, como rotina de estabelecimento e encerramento de conexão entre dispositivos, criação de instâncias servidoras e cliente, dentre outras. Todos os comandos e rotinas, bem como a explicação do que cada um faz, estão expostos no manual de referência da API (ZILLGITH, 2021a).

A API da libIEC61850 consiste na parte cliente e na parte servidor para o protocolo MMS e nas partes editor/assinante para GOOSE e SV. Todas as partes da API compartilham elementos em comum e, por conta disso, a API é subdividida em duas outras APIs, chamadas neste trabalho de API - Servidor (API-S) e API - Cliente (API-C). Apesar de as APIs receberem uma nomenclatura que as diferencia em servidor e cliente, a API-S e a API-C não possuem apenas suporte para a comunicação cliente/servidor do MMS, mas também fornecem serviços

Tabela 5 – Módulos e submódulos pertencentes à libIEC61850.

1	IEC 61850/MMS client API
1.1	Funções gerais de manipulação de conexão do lado do cliente e tipos de dados
1.2	Funções de manipulação de blocos de controle SV do lado do cliente
1.3	Funções de manipulação de blocos de controle GOOSE do lado do cliente
1.4	Funções de serviço de acesso a dados do lado do cliente (leitura/gravação)
1.5	Serviços, funções e tipos de dados de manipulação de relatórios do lado do cliente
1.6	Funções e tipos de dados do serviço de conjunto de dados do lado do cliente
1.7	Funções de serviço de controle do lado do cliente
1.8	Serviços de descoberta de modelo
1.9	Funções relacionadas ao serviço de log, tipos de dados e definições
1.10	Funções, tipos de dados e definições relacionadas ao serviço de arquivos
2	libIEC61850 API common parts
2.1	Definição de tipo de dados MmsValue e funções de manipulação
2.2	Definição de tipo de dados LinkedList e funções de manipulação
2.3	Especificações do tipo de dados MmsVariableSpecification
3	IEC 61850/MMS server API
3.1	Funções gerais de configuração e gerenciamento do servidor
3.2	Manipulação de conexão e autenticação de cliente
3.3	Acesso ao modelo de dados e atualização de dados
3.4	Manipulação do grupo de configuração do lado do servidor
3.5	Manipulação do modelo de controle do lado do servidor
3.6	Manipulação do bloco de controle de SV do lado do servidor (SVCB)
3.7	Manipulação do bloco de controle GOOSE do lado do servidor (GoCB)
3.8	Lidar com acesso externo ao modelo de dados e controle de acesso
3.9	Definições gerais de modelo de dados, funções de acesso e iteração
3.10	Funções gerais de criação de modelo dinâmico
3.11	Criar modelos de dados por arquivos de configuração
3.12	Funções auxiliares para criar classes de dados comuns (CDC) usando a API de modelo dinâmico
3.13	Interface do provedor de serviços (SPI) para implementações de armazenamento de log
4	IEC 61850 API common parts
4.1	Opções de <i>trigger</i> (valores de bits combináveis)
4.2	Opções de <i>report</i> (valores de bits combináveis)
4.3	Categorias de originador (orCat)
4.4	Definição para o tipo addCause - usado em modelos de controle
4.5	Definição para o tipo de erro LastAppError - usado em modelos de controle
4.6	Definições e funções relacionadas a restrições funcionais (FCs)
4.7	Definições e funções relacionadas à qualidade do atributo de dados
4.8	Definições e funções relacionadas ao tipo de dados IEC 61850 Dbpos (um CODED ENUM)
4.9	Definições e funções relacionadas ao tipo de dados IEC 61850 <i>Timestamp</i> (UTC Time)
5	IEC 61850 GOOSE subscriber API
6	IEC 61850 Sampled Values (SV) subscriber API
6.1	Valores <i>Application Service Data Unit</i> (ASDU)
7	IEC 61850 Sampled Values (SV) publisher API
7.1	Valores <i>Application Service Data Unit</i> (ASDU)

Fonte: (ZILLGITH, 2021d)

para trabalhar com os protocolos GOOSE e SV, como é visto em 3.1.2.1.

A libIEC61850 possui uma camada de abstração de *hardware*, no inglês *Hardware Abstraction Layer* (HAL), que funciona como uma camada intermediária entre o *hardware* e o *software*, permitindo a sua atuação conjunta. A HAL provida pela biblioteca consiste em

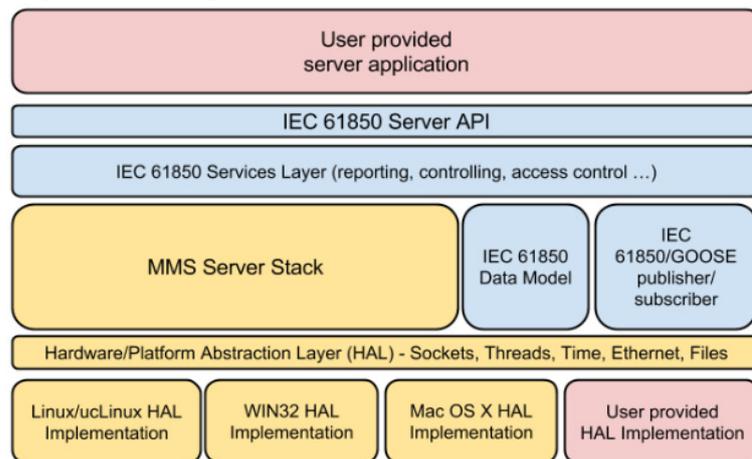
abstração de *threads* (forma de um processo se dividir em duas ou mais tarefas), *sockets* (canais de troca de mensagens entre duas máquinas) e tempo (ZILLGITH, 2021b). Além disso, para suporte às mensagens GOOSE existe uma camada de abstração para utilização da tecnologia *Ethernet*. A HAL permite a compatibilidade com variantes do Sistema Operacional (SO) Unix (Linux, ucLinux, dentre outras) e do SO Windows. Caso seja necessário utilizar a libIEC61850 em uma plataforma diferente, o usuário deve implementar os códigos de abstração da HAL.

### 3.1.2.1 API - Servidor e API - Cliente

Conforme mencionado em 3.1.2, a API da libIEC61850 possui duas subdivisões, denominadas de API-S e API-C. Os códigos que utilizam as APIs são denominados de Instância Servidor (IS) e Instância Cliente (IC), respectivamente, para a API-S e a API-C.

A arquitetura da API-S, apresentada na Figura 19, possui uma HAL com camadas de abstração para *sockets*, *threads*, tempo, *Ethernet* e arquivos, que permitem comunicação com SOs Unix, Windows, Mac OS X e com plataformas providas pelo usuários, após os devidos ajustes realizados. A API-S possui uma pilha de serviços MMS para a IS, com a qual é possível enviar *reports* e mensagens de controle e de acesso. Além disso, a API-S possui o modelo de dados da IEC 61850 e permite que a IS publique ou seja assinante de mensagens GOOSE e SV.

Figura 19 – Arquitetura da API - Servidor.



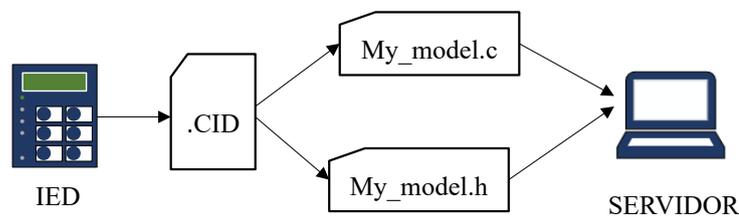
Fonte: (ZILLGITH, 2021d)

A criação de uma IS pode ser feita de duas maneiras distintas. A primeira torna toda a sua estrutura interna estática, ou seja, os LD e LN não podem ser alterados pelo motivo de serem extraídos de um arquivo .CID estático 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. Visto que um dos objetivos deste trabalho é comparar o comportamento de um VIED com o de um IED sob as mesmas condições para fins de validação, a forma de criação dos VIEDs adotada é a estática a partir de um arquivo .CID.

O processo de criação de uma IS estática funciona da seguinte forma. É necessário se ter disponível um arquivo gerado na linguagem SCL que descreva um IED. Com essa limitação do tipo de arquivo, podem ser utilizados os arquivos de extensão .ICD ou .CID, mas, como o .CID já possui toda a parametrização da comunicação de um IED, será o tipo de arquivo utilizado neste trabalho no processo de criação do VIED. Um arquivo com esta extensão .CID pode ser gerado a partir dos *softwares* proprietários de IEDs, como o AcSELERator Architect da SEL e o CET850 da Schneider, e utilizado para fins de virtualização. Os próximos passos são descritos na Figura 20. Conforme descrito no site da biblioteca Zillgith (2021d), o arquivo .CID deve ser adicionado na pasta *tools/model\_generator* e o comando *java jar genmodel.jar my\_model.cid* deve ser aplicado no terminal do Linux. São gerados dois arquivos, "my\_model.c" e "my\_model.h", os quais são utilizados pelo código do servidor como referência de busca de todos os dados da estrutura interna do servidor. Feito esse processo, já é possível utilizar as funções da API do servidor.

Figura 20 – Arquivos necessários para criar uma instância servidora da libIEC61850.



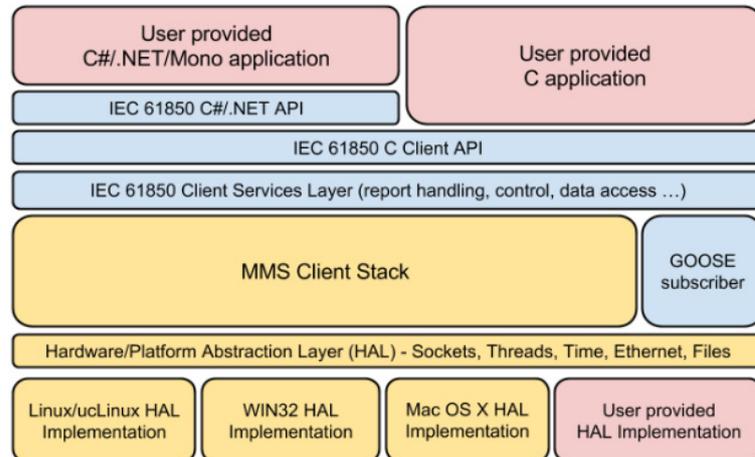
Fonte: Próprio autor.

Existem diversas funções que podem ser utilizadas no código computacional do servidor, como as que iniciam e encerram uma conexão Cliente-Servidor para comunicação MMS, as que habilitam as mensagens GOOSE e as SV, dentre outras.

A arquitetura da API-C é apresentada na Figura 21. Semelhante à API-S, a API-C possui uma HAL com camadas de abstração para *sockets*, *threads*, tempo, *Ethernet* e arquivos, que permitem comunicação com SOs Unix, Windows, Mac OS X e com plataformas providas pelo usuários, após os devidos ajustes realizados. A API-C possui uma pilha de serviços MMS para a IC, com a qual é possível trabalhar com *reports* recebidos, com dados de controle e de acesso. A API-C possui suporte para a funcionalidade assinante de GOOSE e SV, além de suporte para se trabalhar com aplicações em C# ou em C. Dentre os serviços, pode-se citar o

estabelecimento/encerramento de conexão MMS, a descoberta do modelo de dados do IED ou VIED, o envio de comandos, a leitura de dados analógicos e digitais, a solicitação de *reports* etc.

Figura 21 – Pilha de serviços da funcionalidade Cliente da libIEC61850.



Fonte: (ZILLGITH, 2021d)

Diferentemente da IS, a IC não necessita de um arquivo SCL que descreve um IED para ser criada, pois suas funcionalidades e estrutura são totalmente programadas por linhas de código. Visto que uma IC se conecta a uma IS de algum dispositivo, ao se trabalhar com uma IC é necessário conhecer a identificação e os *datasets* de uma IS, o que é possível por meio de funções da API. Todas as funções da API-C estão disponíveis para consulta no *site* da biblioteca (ZILLGITH, 2021b).

### 3.2 Desenvolvimento do VIED

O VIED desenvolvido neste trabalho teve seus LNs criados a partir dos IEDs físicos que também compõem a Plataforma de PAC. A criação com base em um dispositivo existente visou facilitar o processo de validação por meio de comparação do funcionamento do VIED com o do IED físico. O VIED teve como base a API da libIEC 61850 (ZILLGITH, 2021d). Foram feitas modificações em códigos base fornecidos pela biblioteca da API para criar relés virtuais com funções de proteção específicas, como a instantânea de sobrecorrente (50) e a diferencial de transformador (87T). Além disso, foram feitos testes considerando a seletividade lógica entre dispositivos.

Assim como apresentado em 2.1.3, que descreve um PD com funcionalidades cliente e servidor ao mesmo tempo, um VIED possui os dois tipos de instâncias (IS e IC) utilizando a

API para operar corretamente. As duas instâncias fazem parte de um único código computacional como rotinas que são chamadas quando necessário.

Para o desenvolvimento do VIED foi utilizado um *notebook* ACER com processador AMD Ryzen 5, frequência de 2 GHz, 12 GB de memória RAM, SSD de 240 GB e sistema operacional Ubuntu 20.04.3 LTS. Utilizou-se o editor de código-fonte da *Microsoft* Visual Code Studio, versão 1.63.0 para Ubuntu 64 *bits*, pelo qual se faz a programação dos VIEDs. Foi utilizado o arquivo de nome ASSINANTE.CID de um IED SEL-751 e outro arquivo de nome assinante.CID de um IED Schneider SEPAM série 80 para fins de demonstração das funções de proteção 50 e 87T, respectivamente, a fim de criar os arquivos `static_model.c` e `static_model.h`. Os arquivos .CID dos dois fabricantes possuíam uma estrutura semelhante, haja vista estarem no padrão da IEC 61850, divergindo na existência ou não de alguns nós lógicos, a depender das funções existentes nos IEDs físicos.

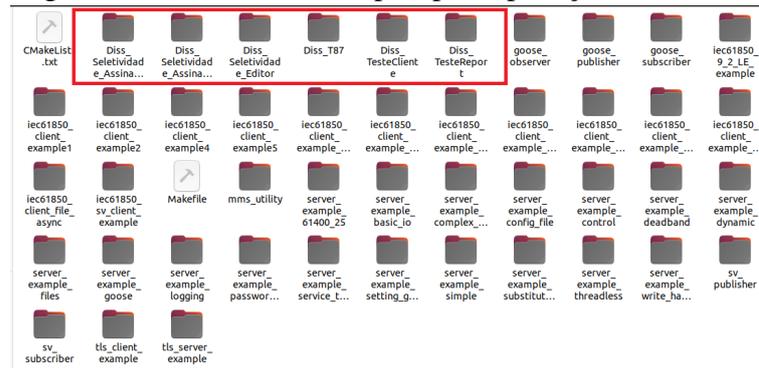
No Apêndice A são apresentados os passos realizados para *download* da libIEC61850 até a geração dos arquivos `static_model.c` e `static_model.h`, necessários para o VIED desenvolvido de forma estática.

### ***3.2.1 VIED com Função de Proteção Instantânea de Sobrecorrente (50) e Seletividade Lógica***

Com a estrutura padrão IEC 61850 fornecida pelos arquivos `static_model.c` e `static_model.h` gerados, foi criado um VIED com a função de proteção ANSI 50 e habilitado para operar com seletividade lógica. Na Figura 22 em destaque vermelho, são apresentadas as pastas com os códigos utilizados neste trabalho. As pastas *Diss\_TesteReport* e *Diss\_TesteCliente* foram códigos utilizados como aprendizado para as situações de *report* e quando o VIED atua como cliente numa comunicação via protocolo MMS. As pastas *Diss\_Seletividade\_Assinante*, *Diss\_Seletividade\_Assinante2* e *Diss\_Seletividade\_Editor* contêm os códigos para VIED com função 50 atuando com seletividade lógica, tanto para função editor, quanto para função assinante. Visto que a criação do VIED é semelhante para os que estão projetados para a situação de seletividade lógica, são detalhados somente os arquivos e códigos presentes na pasta *Diss\_Seletividade\_Assinante*.

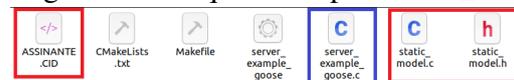
Foram inseridos os arquivos ASSINANTE.CID, `static_model.c` e `static_model.h` na pasta *Diss\_Seletividade\_Assinante*, como pode ser visto em destaque vermelho na Figura 23. O destaque em azul apresenta o código do VIED propriamente dito.

Figura 22 – Pastas com exemplos para aplicação da biblioteca



Fonte: Próprio Autor.

Figura 23 – Arquivos na pasta Diss\_Seletividade\_Assinante.



Fonte: Próprio Autor.

O código do VIED (*server\_example\_goose.c*) foi editado no Visual Code e se encontra na íntegra no Apêndice B. O código dispõe da utilização conjunta das instâncias IS e IC descritas anteriormente. Na Figura 24 pode ser vista a configuração do VIED feita para habilitá-lo a ser publicador GOOSE e também assinante das mensagens GOOSE do IED editor na seletividade lógica. Na Figura 25 é apresentada a seção do código com programação da função 50 com seletividade lógica, e na Figura 26 é apresentado um diagrama lógico do código. Ao perceber uma falta que sensibiliza a sua função de proteção 50, o VIED assinante observa as mensagens GOOSE do editor e analisa as seguintes situações: 1) Caso as mensagens da proteção 50, de TRIP e 50BF (falha de disjuntor) do editor sejam falsas, o VIED atua, enviando um sinal de *trip* e em seguida atualiza o LN de *status* do disjuntor; 2) Se as mensagens da proteção 50 e de TRIP do editor forem verdadeiras, mas a 50BF for falsa, o VIED não atua, pois reconhece a situação de seletividade lógica; 3) Se as mensagens da proteção 50, de TRIP e da 50BF forem verdadeiras, o VIED assinante reconhece a situação de falha de disjuntor, envia um sinal de *trip* e em seguida atualiza o LN de *status* do disjuntor.

Figura 24 – Habilitando o VIED para mensagens GOOSE na seletividade lógica.

```

174 }
175
176 IedServer_enableGoosePublishing(iedServer);
177
178 GooseReceiver receiver = GooseReceiver_create();
179
180 GooseReceiver_setInterfaceId(receiver, "enpl1s0f1");
181
182 GooseSubscriber subscriber = GooseSubscriber_create("SEL_751_ICFG/LLN0$G0$GOOSE_SL_1", NULL);
183
184 GooseSubscriber_setListener(subscriber, gooseListener, iedServer);
185
186 GooseReceiver_addSubscriber(receiver, subscriber);
187
188 GooseReceiver_start(receiver);
189
190 Thread_sleep(1000);
191
192 IedServer_setGoCBHandler(iedServer, goCbEventHandler, NULL);
193
194 /* MMS server will be instructed to start listening to client connections. */
195 IedServer_start(iedServer, 102);

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 – LN utilizados para o VIED.

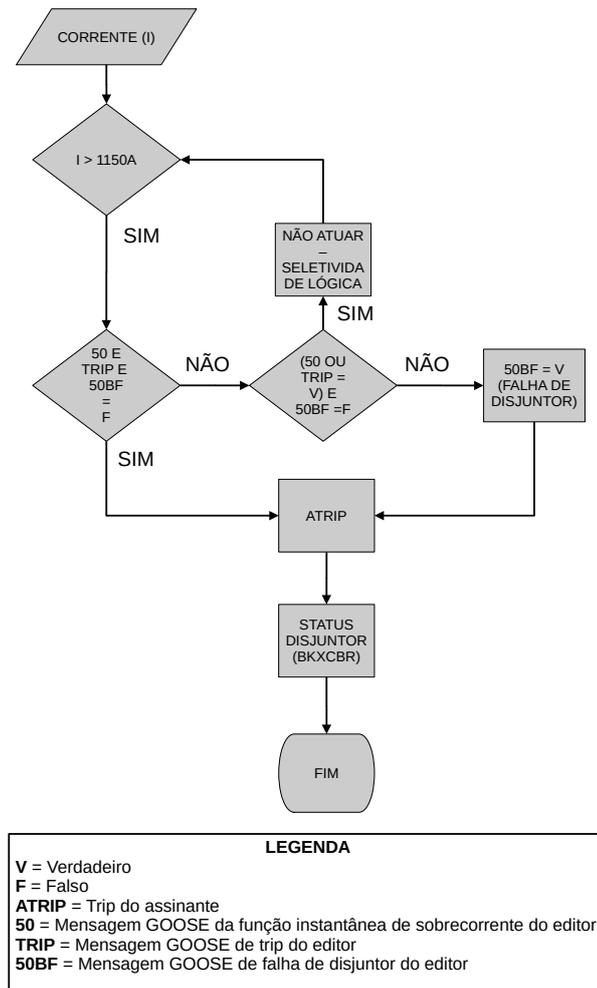
```

112
113 if (corrente_primarioA>1150)
114 {
115     if ((b != 116) && (c != 116) && (d != 116) && (contador == 0))
116     {
117         //Análise mensagens Goose: b=Sobrecorrente (50); c=TRIP; d=Falha de Disjuntor (50BF)
118         printf("ATUAR - FUNÇÃO 50");
119         IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_OFF);
120         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, false);
121         exit();
122     }
123
124     if (((b == 116) && (c != 116) && (d != 116)) || ((b == 116) && (c == 116) && (d != 116)))
125     {
126         //116 é o valor da tabela ASCII para T (True)
127         printf("CORRENTE DE FALTA - NÃO ATUAR (SELETIVIDADE LÓGICA)\n");
128         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, false);
129     }
130
131     if ((b == 116) && (c == 116) && (d == 116)) //116 é o valor da tabela ASCII para T (True)
132     {
133         contador = 1;
134         printf("FALHA DE DISJUNTOR \n");
135         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, true);
136         printf("SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR \n");
137         printf("DISJUNTOR ABERTO \n");
138         IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_OFF);
139         exit();
140     }
141 }
142
143 IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 26 – Diagrama lógico da função 50 com seletividade lógica.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.2 VIED com Função Diferencial de Transformador (87T)

O processo de criação do VIED para a função Diferencial de Transformador (87T) seguiu o mesmo procedimento apresentado em 3.2.1, diferenciado-se no uso do arquivo assinante.CID, de origem de um SEPAM série 80, por meio das linhas de código-fonte que tratam especificamente da lógica da função 87T. Informações do SEP no qual o VIED será inserido devem ser especificadas no código, como: relação de transformação e tipo de ligação (estrela ou delta) do primário e do secundário do transformador de potência; os valores nominais de corrente, tensão e frequência.

Ao desenvolver o código fonte para a função 87T, não se teve como foco neste trabalho o estudo detalhado do algoritmo de processamento de sinais aplicados nas função. O foco principal é o desenvolvimento do VIED em si que possa comunica-se por meio dos protocolos

definidos pela IEC 61850. Desta forma, foi feita uma simplificação no desenvolvimento da função 87T, a qual consiste em um código que analisa apenas a sobrecorrente diferencial, visto não ter sido implementada a corrente de restrição.

O código-fonte do VIED com a função 87T foi programado para receber mensagens SV com um padrão definido de 80 amostras por ciclo de onda. Desta forma, para um sistema cuja frequência é de 60 Hz, a taxa de amostragem é de 4.8000 Hz. O VIED foi programado para receber mensagens SV de origem da MU da Plataforma PAC e para operar em um sistema elétrico trifásico no qual o transformador de potência possui uma configuração delta no lado de alta e uma configuração estrela aterrada no lado de baixa. A escolha da configuração delta-estrela aterrada do transformador foi para que o VIED fosse utilizado na aplicação vista em 4.2.6. Portanto, o VIED faz a leitura individual dos dados digitais de seis correntes oriundas da MU, as quais representam as três correntes do lado de alta e as três correntes do lado de baixa de um transformador, como pode ser visto pela inicialização das variáveis na Figura 27. Os seus LNs configurados foram: comando de abertura do disjuntor (CSWI), *status* do disjuntor (XCBR), sinal de *trip* (PTRC), valor da função de sobrecorrente (A51PTOC) e medida da corrente da linha A (MMXU).

Figura 27 – Variáveis da corrente de um transformador no código do VIED com a função 87T.

```

server_example_goose.c - examples - Visual Studio Code
File Edit Selection View Go Run Terminal Help
EXPLORER
  C server_example_goose.c
  Diss_87
  E assinante.cid
  E ASSINANTE.CID
  M CMakeLists.txt
  E Como compilar
  M Makefile
  E server_example_goose
  C server_example_goose.c
  C static_model.c
  C static_model.h
  > Diss_Seletividade_Assinante
  > Diss_Seletividade_Assinante (cópia)
  > Diss_Seletividade_Assinante_SCH
  > Diss_Seletividade_Assinante2
  > Diss_Seletividade_Editor
  > Diss_Seletividade_Editor (cópia)
  > Diss_sv_publisher
  > Diss_TesteCliente
  > Diss_TesteReport
  > goose_observer
  > goose_publisher
  > goose_subscriber
  > iec61850_9_2_LE_example
  > iec61850_client_example_array
  > iec61850_client_example_async
  > OUTLINE
  > TIMELINE
Diss_87
17 #include "mms_value.h"
18 #include "goose_publisher.h"
19 #include "sv_subscriber.h"
20 #include <math.h>
21 #include "static_model.h"
22
23
24 /* Import IEC 61850 device model created from SCL-File */
25 extern IedModel iedModel;
26
27 int contador = 0; //variável para auxiliar na função de abertura do disjuntor
28 static int running = 0;
29 static IedServer iedServer = NULL;
30 int contadorSV1 = 0;
31 int contadorSV2 = 0;
32 float SVrms deltaA = 0;
33 float SVrms deltaB = 0;
34 float SVrms deltaC = 0;
35 float SVrms estrelaA = 0;
36 float SVrms estrelaB = 0;
37 float SVrms estrelaC = 0;
38 static float r_transformacao = 2.8868;
39
40 void sigint_handler(int signalId)
41 {
42     running = 0;
43 }
44
45 /* Callback handler for received SV messages */
46 static void
47 svUpdateListener (SVSubscriber subscriber, void* parameter, SVSubscriber_ASDU asdu)

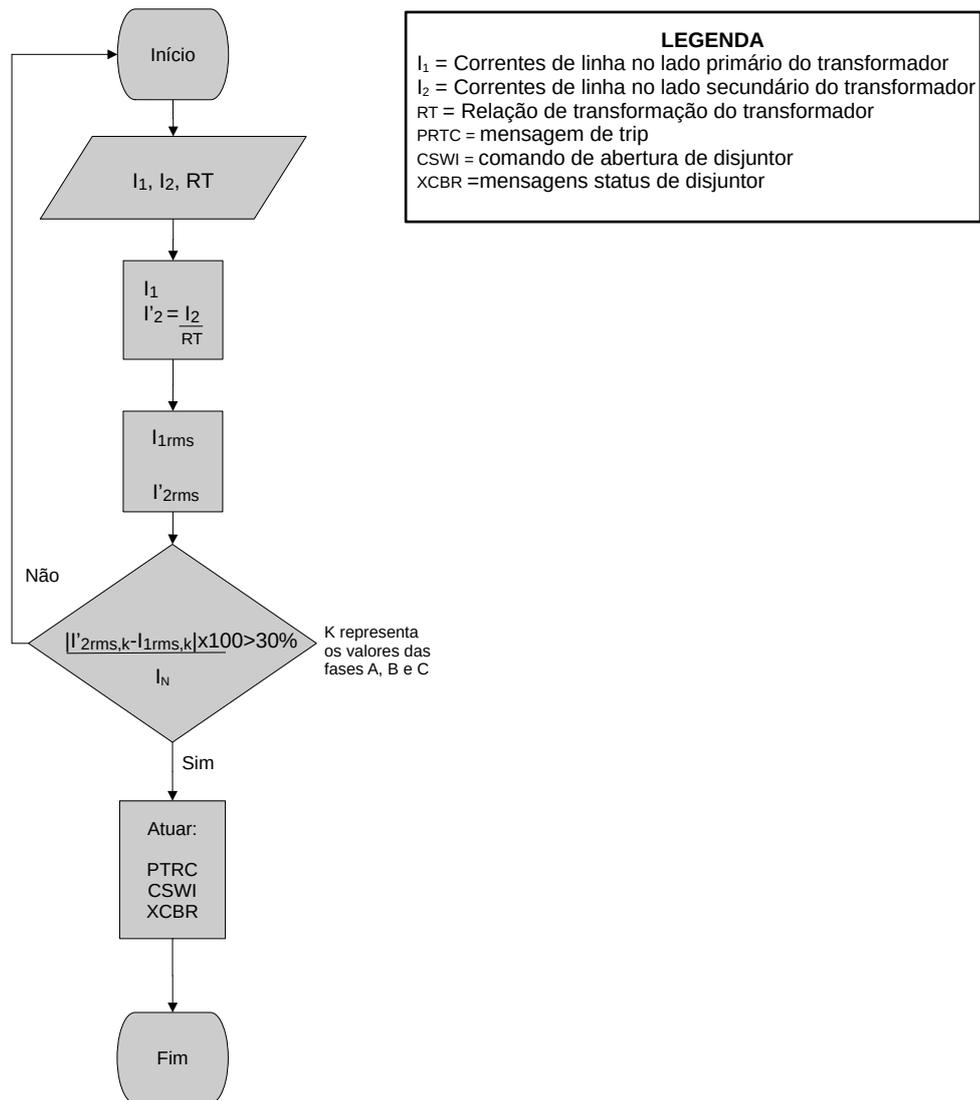
```

Fonte: Próprio Autor.

A lógica interna do VIED 87T, ilustrada no diagrama da Figura 28, consiste em receber os dados das correntes elétricas de linha do lado de alta e do lado de baixa do transformador supracitado e realizar o cálculo matemático da corrente diferencial normalizada, conforme

equação 2.3, apresentando o valor em termos percentuais (SCHNEIDER ELECTRIC, 2009). Definiu-se que para valores da corrente diferencial em relação à corrente nominal que ultrapassem um valor de 30%, o VIED envia o sinal de *trip* (PTRC), envia o comando de abertura aos disjuntores (CSWI) do lado de alta e do lado de baixa do transformador e envia uma mensagem com o *status* dos disjuntores para um sistema SCADA. Na Figura 29 são apresentadas as linhas de código onde são feitas as comparações entre as correntes de linha do transformador.

Figura 28 – Diagrama lógico da função 87T (sem corrente de restrição).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Lógica de comparação das correntes de linha para a função 87T.

```

if ((abs(corrente_primarioA-corrente_secundarioA)/corrente_primarioA)*100>30)
{
    printf("-----\n");
    printf("  ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha A -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO\n");
    printf("-----\n");
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_CSWI1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_PTRC1_Tr_general, true);
    printf("\n");
    teste = teste+1;
}
if((abs(corrente_primarioB-corrente_secundarioB)/corrente_primarioB)*100>30){
    printf("-----\n");
    printf("  ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha B -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO\n");
    printf("-----\n");
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_CSWI1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_PTRC1_Tr_general, true);
    printf("\n");
    teste = teste+1;
}
if((abs(corrente_primarioC-corrente_secundarioC)/corrente_primarioC)*100>30){
    printf("-----\n");
    printf("  ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha C -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO\n");
    printf("-----\n");
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_CSWI1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
    IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer, IEDMODEL_LD0_PTRC1_Tr_general, true);
    printf("\n");
    teste = teste+1;
}

```

Fonte: Próprio Autor.

