



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALICE DE SOUSA FREITAS

PLATAFORMA ABERTA PARA ENSINO DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E
CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM IEDS FÍSICOS E
VIRTUAIS PADRÃO IEC 61850

FORTALEZA

2022

ALICE DE SOUSA FREITAS

PLATAFORMA ABERTA PARA ENSINO DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO
IEC 61850

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Ph.D Ruth Pastôra Saraiva
Leão

Coorientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio

FORTALEZA

2022

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

- F936p Freitas, Alice de Sousa.
Plataforma aberta para ensino de proteção, automação e controle de sistemas elétricos de potência com IEDs físicos e virtuais padrão IEC 61850 / Alice de Sousa Freitas. – 2022.
118 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão.
Coorientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
1. Proteção elétrica. 2. Automação de subestações. 3. IEC 61850. 4. Virtualização. 5. Plataforma de ensino. I. Título.

CDD 621.3

ALICE DE SOUSA FREITAS

PLATAFORMA ABERTA PARA ENSINO DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM IEDS FÍSICOS E VIRTUAIS PADRÃO
IEC 61850

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Ph.D 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)

Eng. Claudivan Domingos de Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Rita Maria e José Valdir.

Ao meu irmão, Apolo.

Ao meu companheiro, Paulo Igor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rita Maria e José Valdir, que sempre me apoiaram incondicionalmente.

Ao meu irmão Apolo Freitas, por me inspirar com sua curiosidade e vontade de saber.

Ao meu namorado, Paulo Igor, por toda ajuda, amizade, carinho e paciência demonstrados durante esses anos de graduação e os de vida que temos juntos.

Às minhas amigas de longa data, Gabriella Barroso e Maria Flavyanne, por todas as conquistas, alegrias e dificuldades compartilhadas.

Aos grandes amigos que fiz durante essa caminhada, Bruno Mascarenhas, Carolina Dias, Larissa Montenegro, Maria Annalyanne, Nathanael Duque e Raul Assunção, por me acolherem e por todas as conversas, risadas, saídas e horas de estudo. Sem vocês eu certamente não teria conseguido.

À minha colega de quarto, Carolina Brandão, por ser a melhor colega de quarto que alguém poderia ter.

Aos professores Ruth Leão, Raimundo Furtado, Natália Barroso, Raphael Amaral e Atslands Rocha, por toda dedicação ao ensino e pesquisa, e pelos aconselhamentos acadêmicos e profissionais.

Aos engenheiros Claudivan Freitas e Lucas Félix, por todo o auxílio prestado durante o desenvolvimento e escrita deste trabalho.

À Tecsys Jr., por ter proporcionado os melhores anos da minha graduação, em especial à direção executiva de 2019.2, Davi Mendes, Gustavo Penaforte e Letícia Vasconcelos. Sou muito grata pela pessoa que me tornei na companhia de vocês.

Aos programas de assistência estudantil, em especial ao programa de Residência Universitária, por subsidiar minha permanência na Universidade.

Aos membros da banca, pela disponibilidade, em especial ao Prof. Dr. Lucas Silveira Melo, por ter aceitado o convite para participação e pelas contribuições.

Aos meus gestores de estágio, Vanice Dornellas, Alef Ramos e Marina Miano, pelo exemplo de profissionalismo e pelos incentivos durante a escrita deste trabalho.

À minha tia Lúcia Freitas, por todo suporte prestado nos meus primeiros anos residindo em Fortaleza.

“E até que a morte eu sinta chegando, prossigo cantando, beijando o espaço.” (Zé Ramalho).

RESUMO

A criação da norma IEC 61850 representou um marco para a comunicação nos sistemas de automação de subestações (SASs) ao definir padrões para alcançar a interoperabilidade num ambiente permeado de protocolos proprietários. Sua concepção e desenvolvimento almejaram a estabilidade conceitual, de forma que a sua versão mais recente abrange toda a gama de inovações e demandas as quais o sistema elétrico de potência tem passado. Outra tecnologia que tem conquistado espaço no SAS é a virtualização, devido aos potenciais benefícios em aspectos como redução de custos com equipamentos e dependência de hardware, bem como a otimização de atividades operacionais. Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma infraestrutura laboratorial de ensino de proteção, automação e controle de sistemas elétricos, composta por IEDs padrão IEC 61850, físicos e virtuais, visando contribuir no aprendizado dos graduandos e qualificá-los nos conceitos e aplicações mais recentes e pesquisados nessa área. A plataforma também conta com a integração de softwares OPC e SCADA, e de um testador hexafásico, ampliando o leque de conceitos que podem ser estudados a partir dela. Nesse sentido, foram elaborados cenários de testes onde foi verificada a boa dinâmica entre os IEDs virtuais e os IEDs físicos, como também o sucesso dos IEDs virtuais na realização de seletividade lógica com e sem falha de disjuntor. Os testes também contemplaram a aplicação do OPC e do SCADA, onde foi possível monitorar o comportamento dos disjuntores mediante a ocorrência de falha.

Palavras-chave: Proteção Elétrica. Automação de Subestações. IEC 61850. Virtualização. Plataforma de Ensino.

ABSTRACT

The creation of the IEC 61850 standard represented a milestone for communication in substation automation systems by defining standards to achieve interoperability in an environment permeated by proprietary protocols. Its conception and development aimed at conceptual stability, so that its latest version covers the entire range of innovations and demands that the power electrical system has gone through. Another technology that has been conquering space in the SAS is virtualization, due to the potential benefits in aspects such as reduced equipment costs and hardware dependency, as well as the optimization of operational activities. Within this context, this paper aims to present the development of a laboratory infrastructure for teaching protection, automation and control of electrical systems, composed of IEC 61850 standard IEDs, both physical and virtual, in order to contribute to the students learning and to qualify them in the most recent concepts and applications researched in this area. The platform also has the integration of OPC and SCADA software, and a six-phase tester, expanding the range of concepts that can be studied from it. In this sense, test scenarios were developed where the good dynamics between the virtual IEDs and the physical IEDs were verified, as well as the success of the virtual IEDs in performing logical selectivity with and without breaker failure. The tests also contemplated the application of OPC and SCADA, where it was possible to monitor the behavior of the breakers upon the occurrence of a failure.

Keywords: Electrical Protection. Substation Automation. IEC 61850. Virtualization. Teaching Platform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Níveis hierárquicos do sistema de automação de subestações.....	18
Figura 2	Modelo de referência OSI.....	21
Figura 3	Topologia de rede em barramento.....	22
Figura 4	Topologia de rede em estrela.....	22
Figura 5	Topologia de rede em anel.....	23
Figura 6	Curvas tempo x corrente.....	26
Figura 7	Esquema básico de seletividade lógica.....	28
Figura 8	Modelo de dados preconizado pela IEC 61850.....	32
Figura 9	Modelo de referência de uma informação no padrão IEC 61850.....	32
Figura 10	Comunicação vertical no ambiente de subestação.....	34
Figura 11	Comunicação horizontal no ambiente de subestação.....	35
Figura 12	Arquitetura de virtualização do SAS.....	37
Figura 13	Bancada de proteção de sistemas elétricos pertencente ao GREI.....	41
Figura 14	Rede local da bancada de proteção de sistemas elétricas.....	41
Figura 15	Arquitetura de implementação de nível cliente da biblioteca libIEC61850.....	43
Figura 16	Arquitetura de implementação de nível servidor da biblioteca libIEC61850....	43
Figura 17	Erro encontrado no CID gerado pelo SEL 751.....	46
Figura 18	Trecho do arquivo <i>static.model.c</i>	46
Figura 19	Trecho do arquivo <i>static.model.h</i>	47
Figura 20	Criação do IED virtual.....	48
Figura 21	Tela inicial do <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i>	49
Figura 22	Adicionar IED no <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i>	49
Figura 23	Importar dados para o <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i>	50
Figura 24	Leitura dos dados do IED selecionado.....	50
Figura 25	Exibição das pastas da estrutura de dados do IED.....	51
Figura 26	IEDs conectados.....	52
Figura 27	Botão de inicialização do <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i>	52
Figura 28	Tela de exibição da conexão do <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i> com o IED físico assinante.....	53
Figura 29	Tela inicial do SCADA LAquis.....	54
Figura 30	Adicionar <i>tag</i> no SCADA LAquis.....	55

Figura 31	Seleção do <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i> no SCADA LAquis.....	56
Figura 32	Escolha da <i>tag</i> do <i>Multi-Protocol MasterOPC Server</i> no SCADA LAquis.....	56
Figura 33	Tela inicial do supervisório desenvolvido.....	57
Figura 34	Ícones de inserção de imagem, inserção de texto e botão.....	57
Figura 35	Ícones de chave e criação de formas.....	57
Figura 36	Diagrama unifilar do Campus do Pici construído no SCADA LAquis.....	58
Figura 37	Associação de <i>tag</i> a um alarme.....	58
Figura 38	Diagrama unifilar da rede do Campus do Pici.....	59
Figura 39	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea em pré-falta.....	61
Figura 40	Critério de parada da simulação e tempo do IED físico para sobrecorrente instantânea sem falha de disjuntor.....	62
Figura 41	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falha.....	63
Figura 42	IED físico pós falta sem falha de disjuntor.....	64
Figura 43	Critério de parada da simulação da função sobrecorrente instantânea com falha de disjuntor.....	65
Figura 44	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falha e falha de disjuntor.....	66
Figura 45	IED físico pós falta com falha de disjuntor.....	67
Figura 46	Sinais monitorados e tempo de atuação durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	68
Figura 47	IEDs físicos após o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	70
Figura 48	Sinais monitorados e tempo de atuação durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	71
Figura 49	IEDs físicos após o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	73
Figura 50	Execução do código de um servidor MMS.....	74
Figura 51	<i>Reports</i> recebidos pelo cliente MMS.....	74
Figura 52	Tráfego de mensagens via MMS.....	74
Figura 53	Inicialização do programa GOOSE editor.....	75
Figura 54	Recebimento das mensagens GOOSE pelo programa assinante.....	75
Figura 55	Captura de uma mensagem GOOSE publicada pelo programa editor.....	76
Figura 56	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea em pré-	77

	falta com IED virtual.....	
Figura 57	Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual para sobrecorrente instantânea sem falha de disjuntor.....	78
Figura 58	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta utilizando o IED virtual.....	79
Figura 59	Mensagens exibidas pelo IED virtual durante o teste de sobrecorrente sem falha de disjuntor.....	79
Figura 60	Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta e falha de disjuntor utilizando IED virtual.....	80
Figura 61	Mensagens exibidas pelo IED virtual durante o teste de sobrecorrente com falha de disjuntor.....	81
Figura 62	Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual editor.....	81
Figura 63	Tráfego da rede local durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual editor.....	82
Figura 64	Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED físico editor.....	83
Figura 65	Mensagem exibida pelo IED virtual assinante durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	84
Figura 66	Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual assinante.....	85
Figura 67	Mensagens exibidas pelo IED virtual assinante durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	86
Figura 68	Associação da <i>tag</i> de estado do disjuntor ao disjuntor 11T2 no SCADA LAquis.....	87
Figura 69	Associação da <i>tag</i> de estado do disjuntor ao disjuntor 21L3 no SCADA LAquis.....	87
Figura 70	Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em pré-falta.....	88
Figura 71	Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de pré-falta.....	88
Figura 72	Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	89
Figura 73	Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	89
Figura 74	Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica com falha de disjuntor.....	90

Figura 75	Leitura do estado do disjuntor 21L3 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica com falha de disjuntor.....	90
Figura 76	Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	91
Figura 77	Tela principal do <i>software ACSELERATOR QuickSet</i>	98
Figura 78	Janela de parâmetros de comunicação.....	99
Figura 79	Janela de seleção do modelo do relé.....	99
Figura 80	Janela de configuração do <i>Part Number</i> do relé escolhido.....	100
Figura 81	Janela de configuração da proteção de sobrecorrente.....	100
Figura 82	Tela principal do <i>software acSELERator Architect</i>	101
Figura 83	Tela de definição dos <i>Datasets</i> para GOOSE.....	102
Figura 84	Janela de configuração das mensagens a serem enviadas.....	102
Figura 85	Aba de configuração das mensagens a serem recebidas pelo relé assinante.....	103
Figura 86	Janela de configuração de proteção instantânea de sobrecorrente.....	104
Figura 87	Janela de configuração da lógica de <i>trip</i>	104
Figura 88	Janela de configuração da lógica da proteção de falha de disjuntor.....	105
Figura 89	Tela do diagrama unifilar da rede do Campus do Pici.....	112
Figura 90	Tela de monitoramento de disjuntores.....	112
Figura 91	Tela de alarmes.....	113
Figura 92	Tela de gráficos de corrente.....	113
Figura 93	Tela de relatórios.....	114
Figura 94	Tela de exportação de relatórios.....	114

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Representação dos sinais enviados pelos IEDs físicos durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	69
Gráfico 2	Representação dos sinais enviados pelos IEDs físicos durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	72
Gráfico 3	Representação dos sinais enviados pelos IEDs físico e virtual durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor.....	84
Gráfico 4	Representação dos sinais enviados pelos IEDs físico e virtual durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estrutura da Norma IEC 61850.....	30
Tabela 2	Endereço IP dos dispositivos conectados à rede.....	41
Tabela 3	Lista de módulos e submódulos da libIEC61850.....	44
Tabela 4	Lista de valores de PRO/BK1XCBR1.Pos\$stVal.....	87
Tabela 5	Ordem de Ajuste da Proteção.....	98
Tabela 6	Agrupamento das <i>tags</i> no SCADA LAquis.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CID	<i>Configuration IED Description</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DCOM	<i>Distributed Component Object Model</i>
GREI	Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LD	<i>Logical Device</i>
LN	<i>Logical Node</i>
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
OPC	<i>Open Platform Communications</i>
OPC-DA	<i>Open Platform Communications - Data Access</i>
OPC-A&E	<i>Open Platform Communications - Alarms & Events</i>
OPC-HA	<i>Open Platform Communications - Historical Data Access</i>
OPC-UA	<i>Open Platform Communications - Unified Architecture</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
SAS	Sistema de Automação de Subestação
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCD	<i>System Configuration Description</i>
SCL	<i>Substation Configuration Language</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SSD	<i>Substation Specification Description</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UCD	Unidade de Controle do Sistema de Distribuição
UCS	Unidade de Controle da Subestação
UTR	Unidade Terminal Remota

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Contexto e justificativa.....	14
1.2	Objetivos do trabalho.....	15
1.2.1	<i>Objetivo principal.....</i>	15
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	15
1.3	Estrutura do trabalho.....	16
2	AUTOMAÇÃO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	17
2.1	Sistema de Automação de Subestações (SAS).....	17
2.2	Componentes dos sistemas de automação.....	18
2.2.1	<i>Dispositivos Eletrônicos Inteligentes</i>	18
2.2.2	<i>Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA).....</i>	19
2.2.3	<i>Redes de comunicação.....</i>	20
2.2.3.1	<i>Topologia em barramento.....</i>	21
2.2.3.2	<i>Topologia em estrela.....</i>	22
2.2.3.3	<i>Topologia em anel.....</i>	22
2.3	Proteção de sistemas elétricos de potência.....	23
2.3.1	<i>Dispositivos de proteção.....</i>	24
2.3.1.1	<i>Relés de proteção.....</i>	24
2.3.1.2	<i>Disjuntores.....</i>	25
2.3.1.3	<i>Fusíveis.....</i>	25
2.3.2	<i>Proteção instantânea e temporizada de sobrecorrente (50/51).....</i>	26
2.3.2.1	<i>Coordenação da proteção.....</i>	27
2.3.3	<i>Seletividade lógica.....</i>	27
3	VIRTUALIZAÇÃO E PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	29
3.1	Norma IEC 61850.....	29
3.1.1	<i>Estrutura da norma IEC 61850.....</i>	30
3.1.2	<i>Modelo de dados da IEC 61850.....</i>	31
3.1.3	<i>Linguagem de configuração SCL.....</i>	33
3.1.4	<i>Protocolos da norma IEC 61850.....</i>	34
3.1.4.1	<i>MMS - Manufacturing Message Specification.....</i>	34

3.1.4.2	<i>GOOSE - Generic Object Oriented Substation Event</i>	34
3.2	Virtualização no contexto do SAS	35
3.3	Padrão de comunicação OPC	38
4	DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DIDÁTICA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS	40
4.1	Metodologia	40
4.2	Biblioteca libIEC61850	42
4.3	Desenvolvimento do IED virtual	45
4.4	Multi-Protocol MasterOPC Server	48
4.5	SCADA LAquis	53
4.5.1	<i>Desenvolvimento do supervisório</i>	55
5	TESTES E RESULTADOS	59
5.1	Cenários de testes	59
5.2	Testes com IEDs físicos	60
5.2.1	<i>Sobrecorrente instantânea</i>	60
5.2.1.1	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de pré-falha</i>	60
5.2.1.2	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta sem falha de disjuntor</i>	61
5.2.1.3	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta com falha de disjuntor</i>	64
5.2.2	<i>Seletividade lógica sem falha de disjuntor</i>	67
5.2.3	<i>Seletividade lógica com falha de disjuntor</i>	70
5.3	Testes com IED virtual	73
5.3.1	<i>Teste de comunicação MMS</i>	73
5.3.2	<i>Teste de comunicação GOOSE</i>	75
5.3.3	<i>Sobrecorrente instantânea</i>	76
5.3.3.1	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de pré-falha</i>	76
5.3.3.2	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta sem falha de disjuntor</i>	77
5.3.3.3	<i>Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta com falha de disjuntor</i>	80
5.3.4	<i>Seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual editor</i>	81
5.3.5	<i>Seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual assinante</i>	82
5.3.6	<i>Seletividade lógica com falha de disjuntor com IED virtual assinante</i>	84
5.4	Integração do IED virtual ao SCADA LAquis	86
5.4.1	<i>Pré-falha</i>	87

5.4.2	<i>Seletividade lógica sem falha de disjuntor</i>	89
5.4.3	<i>Seletividade lógica com falha de disjuntor</i>	90
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	92
6.1	Conclusões	92
6.2	Trabalhos futuros	93
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A - PARAMETRIZAÇÃO DOS IEDS	98
	APÊNDICE B - CÓDIGO EXECUTADO PARA IED VIRTUAL	
	ASSINANTE	106
	APÊNDICE C - AGRUPAMENTO DAS TAGS NO SCADA LAQUIS	110
	APÊNDICE D - TELAS SCADA LAQUIS	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativa

O sistema elétrico de potência tem recebido ao longo das últimas décadas atualizações tecnológicas e novos arranjos, tais como a integração de plantas de geração de energia incentivada e distribuída, dos sistemas de armazenamento de energia, e mais recentemente, a adaptação do setor para incorporação dos veículos elétricos (DAS *et al.*, 2015; 2016). Diante desse contexto, é requisitado dos sistemas de automação da rede a requalificação de sua infraestrutura e os meios de operação e manutenção, apoiando-se em inovações disponibilizadas pela área de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC), com o objetivo de prover a segurança e confiabilidade essenciais para a acomodação dessas atualizações tecnológicas. Entre as modernizações já implementadas, destaca-se a adoção dos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) nos projetos de proteção. Estes dispositivos caracterizam-se pela alta capacidade de processamento, integração com *software* e redes de comunicações (WÓJTOWICZ *et al.*, 2018).

Todavia, como em qualquer avanço na engenharia, fornecer maior desempenho para a automação das redes elétricas traz consigo desafios que não podem ser subestimados, refletidos no alto custo de aquisição de equipamentos e dispositivos, e na implementação e manutenção deles. Shoaib (2019) aponta uma provável solução para essas dificuldades, ao citar as tecnologias de virtualização como forma de atenuar o dispêndio, no que se refere à compra de *hardware* e *software*. Em (DAYABHAI *et al.*, 2015) são tratados os benefícios da virtualização aplicada às subestações, citando a maior eficiência operacional, diminuição da dependência de *hardware*, melhorias em velocidade das interfaces de comunicação, bem como maior robustez contra indisponibilidade da rede.

Como tecnologia emergente, a virtualização tem sido objeto de pesquisa com aplicações em diversos segmentos. Em (WÓJTOWICZ *et al.*, 2018) foi desenvolvida uma plataforma para execução de testes de desempenho de IEDs virtuais, com análises de possíveis cenários de implementação dessa técnica. Em (ANSARI *et al.*, 2019) é apresentada a virtualização de uma RTU, bem como demonstrações de sua aplicação. A virtualização, em conjunto com a computação em nuvem, vem sendo empregada na automação de redes elétricas de pequeno porte, como mostrado por (FERREIRA *et al.*, 2018).

Diante dessa tendência, o Grupo de Redes Elétricas Inteligentes da UFC - GREI iniciou em 2018 um estudo sobre a virtualização de IEDs baseados na norma IEC 61850, que rendeu o trabalho descrito em (MAGALHÃES, 2019), o qual serviu como base para o

desenvolvimento deste trabalho. A ideia de aplicar os IEDs virtuais em uma plataforma de ensino de proteção vem da necessidade em qualificar os alunos da graduação no que há de mais recente nessa área, principalmente no que se refere à norma IEC 61850. Estudos como os realizados em (SHAHNIA *et al.*, 2014), (BRAHMA *et al.*, 2009), (THOMAS *et al.*, 2011) e (LABONNE *et al.*, 2021), corroboram a importância das aulas laboratoriais na formação acadêmica e profissional dos graduandos. Segundo os resultados obtidos por (SHAHNIA *et al.*, 2016), o aprendizado de proteção de sistemas elétricos em laboratório tem produzido desfecho positivo em aspectos como a participação ativa dos alunos durante as aulas, melhoria na satisfação com a disciplina, melhoria no desempenho final e aumento na disposição dos alunos em desenvolver trabalhos finais de curso e trabalhos de pós-graduação relacionados com a área.

Do intuito de abranger uma maior quantidade de conceitos associados à automação e proteção de subestações, partiu-se a ideia de integrar um sistema supervisório à plataforma de ensino. Para garantir acessibilidade a todos os estudantes, foi utilizado um *software* de licença de uso livre, representado pelo SCADA LAquis. Para viabilizar a sua incorporação à plataforma, foi necessária a aplicação do protocolo OPC, baseada nos trabalhos desenvolvidos em (DOS SANTOS, 2015) e em (CELINO, 2014).

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma infraestrutura laboratorial de ensino de proteção, automação e controle de sistemas elétricos, formada por IEDs físicos e virtuais baseados na norma IEC 61850, e por *softwares* de comunicação e supervisão com licença de uso livre.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar a virtualização de um IED físico a partir de seu arquivo *Configuration IED Description* (CID);
- Implementar funções de comunicação baseadas nos protocolos *Manufacturing Message Specification* (MMS) e *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE);

- Executar a comunicação do IED virtual com IEDs físicos e com o testador hexafásico;
- Testar e validar a atuação do IED virtual nas funções de sobrecorrente instantânea, seletividade lógica e falha de disjuntor;
- Desenvolver a integração via protocolo OPC entre os IEDs físicos e virtuais e o *software* SCADA LAquis;
- Desenvolver telas de supervisão no *software* SCADA LAquis;
- Realizar a leitura de dados dos IEDs (físicos e virtuais) em tempo real no SCADA LAquis.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho é composto de seis capítulos, estruturados como apresentado a seguir:

No Capítulo 1 são apresentados a justificativa, os objetivos e estruturação do trabalho.

O Capítulo 2 é de embasamento teórico, no qual é apresentada uma breve introdução às áreas que contextualizam o trabalho, consistindo dos sistemas de automação de subestação e da proteção de sistemas elétricos de potência.

O Capítulo 3 aborda conceitos mais específicos que serviram de ferramentas no desenvolvimento do trabalho. São apresentados a norma IEC 61850 e seus protocolos, a virtualização no contexto de subestações e o padrão de comunicação OPC.

O Capítulo 4 trata da descrição da plataforma de ensino, abrangendo as etapas de desenvolvimento do IED virtual, da configuração do OPC e da criação de telas no SCADA LAquis.

O Capítulo 5 apresenta os testes de validação da comunicação do IED virtual e de sua atuação na execução das funções de proteção, bem como os resultados de sua integração ao SCADA LAquis.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as principais propostas de trabalhos futuros.

2 AUTOMAÇÃO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos conceitos que contextualizam o trabalho, abordando a automação de subestações, filosofia da proteção de sistemas elétricos e as funções de proteção que serão tratadas nos capítulos 4 e 5.

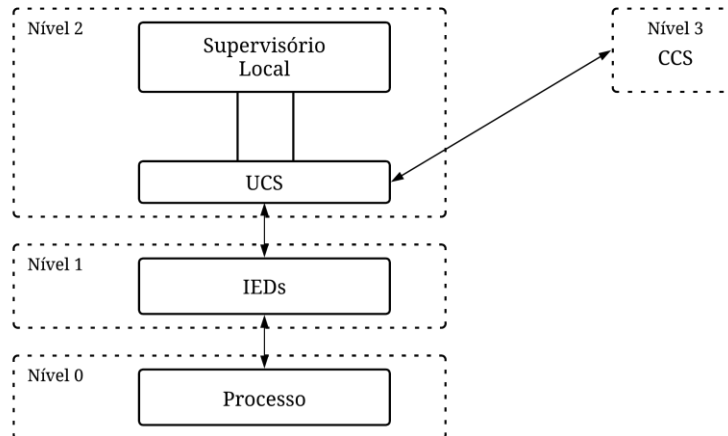
2.1 Sistema de Automação de Subestações (SAS)

O número de equipamentos, os requisitos de controle e os procedimentos de operação encontrados em subestações de energia elétrica de médio e grande porte, conduzem naturalmente à necessidade de automação (RUCH, 2011). Deste modo, os Sistemas de Automação de Subestação surgiram da necessidade de supervisionar, comandar, controlar e proteger os diversos elementos que interagem entre si e compõem o ambiente da subestação (JARDINI, 1997). Ainda segundo Jardini (1997), pode-se empregar as seguintes funções automáticas em uma subestação:

- Sinalização ou monitoramento de estado (*status*) de equipamentos;
- Medição;
- Proteções de linha, de transformador, de barra, de reator, por perda de sincronismo, por falha de disjuntor, e monitoramento das proteções;
- Religamento automático, estimativa de localização de falta na linha e corte seletivo de cargas;
- Telecomando;
- Controle de equipamentos de chaveamento (intertravamento) e sequência automática de chaveamentos;
- Monitoramento de sobrecarga em transformadores;
- Controle local de tensão e fluxo de reativo;
- Alarmes, indicação e registro de sequência de eventos;
- Interface homem-máquina, oscilografia e impressão de relatórios;
- Auto diagnose.

Os componentes e funções que compõem um SAS são divididos em agrupamentos hierárquicos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Níveis hierárquicos do sistema de automação de subestações



Fonte: Sampaio (2002, com adaptações).

O nível zero, também chamado de processo, refere-se aos equipamentos primários da subestação, como por exemplo, transformadores de potência, transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), disjuntores, religadores, chaves manuais, seccionadoras, entre outros. O nível um ou *bay*, compreende os dispositivos responsáveis pela proteção e comando dos equipamentos presentes no nível zero, tratando-se dos relés de proteção e controle, além de dispositivos de medição e monitoramento. O nível dois ou nível de estação, é marcado pela presença das unidades de controle central ou da subestação (UCC/UCS) e dos demais recursos que podem compor a automação da subestação, de acordo com a tecnologia adotada, sendo responsável por coletar, organizar e apresentar aos operadores as informações do nível 1. Como mostra a Figura 1, é possível ainda, encontrar o nível 3 na hierarquia de automação, referente ao Centro de Controle do Sistema da concessionária (SAMPAIO, 2017).

2.2 Componentes dos sistemas de automação

2.2.1 Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED)

Inicialmente, a proteção dos sistemas elétricos era realizada por relés eletromecânicos constituídos predominantemente de elementos mecânicos acionados por acoplamentos eletromagnéticos, os quais não possuíam a capacidade de se comunicar, de modo que sua única função era comandar a abertura do disjuntor por ele supervisionado na ocorrência de uma falta (DA SILVA, 2013; DE SOUZA, 2016). Com a evolução da microeletrônica surgiram os IEDs (*Intelligent Electronic Device*), definidos como dispositivos

microprocessados (digitais) capazes de enviar e receber dados de, ou para, uma fonte externa, armazenando uma considerável quantidade de dados quanto ao seu status interno e o sistema como um todo ao qual monitora, controla e/ou protege (MENDES, 2011; DE SOUZA, 2016). A partir de então, os IEDs proporcionaram aos SASs benefícios no monitoramento da subestação como o controle local e remoto, aprimoramento das funcionalidades de proteção existentes e desenvolvimento de novas aplicabilidades, monitoramento das condições dos equipamentos em operação e muitas outras funções que não poderiam ser facilmente implementadas com os dispositivos convencionais que não utilizavam tecnologias de comunicação (WÓJTOWICZ *et al.*, 2018).

2.2.2 Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA)

Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) consistem em softwares que permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Essas informações são coletadas do sistema através de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas e posteriormente, apresentadas ao usuário através de interfaces gráficas (DE SOUZA, 2016).

No contexto de um SAS, o SCADA tem como função realizar a supervisão e controle centralizados dos equipamentos primários e de sistemas secundários, de forma a subsidiar a tomada de decisão e efetiva ação dos operadores de subestações e redes elétricas em menor tempo possível (MENDES, 2011; MAGALHÃES, 2019). Giroux (2012) cita os três principais componentes de um sistema SCADA:

- Estação de Supervisão: Ambiente gráfico utilizado como meio de interação entre o operador e o próprio sistema, conhecido também por Interface Homem-Máquina (IHM), baseado em um software de supervisão e microcomputador compatível com o sistema, ou computador industrial.
- Sistema de controle e aquisição de dados: Executado por equipamento dissociado da estação de supervisão, sendo bastante comum o uso de Unidades Terminais Remotas (UTR). As UTRs são dispositivos para aquisição de dados que têm boa capacidade de comunicação. São responsáveis pelo gerenciamento e envio dos sinais coletados ao SCADA. Devido ao seu grau de importância, as UTR geralmente são robustas, visando garantir a confiabilidade da operação da subestação.
- Infraestrutura de comunicação: Baseada em conversores de protocolo e interfaces de *Input/Output* (I/O), é responsável por realizar a comunicação

entre a estação de supervisão (nível 2) e as unidades de controle do nível de *bay* (nível 1).

Da Silva (2013) salienta que apesar do sistema SCADA ser um elemento de fundamental importância para os SASs, as funções de proteção, sinalização, monitoramento e comando da subestação via relé de proteção, devem ser implementadas de forma independente do supervisório, pois em caso de ocorrência de algum problema na comunicação entre o centro de controle do sistema e a UCS ou entre a UCS e os relés, todas as funções da subestação devem continuar suas operações normalmente.

2.2.3 Redes de comunicação

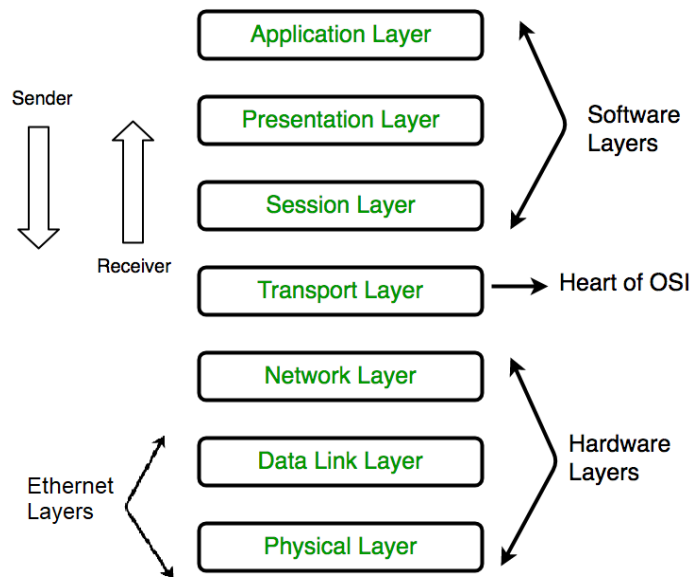
As redes de comunicação têm papel fundamental na automação, pois devem garantir a transmissão dos dados em velocidade adequada e ter disponibilidade. A comunicação de dados em sistemas de automação ocorre em diversos níveis, os quais demandam diferentes características e requisitos. No contexto do SAS, as características podem ser agrupadas conforme os níveis hierárquicos descritos na Seção 2.1. Por exemplo, no nível zero, onde se concentram os equipamentos primários, os requisitos de tempo para as comunicações são da ordem de centenas de microssegundos a milissegundos. O tempo de resposta deve ser muito rápido e a latência e o atraso devem ser os menores praticáveis. Nesse mesmo nível, considera-se que o volume de dados é relativamente pequeno e as mensagens são simples (MENDES, 2011).

