



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

LUCAS FÉLIX MAGALHÃES

**PLATAFORMA DE TESTES E VIRTUALIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS
ELETRÔNICOS INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEC 61850**

FORTALEZA

2019

LUCAS FÉLIX MAGALHÃES

PLATAFORMA DE TESTES E VIRTUALIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS
INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEC 61850

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Lucas Silveira Melo, M.Sc.
Coorientadora: Profa. Ruth Pastôra Saraiva Leão, Ph.D.

FORTALEZA

2019

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)

M167p Magalhães, Lucas Félix.
Plataforma de Testes e Virtualização de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes baseados na Norma IEC 61850 / Lucas Félix Magalhães. – 2019.
99 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Me. Lucas Silveira Melo.

Coorientação: Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão.

1. Automação. 2. IEC 61850. 3. IED. 4. Virtualização. 5. Plataforma de testes. I. Título.

CDD 621.3

LUCAS FÉLIX MAGALHÃES

PLATAFORMA DE TESTES E VIRTUALIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS
INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEC 61850

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 24/06/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Silveira Melo, M.Sc. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Ruth Pastôra Saraiva Leão, Ph.D. (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Eng. José Giordane Silveira, M.Sc.
Enel Distribuição Ceará

A Deus.

Aos meus pais, Meide e Arimatéia, e irmãos,
os quais foram alicerce de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, detentor da vida e de todas as coisas, por me permitir alcançar esse e outros sonhos e objetivos em minha vida, me protegendo e abençoando.

Aos meus pais, Meide Félix e Arimatéia Bernardino, que me deram a vida e me proporcionaram condições de crescer, ensinando-me que a humildade é base de tudo, em especial, minha mãe, que não posso deixar de destacar toda garra, dedicação e amor depositados nesse sonho que agora realizo, sendo esta, uma conquista sua também.

Aos meus irmãos Júnior, Éder, Edna, Edson e Camila, pelo apoio, incentivos, compreensão em meus momentos de ausência e, acima de tudo, companheirismo ao longo dessa caminhada.

Aos meus avós (in memoriam), os maternos pelas lições, cuidados e amor a mim dedicados, os paternos, mesmo não os tendo conhecido, pelas histórias de vida que me foram contadas, servindo de exemplo e motivação em minha vida.

A toda a minha família, o que compreende tios, tias, primos, primas, sobrinhos, pelo apoio, ajuda em diversos momentos e pela torcida para que esse objetivo fosse alcançado.

À minha namorada Joyce Uchôa, que se mostrou uma companheira de vida, estando comigo nos bons e maus momentos, pela sua dedicação a mim e compreensão em meus momentos de ausência.

Aos meus padrinhos de batismo, Romeu Rocha e Joane Laurênio, pela inestimável contribuição à minha formação pessoal e sendo base para minha formação acadêmica, dos quais levarei sempre os ensinamentos, tendo-os como grandes referências.

Aos amigos que cultivei no Colégio Menino Jesus, entre alunos, funcionários e professores e que perduram até hoje, assim como aqueles que fiz em minha passagem pelo Campus Canindé do IFCE, alunos, funcionários e professores, em especial ao Professor Marcel Waline (in memoriam), a quem deixo aqui minha homenagem.

Aos companheiros de caminhada do DEE - UFC, entre grandes amigos e pessoas que cultivei bastante estima e admiração, dos quais cito Lucas Mateus, Adson Alves, Cícero Fábio, Igor Melo, Haroldo Neto, Gabriel Paiva, Arnold Lima, Adrielly Maria, Watson Júnior, João Murilo, Yuri Sousa, Daniele Baltazar, Edilan Ponciano, Felipe Carvalho, Andresa Sombra, Tiago Mota, Mariana Cavalcante, dentre outros, os quais peço perdão pela falta de memória.

Aos bons amigos do GREI, os quais contribuíram fundamentalmente para minha formação em engenharia elétrica, mostrando – me a importância da pesquisa e desenvolvimento

para o setor, atrelados ao companheirismo que é chave para todo e qualquer trabalho em equipe. Em especial, aos meus três orientadores, Professor Raimundo Furtado, pela grande dedicação ao curso e ao grupo de pesquisa, bem como pelos ensinamentos e incentivos voltados a mim, Professora Ruth, pelos valiosos ensinamentos, contribuições e incentivos proferidos a mim e a todos em sua volta e por fim e não menos importante, ao Professor Lucas Melo, que desde de minha entrada no GREI, não hesitou em me repassar bastante de seu conhecimento, sendo um suporte e um guia, vindo a ser meu orientador neste trabalho, aos três e a todos do GREI, meus sinceros agradecimentos.

Aos professores e funcionários do DEE – UFC, principalmente aqueles que colaboraram direta e indiretamente em minha formação, os quais dirijo agradecimentos especiais por buscarem fazer o melhor de si, até mesmo em situações adversas em que a educação é colocada em segundo plano pelos que representam a nação.

Aos amigos que fiz na Enel Distribuição Ceará, em especial a equipe do Programa de Eficiência Energética e áreas afins desta distribuidora, dentre estes, Jordani, Milksa, Laís, Alyne, Tiago, Santana Júnior, Davi, Eliane, Yuri, Larissa, Marcelo, Vanessa, Leidiana, Lídia Bastos, Cleyson, Erica. Cito dentre estes ainda, meus mentores e gestores, Marcony Esmeraldo, Adriano Faria (Enel Goiás) e Odailton Arruda, pelos valiosos ensinamentos e pelo grande apoio para o início da minha trajetória profissional.

Por fim, a todos que posso ter esquecido de mencionar, mas que me ajudaram de alguma maneira, direta ou indiretamente, a alcançar esse sonho, minha gratidão.

“Um sonho se desfaz quando o olho se abre, um ideal não se desfaz nem que a vida se acabe...”

(Samurai – Projota)

RESUMO

MAGALHÃES, L. F. “**Plataforma de Testes e Virtualização de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes baseados na Norma IEC 61850**”. Universidade Federal do Ceará – UFC, 2019, 97p.

A evolução tecnológica proporcionou ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), avanços em automação ao longo das décadas, saindo de dispositivos puramente analógicos até o advento dos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED), os quais são digitais utilizando-se de protocolos de comunicação. A grande variedade de dispositivos com protocolos de comunicação proprietários passou a representar um desafio ao setor por dificultar a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, forçando a utilização de um mesmo fabricante ou de *gateways* conversores de protocolo, o que aumentava os custos do Sistema de Automação (SAS). A criação da norma IEC 61850 representou um marco por definir pré-requisitos, modelagem de dados, serviços e protocolos de comunicação que deveriam ser utilizados em IEDs de controle e automação. No entanto, mesmo com a normatização, dificuldades de interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes ainda persistem. São diversas as situações em que são necessários testes de viabilidade e compatibilidade entre dispositivos, redes de comunicação, sistemas supervisórios ou aplicações de automação. Faz-se então necessária uma ferramenta que não apenas permita testar as funcionalidades de comunicação de IEDs baseados na norma IEC 61850, mas também virtualizar quaisquer dispositivos através de seu modelo de dados. A Tecnologia de Virtualização vem ganhando espaço no setor elétrico, mostrando capacidade para alcançar melhorias de eficiência operacional e proporcionar redução de custos com *hardware* em ambientes de SAS. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de testes para funcionalidades de comunicação e interoperabilidade de IEDs, com base nos protocolos da norma IEC 61850, a qual objetiva realizar testes de comunicação e integração para IEDs reais, além de virtualizar, do ponto de vista das funcionalidades de comunicação, quaisquer IEDs compatíveis com a norma, através do modelo de dados do IED. A plataforma apresenta ainda um simulador de mensagens GOOSE em larga escala, para realizar testes de desempenho de IEDs em meio a redes de comunicação submetidas à sobrecarga. A plataforma foi desenvolvida em linguagens Python e C, através da biblioteca computacional de código aberto libIEC61850, tendo sido testada e validada em laboratório, a partir da infraestrutura de testes do Grupo de Redes

Elétricas Inteligentes da UFC – GREI, apresentando resultados satisfatórios como ferramenta de testes de comunicação padrão IEC 61850.