O código-fonte na íntegra para o VIED com a função 87T é apresentado no Apêndice C. Destaca-se que, apesar de os VIEDs com as funções de proteção 50 e 87T terem sido criados de forma separada para demonstração, é possível desenvolver um único VIED com essas funções de proteção.

### 3.3 Conclusão

O VIED apresentado neste capítulo apresenta características de dinamicidade, pois pode ser rapidamente alterado via *software*. Para o seu desenvolvimento foi utilizada a biblioteca livre libIEC61850, a qual permite utilizar funcionalidades padrão IEC 61850 e enviar/receber mensagens MMS, GOOSE e SV em uma LAN. Optou-se pela linguagem de programação C, entretanto, a biblioteca já oferece alguns recursos nas linguagens python e C#.

As funções de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e diferencial de transformador (87T) foram desenvolvidas para o VIED. Para a função 50, destacou-se o VIED operante como assinante em uma seletividade lógica, estando seu código no Apêndice B. Quanto ao código da função 87T, o qual possui simplificações, visto não ter sido implementada a análise da corrente de restrição, o VIED foi programado para analisar as correntes do lado de alta e do lado de baixa de um transformador, realizar cálculos de uma corrente diferencial, analisar o valor da corrente diferencial e tomar uma decisão de enviar ou não um sinal de *trip* aos disjuntores.

O processo para o desenvolvimento do VIED foi apresentado, sendo complementado

pelo Apêndice A, o qual mostra o passo a passo desde o *download* da biblioteca até a geração de arquivos necessários na linguagem C para o funcionamento do VIED.

## 4 DESENVOLVIMENTO, TESTE E VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE (PAC)

O presente capítulo apresenta resultados de testes experimentais feitos com os VIEDs desenvolvidos no capítulo 3 em uma plataforma PAC. O primeiro tipo de teste é o de validação, que mostra o comportamento genérico dos VIEDs. Dessa forma, é apresentado o funcionamento básico de um VIED utilizando os protocolos MMS, GOOSE, SV, e são feitas comparações de sua operação com o comportamento dos IEDs físicos de bancada. O segundo tipo de resultado é o de integração dos VIEDs e IEDs a um SCADA, que visa explorar situações práticas que alunos e profissionais da área de proteção de SEP enfrentam ou podem enfrentar no seu dia a dia. Nos testes, em algumas situações são utilizados somente os VIEDs (como na utilização da função de proteção 87T), ou em conjunto com os IEDs de bancada (como no caso da situação de seletividade lógica com SCADA).

### 4.1 Plataforma de Sistema PAC Digital

#### 4.1.1 LAN da Plataforma PAC

A Plataforma PAC foi composta pelos equipamentos descritos na seção 1.5. Na Figura 30 é apresentado o esquema de ligação dos componentes da bancada, formando uma LAN. Os *notebooks* ACER e Samsung podem assumir as mesmas funções, que são: ser hospedeiro dos VIEDs, 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 o sistema SCADA utilizado.

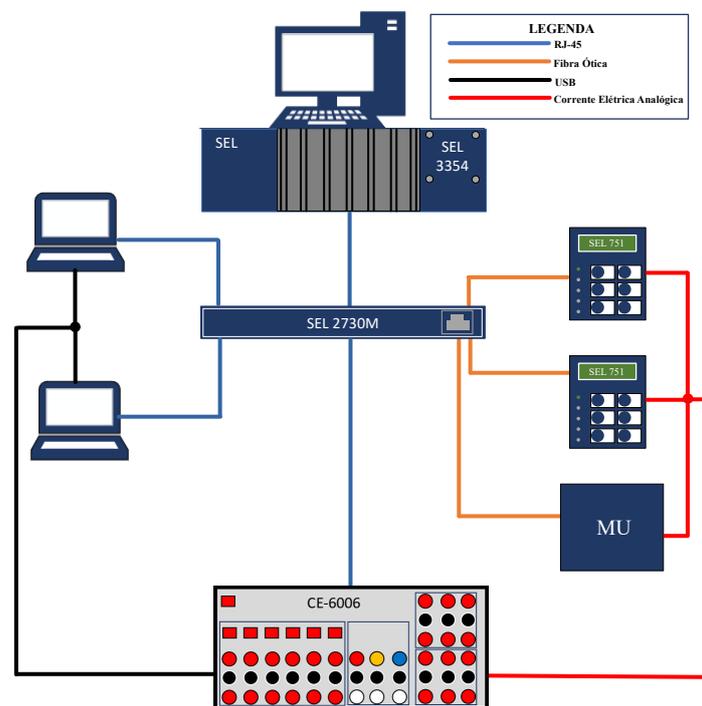
As conexões dos IEDs SEL e da MU ao *switch* gerenciável foram feitas por meio de cabos de fibra ótica, enquanto os demais *hardwares* foram conectados ao *switch* por meio de cabos *ethernet* RJ-45. A mala de testes foi conectada aos *notebooks* Acer e Samsung via cabo USB. Na Tabela 6 são vistos os endereços *Internet Protocol* (IP) dos dispositivos da LAN.

Tabela 6 – Endereços IP dos dispositivos da Plataforma.

<i>Hardware</i>	Endereço IP
SEL 751 (1)	192.168.1.51
SEL 751 (2)	192.168.1.52
ACER	192.168.1.53
Samsung	192.168.1.60
<i>Switch (Gateway)</i>	192.168.1.1
MU	192.168.199

Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 – Esquema de conexões da LAN da Plataforma.



Fonte: Próprio Autor.

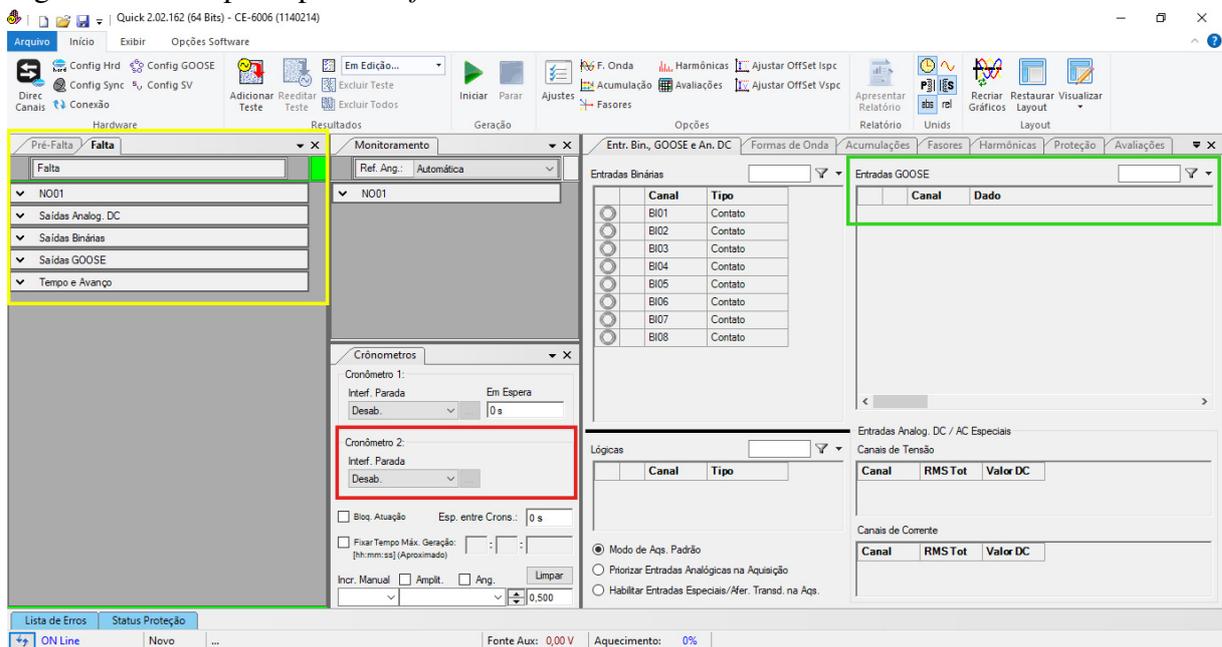
#### 4.1.2 Mala de Testes (Testador Hexafásico)

A Mala de testes possui suporte para envio e recebimento de mensagens GOOSE. O seu *hardware* possui seis canais analógicos, que podem fornecer corrente ou tensão elétrica. Nos casos analisados neste capítulo, todos os canais foram configurados para fornecer corrente elétrica. A mala possui saídas digitais de contatos Normalmente Aberto (NA)/Normalmente Fechado (NF) que podem representar o estado de um disjuntor. Além dessas saídas, possui conector para cabo RJ-45, por meio do qual pode enviar e receber mensagens GOOSE da LAN, e uma fonte auxiliar interna de tensão de Corrente Contínua (CC) que pode fornecer até 250 V.

A corrente elétrica foi aplicada nos módulos de aquisição de corrente dos IEDs

físicos e da MU. De acordo com o contexto dos testes, os bornes de saídas binárias da mala de testes, em combinação com a fonte auxiliar, representam um disjuntor, sendo essenciais para a correta interpretação pelos IEDs do sistema elétrico proposto. Visto que está conectada à LAN, a mala consegue observar as mensagens GOOSE que trafegam na rede de comunicação. A percepção de mensagens GOOSE pela mala de testes foi utilizada como critério de parada das emulações, ou seja, ao perceber determinada mensagem GOOSE, como sinal de TRIP, a mala interrompe o fornecimento de corrente elétrica, de acordo com a situação explorada. O principal *software* da mala de testes é o Manual (ou *Quick* na versão inglês), cuja tela, vista na Figura 31, é mostrada diversas vezes neste capítulo. Em destaque amarelo ficam as propriedades que podem ser configuradas, como injeção de corrente, aplicação de tensão, definição dos estados das saídas binárias, dentre outras funções. Em verde é onde ficam visíveis as mensagens GOOSE que a mala de testes estará observando na rede. Por fim, em destaque vermelho está o critério de parada da simulação feita pela mala, que é em muitas vezes associado ao recebimento de alguma mensagem GOOSE.

Figura 31 – Tela principal do *software* Manual da mala de testes.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.3 IEDs Físicos e VIED

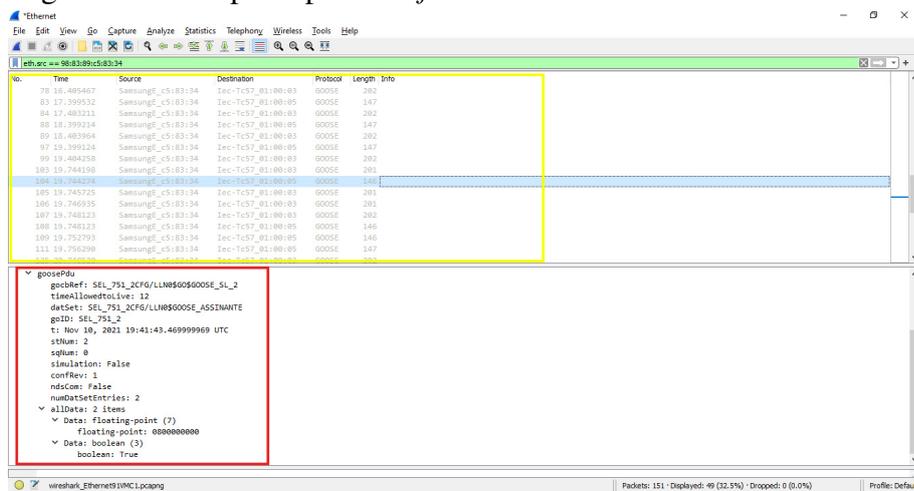
Os IEDs SEL 751 possuem suporte para mensagens MMS e GOOSE padrão IEC 61850. Dois *softwares* são utilizados na sua parametrização: AcSElarator Architect, que

configura a comunicação de mensagens GOOSE e MMS, e o AcSELerator QuickSet, que configura os parâmetros das funções de proteção. A partir dos seus arquivos .CID foi possível criar VIEDs. Para os testes de validação que envolvem comparação com o funcionamento dos IEDs físicos, os VIEDs foram desenvolvidos utilizando arquivos .CID oriundos dos IEDs. Para os casos dos testes iniciais apenas para comunicação simples de mensagens MMS, GOOSE e SV foram utilizados arquivos .CID genéricos fornecidos na documentação da própria libIEC61850. A aplicação de correntes analógicas nos IEDs físicos foi feita pela mala de testes. Para leitura dos valores de corrente pelo VIED, os sinais analógicos gerados pela mala de testes foram aplicados na MU, a qual, por sua vez, digitalizou os sinais e os enviou no barramento de processos, tornando possível a leitura pelo dispositivo virtual.

#### 4.1.4 Tráfego de Rede - Wireshark

Um *software* indispensável para se trabalhar na Plataforma é o Wireshark, que é responsável por captar o tráfego de rede, discriminando quais as mensagens estão sendo enviadas/recebidas na LAN e quais os protocolos utilizados. Na Figura 32 é vista a tela principal do Wireshark. Em destaque amarelo é mostrado o setor onde as amostras dos dados são apresentadas. Em vermelho são mostrados os detalhes da comunicação selecionada. Os detalhes destacados consistem em mostrar, dentre as diversas informações, o protocolo de comunicação e o seu conteúdo.

Figura 32 – Tela principal do *software* Wireshark.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.5 Merging Unit - MU

A MU é o equipamento da bancada responsável por digitalizar os valores de corrente. A MU possui dois dispositivos lógicos chamados de MU01 e MU02 que usam os sinais de corrente aplicados aos módulos de entrada de corrente pela mala de testes. Ela pode aplicar dois tipos de SV: para aplicações de proteção com amostras de 80 pontos por ciclo; para aplicações de medição com amostras de 256 pontos por ciclo. Neste trabalho, os dois dispositivos lógicos foram utilizados para aplicação de proteção, o que, para a frequência de 60 Hz, resultou em uma taxa de amostragem de 4.800 Hz. Uma vez digitalizados os valores de corrente, a MU os envia pelo barramento de processos na LAN para que sejam recebidos e processados pelo VIED. Outros parâmetros são configurados na MU, como endereço IP e relação de transformação dos TCS, que para as aplicações deste trabalho foi definida como 1:400. Os dados da MU não foram utilizados pelos IEDs físicos da bancada, visto que o modelo SEL-751 utilizado não possui suporte para SV. Desta forma, não há o problema de reamostragem e os IEDs físicos recebem diretamente os sinais analógicos providos pela mala de testes.

#### 4.2 Resultados para Validação da Comunicação dos VIEDs

Os resultados para validação apresentam o comportamento da comunicação dos VIEDs utilizando a API da libIEC 61850 e podem ser divididos nas seguintes classes:

- Testes básicos de envio/recebimento de mensagens MMS, GOOSE e SV: os três primeiros testes, apresentados nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, foram feitos para avaliar a capacidade do VIED de enviar e receber mensagens padrão MMS, GOOSE e SV. Para isso, foi utilizada a *interface* de rede *loopback*, a qual possibilita que um *notebook* envie mensagens com o mesmo padrão dos enviados em uma LAN, mas que ele mesmo as receba. Desta forma, neste primeiro momento não foram utilizados os demais equipamentos da Plataforma PAC, como a mala de testes e a MU;
- Testes da função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e da seletividade lógica: os testes realizados nas seções 4.2.4 e 4.2.5 foram feitos para avaliar o comportamento do VIED diante da aplicação de correntes de falta trifásica que sensibilizam a função de proteção 50 e a sua resposta dentro de um contexto de necessidade de seletividade lógica;

- Teste da função de proteção diferencial de transformador (87T): por meio do teste realizado na seção 4.2.6 buscou-se avaliar o comportamento do VIED para uma situação de proteção de um transformador utilizando a função de proteção 87T;
- Teste de aplicação com mais de um VIED: o teste realizado na seção 4.2.7 apresenta uma forma de utilização de mais de um VIED utilizando o conceito de Máquina Virtual.

#### 4.2.1 Mensagens MMS

Para se observar a comunicação por meio de mensagens MMS, foram utilizados a *interface* de rede *loopback* e o arquivo .CID genérico fornecido pela libIEC 61850 para a criação de um VIED com função servidor. Além do servidor, utilizou-se um outro código computacional na funcionalidade cliente, que recebe *reports* via mensagens MMS. No código do VIED, chamado de "simpleIO", foi enviado o *report* referente ao LD "GenericIO" e ao *dataset* "Events". Os LNs que fazem parte de "Events" são: GGIO1.SPCSO0.stVal, GGIO1.SPCSO1.stVal, GGIO1.SPCSO2.stVal, GGIO1.SPCSO3.stVal. Também foi feita uma atualização com um valor do tipo *float* aleatório no LN GGIO/MX. AnIn1. mag. f, que é enviada como *report*.

Na Figura 33 é possível observar que o VIED iniciou a conexão com o cliente, ocasião em que o relé virtual enviou os *reports*, e depois a encerrou. Na Figura 34 é apresentado o *report* recebido pelo cliente. O motivo para o *report* em um primeiro momento foi devido à razão 16 e em outro momento devido à 8, que significam, respectivamente, uma solicitação feita pelo cliente e um *report* periódico de integridade (ZILLGITH, 2021d). Também foi feita uma atualização do valor *float*, que na ocasião apresenta o valor 0,963789.

Figura 33 – VIED com funcionalidade de servidor inicia/finaliza conexão para envio de mensagens MMS.



```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/server_example_basic_io
claudivan@claudivan-Aspire-A315-41: ~/Documentos/dissertação/libiec61850-...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/l...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/server_example_basic_io# ./server_example_basic_io
Using libIEC61850 version 1.5.0
Connection opened
Connection closed

```

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 35 pode ser visto o tráfego de rede no Wireshark. O destaque amarelo apresenta a troca de mensagens MMS na rede *loopback*, de endereço 127.0.0.1, sendo os

Figura 34 – *Report* recebido pelo cliente.

```

claudivan@claudivan-Aspire-A315-41: ~/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/iec61850_client_example1
./client_example1
read float value: 0.963789
RptEna = 0
received report for simpleIOGenericIO/LLN0.RP.EventsRCB01
GGI01.SPCS00.stVal: 0 (included for reason 16)
GGI01.SPCS01.stVal: 0 (included for reason 16)
GGI01.SPCS02.stVal: 0 (included for reason 16)
GGI01.SPCS03.stVal: 0 (included for reason 16)
received report for simpleIOGenericIO/LLN0.RP.EventsRCB01
GGI01.SPCS00.stVal: 0 (included for reason 8)
GGI01.SPCS01.stVal: 0 (included for reason 8)
GGI01.SPCS02.stVal: 0 (included for reason 8)
GGI01.SPCS03.stVal: 0 (included for reason 8)

```

Fonte: Próprio Autor.

retângulos vermelho e azul indicativos de suas características. O primeiro mostra a confirmação de solicitação para a troca de mensagens, e o segundo, a identificação do IED e o item que está sendo enviado na mensagem.

Figura 35 – Tráfego de rede MMS.

```

Ethernet II, Src: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
Transmission Control Protocol, Src Port: 56140, Dst Port: 162, Seq: 210, Ack: 166, Len: 78
TPKT, Version: 3, Length: 78
ISO 8073/X.224 COTP Connection-Oriented Transport Protocol
ISO 8327-1 OSI Session Protocol
ISO 8327-1 OSI Session Protocol
ISO 8823 OSI Presentation Protocol
MMS
  confirmed-RequestPDU
    invokeID: 1
    confirmedServiceRequest: read (4)
      read
        variableAccessSpecificatn: listOfVariable (0)
          listOfVariable: 1 item
            listOfVariable item
              variableSpecification: name (0)
                name: domain-specific (1)
                  domain-specific
                    domainId: simpleIOGenericIO
                    itemId: GGI01$MX$AnIn1$mag$f

```

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2 Mensagens GOOSE

Para a comunicação por meio de mensagens GOOSE também foi utilizada a *interface loopback*. Foram criadas duas instâncias, uma com função de editor e outra com função de assinante. O editor foi configurado com um bloco de controle de mensagens GOOSE com a referência "simpleIOGenericIO/LLN0.GO.gcbAnalogValues" e um *dataset* chamado "simpleIOGenericIO/LLN0.AnalogValues". O editor foi ajustado para enviar três informações na mensagem: dois valores inteiros sem significado físico e um terceiro valor com unidade de tempo.

Na Figura 36 é apresentada a tela do terminal em que o VIED com funcionalidade

de editor é executado, a qual sinaliza o uso da *interface* de rede para envio das mensagens GOOSE. Na Figura 37 é mostrada a tela do terminal da instância com função de assinante, a qual indica que o VIED recebeu as mensagens GOOSE e as apresentou em tela. Por fim, é possível observar na Figura 38 o tráfego de rede. Foram enviadas mensagens GOOSE na rede *loopback* com endereço 127.0.0.1. Em vermelho são vistas as identificações do bloco de controle das mensagens GOOSE e o *dataset*. Em azul, é possível ver que foram enviadas três informações, sendo a primeira um valor inteiro "1234", um valor de tempo e um outro valor inteiro, assim como mostrado na Figura 37.

Figura 36 – VIED com funcionalidade de editor inicia conexão para envio de mensagens GOOSE.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/goose_publisher
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/l...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/goose_publisher# ./goose_publisher_example lo
Using interface lo

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 – Mensagens GOOSE recebidas pelo assinante.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/goose_subscriber
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/l...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/goose_subscriber# ./goose_subscriber_example lo
Set interface id: lo
GOOSE event:
  stNum: 1 sqNum: 0
  timeToLive: 500
  timestamp: 1639404507.450
  message is valid
  allData: {1234,19840101000000.000Z,5678}
GOOSE event:
  stNum: 1 sqNum: 1
  timeToLive: 500
  timestamp: 1639404507.450
  message is valid
  allData: {1234,19840101000000.000Z,5678}
GOOSE event:
  stNum: 1 sqNum: 2
  timeToLive: 500
  timestamp: 1639404507.450
  message is valid
  allData: {1234,19840101000000.000Z,5678}
GOOSE event:
  stNum: 1 sqNum: 3
  timeToLive: 500
  timestamp: 1639404507.450
  message is INVALID
  allData: {1234,19840101000000.000Z,5678}

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 38 – Tráfego de rede GOOSE.

```

▼ GOOSE
  APPID: 0x03e8 (1000)
  Length: 184
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  ▼ goosePdu
    gocbRef: simpleIOGenericIO/LLN0$G0$gcbAnalogValues
    timeAllowedtoLive: 500
    dataSet: simpleIOGenericIO/LLN0$AnalogValues
    goID: simpleIOGenericIO/LLN0$G0$gcbAnalogValues
    t: Dec 13, 2021 14:08:27.449999988 UTC
    stNum: 1
    sqNum: 0
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDataSetEntries: 3
    ▼ allData: 3 items
      ▼ Data: integer (5)
        integer: 1234
      ▶ Data: binary-time (12)
      ▶ Data: integer (5)

```

Fonte: Próprio Autor.

### 4.2.3 Mensagens SV

Este teste visou observar o recebimento de mensagens SV por parte do VIED. Visto que a *interface* de rede utilizada foi a *loopback*, a MU não foi utilizada neste teste em específico, apenas em testes futuros. Diante desse contexto, foi elaborado um código computacional para um publicador de mensagens SV, o qual publica mensagens SV na rede *loopback* para serem observadas pelo VIED. O arquivo .CID utilizado para criar o VIED foi um genérico (sem fabricante em específico) fornecido pela documentação no site da própria libIEC61850. Foram definidas duas ASDUs para o publicador de SV, "asdu1" e "asdu2", cada uma para enviar dados diferentes de amostras. Os *datasets* definidos para cada ASDU foram chamados de "svpub1" e "svpub2". O VIED deste exemplo recebeu os valores amostrados, bem como as demais características da mensagem, e os apresentou em tela.

Na Figura 39 é vista a tela do terminal onde o publicador de SV é executado, a qual indica o uso da *interface loopback* e o envio das mensagens. Na Figura 40 é apresentada a mensagem recebida pelo VIED, onde são vistas as amostras de número 303 das mensagens dos *datasets* "svpub1" e "svpub2". Na Figura 41 é mostrado o tráfego de rede das mensagens SV. Em destaque amarelo é mostrado que se está utilizando a *interface loopback*, e em verde é visto que os detalhes apresentados são de uma mensagem SV. Em vermelho são mostrados os seus detalhes, que refletem os mesmos itens apresentados na tela do terminal do VIED.

Foi possível observar nos três primeiros testes de validação que os VIEDs são aptos a

Figura 39 – Tela do terminal do publicador de mensagens SV.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documents/dissertação/libiec61850-1.5/examples/sv_publisher
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documents/dissertação/libiec61850-1.5/examples/sv_publisher# ./sv_publisher lo
Using interface lo

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 – Mensagens SV recebidas pelo assinante.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documents/dissertação/libiec61850-1.5/examples/sv_subscriber
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documents/dissertação/libiec61850-1.5/examples/sv_subscriber# ./sv_subscriber lo
Set interface id: lo
svUpdateListener called
svID=(svpub1)
smpCnt: 303
confRev: 1
DATA[0]: 1566.760376
DATA[1]: 30.323530
svUpdateListener called
svID=(svpub2)
smpCnt: 303
confRev: 1
DATA[0]: 3133.520752
DATA[1]: 60.647060

```

Fonte: Próprio Autor.

enviar e a receber mensagens MMS, GOOSE e SV na *interface loopback*. Essas funcionalidades serão aplicadas na LAN da bancada que interliga o VIED aos demais dispositivos. Adiante são apresentados outros testes de validação que exploram função de proteção instantânea de sobrecorrente (50), a seletividade lógica, a função de proteção 87T e a utilização de mais de um VIED por *hardware*.

Figura 41 – Tráfego de rede para mensagens SV.