No nível um, onde estão os dispositivos inteligentes, os tempos podem ser da ordem de até dezenas de milissegundos e o volume de dados é moderado, além das mensagens transmitidas conterem maior grau de informação. No nível dois, onde estão as estações de trabalho e servidores, há um volume considerável de troca de dados, porém com o requisito de tempo não tão crítico, podendo ser da ordem de frações de segundos (MENDES, 2011).

No início da utilização de redes de comunicação nas subestações predominavam limitações básicas como velocidade de comunicação e a imposição de comunicação centralizada baseada apenas em arquitetura mestre/escravo. Essa configuração de rede trazia como consequência a restrição de desempenho das funções distribuídas, inviabilizando esse tipo de abordagem. Outro ponto destacável era a ausência de um padrão de rede único que atendesse a todos os níveis citados. Com o avanço da tecnologia de informação e comunicação essa realidade foi superada, e atualmente é possível utilizar um único padrão de

rede em todos os níveis do SAS. A escolha que tem se destacado é a rede Ethernet (IEEE 802.3), devido à simplificação de configuração e gerenciamento para aplicações em SASs. A rede Ethernet utiliza as camadas físicas e enlace de dados do modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*) da *International Standards Organization* (ISO) (MENDES, 2011). O modelo OSI divide as tarefas de comunicação em sete camadas, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo de referência OSI



Fonte: Acervo Lima (2022, com adaptações).

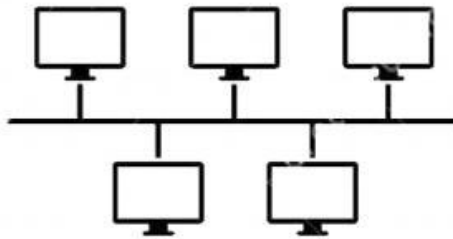
Fisicamente, as redes de comunicação são implementadas em topologias, cuja escolha é de fundamental importância para a eficiência operacional e confiabilidade de uma subestação. As premissas básicas que devem ser observadas são: funcionalidades requeridas do SAS, grau de importância da instalação, taxa de falhas admissível e o custo total dos componentes necessários à implantação (GIROUX, 2012).

2.2.3.1 Topologia em barramento

Caracterizada por todos os nós serem conectados ao mesmo meio de transmissão, ou em um mesmo barramento físico de dados, apresenta como principais vantagens a performance potencializada pela transmissão em *broadcasting* e a expansão econômica e de fácil execução. Em relação às desvantagens, se houver uma grande quantidade de dados sendo transmitidos, ocorre uma diminuição na taxa de transmissão, pois o meio de comunicação é único para todos os dispositivos conectados no barramento. Outro contraponto é que caso ocorra algum problema com o barramento, como uma ruptura em algum trecho do cabo, ou

com um dos dispositivos conectados ao barramento, o funcionamento de toda a rede é interrompido. Para se aumentar a confiabilidade dessa topologia e evitar a interrupção da comunicação, deve-se adicionar um segundo barramento ao sistema, o qual funcionará como redundância (DA SILVA, 2013). A Figura 3 ilustra a topologia em barramento.

Figura 3 - Topologia de rede em barramento

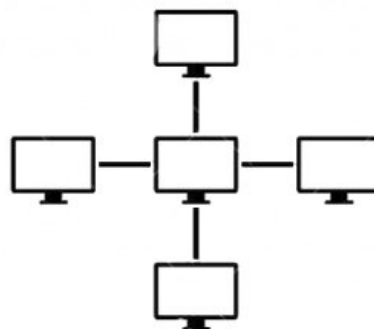


Fonte: Anlix (2022).

2.2.3.2 Topologia em estrela

Na topologia em estrela os nós estão individualmente conectados a um dispositivo central, de forma que se ele falhar, toda a rede pode ser paralisada. A conexão individual dos componentes ao dispositivo central acarreta um custo maior de instalação. Para aumentar a confiabilidade desta topologia, acrescenta-se uma segunda conexão para cada componente, que servirá de redundância para os dispositivos conectados (DA SILVA, 2013). A Figura 4 ilustra a topologia em estrela.

Figura 4 - Topologia de rede em estrela



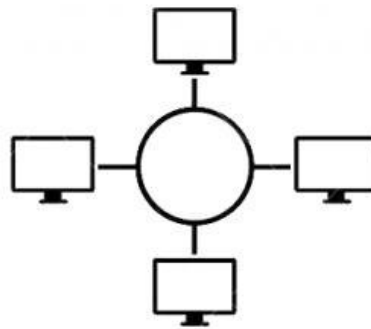
Fonte: Anlix (2022).

2.2.3.3 Topologia em anel

Esta topologia apresenta os componentes da rede conectados através de um caminho fechado. Uma rede em anel apresenta vantagens do ponto de vista do fluxo de

informações, uma vez que todos os nós acessam a rede de maneira igual, já que a comunicação é unidirecional. Outra vantagem está na performance da rede ser pouco afetada pelo aumento de dispositivos conectados. As desvantagens desta topologia são a possibilidade de prejuízo de toda a rede pela falha de apenas um nó, bem como a dificuldade de isolamento de falhas pontuais. Considera-se também que para ampliar a rede é necessária sua paralisação. A ação de redundância que pode ser tomada é a adoção de uma estrutura de *backup*, de forma a construir uma topologia em anel duplo (MAGALHÃES, 2019).

Figura 5 - Topologia de rede em anel



Fonte: Anlix (2022).

2.3 Proteção de sistemas elétricos de potência

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão do segmento do sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte deles. Em segundo lugar, o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

Os sistemas de proteção constituem uma parte fundamental do SAS, pois eles garantem a integridade dos equipamentos do SEP, a segurança das pessoas e aumenta o grau de confiabilidade do sistema elétrico (CARNEIRO, 2021). Segundo Mamede e Mamede Filho (2013), para se obter um bom desempenho na atuação das proteções, um projeto de proteção deve considerar algumas propriedades fundamentais:

- Seletividade: Somente o elemento de proteção mais próximo do defeito deve desconectar a parte defeituosa do sistema elétrico;
- Zonas de atuação: O sistema elétrico é dividido em zonas, de forma que durante a ocorrência de uma falta, o elemento de proteção deve ser capaz de definir se uma dada ocorrência é interna ou externa à zona protegida, e atuar somente no caso em que for interna;

- **Velocidade:** A velocidade de atuação para um elemento de proteção deve ser a maior possível, com o objetivo de evitar que ocorram maiores danos ao sistema e às pessoas;
- **Sensibilidade:** O elemento de proteção deve reconhecer com precisão a faixa e os valores indicados para a sua operação e não operação;
- **Confiabilidade:** O sistema de proteção deve ser seguro e exato quanto às suas respectivas atuações;
- **Automação:** O elemento de proteção deve operar automaticamente quando for solicitado pelas grandezas elétricas que o sensibilizam e retornar sem auxílio humano.

Os sistemas elétricos estão sujeitos permanentemente a eventos de diferentes naturezas que podem ocasionar falhas na operação, fazendo-se necessária a utilização de um conjunto de proteções, cada uma específica para um determinado evento. As sobrecorrentes são os eventos mais comuns nos sistemas elétricos de forma geral, e são os que submetem os componentes elétricos aos maiores níveis de desgaste e comprometimento de sua vida útil. As sobrecorrentes podem ser classificadas, quanto a dois diferentes níveis: sobrecargas e curtos-circuitos. As sobrecargas são variações moderadas da corrente que flui no sistema elétrico. Se ocorrerem limitadas no seu módulo e no tempo, não prejudicam os componentes elétricos do sistema. Muitas vezes, o sistema já é projetado para permitir sobrecargas por tempo limitado. No entanto, quando o valor da corrente de sobrecarga ultrapassa os limites permitidos de qualquer dos componentes, seu valor deve ser reduzido ou o equipamento retirado de operação (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

Já os curtos-circuitos causam variações significativas da corrente que flui no sistema elétrico. Se não forem limitadas em magnitude e tempo, podem danificar os componentes elétricos pelos quais fluem. Enquanto os tempos permitidos nos eventos de sobrecarga podem chegar a vários segundos, os tempos permitidos para a duração dos curtos-circuitos não devem superar o valor de 2 segundos. Normalmente, devem ser limitados entre 50 e 1000 ms. Outros tipos de eventos são as sobretensões, subtensões, sobrefrequência e subfrequência (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

2.3.1 Dispositivos de proteção

2.3.1.1 Relés de proteção

É o principal dispositivo de um esquema de proteção e são classificados de acordo com a grandeza que atuam, como por exemplo: tensão, corrente ou frequência, ou quanto à sua construção: eletromecânicos, estáticos ou digitais/numéricos. Apesar do bom funcionamento dos relés eletromecânicos, os relés digitais acrescentaram uma boa dose de tecnologia e grandes modificações na eficiência e funcionamento destes equipamentos, como no caso dos IEDs, tratados na Subseção 2.2.1. Atualmente, as subestações são projetadas fazendo o uso exclusivamente de tecnologias digitais, substituindo os relés eletromecânicos por esta tecnologia (ARAÚJO, 2014).

2.3.1.2 Disjuntores

Os disjuntores são dispositivos de seccionamento de circuitos elétricos que podem operar em condições de carga ou de curto-circuito. O disjuntor possui uma ou duas bobinas de abertura e fechamento, que quando energizadas, promovem o movimento dos contatos principais que irão interromper ou permitir a passagem da corrente elétrica. As operações de abertura e fechamento são realizadas através de comandos que podem ser efetuados por relés de proteção ou diretamente pelos operadores. A partir do comando de abertura, ocorre a operação da bobina de disparo e posteriormente a liberação e ação do sistema de abertura, que na maioria dos casos é efetuada por mola ou ar comprimido até a abertura total dos contatos principais (ARAÚJO, 2014).

Normalmente, nos sistemas de proteção são aplicadas funções para detecção de falhas no disjuntor (50BF) no momento de abertura, por exemplo, em função de um defeito interno. No caso de ocorrência da não abertura quando dado um comando, haverá necessidade imediata de desconectar outros disjuntores adjacentes por onde flui a corrente de defeito, podendo estes estarem localizados na mesma subestação ou em uma subestação remota. A proteção de falha de disjuntor é iniciada no momento do comando de abertura e supervisiona se a corrente de falta é eliminada, caso não seja, é efetuado um comando aos disjuntores adjacentes (ARAÚJO, 2014).

2.3.1.3 Fusíveis

Os fusíveis são dispositivos de proteção de sobrecorrente compostos por um elemento fusível de metal ou liga metálica de baixo ponto de fusão, cujo objetivo é interromper o circuito para um determinado nível de corrente que seja anormal às condições de operação do sistema elétrico onde estejam instalados. Caracterizam-se pela combinação de

elementos sensor e de interrupção em um mesmo dispositivo, respondendo a uma combinação de intensidade e duração da corrente. Os fusíveis são dispositivos monofásicos, de forma que somente o fusível de uma respectiva fase irá ser interrompido no caso de uma sobrecorrente em apenas uma fase. Após ocorrer a atuação do elemento fusível (rompimento), este deverá ser substituído (ARAÚJO, 2014).

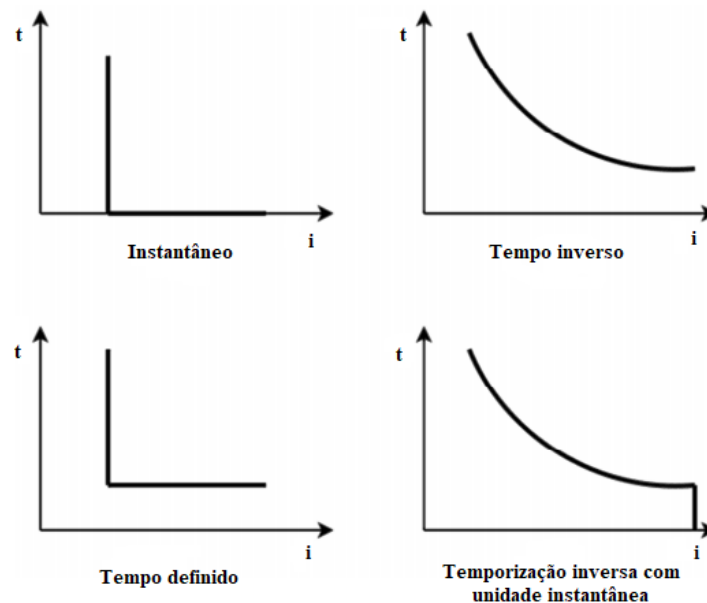
2.3.2 Proteção instantânea e temporizada de sobrecorrente (50/51)

Conforme visto anteriormente, as sobrecorrentes são os eventos mais comuns nos sistemas elétricos de potência, de forma que a proteção de sobrecorrente foi o primeiro sistema de proteção desenvolvido (ARAÚJO, 2014), sendo dividida em duas funções:

- Sobrecorrente instantânea (50): Atua de forma quase instantânea (pois sempre existirá um atraso intrínseco a qualquer sistema analógico ou digital) para qualquer valor de corrente superior ao seu ajuste.
- Sobrecorrente temporizada (51): Atua quando a corrente é superior ao valor ajustado durante um intervalo de tempo predeterminado.

Existem diversas curvas de relação tempo *versus* corrente para a sobrecorrente, as quais são selecionadas em função das características da carga. A Figura 6 ilustra essas curvas.

Figura 6 - Curvas tempo x corrente



Fonte: Araújo (2014, com adaptações).

A curva instantânea ou de corrente definida atua imediatamente perante um nível predeterminado de corrente. A função temporizada possui duas categorias: tempo definido e

tempo inverso. Em tempo definido ocorre a mesma temporização para qualquer valor de corrente acima do ajuste, enquanto em tempo inverso a temporização é inversamente proporcional ao valor da corrente de falta. Há ainda a curva de temporização inversa com unidade de tempo, a qual incorpora um elemento instantâneo, sendo este o tipo mais utilizado (ARAÚJO, 2014).

2.3.2.1 Coordenação da proteção

Outro fator relevante sobre a proteção de sobrecorrente é a coordenação, cujo principal objetivo é determinar as características, classificações e ajustes dos dispositivos de proteção, de forma a minimizar os efeitos das sobrecorrentes através da interrupção das correntes de curto-circuito o mais rápido possível. Um estudo de coordenação de sobrecorrente pode ser definido como a comparação e seleção dos tempos de operação dos dispositivos visando atingir os objetivos de proteção do sistema sob condições anormais. Os principais dados necessários para a elaboração de um estudo para ajuste de relés são: diagrama unifilar detalhado do sistema; impedâncias em ohms, percentuais ou em p.u. de todos os transformadores de potência, máquinas rotativas e circuitos alimentadores; valores máximos e mínimos de curto-circuito no sistema; corrente de carga máxima; e curvas de desempenho de transformadores de corrente. Existem diferentes métodos para efetuar a coordenação entre os dispositivos de proteção, destacando-se a coordenação por tempo, por corrente e pela combinação de ambas (ARAÚJO, 2014).

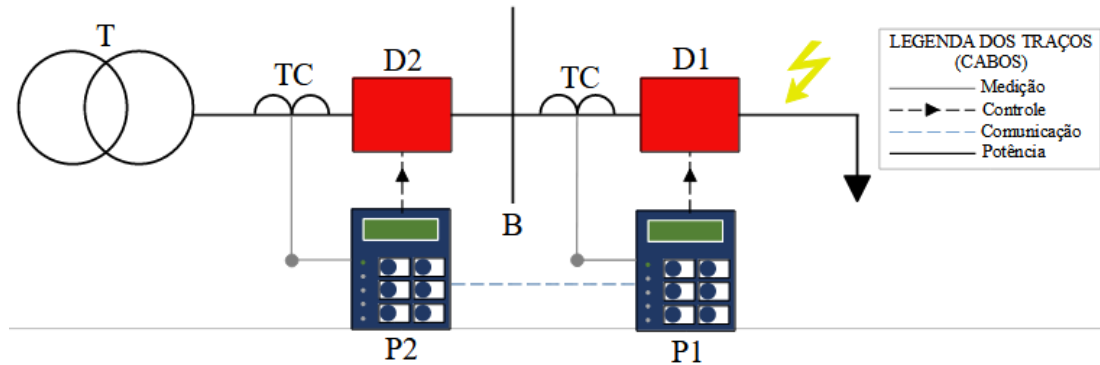
2.3.3 Seletividade lógica

O conceito de seletividade lógica é o mais moderno em relação a outros tipos de seletividade como a amperimétrica e a cronométrica, surgindo em função da utilização dos relés digitais. A seletividade lógica é um sistema lógico que combina um esquema de proteção de sobrecorrente com um esquema de comunicação de forma a obter uma proteção com intervalos de tempo extremamente reduzidos, porém seletivos. Os relés digitais que realizam a seletividade lógica são conectados entre si por cabo de fibra óptica, cujo objetivo é conduzir o sinal de bloqueio (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

A Figura 7 ilustra um esquema simplificado de seletividade lógica, onde a proteção P1 está a montante do ponto de falta e deve ser a primeira a comandar o disjuntor ao qual está associada (D1), enviando antes um sinal lógico de bloqueio de atuação para a proteção imediatamente a montante (P2) ou proteção de retaguarda. A proteção P2, ao receber

o sinal lógico de bloqueio de P1, permanece bloqueada enquanto o sinal lógico estiver ativo, realizando a seletividade lógica. Em caso de ocorrência de falha da proteção P1-D1, a proteção P2 será solicitada a atuar.

Figura 7 - Esquema básico de seletividade lógica



Fonte: Freitas (2022, com adaptações).

Deve-se observar que existem dois tipos de ajuste de tempo a serem implementados nas proteções de seletividade lógica: ajuste de tempo da proteção e ajuste de tempo da seletividade lógica. O tempo de ajuste da proteção é selecionado de forma a eliminar a atuação intempestiva da proteção resultante da partida de motores de indução e da energização de transformadores. Já o ajuste da seletividade lógica é o tempo que deve ser ajustado na proteção que emite a ordem de bloqueio, ou seja, a proteção mais próxima à carga (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

3 VIRTUALIZAÇÃO E PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Este capítulo aborda de modo geral a Norma IEC 16850, a Tecnologia de Virtualização aplicada ao SAS e o Padrão de comunicação OPC, constituindo a base teórica para o desenvolvimento do IED virtual e sua integração ao sistema SCADA LAquis.

3.1 Norma IEC 61850

Atingir a interoperabilidade em um SAS geralmente é um trabalho de grande complexidade devido à presença de padrões legados e protocolos proprietários, de forma que em muitas vezes um projeto de automação de subestação tenha que se restringir a um único fornecedor. Como alternativa podem ser utilizados conversores de protocolo, que por sua vez podem representar um alto custo financeiro e de tempo de implementação (KARIYAWASAM *et al.*, 2017). Em meio a esse contexto, vários órgãos normativos, pesquisadores e fabricantes trabalharam juntos para unificar os vários padrões em uma única norma, culminando na publicação da primeira versão da IEC 61850 no ano de 2003, intitulada de Sistemas e Redes de Comunicação em Subestações (SAMPAIO, 2017). Esta versão forneceu definições explícitas, especificações, requisitos e procedimentos que os fabricantes deveriam respeitar, a fim de alcançar a interoperabilidade em todos os níveis de comunicação da subestação (PICOLO, 2013; KARIYAWASAM *et al.*, 2017). O padrão foi posteriormente revisado para a sua segunda edição, lançada em 2010, e o título da publicação foi atualizado para Sistemas e Redes de Comunicação para Automação de Concessionárias de Energia. Esta nova edição incluiu aplicações em geração hidráulica (Parte 7-410) e passou a cobrir todo o espectro de *Smart Grid* a partir da aprovação de seções adicionais como a de geração fotovoltaica (Parte 90-7, 2013), veículos elétricos (Parte 90-8, 2016) e armazenamento de energia (Parte 90-9, 2020) (RIDWAN *et al.*, 2019).

A IEC 61850 visa a interoperabilidade entre todos os dispositivos independentemente de sua origem, simplificando consideravelmente o esforço de engenharia necessário e permitindo a seleção de dispositivos baseada no desempenho e não na compatibilidade (KARIYAWASAM *et al.*, 2017). Além disso, a norma foi elaborada com base na estabilidade conceitual, em que seus conceitos e definições estão dispostos de maneira que se evita a necessidade de mudanças radicais ou totais em caso de alterações nos segmentos de tecnologia da informação e comunicação ou na regulamentação do setor elétrico (MAGALHÃES, 2019).

3.1.1 Estrutura da norma IEC 61850

A IEC 61850 é dividida em 10 seções principais, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Estrutura da Norma IEC 61850

Parte	Descrição
1	Introdução e visão geral
2	Glossário
3	Requisitos gerais
4	Gerenciamento de sistema e projeto
5	Requisitos de comunicação para modelos de funções e dispositivos
6	Linguagem de configuração para IED de subestações
7	Estrutura de comunicação básica para equipamentos de subestações e alimentadores
7-1	Princípios e modelos
7-2	Serviços de Comunicação Abstratos (ACSI)
7-3	Classes de dados comuns
7-4	Classes de nós lógicos compatíveis e classes de dados Mapeamento de serviço de comunicação específico (SCSM) - Mapeamento para MMS
7-410	Estrutura básica de comunicação - Usinas hidrelétricas Comunicação para monitoramento e controle
7-420	Estrutura básica de comunicação - Nós lógicos de recursos energéticos distribuídos
7-5	Conceitos de modelagem
7-500	Uso de nós lógicos para modelar funções de sistemas de automação de subestação
7-510	Uso de nós lógicos para modelar funções de usinas hidrelétricas
7-520	Uso de nós lógicos para modelar funções de recursos de energia distribuídos
8-1	(Manufacturing Message Specification) (International Organization for Standardization - ISO 9506-1 and ISO 9506-2) e ISO/IEC 8802-3
80-1	Diretrizes para troca de informações de modelo de dados baseado em CDC usando IEC 60870-5-101/104
9-2	Mapeamento de serviço de comunicação específico (SCSM) - Valores amostrados - ISO/IEC 8802-3
90-1	Uso da IEC 61850 para comunicação entre subestações
90-2	Uso da IEC 61850 para a comunicação entre subestações e centros de controle

Parte	Descrição
90-3	Uso da IEC 61850 para monitoramento de condição
90-4	Diretrizes de Engenharia de Rede - Relatório Técnico
90-5	Uso da IEC 61850 para transmitir informações de sincrofasores baseada na IEEE C37.118
10	Testes de conformidade

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

3.1.2 Modelo de dados da IEC 61850

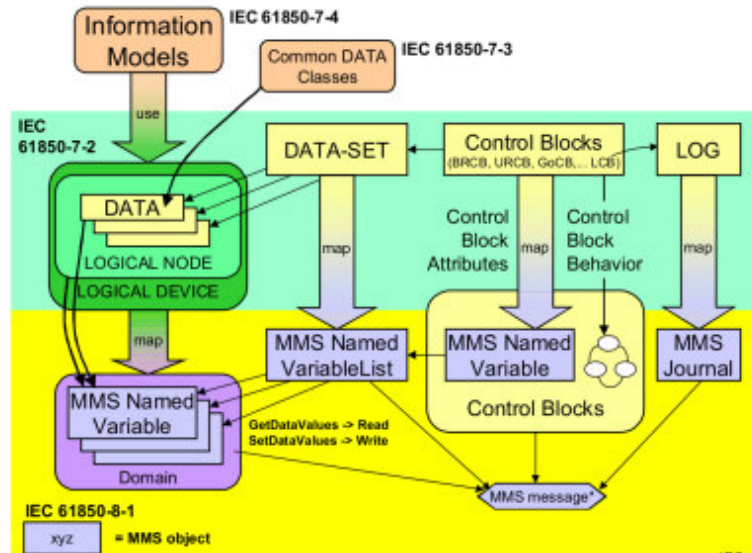
O módulo 7 da norma e seus submódulos, descrevem os componentes base do modelo de dados, organizando-os em uma hierarquia de objetos virtuais que têm por finalidade representar uma subestação física. O primeiro conceito da cadeia hierárquica é o Dispositivo Físico, ou *Physical Device* (PD), que representa o IED em si e que se comunica fisicamente com os demais componentes do SAS através de um barramento TCP/IP via conexão Ethernet. Sua abstração é definida como um Servidor, no qual armazena todas as demais instâncias do modelo de dados, além de criar e gerenciar as conexões entre IEDs (MELO, 2015).

Em sequência na hierarquia está o Dispositivo Lógico, ou *Logical Device* (LD), compreendido como um agrupamento de Nós Lógicos, que pode estar associado a funções desempenhadas pelo IED, como medição, proteção, configuração do dispositivo, entre outras, de acordo com os nós lógicos que abriga. Os Nós Lógicos, ou *Logical Node* (LN), podem ser definidos como uma subfunção de um dispositivo que troca informação com outros LNs. Em alguns casos, também podem ser interpretados como a representação virtual de um dispositivo físico, como por exemplo, os nós lógicos que representam disjuntor (XCBR), transformador de corrente (TCTR) e transformador de potencial (TVTR). A partir deles, diferentes funções de automação e proteção em um ambiente de subestação podem ser modeladas como uma associação de Nós Lógicos que trocam dados entre si, com o objetivo de realizar uma determinada ação (MELO, 2015).

Internamente aos LNs são encontrados os dados (*Data*), que representam uma instância de informações com atributos de dados (*Data Attributes* ou DA) e métodos. Tal conceito é proveniente do modelo de orientação a objetos, permitindo ainda a criação de classes de informação, chamada de Classe de Dados Comuns (*Common Data Classes* ou CDC), com a finalidade de evitar a repetição de dados e atributos de dados comuns a mais de

um LN. Finalmente, o DA apresenta-se como o elemento mais interno da hierarquia do modelo de dados e carrega a informação propriamente dita (MELO, 2015). A Figura 8 mostra em detalhes o modelo de dados apresentado pela norma IEC 61850.

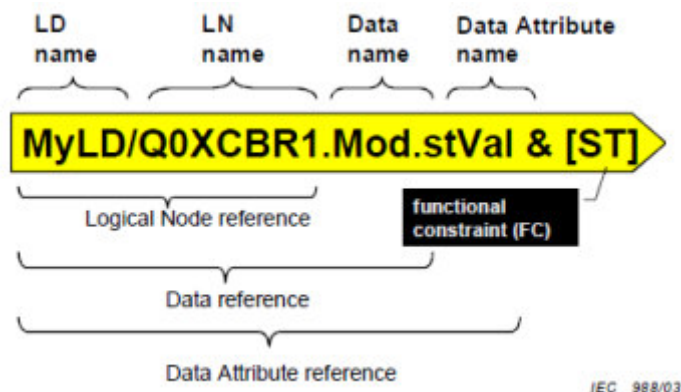
Figura 8 - Modelo de dados preconizado pela IEC 61850



Fonte: IEC/TR 61850-7-1 (2003).

As informações contidas na estrutura interna de um IED padrão IEC 61850 são identificadas e acessadas através de uma referência ou caminho único, obtido a partir da própria hierarquia da modelagem de dados. A Figura 9 apresenta o modelo de referência geral para uma informação específica de um servidor IEC 61850.

Figura 9 - Modelo de referência de uma informação no padrão IEC 61850



Fonte: IEC/TR 61850-7-1 (2003).

A referência de um atributo de dado em um IED é constituída do nome do LD seguido de barra, o nome do LN seguido de ponto, o nome do Dado de interesse seguido de

ponto, e o nome do DA. Por fim, é anexado um & (e comercial) seguido da *functional constraint* - FC do DA, que representa a restrição funcional do respectivo atributo de dado (MAGALHÃES, 2019).

3.1.3 Linguagem de configuração SCL

Na parte 6 da IEC 61850 é apresentada uma sintaxe baseada em linguagem de marcação XML (*eXtensible Markup Language*) definida como a linguagem de descrição da configuração da subestação (*Substation Configuration Description Language* - SCL), que possui o objetivo de padronizar os atributos de configuração de maneira a permitir configurações de IEDs com maior segurança e confiabilidade. A SCL é composta por um conjunto de arquivos que contém informações sobre os IEDs, rede, configurações e funcionalidades (ARAÚJO, 2014). Conforme Araújo (2014), estes arquivos são divididos em quatro grupos de acordo com a aplicação:

- *System Specification Description* (SSD): Contém o diagrama unifilar com todas as funções alocadas possuindo a descrição dos dados do sistema. É pré-requisito para geração do SCD.
- *Substation Configuration Description* (SCD): É gerado pelo *software* de configuração do sistema e contém a descrição da subestação. Possui os arquivos ICDs dos IEDs e descreve a configuração completa da subestação, incluindo as redes de comunicação e informações sobre o fluxo de dados.
- *IED Capability Description* (ICD): Descreve a capacidade e pré-configurações geradas pela ferramenta de configuração da descrição dos IEDs. Neles estão descritas todas as funções que poderão ser utilizadas no sistema.
- *Configured IED Description* (CID): Neste arquivo estão descritas as funções parametrizadas ou habilitadas pelo usuário no IED. É o arquivo que será descarregado no IED com a sua configuração.

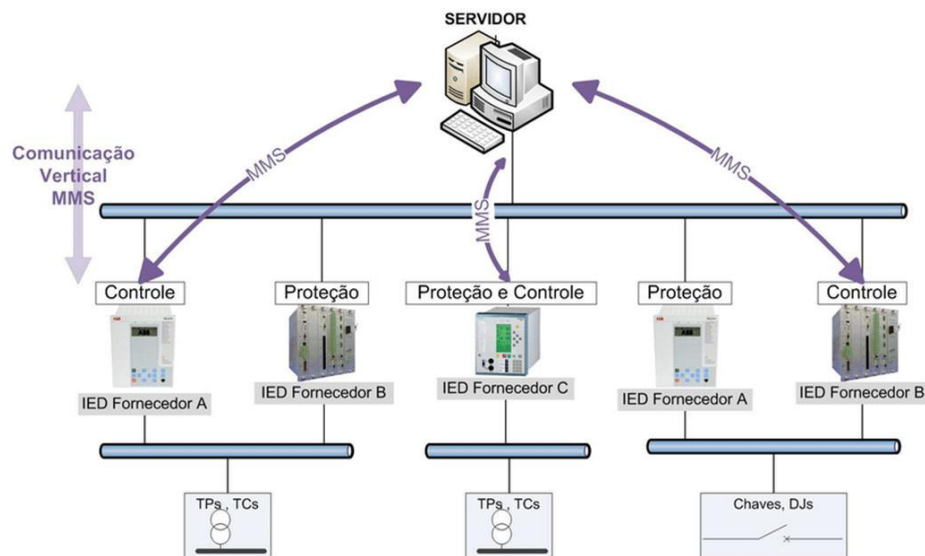
Todos os arquivos citados são gerenciados pelas ferramentas de configuração do sistema e do IED. A ferramenta de configuração do IED é um *software* específico do fabricante do equipamento permitindo configurá-lo e gerar arquivos de parametrização. A ferramenta de configuração do sistema independe dos IEDs utilizados, sendo capaz de importar os arquivos ICDs e SSD e a partir deles gerar o arquivo SCD, contendo as informações do sistema que serão compartilhadas pelos diversos IEDs (ARAÚJO, 2014).