Palavras-chave: Automação, IEC 61850, IED, Virtualização, Plataforma de testes.

ABSTRACT

MAGALHÃES, L. F. “**Platform for Testing and Virtualization of Intelligent Electronic Devices based on the IEC 61850 Standard**”. Universidade Federal do Ceará – UFC, 2019, 97p.

The technological evolution provided the Electrical Power System (EPS), advances in automation over the decades, leaving from purely analog devices until the advent of Intelligent Electronic Devices (IED), which are digital using communication protocols. The wide variety of devices with proprietary communication protocols presented a challenge to the sector by hindering interoperability between devices from different manufacturers, forcing the use of the same manufacturer or gateways protocol converters, which increased the costs of the Automation System (SAS). The creation of the IEC 61850 standard represented a milestone in defining prerequisites, data modeling, services and communication protocols that should be used in control and automation IEDs. However, even with standardization, difficulties of interoperability between devices from different manufacturers still persist. There are several situations in which feasibility tests and compatibility between devices, communication networks, supervisory systems or automation applications are required. A tool is then needed that not only allows to test the IEC 61850 IED communication functionality, but also to virtualize any devices through its data model. Virtualization Technology has been gaining ground in the electrical sector, showing the ability to achieve operational efficiency improvements and provide hardware cost savings in SAS environments. This work presents the development of a test platform for communication and interoperability functionalities of IEDs, based on the protocols of the IEC 61850 standard, which aims to perform communication and integration tests for real IEDs, besides virtualizing, from the point of view of the communication capabilities, any IEDs compliant with the standard, through the IED data model. The platform also features a large-scale GOOSE message simulator to perform IED performance tests on communication networks subjected to overload. The platform was developed in Python and C languages, through the libIEC61850 open source computational library, having been tested and validated in the laboratory, based on the testing infrastructure of the UFC - GREI Intelligent Electrical Networks Group, presenting satisfactory results as a tool for IEC 61850 standard communication tests.

Keywords: Automation, IEC 61850, IED, Virtualization, Test platform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema para testes de interoperabilidade em IEDs de diferentes fabricantes.....	16
Figura 2 - Níveis Hierárquicos de automação de subestações.....	19
Figura 3 - Topologia de rede em Anel: (a) simples e (b) duplo.....	24
Figura 4 - Topologia de rede em barramento: (a) simples e (b) duplo.....	25
Figura 5 - Protocolos convencionais em automação.....	26
Figura 6 - Modelo de dados de um IED pela IEC 61850.....	32
Figura 7 - Modelo de referência de informações dentro de um IED segundo a IEC 61850. ...	33
Figura 8 - Arquivos em linguagem de SCL para configuração da automação pela IEC 61850.	34
Figura 9 - Modelo de troca de informações proposto pela norma IEC 61850.....	35
Figura 10 - Comunicação vertical através da troca de mensagens entre o cliente e o servidor.	37
Figura 11 - Comunicação horizontal entre IEDs seguindo o padrão editor-assinante.....	38
Figura 12 - Padrão de envio de mensagens GOOSE.....	39
Figura 13 - Representação do Modelo do editor de mensagens GOOSE.....	39
Figura 14 - Arquitetura de Virtualização do Sistema de Automação de Subestações.....	41
Figura 15 - Pilha de implementação da API de servidor da libIEC61850.....	47
Figura 16 - Pilha de implementação da API de cliente da libIEC61850.....	47
Figura 17 - Esquema de implementação das funcionalidades de cliente da plataforma de testes.....	52
Figura 18 - Diagrama de caso de uso das funcionalidades de nível cliente da plataforma de testes.....	53
Figura 19 - Esquema de implementação das funcionalidades de servidor da plataforma de testes.....	57
Figura 20 - Diagrama de caso de uso das funcionalidades de nível servidor da plataforma de testes.....	58
Figura 21 - Esquema de geração do modelo de dados do IED a partir da libIEC61850.....	60
Figura 22 - Interface gráfica da plataforma de testes.....	64
Figura 23 - Menu de IED da interface gráfica da plataforma de testes.....	65
Figura 24 – Plataforma montada em bancada para validação da plataforma de testes.....	69
Figura 25 – Esquemático da estrutura de validação das funcionalidades relativas à comunicação MMS.....	70
Figura 26- Esquemático da estrutura de validação das funcionalidades relativas à comunicação GOOSE.....	71
Figura 27 - Leitura de valores de corrente no IED 1 (SEL 751) pela plataforma de testes.....	72
Figura 28 - Painel frontal do IED 1 (SEL 751).....	72
Figura 29 - Tela do Wireshark com captura de tráfego para primeira etapa do caso de teste I.....	73
Figura 30 - Tráfego de rede para segunda parte do caso de teste I.....	74
Figura 31 - Painel frontal do IED 1 (SEL 751) após emissão de comando de abertura de disjuntor (TRIP).....	74
Figura 32 - Report em estrutura de dataset capturado pela plataforma.....	75
Figura 33 - Análise de tráfego na rede para o caso de teste II.....	76
Figura 34 - Report capturado pela plataforma em estrutura de dataset referente a IED virtual.	78
Figura 35 - Análise de tráfego na rede para o caso de teste III.....	78
Figura 36 - Sequência de eventos do caso de teste IV capturados no Wireshark.....	80
Figura 37 - Sequência de mensagens GOOSE registradas pelo testador hexafásico.....	81
Figura 38 - Captura de tráfego de mensagens GOOSE para o teste V.....	82
Figura 39 - Gráfico de pacotes x tempo da rede de comunicação para o caso de teste V.....	82

Figura 40 - Tela inicial do AcSELerator Archtect e definição do IED e dataset.	91
Figura 41 - Configuração do dataset no IED.	92
Figura 42 - Associação de parâmetros de recepção das mensagens GOOSE às variáveis internas do IED.	93
Figura 43 - Configuração da lógica de seletividade lógica no IED a ser bloqueado.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura da Norma IEC 61850.	29
Tabela 2 - Tipos de mensagens e sua classificação em nível de prioridade.	36
Tabela 3 - Lista de todos os módulos e submódulos pertencentes a libIEC61850.	48
Tabela 4 - Comparação entre monitoramento de IEDs por meio de Varredura e Relatórios....	51
Tabela 5 – Endereços IP dos dispositivos conectados à rede Ethernet para realização dos testes.	69
Tabela 6 – Casos de teste utilizados na validação da plataforma.	70
Tabela 7 - Parâmetros principais das mensagens GOOSE dos dispositivos envolvidos no caso de teste IV.	79
Tabela 8 - Relação dos atributos de dados para composição do dataset do IED SEL 751.	92
Tabela 9 - Visão geral dos Serviços de comunicação suportados pela libIEC61850.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CID	<i>Configuration IED Description</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GREI	Grupo de Redes Eléctricas Inteligentes
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GSECB	<i>Generic Substation Event Control Block</i>
GoCB	<i>GOOSE Control Block</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LD	<i>Logical Device</i>
LN	<i>Logical Node</i>
MMS	<i>Manufacturing Message specification</i>
REI	Redes Eléctricas Inteligentes
RCB	<i>Report Control Block</i>
SGCB	<i>Setting Group Control Block</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCD	<i>System Configuration Description</i>
SCL	<i>Substation Configuration Language</i>
SSD	<i>Substation Specification Description</i>
SAS	Sistema de Automação de Subestações
SDMT	Sistema de Distribuição de Energia Eléctrica em Média Tensão