```

▶ Frame 808: 115 bytes on wire (920 bits), 115 bytes captured (920 bits) on interface lo, id 0
▶ Ethernet II, Src: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:00:cd:01:00:01)
▶ 802.1Q Virtual LAN, PRI: 4, DEI: 0, ID: 0
▼ IEC61850 Sampled Values
  APPID: 0x4000
  Length: 97
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  ▼ savPdu
    noASDU: 2
    ▼ seqASDU: 2 items
      ▼ ASDU
        svID: svpub1
        smpCnt: 303
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)
        seqData: 44c3d85541f2969761ae6b384e978d00
      ▼ ASDU
        svID: svpub2
        smpCnt: 303
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)

```

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4 Função ANSI 50: Sobrecorrente Instantânea

Este teste visa observar o comportamento do VIED programado com a função 50 (sobrecorrente instantânea) da ANSI. O VIED foi criado a partir de um arquivo .CID de um IED SEL 751. Primeiramente foi observada a atuação do IED físico e depois a do VIED para que, por fim, fosse possível fazer uma comparação dos resultados. Foi utilizada a *interface* de rede *ethernet* da LAN. Foram aplicadas correntes elétricas analógicas no painel traseiro do IED físico e na MU, a qual digitalizou os dados e os enviou na LAN para leitura pelo VIED.

##### 4.2.4.1 Operação do IED

Utilizou-se o IED SEL 751 de IP 192.168.1.51, que foi parametrizado de tal forma que uma corrente de 1200 A fosse suficiente para sensibilizar a sua proteção instantânea de sobrecorrente. Além disso, em suas configurações internas foi definido que o TC de proteção teria uma relação 1:400. Dessa forma, ao se aplicar uma corrente de 3 A pela mala de testes diretamente ao módulo de aquisição de corrente, o IED deve atuar.

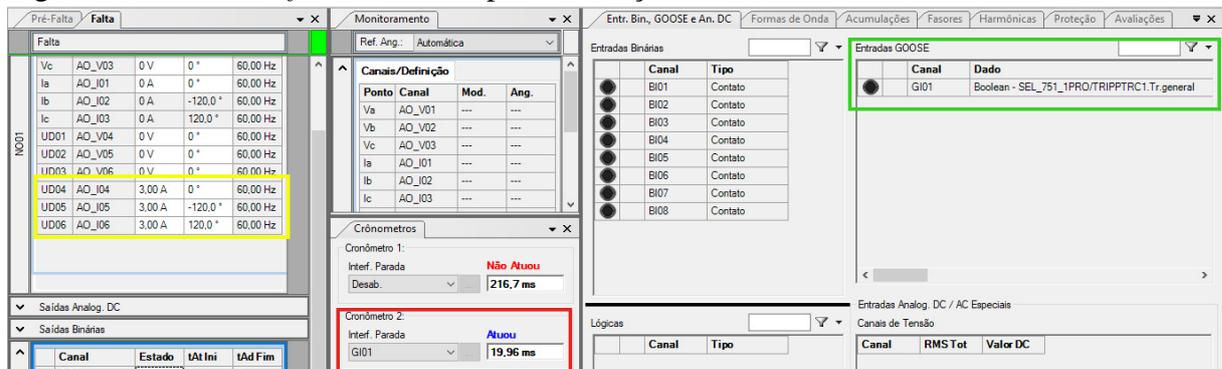
Foi criado um *dataset* chamado "SL\_EDITOR" para enviar a mensagem GOOSE dos seguintes LNs: PRO.P1TPIOC1.Str.general, PRO.TRIPPTRC1.Tr.general e PRO. BRFF1RBRFF1.OpEx. general (definidos necessariamente nesta ordem no *dataset*). O primeiro diz respeito ao valor lógico da função 50; o segundo indica o sinal de *trip*; o último é o valor lógico da função falha de disjuntor.

A mala de testes foi configurada no *software* Manual (ou *Quick*). Na Figura 42, os destaques preto e amarelo mostram que na situação de falta são aplicadas correntes de um sistema trifásico balanceado diretamente no IED com amplitude de 3 A (o que equivale a uma corrente de 1200 A, considerando a relação de transformação dos TCs). Em verde é possível observar que a mensagem GOOSE de *trip* está associada a um canal de entrada (GI01) da mala, ou seja, a mala passa a ser assinante dessa mensagem. Em vermelho observa-se que a mensagem GOOSE do canal GI01 é critério de parada da mala. Isso significa que, quando o sinal lógico do sinal de *trip* for VERDADEIRO, a mala para de injetar corrente, simulando a extinção da falta. O tempo entre o início da falta e a sua extinção foi de 19,96 ms. Destaca-se que esse tempo corresponde à mala perceber a mensagem GOOSE e parar de injetar corrente, e não a um tempo de possível abertura de disjuntor, pois não foram utilizados disjuntores reais nesse experimento. Para se estudar o tempo de extinção total da falta, seria necessário acrescentar o

tempo de abertura dos polos de um disjuntor, que em média é 50 ms.

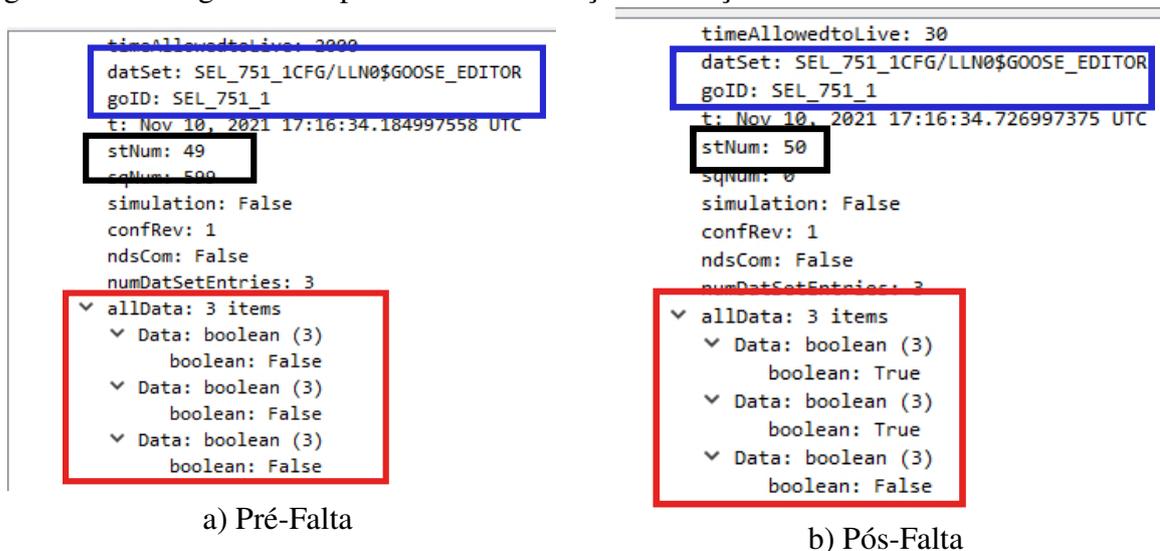
Na Figura 43 pode ser visto o tráfego de mensagens GOOSE enviadas pelo IED antes e após a falta. Tanto na Figura 43a) quanto na Figura 43b), os destaques em azul apresentam os detalhes das mensagens GOOSE (*dataset* e identificação do IED). O destaque preto indica a ordem de envio da mensagem, sendo em a) a mensagem de número 40 e em b) de número 50. Isso indica que as mensagens estão em sequência. O destaque vermelho na Figura 43a) mostra que todos os valores lógicos das mensagens GOOSE são FALSOS. Já na Figura 43b) é mostrado que os valores lógicos da função 50 e o do sinal de *trip* são VERDADEIROS, enquanto o valor lógico da falha de disjuntor é FALSO (a sequência dos nós lógicos que aparecem é a mesma que foi indicada anteriormente).

Figura 42 – Tela do *software* Manual para a situação de sobrecorrente do IED.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 43 – Tráfego de rede para teste de validação da função 50.



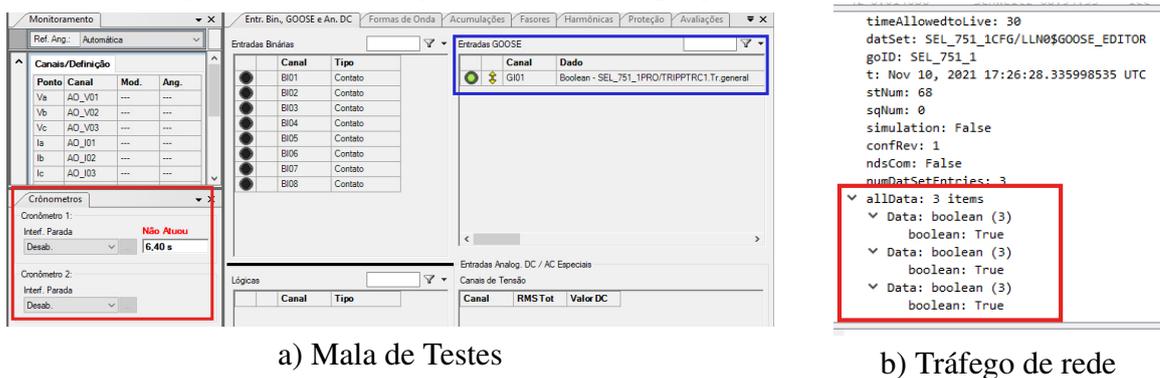
Fonte: Próprio Autor.

Para finalizar o experimento com o IED, foi feita a situação de falha de disjuntor.

Nesse caso, o valor do LD PRO.BRF1RBRF1.OpEx. deve ser VERDADEIRO. Para isso, desabilitou-se a função de parada na mala de testes, como apresentado na Figura 44a) no destaque vermelho. A Figura 44a) também mostra em azul a luz indicadora de recebimento da mensagem de *trip*, que não é atendida. O tráfego de rede é mostrado na Figura 44b), sendo realçados em vermelho os LDs, dos quais está incluso o de falha de disjuntor, que foram para valor lógico VERDADEIRO.

A parte frontal do IED, tanto o seu painel eletrônico quanto os *Light-Emitting Diode* (LED)s, é apresentada na Figura 45 para as duas situações de falta apresentadas: falta sem falha de disjuntor (Figura 45a)) e falta com falha de disjuntor (Figura 45b)). É possível observar que para o primeiro caso os LEDs de *trip* e sobrecorrente instantânea acendem; para o segundo caso, além dos outros dois LEDs, também fica aceso o de falha de disjuntor.

Figura 44 – Situação de falha de disjuntor com o IED programado com a função 50.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4.2 Operação do VIED

O VIED possui a mesma parametrização da comunicação do IED, que foi a fonte do seu arquivo .CID. Isso significa que todos os LDs são os mesmos do exemplo anterior. A mala de testes foi configurada para operar da mesma forma que na seção 4.2.4.1, aplicando os mesmos níveis de corrente agora na MU para digitalização e posterior leitura pelo VIED. Considerando a situação de atuação normal, sem falha de disjuntor, na Figura 46 são apresentados os destaques em preto, amarelo e azul iguais aos da Figura 42. O destaque vermelho, porém, apresenta um tempo de atuação de 1,85 ms, que é menor que o do IED. Isso significa que o VIED consegue trocar mensagens mais rápido que um IED na situação simples de falta trifásica a nível que sensibilize a proteção 50.

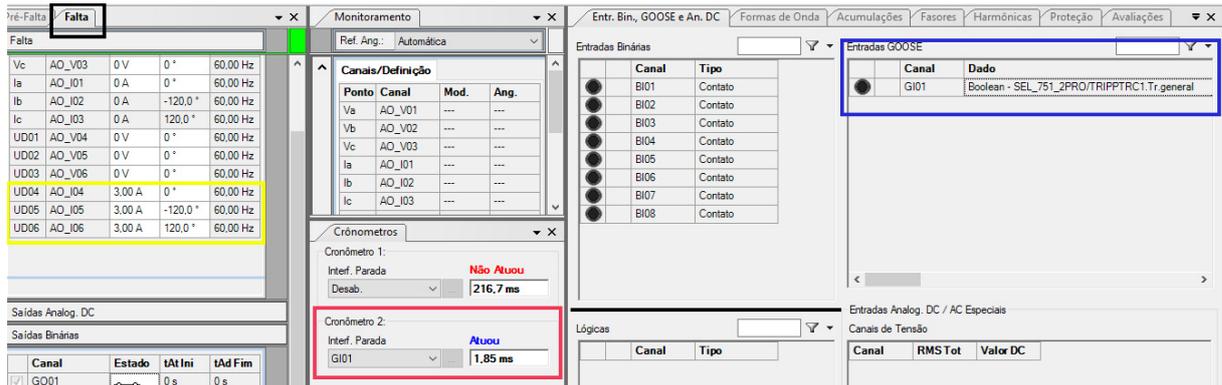
Figura 45 – SEL 751 - Operação da função 50.



a) Situação sem falha de disjuntor.

b) Situação de falha de disjuntor.

Fonte: Próprio Autor.

Figura 46 – Tela do *software* Manual para a situação de sobrecorrente do VIED.

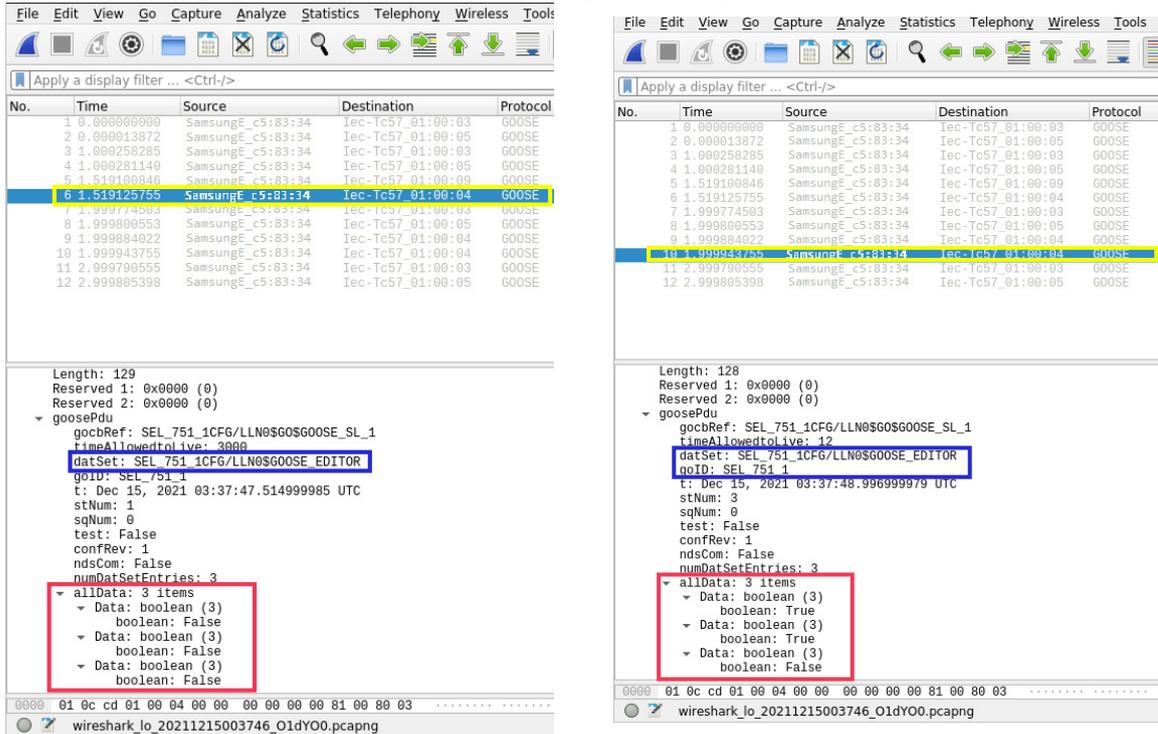
Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 47a) é apresentado o tráfego de rede para o VIED na ocorrência da falta sem falha de disjuntor. Em destaque amarelo observa-se que a fonte das mensagens GOOSE passou a ser o computador da bancada onde reside o VIED e não mais o IED SEL 751. Ao se comparar os demais dados em destaque (retângulos azul e vermelho) com os dados da Figura 43, percebe-se que são iguais. Da mesma forma, na Figura 48 é apresentado o tráfego de rede na ocorrência de falta, mas com falha de disjuntor. Quando se compara a Figura 48 com a Figura 44, são vistos os mesmos dados, à exceção da fonte das mensagens GOOSE, que na nova situação passou a ser o computador da bancada.

À semelhança do que foi visto para o IED na Figura 45, o VIED também apresenta indicações de sua atuação. Nesse caso, a indicação é por mensagens no terminal do Ubuntu, como mostrados na Figura 49 para a situação sem falha e na Figura 50 para a situação com falha.

Portanto, o VIED comportou-se de maneira adequada diante da ocorrência simples de uma falta trifásica que sensibilizou a proteção instantânea de sobrecorrente. Seu tempo de atuação foi, inclusive, melhor que o do IED e as mensagens GOOSE enviadas foram iguais às enviadas pelo SEL 751 da bancada.

Figura 47 – Tráfego de rede para teste de validação da função 50 do VIED.



a) Pré-Falta

b) Pós-Falta

Fonte: Próprio Autor.

Figura 48 – Tráfego de rede para situação de falha com VIED programado com a função 50.

No.	Time	Source	Destination	Protocol
1	0.000000000	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE
2	0.000015433	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:05	GOOSE
3	0.999904032	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE
4	0.999930892	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:05	GOOSE
5	1.897126285	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
6	1.897153285	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
7	1.999470783	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE
8	1.999489351	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:05	GOOSE
9	1.999558895	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
10	1.999610875	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
11	1.999670873	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
12	2.999647173	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:05	GOOSE
13	2.999663677	SamsungE_c5:83:34	Iec-Tc57_01:00:05	GOOSE

Length: 128  
 Reserved 1: 0x0000 (0)  
 Reserved 2: 0x0000 (0)  
 goosePdu  
 gcbRef: SEL\_751\_1CFG/LLN0\$G0\$GOOSE\_SL\_1  
 timeAllowedToLive: 12  
 datSet: SEL\_751\_1CFG/LLN0\$G00SE\_EDITOR  
 goID: SEL\_751\_1  
 t: Dec 15, 2021 04:01:19.067999958 UTC  
 stNum: 4  
 sqNum: 0  
 test: False  
 confRev: 1  
 ndsCom: False  
 numDatSetEntries: 3  
 allData: 3 items  
 Data: boolean (3)  
 boolean: True  
 Data: boolean (3)  
 boolean: True  
 Data: boolean (3)  
 boolean: True

Fonte: Próprio Autor.

Figura 49 – VIED - Mensagens na tela do terminal para a operação da função 50 sem falha de disjuntor.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_Seletividade_Editor (cópia)
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/l...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_Seletividade_Editor (cópia)# ./server_examp
le_goose enp1s0f1
Using GOOSE interface: enp1s0f1
Corrente de curto circuito
Proteção Instantânea (50)
Sinal de trip enviado ao disjuntor
Falta Extinta(disjuntor aberto)

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 50 – VIED - Mensagens na tela do terminal para a operação da função 50 sem falha de disjuntor.

```

root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_Seletividade_Editor (cópia)
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/l...
root@claudivan-Aspire-A315-41: /home/claudivan/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_Seletividade_Editor (cópia)# ./server_examp
le_goose enp1s0f1
Using GOOSE interface: enp1s0f1
Corrente de curto circuito
Proteção Instantânea (50)
Sinal de trip enviado ao disjuntor
Falta NÃO Extinta(Falha de Disjuntor)

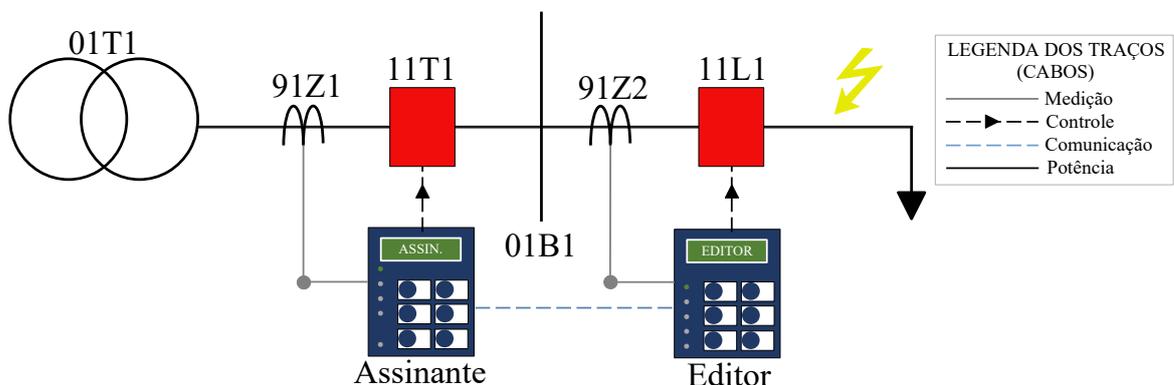
```

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5 Seletividade Lógica

De forma semelhante ao que foi feito para a função 50, é feito para a seletividade lógica: serão apresentados os resultados obtidos para os IEDs e para o VIED. Na Figura 51 é mostrado o diagrama que servirá como referência para toda esta seção. Os dispositivos "Assinante" e "Editor" podem vir a ser IED ou VIED, de acordo com a situação. O assinante é um dispositivo que irá enviar sinais de controle ao disjuntor de barra 11T1, enquanto o editor é o dispositivo que irá enviar mensagens ao disjuntor de linha 11L1. Por questão de conveniência, optou-se por representar apenas um alimentador, mas entende-se nesse contexto a possibilidade de existência de outros alimentadores conectados ao barramento. Considerou-se que os dispositivos de proteção estão muito próximos, de tal forma que uma falta de grande amplitude no local indicado pela seta amarela seja suficiente para sensibilizar a função de proteção instantânea do editor e do assinante. Dessa forma, para que haja a eliminação da falta e os demais alimentadores não sejam afetados, apenas o dispositivo mais próximo à falta deve atuar, enviando sinal de *trip* ao seu disjuntor (11L1). Assim, é necessário que haja comunicação por meio de mensagens GOOSE entre os dois dispositivos, de tal forma que, mesmo percebendo a falta, o assinante espere a atuação preferencial do editor. Somente em caso de falha do disjuntor do alimentador é que o assinante deve enviar o sinal de *trip* ao disjuntor de barramento (11T1). A interface de rede utilizada foi a *Ethernet*, sendo as mensagens GOOSE vistas por todos os dispositivos da LAN.

Figura 51 – Diagrama base para experimentos de validação de seletividade lógica.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5.1 Operação dos IEDs na seletividade lógica

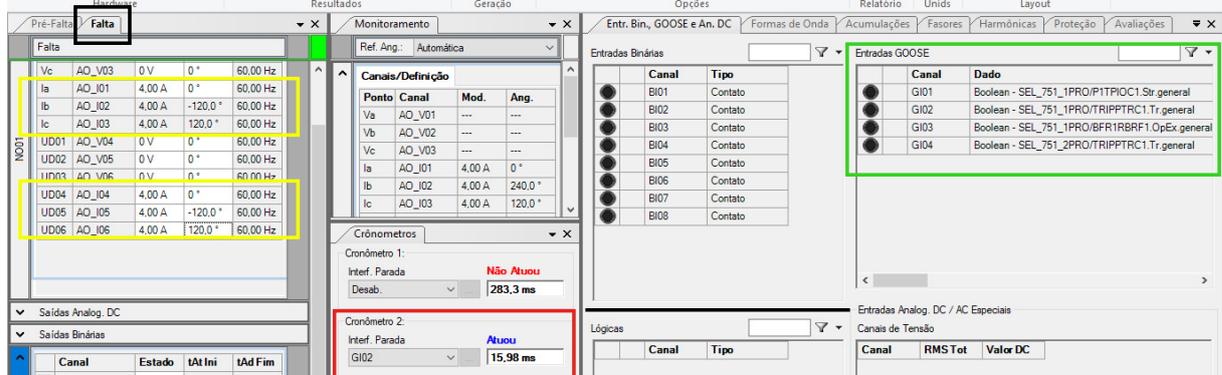
Foram utilizados dois IEDs, o SEL 751(1) como o editor, e o SEL 751 (2), como o assinante, com os endereços IP fixos de acordo com a Tabela 6. Foram abordadas as situações de seletividade lógica com e sem falha de disjuntor. Os IEDs foram configurados para receber corrente de um TC com relação de transformação 1:400. Uma corrente de 1600 A foi suficiente para sensibilizar as proteções instantâneas de sobrecorrente de ambos.

Para o IED editor, que é um dispositivo de nome "SEL\_751\_1", foi criado um *dataset* chamado "SL\_EDITOR" para enviar a mensagem GOOSE dos seguintes LNs: PRO. P1TPIOC1. Str. general, PRO. TRIPPTRC1. Tr. general e PRO. BRFF1RBRF1. OpEx. general (definidos necessariamente nesta ordem no *dataset*). O primeiro diz respeito ao valor lógico da função 50; o segundo indica o sinal de *trip*; o último é o valor lógico da função falha de disjuntor. Para o IED assinante, que é um dispositivo de nome "SEL\_751\_2", foi criado um *dataset* chamado "SL\_ASSINANTE" para enviar a mensagem GOOSE dos seguintes LNs: PRO. P1TPIOC1. Str. general e PRO. TRIPPTRC1. Tr. general. Seus significados são os mesmos apresentados anteriormente. O procedimento nos *softwares* dos IEDs para configurar a seletividade não é apresentado, mas pressupõe-se que a parametrização foi feita, pois é uma etapa necessária. Foi definido que, quando a mensagem de *trip* do editor for recebida, o assinante não deverá enviar o sinal de *trip* ao seu disjuntor. Entretanto, em caso de falha de disjuntor, o editor deverá enviar a mensagem de falha em 500 ms após a detecção da falta, e o assinante deverá enviar uma mensagem de *trip* ao seu disjuntor e apresentar a informação "REMOTE TRIP" em seu painel frontal.

Na Figura 52 é apresentada a configuração da mala de testes para a situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor. Os destaques em amarelo mostram que aos dois IEDs foram aplicadas correntes trifásicas balanceadas de amplitude de 4A, visto serem as correntes aplicadas diretamente no seu módulo de aquisição de corrente. Isso significa que os dispositivos entenderam que no sistema passava uma corrente trifásica de 1600A. O destaque em verde apresenta quais mensagens GOOSE a mala deverá observar na rede: as mensagens dos canais GI01 a GI03 dizem respeito às mensagens do editor e a mensagem do canal GI04 à do assinante. Em vermelho é visto que o critério de parada da mala de testes foi a mensagem de *trip* do editor, pois, como a situação é sem falha de disjuntor, ao enviar *trip* supõe-se a eliminação da falta. O tempo em que a mala percebeu a mensagem e parou de enviar corrente ao sistema foi de 15,98 ms. O tempo não inclui a abertura de contatos de um disjuntor, pois não se trabalhou com esse

tipo de equipamento nos testes, apenas emulação da mala.

Figura 52 – Tela do *software* Manual para a situação de seletividade lógica com dois IEDs.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 53 é apresentado o painel frontal dos dois IEDs, onde o da direita é o editor e o da esquerda é o assinante. É visto que os LEDs de *trip* e proteção instantânea ficaram em vermelho no editor, indicando que foi percebida a falta e enviado o sinal de *trip*, enquanto os LEDs que apresentam as mesmas informações no assinante indicam a não atuação.

Figura 53 – Painel frontal dos IEDs após situação de falta sem falha de disjuntor (seletividade lógica).

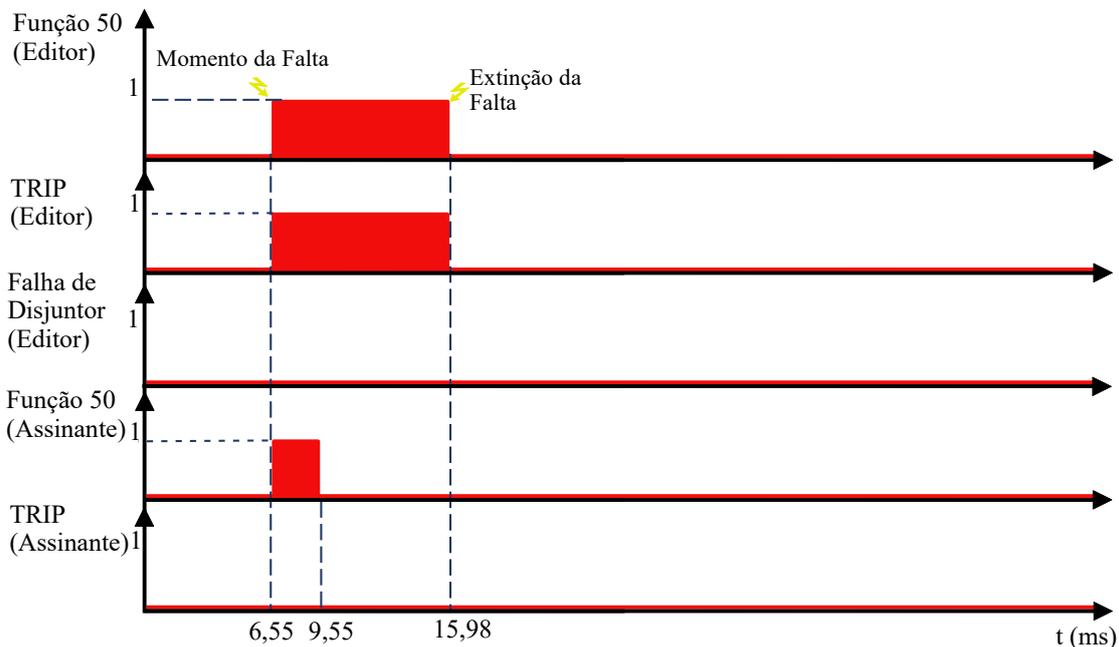


Fonte: Próprio Autor.

Foram feitas leituras do tráfego de rede por meio do *software* Wireshark. Entretanto, diferentemente dos exemplos de validação anteriores, não se mostrará os *prints* de tela. São

muitos dados que precisam ser levados em consideração e, portanto, optou-se por fazer um gráfico com o compilado de informações das mensagens GOOSE obtidas pelo mesmo *software*. Na Figura 54 são apresentas as mensagens GOOSE envolvidas no teste. No momento da falta, no tempo 6,55 ms, a falta ocorreu, levando os valores lógicos da função de proteção instantânea e de *trip* do editor para VERDADEIRO (valor 1). No tempo 15,98 ms a falta foi extinta e o sinais lógicos das mensagens voltaram a FALSO (valor 0). A função 50 do assinante foi sensibilizada por um tempo de 3 ms e depois retornou a zero. Esse tempo desde a sensibilização da função 50 até o seu retorno a zero pode até ser menor, no entanto esse foi o menor tempo da amostra de tráfego de rede fornecido pelo Wireshark. A função de *trip* do assinante não foi sensibilizada, pois foi bloqueada pela configuração de seletividade lógica. A mensagem de falha de disjuntor do editor permaneceu em valor FALSO o tempo todo, como se era esperado para a seletividade lógica sem falha de disjuntor.

Figura 54 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com dois IEDs na situação sem falha de disjuntor.

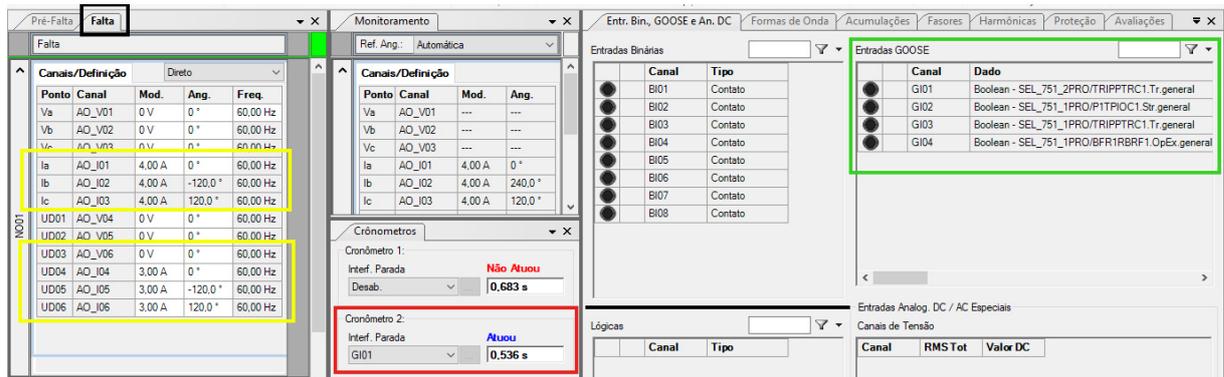


Fonte: Próprio Autor.

Também foi avaliado o comportamento dos IEDs na situação de falha de disjuntor. O IED físico editor foi projetado para, após o envio do sinal de *trip*, aguardar um tempo de 500 ms. Caso a corrente de falta não fosse extinta no tempo pré-determinado, a mensagem de falha de disjuntor (50BF) deveria ser enviada. Esse tempo é programável e depende do estudo de proteção e da aplicação feita pelo projetista. Na Figura 55 é mostrado que o critério de parada

para essa situação é a entrada GOOSE GI01, que é o sinal de *trip* do assinante. Este sinal só deve ser enviado após o sinal de falha de disjuntor ser enviado pelo editor. O tempo para a mala parar de injetar corrente no sistema foi de 536 ms. Na Figura 56 é apresentado o painel frontal dos IEDs, no qual o editor mostra a situação de falha de disjuntor acendendo o último LED, que está em vermelho. O assinante apresentou a mensagem "REMOTE TRIP", indicando que não enviou o *trip* por conta da função 50, mas por conta da mensagem de falha de disjuntor do editor.

Figura 55 – Tela do *software* Manual para a situação de seletividade lógica com falha e dois IEDs.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 56 – Painel frontal dos IEDs após situação de falta com falha de disjuntor (seletividade lógica).

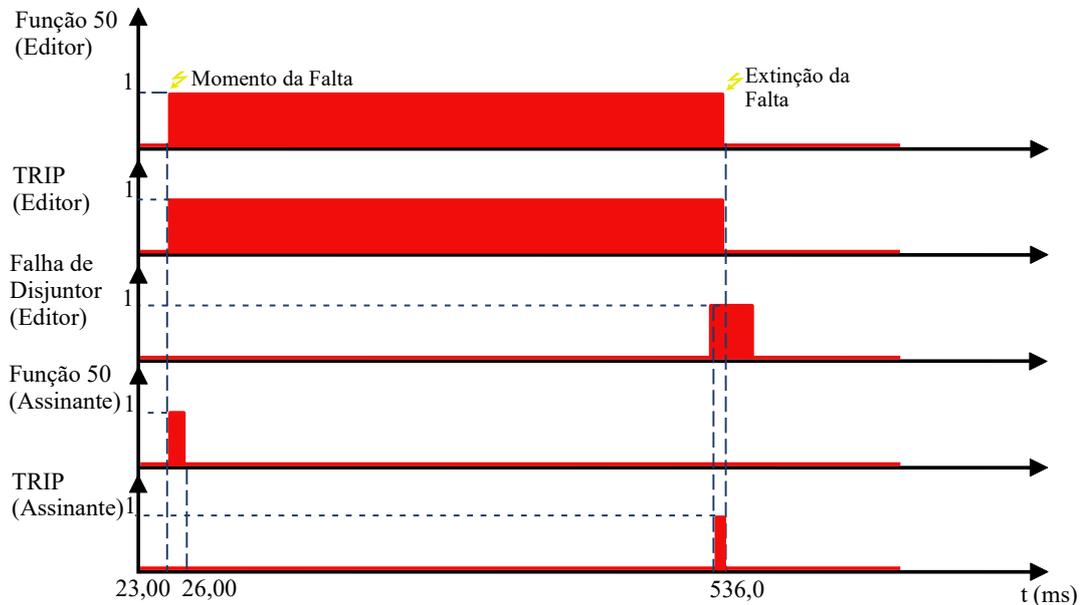


Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 57 é visto que a partir do momento da falta, a função 50 e o sinal de *trip* do editor foram para valor 1. A Função 50 do assinante foi a 1, mas rapidamente voltou a zero por conta da seletividade lógica. Entretanto, a falta não foi extinta ao se enviar o sinal de *trip* do editor, o que, após 500 ms, foi caracterizado como falha de disjuntor e a mensagem de falha

foi enviada. Ao perceber a mensagem de falha, o assinante enviou o sinal de *trip*, que, por fim, promoveu a eliminação da falha.

Figura 57 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com dois IEDs na situação de falha de disjuntor.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5.2 Operação do VIED na seletividade lógica

Após observar o modelo de funcionamento dos IEDs na seletividade lógica, passa-se a explorar a utilização dos VIEDs para esta mesma aplicação. Buscou-se trabalhar com um VIED e um IED físico simultaneamente para demonstrar a possibilidade de sua intercomunicação, revesando as suas funções em dois momentos distintos. Em um primeiro momento, o VIED assumiu o papel de assinante e o IED físico o de editor, enquanto em um segundo momento o VIED assumiu o papel de editor e o IED físico o de assinante. Em ambas as situações, o VIED foi criado a partir dos arquivos .CID dos IEDs da subseção 4.2.5.1, possuindo os mesmos LNs. As leituras de corrente pelo IED físico e pelo VIED seguiram o mesmo procedimento apresentado na seção 4.2.5.1.

#### 4.2.5.3 VIED assinante na seletividade lógica sem falha de disjuntor

Agora passa-se a explorar a situação em que o IED é o editor e o VIED é o assinante na situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor. Quando percebeu a corrente de falha, o

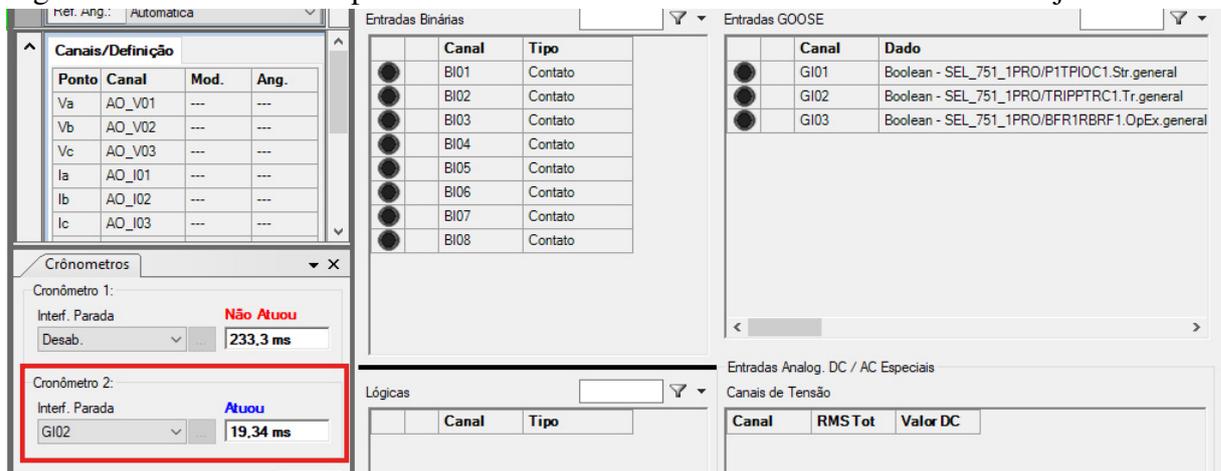
IED enviou as mensagens GOOSE de sobrecorrente instantânea e de *trip* com valor 1 na rede. Ao perceber as mensagens, o VIED permaneceu com o sinal de *trip* em valor 0 e apresentou uma mensagem em tela indicando que não iria atuar por conta da seletividade lógica. O IED editor enviou outra mensagem com a função de sobrecorrente instantânea e de *trip* com valor 0, e o VIED entendeu que a falta foi extinta, nada fez, e a mala parou de injetar corrente.

Na Figura 58 é visto que o critério de parada da mala era a mensagem GOOSE do sinal de *trip* do IED editor. É possível observar que o tempo para a parada foi de 19,34 ms. Na Figura 59 é apresentada a mensagem do VIED assinante no terminal do Ubuntu, a qual indica a percepção da falta por meio das mensagens GOOSE do editor, mas que não houve atuação por conta da configuração de seletividade.

Na Figura 60 é apresentado comportamento semelhante ao mostrado na Figura 54. Uma das diferenças é o tempo em que a função 50 do assinante (VIED) ficou em sinal lógico VERDADEIRO. Esse tempo é de apenas 1ms, que foi definido em código, enquanto esse tempo captado pelo Wireshark para o IED assinante havia sido de 3 ms.

Portanto, conclui-se que o VIED operando na função de assinante se comporta de forma semelhante ao IED na situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor.

Figura 58 – Mala de testes para seletividade com VIED assinante sem falha de disjuntor.



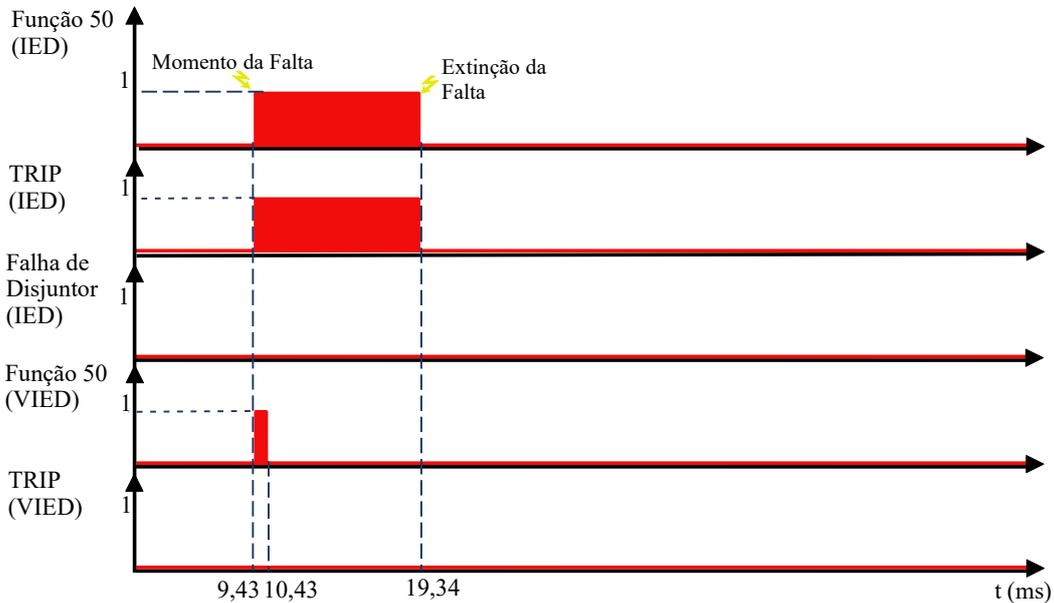
Fonte: Próprio Autor.

Figura 59 – Mensagem apresentada pelo VIED assinante no terminal do Ubuntu na situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor.