3.1.4 Protocolos da norma IEC 61850

3.1.4.1 MMS - Manufacturing Message Specification

O MMS é um protocolo apresentado na seção 8.1 da norma IEC 61850, sendo um padrão internacional (ISO 9506) para realizar troca de mensagens em tempo real e para aquisição de dados e disparo de comandos por sistemas supervisórios. Este protocolo foi escolhido pelo comitê de desenvolvimento da norma IEC 61850 como a forma mais eficiente de implementar a comunicação vertical entre IEDs e aplicações no nível de estação, pois segue a arquitetura cliente/servidor (MELO, 2015). Por ser um protocolo da camada de aplicação no modelo OSI, considera-se o protocolo MMS não rápido o bastante para ser usado na identificação da atuação de funções de proteção, pois ele é focado na conexão entre dispositivos e no envio correto de informações, empregando uma rotina para tratamento de erros que aumenta consideravelmente o tempo de envio dos dados (MAGALHÃES, 2019). A Figura 10 ilustra a comunicação vertical via protocolo MMS.

Figura 10 - Comunicação vertical no ambiente de subestação



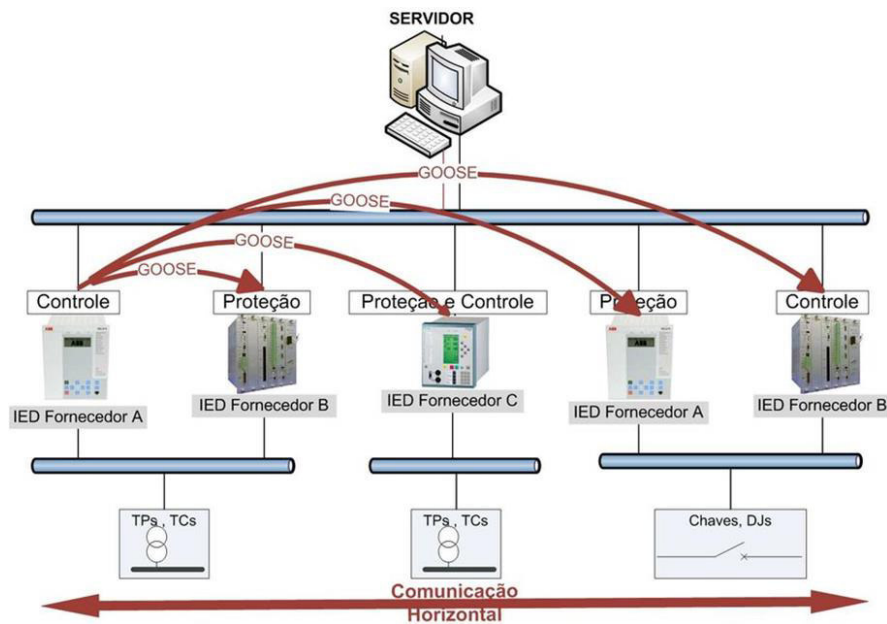
Fonte: Lopes *et al.* (2012).

3.1.4.2 GOOSE - Generic Object Oriented Substation Event

As mensagens GOOSE também são definidas na seção 8.1 da IEC 61850 e são caracterizadas por sua classificação de extrema prioridade e por possuírem limitações de tempo máximo. O uso das mensagens GOOSE está majoritariamente associado às interfaces de proteção e à comunicação entre IEDs por se tratar de um protocolo da camada de enlace no modelo OSI, que implica no objetivo de entregar a informação o mais rápido possível

(LEITE, 2021). As mensagens GOOSE seguem a arquitetura editor/assinante, que consiste em um editor que disponibiliza os dados para aqueles que assinam a informação. Dessa forma, sempre que um editor envia uma mensagem no barramento de dados, todos recebem a mensagem, porém apenas aqueles que a assinam utilizarão. Outra característica das mensagens GOOSE é o parâmetro chamado tempo máximo, sendo este parâmetro o responsável pela taxa de transmissão das mensagens em estado normal de operação. Dessa forma, as mensagens GOOSE estão sendo constantemente transmitidas na rede a uma taxa que obedece ao parâmetro de tempo máximo. Quando um evento ocorre e altera algum dos dados do *Dataset* relativo às mensagens GOOSE, a taxa de transmissão das mensagens é alterada, aumentando exponencialmente a frequência de envio das mensagens (MAGALHÃES, 2019). A Figura 11 ilustra a comunicação horizontal baseada em mensagens GOOSE.

Figura 11 - Comunicação horizontal no ambiente de subestação



Fonte: Lopes *et al.* (2012).

3.2 Virtualização no contexto do SAS

O avanço da integração entre as novas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e a Tecnologia de Operação (TO) ocasionou uma crescente atualização do sistema elétrico de potência, que no momento encontra-se em processo de evolução de seu modelo convencional para um sistema mais inteligente, seguro e flexível baseado em conceitos que antes eram restritos aos âmbitos de computação e telecomunicações. Essas mudanças estão ocorrendo principalmente em relação à transmissão e distribuição de eletricidade, com o

maior esforço direcionado às subestações (ANSARI *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a virtualização emergiu como uma tecnologia de alto potencial em aplicações contextualizadas no SAS. Segundo Dayabhai e Diamandis (2015), a implementação da virtualização nas subestações é viabilizada pelo uso de *hypervisors*, definindo-os como sistemas responsáveis por criar e gerenciar diversas máquinas virtuais hospedadas, que compartilham entre si os recursos de *hardware* e processamento de uma mesma plataforma computacional. Os *hypervisors* são classificados em dois tipos, cuja aplicação individual deve levar em consideração critérios como os sistemas operacionais suportados pelas máquinas virtuais, capacidade de processamento em relação à memória RAM e número de processadores, quantidade de máquinas virtuais a serem executadas, otimização de memória, questões relacionadas a licenciamento do *hypervisor* e o tipo de suporte disponibilizado pelo fornecedor (DAYABHAI *et al.*, 2015). Os dois tipos são:

- *Bare Metal*: Topologia em que o *hypervisor* é executado diretamente no *hardware* hospedeiro, ao passo que realiza a gerência de vários sistemas operacionais convidados.
- *Hosted Hypervisor*: O *hypervisor* é executado sobre um sistema operacional convencional, abstraindo as máquinas virtuais através do *hardware* hospedeiro.

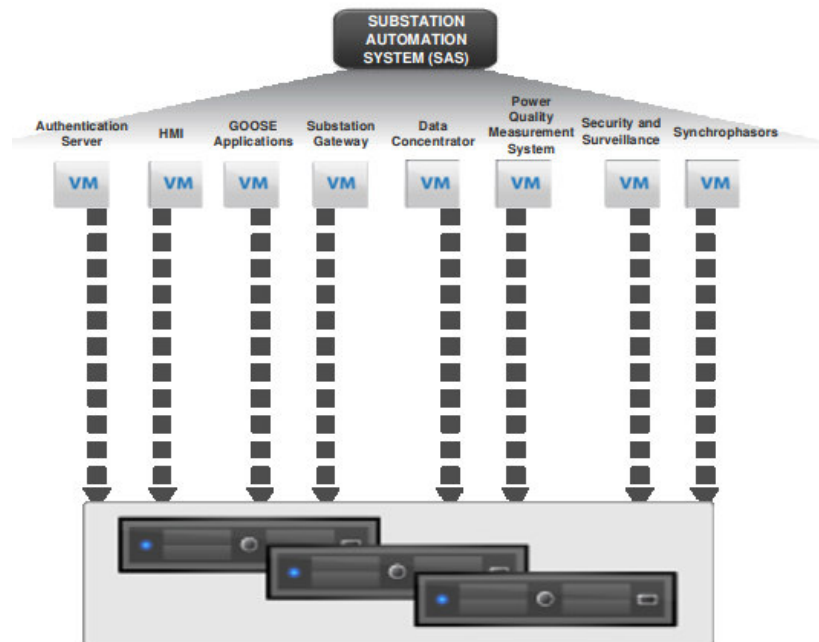
Para que se garanta a confiabilidade do fornecimento elétrico, a arquitetura de virtualização em subestações deve basear-se no conceito de alta disponibilidade, a partir dos seguintes princípios:

- Independência de quaisquer falhas de *hardware*;
- Proteção contra indisponibilidades planejadas / não planejadas;
- Operação das máquinas virtuais em configuração de *cluster*.

A utilização da técnica de *clustering* proporciona replicação, tolerância a falhas e recuperação de desastres, visto que as máquinas virtuais que operam nessa arquitetura são hospedadas em servidores distintos e distribuídos. Embora a arquitetura de alta disponibilidade apresente características importantes para utilização em ambientes de subestações, infelizmente ela não é economicamente ou financeiramente viável para as concessionárias de energia. A alternativa de arquitetura mais viável de se implementar, no contexto do SAS, é a baseada em recuperação de desastres com esquemas de redundância apropriados, mantendo-se as prerrogativas de eficiência e confiabilidade operacional (DAYABHAI *et al.*, 2015). A Figura 12 ilustra a arquitetura de virtualização, onde diversas

máquinas virtuais (*Virtual Machine* ou VM) são hospedadas em um mesmo *hardware* e executam diferentes funções que compõem um SAS.

Figura 12 - Arquitetura de virtualização do SAS



Fonte: Dayabhai *et al.* (2015).

Os benefícios da Tecnologia de Virtualização já são colhidos por diversos pesquisadores (*cf.* ANSARI *et al.*, 2019) através da realização de testes de aplicação em laboratório, os quais têm apresentado resultados otimistas na virtualização de dispositivos como PMUs, UTRs e IEDs. Em síntese, podem ser citados os seguintes benefícios listados por Dayabhai e Diamandis (2015) e Ansari (2019):

- Maior eficiência operacional, como a redução de custos e a realização de testes de dispositivos antes da implementação em campo, e menor dependência de *hardware*;
- Possibilidade de migração em tempo real, de máquinas virtuais em estado crítico para outros *hypervisor*, sem necessidade de retirada de funcionamento;
- Os *hypervisors* suportam o agrupamento de software para melhorar a velocidade e a confiabilidade das interfaces de comunicação;
- Capacidade de memória para retornar a estados anteriores das máquinas virtuais, corrigindo falhas oriundas de novas instalações, atualizações de *software* ou arquivos que venham a ser corrompidos;

- *Backup* de máquinas virtuais em tempo real por meio de aplicações de recuperação de desastres usando técnicas de replicação.

Todavia, alguns pontos limitantes devem ser observados em relação a utilização de virtualização no contexto de SAS, tais como licenciamento de *hardware* e *softwares*, gerenciamento de *software*, suporte técnico de *hardwares*, mais especificamente, dos *hypervisors*, domínio das técnicas e ferramentas de virtualização, além das questões de cibersegurança, os quais constituem um grande desafio para o avanço dessa tecnologia, ao passo que também são oportunidades de desenvolvimento de novas pesquisas na área (DAYABHAI *et al.*, 2015).

3.3 Padrão de comunicação OPC

O OPC (*Open Platform Communications*) é um padrão de interoperabilidade para a troca segura e confiável de dados no espaço de automação industrial. É independente de plataforma e garante o fluxo contínuo de informações entre dispositivos de vários fornecedores, proporcionando as seguintes vantagens (Fundação OPC, 2022; FONSECA, 2002):

- Padronização das interfaces de comunicação entre servidores e clientes de dados em tempo real, facilitando a integração e manutenção dos sistemas;
- Eliminação da necessidade de *drivers* de comunicação específicos (proprietários);
- Melhoria do desempenho e otimização da comunicação entre dispositivos de automação;
- Interoperabilidade entre sistemas de diversos fabricantes;
- Redução dos custos e tempo para desenvolvimento de interfaces e *drivers* de comunicação, com consequente redução do custo de integração de sistemas;
- Facilidade de desenvolvimento e manutenção de sistemas e produtos para comunicação em tempo real;
- Facilidade de treinamento.

O padrão OPC foi lançado pela primeira vez em 1996, cujo propósito era abstrair protocolos específicos de CLPs (como *Modbus*, *Profibus* etc.) para facilitar a leitura e gravação de dados em dispositivos de diferentes fabricantes (Fundação OPC, 2022). O grupo responsável pelo estudo foi a Fundação OPC, uma organização sem fins lucrativos cujo

objetivo é manter e desenvolver o padrão OPC. A princípio, três principais especificações OPC foram desenvolvidas inicialmente com base na tecnologia de comunicação entre processos COM/DCOM da *Microsoft* sobre plataforma *Windows*, e juntas ficaram conhecidas como OPC Clássico, sendo elas, *Data Access* (DA), *Alarm & Events* (AE) e *Historical Data Access* (HDA). Partindo do OPC Clássico foi idealizada uma nova versão do padrão OPC, o OPC UA (*Unified Architecture*), finalmente desvinculada de tecnologias proprietárias e desenvolvida com base na Arquitetura Orientada a Serviço (SOA), incorporando ainda, tecnologias como XML (DOS SANTOS, 2015).

Em resumo, o OPC pode ser representado por uma camada de abstração entre a fonte de dados e o coletor de dados, permitindo que troquem dados sem que tenham conhecimento algum da outra parte. A abstração do dispositivo OPC é realizada utilizando dois componentes OPC especializados, chamados Cliente OPC e Servidor OPC (CELINO, 2014). Conceitualmente, o Cliente OPC representa um coletor de dados que inicia e controla a comunicação com os Servidores OPC com base no que o aplicativo ao qual está integrado solicita. O cliente OPC traduz solicitações de comunicação de determinado aplicativo para uma solicitação OPC equivalente e as envia para o Servidor OPC apropriado para fins de processamento. Reciprocamente, quando os dados OPC retornam do Servidor OPC, o Cliente OPC os traduz de volta para o formato nativo do aplicativo (CELINO, 2014).

O Servidor OPC é um conector que pode ser definido como um tradutor entre o mundo OPC e um protocolo ou interface de comunicação nativa da fonte de dados. Como conceitualmente OPC é bidirecional, os Servidores OPC podem tanto ler ou escrever em uma fonte de dados. O relacionamento cliente/servidor OPC é do tipo mestre/escravo, onde o Servidor OPC somente transferirá dados para (ou de) uma fonte de dados se um Cliente OPC o comandar. Uma boa vantagem dos Servidores OPC é que eles podem se comunicar com, literalmente, qualquer fonte de dados cuja saída possa ser lida ou escrita por meios eletrônicos, sejam elas, dispositivos, CLPs, DCs, UTRs, balanças eletrônicas, banco de dados, páginas *web* e atualizações de arquivos CSV. Para se comunicar com qualquer um desses dispositivos, é necessário utilizar apenas um Servidor OPC que empregue o protocolo ou interface nativa apropriada. Uma vez que tal Servidor OPC seja configurado, qualquer aplicativo para OPC poderá se comunicar com a fonte de dados, sem considerar como a fonte de dados se comunica em sua origem (CELINO, 2014).

4 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DIDÁTICA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

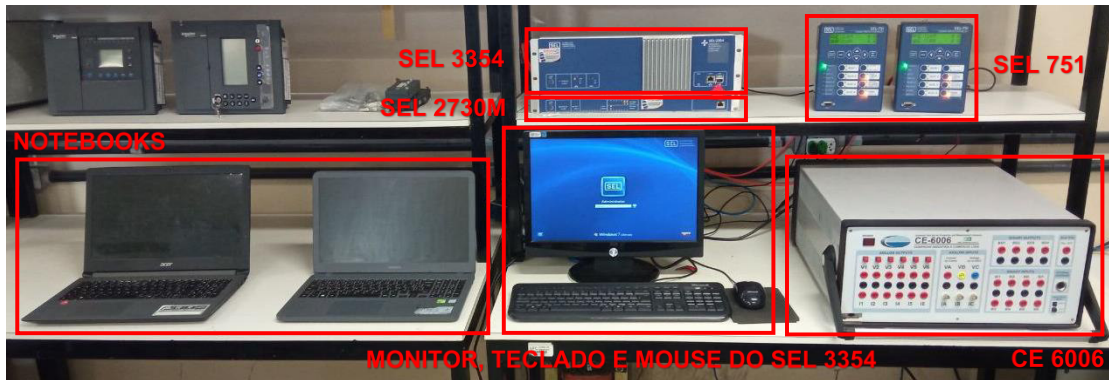
Neste capítulo serão descritas as etapas de desenvolvimento da plataforma de ensino de proteção, abrangendo a construção do relé virtual, das telas do SCADA LAquis e a integração via OPC entre eles.

4.1 Metodologia

A plataforma de ensino foi desenvolvida a partir da bancada de estudos de proteção pertencente ao Grupo de Redes Elétricas Inteligentes - GREI, mostrada na Figura 13, e conta com partes de *hardware* e de *software*. No que tange a parte física, ela é composta por um testador hexafásico CE-6006 do fabricante *Conprove Control Center*, dois IEDs físicos SEL 751 da *Schweitzer Engineering Laboratories*, um computador industrial SEL-3354, um *switch* gerenciável SEL 2730M e dois *notebooks*. O propósito do testador hexafásico é simular uma rede elétrica trifásica real em diferentes situações de falta a partir da injeção de sobrecorrentes e da comunicação via mensagens GOOSE. Os IEDs SEL 751 possuem suporte para IEC 61850, o *switch* gerenciável realiza o encaminhamento de mensagens entre os componentes da bancada, e os *notebooks* efetuam a execução da parte relativa a *software*.

Durante a realização dos testes optou-se pela aplicação de dois sistemas operacionais diferentes, sendo um deles baseado em *software* livre, conhecido como *Linux*, em sua distribuição *Ubuntu 20.04.3 LTS*. Esse sistema foi empregado para os fins de programação e execução do IED virtual e para a captura do tráfego da rede local. Para as funções citadas foram utilizados o editor de código *Visual Code Studio* e o analisador de pacotes *WireShark*. A preferência pelo *Linux* foi motivada por sua usabilidade voltada aos recursos de programação e configuração de rede. Já as execuções dos *softwares* CTC, SCADA LAquis, *Multi-Protocol MasterOPC Server*, *AcSElarator Architect* e *QuickSet*, foram delegadas ao *Windows 10 Home Single Language* devido ao fato destas aplicações serem executadas exclusivamente na plataforma da *Microsoft*. O CTC é o pacote de *softwares* voltados para a configuração do testador hexafásico, assim como o *AcSElarator Architect* e o *QuickSet* são os programas de ajustes do IED SEL 751. O conjunto constituído pelos sistemas operacionais e pelos programas utilizados encerram a parte relativa a *software* da plataforma.

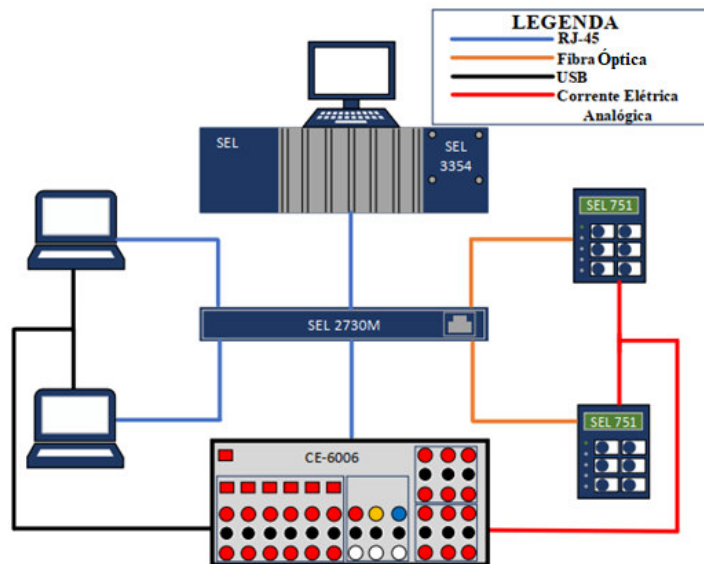
Figura 13 - Bancada de proteção de sistemas elétricos pertencente ao GREI



Fonte: elaborado pelo autor.

A rede de comunicação da bancada foi configurada conforme mostra a Figura 14, onde todos os equipamentos estão conectados à rede Ethernet a partir do *switch* SEL 2730M.

Figura 14 - Rede local da bancada de proteção de sistemas elétricos



Fonte: Freitas (2022).

A Tabela 2 mostra o endereçamento IPV4 atribuído a cada um dos equipamentos conectados à rede, essencial para organização e transparência durante a análise do tráfego.

Tabela 2 - Endereço IP dos dispositivos conectados à rede

Dispositivo	Função	Endereço IP
IED SEL 751	Dispositivo de proteção	192.168.1.51
IED SEL 751	Dispositivo de proteção	192.168.1.52
Notebook 1	Execução do IED virtual	192.168.1.53
Notebook 2	Controle da mala de teste e análise de tráfego da rede	192.168.1.60

Fonte: elaborado pelo autor.

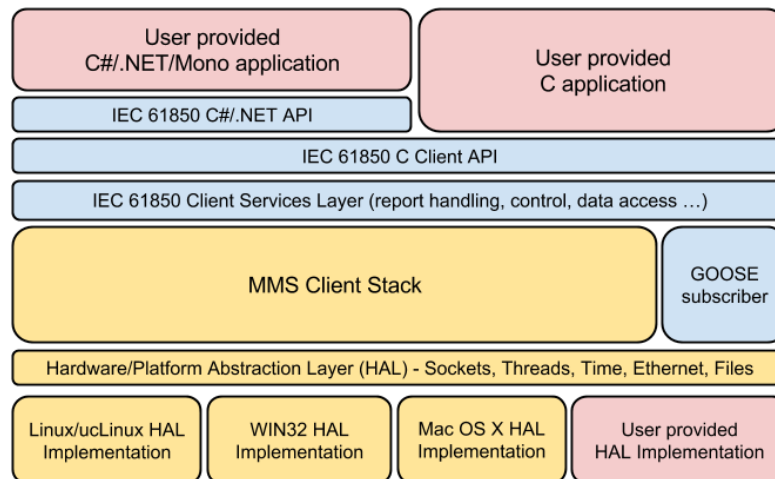
4.2 Biblioteca libIEC61850

A biblioteca computacional libIEC61850 foi a ferramenta que possibilitou o desenvolvimento do relé virtual. Implementada em linguagem C, ela está licenciada sob os termos da licença de código livre GPLv3 e toda sua documentação encontra-se disponível no site de seu desenvolvedor (ZILLGITH, 2022). A contribuição da libIEC61850 para o trabalho reside no fato de que ela implementa funcionalidades a partir dos recursos do protocolo IEC 61850, tais como:

- Comunicação Cliente/Servidor via MMS (IEC 61850-8-1);
- Comunicação Editor/Assinante via GOOSE (IEC 61850-8-1);
- Comunicação Editor/Assinante via *Sampled Values* (SV - IEC 61850-9-2);
- Suporte para relatórios com *buffer* e sem *buffer*;
- Serviços para modelo de dados estático;
- Serviços para modelo de dados dinâmico;
- Serviços de acesso e configuração de modelo de dados (leitura, escrita, criação e exclusão);
- Serviços de registro;
- Serviços de arquivo MMS (procurar, obter, definir, excluir e renomear arquivo);
- Abstração completa de hardware e sistemas operacionais;
- Opção de API implementada em C#.

As funcionalidades citadas são divididas na biblioteca conforme sua implementação em aplicações de nível servidor ou de nível cliente. Segundo ZILLGITH (2022), no nível cliente estão as funções referentes à descoberta de modelos de dados, leitura e gravação de variáveis, relatórios e serviços de controle, e ainda as funcionalidades do GOOSE *Subscriber*. A Figura 15 representa a arquitetura de implementação para nível cliente.

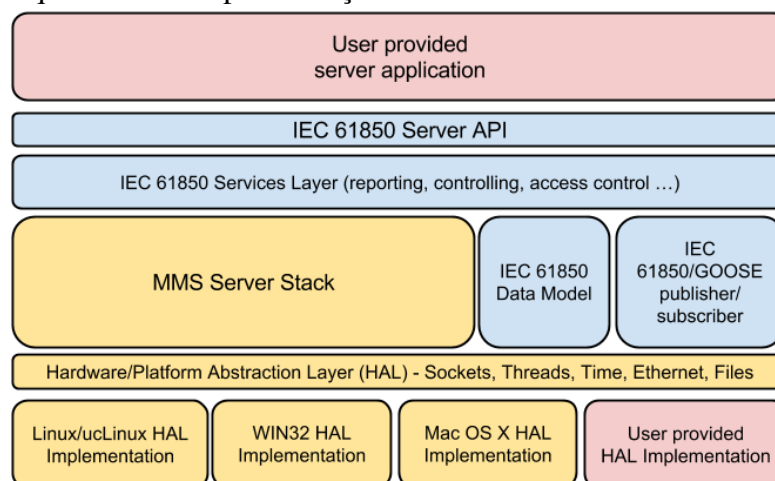
Figura 15 - Arquitetura de implementação de nível cliente da biblioteca libIEC61850



Fonte: Zillgith (2022).

Para o nível servidor estão as funcionalidades de geração de modelo de dispositivo MMS fora do modelo de dados da IEC 61850, suporte para o modelo de controle IEC 61850, serviços de log, modelo de grupo de ajustes, e ainda, suporte a conjunto de dados, registro, relatórios e serviços GOOSE *Publisher* e *Subscriber* (MELO, 2015). A Figura 16 ilustra a arquitetura de implementação para nível servidor.

Figura 16 - Arquitetura de implementação de nível servidor da biblioteca libIEC61850



Fonte: Zillgith (2022).

A documentação da libIEC61850 descreve a sua divisão em módulos, organizados de maneira a explicitar quais partes se aplicam aos processos de nível servidor e quais se aplicam a nível cliente, e ainda, quais módulos são comuns aos dois níveis. A Tabela 3 reproduz a lista de módulos e submódulos.

Tabela 3 - Lista de módulos e submódulos da libIEC61850

1. IEC 61850/MMS client API
1.1 General client side connection handling functions and data types
1.2 Client side SV control block handling functions
1.3 Client side GOOSE control block handling functions
1.4 Client side data access (read/write) service functions
1.5 Client side report handling services, functions, and data types
1.6 Client side data set service functions and data types
1.7 Client side control service functions
1.8 Model discovery services
1.9 Log service related functions, data types, and definitions
1.10 File service related functions, data types, and definitions
2. libIEC61850 API common parts
2.1 MmsValue data type definition and handling functions
2.2 LinkedList data type definition and handling functions
2.3 MmsVariableSpecification data type specifications
3. IEC 61850/MMS server API
3.1 General server setup and management functions
3.2 Connection handling and client authentication
3.3 Data model access and data update
3.4 Server side setting group handling
3.5 Server side control model handling
3.6 Server side report control block (RCB) handling
3.7 Server side sampled values control block (SVCB) handling
3.8 Server side GOOSE control block (GoCB) handling
3.9 Handle external access to data model and access control
3.10 General data model definitions, access and iteration functions
3.11 General dynamic model creation functions
3.12 Create data models by configuration files
3.13 Helper functions to create common data classes (CDC) using the dynamic model API
3.14 Service provider interface (SPI) for log storage implementations
4. IEC 61850 API common parts
4.1 Trigger options (bit values combinable)
4.2 Report options (bit values combinable)
4.3 Originator categories (orCat)
4.4 Definition for addCause type - used in control models
4.5 Definition for LastAppError error type - used in control models
4.6 Definitions and functions related to functional constraints (FCs)
4.7 Definitions and functions related to data attribute quality
4.8 Definitions and functions related to IEC 61850 Dbpos (a CODED ENUM) data type
4.9 Definitions and functions related to IEC 61850 Timestamp (UTC Time) data type
4.10 IEC 61850 GOOSE subscriber API
5. IEC 61850 Sampled Values (SV) subscriber API
5.1 Values Application Service Data Unit (ASDU)
5.1.1 Deprecated API
6. IEC 61850 Sampled Values (SV) publisher API
6.1 Values Application Service Data Unit (ASDU)
6.2 Deprecated API

6.3 MMS client API (for IEC 61850 use IEC 61850 client API instead!)

6.4 IEC 61850/MMS client API

Fonte: Zillgith (2022).

Conforme listado nas funcionalidades da libIEC61850, as duas partes, referentes à aplicação de nível servidor e cliente, foram desenvolvidas com uma camada de abstração entre os recursos implementados e o sistema operacional utilizado, possibilitando que a biblioteca funcione de modo independente do *hardware* e da plataforma de *software* (ZILLGITH, 2022). Atualmente a libIEC61850 está apta para ser utilizada em sistemas *Windows*, *Linux* e *Mac OS*. A versão utilizada na reprodução do IED virtual foi a 1.5.0, lançada em agosto de 2021, ou seja, a mais recente durante o período de desenvolvimento do trabalho. No momento a biblioteca está em sua versão 1.5.1, lançada em março de 2022.

4.3 Desenvolvimento do IED virtual

O IED padrão IEC 61850 utilizado no trabalho exporta arquivos do tipo CID (*Configured IED Description*), que conforme exposto no Capítulo 3, descreve as configurações específicas de um IED de acordo com a sua aplicação a partir dos ajustes e parametrizações realizados, de forma que essa característica torna este arquivo ideal para a base da virtualização. O procedimento de modelagem baseado em um CID pré-existente define um modelo estático para o IED virtual, ou seja, que não suporta alterações em tempo real em seus ajustes. Partindo desse ponto, o IED físico virtualizado teve seu *dataset* configurado de acordo com as funções que se objetivou trabalhar, sendo essas, sobrecorrente instantânea, seletividade lógica e falha de disjuntor. Essa configuração foi realizada através do *software Architect* fornecido pela fabricante SEL, onde foram criados dois *datasets*. Ao primeiro, intitulado de SEL_751_1 atribuiu-se a função de editor na comunicação GOOSE e ao segundo, com o título de SEL_751_2 configurou-se a função de assinante. O Apêndice A contém a parametrização das funções de proteção trabalhadas e a configuração da comunicação GOOSE atribuída aos *datasets*.

O arquivo CID é descrito em linguagem XML, e uma vez que as funcionalidades da biblioteca libIEC61850 estão implementadas em linguagem C, foi necessário realizar a conversão do CID para um formato que facilitasse sua utilização. As instruções para a conversão do formato de arquivo estão na documentação da biblioteca disponível em seu *website*. Durante a realização do trabalho foi detectada uma falha na geração do arquivo CID pelo IED do fabricante SEL. Dessa forma, antes de iniciar o procedimento de conversão, deve-se averiguar se o CID possui o erro mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Erro encontrado no CID gerado pelo SEL 751

```

</DAI>
</DOI>
<DOI name="Pos">
  <SDI name="Oper">
    <DAI esel:datasrc="db:CC" name="ctlVal" />
    <SDI name="origin">
      <DAI esel:datasrc="imm:PRO$BKR1CSWI1$ST$Pos$stVal75:NOOP" name="orCat">
        <Val>1000</Val>
      </DAI>
    </SDI>
  </SDI>
</SDI>
<DAI esel:datasrc="db:52A71:2" name="stVal" />
<DAI esel:datasrc="db:RELAY_EN" name="q" />
<DAI esel:datasrc="imm" name="ctlModel">
  <Val>direct-with-normal-security</Val>
</DAI>

```

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mostrado na Figura 15, o campo *Val* está declarado como 1000 quando o valor correto deveria ser 1. Esse erro é repetido por mais 34 linhas, e após todas as substituições necessárias o arquivo CID está apto para ser convertido nos formatos acessíveis à linguagem C. Esse erro não foi encontrado no CID extraído do IED do fabricante *Schneider Electric*.

Finalmente, para a conversão do formato, o arquivo CID deve ser movido para o diretório *model_generator* da libIEC61850 e em seguida no terminal do *Linux*, deve-se digitar o comando `java -jar genmodel.jar my_model.icd`, em que *my_model* deve ser substituído pelo nome do arquivo original (ZILLGITH, 2022). Após a execução do comando são criados dois arquivos com o título *static.model*, sendo um arquivo no formato *.c* e um *.h*, os quais carregam todas as informações que antes estavam contidas no CID e que foram utilizadas para executar a virtualização. As Figuras 18 e 19 mostram trechos dos arquivos utilizados no trabalho.