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos do Trabalho.....	16
1.2.1	Objetivo Principal.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Estrutura do Trabalho.....	18
2.	AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	19
2.1	Composição Hierárquica e Histórico da Automação de SEPs.....	19
2.2	Funções Básicas e Vantagens da Automação de SEPs.....	21
2.3	Componentes Básicos do SAS.....	22
2.3.1	Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA).....	22
2.3.2	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED).....	23
2.3.3	Redes e Protocolos de Comunicação.....	23
2.4	Considerações finais	27
3.	NORMA IEC 61850 E A TECNOLOGIA DE VIRTUALIZAÇÃO NO SEP	28
3.1	Histórico da norma IEC 61850	28
3.2	Estrutura da norma IEC 61850	29
3.3	Modelagem de Dados	31
3.4	Linguagem de Configuração SCL	33
3.5	Serviços de Comunicação Previstos na Norma IEC 61850.....	35
3.6	Protocolos de Comunicação da Norma IEC 61850	36
3.6.1	Protocolo MMS	37
3.6.2	Mensagens GOOSE.....	37
3.7	Tecnologia de Virtualização aplicada ao SAS	40
3.7.1	Arquitetura de Virtualização em Subestações	41
3.7.2	Benefícios da Virtualização em SAS.....	42
3.8	Considerações Finais	42
4.	PLATAFORMA DE TESTE E VALIDAÇÃO DE FUNÇÕES DE COMUNICAÇÃO PADRÃO IEC 61850.....	43
4.1	Divisão da Plataforma de Testes padrão IEC 61850: Nível Cliente e Nível Servidor	43
4.2	Importância da plataforma de teste de IEDs padrão IEC 61850.....	44
4.3	Estrutura da plataforma de testes de IEDs padrão IEC 61850.....	45
4.3.1	Biblioteca libIEC61850	45
4.3.2	Desenvolvimento das funcionalidades da plataforma de testes padrão IEC 61850	

.....	50
4.4 Considerações finais	66
5. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTES	68
5.1 Montagem da Estação de Trabalho para Realização dos Testes	68
5.2 Casos de Teste	69
5.2.1 Caso de Teste I - Comunicação Vertical entre a plataforma (simulando atuação de um SCADA) e IEDs	71
5.2.2 Caso de Teste II - Recebimento de <i>reports</i> MMS pela plataforma	75
5.2.3 Caso de Teste III - Envio de reports MMS pela plataforma via virtualização ...	77
5.2.4 Caso de Teste IV - Comunicação Horizontal entre IEDs reais e virtuais	79
5.2.5 Caso de Teste V - Geração de mensagens GOOSE em grande quantidade para testes de performance da rede de comunicação	81
5.3 Considerações finais	83
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	84
6.1 Conclusões	84
6.2 Trabalhos Futuros	85
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICES	89
Apêndice A: Arquivo de dados .txt usado para virtualização de IEDs e modelo de entrada de dados	89
Apêndice B: Configuração da comunicação entre dispositivos para realização dos testes com a plataforma	91
ANEXOS	95
Anexo A: Lista de serviços de comunicação padrão IEC 61850 suportados pela biblioteca libIEC61850	95

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o uso global de eletricidade vem crescendo quase ininterruptamente, ao passo que outras fontes de energia vêm sendo menos demandadas. Segundo dados da International Energy Agency – IEA, o consumo final de energia elétrica em 2016 atingiu 20.863 TWh, apresentando um crescimento médio anual de 3,3%, desde o ano de 1974. Já o consumo residencial de energia elétrica no Brasil cresceu, entre os anos de 2000 e 2015, em média 1,2 % ao ano, enquanto o número de consumidores residenciais brasileiros cresceu 3,4 % ao ano, no mesmo período (EPE, 2019). A evidente expansão do setor elétrico mundial atrelada à democratização do acesso à energia elétrica se traduziu, ao longo dos anos, em desenvolvimento tecnológico para atender às demandas da sociedade e às regulamentações do setor, que requer cada vez mais confiabilidade, interruptibilidade e eficiência.

A automação dos sistemas elétricos de potência (SEP) surgiu com propósitos de melhoria no fornecimento de energia elétrica aos consumidores finais, passando por evoluções que têm possibilitado supervisão e comando remoto do sistema elétrico em tempo real, reduzindo quantidade e frequência de interrupções, além de diminuir o tempo de reestabelecimento do serviço em caso de faltas (GIROUX, 2012).

A evolução tecnológica do SEP chegou no patamar em que o monitoramento, proteção e controle, em subestações e redes elétricas, se dá em sua maioria de maneira remota, através de dispositivos eletrônicos inteligentes - IED e sistemas de controle supervisórios e de aquisição de dados conectados por meio de redes de dados baseadas em diversos tipos de protocolos de comunicação (MELO, 2015). Considera-se que o desafio atual para a automação do SEP está na garantia da interoperabilidade, seja entre os próprios IEDs ou entre IEDs e os sistemas de controle e supervisão. A norma IEC 61850 foi criada com propósitos de colaborar, principalmente, com a interoperabilidade entre IEDs e sistemas de monitoramento e controle de diferentes fabricantes.

1.1 Motivação

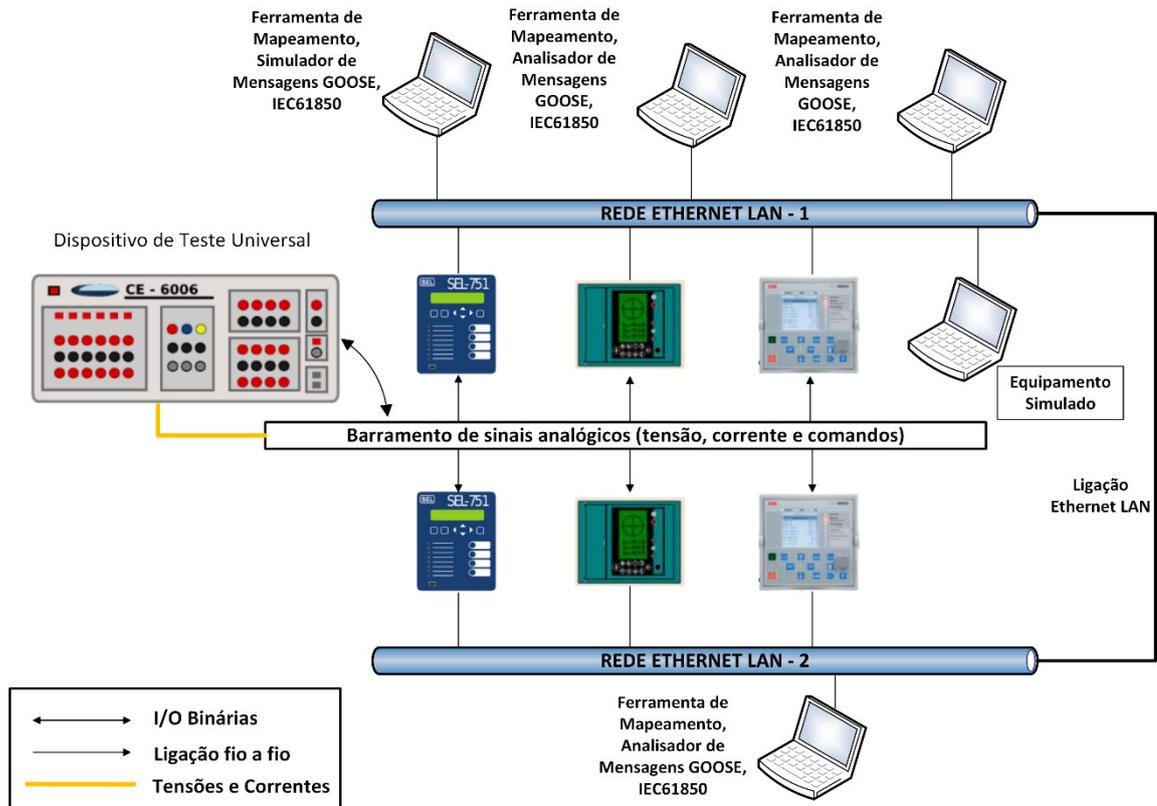
Nos últimos anos, o Grupo de Redes Elétricas Inteligentes da UFC – GREI tem trabalhado na pesquisa e desenvolvimento de ferramentas e algoritmos baseados em inteligência computacional aplicada à proteção, controle e automação de sistemas elétricos (SAMPAIO, 2017). Percebeu-se a necessidade de criação de ferramentas voltadas à comunicação de IEDs, com base nos padrões previstos na norma IEC 61850. As premissas

destas ferramentas estão em realizar a integração de IEDs com as aplicações de automação desenvolvidas, mas também, possibilitar a virtualização de quaisquer IEDs disponíveis no mercado, uma vez que para validar aplicações de automação desenvolvidas, pode ser necessário testar uma quantidade considerável de cenários distintos, abrangendo um maior número de IEDs do que os que se tem disponível em laboratório. Em situações práticas vivenciadas por equipes de manutenção de redes elétricas, subestações ou instalações industriais, segundo (ATIZANI et al., 2015), é possível verificar uma série de situações práticas em que a disponibilidade de uma ferramenta de teste e simulação de dispositivos inteligentes baseados na IEC 61850 é vantajosa, tais como: a expansão em uma planta existente, a substituição de uma unidade por uma mais moderna, bem como a modernização completa do sistema, a troca de gateways de comunicação, entre outras.