```
Using GOOSE interface: enp2s0
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 60 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com IED e VIED na situação sem falha de disjuntor.



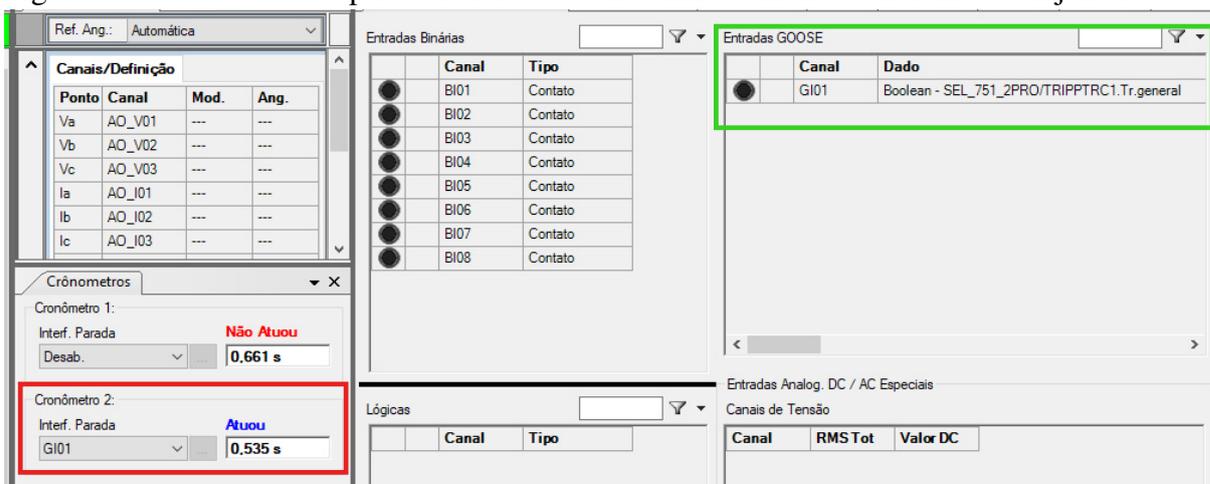
Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5.4 VIED assinante na seletividade lógica com falha de disjuntor

Ao trabalhar com a situação de falha de disjuntor, o procedimento é semelhante ao apresentado na subseção 4.2.5.1. Na Figura 61 são vistos nos destaques vermelho e verde que o critério de parada da mala é o sinal de *trip* do VIED. O tempo de parada foi de 535 ms. Na Figura 62 é apresentada a mensagem do VIED no terminal do Ubuntu. Primeiramente, o VIED indicou que não iria atuar por conta da seletividade lógica, mas quando recebeu a mensagem de falha de disjuntor do IED editor, o relé virtual enviou o sinal de *trip* para abertura de disjuntor.

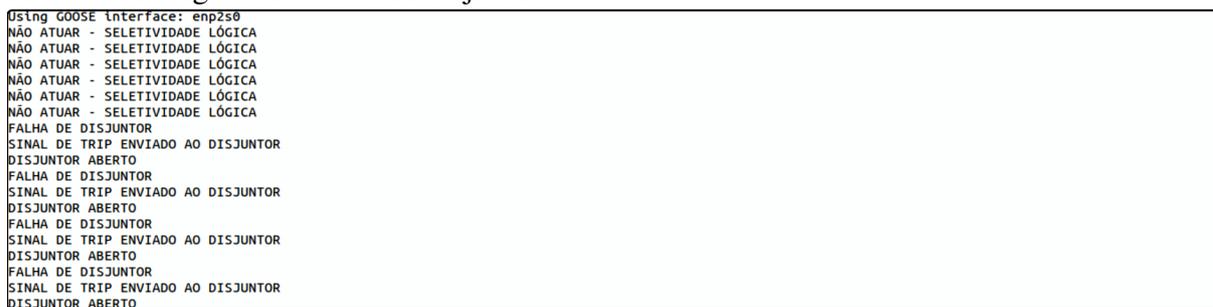
Na Figura 63 é mostrada a evolução das mensagens GOOSE ao longo do tempo a partir de dados do Wireshark. Seu comportamento é semelhante ao apresentado na Figura 57. Portanto, o VIED atua de maneira esperada como assinante e semelhante a um IED físico na situação seletividade lógica com falha de disjuntor.

Figura 61 – Mala de testes para seletividade com VIED assinante com falha de disjuntor.



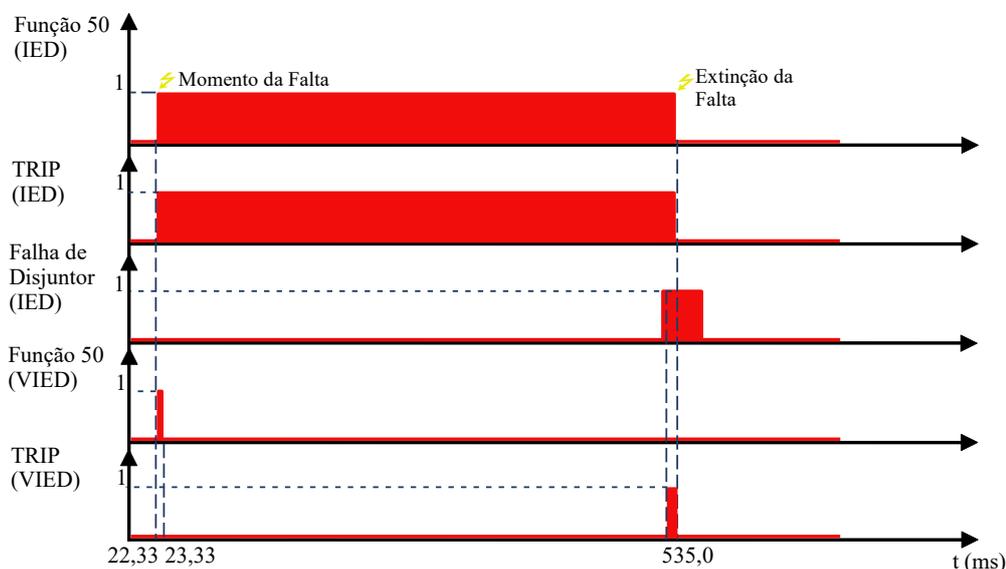
Fonte: Próprio Autor.

Figura 62 – Mensagem apresentada pelo VIED assinante no terminal do Ubuntu na situação de seletividade lógica com falha de disjuntor.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 63 – Gráfico com as mensagens GOOSE para seletividade lógica com IED e VIED na situação com falha de disjuntor.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.5.5 VIED editor na seletividade lógica sem falha de disjuntor

Agora passa-se a explorar a situação em que o IED é o assinante e o VIED é o editor na seletividade lógica sem falha de disjuntor. Quando o VIED percebeu a corrente de falta, enviou as mensagens GOOSE de sobrecorrente instantânea e de *trip* com valor 1 para a rede. Ao perceber as mensagens, o IED permaneceu com o sinal de *trip* em valor 0. A mala de testes, que tinha como critério de parada a mensagem GOOSE da função 50, parou de injetar corrente. Com a extinção da falta, o VIED editor enviou outra mensagem com a função de sobrecorrente instantânea e de *trip* com valor 0. O IED entendeu que a falta fora extinta, nada faz.

Na Figura 64 é apresentada a tela do *software* da mala de testes para a situação. O critério de parada (em destaque vermelho) era a entrada GOOSE GI01, que referencia à mensagem de proteção 50 (destaque verde). Esse critério de parada era diferente do apresentado na Figura 52, porém, não há problemas, pois tanto o sinal de *trip* quanto o valor lógico da função 50 são levados a 1 ao mesmo tempo, como mostrado na Figura 54. O destaque vermelho mostra que o tempo para a mala de testes perceber a mensagem GOOSE foi 342,8 ms, ao passo que para o IED da Figura 52 foi de 15,98 ms. Isso dá uma diferença de 326,82 ms, o que é inaceitável para a proteção de um SEP. Dentre as possíveis causas para esse problema pode-se citar a necessidade de adequações no código computacional e a configuração do *hardware* do *notebook*. As soluções podem envolver uma busca por problemas no código computacional que interfiram na velocidade de execução e, posteriormente, uma análise da necessidade de mais poder de processamento do *hardware*. Diante disso, não serão apresentados os outros dados (resposta em tela do VIED e tráfego de rede), pois o VIED não passou no teste de tempo de resposta atuando como editor.

Figura 64 – Mala de testes para seletividade com VIED editor sem falha de disjuntor.

The screenshot shows the software interface for testing a fault scenario. The 'Falta' (Fault) tab is active, displaying a table of channels and their parameters. The 'Entradas GOOSE' (GOOSE Inputs) table is highlighted in green, showing GI01 as the stop criterion. The 'Cronômetros' (Timers) section shows a red box around 'Cronômetro 2' with a value of 342,8 ms, indicating the time taken to receive the GOOSE message.

Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.
Va	AO_V01	0 V	0°	60,00 Hz
Vb	AO_V02	0 V	0°	60,00 Hz
Vc	AO_V03	0 V	0°	60,00 Hz
Ia	AO_I01	5,00 A	0°	60,00 Hz
Ib	AO_I02	5,00 A	-120,0°	60,00 Hz
Ic	AO_I03	5,00 A	120,0°	60,00 Hz
UD01	AO_V04	0 V	0°	60,00 Hz
UD02	AO_V05	0 V	0°	60,00 Hz
UD03	AO_V06	0 V	0°	60,00 Hz
UD04	AO_I04	0 A	0°	60,00 Hz
UD05	AO_I05	0 A	-120,0°	60,00 Hz
UD06	AO_I06	0 A	120,0°	60,00 Hz

Canal	Dado
GI01	Boolean - SEL_751_1PRO/ITPTIOC1.Str.general
GI02	Boolean - SEL_751_1PRO/TRIPTRC1.Tr.general
GI03	Boolean - SEL_751_1PRO/BFR1BRF1.OpEx.general
GI04	Boolean - SEL_751_2PRO/TRIPTRC1.Tr.general

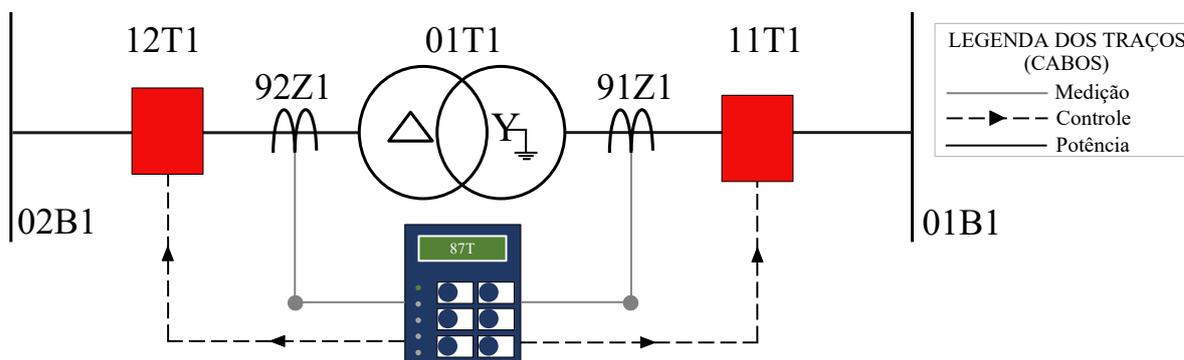
Cronômetro	Interf. Parada	Valor
Cronômetro 1:	Interf. Parada	Não Atuou
	Desab.	466,6 ms
Cronômetro 2:	Interf. Parada	Atuou
	GI01	342,8 ms

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.6 Função ANSI 87T: Diferencial de Transformador

O conceito da função de proteção ANSI 87T foi apresentado na seção 2.3.3. Conforme destacado na seção 3.2.2, o código da função 87T possui simplificações, visto não ter sido considerada a corrente de restrição, mas apenas a corrente diferencial. O diagrama elétrico unifilar do sistema de potência trifásico utilizado para esse exemplo de validação é o apresentado na Figura 65, no qual são ilustrados dois barramentos, dois TCs, um transformador de potência, uma MU e dois disjuntores comandados pelo VIED com a função 87T. Seguindo o mesmo procedimento dos testes anteriores, a mala de testes fez a aplicação de correntes trifásicas apenas com conteúdo de frequência fundamental (60 Hz) na MU, a qual as digitalizou e enviou no barramento de processos para leitura pelo VIED. Foram aplicados seis sinais de corrente, um para cada linha do lado de alta do transformador e um para cada linha do lado de baixa conforme as especificações de amostragem da seção 4.1.5.

Figura 65 – Diagrama para o teste da Função 87T.



Fonte: Próprio Autor.

As correntes de alta foram enviadas em um ASDU com uma identificação (*svID*) "IEDnameMU0101", e as correntes de baixa com *svID* chamado "IEDnameMU0201". O VIED foi criado a partir de um arquivo .CID de um IED da Schneider, parametrizado no *software* CET850. Os seus LNs configurados foram, nessa exata ordem: comando de abertura do disjuntor (CSWI), *status* do disjuntor (XCBR), sinal de *trip* (PTRC), valor da função de sobrecorrente (A51PTOC) e medida da corrente da linha (MMXU). Às correntes *Root Mean Square* (RMS) do lado de baixa de 01T1 foram aplicadas a relação de transformação para que elas fossem vistas na mesma base das correntes do lado de alta. Feito isso, as amplitudes das correntes foram comparadas e a diferença foi vista em níveis percentuais, conforme a equação 2.1.

Foi considerado que 01T1 possuía os mesmos dados de placa apresentados no exem-

plo de parametrização do manual de utilização da série SEPAM 80 da Schneider (SCHNEIDER ELECTRIC, 2009) e que são apresentados na Tabela 7. Se a corrente diferencial normalizada entre as correntes de alta e de baixa de 01T1,  $I_{ds}$  da equação 2.3, apresentar um valor maior que 30%, o VIED envia o comando de abertura aos disjuntores 12T1 e 11T1; caso contrário, nada é feito. Diferentes situações podem ser exploradas de forma que o VIED com a função 87T atue.

A primeira situação é considerar as correntes dos lados de alta e de baixa com valores não nulos, mas  $I_{ds}$  com valor superior a 30%. Isso indica que existe alguma fuga interna de corrente em 01T1. Uma segunda situação é a que apresenta corrente do lado de baixa nula. Ainda uma última situação é a que apresenta corrente do lado de baixa maior que a corrente do lado de alta, que significa uma corrente de fluxo reverso indesejada.

Tabela 7 – Dados de Placa do Transformador 01T1.

Grandeza Elétrica	Símbolo	Valor
Potência nominal	S	4MVA
Tensão de alta	$U_{n1}$	20kV
Tensão de Baixa	$U_{n2}$	1kV
Corrente nominal de alta	$I_{n1}$	116A
Corrente nominal de baixa	$I_{n2}$	2,3kA
Corrente de <i>inrush</i> instantânea de pico	$i_{nrush}$	820A

Fonte: Próprio Autor.

Após receber as correntes da MU, o VIED percebeu a corrente do lado de alta de valor 137,7 A e a corrente do lado de baixa, após as devidas transformações, com valor de 100,1 A, como visto no terminal de execução da Figura 66. O VIED realizou os devidos cálculos utilizando a equação 2.3, resultando em  $I_{ds}$  de 32%. Dessa forma, o VIED apresentou a mensagem de falta no terminal e enviou uma mensagem GOOSE com o comando de abertura e *status* de disjuntor.

Figura 66 – Mensagem de tela do VIED ao perceber uma diferença de corrente maior que 30%.

```

root@grel-All-Series: /home/grel/Documentos/Claudian/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_87
svID=(IEDNameMU0101)
smpCnt: 2938
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no primário é: 137.672791 [A]
A corrente RMS da linha B no primário é: 100.981453 [A]
A corrente RMS da linha C no primário é: 100.981453 [A]
svID=(IEDNameMU0201)
smpCnt: 2938
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no secundário refletida no primário é: 100.106613 [A]
A corrente RMS da linha B no secundário refletida no primário é: 102.075745 [A]
A corrente RMS da linha C no secundário refletida no primário é: 101.415268 [A]
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha A -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
root@grel-All-Series: /home/grel/Documentos/Claudian/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Dtss_87#

```

Fonte: Próprio Autor.

Nas Figuras 67a) e 67b), respectivamente, são vistas as mensagens SV enviadas na rede e a mensagem GOOSE do VIED. Enquanto na Figura 67a) é visto que a mensagem captada pelo VIED no momento apresentado em tela na Figura 66, na Figura 67b) é mostrado que de fato foi enviado o comando de abertura de disjuntor, o qual foi aberto.

Figura 67 – Tráfego de rede para teste de validação da função 87T.

```

Ethernet II, Src: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:0c:cd:01:00:01)
802.1Q Virtual LAN, PRI: 4, DEI: 0, ID: 0
IEEE802.3 Standard Values
  APPID: 0x4000
  Length: 105
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  savPdu
  noASDU: 2
  seqASDU: 2 items
  ASDU
    svID: svpub1
    smpCnt: 80
    confRef: 1
    smpSynch: none (0)
    seqData: c1f96ab2c20ba275430413f061c51d1594395800
  ASDU
    svID: svpub2
    smpCnt: 80
    confRef: 1
    smpSynch: none (0)
    seqData: c288669c39e82a243bea42761c51d1594395800

```

a) Mensagens SV recebidas pelo VIED da função 87T.

```

datSet: assinanteLD0/LLN0$SCH_ASSINANTE
goID: SCH1
t: Dec 24, 2021 01:06:29.580999970 UTC
stNum: 4
sqNum: 0
test: False
confRev: 10001
ndsCom: False
numDatSetEntries: 5
  allData: 5 items
    Data: bit-string (4)
      Padding: 6
      bit-string: 80
    Data: bit-string (4)
      Padding: 6
      bit-string: 80
    Data: boolean (3)
      boolean: True
    Data: boolean (3)
      boolean: False
    Data: floating-point (7)
      floating-point: 0800000000

```

b) Mensagem GOOSE enviada.

Fonte: Próprio Autor.

As demais situações exploradas apresentam comportamento de rede semelhante e o VIED envia as mesmas mensagens GOOSE. Portanto, são apresentadas somente as respostas de tela. Na Figura 68 é apresentada a resposta para quando a corrente do lado de baixa é nula, enquanto na Figura 69 é apresentada a tela para a situação de fluxo de corrente reverso.

Figura 68 – Mensagem de tela do VIED para corrente do lado de baixa nula.

```

root@grei-All-Series: /home/grei/Documents/Claudivan/dissertação/libiec61850-1.5/examples/DIss_87
svID=(IEDNameMU0101)
smpCnt: 1417
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no primário é: 104.226303 [A]
A corrente RMS da linha B no primário é: 100.517860 [A]
A corrente RMS da linha C no primário é: 100.517860 [A]
svID=(IEDNameMU0201)
smpCnt: 1417
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no secundário refletida no primário é: 0.614487 [A]
A corrente RMS da linha B no secundário refletida no primário é: 1.531555 [A]
A corrente RMS da linha C no secundário refletida no primário é: 2.762603 [A]
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha A -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha B -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha C -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
root@grei-All-Series: /home/grei/Documents/Claudivan/dissertação/libiec61850-1.5/examples/DIss_87#

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 69 – Mensagem de tela do VIED para fluxo reverso de corrente.