Figura 18 - Trecho do arquivo *static.model.c*

```

C static_model.c x
tools > model_generator > C static_model.c
1 /*
2  * static_model.c
3  *
4  * automatically generated from ASSINANTE.CID
5  */
6 #include "static_model.h"
7
8 static void initializeValues();
9
10 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet01;
11 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet02;
12 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet03;
13 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet04;
14 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet05;
15 extern DataSet iedModelds_CFG_LLNO_DSet06;

```

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 - Trecho do arquivo *static.model.h*

```

C static_model.h x
tools > model_generator > C static_model.h
1  /*
2  * static_model.h
3  *
4  * automatically generated from ASSINANTE.CID
5  */
6
7  #ifndef STATIC_MODEL_H_
8  #define STATIC_MODEL_H_
9
10 #include <stdlib.h>
11 #include "iec61850_model.h"
12
13 extern IedModel iedModel;
14 extern LogicalDevice iedModel_CFG;
15 extern LogicalNode iedModel_CFG_LLN0;
16 extern DataObject iedModel_CFG_LLN0_Mod;
17 extern DataAttribute iedModel_CFG_LLN0_Mod_stVal;
18 extern DataAttribute iedModel_CFG_LLN0_Mod_q;
19 extern DataAttribute iedModel_CFG_LLN0_Mod_t;
20 extern DataAttribute iedModel_CFG_LLN0_Mod_ctlModel;

```

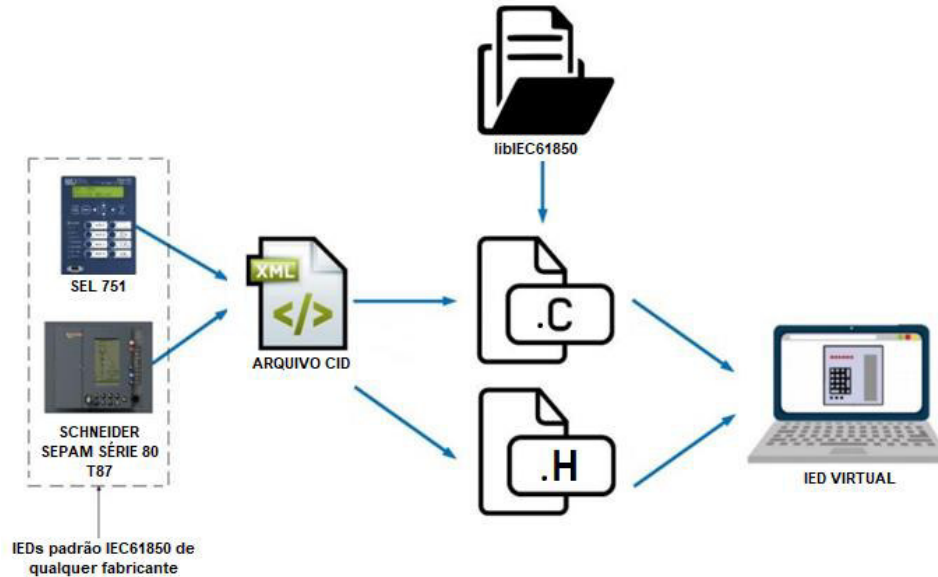
Fonte: elaborado pelo autor.

Os dois arquivos *static_model* devem ser movidos para a pasta de criação do IED virtual, pois o modelo de dados neles contidos interagirá com os recursos fornecidos pela libIEC61850. Diante disso, os módulos e submódulos da biblioteca utilizados na programação do IED virtual foram selecionados de acordo com as aplicações necessárias para permitir sua execução e comunicação com outros IEDs. No que tange à execução, foram utilizadas as funções de criação de servidor, implementadas a partir do submódulo 3.1 - *General server setup and management functions*, responsáveis por instanciar um servidor IEC 61850 baseado na estrutura de dados obtida do arquivo CID. Essa funcionalidade captura o modelo de dados, realiza configurações iniciais e inicia a virtualização que se mantém em execução por meio de *loop* infinito (MAGALHÃES, 2019). Ainda segundo Magalhães (2019), é durante o *loop* que são executadas as funções que correspondem à comunicação do IED virtual, sendo essas a comunicação vertical implementada pelo protocolo MMS e a comunicação horizontal implementada pelo protocolo GOOSE.

A partir do diretório de exemplos fornecido pela libIEC61850, foi possível reproduzir um código-fonte completo que integrasse as funcionalidades de execução e comunicação. Os códigos-exemplos da biblioteca utilizam a referência dos nós lógicos de um modelo estático genérico, os quais foram substituídos pelos nós lógicos do modelo estático gerado a partir do IED físico. No Apêndice B encontra-se um exemplo de código do IED virtual com função assinante utilizado no trabalho, que deve ser executado com permissão de administrador. Reitera-se que por se tratar de uma modelagem estática, não é possível fazer alterações em tempo real na instância servidora do IED. Deste modo, cada IED virtual deve ser programado individualmente de acordo com sua aplicação. Todo o procedimento citado é replicável para a virtualização de IEDs de quaisquer fabricantes, uma vez que estes tenham

suporte a IEC 61850. A Figura 20 elucida o procedimento de criação do IED virtual.

Figura 20 - Criação do IED virtual



Fonte: Magalhães (2019, com adaptações).

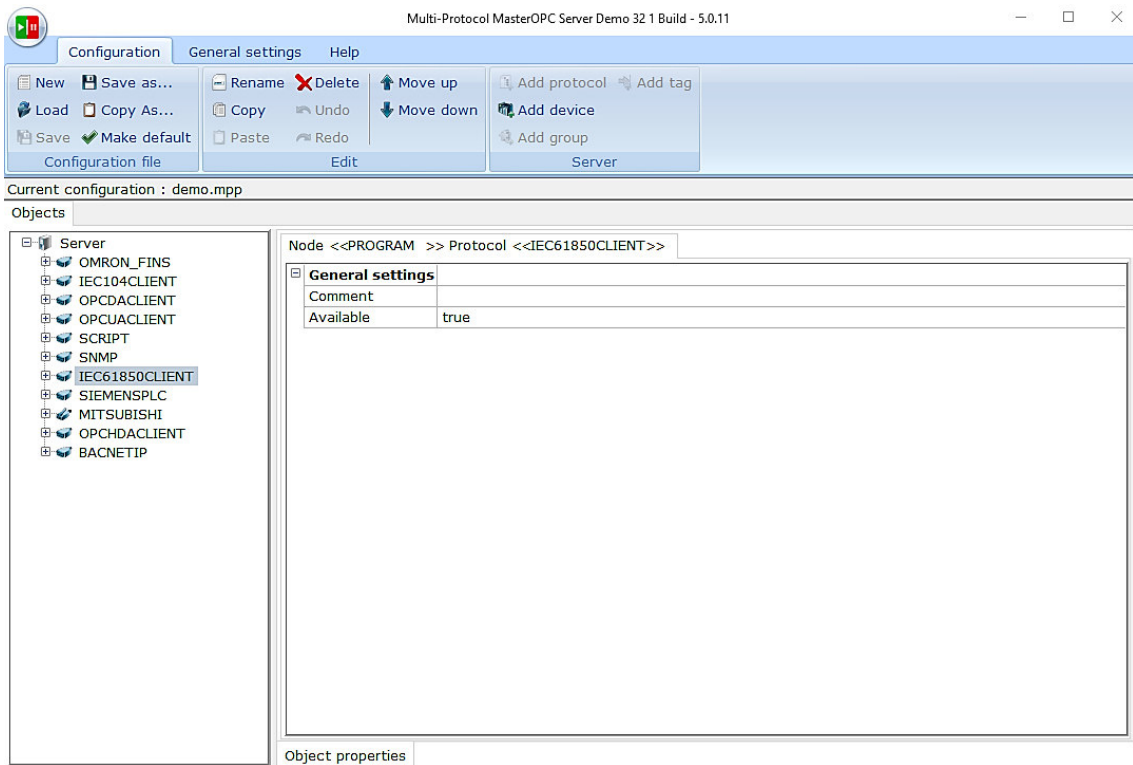
4.4 Multi-Protocol MasterOPC Server

A utilidade do OPC na plataforma veio com a necessidade de uma interface de comunicação entre o IED virtual e o SCADA utilizado, uma vez que o supervisório adotado não possuía suportabilidade a IEC 61850. Partindo da proposta inicial de ofertar uma plataforma didática livre, optou-se por utilizar o *Multi-Protocol MasterOPC Server* fornecido pela companhia *InSAT*. O *Multi-Protocol MasterOPC Server* é um servidor OPC modular, ou seja, suporta uma ampla gama de protocolos industriais conhecidos, como SNMP, Profinet e IEC 60870-5-104 e possibilita que o usuário desenvolva seu próprio protocolo em Visual C++. Além disso, o *Multi-Protocol MasterOPC Server* pode operar como servidor OPC UA, cliente OPC UA, servidor IEC104 ou cliente OPC DA (InSAT, 2022).

A respeito do módulo IEC 61850, ele realiza a coleta rápida de dados de todos os IEDs e os transmite para processamento posterior. Devido à sua compatibilidade com qualquer *hardware* compatível com a norma IEC 61850, esse módulo configura-se como uma boa sugestão de utilização em sistemas SCADA universais (InSAT, 2022). No site da desenvolvedora está disponível uma versão gratuita do servidor OPC para IEC 61850 que suporta até 32 *tags*. Este não é um produto de teste e conforme declarado pelo fabricante, destina-se ao uso completo em pequenas empresas. A configuração do OPC é simples e intuitiva e após a sua instalação já está pronto para ser utilizado, nenhuma configuração de D-

COM é necessária, podendo ser executado em versões não profissionais do *Windows*. A Figura 21 mostra a tela inicial sem configuração prévia, onde é possível observar todos os módulos ofertados pelo *software*.

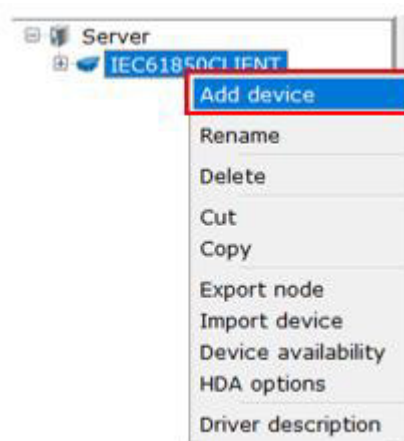
Figura 21 - Tela inicial do *Multi-Protocol MasterOPC Server*



Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

A configuração do OPC inicia-se com a seleção do módulo IEC61850CLIENT, onde será adicionado o IED que se deseja conectar, como mostra a Figura 22.

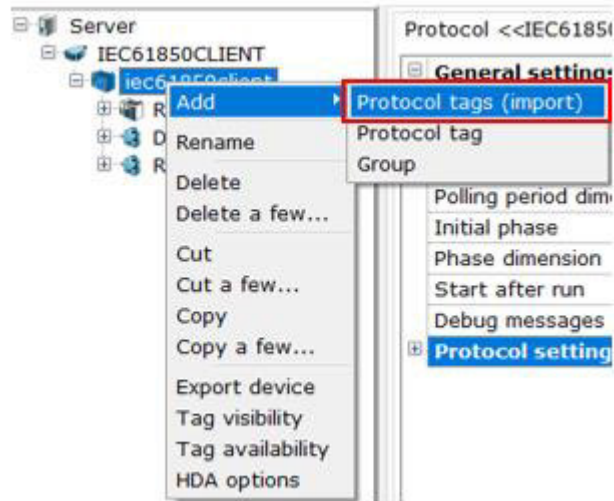
Figura 22 - Adicionar IED no *Multi-Protocol MasterOPC Server*



Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

Após a criação do dispositivo, segue-se a importação dos nós lógicos desejados do IED, como mostra a Figura 23.

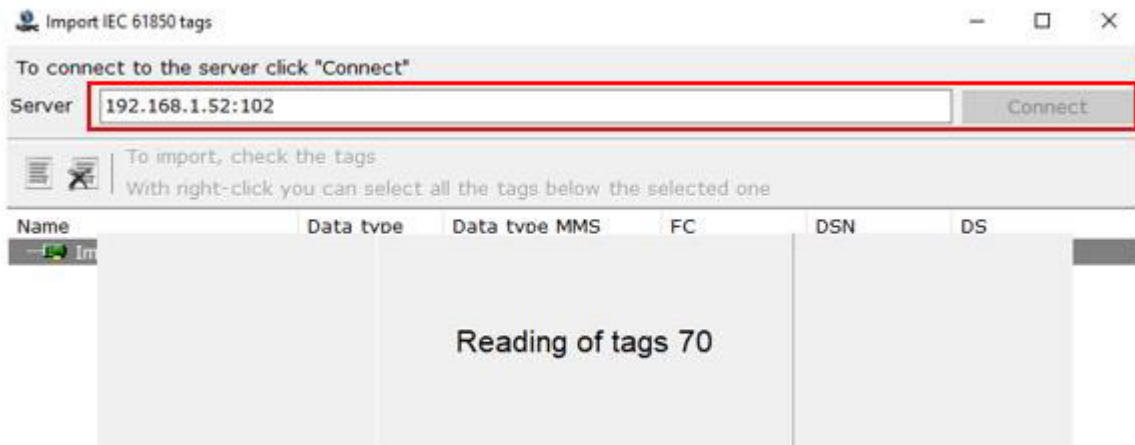
Figura 23 - Importar dados para o *Multi-Protocol MasterOPC Server*



Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

A seguir, como mostra a Figura 24, será exibida a tela de conexão que deverá ser preenchida com o endereço IPV4 do IED a ser conectado. Após clicar em conectar, será iniciada a leitura dos dados do IED.

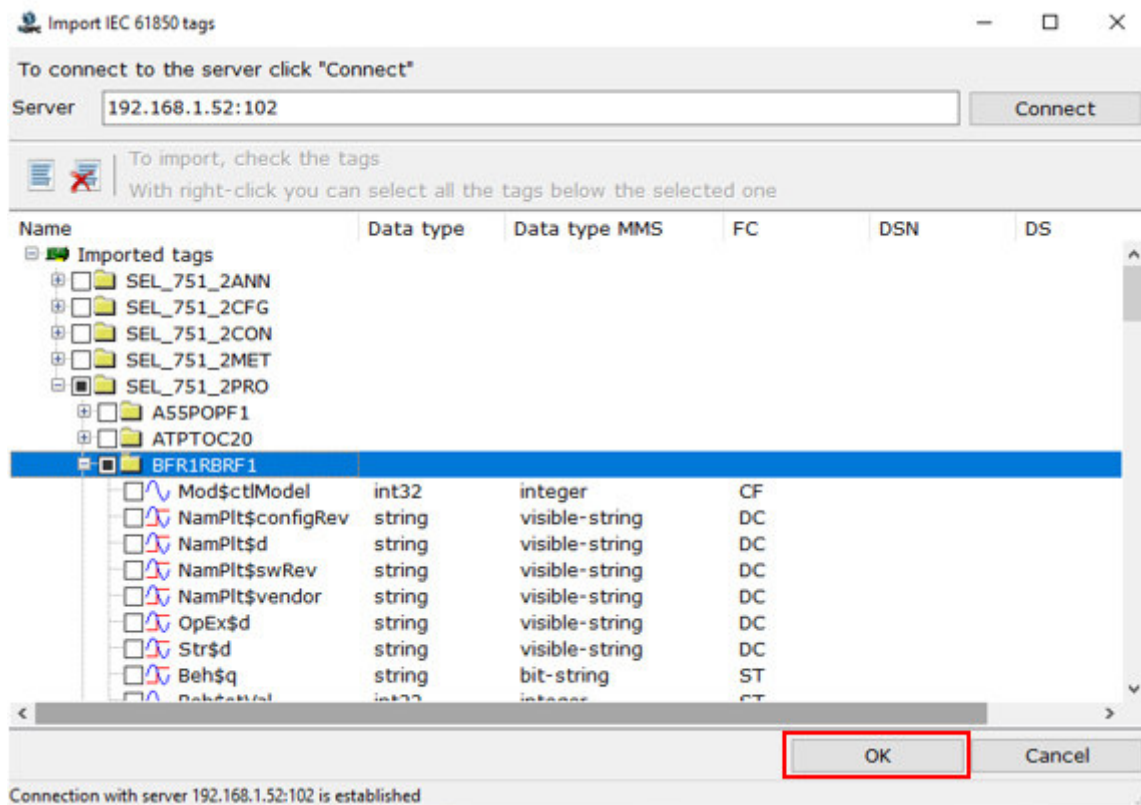
Figura 24 - Leitura dos dados do IED selecionado



Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

Após a conclusão da leitura, serão exibidas as pastas que representam a estrutura de dados do IED de acordo com a IEC 61850, como mostra a Figura 25.

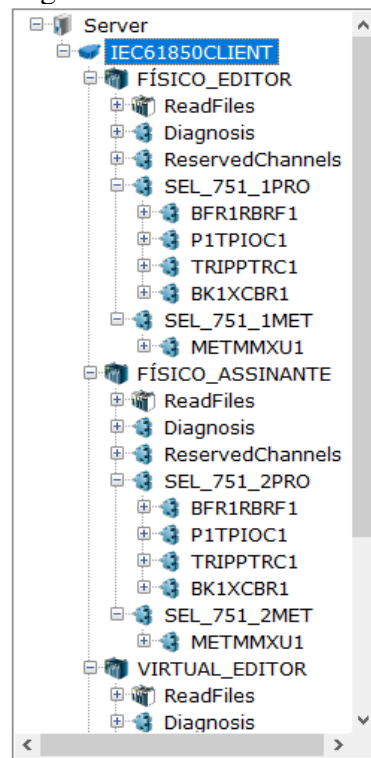
Figura 25 - Exibição das pastas da estrutura de dados do IED



Fonte: Multi-Protocol MasterOPC Server.

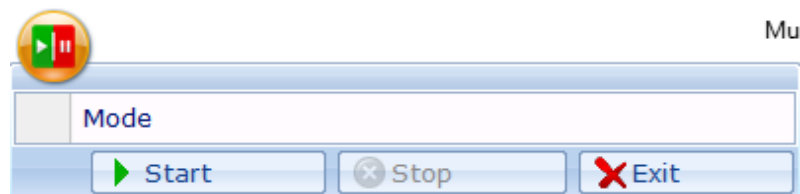
Após selecionar os nós lógicos de acordo com as funções e testes que se deseja realizar, finaliza-se clicando em *OK*. Conforme citado anteriormente, deve-se atentar para a limitação de 32 *tags* no OPC. Na Figura 23 tem-se um exemplo de IEDs conectados, sendo dois físicos (FÍSICO_EDITOR e FÍSICO_ASSINANTE) correspondentes aos IEDs reais da plataforma, e um virtual (VIRTUAL_EDITOR) com seus respectivos nós lógicos. O procedimento para a conexão foi o mesmo em todos os casos, inclusive para o VIRTUAL_ASSINANTE que não pôde ser visualizado na Figura 26. Nessa fase, antes de estabelecer a comunicação em tempo real, é possível habilitar a comunicação para leitura e escrita das *tags*. No caso do trabalho realizado, utilizou-se a configuração padrão de apenas leitura.

Figura 26 - IEDs conectados



Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

Com a importação e configuração das *tags* finalizadas, basta salvar o arquivo de configuração do OPC e iniciar a comunicação em tempo real clicando no botão de *Start* localizado no topo esquerdo da tela do software, como mostra a Figura 27.

Figura 27 - Botão de inicialização do *Multi-Protocol MasterOPC Server*

Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

A Figura 28 mostra o OPC conectado ao IED realizando a leitura dos estados dos nós lógicos selecionados. A tela oferece informações para monitoramento, tais como, o endereço da *tag* na estrutura de dados do IED, o valor lido na *tag*, a qualidade da conexão do OPC com o nó lógico do IED, registro de data e hora das leituras, o tipo de variável lida e o tipo de acesso definido. Quaisquer alterações no comportamento das *tags* ou na conexão podem ser averiguadas diretamente nesta tela.

Figura 28 - Tela de exibição da conexão do *Multi-Protocol MasterOPC Server* com o IED físico assinante

Device - IED ASSINANTE : IEC 61850 CLIENT						
Tags						
Identifier	Region	Value	Quality	Timestamp	Type in	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.ReadFiles.NumberReadedFiles		0	GOOD	2021-11-3...	uint32	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.Diagnosis.Failure		false	GOOD	2021-11-3...	bool	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.ReservedChannels.SpecifiedChannelNumber		1	GOOD	2021-11-3...	int32	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.ReservedChannels.CurrentChannelNumber		0	GOOD	2021-11-3...	int32	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2PRO.BFR1RBRF1.OpEx\$general	SEL_751...	false	GOOD	2021-11-3...	bool	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2PRO.P1TPIOC1.Str\$general	SEL_751...	false	GOOD	2021-11-3...	bool	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2PRO.TRIPPTRC1.Tr\$general	SEL_751...	false	GOOD	2021-11-3...	bool	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2PRO.BK1XCBR1.Pos\$stVal	SEL_751...	01	GOOD	2021-11-3...	string	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2MET.METMMXU1.A\$phsA\$cVal\$mag\$f	SEL_751...	0	GOOD	2021-11-3...	float	
IEC61850CLIENT.IED ASSINANTE.SEL_751_2MET.METMMXU1.A\$phsC\$instCVal\$a...	SEL_751...	-111.8...	GOOD	2021-11-3...	float	

Fonte: *Multi-Protocol MasterOPC Server*.

4.5 SCADA LAquis

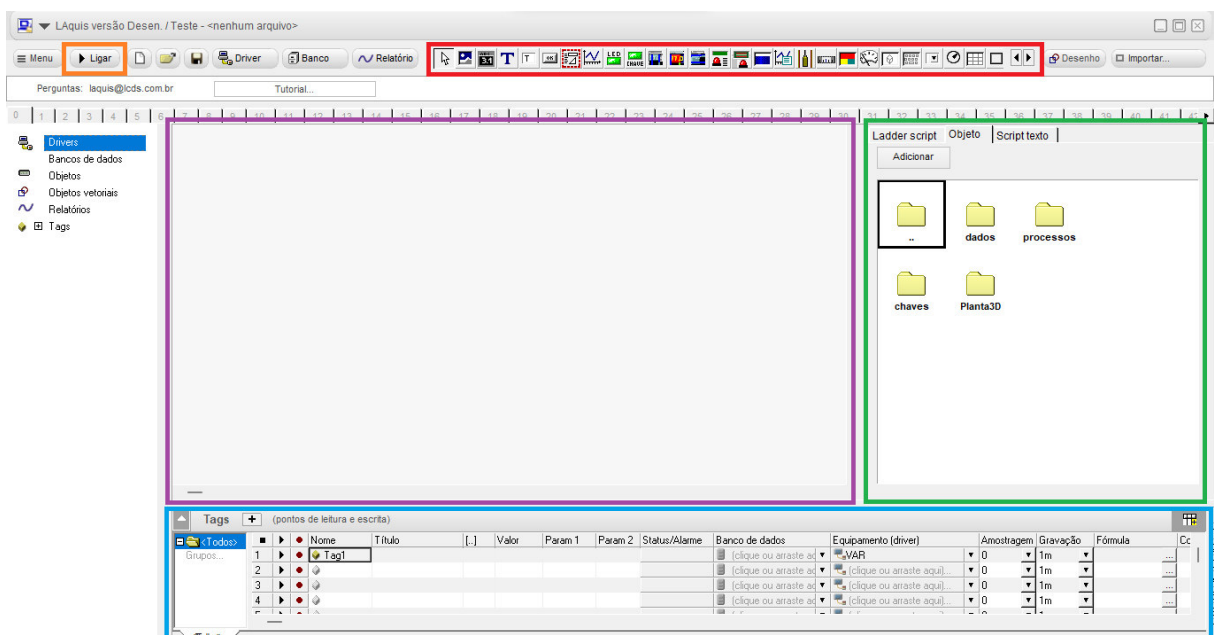
O SCADA LAquis é uma ferramenta para aquisição e armazenamento de dados, controle, supervisão e automação de processos, geração de relatórios e desenvolvimento de aplicativos (SCADA LAquis, 2022), desenvolvida pela empresa brasileira Leão Consultoria e Desenvolvimento de Sistemas. Conforme a empresa desenvolvedora, o SCADA Laquis possui as seguintes funcionalidades:

- Aplicações básicas como indicadores, banco de *tags* com informações dos equipamentos, endereços das variáveis, propriedades e dados de entrada e saída;
- Serviços de acompanhamento, armazenamento, histórico, acesso ao hardware e geração de relatório das leituras;
- Cada variável, *tag*, ponto de leitura ou escrita no sistema supervisão pode conter quantas propriedades forem necessárias;
- Os arquivos de gravação dos dados são flexíveis e seus campos podem ser definidos pelo usuário;
- Recursos especiais de geração de relatórios. Além dos modelos existentes no sistema, é possível desenvolver e personalizar desde relatórios simples até estatísticas voltadas à automação, inspeção e controle de qualidade;
- Possibilidade de programar ações e eventos através de uma linguagem visual estruturada;
- Acompanhamento via Internet/Intranet/WEB;
- Os *drivers* de comunicação podem ser desenvolvidos no próprio *software*, através de uma linguagem voltada para este tipo de desenvolvimento (*Idriver*), ou por meio de *scripts* ou *DLLs*;

- Suporte para receber *tags* via OPC;
- Geração de interfaces de controle em 2D/3D;
- Assistência e suporte acessíveis.

O SCADA LAquis utilizado na plataforma foi a versão de estudante, o *download* é feito no *site* da empresa desenvolvedora mediante cadastro de um *e-mail* válido. Essa versão não necessita de requisitos avançados de *hardware* e é de fácil instalação. A versão profissional não é livre. Na Figura 29 encontra-se a tela inicial sem configuração prévia.

Figura 29 - Tela inicial do SCADA LAquis



Fonte: SCADA LAquis.

A porção destacada em vermelho é o menu geral, nele estão as ferramentas para criação das telas. Através desse menu é possível inserir e criar objetos visuais como textos, imagens, animações em 2D e 3D, telas de alarmes, relatórios, ensaios e testes. Destacado em azul está o banco de *tags*, onde é possível inserir, configurar e personalizar as variáveis utilizadas pelo supervisor. Grifado em verde está o ambiente de configuração de objetos e de programação. A programação pode ser realizada em linguagem visual, ao selecionar a aba *Ladder script*, ou em *script* selecionando a aba *Script texto*. O SCADA LAquis possui sua própria linguagem de programação, similar à linguagem C. Ainda nesse grupo, está a aba *Objeto*, onde é possível inserir quaisquer objetos externos para compor o sistema supervisor. Destacado em violeta está o ambiente de criação das telas, ressalta-se que o usuário pode utilizar quantos ambientes forem necessários para o desenvolvimento de seu sistema. Finalmente, destacado em laranja está o botão *ligar* que inicia a execução do

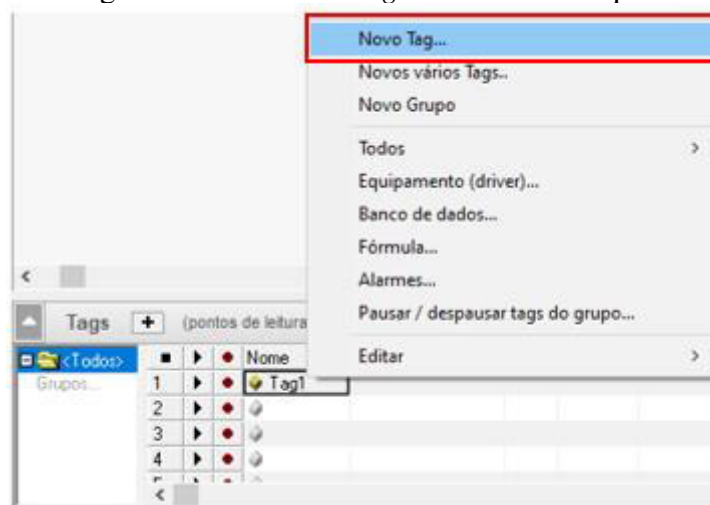
supervisório.

A partir do SCADA LAquis foi desenvolvido um sistema supervisório simplificado, constituído por uma tela inicial, um diagrama unifilar geral, uma tela alarmes, de monitoramento de disjuntores e de gráfico de corrente. A liberdade de criação ofertada pelo SCADA LAquis pode estimular a produção de maiores funcionalidades para o sistema supervisório, e por ser uma versão livre, se torna uma opção acessível para o primeiro contato com a concepção e construção desse tipo de sistema.

4.5.1 Desenvolvimento do supervisório

A chave para a criação de qualquer sistema de supervisão no SCADA LAquis são as *tags*, pois elas são o ponto de entrada e saída de informação do sistema, e conseqüentemente virão a ser as variáveis trabalhadas nos objetos visuais e relatórios. Para adicionar uma *tag* deve-se clicar com o botão direito do *mouse* em qualquer ponto do banco de *tags*, onde será exibido uma tela de opções na qual deve-se escolher Novo *Tag*, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Adicionar *tag* no SCADA LAquis



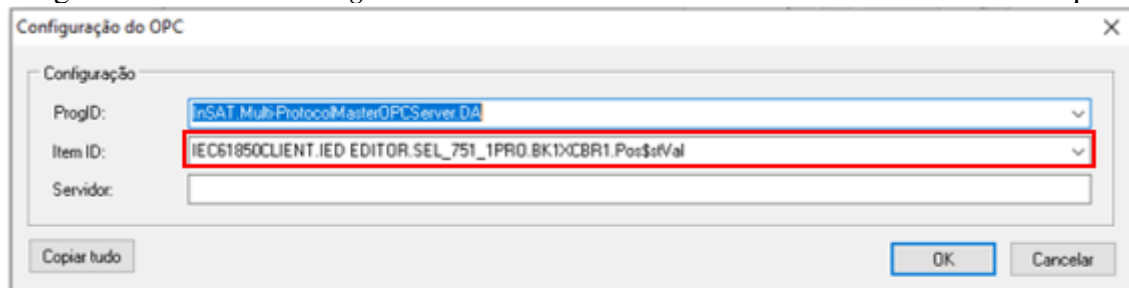
Fonte: SCADA LAquis.

Imediatamente após selecionar Novo *Tag*, será exibida uma tela com a lista de *drivers* disponibilizados pelo LAquis para a comunicação das *tags* com a sua fonte de dados. No caso do trabalho desenvolvido foi selecionada a opção OPC. Após a seleção é exibida uma tela com as opções de *drivers* OPC disponíveis no computador utilizado, tal como mostra a Figura 31. Deve-se escolher a opção *InSAT.Multi-ProtocolMasterOPCServer.DA*. Ressalta-se que esse é o momento em que ocorre a associação das *tags* do SCADA com as *tags* previamente criadas no *Multi-Protocol MasterOPC Server*, demonstrado na Seção 4.4 e na

Figura 32.

Figura 31 - Seleção do *Multi-Protocol MasterOPC Server* no SCADA LAquis

Fonte: SCADA LAquis.

Figura 32 - Escolha da *tag* do *Multi-Protocol MasterOPC Server* no SCADA LAquis

Fonte: SCADA LAquis.

Ainda no banco de *tags* é possível fazer pré-ajustes de acordo com a sua finalidade. Pode-se, por exemplo, realizar conversões diretas por meio de expressões ou acrescentar fatores multiplicativos através da coluna Fórmulas. Outra funcionalidade interessante é a atribuição de limites inferior e superior para uma *tag*, com isso, qualquer leitura de valor que extrapole os limites estabelecidos aciona imediatamente um alarme. Pode-se também definir a taxa de atualização individual de cada *tag* e suas grandezas físicas, como também definir valores constantes.

Dependendo da quantidade e variação das fontes de informação das *tags*, recomenda-se como boa prática de organização agrupá-las conforme a origem de seus dados. Ao ser criado um grupo, cria-se também um banco de dados dedicado, onde será salvo o histórico de valores das *tags* pertencentes ao grupo. Para o trabalho foram criados cinco agrupamentos, sendo dois para os IEDs físicos editor e assinante, dois para os IEDs virtuais editor e assinante, e um grupo de *tags* auxiliares. As *tags* auxiliares servem para atribuir funcionalidade aos demais objetos do diagrama unifilar que não estão associados ao OPC devido a sua limitação de quantidade. Em uma condição de maior infraestrutura, as *tags* auxiliares também poderão ser associadas às suas respectivas fontes de dados. A Tabela 6 no Apêndice C detalha os agrupamentos criados e suas *tags*.