Ainda no contexto da disponibilidade de recursos para teste das funcionalidades de comunicação no padrão IEC 61850, a própria norma alerta para a necessidade de uma estrutura mínima de testes e validação de IEDs, conforme IEC/TR 61850-10 (2003). Muito embora a IEC 61850 defina com rigor, nas seções 4.6 e 4.7, a padronização dos nós lógicos, dados e atributos de dados que devem compor as estruturas dos IEDs, não está explícito na Parte 10 da norma, quais tipos de testes devem ser feitos para garantir a interoperabilidade entre dispositivos que serão utilizados em conjunto, estando especificados apenas os testes funcionais e de conformidade (SILVA, 2015).

Enquanto os testes funcionais e de conformidade se destinam a validar individualmente cada dispositivo a ser utilizado, os testes de interoperabilidade se destinam a avaliar a comunicação entre vários equipamentos, sendo estes, com vistas à manutenção e garantia da interoperabilidade, uma vez que a variedade de fabricantes aumenta as particularidades de conexão para cada dispositivo, dificultando a correta integração destes dispositivos. Na Figura 1 é mostrado o sistema proposto por CARDOSO (2013) para a realização de testes de interoperabilidade em IEDs.

Figura 1- Sistema para testes de interoperabilidade em IEDs de diferentes fabricantes.



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 2013).

Como visualizado na Figura 1, a estrutura de testes é formada pelo dispositivo de teste universal, caracterizado por um testador hexafásico que é responsável por emular o sistema elétrico, a rede de comunicação Ethernet, que é implementada através de switch gerenciável, os próprios IEDs comerciais que deverão ser submetidos aos testes, além de ferramentas de análise de rede de comunicação (analisadores de protocolo), para verificação das mensagens trocadas na rede Ethernet. Contudo, há ainda a necessidade de possuir uma ferramenta para virtualização de IED, que se destinam a emular algum IED que não esteja disponível durante o teste de interoperabilidade, seja por impossibilidade de retirada de operação ou um equipamento a ser adquirido no futuro, e a ferramenta de geração de mensagens IEC 61850, como GOOSE e MMS.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo geral, a melhoria de uma plataforma de testes de interoperabilidade de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) baseados na Norma IEC 61850, a virtualização de IEDs padrão IEC 61850 e o desenvolvimento de um simulador de

avalanche de mensagens GOOSE para teste de desempenho da rede de comunicação de sistemas de automação de subestação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Durante o desenvolvimento deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Desenvolver uma ferramenta para realização de testes de comunicação em IEDs reais (comunicação no nível cliente), através das seguintes funcionalidades:
 - ✓ Estabelecimento de conexão via protocolo MMS com o IED;
 - ✓ Obtenção da estrutura interna completa do IED;
 - ✓ Leitura de dados e atributos de dados internos via MMS pelo método de varredura - *polling*;
 - ✓ Leitura de dados através de *datasets* pré-configurados;
 - ✓ Acionamento e coleta de relatórios gerados automaticamente e enviados via MMS através dos *datasets*.
 - ✓ Envio de comandos via MMS, através da atribuição de valores em atributos editáveis (escrita e leitura).
- Desenvolver uma ferramenta para virtualização das seguintes funcionalidades de comunicação previstas em um IED padrão IEC 61850 (comunicação no nível servidor):
 - ✓ Troca de mensagens do tipo Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE);
 - ✓ Envio de Reports (Relatórios), via protocolo Manufacturing Message Specification (MMS);
 - ✓ Mudança de grupos de Ajustes via MMS;
 - ✓ Recebimento de comandos via MMS;
 - ✓ Disponibilização de informações individuais como status de equipamentos e leitura de valores analógicos.
- Desenvolver simulador de mensagens GOOSE para testes de desempenho da rede de comunicação;
- Desenvolver de interface gráfica para gerenciamento das ferramentas de nível cliente e servidor e do simulador de mensagens GOOSE;
- Teste e validação do sistema proposto em bancada, utilizando IEDs reais e

softwares comerciais de teste de IEDs padrão IEC 61850.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos.

O Capítulo 1 é composto por breve introdução, motivação, objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma introdução à Automação de Sistemas Elétricos de Potência, abordando o contexto histórico, as principais características e a estrutura básica de um sistema de automação de subestações e redes elétricas.

O Capítulo 3 está relacionado à norma IEC 61850, sendo mostrada uma visão geral da norma e apresentados seus principais conceitos, estruturação e modelagem, serviços e protocolos de comunicação.

O Capítulo 4 se destina à descrição da plataforma de testes proposta, mostrando a metodologia de desenvolvimento da mesma, partindo da biblioteca computacional empregada, até a estrutura e as funcionalidades implementadas.

O Capítulo 5 apresenta os procedimentos de testes e os resultados obtidos neste trabalho. Neste capítulo, são descritos os ensaios de validação das funcionalidades baseadas em IEC61850 desenvolvidas na plataforma, dentre elas, envio e recebimento de mensagens MMS, envio e coleta de relatórios, envio e recebimento de mensagens GOOSE, além da virtualização de IEDs por meio da sua estrutura de dados.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as principais sugestões de trabalhos futuros relativos ao tema.

2. AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste capítulo será apresentada breve revisão bibliográfica sobre automação de sistema elétricos de potência, abordando o histórico da automação de SEP, seus níveis hierárquicos, funções básicas e principais vantagens, equipamentos e softwares empregados, além de redes e protocolos de comunicação.

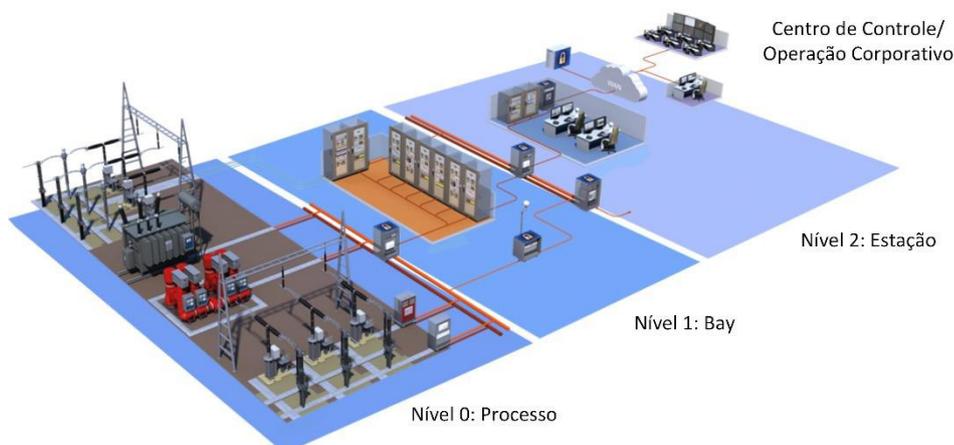
2.1 Composição Hierárquica e Histórico da Automação de SEPs

Com o objetivo de promover o aperfeiçoamento continuado do fornecimento de energia elétrica, a automação dos SEPs nos dias atuais já ultrapassa os limites físicos da subestação ou rede elétrica compreendida, pois opera em conjunto a outras subestações e com o Centro de Controle do Sistema da empresa, interagindo com uma rede de comunicação e fluxo de dados, por meio do envio de informações e recebimento de comandos (GIROUX, 2012).

Atualmente, as empresas de distribuição de energia possuem sistema de controle e automação de seus sistemas elétricos baseados em sistemas SCADA (acrônimo em inglês para "Supervisory Control and Data Acquisition") localizados nos centros de controle e/ou operação do sistema (CCS/COS), integrados aos sistemas de automação de subestações (SAS) e ao sistema de distribuição através dos sistemas de comunicação.