```

root@grei-All-Series: /home/grei/Documents/Claudivan/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_87
svID=(IEDNameU0101)
snpCnt: 1470
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no primário é: 102.791992 [A]
A corrente RMS da linha B no primário é: 99.914536 [A]
A corrente RMS da linha C no primário é: 99.914536 [A]
svID=(IEDNameU0201)
snpCnt: 1470
confRev: 1
A corrente RMS da linha A no secundário refletida no primário é: 138.671585 [A]
A corrente RMS da linha B no secundário refletida no primário é: 138.711807 [A]
A corrente RMS da linha C no secundário refletida no primário é: 140.741501 [A]
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha A -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha B -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
ATUAR FUNÇÃO 87T: Diferença maior que 30% na linha C -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E 11T1 ENVIADO
-----
root@grei-All-Series:/home/grei/Documents/Claudivan/dissertação/libiec61850-1.5/examples/Diss_87#

```

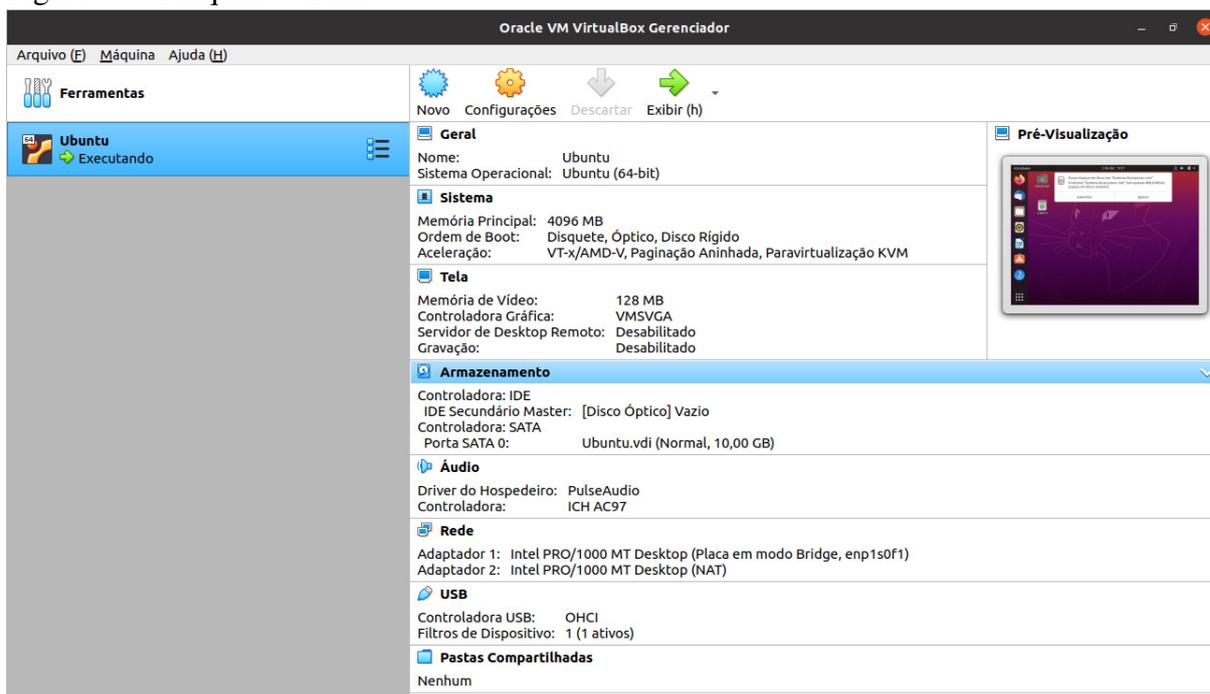
Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.7 Utilização de mais de um VIED

Essa seção apresenta a possibilidade de se trabalhar com mais de um VIED em um mesmo *hardware*. Existem diferentes formas de se buscar fazer isso. Uma delas é modificar a porta que cada servidor VIED criado envia e recebe mensagens MMS. Outra forma, que foi a utilizada, é criar máquinas virtuais (MV) e criar os VIEDs dentro delas. Pode-se criar quantas MV se desejar, sendo o *hardware* uma limitação, já que a redução da velocidade de processamento diminui à medida que são criadas mais MVs. Na Figura 70 é vista a tela de uma MV com sistema operacional Ubuntu criada no *software* Oracle VM VirtualBox. A MV utiliza a mesma interface de rede *Ethernet* do computador.

Foi criado um VIED na MV com a função de assinante a partir do arquivo .CID de um IED da Schneider, enquanto no sistema operacional principal, que também era Ubuntu, foi criado um VIED a partir do arquivo .CID de um IED da SEL. Trabalhou-se com os dois VIEDs numa situação de seletividade lógica e as mensagens GOOSE oriundas de sua interação foram enviadas de forma que os dispositivos conectados na LAN pudessem percebê-las. O tráfego de rede foi captado pelo Wireshark, sendo as mensagens do editor apresentadas na Figura 71a), e as mensagens do assinante apresentadas na Figura 71b).

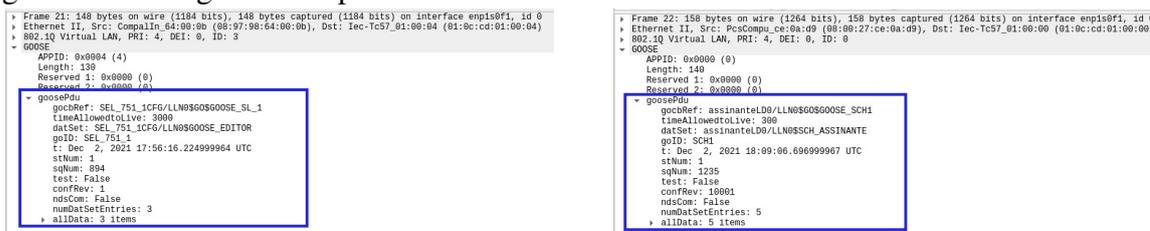
Figura 70 – Máquina Virtual.



Fonte: Próprio Autor.

Portanto, observa-se que um *hardware* pode ser o hospedeiro de mais de uma VIED, sendo a técnica utilizada para isso dependente de aspectos como: quantidade de VIEDs que se pretende criar, propriedades do *hardware* utilizado e aplicações desejadas.

Figura 71 – Tráfego de rede para dois VIEDs.



a) Editor (sistema operacional principal).

b) Assinante (MV).

Fonte: Próprio Autor.

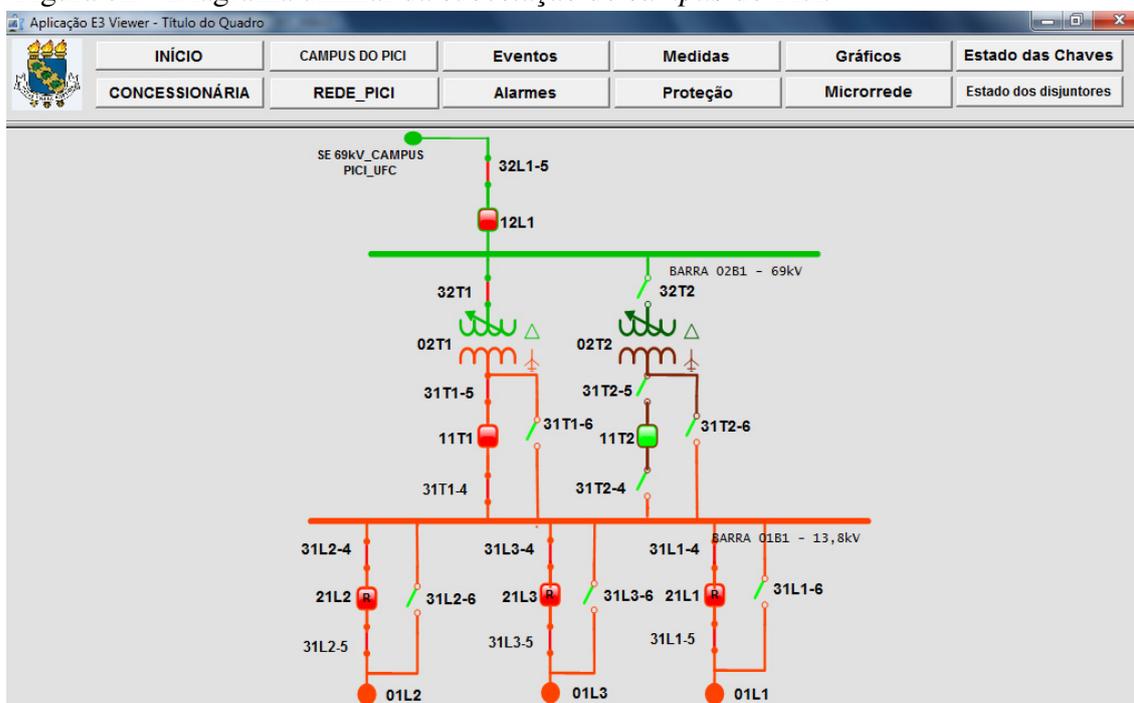
### 4.3 Resultados de Integração dos VIED e IED a um sistema SCADA

Esta seção apresenta a integração dos VIEDs e dos IEDs ao SCADA da plataforma. Não é objetivo seguir o passo a passo de toda a criação do supervisor. Para isso, existem manuais de prática da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos do curso de engenharia elétrica da UFC. Foram apresentadas situações selecionadas para mostrar a integração ao SCADA, que foram: seletividade lógica (com e sem falha de disjuntor), recomposição manual e função 87T.

O SCADA foi baseado no supervisor utilizado pela UFC na subestação do *campus* do Pici. Na Figura 72 é apresentado o diagrama unifilar da subestação do Pici. O barramento 02B1 é alimentado pela concessionária de energia com uma tensão de 69 kV. Existem dois transformadores, 02T1 e 02T2, porém, 02T2 não é utilizado continuamente até o presente momento, servindo para casos de manutenção de 02T1 ou para futuro aumento de carga. A tensão do lado de baixa é 13,8 kV, que é a tensão de distribuição da Rede Pici. Saem três alimentadores da subestação: 01L1, 01L2 e 01L3. As chaves, os disjuntores e os religadores podem ser comandados de forma manual ou automática.

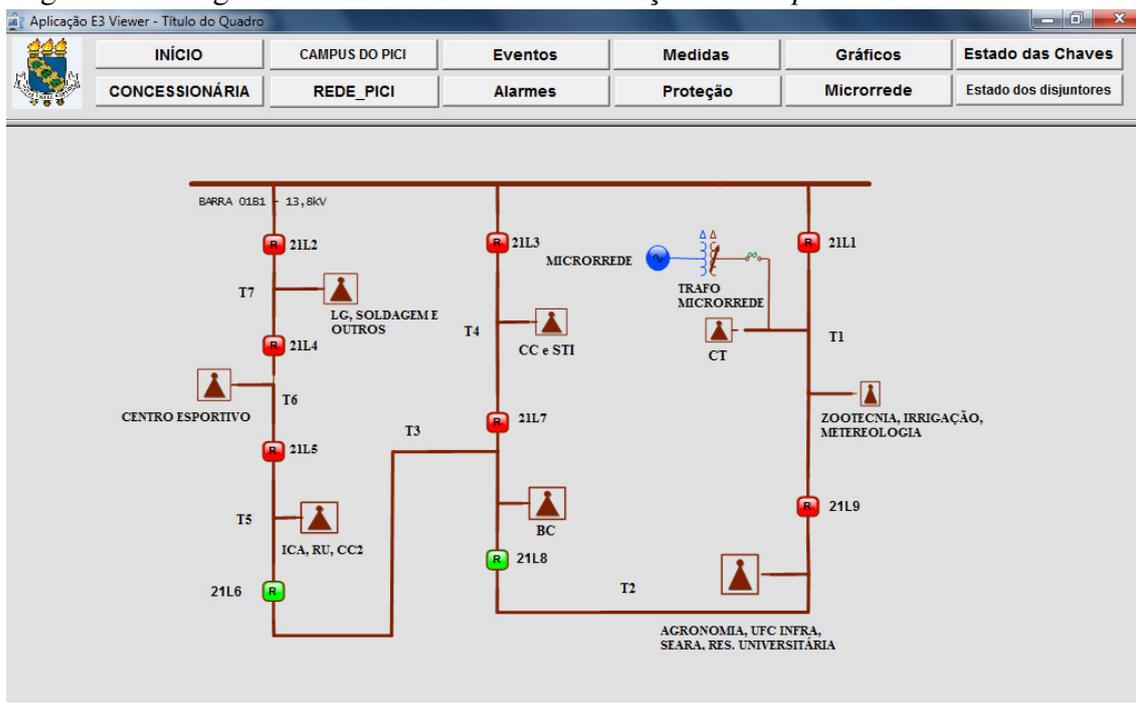
Na Figura 73 é apresentada a rede de distribuição do *campus* do Pici, que alimenta as diversas unidades acadêmicas do campus universitário do Pici da UFC. A rede elétrica é composta por nove religadores, operando dois deles em estado normalmente aberto e os demais em estado normalmente fechado. Os religadores normalmente abertos são fechados no caso de recomposição do sistema, que atualmente é feita de maneira manual, para isolar o trecho em falta e a menor quantidade possível de carga ficar desenergizada. As demais funcionalidades apresentadas na Figura 72, como as telas "Eventos", "Gráficos", "Microrredes" e as demais não são exploradas neste trabalho por não ser seu objetivo.

Figura 72 – Diagrama unifilar da subestação do *campus* do Pici.



Fonte: Próprio Autor.

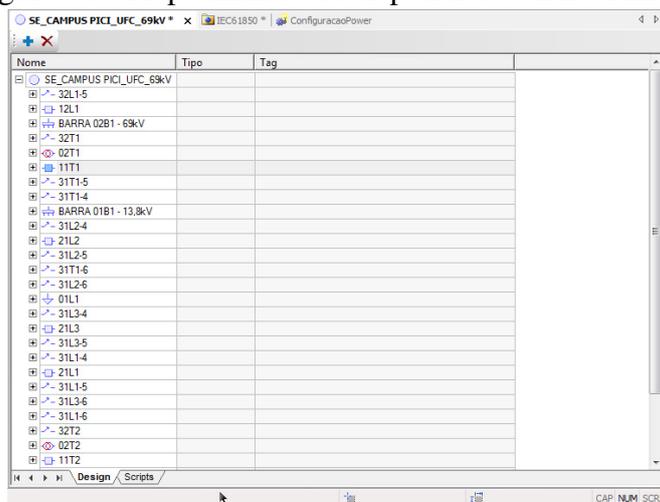
Figura 73 – Diagrama unifilar da rede de distribuição do *campus* do Pici.



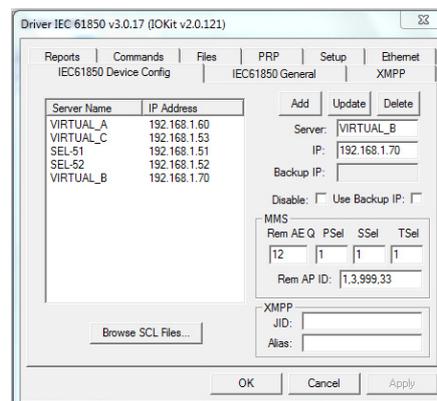
Fonte: Próprio Autor.

Todos os equipamentos da rede e da subestação do Pici são mapeados pelo SCADA, como mostrado na Figura 74a), e podem ter como modo de operação um operador ou o próprio SCADA. Na Figura 74b) pode ser visto o *driver* inserido no SCADA, que habilita o supervisor a trabalhar com os protocolos da IEC 61850. Também pode ser visto que foram cadastrados dois IEDs (SEL 51 e SEL 52) e três VIEDs (VIRTUAL\_A, VIRTUAL\_B E VIRTUAL\_C). Na Figura 74c) é mostrado quais são os dispositivos que estão *online* na LAN e na Figura 74d) é apresentado um exemplo da visualização dos LNs de um VIED *online*.

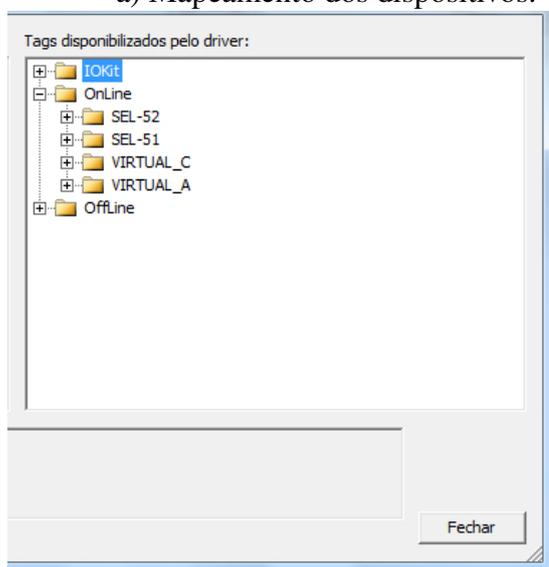
Figura 74 – Mapeamento dos dispositivos e Driver IEC 61850.



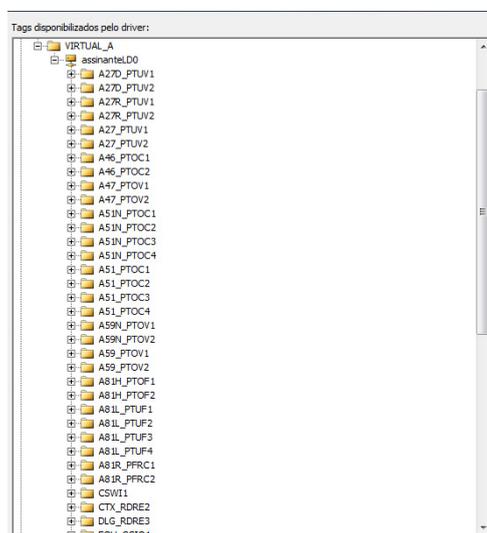
a) Mapeamento dos dispositivos.



b) Driver IEC 61850 e dispositivos conectados.



c) Dispositivos *online*.



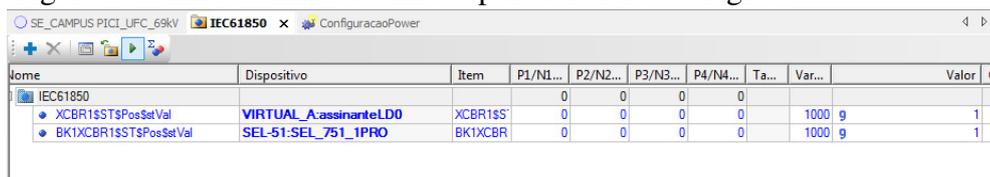
c) LN dos dispositivos.

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.3.1 Seletividade Lógica integrada ao SCADA

Foram escolhidos para fazer parte desse experimento o IED SEL 751 (1) como editor e o VIED criado a partir do arquivo .CID de um IED da Schneider como assinante. Como mostrado na Figura 75, ambos enviaram ao supervisor o LN correspondente ao *status* de disjuntor. Conforme pode ser visto na Figura 76, o IED foi associado ao dispositivo 21L2, enquanto o VIED foi associado ao 11T1.

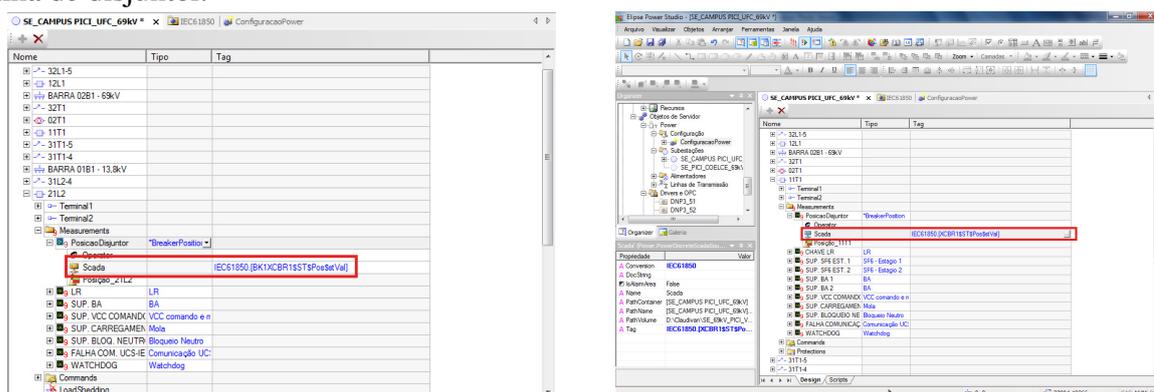
Figura 75 – IED e VIED escolhidos para seletividade lógica.



Nome	Dispositivo	Item	P1/N1...	P2/N2...	P3/N3...	P4/N4...	Ta...	Var...	Valor C
IEC61850			0	0	0	0			
XCBR1\$ST\$PosSetVal	VIRTUAL_AassinanteLDO	XCBR1\$S	0	0	0	0		1000 9	1
BK1XCBR1\$ST\$PosSetVal	SEL-51-SEL_751_1PRO	BK1XCBR	0	0	0	0		1000 9	1

Fonte: Próprio Autor.

Figura 76 – Associação dos IED e VIED aos dispositivos do diagrama unifilar na situação de falha de disjuntor.



a) Tag 21L2.

b) Tag 11T1.

Fonte: Próprio Autor.

Por fim, o procedimento apresentado na seção 4.2.5 foi replicado para as situações de falha e sem falha de disjuntor. Simulou-se um curto-circuito trifásico no alimentador 01L2 de amplitude suficiente para sensibilizar a proteção instantânea de sobrecorrente tanto de 11T1 quanto de 21L2. Na Figura são apresentados os resultados no SCADA para a situação sem falha (Figura 77a)) e com falha (Figura 77b)) de disjuntor. No primeiro caso, a falta é eliminada e pode-se perceber que 11T1 permanece fechado (na cor vermelha) e 21L2 é aberto (na cor verde). No segundo caso, todo o barramento é desenergizado por conta de algum defeito em 21L2, que permanece fechado (na cor vermelha), e 11T1 abre seus contatos (na cor verde).

Figura 77 – Associação dos IED e VIED aos dispositivos do diagrama unifilar.



a) Seletividade sem falha de disjuntor.

b) Seletividade com falha de disjuntor.

Fonte: Próprio Autor.

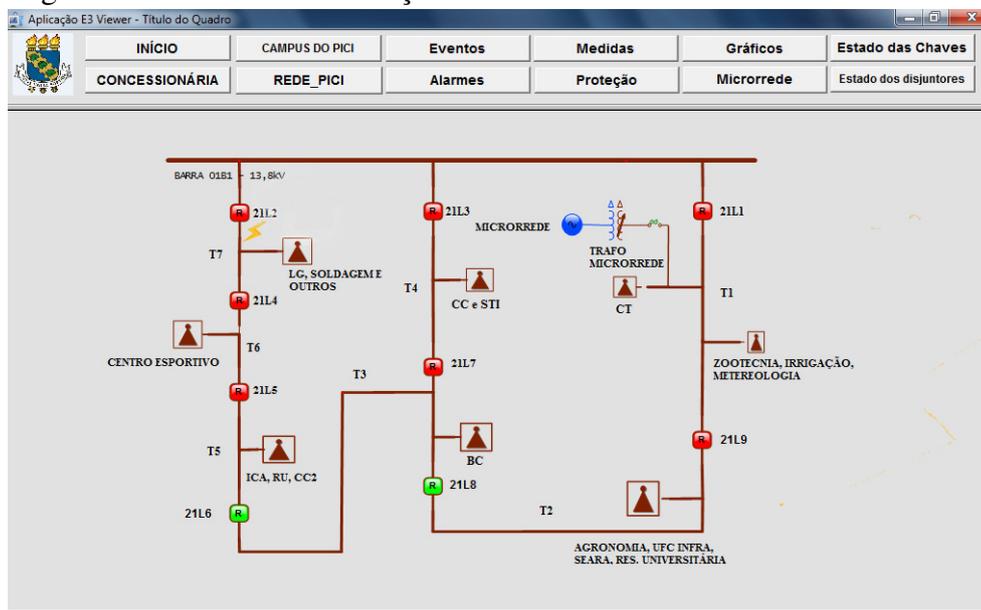
### 4.3.2 *Recomposição Manual*

A recomposição manual do sistema explorada é o passo seguinte da situação de seletividade lógica sem falha de disjuntor da seção anterior. Para o caso de teste de recomposição manual é possível assumir que a lógica automática dos religadores está operante. Na situação de falta permanente, o religador abre definitivamente e então o processo de restauração pode ser explorado na forma manual. Dessa forma, 21L2 é associado ao IED SEL 751, e 11T1 é associado ao VIED. Para efeitos de demonstração, considerou-se a existência de um estudo de proteção que garante que os alimentadores suportam a carga após a recomposição manual. Na Figura 78 é apresentada a rede de distribuição do Pici e o local da falta no trecho T7. Os religadores 21L4 e 21L6 foram configurados para serem acessados por um operador de forma manual no SCADA. Isso significa a necessidade de intervenção humana para comandar a abertura/fechamento dos religadores após a detecção de falta permanente. Sabendo que a falta de fato ocorreu em T7, a abertura de 21L2 desenergizou todo o alimentador 02L2. Isso não é desejável, pois os trechos T6 e T5 foram desenergizados mesmo estando sãos. Dessa forma, torna-se necessário abrir o religador 21L4 e fechar o religador 21L6. Fazendo isso os trechos T6 e T5 passam a ser alimentados pelo alimentador 01L3.

Após a ocorrência da falta, 21L2 desenergizou todo o alimentador 01L2. Diante disso, na Figura 79 é vista a sequência de passos envolvidas na recomposição. Nas Figuras 79 a) e b) são vistos o comando manual para abertura de 21L4 e o seu estado aberto, respectivamente. Nas Figuras 79 c) e d) são mostrados o comando manual para abertura de 21L6 e o seu estado fechado, respectivamente. Dessa forma, somente o trecho T7 é isolado e os trechos T6 e T5 são alimentados por 01L3. Portanto, pode-se somar à situação de seletividade lógica a recomposição

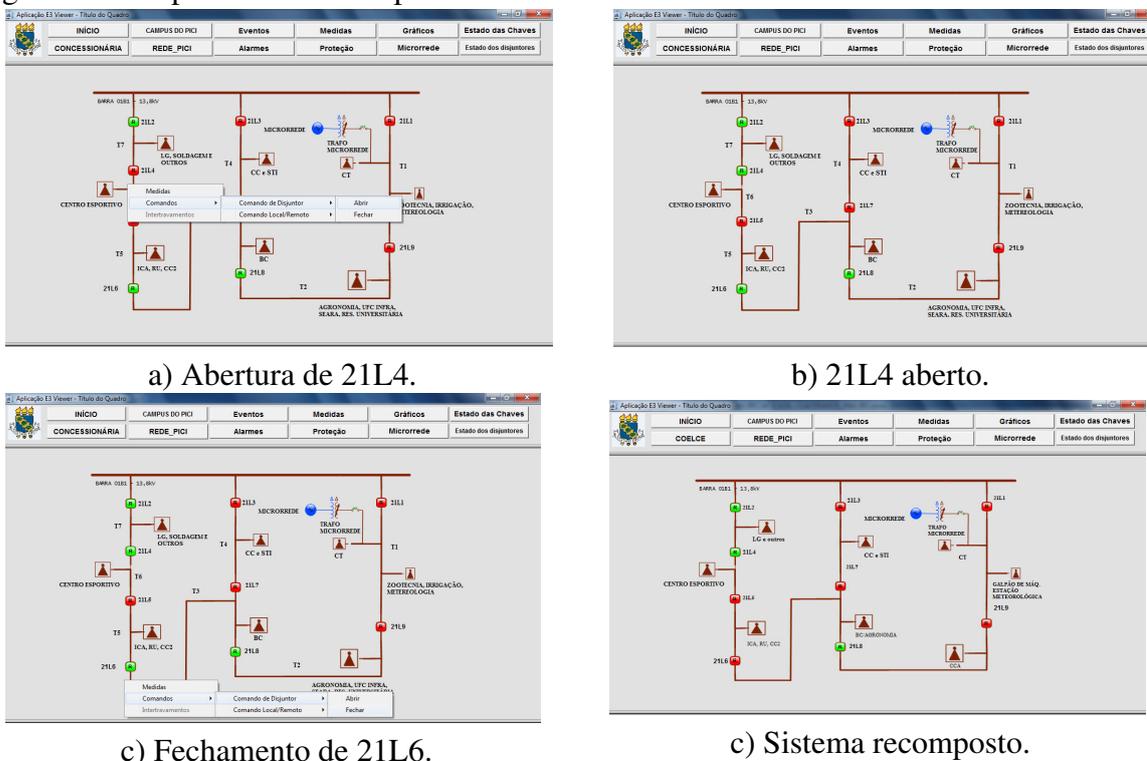
manual do sistema de distribuição por intermédio de intervenção humana.

Figura 78 – Rede Pici e indicação do local de falta



Fonte: Próprio Autor.

Figura 79 – Mapeamento dos dispositivos e Driver IEC 61850.



a) Abertura de 21L4.

b) 21L4 aberto.

c) Fechamento de 21L6.

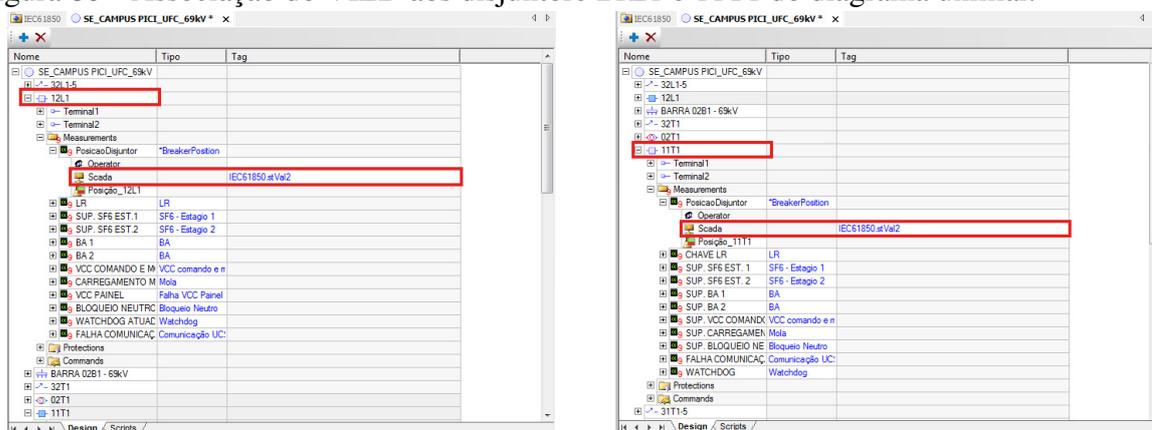
c) Sistema recomposto.

Fonte: Próprio Autor.

### 4.3.3 Função ANSI 87T: Diferencial de Transformador

A última situação de integração ao SCADA considera a atuação da função 87T. Foi escolhido para fazer parte desse experimento o VIED criado a partir do arquivo .CID de um IED da Schneider, que envia ao supervisor o LN correspondente ao *status* dos disjuntores. Conforme mostrado na Figura 80, o nó de *status* de disjuntor do VIED foi associado aos disjuntores 11T1 e 12L1; ambos possuem a mesma *tag*.

Figura 80 – Associação do VIED aos disjuntore 21L1 e 11T1 do diagrama unifilar.



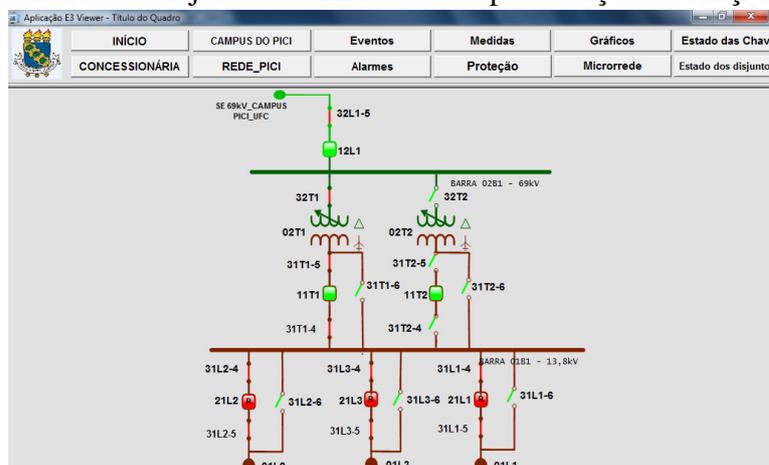
a) Tag de 21L1.

b) Tag de 11T1.

Fonte: Próprio Autor.

Considerou-se que a diferença das correntes era maior que 30%, seguindo o mesmo procedimento apresentado na subseção 4.2.6. O resultado é o apresentado na Figura 81. O VIED comandou a abertura dos disjuntores e também enviou o sinal de *status* de disjuntor ao SCADA. O transformador 01T1 foi por completo desenergizado.

Figura 81 – Abertura dos disjuntores 12L1 e 11T1 após atuação da função 87T.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados exemplos de validação dos VIEDs desenvolvidos e de integração ao SCADA da plataforma proposta. Os dispositivos da Plataforma PAC foram conectados a uma LAN na qual trafegavam mensagens MMS, GOOSE e SV padrão IEC 61850, permitindo a interação entre os dispositivos, demonstrados em diferentes testes realizados. As correntes elétricas foram injetadas pela mala de testes no IEDs físicos e na MU que as digitalizou e enviou na LAN para leitura pelo VIED. Foi possível observar que o VIED funcionou normalmente nos testes considerados para envio de mensagens MMS, GOOSE e SV, além de operar em situações de falta trifásica para atuação da função instantânea de sobrecorrente, na seletividade lógica como assinante e como VIED diferencial de transformador.

Foram observados problemas no teste de seletividade lógica com VIED editor e IED físico assinante. Verificou-se que o tempo normal para operação do teste deveria estar em torno de 20 ms, porém, o resultado obtido foi de 342,8 ms. Torna-se necessário, para trabalhos futuros, a identificação de possíveis problemas que levaram ao mau funcionamento, sendo possíveis causas a necessidade de adequação do código computacional para a devida operação do VIED editor e as configurações de processamento do *hardware* do computador utilizado.

Portanto, de maneira geral, o VIED apresentou bom comportamento na troca de mensagens padrão IEC 61850 e na operação das funções de proteção 50, 87T e na seletividade lógica, falhando apenas no teste de seletividade lógica como editor.

## **5 METODOLOGIA ATIVA APLICADA AO APRENDIZADO DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE**

Os conceitos abordados, tanto da IEC 61850 no Capítulo 2, quanto o de VIED, sua criação e funcionalidades, abordadas no Capítulo 3, são fundamentais para a atuação na área de proteção de subestações. Por um lado, os protocolos da IEC 61850 são bem estabelecidos e são aplicados em subestações, embora a utilização de SV no barramento de processos ainda não seja comum como MMS e GOOSE no presente momento. Por outro lado, os VIEDs representam uma tecnologia promissora em franco desenvolvimento para aplicação em subestações digitais. Diante disso, é necessário que estudantes e profissionais que atuam no mercado sejam treinados para trabalhar com o padrão da IEC 61850 e estejam preparados para mudanças advindas da utilização de VIEDs. Os VIEDs foram validados e aplicados no âmbito de laboratório, como apresentados no Capítulo 4, e neste capítulo é proposta a aplicação da metodologia de aprendizagem baseada em projeto para exploração da plataforma PAC.

Na próxima seção é feita uma apresentação de metodologias de ensino. Em seguida, são apresentadas duas aplicações da Plataforma PAC:

- Aula expositiva a alunos de graduação em Engenharia Elétrica da UFC com o objetivo de apresentar a Plataforma PAC e demonstrar a utilização de VIEDs;
- Proposta de aplicação da Plataforma PAC na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência utilizando a Metodologia Ativa de Aprendizagem Baseada em Projetos.

### **5.1 Metodologias de Ensino**

O passo inicial para ensinar os fundamentos da IEC 61850 e de VIEDs é escolher qual a metodologia de ensino utilizar. A forma clássica de ensinar, por assim dizer, é aquela em que todo o planejamento e ações são elaboradas pelo professor, sendo o aluno um participante muitas vezes somente passivo nesse processo. A metodologia tradicional tem benefícios como o baixo custo de implementação, capacidade de sintetizar conteúdos muito extensos quando o tempo é fator limitante, fácil planejamento e gerenciamento. Entretanto, são dificuldades do processo puramente expositivo resultantes dessa metodologia a distância de diálogo entre o professor e o aluno e, principalmente, a passividade dos aprendizes. A passividade pode causar muitos danos na formação profissional, visto que o aprendiz pode ser levado a apenas receber o conteúdo, mas não ser incentivado a problematizar e questionar, o que lhe tira a capacidade

de interpretação, analogia, senso crítico e ampliação do conhecimento (BUSS; MACKEDANZ, 2017).

Opções diferentes do método clássico que podem ser utilizadas como alternativas no ensino são as Metodologias Ativas. O enfoque dessas metodologias está na participação dos próprios alunos na construção do conhecimento com o apoio dos docentes que agem como mediadores. Embora o professor seja a figura de suporte e fonte de consulta, os alunos têm a oportunidade de buscar soluções por si mesmos. Os aprendizes são atores no processo de aprendizagem que se dá por meio de atividades como: projetos, solução de problemas, jogos, sala de aula invertida, dentre outras (MORAN, 2017). O professor assume o papel de orientador, direcionando os estudos do aluno, e se utiliza ainda mais de recursos tecnológicos, como celulares, computadores e o acesso internet.

A sala de aula invertida, por exemplo, é uma metodologia ativa na qual são gravadas vídeo-aulas e disponibilizados materiais para leitura em uma plataforma virtual para que os alunos possam estudar em um ambiente individual (casa, biblioteca, etc). No dia devido para a aula em grupo presencial, os alunos, devidamente informados do conteúdo, levantam questionamentos, possíveis aplicações, fatos interessantes, sendo tudo isso mediado por um professor. Mason *et al.* (2013) aplicaram essa metodologia na disciplina de "Controle de Sistemas" do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de *Seattle*, Estados Unidos. Os autores fizeram comparações de resultados de testes com os obtidos em uma turma da mesma disciplina, porém em um ano anterior, na qual foi aplicada a metodologia tradicional. Procurou-se manter as mesmas condições de aula, dentro do possível para cada metodologia: mesmos professor, sequência de conteúdo, livro texto como base, ferramenta de controle de sistemas (MATLAB) e mesmo nível de questões avaliativas. Foi observado que na turma em que se aplicou a sala de aula invertida, foi possível cobrir maior parte do conteúdo proposto pela disciplina. Além disso, das dezessete avaliações feitas, a turma da metodologia ativa alcançou resultados iguais ou melhores que os do outro grupo. Os alunos da sala de aula invertida se saíram melhor em algumas situações envolvendo projetos para resolução de problemas. Por fim, os alunos avaliaram positivamente a implementação das aulas invertidas.

Motivados pela falta de engajamento dos alunos do curso de "Conversão Eletromecânica de Energia" da Universidade de *West Indies*, Trindade e Tobaco, Singh *et al.* (2019) aplicaram a metodologia ativa chamada de *blended learning*. Ela é parecida com a sala de aula invertida, porém, as aulas em sala de aula presencial não são de todo eliminadas. Dessa forma,

ela permite uma mistura de aulas *online*, disponibilização de materiais digitais e também aulas presenciais do modelo clássico, ainda que reduzidas em seu tempo e conteúdo. Foram feitas comparações com o desempenho dos alunos da mesma disciplina em anos anteriores, no qual se aplicou apenas a metodologia clássica. A taxa de aprovação subiu de 60% para 86%. A média das notas da turma também subiu de 50% para 63%.

Nesse conjunto de metodologias ativas há a Metodologia Ativa de Aprendizagem Baseada em Projetos (MAABP), como apresentado na seção 1.3. O ensino com utilização de projetos é comum em cursos de engenharia (KYLE *et al.*, 2016) e busca unir o estilo de ensino clássico a uma abordagem prática. Dessa forma, os alunos são desafiados a aplicar o conhecimento na busca de soluções e no desenvolvimento de protótipos ou testes de bancadas. A abordagem em projetos proporciona o amadurecimento de habilidades dos alunos, como trabalho em equipe, resolução de problemas práticos e comunicação entre equipes, algo necessário para profissionais de engenharia.

Diante disso, é possível observar que as metodologias ativas têm impacto positivo na aprendizagem e podem aumentar os resultados obtidos pela forma clássica de ensinar. As disciplinas Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência são ofertadas pelo curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFC, ambas do currículo optativo de disciplinas, e fazem parte da grande área de formação de Sistemas Elétricos de Potência. Dentre os tópicos do conteúdo programático da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, têm-se: A Evolução da Automação e Perspectivas e Cenários Futuros para os Sistemas de Automação, Controle e Proteção (UFC, 2022a). A disciplina Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência possui como componentes de seu conteúdo programático, dentre outros, os seguintes temas: Ferramentas de análise e supervisão de SEP - SCADA, aquisição e processamento de dados, sistemas de automação e aplicação de técnicas de automação (UFC, 2022b). A partir da observação da estrutura da disciplina, optou-se por aplicar uma aula expositiva de laboratório utilizando a Plataforma PAC aos alunos de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência para capacitá-los e motivá-los a cursarem a disciplina de Supervisão. Além disso, foi feita uma proposta utilizando MAABP aplicada à disciplina de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência.

Adiciona-se que a metodologia baseada em projeto pode ser aplicada a profissionais atuantes no mercados a fim de se capacitarem na prática de comunicação padrão IEC 61850 e na utilização de VIEDs.

## 5.2 Aula Expositiva com a Plataforma PAC

No primeiro semestre de 2022, retorno das aulas presenciais após o período da pandemia COVID, a plataforma PAC com IEDs físicos e VIEDs proposta neste trabalho foi utilizada na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência em uma aula expositiva, Nesta aula foram apresentados os seguintes conceitos, definições e lógicas de PAC: IEC61850 e sua aplicação em subestações; função de proteção instantânea de sobrecorrente; seletividade lógica e funções do VIED. Destaca-se que as análises feitas após a realização da aula consideraram as respostas de um grupo de alunos de apenas uma turma, necessitando futuramente de aplicação em mais turmas para se fazer análises mais sólidas. A aula foi ministrada em um tempo de duas horas e se desenvolveu na seguinte sequência:

- Os alunos preencheram um formulário pré-aula via *Google Forms*;
- Foi feita exposição de conceitos básicos da IEC 61850;
- Apresentou-se a Plataforma PAC e todos os seu componentes;
- Realizou-se uma prática envolvendo seletividade lógica com e sem falha de disjuntor, na qual o VIED era o assinante e o IED era o editor;
- Os alunos preencheram um formulário pós-aula *Google forms*.

### 5.2.1 Formulário Pré-Aula

Foi feito um formulário no *Google Forms* e entregue aos alunos para preenchimento antes da ministração da aula. As questões foram direcionadas para entender o contexto dos alunos em relação a proteção de SEP e identificar o seu nível de motivação com os assuntos abordados enquanto cursavam a disciplina. As perguntas feitas no formulário e o detalhamento das respostas são apresentados no Apêndice D.

A partir do questionário e das respostas obtidas, é possível considerar por meio das respostas da questão 1 que os alunos que cursaram a disciplina queriam diversificar seu conhecimento em engenharia elétrica (42,9%), o que representa uma fase de descoberta dos alunos em relação às áreas nas quais podem atuar quando no mercado de trabalho, sua afinidade à matéria e a importância dela para um engenheiro eletricitista. Outros 42,9% já entendiam desde o começo a importância do estudo da proteção de SEP para a sua formação profissional. Outros 14,3%, entretanto, fizeram a escolha da disciplina baseados na necessidade de complementar a carga horária de disciplinas optativas necessárias para obter o título de Engenheiro Eletricista.

As respostas da segunda questão indicam que 71,73% dos alunos já tinham tido contato com a área de proteção em outras disciplinas de engenharia elétrica, principalmente na disciplina de Instalações Elétricas Industriais, de acordo com a resposta livre dos alunos nesse mesmo item. Um ponto de destaque da questão 3 é que a maioria dos alunos (85,71%) entendeu que o projeto final da disciplina, que conta como nota de avaliação, ajudou a fixar o conteúdo ensinado em sala de aula. Isso indica que a aplicação prática ajuda no entendimento das matérias estudadas.

É possível observar na questão 6 que enquanto o interesse pela proteção de SEP aumentou para 42,9% dos alunos, para 57,1% esse interesse permaneceu como no início do curso. Pela questão 7 pode-se observar que a motivação para trabalhar em proteção de SEP está em uma escala positiva, pois todos os alunos esboçaram um interesse que está acima da média numa escala de 1 a 10 (média de 7,71). Ao observar a questão 8, entende-se que 85,7% dos alunos consideraria fazer seu Trabalho de Conclusão de Curso na área de proteção de SEP, o que é significativo em vista das diversas áreas em que os alunos podem fazer o trabalho final da graduação.

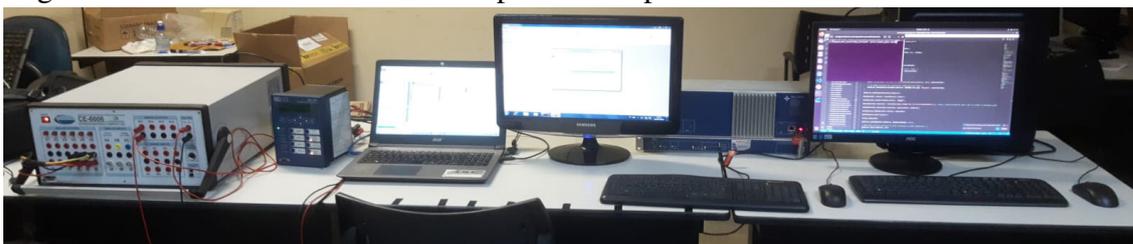
A questão 4 mostra que 71,43% dos alunos sentiu necessidade de aulas práticas. Por fim, ao analisar a questão 5, observa-se que nenhum dos alunos havia ouvido falar da norma IEC 61850 antes de cursar a disciplina. Duas considerações são importantes nesse ponto: a primeira é a importância da disciplina de proteção, pois revelou a existência dessa norma importante para a proteção, automação e controle de SEs; um segundo ponto é que, apesar de os alunos já terem sido introduzidos à proteção de SEP por outras disciplinas, desconheciam a existência da norma, o que demonstra que a IEC 61850 ainda não é tão difundida quanto às técnicas tradicionais de automação de SE.

### **5.2.2 *Exposição dos conceitos da IEC 61850, apresentação da Plataforma PAC e Prática***

Na Figura 82 é apresentada a bancada, com a diferença em relação à Figura 1 da utilização de apenas um IED SEL-751 e a troca do *notebook* Samsung por um computador *desktop* de configurações semelhantes.

Após os alunos responderem ao primeiro formulário, foi feita uma exposição de conceitos básicos da IEC 61850, como: a padronização de protocolos; a função dos protocolos MMS, GOOSE e SV; o significado de PD, LD e LN; e a estrutura dos dados que devem trafegar na LAN.

Figura 82 – Plataforma PAC montada para a aula prática.



Fonte: Próprio Autor.