Após finalizar a criação das principais *tags*, inicia-se a produção das telas. A Figura 33 mostra a tela inicial do sistema, desenvolvida a partir das ferramentas de inserção de imagem e de texto, e da ferramenta *Button*. Na configuração de botão é definida a sua funcionalidade, nesse caso, foi-lhe atribuída a navegação entre telas. A Figura 34 mostra os ícones das ferramentas utilizadas. Destacado em vermelho está a ferramenta de inserção de imagem e em azul as ferramentas de texto e botão.

Figura 33 - Tela inicial do supervisório desenvolvido



Fonte: SCADA LAquis.

Figura 34 - Ícones de inserção de imagem, inserção de texto e botão



Fonte: SCADA LAquis.

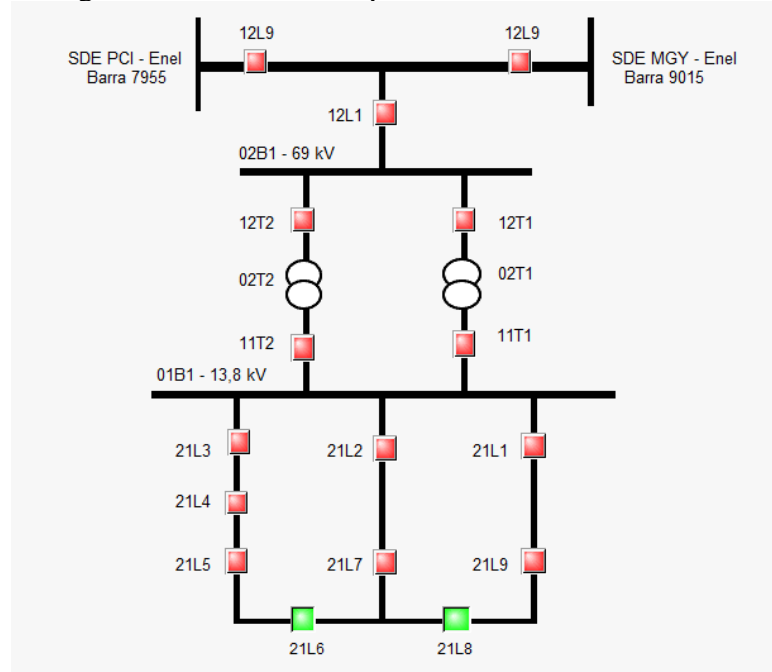
A segunda tela corresponde ao diagrama unifilar geral do Campus do Pícaro, construído a partir das ferramentas *Shape* (barras, linhas de distribuição e transformador) e *Chave* (disjuntores), conforme mostrado na Figura 36. Na Figura 35, destacado em vermelho está o ícone da ferramenta *Chave* e em azul a ferramenta *Shape*. As demais telas encontram-se no Apêndice D.

Figura 35 - Ícones de chave e criação de formas



Fonte: SCADA LAquis.

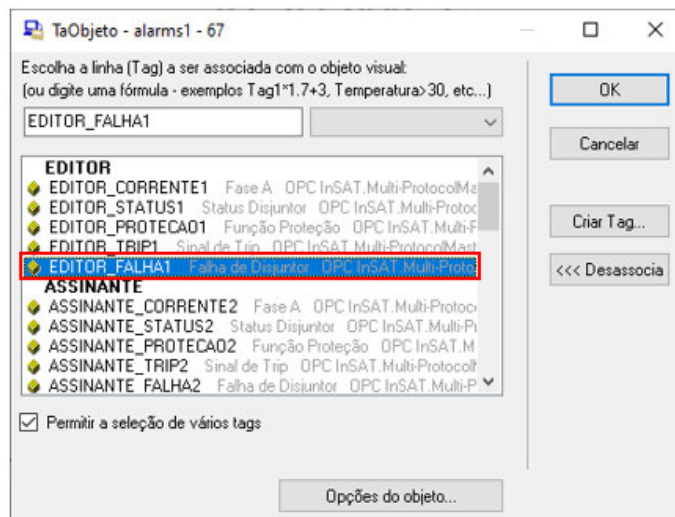
Figura 36 - Diagrama unifilar do Campus do Pici construído no SCADA LAquis



Fonte: SCADA LAquis.

Para associar uma *tag* a um objeto do ambiente de criação, seja ele um alarme, forma ou relatório, basta clicar para selecioná-lo e abrir a sua tela de configuração. Em configurações seleciona-se a opção *Tag* (fórmula), onde será exibida a lista das *tags* criadas no SCADA LAquis. No exemplo da Figura 37 foi criada uma tela de alarmes e a ela foi atribuída a *tag* EDITOR_FALHA1, que está associada ao nó lógico PRO/BFR1RBRF1.OpEx.general do IED conectado através do OPC, ou seja, em um teste de falha de disjuntor o evento será registrado no relatório de alarmes do SCADA e exibido na tela de alarmes.

Figura 37 - Associação de *tag* a um alarme



Fonte: SCADA LAquis.

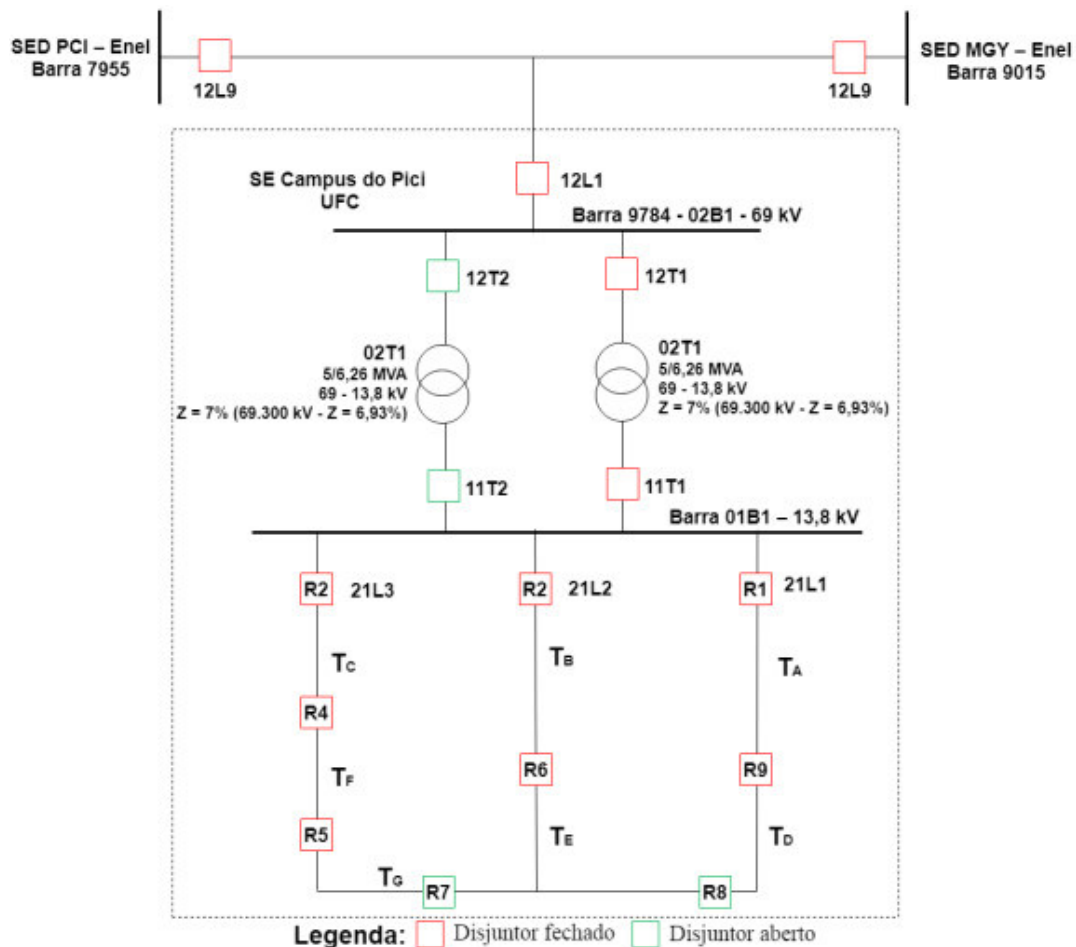
5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas com o IED virtual. Foram testados os seus protocolos de comunicação e a sua atuação nas funções de proteção para o qual foi programado. Também são apresentados os resultados da integração do IED virtual ao supervisório SCADA LAquis.

5.1 Cenários de teste

Os testes para a validação das atribuições do IED virtual foram divididos em cenários, sendo estes relativos às funções de proteção para quais ele foi programado. Todavia, para consolidar o sucesso de seu desenvolvimento, foi necessário comparar o seu funcionamento e desempenho com o de um IED físico, portanto, os primeiros testes foram realizados utilizando apenas IEDs reais. A Figura 38 contextualiza o cenário da simulação, onde os IEDs testados estão na posição de comando dos disjuntores 11T2 e 21L3.

Figura 38 - Diagrama unifilar da rede do Campus do Pici



Fonte: Carneiro (2021, p. 32).

As simulações foram acompanhadas a partir da captura do tráfego da rede local, onde foram verificados os conteúdos das mensagens GOOSE enviadas pelos IEDs (físico e virtual), monitorando-se especificamente o estado dos dados:

- SEL_751_1PRO/P1TPIOC1.Str.general;
- SEL_751_1PRO/TRIPPTRC1.Tr.general;
- SEL_751_1PRO/BFR1RBRF1.OpEx.general;
- SEL_751_2PRO/TRIPPTRC1.Tr.general.

Considerou-se ainda que os IEDs físicos foram devidamente parametrizados, conforme Apêndice A.

5.2 Testes com IEDs físicos

O primeiro grupo de testes foi efetuado apenas por IEDs físicos, a fim de construir uma base de comparação para a atuação do IED virtual. A partir disso, os testes foram divididos em função de sobrecorrente instantânea, seletividade lógica sem falha de disjuntor e seletividade lógica com falha de disjuntor.

5.2.1 Sobrecorrente instantânea

A função de Sobrecorrente Instantânea foi testada a partir do IED físico SEL_751_1 pertencente à bancada do laboratório, na posição de comando do disjuntor 21L3 do diagrama unifilar mostrado na Figura 35. Esse teste foi subdividido em três casos, os quais são o de pré-falta, falta sem falha de disjuntor e falta com falha de disjuntor. A importância desse teste reside no fato de que essa função serviu de base para os cenários seguintes de seletividade lógica.

5.2.1.1 Sobrecorrente instantânea - Cenário de pré-falta

A situação de pré-falta simula o comportamento da rede elétrica em condições normais de operação, portanto, para esse caso, não deve haver atuação do IED sobre o disjuntor comandado. Desta forma, em relação à simulação, nenhum dado sofreu alteração de estado, pois nenhum sinal foi enviado pelo IED. O conteúdo das mensagens GOOSE enviadas pelo IED físico SEL_751_1 foi de bits zeros ou *False*. A Figura 39 mostra a captura da rede local no momento de pré-falta, onde destacado em roxo está a identificação dos dispositivos de origem e destino e o protocolo utilizado, ressaltando o envio de mensagens GOOSE do IED para o testador hexafásico. A seguir, destacado em azul, estão as informações do *dataset*

do IED que originou a mensagem, identificando-o como o IED editor. Destacado em verde está o número de sequência da mensagem enviada e o seu registro de tempo, tornando-a uma fonte de validação para a sequência temporal dos eventos simulados. E finalmente, destacado em vermelho, está o conteúdo da mensagem GOOSE enviada ao testador hexafásico, onde os campos relativos aos dados monitorados estão com o valor *False*, conforme previamente apontado, indicando que não houve atuação da função de sobrecorrente.

Figura 39 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea em pré-falta

No.	Time	Source	Destination	Protocol
1	0.000000	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
3	0.845132	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
5	0.999969	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
7	1.850113	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
8	2.000050	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
11	2.850149	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
12	3.005117	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
14	3.850324	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
15	4.005057	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
17	4.850678	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
18	5.005120	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
20	5.855784	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
21	6.005190	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
23	6.847044	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
24	6.560180	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
25	6.585182	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE


```

timeAllowedToLive: 2000
datSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_EDITOR
goID: SEL 751 1
t: Nov 10, 2021 17:16:34.184997558 UTC
stNum: 49
sqlNum: 599
simulation: False
confRev: 1
ndsCom: False
numDataSetEntries: 3
  allData: 3 ites
    Data: boolean (3)
      boolean: False
    Data: boolean (3)
      boolean: False
    Data: boolean (3)
      boolean: False
  
```

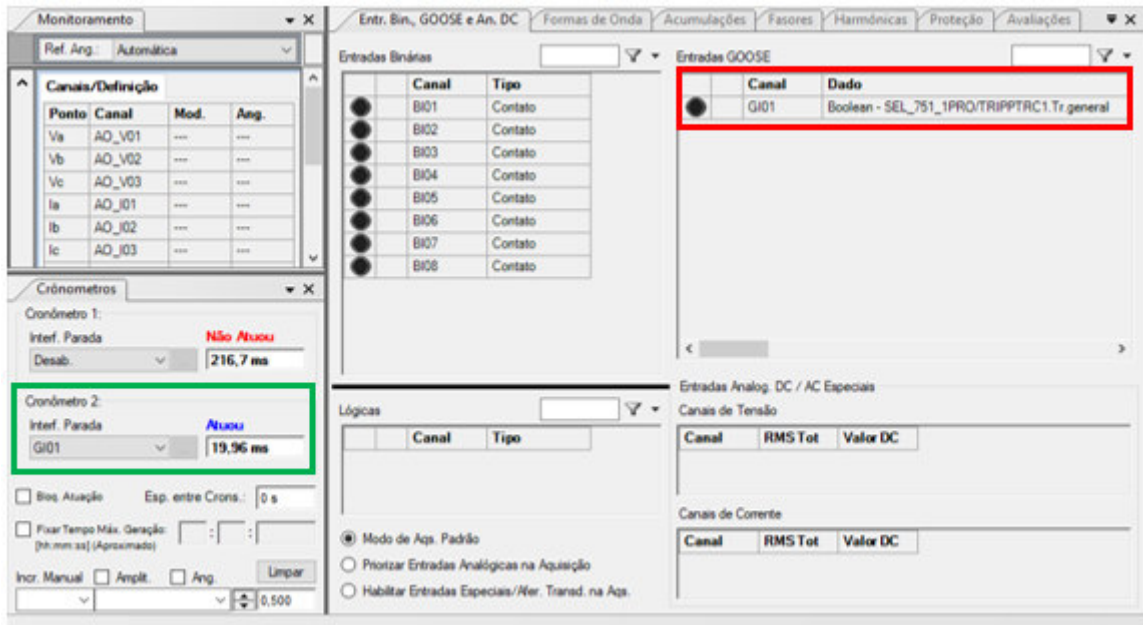
Fonte: *Wireshark*.

5.2.1.2 Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta sem falha de disjuntor

No segundo cenário de simulação foi considerada a incidência de uma falta trifásica no trecho Tc da linha a qual sensibilizou o IED SEL_751_1. Nesse caso, foram enviados na rede os sinais de sobrecorrente instantânea e de *trip* para o disjuntor 21L3. A Figura 40 mostra destacado em vermelho a associação do sinal de *trip* do IED SEL_751_1 ao canal de comunicação GOOSE GI01 do testador hexafásico, o qual foi utilizado como critério de parada da simulação. A porção destacada em verde mostra o tempo para a atuação do sinal

de *trip* enviado pelo IED após a identificação da falta.

Figura 40 - Critério de parada da simulação e tempo do IED físico para sobrecorrente instantânea sem falha de disjuntor



Fonte: CTC.

Novamente, através do *WireShark*, acompanhou-se as mensagens enviadas pelo IED físico durante a simulação da falta, onde nesse caso, as mensagens GOOSE passaram a conter os sinais de atuação da função de sobrecorrente instantânea e de *trip*, como mostra o destaque em vermelho da Figura 41. O campo que permaneceu em *False* corresponde ao sinal de falha de disjuntor.

Figura 41 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta

No.	Time	Source	Destination	Protocol
1	0.000000	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
3	0.045132	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
5	0.999969	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
7	1.850113	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
8	2.000050	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
11	2.850149	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
12	3.005117	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
14	3.850324	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
15	4.005057	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
17	4.850678	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
18	5.005128	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
20	5.855284	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
21	6.005100	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
23	6.547044	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
24	6.990180	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
25	6.585182	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE

```

timeAllowedtoLive: 30
datSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_EDITOR
goID: SEL 751 1
t: Nov 10, 2021 17:16:34.726997375 UTC
stNum: 50
sqNum: 0
simulation: False
confRev: 1
ndsCom: False
numDatSetEntries: 3
  allData: 3 items
    Data: boolean (3)
      boolean: True
    Data: boolean (3)
      boolean: True
    Data: boolean (3)
      boolean: False
  
```

wireshark_Ethernet2B5RC1.pcapng

Fonte: *Wireshark*.

O destaque em roxo sinaliza o pacote analisado, que partiu do IED físico para o testador hexafásico. A identificação do *dataset* do IED está destacada em azul, identificando-o como o IED SEL_751_1. Em verde estão as informações de sequência da mensagem e de tempo, ressaltando que esse evento ocorreu após a pré-falta analisada no item 5.2.1.1. A Figura 42 mostra o IED físico após a finalização do teste, indicando o acendimento dos leds relacionados às funções ativadas em TRIP e INST OC.

Figura 42 - IED físico pós falta sem falha de disjuntor

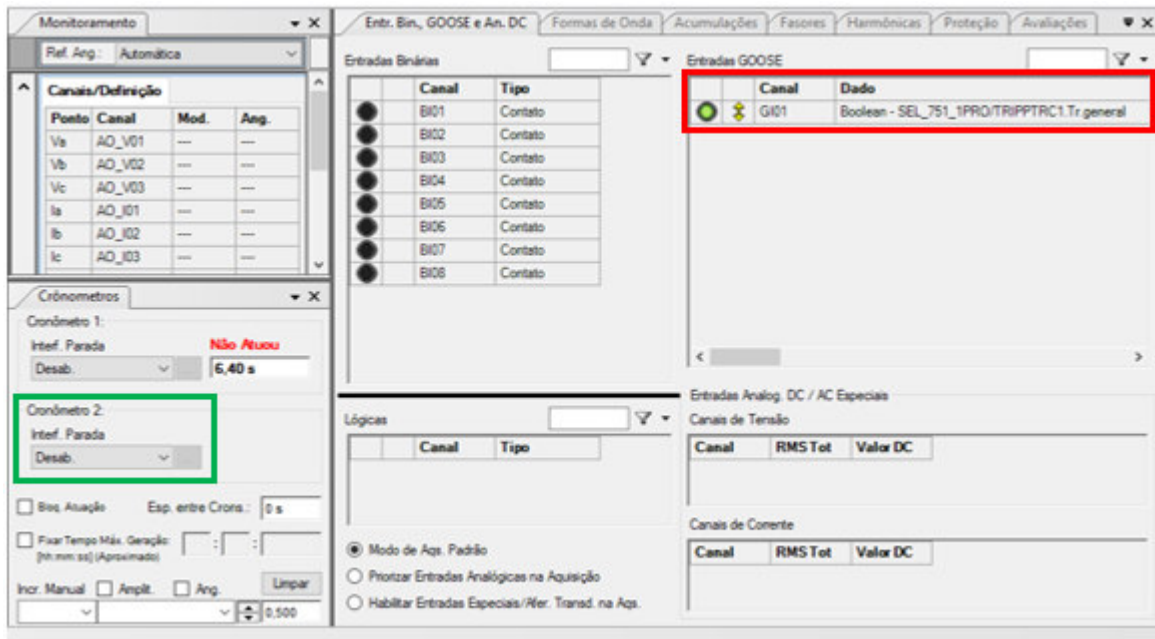


Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.1.3 Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta com falha de disjuntor

O terceiro cenário de sobrecorrente instantânea simulou uma falha na atuação do disjuntor 21L3 comandado pelo IED SEL_751_1. Para tanto, o sinal de *trip* não foi adotado como critério de parada da simulação durante as configurações iniciais do testador hexafásico. Sendo assim, a injeção de corrente de falta não foi cessada após o recebimento do *trip* do IED, causando então a sensibilização da função de falha de disjuntor, como mostra a porção destacada em verde na Figura 43. O destaque em vermelho sinaliza a confirmação de recebimento do sinal de *trip* no testador hexafásico.

Figura 43 - Critério de parada da simulação da função sobrecorrente instantânea com falha de disjuntor



Fonte: CTC.

No *WireShark* fez-se a captura do tráfego de mensagens no momento da falha de disjuntor. As informações de pacote, *dataset*, número de sequência e registro de tempo estão nos mesmos campos destacados nos exemplos anteriores. Entretanto, nota-se dessa vez que todos os sinais monitorados foram alterados para *True*, correspondendo a atuação das funções de sobrecorrente, *trip* e de falha de disjuntor, como mostra a parte destacada em vermelho da Figura 44.

Figura 44 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta e falha de disjuntor

No.	Time	Source	Destination	Protocol
14	2.199795	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
17	2.850022	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
20	3.199858	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
22	3.854472	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
25	4.198970	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
28	4.859131	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
31	5.200334	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
32	5.487607	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
33	5.499980	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
34	5.525080	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
35	5.569078	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
36	5.650021	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
37	5.814080	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
38	5.864204	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE
39	6.000107	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:04	GOOSE
32	6.000000	Schweitz_08:54:33	Iec-Tc57_01:00:09	GOOSE


```

timeAllowedtoLive: 30
datSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_EDITOR
goID: SEL 751 1
t: Nov 10, 2021 17:26:28.335998535 UTC
stNum: 68
sqNum: 0
simulation: 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: *Wireshark*.

A Figura 45 mostra o IED físico após o teste, indicando adicionalmente o acendimento do led correspondente à falha de disjuntor representado por BRKR FAIL.

Figura 45 - IED físico pós falta com falha de disjuntor

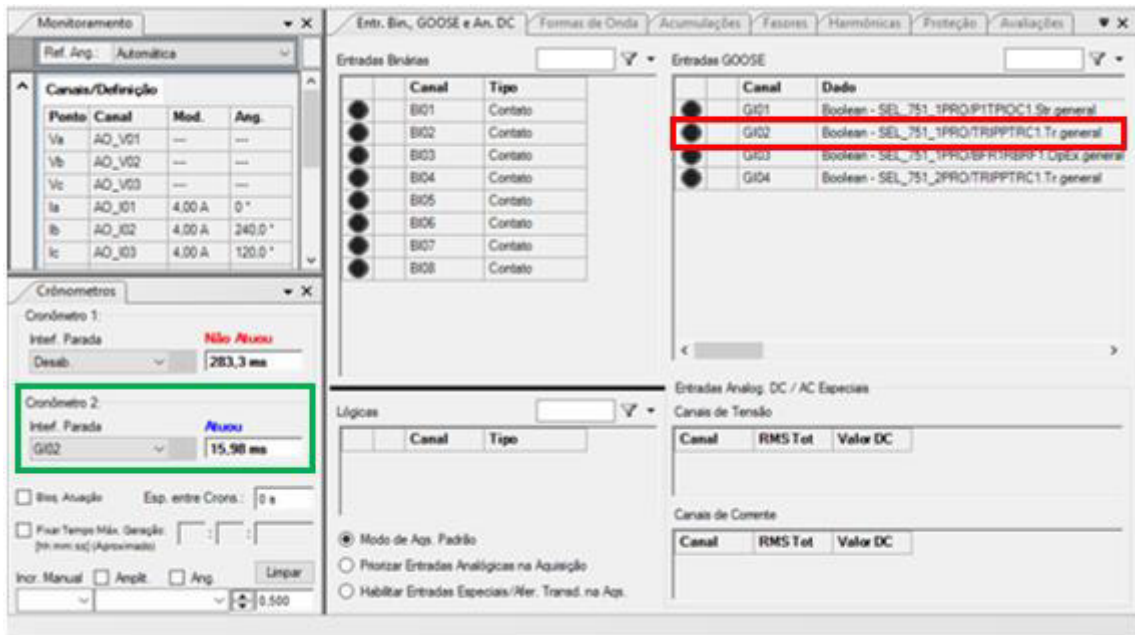


Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.2 Seletividade lógica sem falha de disjuntor

Para o teste de seletividade lógica utilizaram-se os dois IEDs físicos mencionados no diagrama unifilar da Figura 35. O IED SEL_751_1 operou como editor e comandou o disjuntor 21L3, enquanto o IED SEL_751_2 operou como assinante e comandou o disjuntor 11T2. Nesse cenário considerou-se que a falta ocorreu na linha Tc, a jusante do IED SEL_751_1. A partir dessas definições e do conceito de seletividade da proteção, observou-se que deveria partir do IED editor o sinal de *trip* para a abertura do disjuntor 21L3. A Figura 46 mostra a simulação realizada no testador hexafásico, onde nesse teste foram monitorados os dados PRO/P1TPIOC1.Str.general, PRO/TRIPPTRC1.Tr.general e PRO/BFR1RBRF1.OpEx.general para o acompanhamento da atuação do IED SEL_751_1, e o dado PRO/TRIPPTRC1.Tr.general do IED SEL_751_2 para averiguar a sua participação na seletividade lógica.

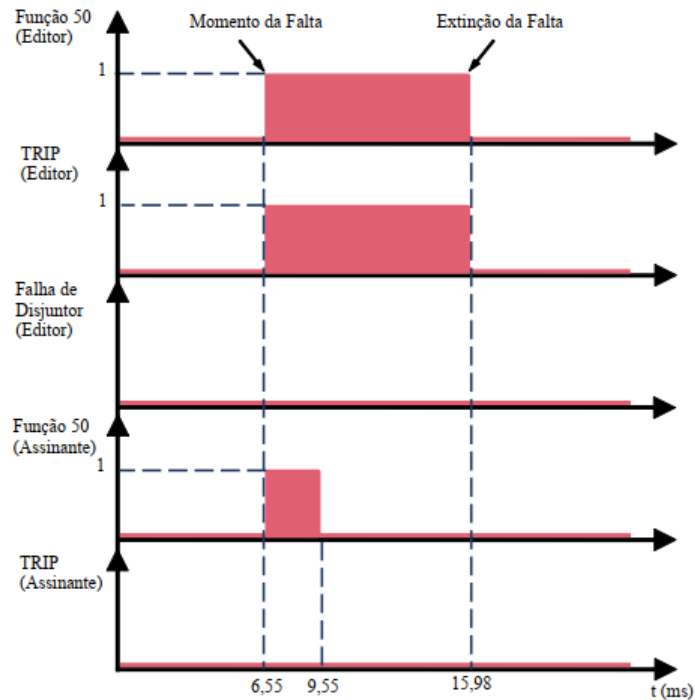
Figura 46 - Sinais monitorados e tempo de atuação durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor



Fonte: CTC.

De modo semelhante ao teste realizado em 5.2.1.2, utilizou-se como critério de parada da simulação o sinal de *trip* emitido pelo IED SEL_751_1 como destacado em verde na Figura 46. O Gráfico 1 ilustra a atuação dos sinais dos dois IEDs físicos, mostrando que a corrente de falta injetada pelo testador hexafásico foi percebida por ambos IEDs. Entretanto, devido a sua parametrização, o IED editor emitiu de imediato o sinal de *trip* para a abertura do disjuntor 21L3. O IED assinante ao receber essas mensagens, permaneceu sem enviar seu *trip*, efetuando assim, a seletividade lógica, pois em sua parametrização, o seu sinal de *trip* só seria enviado ao disjuntor 11T2 mediante o recebimento do sinal de falha de disjuntor do IED editor.

Gráfico 1 - Representação dos sinais enviados pelos IEDs físicos durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor



Fonte: Freitas (2022, com adaptações).

A Figura 47 mostra os IEDs físicos após a finalização do teste, onde o IED da esquerda é o IED assinante e o da direita é o IED editor, o qual está sinalizando a falta trifásica em seu *display* e atuação das funções de sobrecorrente e *trip* em seus leds. O IED assinante que no cenário da simulação estava a montante do editor, não sinalizou a operação de nenhuma função, corroborando a seletividade lógica apresentada pelo Gráfico 1.

Figura 47 - IEDs físicos após o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor

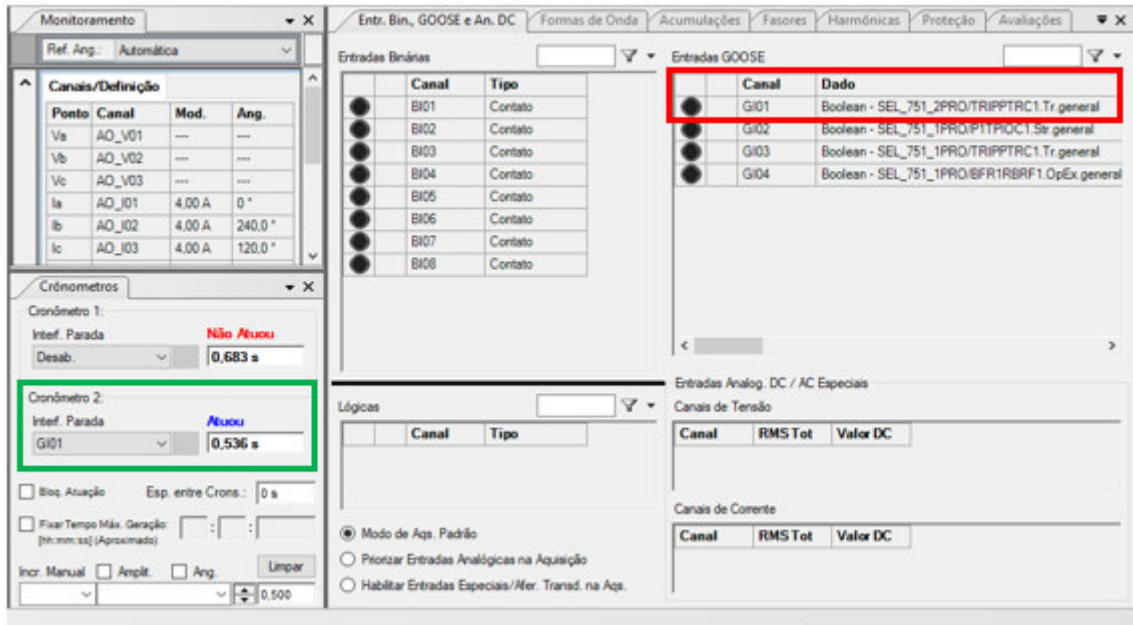


Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.3 Seletividade lógica com falha de disjuntor

De modo semelhante ao teste realizado em 5.2.2, o cenário para simulação da seletividade lógica com falha de disjuntor consistiu em dois IEDs físicos, um editor e um assinante, que comandaram a abertura dos disjuntores 21L3 e 11T2. A falta ocorreu na linha Tc, a jusante do IED editor, entretanto, para esse caso, devido a uma falha em seu funcionamento, o disjuntor 21L3 não abriu seus terminais. Logo, pelo princípio de seletividade da proteção, o IED assinante enviou seu *trip* para o disjuntor 11T2, extinguindo a falta. A Figura 48 mostra os sinais monitorados nesse teste. O critério de parada da injeção de corrente de falta foi o *trip* do IED assinante SEL_751_2 destacado em verde.

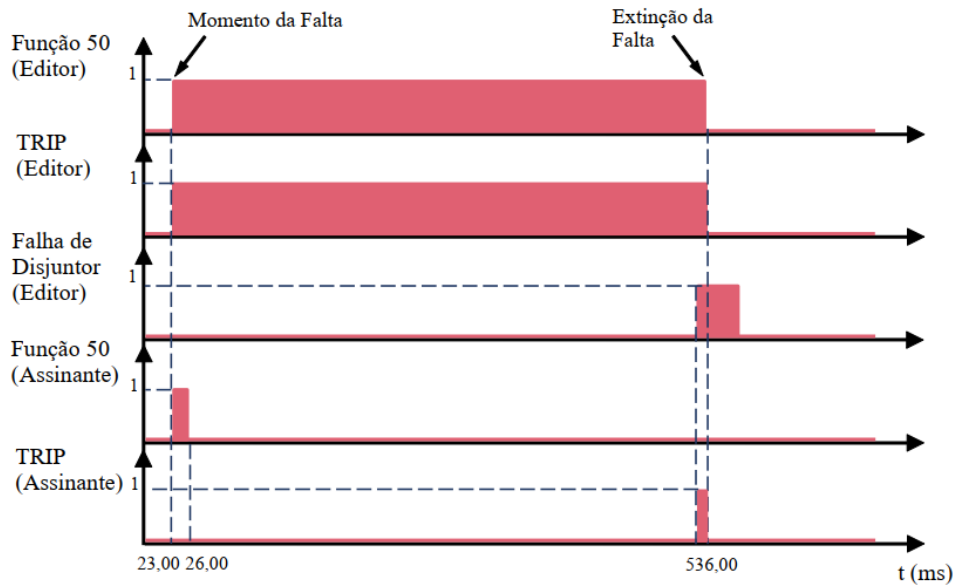
Figura 48 - Sinais monitorados e tempo de atuação durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor



Fonte: CTC.

O Gráfico 2 ilustra a sequência de eventos ocorridos durante o teste, de modo que na ocasião da falta, os dois IEDs são sensibilizados para a sobrecorrente instantânea. Devido a sua parametrização, o IED editor envia o sinal de *trip* para o disjuntor, inibindo a atuação do IED assinante. No entanto, mediante a falha na abertura do disjuntor 21L3, a corrente de falta continua no sistema, e após o tempo pré-configurado de 536 ms o IED editor envia o sinal de falha para a rede. Logo que o IED assinante percebe o sinal de falha, envia imediatamente o *trip* para o disjuntor 11T2, extinguindo a falta.

Gráfico 2 - Representação dos sinais enviados pelos IEDs físicos durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor



Fonte: Freitas (2022, com adaptações).

A Figura 49 mostra os IEDs físicos após a execução do teste, onde o IED da direita é o SEL_751_2 que operou como o assinante, e o da esquerda é o SEL_751_1 que operou como o editor. Visualiza-se no IED editor o acendimento dos leds relacionados a sobrecorrente instantânea (INST OC), trip (TRIP) e falha de disjuntor (BRKR FAIL). No IED assinante, devido a sua atuação por seletividade lógica frente a falha de disjuntor, houve o acendimento do led TRIP e em seu *display* exibiu-se a mensagem REMOTE TRIP.

Figura 49 - IEDs físicos após o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 Testes com IED virtual

Os testes com o IED virtual seguiram o mesmo conjunto de procedimentos realizados com os IEDs físicos, onde foram executadas as funções de sobrecorrente instantânea, seletividade lógica sem falha de disjuntor e seletividade lógica com falha de disjuntor, todas sob o monitoramento do tráfego de rede. Todavia, antes de iniciar as simulações com o IED virtual no cenário das funções de proteção, teve-se que avaliar primeiramente a sua capacidade de comunicação. O IED virtual foi desenvolvido para utilizar os protocolos MMS e GOOSE, dessa forma, foram realizados testes a fim de verificar sua aptidão na execução desses protocolos.

5.3.1 Teste de comunicação MMS

O teste para esse protocolo foi efetuado através da criação de uma simples instância servidora capaz de enviar *reports* para um cliente via MMS, sendo realizado em modo *loopback*, ou seja, o envio e recebimento das mensagens estava restrito apenas à placa de rede do computador utilizado na execução do IED virtual. Os códigos do servidor e do cliente estão disponíveis no diretório de exemplos da libIEC61850 sob os títulos *server_example_basic_io* e *cliente_example1*. Na Figura 50 está a captura de tela do terminal *Linux* onde foi executado o programa do servidor, no qual inicia conexão com o cliente e passa a enviar os seus *reports*. Após finalizado o envio, o servidor encerra a conexão.

Figura 50 - Execução do código de um servidor MMS