O sistema de automação de subestações é estruturado hierarquicamente de acordo com as funções desempenhadas, apresentando três níveis distintos, denominados nível zero, um e dois. Na Figura 2 está mostrada a hierarquia de automação de subestações.

Figura 2 - Níveis Hierárquicos de automação de subestações.



Fonte: Adaptado de (CORP, 2019)

Os três níveis da hierarquia de automação de subestações podem ser descritos como

(SAMPAIO, 2017; SOARES, 2016):

- Nível zero, ou processo, é onde estão presentes os equipamentos primários do sistema elétrico/subestação. Exemplo: transformadores de potência, transformadores de potencial e de corrente (TP e TC), disjuntores, religadores, chaves manuais, dentre outros.
- Nível um, também conhecido como “Vão” ou “*Bay*”, concentra os equipamentos responsáveis por proteger e comandar os equipamentos presentes no nível zero, sendo estes, relés de proteção e controle, além de dispositivos de medição e monitoramento.
- No nível dois, também denominado nível de estação, estão presentes as Unidades de controle central ou da subestação (UCC/UCS), bem como demais recursos que podem compor a automação da subestação, de acordo com a situação, como gateways, concentradores de dados, computadores de posto de operação, IHM e softwares de supervisão (Sage, Elipse, etc). Em geral, o nível 2 é responsável por coletar, organizar e apresentar aos operadores locais (quando existentes) as informações do nível 1.

O centro de controle/operação da empresa conecta-se geralmente ao nível 2 através de sistemas de comunicação específicos e que proporcionam controle da operação remotamente. Na literatura é possível ainda, encontrar o nível 3 na hierarquia de automação, abrangendo o Centro de Controle do Sistema da concessionária.

Contudo, o sistema de automação passou por evolução significativa, tendo percorrido duas etapas até o terceiro e atual estágio. A evolução ocorreu mediante o avanço das próprias tecnologias e equipamentos utilizados, desde os equipamentos primários e de proteção, até os sistemas de medição e aquisição de dados, até o controle e monitoramento. Os três estágios que compreendem a evolução da automação de subestações são (SAMPAIO, 2017):

- Automação convencional: Primeiro estágio da automação de subestações, em que os equipamentos de proteção (relés) eram basicamente eletromecânicos ou estáticos, possuindo apenas uma função por dispositivo, sendo conectados ao nível 1 (*bay*) por meio de condutores elétricos e monitorados por uma Unidade Terminal Remota – UTR. Havia divisão entre dispositivos de controle e dispositivos de proteção, sendo distribuídos em painéis separados, ao passo que em subestações de maior porte, um grande espaço era necessário para

acomodar todos estes painéis e equipamentos, aumentando o custo das edificações necessárias para abrigá-los.

- Segundo estágio, com automação baseada em sistemas supervisórios SCADA alocados na UCS presente no nível estação, sendo conectados, através de protocolos de comunicação proprietários, a relés digitais ou numéricos multifuncionais. Os protocolos de comunicação usados, geralmente do tipo mestre-escravo no nível um, garantiram diminuição da quantidade de conexões elétricas entre dispositivos, porém, eram não interoperáveis, gerando grande dependência de fabricantes para cada subestação, visto que fabricantes usavam protocolos distintos uns dos outros.
- Estágio atual: Sistemas de automação baseados e compatíveis à norma IEC 61850 com uso de SCADA na UCS do nível estação. O nível dois encontra-se conectado a relés digitais com múltiplas funções (agora denominados IED) possuindo protocolos de comunicação interoperáveis no nível um, comunicando-se com a UCS por meio de protocolo cliente-servidor. Os dispositivos do nível de vão também são integrados por meio de protocolo de comunicação editor-assinante, proporcionando a comunicação horizontal ultrarrápida entre os IEDs. Embora seja maioria no SEP atualmente, nem todas as redes elétricas e subestações já estão compatíveis com este estágio, apresentando ainda, relés digitais com protocolos de comunicação proprietários ou até mesmo, equipamentos de proteção eletromecânicos.

2.2 Funções Básicas e Vantagens da Automação de SEPs

Embora represente um alto investimento, justificado pela existência de redes elétricas, principalmente no SDMT, que possuem pontos não monitorados e comandados através do centro de controle das distribuidoras, a automação de subestações e do próprio SDMT, por exemplo, segundo (SOARES, 2016) traz reflexos bastante positivos como:

- Aprimoramento do controle e supervisão da rede elétrica, através do monitoramento em tempo real, possibilitando tomadas de decisão pelas equipes de operação mais rápidas e confiáveis, visando a recomposição do sistema;
- Registro e diminuição do tempo de eliminação das faltas;
- Diminuição de custos de operação e manutenção, por ser possível verificar problemas e defeitos de maneira mais eficiente;

- Maior precisão na identificação e diagnóstico de causa e origem da falha na rede.

Como premissa para ser considerado satisfatório, um sistema de automação de subestações e redes elétricas precisa exercer nove funções preestabelecidas (GIROUX, 2012):

- Comando remoto;
- Função de monitoramento
- Listas de eventos;
- Registro sequencial de eventos
- Armazenamento de dados históricos
- Intertravamento
- Controle de tensão e reativos
- Religamento automático
- Recomposição.

As funções de um sistema de automação se baseiam nas premissas básicas de eficiência operacional, monitoramento da operação em tempo real, avaliação de desempenho, segurança dos profissionais e tempo de resposta mínimo a eventos ocorridos no sistema elétrico. Para que estas funções possam ser desempenhadas, as topologias atuais de automação contam com componentes básicos, entre equipamentos, softwares e meio de comunicação e integração entre estes componentes.

2.3 Componentes Básicos do SAS

De modo geral, os principais componentes do SAS se dividem em três categorias: *Softwares* e aplicativos de gerenciamento; Equipamentos de proteção, medição e atuação (relés, medidores, etc.) e Sistemas de comunicação. Dentre os *softwares*/aplicativos de gerenciamento, o principal e mais consolidado é o sistema SCADA, utilizado não apenas em subestações, mas também em automação industrial. Na categoria de equipamentos de proteção e controle, o panorama atual mostra a predominância dos IED, capazes de concentrar múltiplas funções em um único dispositivo. Já os sistemas de comunicação do SAS abrangem além de equipamentos para implementação de redes de comunicação, diversas topologias de rede, além da existência de uma considerável variedade de protocolos de comunicação.

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

Possuindo como foco principal, subsidiar a tomada de decisão e efetiva ação dos operadores de subestações e redes elétricas, locais ou remotos, em menor tempo possível, um Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados – SCADA, é fundamental em todo sistema de automação moderno. Através do SCADA é possível controlar e supervisionar as variáveis (*tags*) e os IED de um sistema de controle presentes no nível de *bay*, conectados por meio de um driver específico.

Segundo (GIROUX, 2012), um sistema SCADA possui três principais componentes:

- a) Estação de Supervisão: Meio de interação entre o operador e o próprio sistema, também chamado de interface Homem-Máquina ou IHM, baseada em um software de supervisão e microcomputador compatível com o sistema.
- b) Sistema de controle e aquisição de dados: Normalmente executado por equipamento dissociado da estação de supervisão, sendo bastante comum o uso de Unidades Terminais Remotas (UTR) responsáveis pelo gerenciamento e envio dos sinais coletados ao SCADA. Devido seu grau de importância, as UTR geralmente são robustas, visando garantir a confiabilidade da operação da subestação.
- c) 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).

2.3.2 Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED)

Segundo De La Hoz León (2015), um IED é caracterizado por possuir lógica de execução embarcada em microprocessadores. Com o aumento da capacidade de processamento, frente aos equipamentos de gerações anteriores, os IEDs passaram a agrupar num único equipamento, diversas funções que tradicionalmente estariam separadas em outros dispositivos. IEDs permitem ainda comunicação digital com outros dispositivos do SAS, em configurações especiais, que seria inviável ou bastante complexo e oneroso com tecnologias anteriores, através de *gateways* conversores de protocolos ou equipamentos adicionais.