Seguindo à exposição da IEC 61850, cada componente da Plataforma PAC foi apresentado aos alunos, explicando-se seu papel, e abriu-se espaço para questionamentos que haviam surgido até o momento. Na Figura 83 são vistos os alunos no laboratório.

Figura 83 – Alunos assistindo à aula no laboratório (momento de preenchimento do formulário).



Fonte: Próprio Autor.

A prática expositiva feita para demonstração aos alunos consistiu nas situações exploradas em 4.2.5.3 e em 4.2.5.4, nas quais o VIED opera como assinante em situações de seletividade sem falha de disjuntor e com falha de disjuntor, respectivamente. Utilizou-se os *softwares* Manual (do testador hexafásico), Wireshark (para monitoramento do tráfego de rede) e Visual Code (para apresentar o VIED). Além disso, para uma melhor visualização de todas as situações exploradas, os dados foram captados pelo SCADA e apresentados em tela, conforme visto em 4.3.

### 5.3 Formulário Pós-Aula

Foi feito um segundo formulário no *Google Forms* e entregue aos alunos para preenchimento após a ministração da aula e da prática. As questões foram direcionadas para qualificar a aceitação dos alunos em relação a aula propriamente dita e à Plataforma PAC. As perguntas feitas no formulário e o detalhamento das respostas são apresentados no Apêndice D.

É possível observar que, que os alunos consideraram a IEC 61850 com uma complexidade não tão elevada (média de 7,71 numa escala de 1 a 10), e que conseguiram assimilar os conceitos básicos apresentados no laboratório (média de 9 na escala de 1 a 10), conforme as questões 2 e 1, respectivamente. Os alunos também sinalizaram um bom entendimento dos conceitos do VIED, conforme resposta da questão 5.

A prática teve um impacto positivo nos alunos, como pode ser visto nas questões 3, 4, 6 e 7. A resposta à questão 8 revela o peso que práticas de laboratório realizadas têm sobre a percepção do aluno sobre o conteúdo, visto que foi entendido por todos que a prática (e outras semelhantes que abordam o conteúdo de aula) ajuda a fixar a matéria estudada.

Por fim, foi dado espaço aos alunos para sugestões para melhorar a prática com a Plataforma PAC. A principal sugestão foi que as práticas possam permitir que os próprios alunos manipulem o VIED e operem os demais equipamentos da Plataforma PAC.

### 5.4 Proposta de Projetos Utilizando a Plataforma PAC

A proposta para utilização da Plataforma PAC nesta seção é direcionada à disciplina de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência. A metodologia de ensino utilizada é a MAABP, sendo mantida a ministração em sala de aula com o conteúdo normativo e técnico de PAC de subestações (UFC, 2022b), e adicionando-se a utilização da Plataforma PAC para testes práticos de VIEDs desenvolvidos pelos alunos. Para uma melhor contextualização dos alunos, sugere-se reservar aula(s) específica(s) sobre a IEC 61850 e adicioná-la(s) no Programa da disciplina, juntamente com a previsão dos projetos desenvolvidos pelos alunos (UFC, 2022b). O documento com a proposta de projetos para a disciplina se encontra no Apêndice E.

#### 5.4.1 Metodologia

A metodologia de ensino utilizada é a MAABP, como citado anteriormente. As aulas tradicionais são mantidas, pois são de fundamental importância para que os alunos sejam

introduzidos aos conceitos e técnicas utilizadas na Supervisão e Controle de SEP. Conhecimentos prévios são explorados, como os da disciplina pré-requisito Análise de Sistemas Elétricos de Potência (UFC, 2022b), a qual apresenta conceitos de curto-circuito e fluxo de potência no SEP.

Em adição às aulas teóricas, são propostos temas de projetos para que os alunos apresentem ao fim da disciplina em uma data especificada com pelo menos dois meses antes do fim do semestre letivo. Sugere-se que a turma seja dividida em equipes, cada uma com um líder escolhido, e os temas sejam distribuídos em forma de sorteio, sendo apresentados relatórios do andamento do projeto. O acompanhamento dos alunos é feito pelo professor, que pode ser auxiliado por um monitor. A forma de acompanhamento do professor é feita por meio de encontros no horário de aula, pelo menos dois durante o semestre, para compartilhamento dos avanços e para orientar os alunos em suas dificuldades e por meio dos relatórios. Os projetos desenvolvidos pelos alunos são limitados aos materiais da Plataforma PAC. Apesar dessa limitação, é solicitado que os materiais sejam especificados e descritos na seção do trabalhos técnicos do relatório final do projeto. Os alunos, portanto, precisam ter acesso à Plataforma para realização de testes, sendo possivelmente necessário o auxílio de um monitor para acompanhamento.

Ao fim do prazo para entrega, os alunos apresentam o projeto para toda a turma e fazem a demonstração na Plataforma PAC.

#### **5.4.2 Descrição dos Projetos Propostos**

A seguir são apresentadas quatro propostas de projetos com as quais os alunos poderão trabalhar. Destaca-se que a Plataforma PAC pode ser utilizada em atividades prévias aos projetos, como: explorar o IED físico por meio da parametrização de funções de proteção tipo sobrecorrente instantânea e temporizada; e explorar a troca de mensagens GOOSE, MMS e SV com IEDs físicos e a supervisão via *software* Wireshark. Os projetos propostos podem ser modificados ao longo dos anos, seguindo abaixo um modelo:

- Projeto 1: Desenvolver um VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e testá-lo na Plataforma PAC emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização do dispositivo de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED diante da aplicação de faltas trifásicas equilibradas de corrente que sensibilizam a função de proteção 50; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da

IEC 61850. Para este projeto, a configuração do sistema requisitará o ajuste de dois datasets de proteção, os quais deverão ser feitos pela equipe. Os resultados desejados citados anteriormente devem ser apresentados para cada dataset.

- Projeto 2: Desenvolver um VIED padrão EC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e testá-lo na Plataforma PAC em um contexto de seletividade lógica junto a um IED físico editor, emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização dos dispositivos de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED assinante e do IED editor diante da aplicação de faltas trifásicas equilibradas de corrente que sensibilizam a função de proteção 50; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da IEC 61850.
- Projeto 3: Desenvolver um VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção diferencial de transformador (87T) e testá-lo na Plataforma PAC emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização dos dispositivos de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED diante de uma falta interna a um transformador; correta operação do VIED diante de uma falta externa a um transformador; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da IEC 61850. O resultado da operação do VIED diante de uma falta interna a um transformador deve ser apresentado para três situações: Corrente do lado de alta do transformador maior que a corrente do lado de baixa; corrente do lado de baixa maior que a corrente do lado de alta (fluxo reverso de corrente); corrente do lado de baixa nula.
- Projeto 4: Desenvolver um VIED padrão IEC 61850 capaz de se comunicar com o SCADA da Plataforma PAC para um sistema elétrico proposto pelo professor. Os resultados desejados são: elaboração do diagrama proposto pelo professor no SCADA; conectar o VIED ao SCADA; associar os comandos do VIED a um disjuntor do diagrama; atualizar o status de disjuntor via mensagens do VIED e apresentar na tela do SCADA.

### **5.4.3 Avaliação**

A forma de avaliação é por meio de relatórios técnicos, de apresentações orais e da demonstração dos resultados de projeto obtidos em testes na Plataforma PAC. São solicitados dois

relatórios técnicos, os quais consistem em documentos escritos nos quais os alunos destacarão o andamento do projeto. As apresentações orais devem ser feitas para as demais equipes e para o professor a cada entrega de relatório explanando de forma sucinta os avanços. A demonstração dos resultados do projeto obtidos por meio de testes na Plataforma consiste na última avaliação prática, onde será observado se os objetivos do projeto proposto foram alcançados. A nota para o projeto pode ser calculada de acordo com a equação 5.1. A nota do projeto poderá ser utilizada, juntamente com a metodologia que o professor escolher para avaliar a absorção do conteúdo teórico, para compor a nota final da disciplina.

$$NP = \frac{R1 + R2 + AO1 + AO2 + DP}{5}, \quad (5.1)$$

em que:

- NP é a nota das atividades de projetos;
- R1, R2 são as notas dos dois relatórios;
- AO1, AO2 são as notas das apresentações orais;
- DP é a nota a Demonstração dos resultados do Projeto na Plataforma PAC.

## 5.5 Conclusão

A Plataforma PAC foi utilizada em uma aula expositiva a alunos da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Apesar de não ter sido possível que cada aluno operasse a bancada, a prática recebeu avaliações positivas por parte dos alunos. Devido o tempo para a prática (apenas uma aula de 2 horas), não foi possível que cada aluno explorasse por si cada dispositivo da Plataforma.

Foi feita uma proposta para utilização da Plataforma PAC na disciplina de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência. A proposta consiste em utilizar uma metodologia ativa baseada em projetos, na qual os alunos recebem temas e devem apresentar relatórios, fazer apresentações orais do andamento das atividades e demonstrar ao fim da disciplina os resultados alcançados em uma demonstração para o professor e os demais alunos.

O experimento de metodologia ativa sugeriu que a Plataforma PAC pode ser utilizada de forma prática para treinamento. Sua aplicação parte da exposição prática de conceitos de PAC até a possível utilização por alunos projetos de disciplinas.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma plataforma de proteção, automação e controle de subestações aderente ao conceito de redes elétricas inteligentes. A plataforma digital integra IEDs físicos, VIEDs e SCADA conectados em rede LAN com tecnologia *Ethernet*, baseada na norma IEC 61850. Os IEDs físicos, Os VIEDs, a mala de testes e o computador industrial têm suporte para comunicação baseada nos protocolos da norma IEC 61850 e, portanto, podem simular, a nível de laboratório, situações que podem ocorrer nas subestações elétricas.

Após o desenvolvimento do VIED, foram feitos testes de validação. Os três primeiros testes mostraram que o VIED é capaz de comunicar-se com outros dispositivos da Plataforma via mensagens MMS, GOOSE e SV. Os demais testes de validação exploraram situações da atuação do VIED diante de falta trifásica de corrente que sensibiliza a função 50, a seletividade lógica (estando o VIED como editor e como assinante) e a função 87T. Para a função 50 e para a seletividade lógica foram feitos testes com os IEDs da plataforma e depois comparado com o comportamento do VIED. Os resultados mostram-se satisfatórios, à exceção da situação de seletividade lógica quando o VIED atuou como editor. O tempo para envio das mensagens GOOSE ultrapassou em mais de 300 ms o tempo esperado. As possíveis causas são a necessidade de adequação do código computacional para a devida operação do VIED editor e as configurações de processamento do *hardware* do computador utilizado. Os testes para função 87T foram baseados na curva de operação apresentada no manual de uso da Série SEPAM 80 da Schneider. O VIED operou normalmente após uma sequência de testes envolvendo correntes diferenciais no transformador 01T1. Dessa forma, o VIED apresentou bom comportamento diante das situações estudadas, precisando-se solucionar o problema de sua operação como editor na seletividade lógica.

Além dos testes de validação, foram realizados testes de integração do VIED a um SCADA. Foi possível realizar a comunicação via mensagens MMS entre o SCADA e o VIED, percebendo-se a capacidade do dispositivo virtual se comunicar com *softwares* utilizados comercialmente padrão IEC 61850. Nesses testes de comunicação foram exploradas as situações de seletividade lógica, da função 87T e um caso de recomposição manual, nos quais o VIED foi associado graficamente ao diagrama unifilar dos testes

Portanto, os VIEDs estudados neste trabalho mostraram-se capazes de estabelecer comunicação baseada na norma IEC 61850 com outros dispositivos de uma subestação conectados em uma LAN, além de apresentar repostas e tempos de respostas adequados diante das

situações de faltas trifásicas de corrente, seletividade lógica e proteção diferencial de transformador, avaliação feita a partir do funcionamento dos VIEDs com o funcionamento dos IEDs físicos de mercado que compuseram a Plataforma PAC. Foi observada, porém, a necessidade de melhorias quanto ao tempo de resposta do VIED editor na situação de seletividade lógica. Além disso, os VIEDs podem ser utilizados para testes laboratoriais da comunicação dos dispositivos de subestações, visto que uma forma de sua criação é a partir do arquivo .CID de um IED real, antes de uma aplicação final em campo. Essa funcionalidade diminui a necessidade de *hardwares* e permite simular testes de toda uma rede, dependendo do dispositivo físico que irá hospedar os VIEDs.

Foi visto que a Plataforma PAC pode ser aplicada ao ensino. Primeiramente, foi feita uma aula expositiva apresentando conceitos de proteção e a operação de IEDs físicos e VIEDs para alunos de graduação. Em seguida, foram propostos projetos para aplicação na disciplina de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência, os quais podem ser aplicados em trabalhos futuros.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Visando trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa, são propostos os seguintes tópicos:

- Desenvolver e validar um VIED com funcionalidade de servidor dinâmica. Isso significa que o VIED não estará mais associado a um arquivo .CID pré-existente, mas todos os seus LDs, LNs, *datasets* e demais funcionalidades de comunicação definidas pela IEC 61850 serão totalmente programáveis. Isso torna o VIED mais didático, proporciona um maior entendimento da norma e o torna mais dinâmico com possibilidade de ajustes via código computacional. A validação desse VIED deve conter testes de conformidade apresentados na norma IEC 61850-10.
- Criar uma *interface* gráfica para os VIEDs. Isso torna a sua operação mais simples. Além disso, criar funcionalidades que permitam apresentar gráficos dos ajustes das funções 50, 51, 87T e permitam mostrar o coordenograma dos VIEDs criados;
- Trabalhar com vários VIEDs em situações de integração ao SCADA;
- Desenvolver outras funções de proteção, tanto para corrente quanto para tensão, como as funções: 27, 51, 59 e 67;

- Desenvolver a função de proteção diferencial de barra (87B) e avaliar seu desempenho, principalmente no quesito de tempo de eliminação de curto-circuito, considerando as normas vigentes para transmissão de energia elétrica;
- Aumentar a complexidade dos testes feitos neste trabalho por aumentar o número de VIEDs. Isso exigirá que se trabalhe com MVs (ou outra tecnologia), *switches* virtuais e sincronização de tempo de envio das mensagens na comunicação;
- Trabalhar com o sistema operacional Linux em tempo real no experimentos com os VIEDs;
- Desenvolver uma aplicação do VIED que permita o acesso remoto via página *web*;
- Utilizar o serviço de autenticação de senha como recurso de segurança contra ataques cibernéticos de VIEDs.

## 6.2 Trabalhos Publicados

FREITAS, C.D.; LEÃO, R.P.S; SAMPAIO, R.F; MELO, L.S.; BARROSO, G.C.; MARTINS, L.L.P; FREITAS, A.S. Platform for Teaching Protection, Automation and Control with IEC 61850 Standard Physical and Virtual IEDs. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XXIV., 2022, Fortaleza, Anais... FORTALEZA:SBA, 2022

## REFERÊNCIAS

- ALBARAKATI, A.; ROBILLARD, C.; KARANFIL, M.; KASSOUF, M.; HADJIDJ, R.; DEBBABI, M.; YOUSSEF, A. Security monitoring of iec 61850 substations using iec 62351-7 network and system management1. *In: 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CONTROL, AND COMPUTING TECHNOLOGIES FOR SMART GRIDS (SMARTGRIDCOMM), 2019, Beijing. Proceedings[...].* China: IEEE, 2019. p. 1–7.
- BRAHMA, S.; REE, J. D. L.; 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.; WIEDMAN, T. The education and training of future protection engineers: Challenges, opportunities, and solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 538–544, 2009.
- BUSS, C. da S.; MACKEDANZ, L. F. O ensino através de projetos como metodologia ativa de ensino e de aprendizagem. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, n. 3, p. 122–131, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/481>. Acesso em: 01 de fev. de 2023.
- FREITAS, A. D. S. **Plataforma aberta para ensino de proteção de sistemas elétricos de potência com IEDs físicos e virtuais padrão IEC 61850** 2022. 119 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
- HOSSENLOPP, L. Engineering perspectives on iec 61850. **IEEE Power and Energy Magazine**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 45–50, 2007.
- HUNT, R.; FLYNN, B.; SMITH, T. The substation of the future: moving toward a digital solution. **IEEE Power and Energy Magazine**, [s.l.], v. 17, n. 4, p. 47–55, 2019.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Principle and models**. [S. l.], 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface (ACSI)**. [S. l.], 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 7-3: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Common data classes**. [S. l.], 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 8: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3**. [S. l.], 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs**. [S. l.], 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link.** [S. l.], 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems in substations, part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3.** [S. l.], 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC TR 61850-1: Standard for communication networks and systems for power utility automation-Part 1: Introduction and overview.** [S. l.], 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers.** [S. l.], 2016.

KHAVNEKAR, A.; WAGH, S.; MORE, A. Comparative analysis of iec 61850 edition-i and ii standards for substation automation. *In: 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND COMPUTING RESEARCH (ICCIC), 2015, Madurai. Proceedings[...].* India: IEEE, 2015. p. 1–6.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Santa Catarina: LaBPlan - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. v. 1.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Santa Catarina: LaBPlan - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. v. 2.

KYLE, A. M.; JANGRAW, D. C.; BOUCHARD, M. B.; DOWNS, M. E. Bioinstrumentation: A project-based engineering course. **IEEE Transactions on Education**, [s.l.], v. 59, n. 1, p. 52–58, 2016.

LABONNE, A.; CAIRE, R.; BRACONNIER, T.; GUISE, L.; JARDIM, M.; HADJSAID, N. Teaching digital control of substation and iec 61850 with a test bench validation. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s.l.], v. 36, n. 2, p. 1175–1182, 2021.

LEÓN, H. E. D. L. H. **Modelagem de dispositivos eletrônicos inteligentes para barramento de processos baseado na norma IEC 61850** 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistema da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MACKIEWICZ, R. Overview of iec 61850 and benefits. *In: 2006 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. Proceedings[...].* Canadá: IEEE, 2006. p. 8 pp.–.

MAGALHÃES, L. F. **Plataforma de testes e virtualização de dispositivos eletrônicos inteligentes baseados na norma IEC 61850** 2019. 99 f. Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

MASON, G. S.; SHUMAN, T. R.; COOK, K. E. Comparing the effectiveness of an inverted classroom to a traditional classroom in an upper-division engineering course. **IEEE Transactions on Education**, [s.l.], v. 56, n. 4, p. 430–435, 2013.

MELO, L. S. **Desenvolvimento de uma plataforma para implementação de sistemas multiagentes com aplicação para recomposição automática de sistemas de distribuição de energia elétrica** 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

MORAN, J. Metodologias ativas e modelos híbridos na educação. *In*: YAEGASHI, Solange et al (org.). **Novas tecnologias digitais: Reflexões sobre mediação, aprendizagem e desenvolvimento**. Curitiba: CRV, 2017. p. 23–35.

SAMPAIO, F. C. **Sistema multiagente de proteção adaptativa** 2019. 74 f. Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de automação distribuído: uma abordagem baseada em multiagente aplicada a sistemas de distribuição de energia elétrica em médias tensão** 2017. 226 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

SCHNEIDER ELECTRIC. **SEPAM série 80: Medições e proteções**. São Paulo, 2009.

SCHUMACHER, M.; HOGA, C.; SCHMID, J. Get on the digital bus to substation automation. **IEEE Power and Energy Magazine**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 51–56, 2007.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. **SEL-751 feeder protection relay: instruction manual**. [S. l.], 2013.

SINGH, A.; ROCKE, S.; POORANSINGH, A.; RAMLAL, C. J. Improving student engagement in teaching electric machines through blended learning. **IEEE Transactions on Education**, [s.l.], v. 62, n. 4, p. 297–304, 2019.

THOMAS, M. S.; KOTHARI, D. P.; PRAKASH, A. Design, development, and commissioning of a substation automation laboratory to enhance learning. **IEEE Transactions on Education**, [s.l.], v. 54, n. 2, p. 286–293, 2011.

UCA INTERNATIONAL USERS GROUP. **Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2**. [S. l.], 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Departamento de Engenharia Elétrica. **Plano de Aula da Disciplina Proteção de SEP**. Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://ccee.ufc.br/pt/estrutura-curricular-e-ementas-2/planos-de-ensino/estrutura-curricular-e-ementas/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Departamento de Engenharia Elétrica. **Plano de aula da disciplina supervisão e controle de SEP**. Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://ccee.ufc.br/wp-content/uploads/2020/10/supervisao-e-controle-de-sistemas-eletricos-de-potencia.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

WOJTOWICZ, R.; KOWALIK, R.; RASOLOMAMPIONONA, D. D. Next generation of power system protection automation—virtualization of protection systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 2002–2010, 2018.

WOJTOWICZ, R.; KOWALIK, R.; RASOLOMAMPIONONA, D. D.; KUREK, K. Virtualization of protection systems - tests performed on a large environment based on data center solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s.l.], v. 37, n. 4, p. 3401–3411, 2022.

ZHANG, Z.; HANSEN, C. T.; ANDERSEN, M. A. E. Teaching power electronics with a design-oriented, project-based learning method at the technical university of denmark. **IEEE Transactions on Education**, [s.l.], v. 59, n. 1, p. 32–38, 2016.

ZILLGITH, M. **API Reference Manual - libIEC61850 1.5.1**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://support.mz-automation.de/doc/libiec61850/c/latest/>. Acesso em: 17 jan. de 2022.

ZILLGITH, M. **Documentação - libIEC61850 1.5.1**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://libiec61850.com/documentation/>. Acesso em: 17 jan. de 2022.

ZILLGITH, M. **Downloads - libIEC61850 1.5.1**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://libiec61850.com/downloads/>. Acesso em: 17 jan. de 2022.

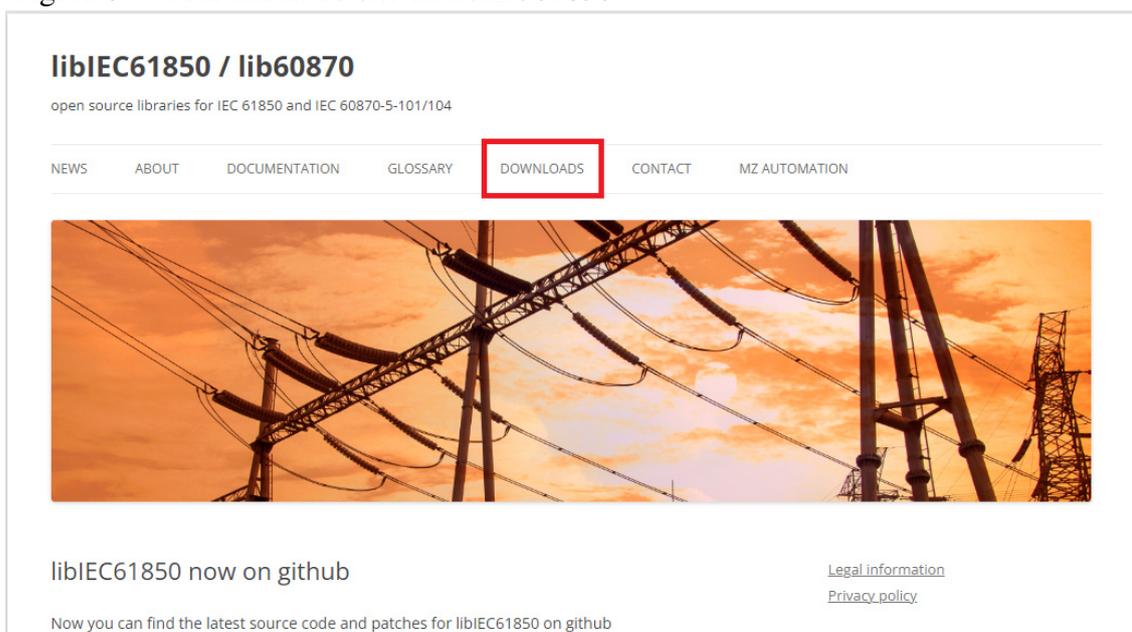
ZILLGITH, M. **libIEC61850 / lib60870**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://libiec61850.com/libiec61850-now-on-github/>. Acesso em: 17 jan. de 2022.

## APÊNDICE A – DOWNLOAD DA LIBIEC61850 E CRIAÇÃO DE ARQUIVOS NA LINGUAGEM C

Este Apêndice do trabalho apresenta os passos efetuados na criação de um VIED de forma estática, conforme destacado no Capítulo 3, desde o *download* da biblioteca libIEC61850 até a geração dos arquivos *static\_model.c* e *static\_model.h* na linguagem C.

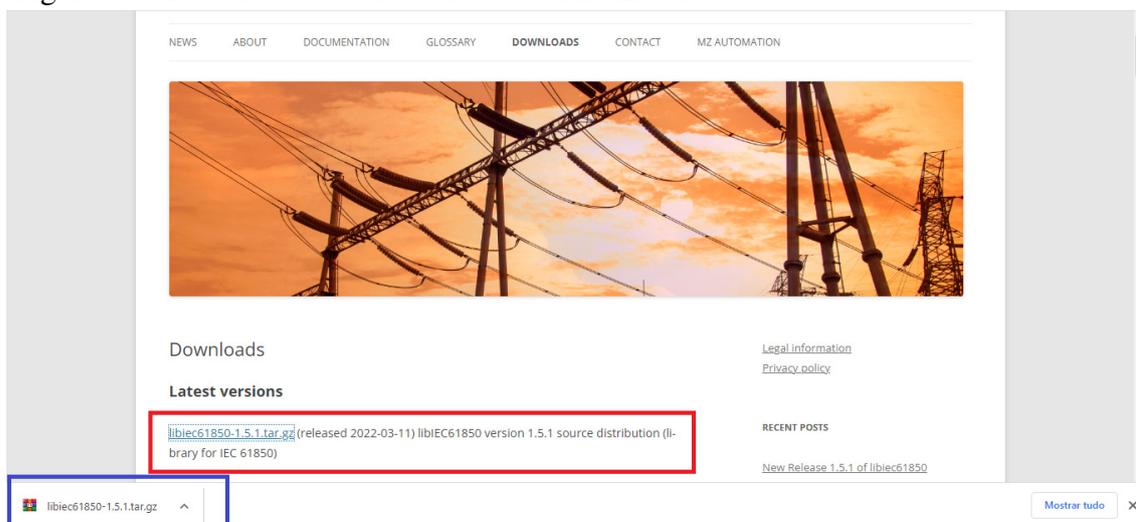
Primeiramente foi feito o *download* da pasta com todos os arquivos da biblioteca necessários para trabalhar com a IEC 61850 a partir do site oficial da libIEC61850 (ZILLGITH, 2021d), como mostrado na Figura 84. Em seguida ocorreu um redirecionamento para a página de *downloads*, como pode ser visto na Figura 85, onde foi dado um clique no *link* da versão mais atual da biblioteca (destaque vermelho), e o *download* da pasta compactada com todos os arquivos necessários foi iniciado (destaque azul).

Figura 84 – Tela inicial do site da libIEC61850.



Fonte: Próprio Autor.

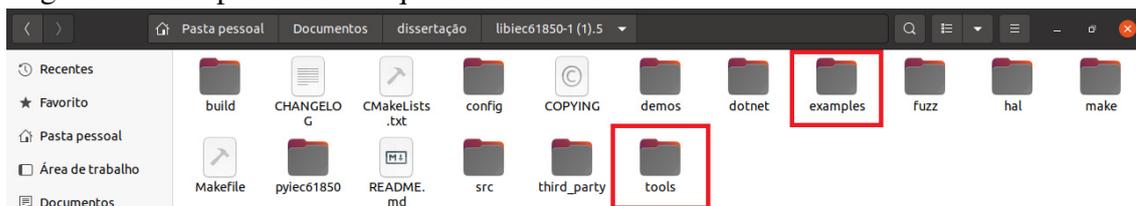
Figura 85 – Download da versão mais atual libIEC61850.



Fonte: Próprio Autor.

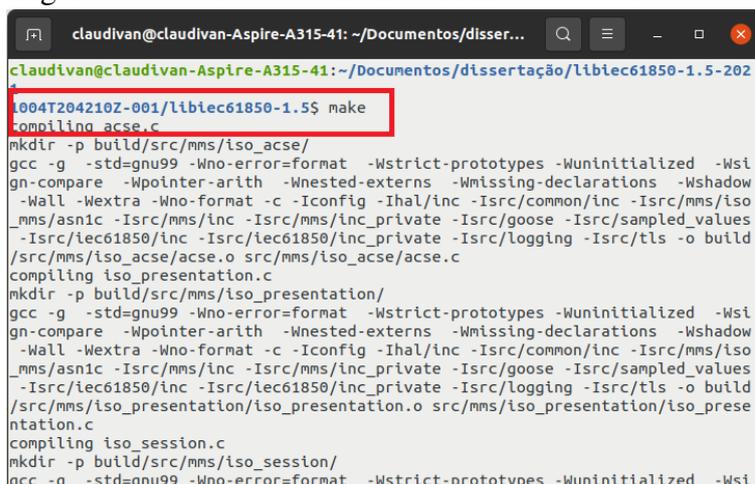
A pasta da libIEC61850 contém subpastas, como apresentadas na Figura 86. As pastas *config*, *demos*, *fuzz*, *hall*, *src* e *third\_party* possuem arquivos com as rotinas já preparadas pela própria biblioteca. As pastas *build*, *make* são gerados após a compilação dos códigos com o comando *make* no terminal do Ubuntu (Figura 87). As pastas em destaques vermelhos (*tool* e *examples*) são as únicas utilizadas pelo programador que utiliza um SO atendido pela libIEC61850.

Figura 86 – Subpastas com arquivos da libIEC61850.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 87 – Comando make no terminal do Ubuntu.