```
Using libIEC61850 version 1.5.0
Connection opened
Connection closed
```

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 51 mostra alguns dos *reports* recebidos pelo cliente.

Figura 51 - *Reports* recebidos pelo cliente MMS

```
ples/iec61850_client_example1$ ./client_example1
read float value: 0.963789
RptEna = 0
received report for simpleIOGenericIO/LLN0.RP.EventsRCB01
GGIO1.SPCS00.stVal: 0 (included for reason 16)
GGIO1.SPCS01.stVal: 0 (included for reason 16)
GGIO1.SPCS02.stVal: 0 (included for reason 16)
GGIO1.SPCS03.stVal: 0 (included for reason 16)
```

Fonte: elaborado pelo autor.

No *WireShark* foi possível observar o procedimento de conexão entre o cliente e o servidor via protocolo MMS, conforme mostrado na Figura 52. Destacado em roxo está a primeira solicitação de conexão enviada pelo servidor. Na sequência das mensagens pode-se observar no destaque verde, o *Dataset* que contém o conteúdo dos *reports* enviados ao cliente, tal como mostrado na Figura 51. Os destaques em azul e vermelho confirmam a origem da requisição de conexão a partir do servidor MMS.

Figura 52 - Tráfego de mensagens via MMS

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
56	84.468428659	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	253	initiate-RequestPDU
58	84.468473343	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	200	initiate-ResponsePDU
69	84.468919777	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	144	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO GGIO1SPXSAnInI\$mag\$1
64	84.468987487	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	163	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO GGIO1SDCSNasPit\$ven.
66	84.468982781	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	95	confirmed-ResponsePDU
68	84.468919469	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	134	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO LLN0SEvents
70	84.468978823	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	145	confirmed-ResponsePDU simpleIOGenericIO LLN0SEvents
72	84.461869640	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	143	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO LLN0SRPSEventsRCB01
74	84.461821036	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	100	confirmed-ResponsePDU
76	84.461261831	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	273	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO LLN0SRPSEventsRCB01
78	84.461358834	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	99	confirmed-ResponsePDU
80	85.461856397	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	149	confirmed-RequestPDU simpleIOGenericIO LLN0SRPSEventsRCB01
82	85.461998782	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	95	confirmed-ResponsePDU
84	85.472161554	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	190	unconfirmed-PDU
86	89.468281795	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	190	unconfirmed-PDU
88	94.478535474	127.0.0.1	127.0.0.1	MMS	190	unconfirmed-PDU

Expanded packet 77 details:

- MMS:
 - confirmed-RequestPDU
 - invokeID: 1
 - confirmedServiceRequest: read (4)
 - variableAccessSpecification: listOfVariable (0)
 - listOfVariable: 1 item
 - listOfVariable item
 - variableSpecification: name (0)
 - name: domain-specific (1)
 - domain-specific
 - domainID: simpleIOGenericIO
 - itemID: GGIO1SPXSAnInI\$mag\$1

Fonte: *WireShark*.

5.3.2 Teste de comunicação GOOSE

De modo semelhante ao teste da comunicação MMS, a troca de mensagens via GOOSE foi testada a partir de uma instância editora que enviou mensagens a um assinante. Os códigos foram retirados do diretório de exemplos da libIEC61850 e possuem os títulos *goose_publisher_example* e *goose_subscriber_example*. O teste também ocorreu em *loopback*. A Figura 53 mostra a inicialização do editor e a Figura 54 exibe uma das mensagens recebidas, onde o conteúdo enviado pelo editor está no campo *allData*, que consiste no mesmo campo onde se exibiam os sinais de sobrecorrente, *trip* e falha de disjuntor nos testes realizados em 5.2 e que foram visualizados no *WireShark*.

Figura 53 - Inicialização do programa GOOSE editor

```
Using interface lo
```

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 54 - Recebimento das mensagens GOOSE pelo programa assinante

```
Set interface id: lo
GOOSE event:
  stNum: 1 sqNum: 0
  timeToLive: 500
  timestamp: 1639404507.450
  message is valid
  allData: {1234,19840101000000.000Z,5678}
```

Fonte: elaborado pelo autor.

No *Wireshark* é possível verificar que o conteúdo das mensagens GOOSE capturadas na rede local é o mesmo recebido pelo programa assinante da Figura 54, como mostra o destaque em vermelho da Figura 55.

Figura 55 - Captura de uma mensagem GOOSE publicada pelo programa editor

| No. | Time | Source | Destination | Protocol |
|-----|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | 0.000000000 | 00:00:00_00:00:00 | Iec-Tc57_01:00:01 | GOOSE |
| 2 | 1.000303008 | 00:00:00_00:00:00 | Iec-Tc57_01:00:01 | GOOSE |
| 3 | 2.000483946 | 00:00:00_00:00:00 | Iec-Tc57_01:00:01 | GOOSE |
| 4 | 3.001025204 | 00:00:00_00:00:00 | Iec-Tc57_01:00:01 | 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)
  
```

0000 01 0c cd 01 00 01 00 00 00 00 00 00 00 81 00 80 00

wireshark_lo_20211213110824_20Q4Py.pcapng

Fonte: *Wireshark*.

5.3.3 Sobrecorrente instantânea

Obedecendo ao mesmo padrão de testes realizados apenas com os IEDs físicos, o teste de sobrecorrente instantânea para o IED virtual foi dividido em três cenários, sendo o de pré-falta, falta sem falha de disjuntor e falta com falha de disjuntor. Do mesmo modo, a validação dessa função foi relevante para que posteriormente fosse executada a função de seletividade lógica com o IED virtual.

É importante salientar que o IED virtual não realiza a leitura da corrente elétrica, pois por se tratar de uma virtualização das funcionalidades de comunicação padrão IEC61850 de um IED físico, ele não possui terminais ou quaisquer componentes físicos que possam ser conectados diretamente ao testador hexafásico. Desse modo, o valor da corrente é recebido via mensagem GOOSE originada de um IED físico da bancada.

5.3.3.1 Sobrecorrente instantânea - Cenário de pré-falta

A configuração do testador hexafásico obedeceu aos mesmos parâmetros do teste

realizado em 5.2.1.1 com o objetivo de submeter o IED virtual às mesmas condições de simulação aplicadas aos IEDs físicos. Como em uma simulação de pré-falta não há a emissão de nenhum dos sinais observados (sobrecorrente, *trip* e falha) a validação ocorreu através da análise do tráfego de rede analisado via *WireShark*, onde foi possível observar que o envio de mensagens GOOSE a partir do IED virtual é idêntico ao realizado pelo IED físico em 5.2.1.1, sendo o conteúdo das mensagens igual a *False* no campo *allData*, como mostra o destaque em vermelho da Figura 56. O destaque em roxo aponta a origem das mensagens GOOSE, que diferentemente do teste realizado com o IED físico, partem do *notebook* que estava executando o IED virtual.

Figura 56 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea em pré-falta com IED virtual

| No. | Time | Source | Destination | Protocol |
|-----|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | 0.000000000 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 2 | 0.000013872 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 3 | 1.000258285 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 4 | 1.000281140 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 5 | 1.519100846 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 6 | 1.519125755 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 7 | 1.999774503 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 8 | 1.999800553 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 9 | 1.999884822 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 10 | 1.999943755 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 11 | 2.999796555 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 12 | 2.999895398 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |


```

Length: 129
Reserved 1: 0x0000 (0)
Reserved 2: 0x0000 (0)
  goosePdu
    gocbRef: SEL_751_1CFG/LLN0$G0S$GOOSE_SL_1
    timeAllowedtoLive: 3000
    dataSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE EDITOR
    gid: SEL_751_1
    t: Dec 15, 2021 03:37:47.514999985 UTC
    stNum: 1
    sqNum: 0
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDataSetEntries: 3
    allData: 3 items
      Data: boolean (3)
        boolean: False
      Data: boolean (3)
        boolean: False
      Data: boolean (3)
        boolean: False
  
```

0000 01 0c cd 01 00 04 00 00 00 00 00 00 00 81 00 80 03
wireshark_lo_20211215003746_01dY00.pcapng

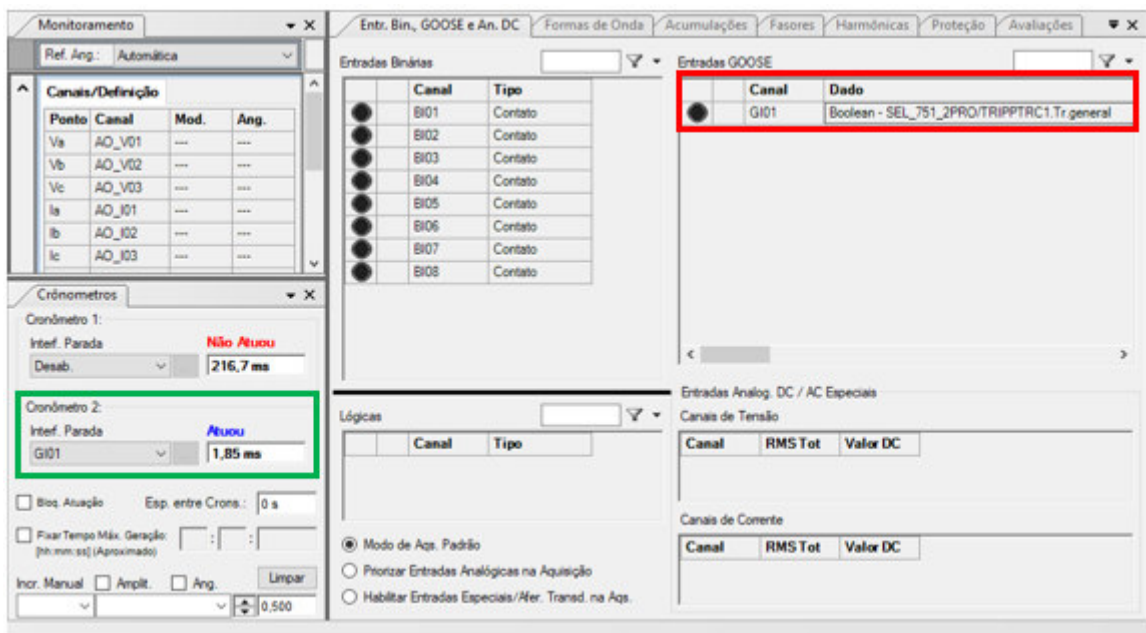
Fonte: *WireShark*.

5.3.3.2 Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta sem falha de disjuntor

Para o segundo cenário de simulação de sobrecorrente com o IED virtual, foi considerada novamente a incidência de uma falta trifásica, tal como aplicada no teste do IED

físico. A Figura 57 mostra a associação do sinal de *trip* do IED virtual ao canal de comunicação GOOSE GI01 do testador hexafásico, o qual foi utilizado como critério de parada da simulação. Reitera-se que por se tratar de uma virtualização das funções de comunicação de um IED físico, o IED virtual não realiza a leitura direta da corrente elétrica, e sim, recebe o valor dessa grandeza percebida pelo IED físico da bancada de testes via mensagens GOOSE.

Figura 57 - Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual para sobrecorrente instantânea sem falha de disjuntor



Fonte: CTC.

No *WireShark* acompanhou-se as mensagens enviadas pelo IED virtual durante a simulação da falta, e nesse caso as mensagens GOOSE passaram a conter os sinais de atuação da função de sobrecorrente instantânea e de *trip*, representados pelo valor *True* no destaque em vermelho da Figura 58. O campo que permaneceu em *False* corresponde ao sinal de falha de disjuntor. Observa-se que destacado em roxo está o *notebook* que executou o IED virtual como origem das mensagens GOOSE e em azul a identificação do *dataset* virtualizado.

Figura 58 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta utilizando o IED virtual

| No. | Time | Source | Destination | Protocol |
|-----|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 | 0.000000000 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 2 | 0.000013872 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 3 | 1.000258285 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 4 | 1.000281149 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 5 | 1.510100846 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:09 | GOOSE |
| 6 | 1.510125755 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 7 | 1.999774593 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 8 | 1.999800553 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 9 | 1.999810327 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 10 | 1.999943755 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 11 | 2.999790555 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 12 | 2.999805398 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |

```

Length: 128
Reserved 1: 0x0000 (0)
Reserved 2: 0x0000 (0)
  ↳ goosePdu
    gocbRef: SEL_751_1CFG/LLN0$G05$GOOSE_SL_1
    timeAllowedToLive: 12
    dataSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_EDITOR
    goID: SEL_751_1
    t: Dec 15, 2021 03:37:48.996999979 UTC
    stNum: 3
    sqNum: 0
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDataSetEntries: 3
    ↳ allData: 3 items
      ↳ Data: boolean (3)
        boolean: True
      ↳ Data: boolean (3)
        boolean: True
      ↳ Data: boolean (3)
        boolean: False
  
```

Fonte: *Wireshark*.

O IED virtual foi programado para exibir uma sequência de mensagens durante a tratativa da falta. Cada mensagem é exibida após a atuação de uma função. Desta forma, ao perceber a falta, o IED virtual exibe no terminal do *Linux* a mensagem “Corrente de curto-circuito”. Após o envio do sinal de sobrecorrente instantânea ele passa a exibir a mensagem “Proteção Instantânea (50)”. Ao enviar o sinal de *trip*, a mensagem “Sinal de trip enviado ao disjuntor” é exibida. Após a extinção da falta pelo testador hexafásico, o IED virtual mostra a mensagem “Falta Extinta (disjuntor aberto)”, tal como na Figura 59.

Figura 59 - Mensagens exibidas pelo IED virtual durante o teste de sobrecorrente sem falha de disjuntor

```

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: elaborado pelo autor.

5.3.3.3 Sobrecorrente instantânea - Cenário de falta com falha de disjuntor

Para o terceiro cenário de sobrecorrente instantânea com IED virtual foi simulada uma falha na abertura do disjuntor através da ausência de condição de parada da injeção de corrente de falta pelo testador hexafásico. Sendo assim, sem a extinção da falta após a emissão do sinal de *trip*, o IED virtual envia na rede o sinal de falha de disjuntor, conforme mostrado na porção destacada em vermelho na Figura 60. O destaque em roxo mostra o *notebook* que executou o IED virtual como fonte das mensagens GOOSE.

Figura 60 - Tráfego da rede local durante o teste de sobrecorrente instantânea com falta e falha de disjuntor utilizando IED virtual

| No. | Time | Source | Destination | Protocol |
|-----|----------|-------------------|-------------------|----------|
| 5 | 0.718568 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 6 | 0.721673 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 9 | 1.718100 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 10 | 1.721828 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 13 | 2.718338 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 14 | 2.722035 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 16 | 3.718731 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 17 | 3.722441 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 21 | 4.718708 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 22 | 4.722417 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 27 | 5.552052 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |
| 28 | 5.552233 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 29 | 5.553239 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 30 | 5.555603 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 32 | 5.555725 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:03 | GOOSE |
| 33 | 5.556937 | SamsungE_c5:83:34 | Iec-Tc57_01:00:05 | GOOSE |

```

Length: 128
Reserved 1: 0x0000 (0)
Reserved 2: 0x0000 (0)
  - goosePdu
    gocbRef: SEL_751_1CFG/LLN0$G0$GOOSE_SL_1
    timeAllowedtoLive: 12
    datSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_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
  
```

000 01 0c cd 01 00 04 00 00 00 00 00 00 81 00 80 03

wireshark_lo_20211215010116_wsONNK.pcapng

Fonte: *WireShark*.

No caso em que ocorre a falha de disjuntor, o IED virtual mostra a mensagem “Falta NÃO Extinta (Falha de Disjuntor)”, tal como na Figura 61.

Figura 61 - Mensagens exibidas pelo IED virtual durante o teste de sobrecorrente com falha de disjuntor

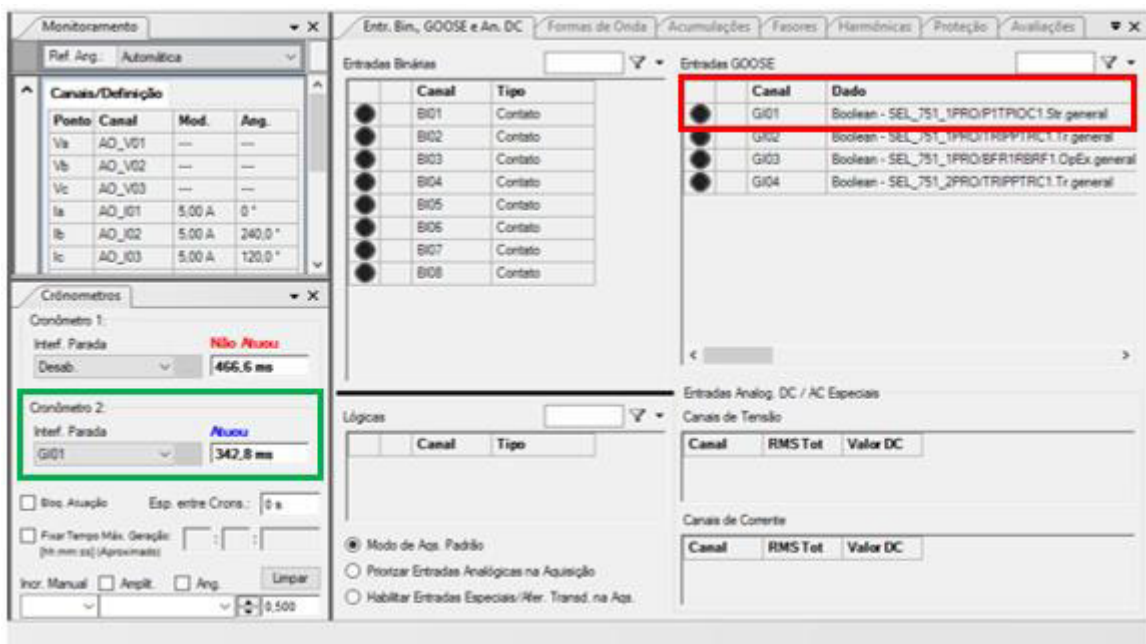
```
le_goose enp1s0f1
Using GOOSE interface: enp1s0f1
Corrente de curto circuito
Proteção Instantânea (50)
Sinal de trip enviado ao disjuntor
Falta NÃO Extinta(Falha de Disjuntor)
```

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.4 Seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual editor

Os testes de seletividade lógica sem falha de disjuntor foram realizados em duas versões, sendo uma a partir do IED virtual editor, e outra a partir do IED virtual assinante, de modo a consolidar a aplicabilidade da virtualização nas duas funções. No entanto, em ambos os casos, os testes ocorreram entre um IED virtual e um IED físico pela razão de averiguar a interação físico-virtual dos IEDs e pela necessidade de um dispositivo que fizesse a leitura da corrente elétrica. No testador hexafásico selecionou-se o sinal de *trip* do IED editor, nesse caso, o SEL_751_1 como critério de parada do teste, simulando a extinção da falta pela abertura do disjuntor 21L3, como mostram os destaques em vermelho e verde da Figura 62. Do ponto de vista do IED virtual editor, o teste de seletividade lógica sem falha ocorreu de igual maneira a um teste de sobrecorrente sem falha.

Figura 62 - Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual editor



Fonte: CTC.

No *WireShark* observou-se o envio dos sinais de sobrecorrente e de *trip* a partir do

IED virtual editor, conforme mostrado no destaque em vermelho da Figura 63. Destacado em roxo está o *notebook* que executou o IED virtual como origem das mensagens GOOSE enviadas na rede. Como o IED virtual editor extinguiu a falta, não houve atuação do IED físico assinante.

Figura 63 - Tráfego da rede local durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual editor

| No. | Time | Source | Destination | Protocol |
|-----|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 4 | 0.356880448 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 9 | 1.356978531 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 21 | 2.356197984 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 36 | 3.356784619 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 52 | 4.356992384 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 54 | 4.467951619 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 55 | 4.468005489 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 56 | 4.475560815 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |
| 58 | 4.478862617 | Compalln_64:00:0b | Iec-Tc57_01:00:04 | GOOSE |

```

goosePdu
  gocbRef: SEL_751_1CFG/LLN0$G0$GOOSE_SL_1
  timeAllowedtoLive: 12
  datSet: SEL_751_1CFG/LLN0$GOOSE_EDITOR
  goID: SEL_751_1
  t: Nov 30, 2021 18:10:59.727999985 UTC
  stNum: 19
  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: False
  
```

0000 01 0c cd 01 00 04 00 97 98 64 00 0b 81 00 80 03 d....

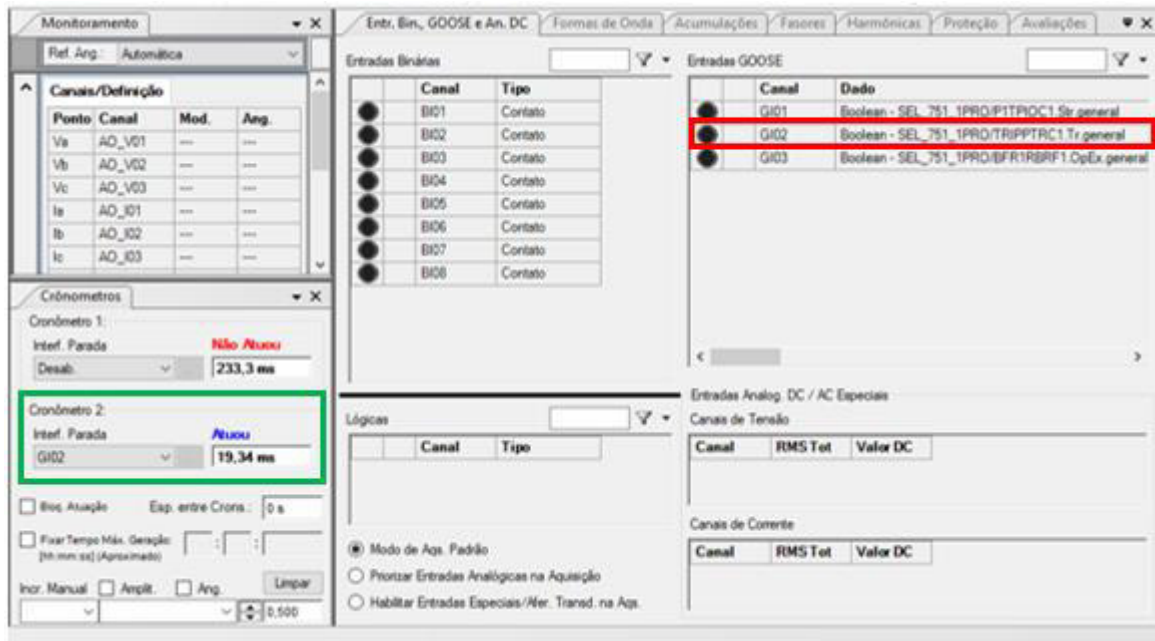
wireshark_enp1s0f1_20211130151055_jKOlqY.pcapng

Fonte: *WireShark*.

5.3.5 Seletividade lógica sem falha de disjuntor com IED virtual assinante

Do ponto de vista do IED virtual assinante, a simulação no testador hexafásico ocorreu de forma idêntica ao do item 5.3.4, onde o *trip* do IED editor, que desta vez é o físico SEL_751_1, foi o critério de parada da injeção de corrente de falta, como mostram os destaques em vermelho e verde da Figura 64. O IED virtual assinante só poderia atuar mediante recebimento do sinal de falha de disjuntor do editor.

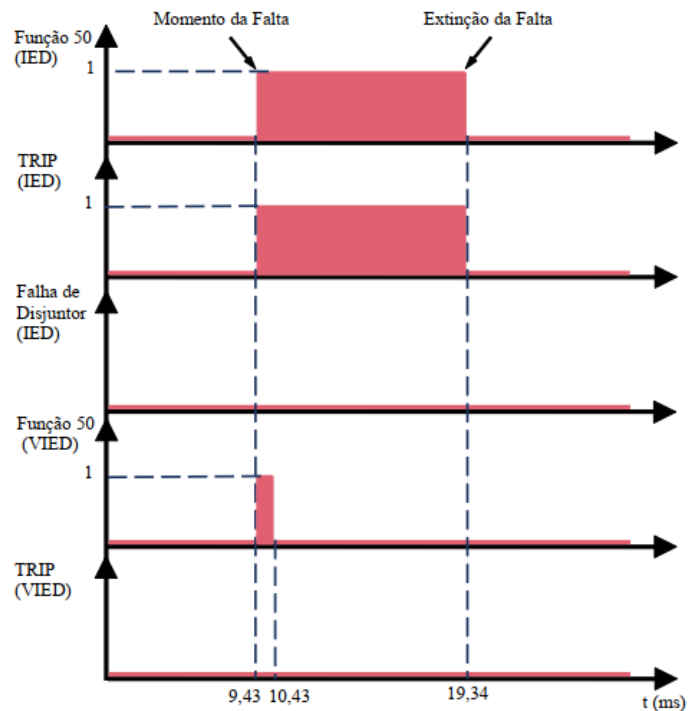
Figura 64 - Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED físico editor



Fonte: CTC.

O Gráfico 3 ilustra a atuação do IED virtual assinante (VIED) em meio ao cenário de seletividade lógica sem falha de disjuntor no qual ele percebe a corrente de falta, mas devido ao recebimento do sinal de *trip* do IED físico editor (IED), sua atuação entra em bloqueio. Para a simulação dos cenários de seletividade lógica considerando o IED virtual assinante, foram adicionados atrasos nos tempos de atuação dos sinais de sobrecorrente instantânea, *trip* e falha de disjuntor, devido ao tempo de processamento do *notebook* responsável por sua execução. Os valores dos atrasos atribuídos são de natureza experimental e podem ser verificados no Apêndice A.

Gráfico 3 - Representação dos sinais enviados pelos IEDs físico e virtual durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor



Fonte: Freitas (2022, com adaptações).

Para o teste realizado o código do IED virtual assinante foi programado para imprimir no terminal do *Linux* a mensagem de “NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA” enquanto não recebesse o sinal de falha de disjuntor do IED editor, como mostra a Figura 65.

Figura 65 - Mensagem exibida pelo IED virtual assinante durante o teste de seletividade lógica sem falha de disjuntor

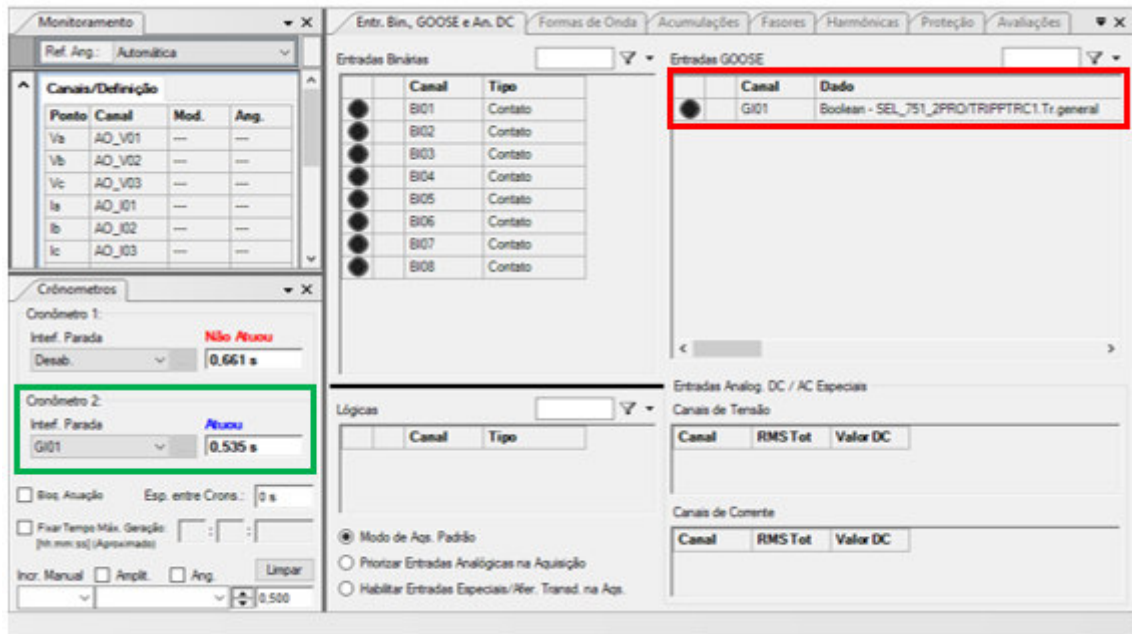
```
Using GOOSE interface: enp2s0
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
```

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.6 Seletividade lógica com falha de disjuntor com IED virtual assinante

O cenário de seletividade lógica com falha de disjuntor foi simulado a partir do IED virtual assinante, no qual o seu sinal de *trip* para o disjuntor 11T2 foi o critério de parada da injeção de corrente de falta, como mostram os destaques em vermelho e verde da Figura 66.

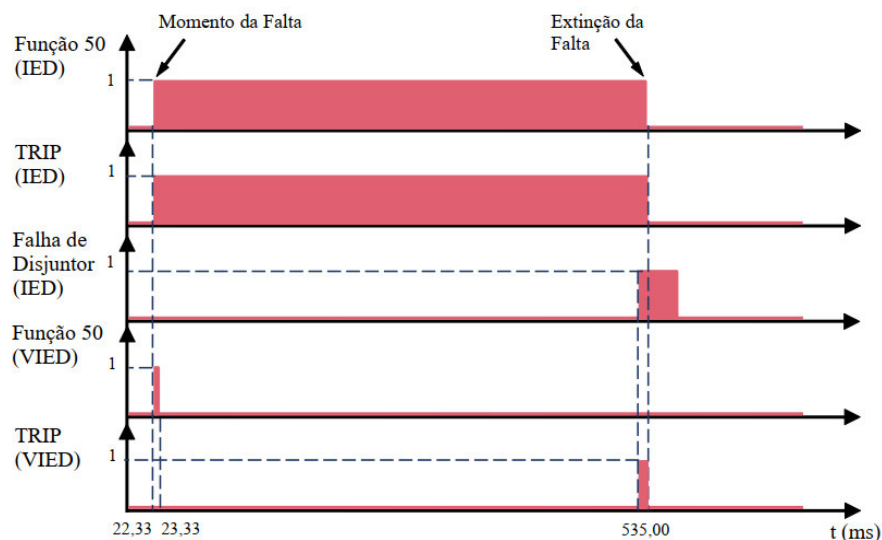
Figura 66 - Critério de parada da simulação e tempo de atuação do IED virtual assinante



Fonte: CTC.

O Gráfico 4 ilustra a operação do IED virtual assinante em relação aos sinais recebidos do IED físico editor durante a execução do teste de seletividade lógica. Observa-se que o comportamento expresso nesse gráfico é idêntico ao Gráfico 2 gerado na validação do IED físico realizada em 5.2.3, onde após o tempo pré-configurado de 535 ms sem a extinção da falta, o IED editor envia na rede o sinal de falha de disjuntor, permitindo então a atuação do *trip* do IED virtual assinante.

Gráfico 4 - Representação dos sinais enviados pelos IEDs físico e virtual durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor



Fonte: Freitas (2022, com adaptações).

No terminal do *Linux*, enquanto o IED virtual assinante recebia o sinal de *trip* do IED editor, a mensagem “NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA” era exibida, mas a partir do instante em que foi percebido o sinal de falha de disjuntor, exibiu-se a mensagem “FALHA DE DISJUNTOR”. Ao enviar seu *trip* o IED virtual passou a exibir a mensagem “SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR”. Após a extinção da falta a mensagem “DISJUNTOR ABERTO” foi mostrada. Toda a sequência de mensagens pode ser visualizada na Figura 67.

Figura 67 - Mensagens exibidas pelo IED virtual assinante durante o teste de seletividade lógica com falha de disjuntor