2.3.3 Redes e Protocolos de Comunicação

Com o surgimento dos dispositivos de proteção, controle e automação digitais, correspondendo ao segundo estágio da linha do tempo do SAS, as conexões elétricas entre

dispositivos foram sendo deixadas de lado, dando espaço para o uso de redes de comunicação baseadas em protocolos. A ascensão do uso de redes de comunicação em subestações acompanhou a evolução das tecnologias do setor de computação e telecomunicações, permitindo o aprimoramento de aplicações para proteção de equipamentos elétricos (DE LA HOZ LEÓN, 2015).

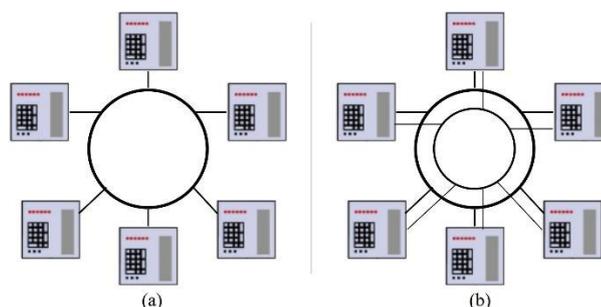
Segundo Giroux (2012), a definição da topologia da rede de comunicação é de fundamental importância para a eficiência operacional e confiabilidade de uma subestação, tendo como premissas básicas: funcionalidades requeridas do SAS, grau de importância da instalação, taxa de falhas admissível e, não menos importante, o custo total dos componentes necessários à implantação. Em uma rede de comunicação, os equipamentos são denominados de “nós”, enquanto a conexão (meio físico) entre estes é chamada de “meio de transmissão”.

São apresentados a seguir, algumas das topologias de redes de comunicação mais comumente utilizadas em automação de subestações.

2.3.3.1 Topologia em Anel

Uma rede em anel se baseia na existência de vários nós conectados através de um caminho fechado, como mostrado na Figura 3. As topologias em anel são classificadas em: Anel Simples e Anel Duplo. 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 dessa 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. Quando o sistema de automação necessita de uma baixa taxa de falhas, ações de redundância de rede podem ser tomadas visando segurança de operação do SAS, através da adoção de estruturas principais e de *back-up* (anel duplo).

Figura 3 - Topologia de rede em Anel: (a) simples e (b) duplo.

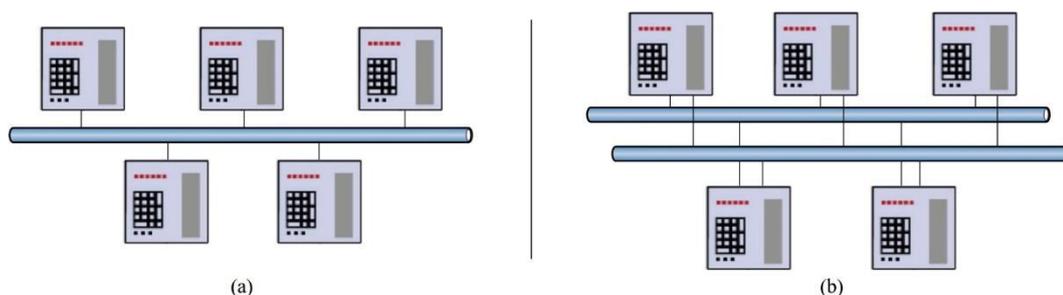


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.3.2 Topologia em Barramento

Uma alternativa à topologia em anel, bastante encontrada em sistemas de automação é a topologia em barramento. Nesta topologia de comunicação, todos os nós são conectados ao mesmo meio de transmissão, ou em um mesmo barramento físico de dados, como mostrado na Figura 4. Essa topologia é justificada pelo uso da transmissão por difusão, ou *broadcasting*, em que todos os nós captam as informações da rede, mas só os interessados a utilizam, os demais simplesmente ignoram. As principais vantagens estão na performance potencializada pela difusão, aumentando a confiabilidade, além de implantação e expansão serem econômicas e de fácil execução. Em contrapartida, é mais sensível ao aumento de nós conectados.

Figura 4 - Topologia de rede em barramento: (a) simples e (b) duplo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ações de redundância também são comuns em topologias de rede em barramento, como mostrado na Figura 4, em que passam a ser utilizados dois barramentos semelhantes na mesma rede. Um dos barramentos funciona como principal e o outro como retaguarda, sendo acionado em caso de falha do primeiro.

2.3.3.3 Protocolos de comunicação

Segundo (DE MELLO, 2006) um protocolo de comunicação é um conjunto de regras que regulamenta a forma como mensagens contendo informações são agrupadas em uma fonte, transmitidas através da rede e desagrupadas quando chegam ao destino. Passando a integrar o SAS a partir do segundo estágio, os protocolos de comunicação permitiram que os primeiros relés digitais pudessem comunicar-se, interagindo dentro da operação da subestação, diminuindo a quantidade de cabeamento e levando mais segurança e confiabilidade aos sistemas de proteção e controle.

Contudo, a automação através de protocolos de comunicação não está livre de erros.

A compatibilidade dos dispositivos físicos com os protocolos e a própria equivalência de versões de protocolos em dispositivos físicos distintos são alguns pré-requisitos de confiabilidade para os sistemas de automação. Entretanto, um fato trouxe vantagens e desvantagens a automação digital, a criação de protocolos proprietários por parte dos fabricantes de equipamentos. As vantagens são a minimização do risco de ocorrência de erros de comunicação para dispositivos de mesmas marcas, além de que, em teoria, os protocolos proprietários são feitos para utilizar toda a capacidade de processamento dos dispositivos, maximizando a performance. Já a desvantagem é a limitação para aquisição de novos equipamentos de outro fabricante, impedindo concorrência e gerando elevação de custos (SOARES, 2016).

Em contrapartida, a evolução da automação também foi marcada pela criação de protocolos padrão industrial (os quais não são exclusivos de um fabricante), possibilitando a implantação de sistemas de automação com equipamentos de diferentes fabricantes, mas nem sempre os próprios equipamentos são compatíveis com estes protocolos, sendo ainda suscetíveis a erros.

Com a existência de diversos protocolos para implementação de SAS, tanto padrões como exclusivos de seus fabricantes, uma alternativa foi buscar conectar equipamentos de fabricantes distintos através de *gateways* conversores de protocolos. Porém, o uso desses equipamentos gera atraso inerente para sistemas em tempo real, como os sistemas de proteção de uma subestação, o que pode ser grave problema por possibilitar atuações indevidas e conseqüentemente, transtorno no fornecimento de energia elétrica, além do fato de que a diversidade de protocolos de comunicação em um SAS representa aumento de custos de implantação, manutenções e possíveis expansões (SOARES, 2016).

Na Figura 5 estão ilustrados protocolos comumente encontrados em sistemas de automação em geral.

Figura 5 - Protocolos convencionais em automação.



Fonte: (SOARES, 2016).

Entretanto, o terceiro estágio dos sistemas de automação é marcado pela presença dos IEDs e pela busca pela interoperabilidade entre os equipamentos de um SAS, isto é, a capacidade de comunicação factível entre equipamentos de diferentes fabricantes, sem a necessidade do uso de conversores de protocolo. A norma IEC 61850 surge pela necessidade de padronizar a comunicação entre dispositivos de proteção, controle e automação em subestações e redes elétricas, proporcionando o alcance total da interoperabilidade esperada para um bom SAS.

2.4 Considerações finais

Neste capítulo abordou-se o contexto da automação de sistemas elétricos de potência, através da apresentação das definições, histórico, estrutura hierárquica, funções e componentes básicas de um SAS. Deu-se destaque à evolução tecnológica dos sistemas de comunicação (redes e protocolos) voltados à automação de subestações e redes elétricas, chegando ao panorama atual do SAS que busca confiabilidade, sobretudo, através da interoperabilidade entre os dispositivos envolvidos, abrindo espaço para a norma IEC 61850, tratada do Capítulo 3 deste trabalho.

3. NORMA IEC 61850 E A TECNOLOGIA DE VIRTUALIZAÇÃO NO SEP

Neste capítulo é abordada a Norma IEC 61850, apresentando breve histórico e estrutura textual da norma, os serviços de comunicação preconizados, a modelagem de dados voltada a representação do sistema elétrico, a linguagem de configuração SCL e os protocolos defendidos pela norma para implementação dos sistemas de comunicação. Também é abordada a Tecnologia de Virtualização de dispositivos e processos aplicada ao SEP, bem como suas características e as vantagens de sua utilização. Os conceitos mostrados neste capítulo são a base para o desenvolvimento da plataforma apresentada neste trabalho.