```

claudivan@claudivan-Aspire-A315-41: ~/Documentos/disser...
claudivan@claudivan-Aspire-A315-41:~/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5-202
1004T204210Z-001/libiec61850-1.5$ make
compiling acse.c
mkdir -p build/src/mms/iso_acse/
gcc -g -std=gnu99 -Wno-error=format -Wstrict-prototypes -Wuninitialized -Wsi
gn-compare -Wpointer-arith -Wnested-externs -Wmissing-declarations -Wshadow
-Wall -Wextra -Wno-format -c -Iconfig -Ihal/inc -Isrc/common/inc -Isrc/mms/iso
_mms/asn1c -Isrc/mms/inc -Isrc/mms/inc_private -Isrc/goose -Isrc/sampled_values
-Isrc/iec61850/inc -Isrc/iec61850/inc_private -Isrc/logging -Isrc/tls -o build
/src/mms/iso_acse/acse.o src/mms/iso_acse/acse.c
compiling iso_presentation.c
mkdir -p build/src/mms/iso_presentation/
gcc -g -std=gnu99 -Wno-error=format -Wstrict-prototypes -Wuninitialized -Wsi
gn-compare -Wpointer-arith -Wnested-externs -Wmissing-declarations -Wshadow
-Wall -Wextra -Wno-format -c -Iconfig -Ihal/inc -Isrc/common/inc -Isrc/mms/iso
_mms/asn1c -Isrc/mms/inc -Isrc/mms/inc_private -Isrc/goose -Isrc/sampled_values
-Isrc/iec61850/inc -Isrc/iec61850/inc_private -Isrc/logging -Isrc/tls -o build
/src/mms/iso_presentation/iso_presentation.o src/mms/iso_presentation/iso_pre
sentation.c
compiling iso_session.c
mkdir -p build/src/mms/iso_session/
gcc -g -std=gnu99 -Wno-error=format -Wstrict-prototypes -Wuninitialized -Wsi

```

Fonte: Próprio Autor.

Para criar os arquivos *static\_model.c* e *static\_model.h* foi dado duplo clique na pasta *tools* e outro duplo clique na sua pasta interna *model\_generator*. Foi inserido o arquivo *ASSINANTE.CID* dentro da pasta *model\_generator* e realizado o processo de criação do arquivos por meio do comando `java -jar genmodel.jar ASSINANTE.CID`, como apresentado na Figura 88. Após isso os arquivos *static\_model.c* e *static\_model.h* foram gerados automaticamente dentro da pasta *model\_generator* (Figura 89). Dessa forma, o modelo padrão IEC 61850 contido no arquivo de origem do IED SEL podem ser acessados via código na linguagem C e utilizados para programar funções de proteção do VIED.

Figura 88 – Comando para gerar arquivos do modelo estático do VIED.

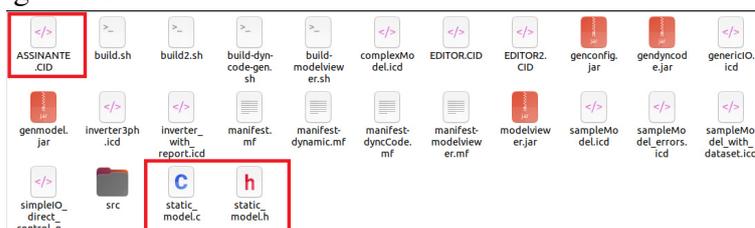


```

claudivan@claudivan-Aspire-A315-41: ~/Documentos/diss...
claudivan@claudivan-Aspire-A315-41:~/Documentos/dissertação/libiec61850-1.5-20
211004T204210Z-001/libiec61850-1.5/tools/model_generator$ java -jar genmodel.j
ar ASSINANTE.CID
Select ICD File ASSINANTE.CID
parse data type templates ...
parse IED section ...

```

Fonte: Próprio Autor.

Figura 89 – Arquivo *ASSINANTE.CID* e arquivos *static* gerados.

Fonte: Próprio Autor.

## APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE VIED COM FUNÇÃO 50 ASSINANTE EM SELETIVIDADE LÓGICA

```
1
2 #include "goose_receiver.h"
3 #include "goose_subscriber.h"
4 #include "iec61850_server.h"
5 #include "hal_thread.h" /* for Thread_sleep() */
6 #include <signal.h>
7 #include <stdlib.h>
8 #include <stdio.h>
9 #include <string.h>
10 #include "mms_value.h"
11 #include "goose_publisher.h"
12 #include "sv_subscriber.h"
13 #include <math.h>
14 #include "static_model.h"
15
16
17 /* import IEC 61850 device model created from SCL-File */
18 extern IedModel iedModel;
19
20 int contador = 0; /*variavel para auxiliar na funcao de abertura do
    disjuntor8*/
21 char* svID2;
22 static int running = 0;
23 static IedServer iedServer = NULL;
24 int contadorSV1 = 0;
25 int contadorSV2 = 0;
26 float SVrms_deltaA = 0;
27 float SVrms_deltaB = 0;
28 float SVrms_deltaC = 0;
29 static float corrente_primarioA = 0;
30 float corrente_primarioB = 0;
```

```

31 float corrente_primarioC = 0;
32 static float r_transformacao = 2.8868;
33 float corrente_teste = 100;
34
35
36 void sigint_handler(int signalId)
37 {
38     running = 0;
39 }
40
41 void corrente_sv(SVSubscriber subscriber)
42 {
43
44 }
45 /* Callback handler for received SV messages */
46 static void
47 svUpdateListener (SVSubscriber subscriber, void* parameter,
48     SVSubscriber_ASDU asdu)
49 {
50
51     const char* svID = SVSubscriber_ASDU_getSvId(asdu);
52
53     if ((strcmp(svID,"svpub1"))== 0){
54         SVrms_deltaA = (SVrms_deltaA + pow(
55             SVSubscriber_ASDU_getFLOAT32(asdu, 0),2));
56         SVrms_deltaB = (SVrms_deltaB + pow(
57             SVSubscriber_ASDU_getFLOAT32(asdu, 4),2));
58         SVrms_deltaC = (SVrms_deltaC + pow(
59             SVSubscriber_ASDU_getFLOAT32(asdu, 8),2));
60         contadorSV1 += 1;
61     }
62
63     if (contadorSV1==80)
64     {
65         corrente_primarioA = sqrt(SVrms_deltaA / 80);

```

```

61     corriente_primarioB = sqrt(SVrms_deltaB / 80);
62     corriente_primarioC = sqrt(SVrms_deltaC / 80);
63     contadorSV1=0;
64     SVrms_deltaA=0;
65     SVrms_deltaB=0;
66     SVrms_deltaC=0;
67 }
68 }
69
70 static void
71 goCbEventHandler(MmsGooseControlBlock goCb, int event, void*
    parameter)
72 {
73     printf("Access to GoCB: %s\n", MmsGooseControlBlock_getName(
        goCb));
74     printf("        GoEna: %i\n", MmsGooseControlBlock_getGoEna(
        goCb));
75 }
76
77
78 static void
79 gooseListener(GooseSubscriber subscriber, void* parameter)
80 {
81     MmsValue* values = GooseSubscriber_getDataSetValues(subscriber)
        ;
82
83     char buffer[50];
84
85     MmsValue_printToBuffer(values, buffer, 50);
86
87
88     char b; char c; char d;
89
90     b = buffer[1];

```

```
91     c = buffer[6];
92     d = buffer[11];
93
94
95     printf ("A corrente: %f\n", corrente_primarioA);
96
97
98     if (corrente_primarioA>1150)
99     {
100         if ((b != 116) && (c != 116) && (d != 116) && (contador ==
101             0))
102             /*An lise mensagens Goose: b=Sobrecorrente (50); c=TRIP;
103             d=Falha de Disjuntor (50BF)*/
104             printf("ATUAR - FUN 0 50");
105             IedServer_updateDbposValue(iedServer,
106                 IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_OFF);
107             IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
108                 IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, false);
109             exit();
110         }
111
112         if (((b == 116) && (c != 116) && (d != 116)) || ((b == 116)
113             && (c == 116) && (d != 116)))
114             /*116 o valor da tabela ASCII para T (True)
115             printf("CORRENTE DE FALTA - N O ATUAR (SELETIVIDADE
116                 L GICA)\n");
117             IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
118                 IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, false);
119         }
120
121         if ((b == 116) && (c == 116) && (d == 116))/*116 o valor
122             da tabela ASCII para T (True)
123         {
124             contador = 1;
```

```

117     printf("FALHA DE DISJUNTOR \n");
118     IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
119         IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, true);
119     printf("SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR \n");
120     printf("DISJUNTOR ABERTO \n");
121     IedServer_updateDbposValue(iedServer,
122         IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_OFF);
122     exit();
123 }
124 }else
125 {
126     IedServer_updateDbposValue(iedServer,
127         IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
127 }
128 }
129
130 int
131 main(int argc, char** argv)
132 {
133     IedServerConfig config = IedServerConfig_create();
134
135     iedServer = IedServer_createWithConfig(&iedModel, NULL, config)
136     ;
137
138     IedServerConfig_destroy(config);
139
140     SVReceiver receiverSV = SVReceiver_create();
141
142     if (argc > 1) {
143         char* ethernetIfcID = argv[1];
144
145         printf("Using GOOSE interface: %s\n", ethernetIfcID);
146
147         /* set GOOSE interface for all GOOSE publishers (GCBs) */

```

```

147     IedServer_setGooseInterfaceId(iedServer, ethernetIfcID);
148     SVReceiver_setInterfaceId(receiverSV, ethernetIfcID);
149 }
150
151 if (argc > 2) {
152     char* ethernetIfcID = argv[2];
153
154     printf("Using GOOSE interface for GenericIO/LLNO.
155           gcbAnalogValues: %s\n", ethernetIfcID);
156
157     /* set GOOSE interface for a particular GOOSE publisher (
158        GCB) */
159     IedServer_setGooseInterfaceIdEx(iedServer,
160                                     IEDMODEL_CFG_LLNO, "BRep0201", ethernetIfcID);
161 }
162
163 /*Preparando o código para receber mensagens SV*/
164
165 SVSubscriber subscriberSV = SVSubscriber_create(NULL, 0x4000);
166 SVSubscriber_setListener(subscriberSV, svUpdateListener, NULL);
167 SVReceiver_addSubscriber(receiverSV, subscriberSV);
168
169 /*Preparando o código para publicar mensagens GOOSE*/
170
171 IedServer_enableGoosePublishing(iedServer);
172 GooseReceiver receiver = GooseReceiver_create();
173 GooseReceiver_setInterfaceId(receiver, "lo");
174 GooseSubscriber subscriber = GooseSubscriber_create("
175     SEL_751_1CFG/LLNO$GO$GOOSE_SL_1", NULL); //Especifica o
176     de quem o ied ir receber as mensagens goose
177
178 GooseSubscriber_setListener(subscriber, gooseListener,
179                             iedServer);
180
181 GooseReceiver_addSubscriber(receiver, subscriber);
182

```

```
175      /* Come a a receber mensagens SV e GOOSE*/
176
177      GooseReceiver_start(receiver);
178      SVReceiver_start(receiverSV);
179
180
181      //Thread_sleep(1000);
182
183      IedServer_setGoCBHandler(iedServer, goCbEventHandler, NULL);
184
185      /* MMS server will be instructed to start listening to client
186         connections. */
187      IedServer_start(iedServer, 102);
188      IedServer_setControlHandler(iedServer,
189                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS001, (ControlHandler)
190                                  controlHandlerForBinaryOutput,
191                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS001);
192
193      IedServer_setControlHandler(iedServer,
194                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS002, (ControlHandler)
195                                  controlHandlerForBinaryOutput,
196                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS002);
197
198      IedServer_setControlHandler(iedServer,
199                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS003, (ControlHandler)
200                                  controlHandlerForBinaryOutput,
201                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS003);
202
203      IedServer_setControlHandler(iedServer,
204                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS004, (ControlHandler)
205                                  controlHandlerForBinaryOutput,
206                                  IEDMODEL_CON_RBGGIO1_SPCS004);
207      if (!IedServer_isRunning(iedServer)) {
208          printf("Starting server failed! Exit.\n");
209      }
```

```
200     IedServer_destroy(iedServer);
201     exit(-1);
202 }
203
204     running = 1;
205
206     signal(SIGINT, sigint_handler);
207
208     while (running) {
209
210         Thread_sleep(0.20833);
211     }
212
213     /* stop MMS server - close TCP server socket and all client
214        sockets */
215     IedServer_stop(iedServer);
216
217     /* Cleanup - free all resources */
218     SVReceiver_destroy(receiverSV);
219     IedServer_destroy(iedServer);
220
221     return 0;
222 } /* main() */
```

## APÊNDICE C – CÓDIGO-FONTE VIED COM FUNÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

```
1
2 #include "goose_receiver.h"
3 #include "goose_subscriber.h"
4 #include "iec61850_server.h"
5 #include "hal_thread.h" /* for Thread_sleep() */
6 #include <signal.h>
7 #include <stdlib.h>
8 #include <stdio.h>
9 #include <string.h>
10 #include "mms_value.h"
11 #include "goose_publisher.h"
12 #include "sv_subscriber.h"
13 #include <math.h>
14 #include "static_model.h"
15
16
17 /* import IEC 61850 device model created from SCL-File */
18 extern IedModel iedModel;
19
20 int contador = 0; //variavel para auxiliar na funcao de abertura
    do disjuntor
21 static int running = 0;
22 static IedServer iedServer = NULL;
23 int contadorSV1 = 0;
24 int contadorSV2 = 0;
25 float SVrms_deltaA = 0;
26 float SVrms_deltaB = 0;
27 float SVrms_deltaC = 0;
28 float SVrms_estrelaA = 0;
29 float SVrms_estrelaB = 0;
30 float SVrms_estrelaC = 0;
```

```

31 static float r_transformacao = 2.8868;
32
33 void sigint_handler(int signalId)
34 {
35     running = 0;
36 }
37
38 /* Callback handler for received SV messages */
39 static void
40 svUpdateListener (SVSubscriber subscriber, void* parameter,
41     SVSubscriber_ASDU asdu)
42 {
43     //printf("svUpdateListener called\n");
44
45     const char* svID = SVSubscriber_ASDU_getSvId(asdu);
46     float corrente_primarioA = 0;
47     float corrente_primarioB = 0;
48     float corrente_primarioC = 0;
49     float corrente_secundarioA = 0;
50     float corrente_secundarioB = 0;
51     float corrente_secundarioC = 0;
52     int teste = 0;
53
54     if ((strcmp(svID, "IEDNameMU0101"))== 0){
55         SVrms_deltaA = (SVrms_deltaA + pow((
56             SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 0)*0.001), 2));
57         SVrms_deltaB = (SVrms_deltaB + pow((
58             SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 8)*0.001), 2));
59         SVrms_deltaC = (SVrms_deltaB + pow((
60             SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 16)*0.001), 2));
61         contadorSV1 += 1;
62     }
63
64     if ((strcmp(svID, "IEDNameMU0201"))== 0){

```

```

60     SVrms_estrelaA = (SVrms_estrelaA + pow((
        SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 0)*0.001),2));
61     SVrms_estrelaB = (SVrms_estrelaB + pow((
        SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 8)*0.001),2));
62     SVrms_estrelaC = (SVrms_estrelaC + pow((
        SVSubscriber_ASDU_getINT32 (asdu, 16)*0.001),2));
63     contadorSV2 += 1;
64 }
65
66 if (contadorSV1==80)
67 {
68     system ("clear");
69     printf("  svID=(%s)\n", svID);
70     printf("  smpCnt: %i\n", SVSubscriber_ASDU_getSmpCnt(asdu))
        ;
71     printf("  confRev: %u\n", SVSubscriber_ASDU_getConfRev(asdu
        ));
72     corrente_primarioA = sqrt(SVrms_deltaA / 80);
73     corrente_primarioB = sqrt(SVrms_deltaB / 80);
74     corrente_primarioC = sqrt(SVrms_deltaB / 80);
75     printf("  A corrente RMS da linha A no prim rio    : %f [A
        ]\n", corrente_primarioA );
76     printf("  A corrente RMS da linha B no prim rio    : %f [A
        ]\n", corrente_primarioB );
77     printf("  A corrente RMS da linha C no prim rio    : %f [A
        ]\n", corrente_primarioC );
78     contadorSV1 += 1;
79 }
80
81 if (contadorSV2==80)
82 {
83     printf("  svID=(%s)\n", svID);
84     printf("  smpCnt: %i\n", SVSubscriber_ASDU_getSmpCnt(asdu))
        ;

```

```

85     printf("   confRev: %u\n", SVSubscriber_ASDU_getConfRev(asdu
        ));
86     corrente_primarioA = sqrt(SVrms_deltaA / 80);
87     corrente_primarioB = sqrt(SVrms_deltaB / 80);
88     corrente_primarioC = sqrt(SVrms_deltaB / 80);
89     corrente_secundarioA = sqrt(SVrms_estrelaA / (80))/
        r_transformacao;
90     corrente_secundarioB = sqrt(SVrms_estrelaB / (80))/
        r_transformacao;
91     corrente_secundarioC = sqrt(SVrms_estrelaC / (80))/
        r_transformacao;
92     printf("   A corrente RMS da linha A no secund rio
        refletida no prim rio   : %f [A]\n",
        corrente_secundarioA);
93     printf("   A corrente RMS da linha B no secund rio
        refletida no prim rio   : %f [A]\n",
        corrente_secundarioB);
94     printf("   A corrente RMS da linha C no secund rio
        refletida no prim rio   : %f [A]\n",
        corrente_secundarioC);
95     contadorSV1=0;
96     contadorSV2=0;
97     SVrms_deltaA = 0;
98     SVrms_deltaB = 0;
99     SVrms_deltaC = 0;
100    SVrms_estrelaA = 0;
101    SVrms_estrelaB = 0;
102    SVrms_estrelaC = 0;
103
104    if ((abs(corrente_primarioA - corrente_secundarioA)/
        corrente_primarioA)*100>30)
105    {
106        printf("
        -----

```

```

n");
107 printf("    ATUAR FUN    O 87T: Diferen a maior que
      30%% na linha A -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1 E
      11T1 ENVIADO\n");
108 printf("
      -----
n");
109 IedServer_updateDbposValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_CSWI1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
110 IedServer_updateDbposValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
111 IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general, true);
112 printf("\n");
113 teste = teste+1;
114 }
115 if((abs(corrente_primarioB - corrente_secundarioB)/
      corrente_primarioB)*100 > 30){
116 printf("
      -----
n");
117 printf("    ATUAR FUN    O 87T: Diferen a maior que
      30%% na linha B -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1
      E 11T1 ENVIADO\n");
118 printf("
      -----
n");
119 IedServer_updateDbposValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_CSWI1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
120 IedServer_updateDbposValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
121 IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
      IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general, true);
122 printf("\n");

```

```
123         teste = teste+1;
124     }
125     if((abs(corrente_primarioC-corrente_secundarioC)/
126         corrente_primarioC)*100>30){
127         printf("
128             -----
129             n");
130         printf("    ATUAR FUN    O 87T: Diferen a maior que
131             30%% na linha C -----> COMANDO DE ABERTURA DE 12T1
132             E 11T1 ENVIADO\n");
133         printf("
134             -----
135             n");
136         IedServer_updateDbposValue(iedServer ,
137             IEDMODEL_LDO_CSWI1_Pos_stVal , DBPOS_ON);
138         IedServer_updateDbposValue(iedServer ,
139             IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal , DBPOS_ON);
140         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer ,
141             IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general , true);
142         printf("\n");
143         teste = teste+1;
144     }
145     if (teste == 0){
146         IedServer_updateDbposValue(iedServer ,
147             IEDMODEL_LDO_CSWI1_Pos_stVal , DBPOS_OFF);
148         IedServer_updateDbposValue(iedServer ,
149             IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal , DBPOS_OFF);
150         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer ,
151             IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general , false);
152     }else{
153         exit(0);
154     }
155 }
```

```

144     }
145
146 static void
147 goCbEventHandler(MmsGooseControlBlock goCb, int event, void*
    parameter)
148 {
149     printf("Access to GoCB: %s\n", MmsGooseControlBlock_getName(
        goCb));
150     printf("          GoEna: %i\n", MmsGooseControlBlock_getGoEna(
        goCb));
151 }
152
153 //Fun   o Listener
154
155 static void
156 gooseListener(GooseSubscriber subscriber, void* parameter)
157 {
158     MmsValue* values = GooseSubscriber_getDataSetValues(subscriber)
        ;
159
160     char buffer[50];
161
162     MmsValue_printToBuffer(values, buffer, 50);
163
164
165     /*****seletividade assinante*****/
166
167     char b; char c; char d;
168
169     b = buffer[1];
170     c = buffer[6];
171     d = buffer[11];
172

```

```
173     if ((b != 116) && (c != 116) && (d != 116) && (contador == 0))
174     {
175         IedServer_updateDbposValue(iedServer,
176             IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_OFF);
177         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
178             IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general, false);
179     }
180
181     if ((b == 116) && (c != 116) && (d != 116)) //116 o valor da
182     tabela ASCII para T (True)
183     {
184         printf("CORRENTE DE FALTA \n");
185         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
186             IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general, false);
187     }
188
189     if ((b == 116) && (c == 116) && (d != 116))//116 o valor da
190     tabela ASCII para T (True)
191     {
192         printf("N O ATUAR - SELETIVIDADE L GICA \n");
193     }
194
195     if ((b == 116) && (c == 116) && (d == 116))//116 o valor da
196     tabela ASCII para T (True)
197     {
198         contador = 1;
199         printf("FALHA DE DISJUNTOR \n");
200         IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
201             IEDMODEL_LDO_PTRC1_Tr_general, true);
202         printf("SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR \n");
203         printf("DISJUNTOR ABERTO \n");
204         IedServer_updateDbposValue(iedServer,
205             IEDMODEL_LDO_XCBR1_Pos_stVal, DBPOS_ON);
206     }
```

```
198     if (contador == 1) {
199         IedServer_updateDbposValue(iedServer ,
200             IEDMODEL_LD0_XCBR1_Pos_stVal , DBPOS_OFF);
201     }
202 }
203 int
204 main(int argc, char** argv)
205 {
206     IedServerConfig config = IedServerConfig_create();
207
208     iedServer = IedServer_createWithConfig(&iedModel, NULL, config)
209         ;
210
211     IedServerConfig_destroy(config);
212
213     SVReceiver receiverSV = SVReceiver_create();
214
215     if (argc > 1) {
216         char* ethernetIfcID = argv[1];
217
218         printf("Using GOOSE interface: %s\n", ethernetIfcID);
219
220         /* set GOOSE interface for all GOOSE publishers (GCBs) */
221         IedServer_setGooseInterfaceId(iedServer, ethernetIfcID);
222         SVReceiver_setInterfaceId(receiverSV, ethernetIfcID);
223     }
224
225     if (argc > 2) {
226         char* ethernetIfcID = argv[2];
227
228         printf("Using GOOSE interface for GenericIO/LLNO.
229             gcbAnalogValues: %s\n", ethernetIfcID);
```

```
229      /* set GOOSE interface for a particular GOOSE publisher (
230          GCB) */
231      IedServer_setGooseInterfaceIdEx(iedServer,
232          IEDMODEL_LDO_LLNO, "BRep0201", ethernetIfcID);
233  }
234
235  /*Preparando o c d i g o para receber mensagens SV*/
236  SVSubscriber subscriberSV = SVSubscriber_create(NULL, 0x4000);
237  SVSubscriber_setListener(subscriberSV, svUpdateListener, NULL);
238  SVReceiver_addSubscriber(receiverSV, subscriberSV);
239
240  /*Preparando o c d i g o para publicar mensagens GOOSE*/
241  IedServer_enableGoosePublishing(iedServer);
242  GooseReceiver receiver = GooseReceiver_create();
243  GooseReceiver_setInterfaceId(receiver, "enp1s0f1");
244  GooseSubscriber subscriber = GooseSubscriber_create("
245      SEL_7IEDNameMU020151_1CFG/LLNO$GO$GOOSE_SL_1", NULL); //
246      Especifica o de quem o ied ir receber as mensagens
247      goose
248  GooseSubscriber_setListener(subscriber, gooseListener,
249      iedServer);
250  GooseReceiver_addSubscriber(receiver, subscriber);
251
252  /*Come a a receber mensagens SV e GOOSE*/
253  GooseReceiver_start(receiver);
254  SVReceiver_start(receiverSV);
255
256  //Thread_sleep(1000);
257
258  IedServer_setGoCBHandler(iedServer, goCbEventHandler, NULL);
```