```

root@alicefreitas-340XAA-350XAA-550XAA:~/home/alicefreitas/Documentos/11blec61850-1.5/examples/Diss_Seletividade_Assinante# ./server_example_goose enp2
s0
Using GOOSE interface: enp2s0
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO
FALHA DE DISJUNTOR
SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR
DISJUNTOR ABERTO

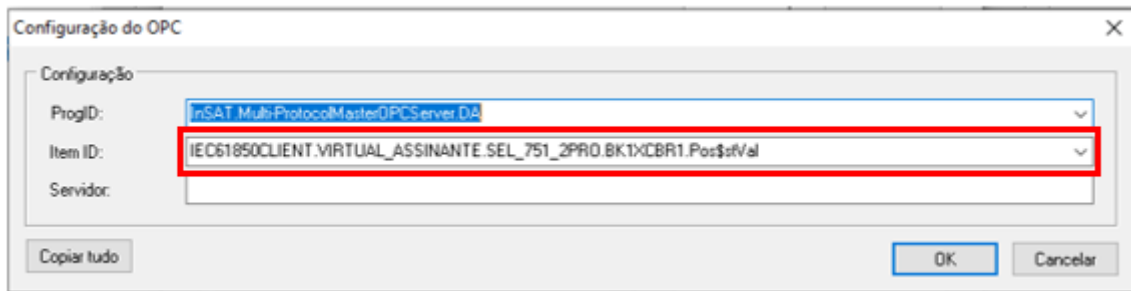
```

Fonte: elaborado pelo autor.

5.4 Integração do IED virtual ao SCADA LAquis

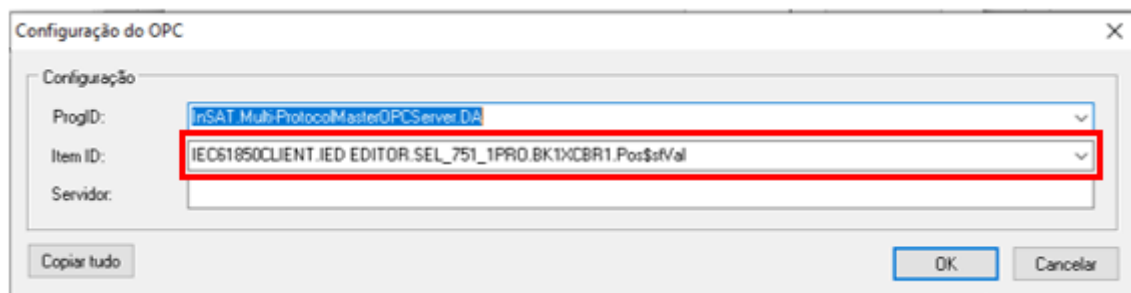
Após a validação da aplicabilidade do IED virtual nas funções de proteção de sobrecorrente instantânea, seletividade lógica e falha de disjuntor, foram realizados testes inserindo-se o supervisório construído no SCADA LAquis para consolidar a plataforma ensino de proteção. Os testes realizados consistiram em seletividade lógica sem falha de disjuntor e seletividade lógica com falha de disjuntor. Para tanto, manteve-se o arranjo estabelecido nos testes de validação realizados em 5.3.5, com o IED físico editor comandando o disjuntor 21L3 e o IED virtual assinante comandando o disjuntor 11T2. As Figuras 68 e 69 mostram o caminho de associação entre o dado PRO/BK1XCBR1.Pos\$stVal e os disjuntores criados no supervisório. Esse dado corresponde ao estado do disjuntor detectado pelo IED físico.

Figura 68 - Associação da *tag* de estado do disjuntor ao disjuntor 11T2 no SCADA LAquis



Fonte: SCADA LAquis.

Figura 69 - Associação da *tag* de estado do disjuntor ao disjuntor 21L3 no SCADA LAquis



Fonte: SCADA LAquis.

O disjuntor foi simulado através do testador hexafásico utilizando suas saídas binárias, as quais foram conectadas diretamente aos terminais do IED físico, funcionando do seguinte modo: quando um IED envia seu sinal de *trip* na rede local o testador hexafásico abre os contatos da saída binária utilizada simulando então a abertura do disjuntor. A falha na abertura é simulada ao deixar que os contatos permaneçam fechados após o recebimento do sinal de *trip*. A Tabela 4 mostra os valores que o dado PRO/BK1XCBR1.Pos\$stVal pode assumir e o significado de cada um.

Tabela 4 - Lista de valores de PRO/BK1XCBR1.Pos\$stVal

| Valor IEC61850 | Valor binário | Função |
|----------------|---------------|--------------------------------|
| 1 | 01 | Fechado |
| 2 | 10 | Aberto |
| 3 | 11 | Mau funcionamento/Sem resposta |

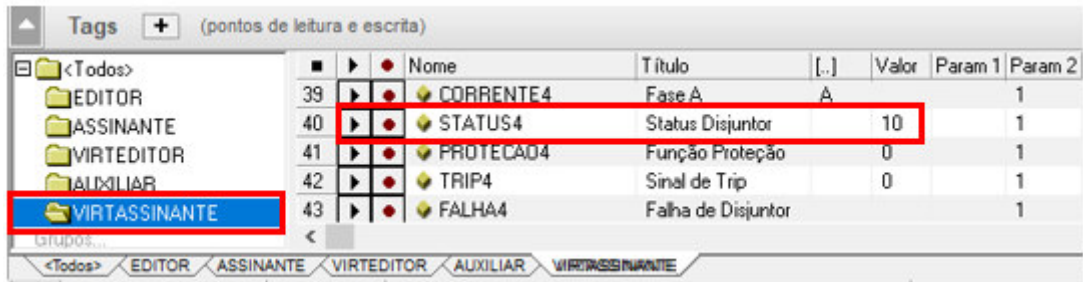
Fonte: ZILLGITH (2022).

5.4.1 Pré-falta

No cenário de pré-falta os disjuntores 21L3 e 11T2 devem permanecer fechados devido às condições normais de operação do sistema elétrico simulado. A Figura 70 mostra a leitura do estado do disjuntor comandado pelo IED virtual. Na coluna Valor é possível

observar que ele assumiu o valor 10 referente ao estado Aberto, quando deveria ter assumido o valor 01 para Fechado. Esse fato ocorreu devido a um erro de inversão da sequência de envio/recebimento dos bits a partir do OPC que resultou no espelhamento desse valor. Para corrigi-lo realizou-se apenas o ajuste na lógica de mudança de cores do disjuntor associado a *tag* de estado.

Figura 70 - Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em pré-falta

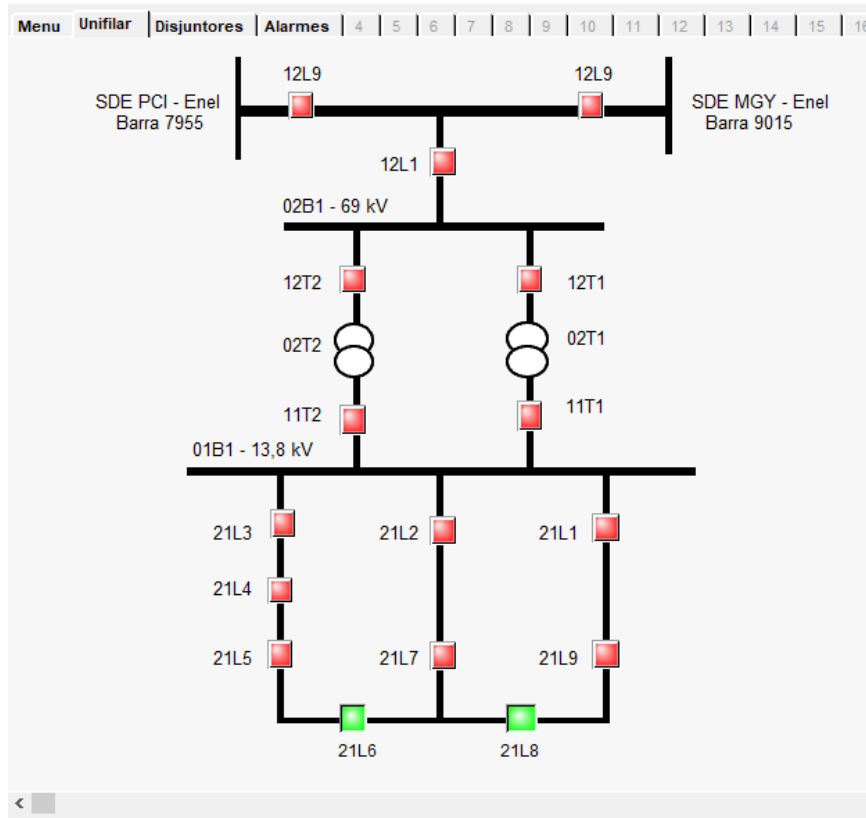


| Nome | Título | Valor | Param 1 | Param 2 |
|-----------|--------------------|-------|---------|---------|
| CORRENTE4 | Fase A | A | 1 | |
| STATUS4 | Status Disjuntor | 10 | 1 | |
| PROTECAO4 | Função Proteção | 0 | 1 | |
| TRIP4 | Sinal de Trip | 0 | 1 | |
| FALHA4 | Falha de Disjuntor | | 1 | |

Fonte: SCADA LAquis.

A Figura 71 mostra a representação do diagrama unifilar geral da rede do Campus do Pici no SCADA LAquis durante a simulação de pré-falta.

Figura 71 - Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de pré-falta

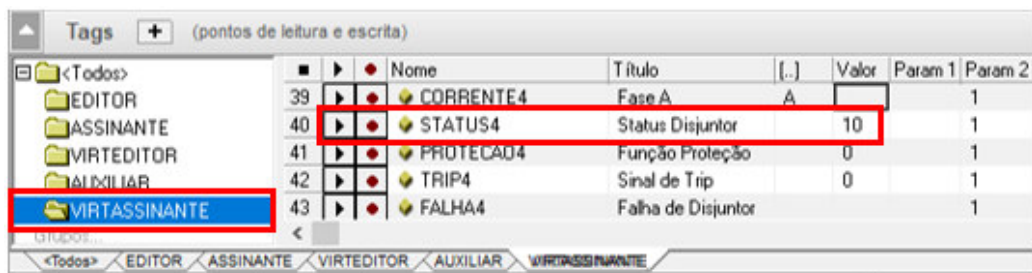


Fonte: SCADA LAquis.

5.4.2 Seletividade lógica sem falha de disjuntor

Para a simulação de falta na linha Tc em que não ocorre a falha na abertura do disjuntor 21L3 comandado pelo IED físico editor, o disjuntor 11T2 comandado pelo IED virtual assinante deve permanecer com seus contatos fechados. A Figura 72 mostra a leitura do estado de 11T2, reiterando que o valor está espelhado quando a representação correta deveria ser 01.

Figura 72 - Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica sem falha de disjuntor

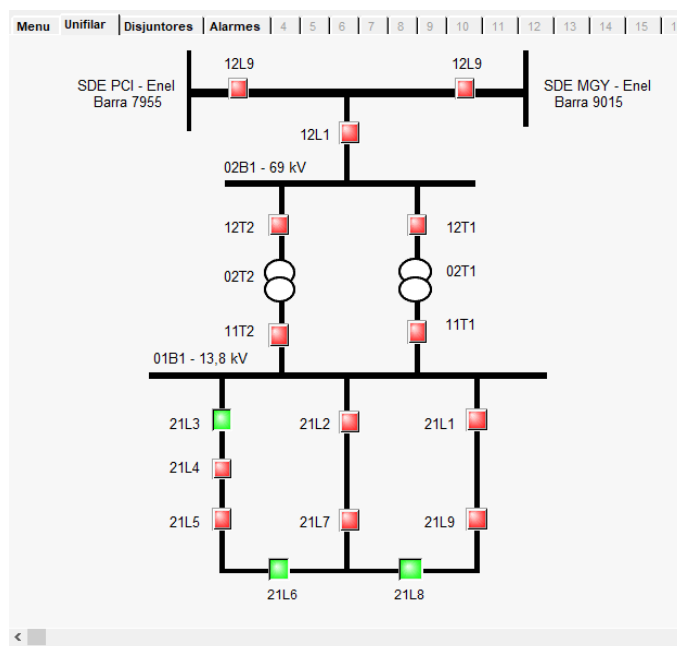


| | Nome | Título | [.] | Valor | Param 1 | Param 2 |
|----|-----------|--------------------|-----|-------|---------|---------|
| 39 | CORRENTE4 | Fase A | A | | 1 | |
| 40 | STATUS4 | Status Disjuntor | | 10 | 1 | |
| 41 | PROTECAO4 | Função Proteção | | 0 | 1 | |
| 42 | TRIP4 | Sinal de Trip | | 0 | 1 | |
| 43 | FALHA4 | Falha de Disjuntor | | | 1 | |

Fonte: SCADA LAquis.

A Figura 73 mostra a representação do diagrama unifilar geral do Campus do Pici no SCADA LAquis durante a simulação de seletividade lógica sem falha de disjuntor, onde o disjuntor 21L3 teve seu contato aberto após o envio do *trip* pelo IED físico SEL_751_1.

Figura 73 - Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de seletividade lógica sem falha de disjuntor



Fonte: SCADA LAquis.

5.4.3 Seletividade lógica com falha de disjuntor

No último teste realizado, após a falha na abertura do disjuntor 21L3 comandado pelo IED físico, o IED virtual assinante deve enviar seu trip para o disjuntor 11T2. A Figura 74 mostra a mudança no valor de estado do disjuntor para 01, que nesse caso foi corrigido por meio da lógica de sinalização das cores do disjuntor.

Figura 74 - Leitura do estado do disjuntor 11T2 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica com falha de disjuntor

| Nome | Título | Valor | Param 1 | Param 2 |
|--------------|--------------------|-------|---------|---------|
| 39 CORRENTE4 | Fase A | A | 1 | |
| 40 STATUS4 | Status Disjuntor | 01 | 1 | |
| 41 PROTECAU4 | Função Proteção | 0 | 1 | |
| 42 TRIP4 | Sinal de Trip | 0 | 1 | |
| 43 FALHA4 | Falha de Disjuntor | | 1 | |

Fonte: SCADA LAquis.

A Figura 75 mostra a leitura do estado do disjuntor comandado pelo IED físico editor.

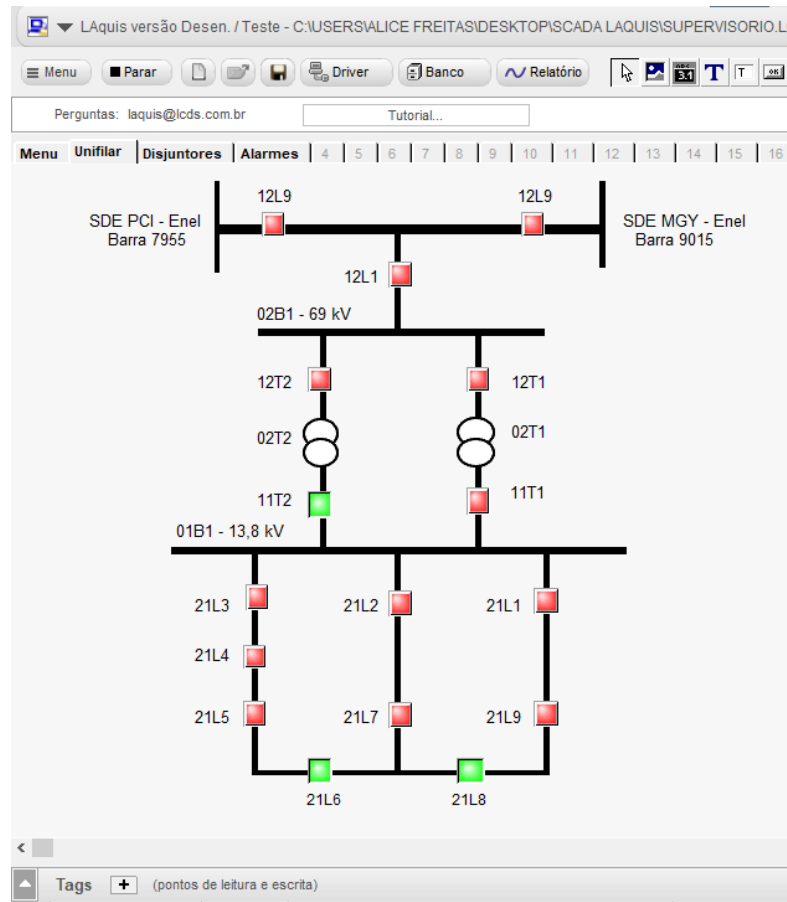
Figura 75 - Leitura do estado do disjuntor 21L3 pelo SCADA LAquis em seletividade lógica com falha de disjuntor

| Nome | Título | Valor | Param 1 | Param 2 |
|-------------|--------------------|-------|---------|---------|
| 2 CORRENTE1 | Fase A | A | 1 | |
| 3 STATUS1 | Status Disjuntor | 10 | 1 | |
| 4 PROTECA01 | Função Proteção | 0 | 1 | |
| 5 TRIP1 | Sinal de Trip | 0 | 1 | |
| 6 FALHA1 | Falha de Disjuntor | 0 | 1 | |

Fonte: SCADA LAquis.

A Figura 76 mostra a representação do diagrama unifilar geral do Campus do Pici no SCADA LAquis durante a simulação de seletividade lógica com falha de disjuntor, onde o disjuntor 21L3 não abriu seus contatos após o envio do *trip* pelo IED físico SEL_751_1. Dessa forma, o IED virtual teve de comandar a abertura do disjuntor 11T2.

Figura 76 - Diagrama unifilar no SCADA LAquis em cenário de seletividade lógica com falha de disjuntor



Fonte: SCADA LAquis.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas as etapas de desenvolvimento de uma plataforma de ensino de proteção de sistemas elétricos de potência, constituída por IEDs físicos e virtuais e um sistema supervisorio. As ferramentas de implementação utilizadas foram: libIEC61850, OPC *Multi-Protocol MasterOPC Server* e SCADA LAquis, todas de uso livre.

O IED virtual desenvolvido para este trabalho foi programado para comunicar-se a partir dos protocolos GOOSE E MMS. Através da comunicação horizontal implementada via GOOSE, o IED virtual pode trocar mensagens com os IEDs físicos da plataforma, possibilitando a execução de esquemas de seletividade lógica sem e com falha de disjuntor. Foram desenvolvidos dois códigos, os quais são correspondentes às funções de editor e assinante, em conformidade com a descrição fornecida no Capítulo 4, onde a modelagem estática de dados restringe a aplicação do IED virtual à configuração predeterminada no IED físico de onde se extraiu o arquivo CID. Os resultados obtidos a partir dos testes realizados com o IED virtual foram satisfatórios e apresentaram coerência com os testes realizados apenas com IEDs físicos.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado a partir da implementação da comunicação dos IEDs da plataforma (físicos e virtuais) com o supervisorio adotado. Foram apresentados os procedimentos de configuração do Servidor OPC que realizou a leitura dos dados dos IEDs, e os procedimentos de conexão do Cliente OPC com o SCADA LAquis. O *software* supervisorio demonstrou bom desempenho na interação com o OPC e em sua própria execução, não apresentando atrasos na visualização dos dados obtidos. Além disso, o SCADA LAquis mostrou-se um *software* de fácil usabilidade desde a sua instalação até o manuseio das ferramentas de construção das telas de supervisão, tornando-se recomendável para um primeiro contato dos alunos com a concepção e construção desse tipo de sistema.

Diante do exposto, a disponibilidade de uma plataforma de ensino aberta representa uma grande adição às ferramentas didáticas aplicáveis aos graduandos, com o objetivo de melhorar a experiência de aprendizado e engajá-los para assuntos relacionados com a proteção de sistemas elétricos de potência.

6.2 Trabalhos futuros

Propõe-se como trabalhos futuros:

- Reduzir os atrasos na execução do IED virtual;
- Desenvolver a virtualização do IED a partir da modelagem de dados dinâmica;
- Utilizar mais de um IED virtual comunicando-se com o SCADA e validar testes como o de seletividade lógica entre eles;
- Implementar novas funções de proteção no IED virtual (exemplo: 59, 87) e suas respectivas telas de supervisão no SCADA LAquis;
- Explorar aplicações do SCADA LAquis a partir de outros protocolos (exemplo: *Modbus IP*).

REFERÊNCIAS

- ACERVO LIMA. **Formulário Completo do Modelo OSI em Redes de Computadores**. Disponível em: <<https://acervolima.com/formulario-completo-do-modelo-osi-em-redes-de-computadores/>>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- ANLIX. **Topologia de rede: o que é, tipos e qual é melhor**. Disponível em: <<https://anlix.io/topologia-de-rede-o-que-e-tipos-e-qual-e-melhor/>>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- ANSARI, S. et al. **Towards Virtualization of Operational Technology to Enable Large-Scale System Testing**. IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, 2019.
- ARAÚJO, M. L. P. **Proposta de Proteção de Sobrecorrente no Âmbito Industrial através de Comunicação de IEDs baseados na Norma IEC 61850**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- BRAHMA, S. et al. **The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 2, p. 538–544, abr. 2009.
- CARNEIRO, J. A. B. **Proposta de Metodologia de Aprendizagem baseada em Projeto para Aplicação na Disciplina de Supervisão E Controle de Sistemas Elétricos de Potência**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2021.
- CELINO, R. A. **Aplicação da Norma IEC 61400-25 na Automação e Controle de Parques Eólicos no Brasil**. SÃO CRISTÓVÃO: Universidade Federal de Sergipe, 2014.
- DA SILVA, L. R. A. **Metodologia para Aquisição e Implantação de Sistema Digital de Automação com a Utilização da Norma IEC 61850 - Estudo de Caso: Subestação Parambu (69 - 13,8 kV)**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.
- DAS, R. et al., **Distribution Automation Strategies: Evolution of Technologies and the Business Case**. in Proc. IEEE Trans. Smart Grid, DOI:10.1109/TSG.2014.2368393, pp. 2166-2175, July 2015.
- DAS, R. et al. Working Group on Centralized Substation Protection and Control, IEEE Power System Relaying Committee, **Advancements in Centralized Protection and Control Within a Substation**. IEEE Transactions on Power Delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2528958, pp. 1945-1952, Vol 31, No. 4, Aug 2016.
- DAYABHAI, M. S.; DIAMANDIS, P. **The role of virtualization in a smart-grid enabled substation automation system**. 2015.
- DE SOUZA, E. H. N. **Automação de Subestações com Protocolo IEC-61850: Estudo de Caso**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- DOS SANTOS, L. A. **Integração de um Sistema de Recomposição Automático via OPC para Automação da Rede Elétrica de Distribuição em Média Tensão do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2015.

GIROUX, T. D. S. **Automação de Subestações utilizando a Norma IEC 61850 - Estudo de Caso da Subestação do Campus do Pici (69-13,8 kV)**. Universidade Federal do Ceará, p.100, 2012.

FERREIRA, R. D. F.; OLIVEIRA, R. S. D. **Cloud IEC 61850**, 2018.

FONSECA, M. O. **Comunicação OPC - Uma abordagem prática**. Vitória: 2002.

FREITAS, C. D. et al. **Plataforma para Ensino de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência com IEDs Reais e Virtuais Baseados na Norma IEC 61850**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2022. No prelo.

FUNDAÇÃO OPC. **OPC Foundation**. Disponível em: < <https://opcfoundation.org/>>. Acesso em: 20 mai. 2022

IEC/TR 61850-1. **IEC 61850-1: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation, Part 1: Introduction and overview. International Electrotechnical Commission**, 2013. Disponível em: < <https://webstore.iec.ch/publication/6007>>

IEC/TR 61850-1. **IEC 61850-1: Communication Networks and Systems in Substations, Part 1: Introduction and overview. International Electrotechnical Commission**, 2003. Disponível em: <<http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/033549!opendocument>>

IEC/TR 61850-6. **IEC 61850-6: Communication Networks and Systems in Substations, Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs**, 2003. Disponível em: <<http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/033549!opendocument>>

IEC/TR 61850-7-1. **IEC 61850-7-1: Communication Networks and Systems in Substations, Part: 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment - Principles and Models. International Electrotechnical Commission**, 2003. Disponível em: <<http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/033549!opendocument>>

IEC/TR 61850-8-1. **IEC 61850-8-1: Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. International Electrotechnical Commission**, 2013. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/6021>>

IEC/TR 61850-90-8. **IEC 61850-90-8: Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-8: Object model for E-mobility**, 2016. Disponível em: < <https://webstore.iec.ch/publication/24475>>

IEC/TR 61850-90-9. **IEC 61850-90-9: Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-9: Use of IEC 61850 for Electrical Energy Storage Systems**, 2020. Disponível em: < <https://webstore.iec.ch/publication/29365>>

INSAT. **IEC 61850 OPC Server**. Disponível em: <https://opc-server.com/catalog/multi-protocol/iec_61850_opc_server/>. Acesso em: 04 mai. 2022.

JARDINI, J. A. **Sistemas Elétricos de Potência: Automação**. São Paulo: 1997.

KARIYAWASAM, S.; WICKREMASURIYA, A.; RAJAPAKSE, A. **Teaching IEC 61850 Based Substation Automation Through Hands-on Experiences**. IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2017.

LABONNE, A. et al. **Teaching Digital Control of Substation and IEC 61850 With a Test Bench Validation**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 36, n. 2, p. 1175–1182, mar. 2021.

LEITE, M. F. A. **Interoperabilidade com Base na Norma IEC 61850: Revisão Sistemática e Estudo de Caso**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2021.

LOPES, Y.; FRAZ, R. H.; MOLANO, D. A. **Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico**. XXX SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBrT'12, n. October, p. 45, 2012.

MAGALHÃES, L. F. **Plataforma de Testes e Virtualização de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes baseados na Norma IEC 61850**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019.

MAMEDE, D. R.; MAMEDE FILHO, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 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**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2015.

MENDES, M. F. **Proposta de Metodologia e de Modelo para Modernizações de Sistemas de Automação de Unidades Geradores Hidráulicas de Grande Porte**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

PICOLO, H. E. F. **Aplicação da Norma IEC 61850 na Proteção, Especificação dos Equipamentos, Supervisão e Controle de Subestações**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

RIDWAN, M. I.; LIN, N. T. M.; AGELIDIS, V. **Design and Simulation of Multi-Function Virtual Grid Edge Intelligent Electronic Device with Standardized Semantics Based on IEC 61850 Standard**. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 - 8958, Volume-9, Issue-1, October 2019.

RUSH, P. **Proteção e automação de redes: conceito e aplicação**. 2011.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de Diagnósticos de Falhas para Subestações Baseado em Redes de Preti Coloridas**. Dissertação - Fortaleza: Universidade Federal do Ceará - UFC, 2002.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de Automação Distribuído: Uma Abordagem baseada em Multiagente Aplicada a Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão**. Tese - Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2017.

SAMPAIO, R. F. **Prática Laboratório de Proteção X - Cálculo e Simulação de Sobrecorrente**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.

SCADA LAQUIS. **Supervisório - LAquis**. Disponível em:

<<https://www.lcds.com.br/laquis.asp>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

SHAHNIA, F.; MOGHBEL, M.; HOSSEINIAN YENGEJEH, H. **Improving the Learning Experience of Power System Protection Students using Computer-based Simulations and Practical Experiments**. 2014.

SHAHNIA, F.; MOGHBEL, M.; YENGEJEH, H. H. **Motivating Power System Protection Course Students by Practical and Computer-Based Activities**. IEEE Transactions on Education, v. 59, n. 2, p. 81–90, 1 maio 2016.

THOMAS, M. S.; KOTHARI, D. P.; PRAKASH, A. **Design, Development, and Commissioning of a Substation Automation Laboratory to Enhance Learning**. IEEE Transactions on Education, v. 54, n. 2, p. 286–293, maio 2011.

WÓJTOWICZ, R.; KOWALIK, R.; RASOLOMAMPIONONA, D. D., **Next Generation of Power System Protection Automation - Virtualization of Protection Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2786339, pp. 2002-2010, Vol 33, No. 4, Aug 2018.

ZILLGITH, M. **libIEC61850**. Disponível em: <<https://libiec61850.com/>>. Acesso em: 06 mai. 2022.

APÊNDICE A - PARAMETRIZAÇÃO DOS IEDS

A Tabela 5 mostra a OAP utilizada como base para a parametrização da função de sobrecorrente instantânea. As instruções de configuração são baseadas em (SAMPAIO, 2018).

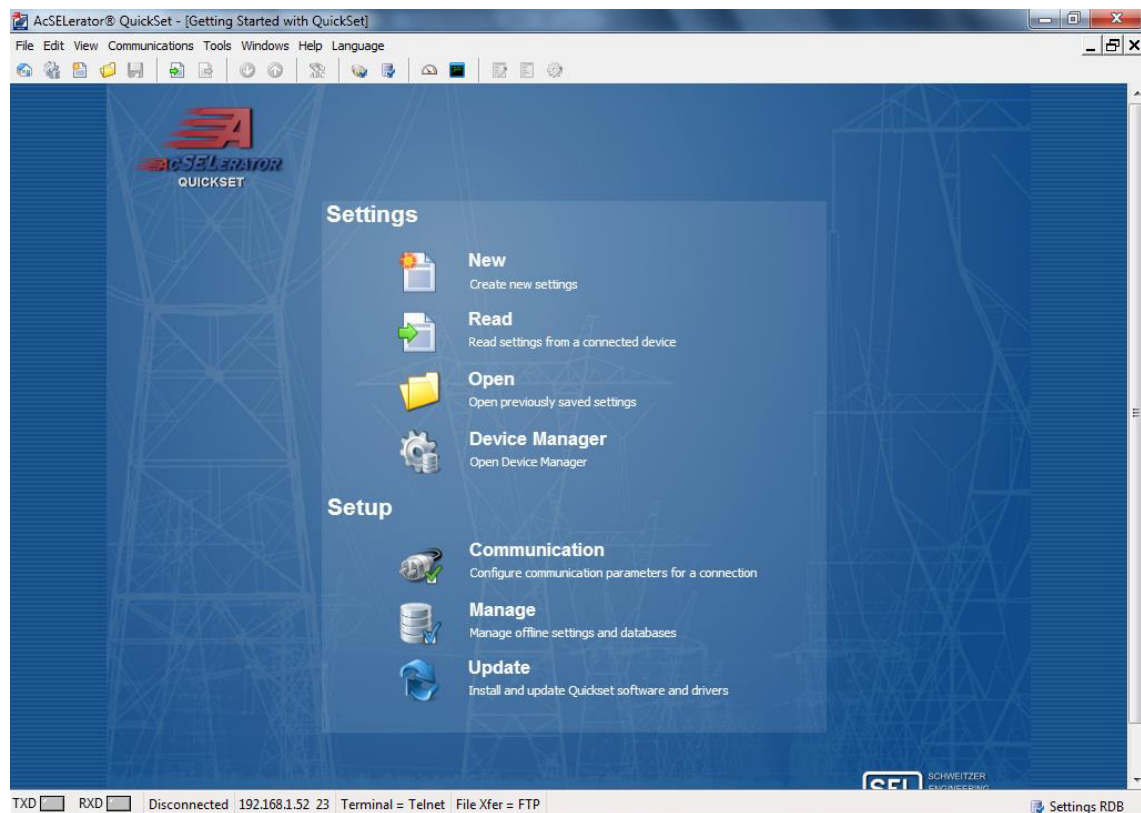
Tabela 5 - Ordem de Ajuste da Proteção

| Equipamento | TC | Função | Corrente de Pick-up | Dial | Tempo de operação | Curva |
|-------------|---------|--------|---------------------|------|-------------------|-------|
| 11T1 | 400-5 A | 51 | 314 A | 0,25 | - | MI |
| | | 50 | 1570 A | - | 0,1 s | - |
| 21I1 | 400-5 A | 51 | 230 A | 0,12 | - | MI |
| | | 50 | 1150 A | - | 0,1 s | - |
| RS1 | 400-5 A | 51 | 170 A | 0,06 | - | MI |
| | | 50 | 850 A | - | - | - |

Fonte: SAMPAIO (2018).

A parametrização dos IEDs é realizada por meio do *software ACSELERATOR QuickSet*, a Figura 77 mostra a sua tela inicial.

Figura 77 - Tela principal do *software ACSELERATOR QuickSet*

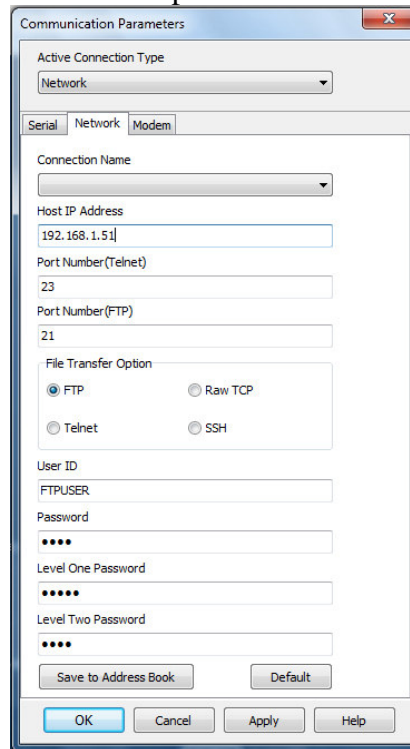


Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

Deve-se clicar no menu *Communication* e em seguida selecionar o item *Parâmetros* para abrir a janela mostrada Figura 78 para configurar conexão TCP/IP com os seguintes parâmetros: inserir o IP do relé, configurar a porta Telnet como 23 e a porta FTP como 21, marcar a opção de transferência de arquivo como FTP, preencher o “ID de Usuário”

com “FTPUSER” e a senha com “TAIL”, clicar em Aplicar e verificar se o status “conectado” é mostrado no canto inferior da tela inicial. Se estiver conectado clicar no botao OK para voltar a tela inicial.

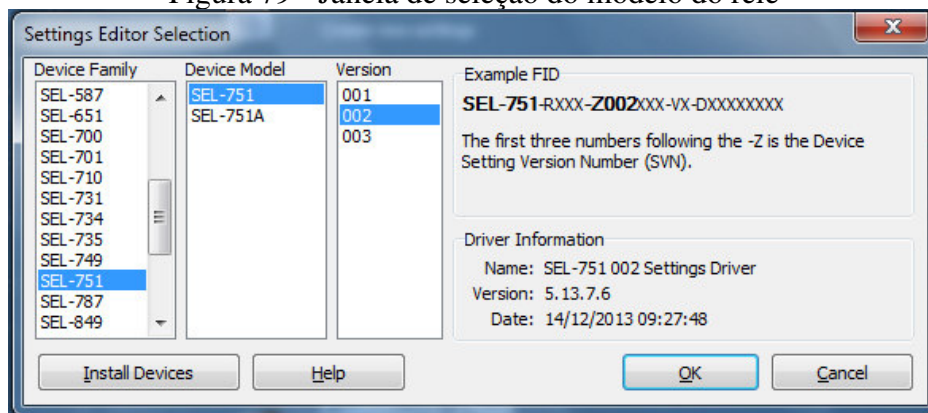
Figura 78 - Janela de parâmetros de Comunicação



Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

Na tela principal mostrada na Figura 77, deve-se clicar em “New (create new settings)”, onde é mostrada a tela de escolha do modelo do relé, o qual deve ser selecionado SEL-751 e Versão 002, tal como mostrado na Figura 79, clique em OK em seguida.

Figura 79 - Janela de seleção do modelo do relé



Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

A seguir, deve-se inserir o *Part Number* do relé SEL 751. Na janela específica para esta configuração, seleciona-se o botão *Edit* para inserir o código: **751401G3G1G70810830**, tal como mostrado na Figura 80.

Figura 80 - Janela de configuração do *Part Number* do relé escolhido

Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

A Figura 81 mostra a configuração preenchida para a proteção de sobrecorrente instantânea.

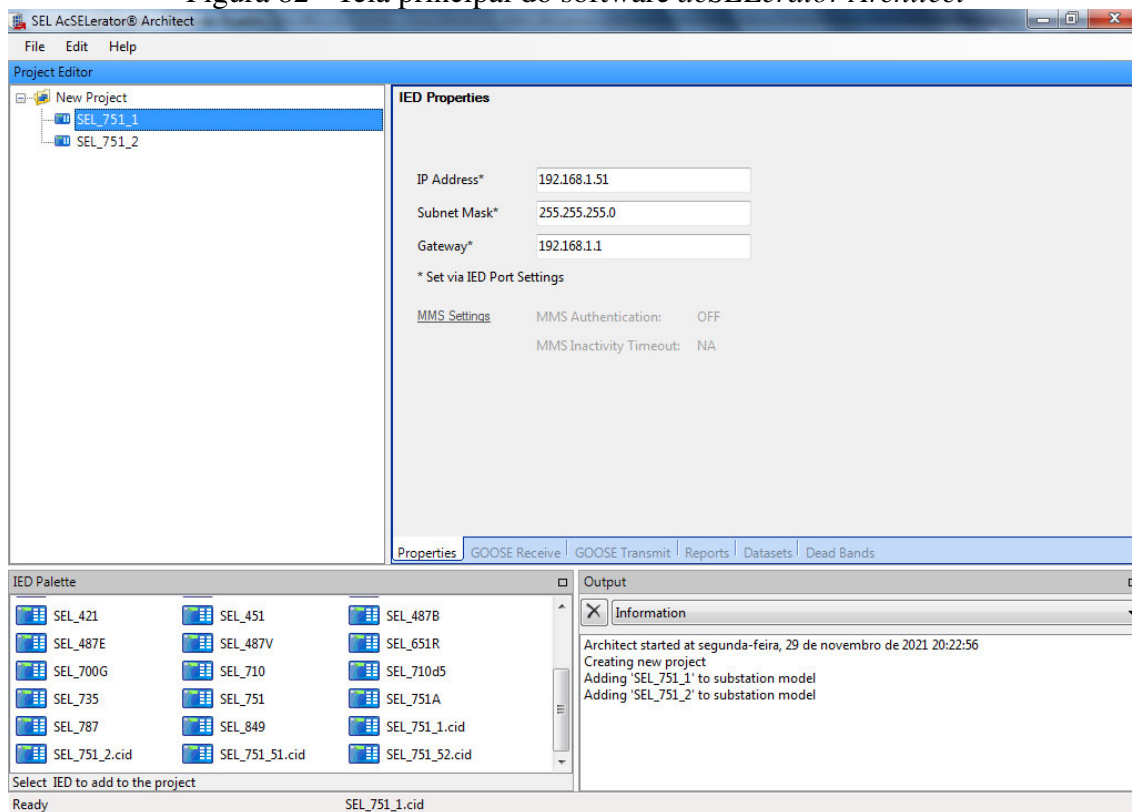
Figura 81 - Janela de configuração da proteção de sobrecorrente

Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

A parametrização da seletividade lógica inicia-se com o *software acSELerator Architect*. Na janela principal, pode ser verificado o item *New Project*, como mostrado na Figura 82. Neste item são inseridos os relés integrantes da rede de teste, clicando sobre o ícone do relé SEL 751 mostrado no quadro *IED Palette*, situado no canto inferior esquerdo na

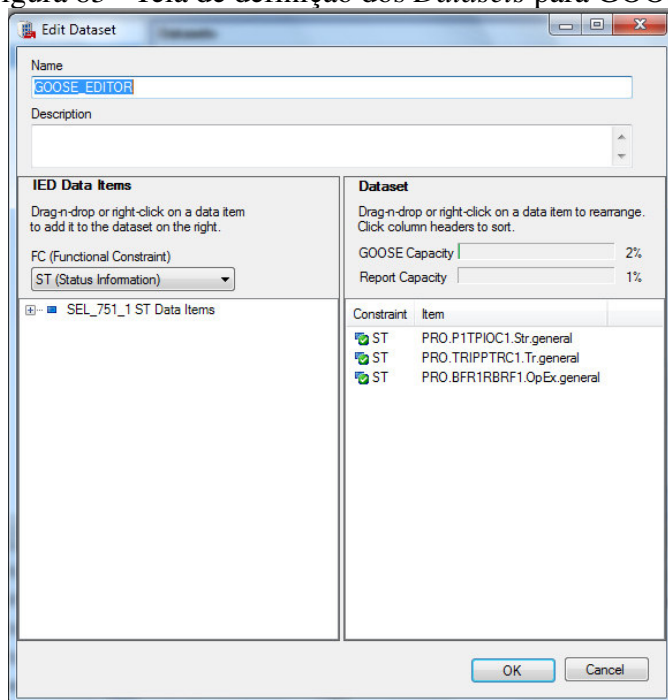
tela principal, arrastando até a área *Project Editor*. Por razão de organização, os nomes de cada relé devem considerar as suas ordens no diagrama de teste (montante e jusante).

Figura 82 - Tela principal do software *acSELerator Architect*



Fonte: *ACSELERATOR Architect*.

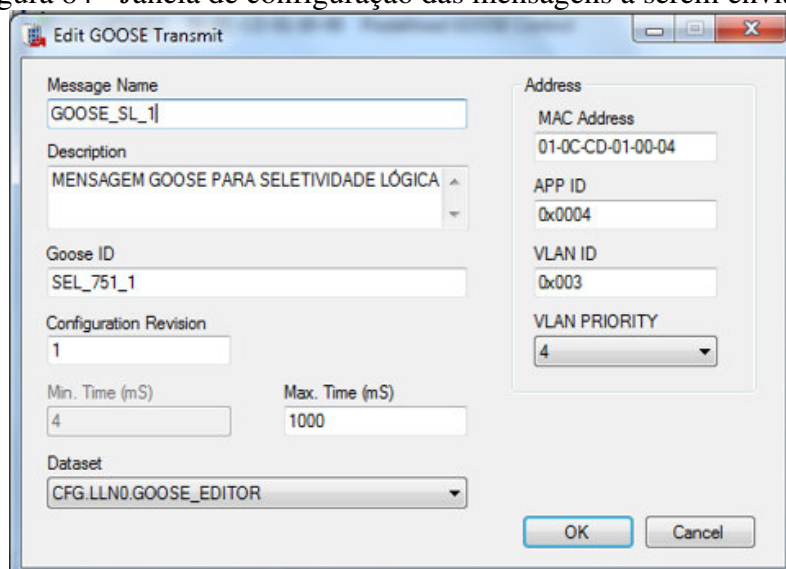
O passo seguinte consiste em selecionar o relé definido para enviar as mensagens de bloqueio ao relé a montante (relé que deverá ser o assinante das mensagens GOOSE). Com o relé selecionado clica-se na aba *Datasets*, mostrada também na Figura 81, e em seguida, clica-se em *New*, de forma que será aberta uma janela como mostrado na Figura 83.

Figura 83 - Tela de definição dos *Datasets* para GOOSE

Fonte: ACSELERATOR Architect.

Esse é o espaço de criação do *Dataset* para as mensagens GOOSE. Na mesma janela, no quadro *IED Data Items*, clica-se sobre o símbolo de soma (+) para selecionar os nós lógicos pertinentes ao teste que será realizado (proteção instantânea, trip, falha de disjuntor). Ao final deste procedimento, a janela deve estar como mostra a Figura 83. Ainda no relé editor, na aba *GOOSE Transmit*, clica-se em *New*, onde aparecerá uma janela como mostrado na Figura 84. Nesta janela é configurada a mensagem GOOSE a ser enviada pelo relé editor.

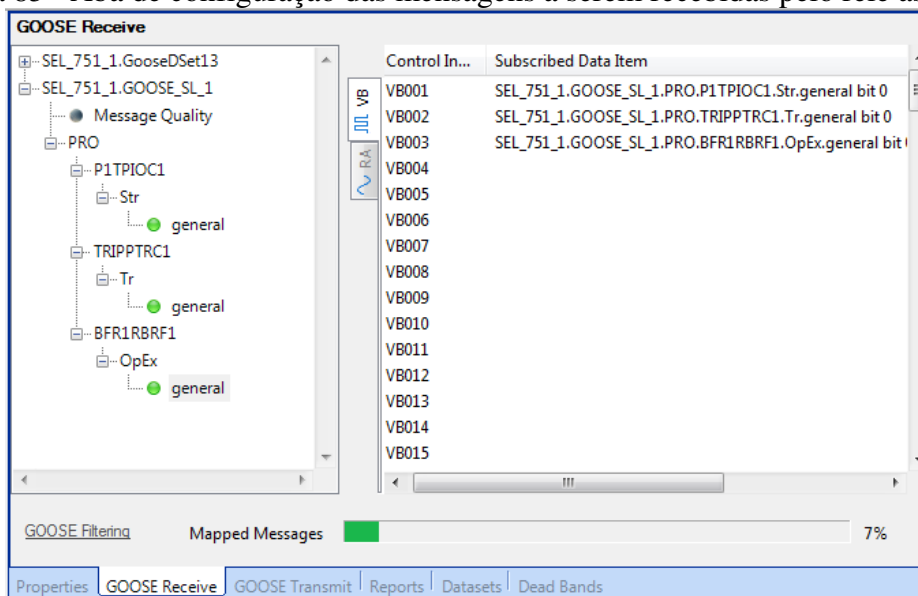
Figura 84 - Janela de configuração das mensagens a serem enviadas



Fonte: ACSELERATOR Architect.

Para o relé assinante, seleciona-se a aba *GOOSE Receive*, na qual já deve estar disponível para escolha o *Dataset* pré configurado no relé editor, para que o relé assinante receba as mensagens nele definidas. A seleção dos nós lógicos deve ser semelhante a mostrada na Figura 85.

Figura 85 - Aba de configuração das mensagens a serem recebidas pelo relé assinante



Fonte: *ACSELERATOR Architect*.

Após a configuração das conexões entre relés editor e assinante, o passo seguinte é criar a lógica que efetivamente fará a seletividade lógica funcionar entre eles. Para isso, no *AcSELERator QuickSet* deve-se realizar as configurações mostradas nas Figuras 86, 87 e 88. Devido a simulação dos cenários de seletividade lógica considerando o IED virtual assinante, foram adicionados atrasos nos tempos de atuação.

Figura 86 - Janela de configuração de proteção instantânea de sobrecorrente

Maximum Phase Overcurrent

Element 1

50P1P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
2,00 Range = 0,10 to 20,00, OFF

50P1D Maximum Phase Overcurrent Trip Delay (seconds)
0,01 Range = 0,00 to 400,00

50P1TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
NOT(VB001)

Element 2

50P2P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
OFF Range = 0,10 to 20,00, OFF

50P2D Maximum Phase Overcurrent Trip Delay (seconds)
0,00 Range = 0,00 to 400,00

50P2TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
1

Element 3

50P3P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
OFF Range = 0,10 to 20,00, OFF

50P3D Maximum Phase Overcurrent Trip Delay (seconds)
0,00 Range = 0,00 to 400,00

50P3TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
1

Element 4

50P4P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)

Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

Figura 87 - Janela de configuração da lógica de trip

Trip and Close Logic

TDURD Minimum Trip Time (seconds)
0,5 Range = 0,0 to 400,0

CFD Close Failure Time Delay (seconds)
1,0 Range = 0,0 to 400,0, OFF

TR Trip (SELogic)
ORED50T OR ORED51T OR ORED81T OR REMTRIP OR OC OR SV04T

REMTRIP Remote Trip (SELogic)
VB001

ULTRIP Unlatch Trip (SELogic)
NOT (51P1P OR 51G1P OR 51N1P OR 52A)

52A Breaker Status (SELogic)
IN101

CL Close Equation (SELogic)
SV03T AND LT02 OR CC

ULCL Unlatch Close (SELogic)
0

Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

Figura 88 - Janela de configuração da lógica da proteção de falha de disjuntor

The screenshot displays the configuration window for Breaker Failure protection logic. The interface is divided into a left-hand navigation tree and a main configuration area on the right.

Navigation Tree (Left):

- Global
 - General
 - Event Messeng
 - Settings Group
 - Synchronized f
 - Time and Date
 - Breaker Failure** (Selected)
 - Arc-Flash Prote
 - Analog Inputs
 - Analog Outputs
 - Station DC Bat
 - Input Debounc
 - Breaker Monito
 - Data Reset
 - Access Control
 - Time Synchron
- Group 1
 - Set 1
 - Main
 - Line Param
 - Fault Local
 - Overcurren
 - Maximu
 - Neutra
 - Residu
 - Negatr
 - Time Over
 - Directional
 - Load Encr
 - High Imped
 - RTD
 - Under/Ove
 - Synchronis
 - Power Fac
 - Frequency
 - Demand M
 - Power Eler

Main Configuration Area (Right):

Breaker Failure

52ABF 52A Interlock in BF Logic
 Select: Y, N

50BFP Breaker-Failure Current Detector Pickup (amps sec.)
 Range = 0,02 to 2,00

BFD Breaker Failure Delay (seconds)
 Range = 0,00 to 2,00

ATD Auxiliary Timer Delay (seconds)
 Range = 0,01 to 2,00, OFF

BFI Breaker Failure Initiate (SELogic)

Part#: 751401G3G1G70810830 Global : Breaker Failure

TXD RXD Abrir: Conectado 192.168.1.52 23 Terminal = Telnet Transferência de Arquivo = FTP

Fonte: ACSELERATOR QuickSet.

APÊNDICE B - CÓDIGO EXECUTADO PARA IED VIRTUAL ASSINANTE