3.1 Histórico da norma IEC 61850

Em meio a evolução do SAS e à diversidade de protocolos de comunicação, uma iniciativa conjunta de pesquisadores, desenvolvedores e fabricantes de IEDs foi formada com objetivo de proporcionar padronização à automação por meio do SAS, além de torná-lo mais prático e otimizado. A maneira para alcançar estes objetivos era estabelecer padrões para os protocolos e requisitos de comunicação e criar um modelo de dados que permitisse a abstração do sistema elétrico para facilitar as ações mínimas necessárias do SAS, como coletar informações (medições e *status* de equipamentos), emitir comandos e monitorar a operação em tempo real. Por volta de 1997, o IEC, através do comitê técnico 57 (IEC TC57), e o Electric Power Research Institute (EPRI), criador do padrão Utility Communication Architecture (UCA - 1990), uniram-se com o propósito de criar um padrão único, resultando no lançamento da primeira edição da IEC 61850, em 2003 (MELO, 2015).

Em junho de 2010, foi lançada a segunda edição da IEC 61850, apresentando melhorias sobre os aspectos de confiabilidade e tolerância a falhas, incluindo protocolos específicos para implementação de redundância nos sistemas de comunicação, além de aprimoramentos quanto aos aspectos de sincronismo. Com as mudanças feitas, a chance de ocorrência de falhas ou perdas de informações são consideradas baixas, além da norma se estender para plantas de geração hidráulica, eólica e geração distribuída (KHAVNEKAR; WAGH; MORE, 2016).

A norma foi elaborada com base na estabilidade conceitual, em que 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 de informação e comunicação ou na regulamentação do setor elétrico. Tal característica é denominada de “à prova de futuro”, sendo considerada uma forte razão da adesão à norma ao longo dos anos, embora a mesma ainda não

tenha alcançado unanimidade no setor elétrico mundial (DE LA HOZ LEÓN, 2015).

3.2 Estrutura da norma IEC 61850

Conforme já mencionado, a norma IEC 61850 apresenta como principal objetivo oferecer a interoperabilidade entre IED de diferentes fabricantes, ou ainda, entre funções de automação da subestação a serem executadas por equipamentos de diferentes fabricantes (IEC/TR 61850-5, 2003).

Estrategicamente, a norma foi dividida em 10 módulos sequenciados com base em três aspectos da interoperabilidade abrangidos pela norma (DE LA HOZ LEÓN, 2015):

- **Sintaxe.** Os dispositivos devem ser conectados numa infraestrutura de rede através de protocolo padrão.
- **Semântica.** Os dispositivos devem compreender a informação recebida de outros dispositivos.
- **Função Distribuída.** Os dispositivos devem executar juntos uma função caso necessário.

Na Tabela 1 está mostrada a divisão em módulos da estrutura da Norma IEC 61850.

Tabela 1 - Estrutura da Norma IEC 61850.

Parte	Descrição
IEC 61850-1	Introdução e Visão Geral
IEC 61850-2	Glossário
IEC 61850-3	Requisitos Gerais
IEC 61850-4	Gerenciamento de Sistema e Projeto
IEC 61850-5	Requisitos de Comunicação para Modelos de Funções e Dispositivos
IEC 61850-6	Linguagem de Configuração para IED de subestações
IEC 61850-7	Estrutura de Comunicação Básica para Equipamentos de Subestações e Alimentadores
IEC 61850-7-1	Princípios e Modelos
IEC 61850-7-2	Serviços de Comunicação Abstratos (ACSI)
IEC 61850-7-3	Classes de Dados Comuns
IEC 61850-7-4	Classes de Nós Lógicos Compatíveis e Classes de Dados
IEC 61850-8-1	Mapeamento de serviço de comunicação específico (SCSM) - Mapeamento para MMS (Manufacturing Message Specification) (International Organization for Standardization - ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3.
IEC 61850-9-1	Mapeamento de serviço de comunicação específico (SCSM) - Valores amostrados sobre ISO/IEC 8802-3 (Valores Amostrais sobre Enlace Serial Unidirecional Multidrop Ponto-a-ponto - P2P).
IEC 61850-9-2	Perfil de protocolo de precisão de tempo para automação de concessionária de energia (Mapeamento de Amostra de Valores Analógicos baseado no barramento de processo).
IEC 61850-10	Testes de Conformidade

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

Nas quatro primeiras partes ou módulos, a norma IEC 61850 trata de aspectos dos sistemas de comunicações, tais como terminologias e requisitos gerais para implementação. Na quinta parte, são discutidos temas que serão usados nas demais partes da norma, como a abstração das funções de uma subestação através dos chamados “Nós Lógicos - LN”, a definição dos tipos das mensagens que são abrangidas na norma, bem como seus requisitos de desempenho (DE LA HOZ LEÓN, 2015).

Na sexta parte é apresentada a etapa de engenharia de configuração de um SAS que utiliza IEC 61850, que faz uso de linguagem própria baseada em XML, a SCL, um modelo padronizado de organização de informações não só de equipamentos do sistema elétrico (nível zero do SAS), mas também dos sistemas de comunicação, como a própria rede e os IED presentes (IEC/TR 61850-6, 2003).

A sétima parte é focada na descrição detalhada do sistema de comunicação proposto pela norma. Esse módulo é subdividido em quatro partes descritas a seguir (IEC/TR 61850-7, 2003):

- Parte 7-1: Introduz os princípios de comunicação, bem como os modelos de informação utilizados;
- Parte 7-2: Define como deve ocorrer a troca de informações dentro do SAS, no que se refere aos dados gerados ou consumidos pelas funções e lógicas de controle e automação. A troca de informações pode ocorrer pelos serviços de leituras, escrita, controle/comandos e relatórios de monitoramento, os quais são especificados pela Abstract Communication Service Interface, ou interface abstrata de serviços de comunicação - ACSI, independentemente do protocolo que utilizado na comunicação;
- Parte 7-3: Explora a maneira de construção da estrutura de dados contida nos LNs, através do paradigma da modelagem orientada a objeto. Essa estrutura é composta de classes abstratas denominadas Common Data Classes – CDC, onde são definidos os atributos contidos dentro dos LNs, bem como os serviços de comunicação, condição de presença dos atributos e outras informações básicas;
- Parte 7-4: Congrega os resultados das três primeiras partes do módulo 7, definindo o que deve ser modelado e transferido/comunicado, através da especificação de quais LNs devem estar presentes na estrutura interna de um IED, representando as funções e lógicas mais comuns no contexto do SAS.

Estes LNs possuem seus atributos internos especificados e quais CDC estes pertencem, bem como a quais serviços de comunicação se referem e sua condição de presença no respectivo LN.

Na oitava parte, a conexão dos modelos e serviços de comunicação é feita com os protocolos preconizados pela norma. Embora possam ser utilizados quaisquer protocolos de comunicação para os modelos de dados e serviços de comunicação definidos, a interoperabilidade desejada necessita da padronização dos protocolos. Os protocolos *Manufacturing Message Specification - MMS* e *Generic Object Oriented Substation Event - GOOSE* são apresentados nesta parte, descrevendo suas implementações através das camadas das redes de comunicação, bem como a que se destinam cada um dos protocolos (IEC/TR 61850-8-1, 2003).

Na nona parte da norma, dividida em duas partes, são apresentados protocolos de comunicação baseados em Ethernet, que objetivam a transferência de dados/grandezas elétricas através de valores amostrados (*Sampled Values – SV*) (IEC/TR 61850-9-1, 2003).

Por fim, a décima parte da norma apresenta recomendações sobre testes de conformidade que devem ser realizados, tanto a nível de fabricantes/desenvolvedores, quanto mantenedores de subestações ou outras instalações elétricas, com objetivo de garantir o atendimento aos requisitos e condições assinaladas ao longo da norma (IEC/TR 61850-9-1, 2003). No decorrer do capítulo, serão detalhados os aspectos citados na descrição da estrutura textual da Norma IEC 61850.