```
257     /* MMS server will be instructed to start listening to client
258         connections. */
259
260     IedServer_start(iedServer, 102);
261
262     if (!IedServer_isRunning(iedServer)) {
263         printf("Starting server failed! Exit.\n");
264         IedServer_destroy(iedServer);
265         exit(-1);
266     }
267
268     running = 1;
269
270     signal(SIGINT, sigint_handler);
271
272     while (running) {
273         Thread_sleep(0.20833);
274     }
275
276     /* stop MMS server - close TCP server socket and all client
277         sockets */
278     IedServer_stop(iedServer);
279
280     /* Cleanup - free all resources */
281     SVReceiver_destroy(receiverSV);
282     IedServer_destroy(iedServer);
283
284     return 0;
285 } /* main() */
```

## APÊNDICE D – FORMULÁRIOS APLICADOS NA REALIZAÇÃO DE AULA EXPOSITIVA UTILIZANDO A PLATAFORMA PAC

A seguir são apresentados os formulários feito no *Google Forms* entregues aos alunos participantes antes e após a aula expositiva utilizando a Plataforma PAC. Junto a cada pergunta há um gráfico com ilustração das respostas obtidas.

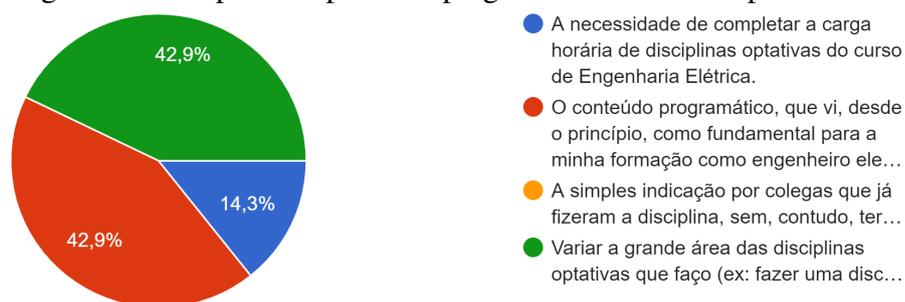
### D.1 Formulário Pré-Aula

**Questão 1.** Qual o principal motivo de você se matricular na disciplinar de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)?

- (a) A necessidade de completar a carga horária de disciplinas optativas do curso de Engenharia Elétrica.
- (b) O conteúdo programático, que vi, desde o princípio, como fundamental para a minha formação como engenheiro eletricista.
- (c) A simples indicação por colegas que já fizeram a disciplina, sem, contudo, ter expectativas quanto ao conteúdo que seria ministrado.
- (d) Variar a grande área das disciplinas optativas que faço (ex: fazer uma disciplina de Eletrônica de Potência, uma de Sistemas de Potência e outra de Controle).

As respostas obtidas para a questão 1 são apresentadas na Figura 90.

Figura 90 – Respostas a primeira pergunta do formulário pré-aula.

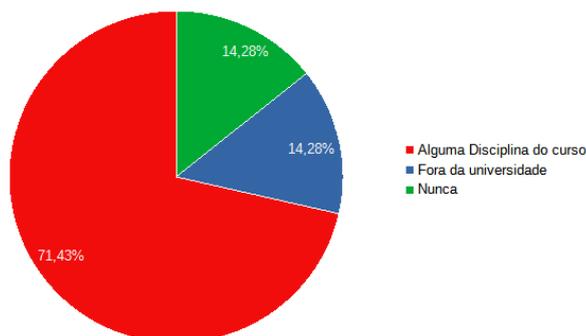


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 2.** Você já teve algum contato com Proteção de SEP antes da disciplina? Se sim, onde?

As respostas obtidas para a questão 2 são apresentadas na Figura 91.

Figura 91 – Respostas a segunda pergunta do formulário pré-aula.



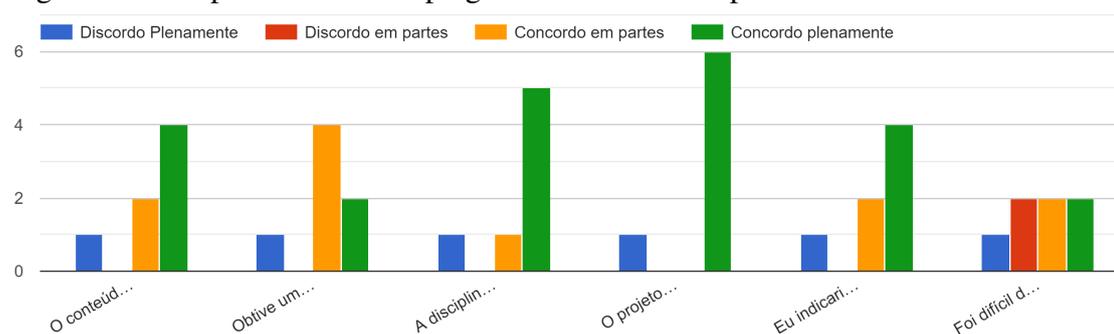
Fonte: Próprio Autor.

**Questão 3.** Para cada afirmação nas linhas, associe a um nível de concordância (Discordo Plenamente, Discordo em partes, Concordo em partes, Concordo plenamente)

- (a) O conteúdo repassado em sala de aula foi suficiente para a introdução à Proteção de SEP;
- (b) Obtive um excelente aprendizado na disciplina;
- (c) A disciplina é muito importante para minha formação profissional;
- (d) O projeto da disciplina me ajudou a fixar o conteúdo ensinado na sala de aula;
- (e) Eu indicaria esta disciplina a um colega;
- (f) Foi difícil de entender alguns conceitos sem exemplificação prática em laboratório.

As respostas obtidas para a questão 3 são apresentadas na Figura 92.

Figura 92 – Respostas a terceira pergunta do formulário pré-aula.

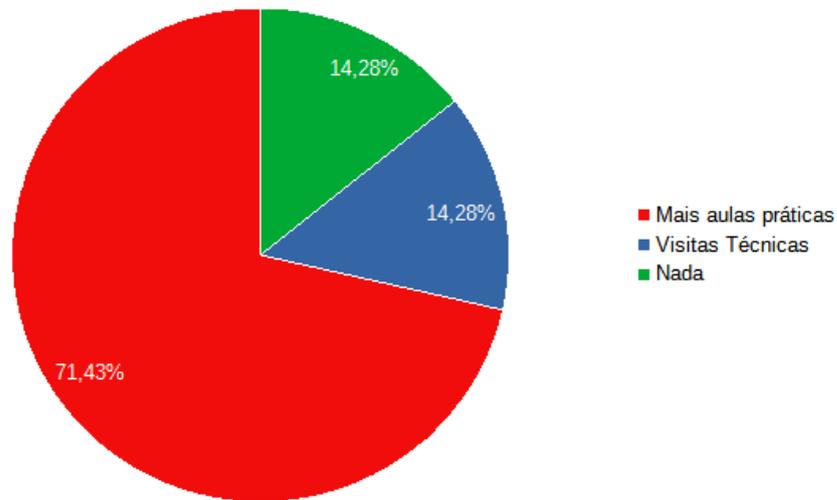


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 4.** Do que você mais sentiu falta na disciplina para ajudar no entendimento da proteção de SEP?

As respostas obtidas para a questão 4 são apresentadas na Figura 93.

Figura 93 – Respostas a quarta pergunta do formulário pré-aula.

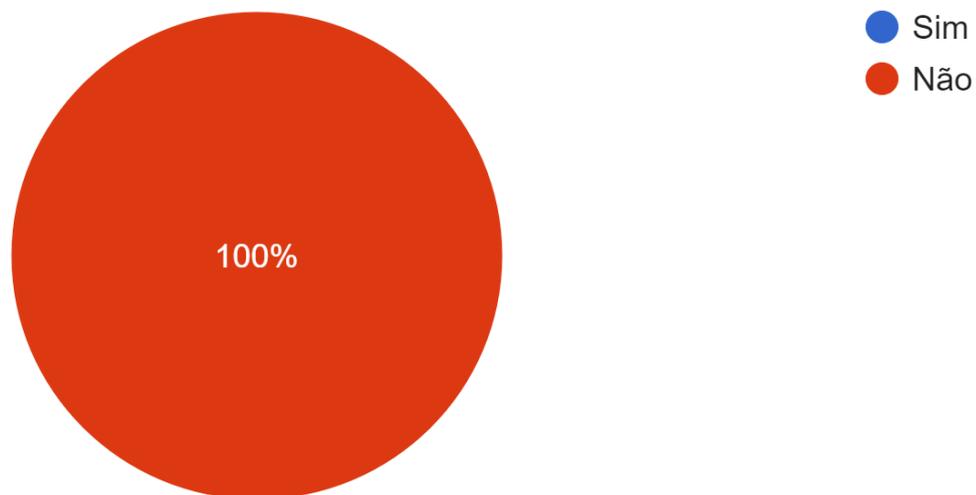


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 5.** Você tinha conhecimento do conteúdo e da aplicação da IEC 61850 antes de cursar a disciplina de Proteção de SEP?

As respostas obtidas para a questão 5 são apresentadas na Figura 94.

Figura 94 – Respostas a quinta pergunta do formulário pré-aula.

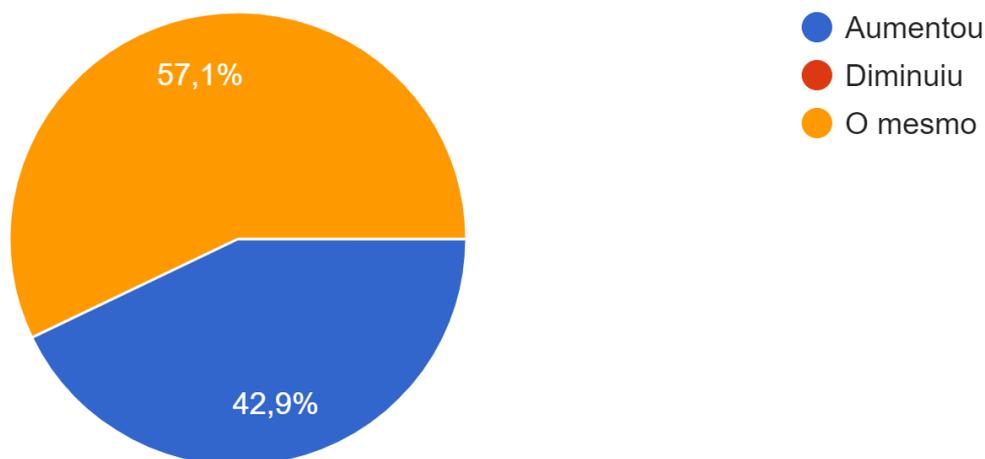


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 6.** Após ter cursado a disciplina, o seu interesse pela área de Proteção de SEP aumentou, diminuiu ou continuou o mesmo?

As respostas obtidas para a questão 6 são apresentadas na Figura 95.

Figura 95 – Respostas a sexta pergunta do formulário pré-aula.

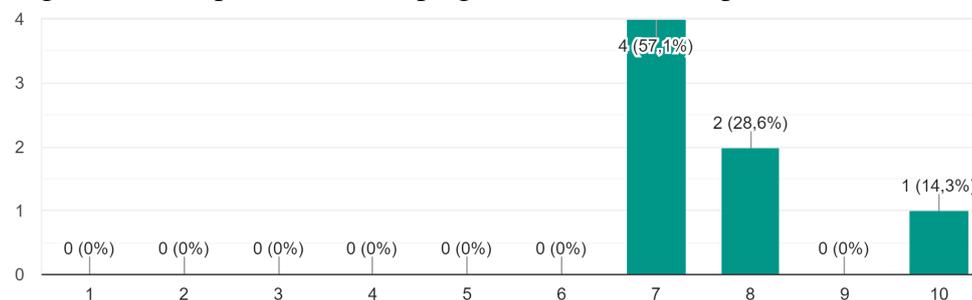


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 7.** Numa escala de 1 a 10, responda: Qual o seu nível de motivação para trabalhar com Proteção de SEP após ter cursado a disciplina, caso exista a possibilidade?

As respostas obtidas para a questão 7 são apresentadas na Figura 96.

Figura 96 – Respostas a sétima pergunta do formulário pré-aula.

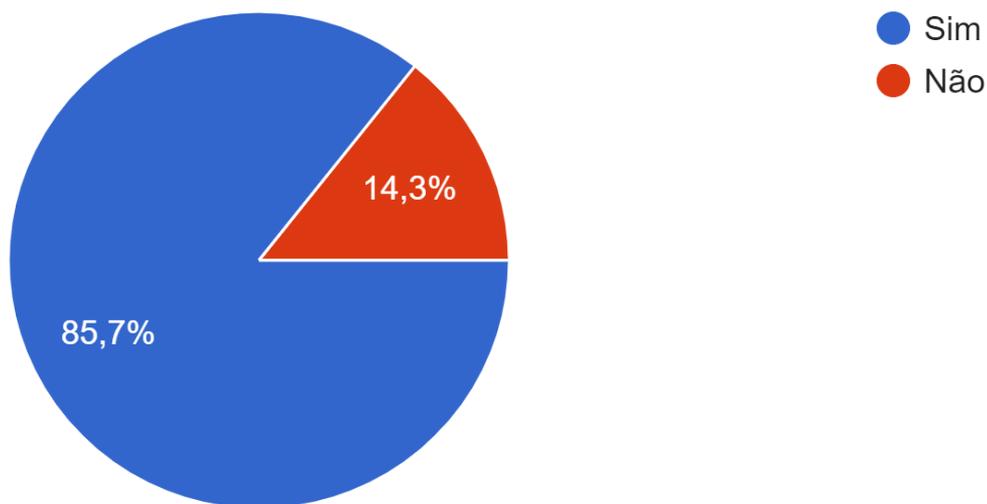


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 8.** Você consideraria fazer seu Trabalho de Conclusão de Curso na área de Proteção de SEP?

As respostas obtidas para a questão 8 são apresentadas na Figura 97.

Figura 97 – Respostas a oitava pergunta do formulário pré-aula.



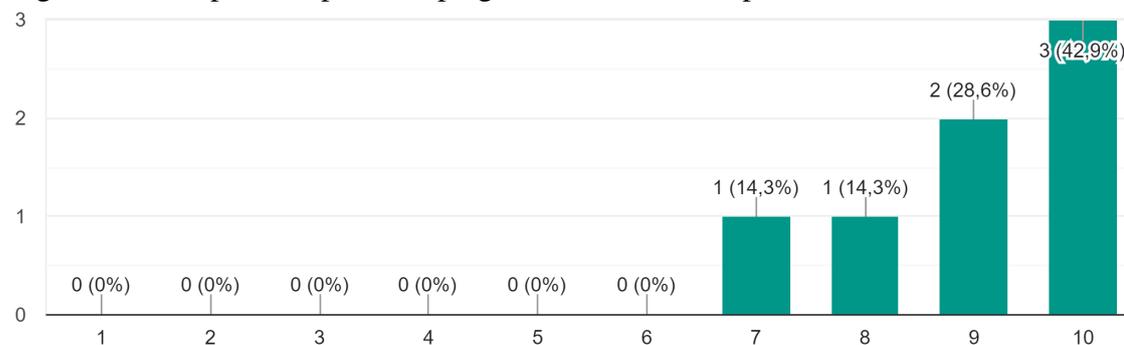
Fonte: Próprio Autor.

## D.2 Formulário Pós-Aula

**Questão 1.** Numa escala de 1 a 10, responda: você entendeu os conceitos da IEC 61850 apresentados na prática?

As respostas obtidas para a questão 1 são apresentadas na Figura 98

Figura 98 – Respostas a primeira pergunta do formulário pós-aula.

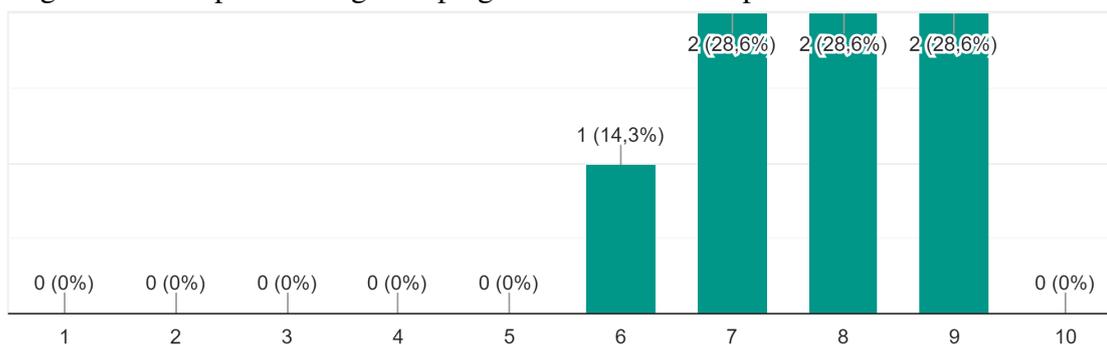


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 2.** Numa escala de 1 a 10, responda: Como você considera o nível de complexidade da IEC 61850 no que diz respeito ao temas abordados no laboratório?

As respostas obtidas para a questão 2 são apresentadas na Figura 99

Figura 99 – Respostas a segunda pergunta do formulário pós-aula.

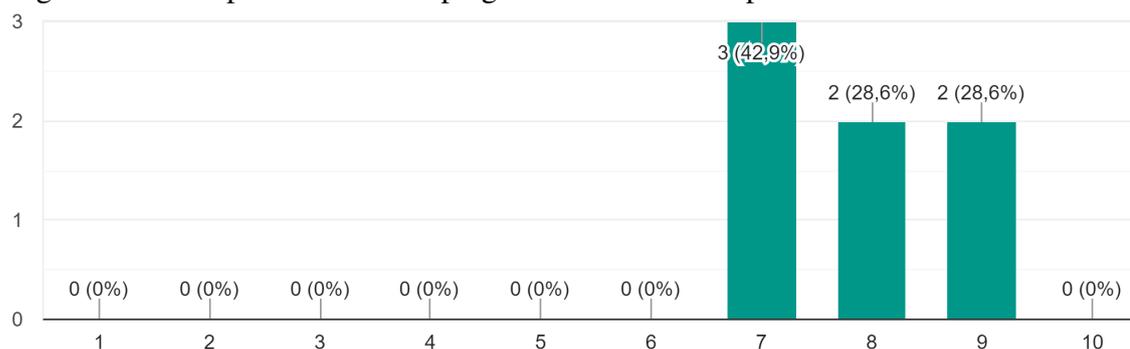


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 3.** Numa escala de 1 a 10, responda: Qual o seu interesse em estudar os temas da IEC 61850 após a aula de laboratório?

As respostas obtidas para a questão 3 são apresentadas na Figura 100

Figura 100 – Respostas a terceira pergunta do formulário pós-aula.

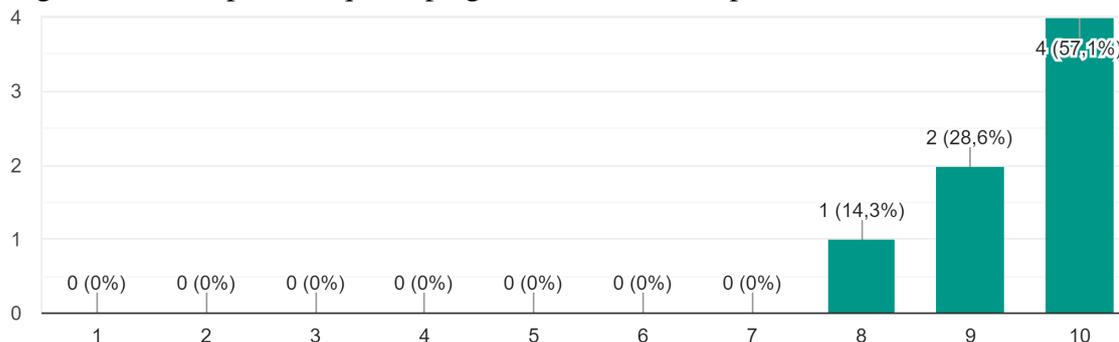


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 4.** Numa escala de 1 a 10, responda: Como foi a abordagem da prática em relação a utilização da IEC 61850 juntamente com o SCADA Elipse?

As respostas obtidas para a questão 4 são apresentadas na Figura 101

Figura 101 – Respostas a quarta pergunta do formulário pós-aula.

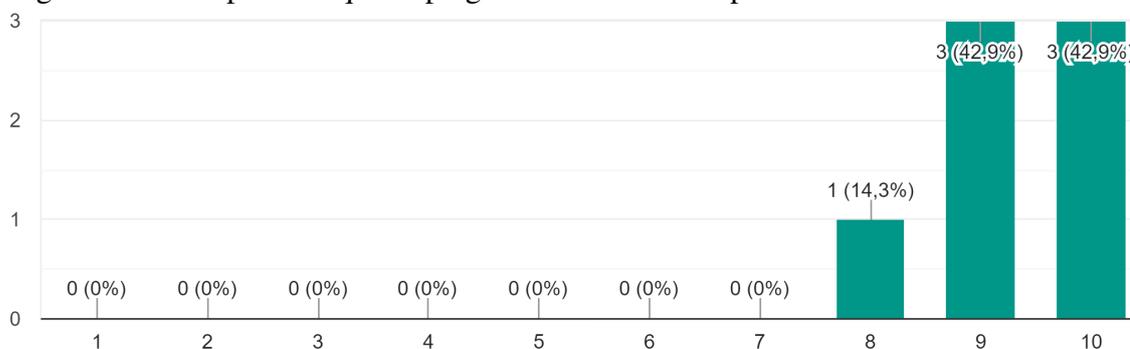


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 5.** Numa escala de 1 a 10, responda: Você entendeu os conceitos relacionados ao VIED?

As respostas obtidas para a questão 5 são apresentadas na Figura 102

Figura 102 – Respostas a quinta pergunta do formulário pós-aula.

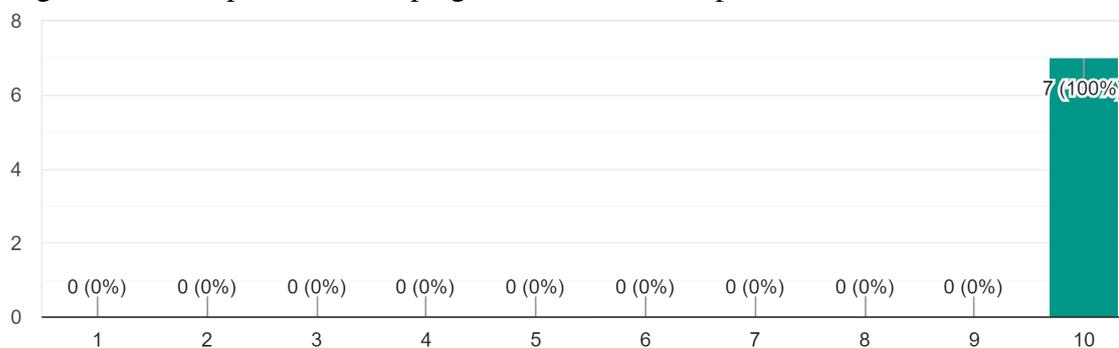


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 6.** Numa escala de 1 a 10, responda: Você conseguiu entender as situações de seletividade lógica abordadas na prática?

As respostas obtidas para a questão 6 são apresentadas na Figura 103

Figura 103 – Respostas a sexta pergunta do formulário pós-aula.

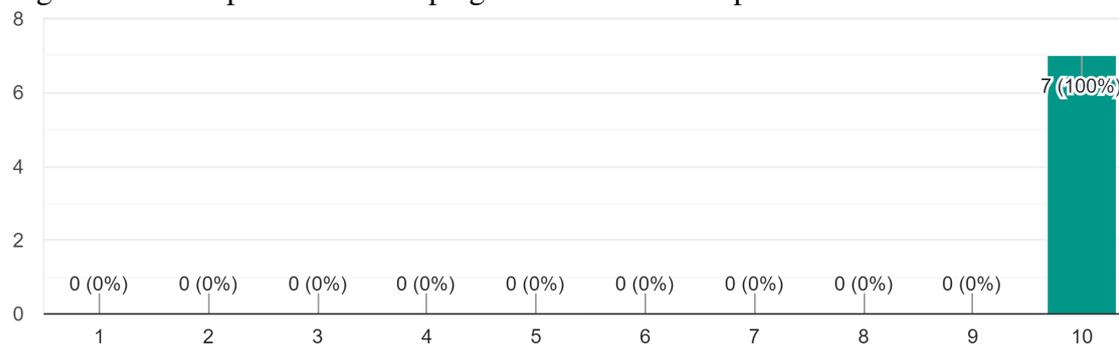


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 7.** Numa escala de 1 a 10, responda: Como você avalia a prática realizada?

As respostas obtidas para a questão 7 são apresentadas na Figura 104

Figura 104 – Respostas a sétima pergunta do formulário pós-aula.

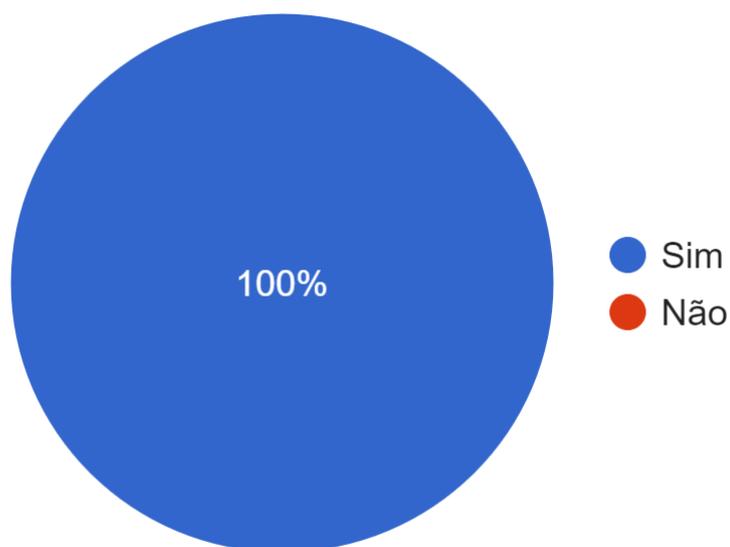


Fonte: Próprio Autor.

**Questão 8.** Você acredita que mais práticas como a realizada ajudaria a fixar o conteúdo aprendido em sala de aula?

As respostas obtidas para a questão 8 são apresentadas na Figura 105

Figura 105 – Respostas a oitava pergunta do formulário pós-aula.



Fonte: Próprio Autor.

**APÊNDICE E – PLANO DE PROJETOS DA DISCIPLINA SUPERVISÃO E  
CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Ano/Semestre

### 1 – Identificação

Disciplina:	Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos de Potência
Professor:	
Curso:	Graduação em Engenharia Elétrica

### 2 – Justificativa

Os projetos propostos são necessários para capacitar os alunos a aplicar conhecimentos adquiridos ao longo da disciplina, bem como desenvolver habilidades e senso crítico desejados para atuação no mercado de proteção de sistemas elétricos.

### 3 – Objetivos

Projetar a proteção, o controle e a supervisão de situações propostas; Desenvolver dispositivos virtuais (VIEDs) com funções de IEDs de proteção.

### 4 – Projetos Propostos

Projeto 1 – VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) para proteger alimentador;

Projeto 2 – VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) com função assinante em seletividade lógica;

Projeto 3 – VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção diferencial de transformador (87T);

Projeto 4 – VIED padrão IEC 61850 integrado a um SCADA.

### 5 – Metodologia

**METODOLOGIA:** Os alunos serão agrupados em equipes de quantidade de componentes dependente do número de alunos matriculados e lhes será entregue uma proposta de projeto especificando o resultado final desejado. Os alunos deverão apresentar dois relatórios em datas especificadas, realizar apresentações orais e mostrar os resultados obtidos.

**RECURSOS:** Será disponibilizada aos alunos a Plataforma PAC para testes, sendo necessário marcar previamente a data para a operação na Plataforma, a fim de que haja acompanhamento por parte do monitor da disciplina.

## 6 – Avaliação

AVALIAÇÕES: Dois Relatórios (R1 e R2), duas Apresentações Oraís (AO1 e AO2) e Demonstração dos resultados do Projeto (DP). A média prática (MP), que será utilizada para compor a nota final da disciplina, será calculada da seguinte maneira:

$$MP = \frac{(R1+R2+AO1+AO2+DP)}{5}$$

RELATÓRIOS: O relatório 1 é um documento técnico que apresenta o andamento do projeto. O relatório 2 é o documento final. Os relatórios poderão ter uma nota mínima 0 (zero) e uma nota máxima 10 (dez). Serão avaliados os seguintes critérios: formatação do documento; fundamentação teórica; descrição dos materiais utilizados, resultados apresentados; conclusão.

APRESENTAÇÕES ORAIS: As apresentações Oraís serão feitas para toda a turma a cada entrega de relatório e poderão ter uma nota mínima 0 (zero) e uma nota máxima 10 (dez). Serão avaliados os seguintes critérios: uso adequado do tempo (15 minutos); organização entre os membros da equipe; recursos utilizados; conteúdo apresentado.

DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROJETO: Serão avaliados os resultados obtidos pela equipe diante dos resultados pretendidos.

## 7 – Descrição do projeto e dos resultados pretendidos

Projeto 1 - Desenvolver um VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e testá-lo na Plataforma PAC emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização do dispositivo de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED diante da aplicação de faltas trifásicas equilibradas de corrente que sensibilizam a função de proteção 50; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da IEC 61850. Para este projeto, a configuração do sistema requisitará o ajuste de dois datasets de proteção, os quais deverão ser feitos pela equipe. Os resultados desejados citados anteriormente devem ser apresentados para cada dataset.

Projeto 2 - Desenvolver um VIED padrão EC 61850 com a função de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e testá-lo na Plataforma PAC em um contexto de seletividade lógica junto a um IED físico editor, emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização dos dispositivos de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED assinante e do IED editor diante da aplicação de faltas trifásicas equilibradas de corrente que sensibilizam a função de proteção 50; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da IEC 61850.

Projeto 3 - Desenvolvimento de um VIED padrão IEC 61850 com a função de proteção diferencial de transformador (87T) e testá-lo na Plataforma PAC emulando o sistema elétrico definido pelo professor. Os resultados desejados são: parametrização dos dispositivos de proteção diante do sistema proposto; correta operação do VIED diante de uma falta interna a um transformador; correta operação do VIED diante de uma falta externa a um transformador; apresentar o tráfego de rede com as mensagens da IEC 61850. O resultado da operação do VIED diante de uma falta interna a um transformador deve ser apresentado para três situações: Corrente do lado de alta do transformador maior que a corrente do lado de baixa; corrente do lado de baixa maior que a corrente do lado de alta (fluxo reverso de corrente); corrente do lado de baixa

nula.

Projeto 4 - Desenvolver um VIED padrão IEC 61850 capaz de se comunicar com o SCADA da Plataforma PAC para um sistema elétrico proposto pelo professor. Os resultados desejados são: elaboração do diagrama proposto pelo professor no SCADA; conectar o VIED ao SCADA; associar os comandos do VIED a um disjuntor do diagrama; atualizar o status de disjuntor via mensagens do VIED e apresentar na tela do SCADA.