```

/*
 * IED_ASSINANTE.c
 * DESENVOLVIDO POR: ALICE DE SOUSA FREITAS
                   CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS
 * UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
 * GRUPO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES - GREI
 * 2021
 */

#include "goose_receiver.h"
#include "goose_subscriber.h"
#include "iec61850_server.h"
#include "hal_thread.h" /* for Thread_sleep() */
#include <signal.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include "mms_value.h"
#include "goose_publisher.h"

#include "static_model.h"

/* importa modelo de dispositivo IEC 61850 criado a partir do SCL-File */
extern IedModel iedModel;

int contador = 0; //variável para auxiliar na função de abertura do disjuntor
static int running = 0;
static IedServer iedServer = NULL;

void sigint_handler(int signalId)
{
    running = 0;
}

static void
goCbEventHandler(MmsGooseControlBlock goCb, int event, void* parameter)
{
    printf("Access to GoCB: %s\n", MmsGooseControlBlock_getName(goCb));
    printf("    GoEna: %i\n", MmsGooseControlBlock_getGoEna(goCb));
}

//Função Listener

static void
gooseListener(GooseSubscriber subscriber, void* parameter)
{
    MmsValue* values = GooseSubscriber_getDataSetValues(subscriber);

```



```

char buffer[50];

MmsValue_printToBuffer(values, buffer, 50);

/*****seletividade assinante*****/

char b; char c; char d;

b = buffer[1];
c = buffer[6];
d = buffer[11];

if((b!=116)&&(c!=116)&&(d!=116))
{
printf("Sem evento \n");
}

if ((b != 116) && (c != 116) && (d != 116) && (contador == 0)) {
IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal,
DBPOS_ON);
}

if ((b == 116) && (c != 116) && (d != 116)) //116 é o valor da tabela ASCII para T (True)
{
printf("CORRENTE DE FALTA \n");
}

if ((b == 116) && (c == 116) && (d != 116))//116 é o valor da tabela ASCII para T (True)
{
printf("NÃO ATUAR - SELETIVIDADE LÓGICA \n");
}

if ((b == 116) && (c == 116) && (d == 116))//116 é o valor da tabela ASCII para T (True)
{
contador = 1;
printf("FALHA DE DISJUNTOR \n");
IedServer_updateBooleanAttributeValue(iedServer,
IEDMODEL_PRO_TRIPPTRC1_Tr_general, true);
printf("SINAL DE TRIP ENVIADO AO DISJUNTOR \n");
printf("DISJUNTOR ABERTO \n");
IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal,
DBPOS_OFF);
}
if (contador == 1) {
IedServer_updateDbposValue(iedServer, IEDMODEL_PRO_BK1XCBR1_Pos_stVal,
DBPOS_OFF);
}
}

```

```

int
main(int argc, char** argv)
{
    IedServerConfig config = IedServerConfig_create();

    IedServer = IedServer_createWithConfig(&iedModel, NULL, config);

    IedServerConfig_destroy(config);

    if (argc > 1) {
        char* ethernetIfcID = argv[1];

        printf("Using GOOSE interface: %s\n", ethernetIfcID);

        /* seta interface GOOSE para todos GOOSE publishers (GCBs) */
        IedServer_setGooseInterfaceId(iedServer, ethernetIfcID);
    }

    if (argc > 2) {
        char* ethernetIfcID = argv[2];

        printf("Using GOOSE interface for GenericIO/LLN0.gcbAnalogValues: %s\n",
        ethernetIfcID);

        /* seta interface GOOSE para GOOSE publisher (GCB) específico */
        IedServer_setGooseInterfaceIdEx(iedServer, IEDMODEL_CFG_LLN0, "BRep0201",
        ethernetIfcID);
    }

    IedServer_enableGoosePublishing(iedServer);

    GooseReceiver receiver = GooseReceiver_create();

    GooseReceiver_setInterfaceId(receiver, "enp2s0"); //sempre verificar a interface de rede do
    computador utilizado para executar o programa

    GooseSubscriber subscriber =
    GooseSubscriber_create("SEL_751_1CFG/LLN0$GO$GOOSE_SL_1", NULL);
    //Especificação de quem o IED irá receber as mensagens GOOSE

    GooseSubscriber_setListener(subscriber, gooseListener, iedServer);

    GooseReceiver_addSubscriber(receiver, subscriber);

    GooseReceiver_start(receiver);

    Thread_sleep(1000);

    IedServer_setGoCbHandler(iedServer, goCbEventHandler, NULL);

```

```
/* servidor MMS inicia a conexão com cliente */
IedServer_start(iedServer, 102);

if (!IedServer_isRunning(iedServer)) {
    printf("Starting server failed! Exit.\n");
    IedServer_destroy(iedServer);
    exit(-1);
}

running = 1;

signal(SIGINT, sigint_handler);

while (running) {

    Thread_sleep(1000);
}

/* parada do MMS server – fecha todas as conexoes TCP */
IedServer_stop(iedServer);

/* Cleanup */
IedServer_destroy(iedServer);

return 0;
} /* main() */
```

APÊNDICE C – AGRUPAMENTO DAS TAGS NO SCADA LAQUIS

Tabela 6 - Agrupamento das *tags* no SCADA LAquis

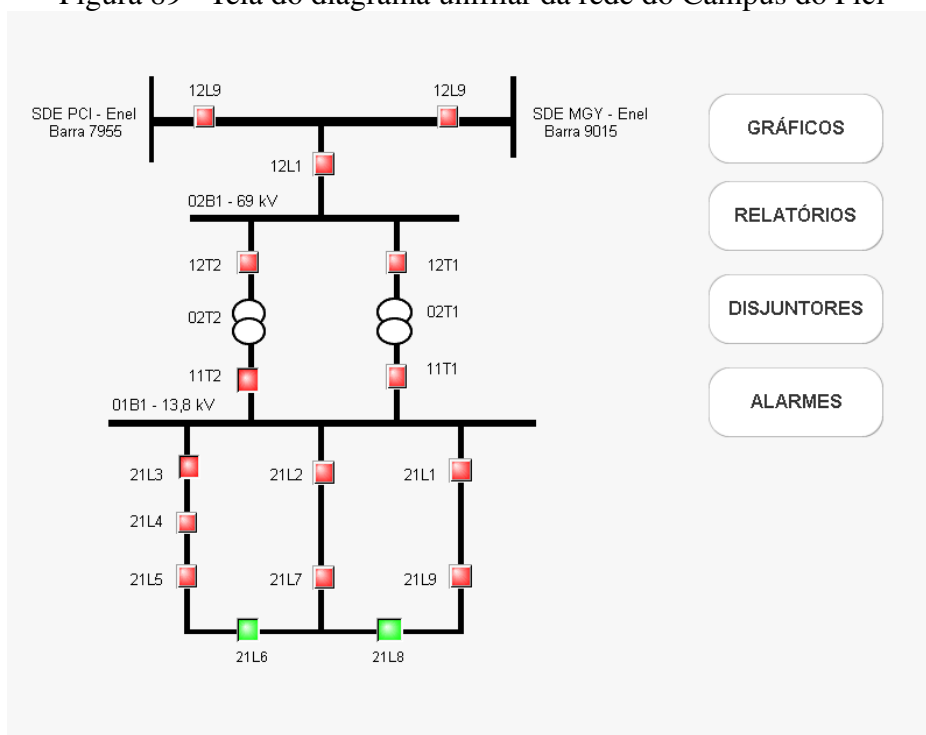
| Nome da <i>tag</i> | Dado associado | Grupo/Banco de Dados | Driver | Tipo de IED |
|--------------------|---|----------------------|--|-------------|
| CORRENTE1 | SEL_751_1MET/METM
MXU1.A.phsA.instCVal.
mag.f | EDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| STATUS1 | SEL_751_1PRO/BK1X
CBR1.Pos\$stVal | EDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| PROTECAO1 | SEL_751_1PRO/P1TPI
OC1.Str.general | EDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| TRIP1 | SEL_751_1PRO/TRIPP
TRC1.Tr.general | EDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| FALHA1 | SEL_751_1PRO/BFR1R
BRF1.OpEx.general | EDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| CORRENTE2 | SEL_751_2MET/METM
MXU1.A.phsA.instCVal.
mag.f | ASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| STATUS2 | SEL_751_2PRO/BK1X
CBR1.Pos\$stVal | ASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| PROTECAO2 | SEL_751_2PRO/P1TPI
OC1.Str.general | ASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| TRIP2 | SEL_751_2PRO/TRIPP
TRC1.Tr.general | ASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| FALHA2 | SEL_751_1PRO/BFR1R
BRF1.OpEx.general | ASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Físico |
| CORRENTE3 | SEL_751_1MET/METM
MXU1.A.phsA.instCVal.
mag.f | VIRTEDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| STATUS3 | SEL_751_1PRO/BK1X
CBR1.Pos\$stVal | VIRTEDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| PROTECAO3 | SEL_751_1PRO/P1TPI
OC1.Str.general | VIRTEDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| TRIP3 | SEL_751_1PRO/TRIPP
TRC1.Tr.general | VIRTEDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| FALHA3 | SEL_751_1PRO/BFR1R
BRF1.OpEx.general | VIRTEDITOR.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| CORRENTE4 | SEL_751_2MET/METM
MXU1.A.phsA.instCVal.
mag.f | VIRTASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| STATUS4 | SEL_751_2PRO/BK1X
CBR1.Pos\$stVal | VIRTASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| PROTECAO4 | SEL_751_2PRO/P1TPI
OC1.Str.general | VIRTASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
| TRIP4 | SEL_751_2PRO/TRIPP
TRC1.Tr.general | VIRTASSINANTE.LB | InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D | Virtual |

| FALHA4 | SEL_751_1PRO/BFR1R
BRF1.OpEx.general | VIRTASSINANTE.LB | A
InSAT.Multi-
ProtocolMasterOPCServer.D
A | Virtual |
|-------------|---|------------------|---|---------|
| DISJUNTOR1 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR2 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR3 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR4 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR5 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR6 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR1 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR2 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR3 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| PRIMARIO | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| SECUNDARIO | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR4 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR5 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR6 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR7 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR8 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| RELIGADOR9 | - | AUXILIAR.LB | - | - |
| DISJUNTOR10 | - | AUXILIAR.LB | - | - |

Fonte: elaborado pelo autor.


APÊNDICE D - TELAS SCADA LAQUIS

Figura 89 - Tela do diagrama unifilar da rede do Campus do Pici



Fonte: SCADA LAquis.

Figura 90 - Tela de monitoramento de disjuntores



UNIFILAR

GRÁFICOS

RELATÓRIOS

DISJUNTORES

ALARMES

DISJUNTORES

| | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 12L9 | 12L9 | 12L1 | 12T1 |
| <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |
| 12T2 | 11T1 | 11T2 | 21L1 |
| <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |
| 21L2 | 21L3 | 21L4 | 21L5 |
| <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |
| 21L6 | 21L7 | 21L8 | 21L9 |
| <input type="text" value="1"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="1"/> | <input type="text" value="0"/> |

Fonte: SCADA LAquis.

Figura 91 - Tela de alarmes



Fonte: SCADA LAquis.

Figura 92 - Tela de gráficos de corrente



Fonte: SCADA LAquis.

Figura 93 - Tela de relatórios

MedReleEditor

Arquivo Editar Formatar

Salvar Imprimir Executar Gráfico Campos

Relatório individual dos valores

Data: 18/06/2022

Período: 1 dia(s)

Tag: RELIGADOR6

Grupo: VIRTASSINANTE

HI: 00:00:00

HF: 23:59:59

Formato da Data: dd/mm/yyyy

Formato da Hora: hh:nn:ss

Título: 21L6

Média: 0,00

Tempo 21L6

Fonte: SCADA LAquis.

Figura 94 - Tela de exportação de relatórios

MedReleEditor

Arquivo Editar Formatar

Salvar Gerar html Gráfico Imprimir... Imprimir com gráfico... Imprimir todos os gráficos... Exportar para DOCX... Exportar XLSX... Fechar

Ctrl+S Campos

Relatório individual dos valores

Data: 18/06/2022

Período: 2 dia(s)

Tag: RELIGADOR6

Grupo: VIRTASSINANTE

HI: 00:00:00

HF: 23:59:59

Formato da Data: dd/mm/yyyy

Formato da Hora: hh:nn:ss

Título: 21L6

Média: 0,00

Tempo 21L6

Fonte: SCADA LAquis.