3.3 Modelagem de Dados

Como citado na descrição da parte 7-2 da norma, um modelo de representação de informações foi criado como uma das ferramentas para alcançar a interoperabilidade entre dispositivos do SAS. Esse modelo de representação é crucial para definir a ACSI que possibilita a realização dos processos de controle e automação, seja entre diferentes níveis do SAS ou somente no nível de vão (comunicação entre diferentes IEDs).

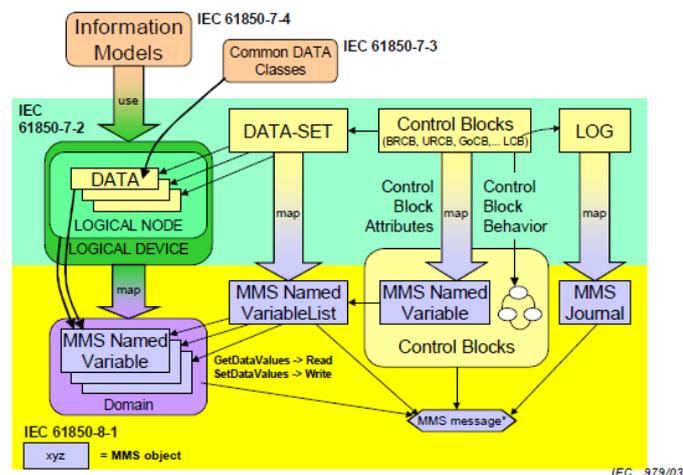
O modelo de representação de informações considera um IED como um servidor baseado em um dispositivo físico (*Physical Device - PD*), que possui funções de automação ou proteção e que precisa se conectar a um barramento de comunicação, possuindo, portanto, um endereço IP e uma porta de comunicação, visto que há necessidade de que os dispositivos possam conectar-se entre si e sobretudo, distinguir-se dentro do barramento de comunicação. A modelagem define, a partir deste ponto, uma estrutura interna ao IED que permite representar detalhadamente todas características e/ou informações mínimas necessárias para execução das

funções predefinidas, disponibilizando essas informações para transmissão através dos protocolos de comunicação.

A estrutura interna citada se trata de um ou mais dispositivos lógicos (*Logical Devices - LD*) que podem estar associados a funções desempenhadas pelo IED, como proteção, medição, configurações do dispositivo, lógicas de atuação, entre outras. Um LD é entendido como um agrupamento de LNs pertencentes ao mesmo tipo ou objetivo, ou, para o caso da existência de apenas um LD, um agrupamento de todos os LNs presentes no IED. Já o LN pode ser interpretado como sendo uma subfunção de um dispositivo, que troca informações com outros nós lógicos. Há ainda LNs que são apenas representações virtuais de dispositivos físicos de uma subestação no nível de processo, como por exemplo, os LNs que representam disjuntor (XCBR), transformador de corrente (TCTR) e transformador de potencial (TVTR), entre outros (MELO, 2015).

Visto que a ACSI leva em conta o paradigma da orientação a objetos, dentro de cada LN são encontrados os dados (*data*), uma instância de informações com atributos de dados (*Data Attributes – DA*) e métodos que representam o objeto em questão (função do IED, de proteção ou controle). Considerando que há tipos de dados e atributos de dados que não são exclusivos dentro de um LN, a norma criou uma classe de informações, denominada Classe de Dados Comuns (*Common Data Classes – CDC*), que permite a não repetição dos dados e atributos de dados comuns. Os DA são os elementos mais internos dentro de um LN, carregando a informação propriamente dita daquele dado ou até do LN, como um valor de medição de grandeza elétrica ou um *status* de equipamento. Na Figura 6 está mostrado o modelo de dados proposto pela IEC 61850, detalhando a relação hierárquica dos componentes da modelagem e em quais partes são definidos cada aspecto apresentado.

Figura 6 - Modelo de dados de um IED pela IEC 61850.

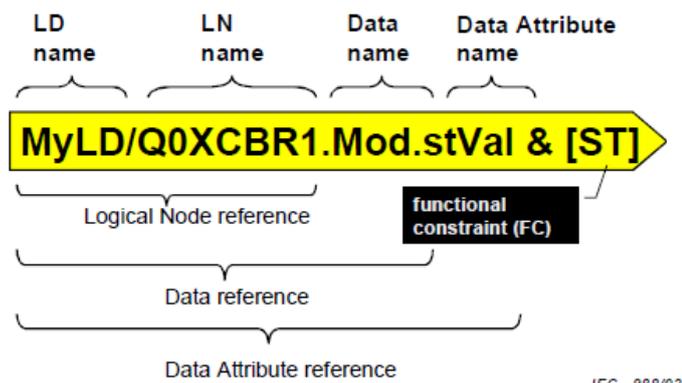


Fonte: (IEC/TR 61850-7-1, 2003).

Na Figura 6 estão mostrados ainda dois itens de destaque e importância dentro dos sistemas de comunicação baseados em IEC 61850: *Datasets* e *Control Blocks*. *Datasets* podem ser entendidos como o agrupamento de dados e atributos de dados livremente escolhidos ou pré-fixados, permitindo o acesso direto, relatórios, registros e mensagens GOOSE. Já *Control Blocks* ou blocos de controle são ferramentas de configuração de serviços da IEC 61850, sejam eles, relatórios (*reporting*), mensagens GOOSE, registro (*logging*), valores amostrados (*sampled values*) ou grupos de ajustes (*setting groups*) (IEC/TR 61850-7-1, 2003).

Graças à própria metodologia de mapeamento e modelagem da IEC 61850, é possível obter acesso a informações contidas na estrutura interna de um IED utilizando uma referência ou caminho, tal como o caminho do diretório de um arquivo específico no disco rígido de um computador. Na Figura 7 está mostrado o modelo de referência genérico para acesso a informações específicas de um dispositivo servidor IEC 61850.

Figura 7 - Modelo de referência de informações dentro de um IED segundo a IEC 61850.



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

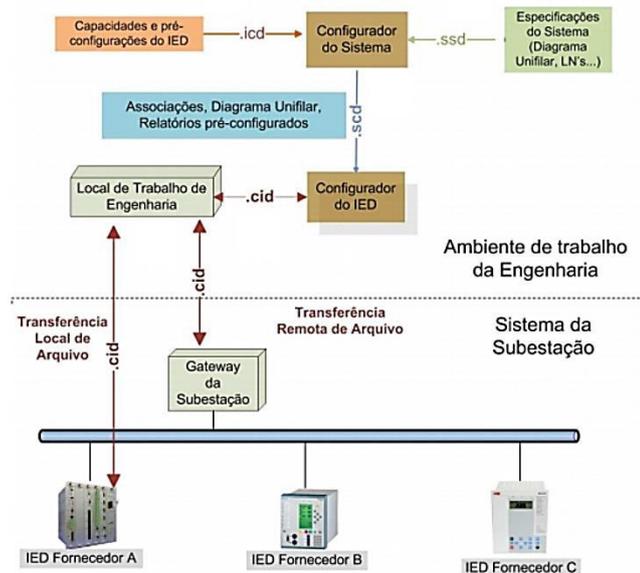
A referência de caminho de um atributo de dado em um IED é constituído do nome do LD (que geralmente possui também do nome do IED agregado) seguido de barra, o nome do LN seguido de ponto, o nome do dado de interesse, seguido novamente de ponto, e o nome do DA, por fim, é anexado um & (e comercial) seguido da *functional constraint* – FC do DA, que representa a restrição funcional do respectivo atributo de dado.

3.4 Linguagem de Configuração SCL

Para implementação do sistema de automação baseado na norma IEC 61850, são necessárias diversas configurações em diferentes níveis do SAS, nos IED, no sistema de supervisão local e até no nível onde está locado o COS/CCS. A IEC 61850 definiu, na parte 7-2, uma padronização de arquivos de configuração da automação desenvolvidos na linguagem

SCL, a qual se baseia na conhecida linguagem de marcação *eXtensible Markup Language* (XML) versão 1.0., que carrega informações desde os equipamentos primários do nível de processo, até dispositivos de comunicação como *switchs*, *hubs*, etc. Na Figura 8 está mostrada o conjunto de arquivos em linguagem de configuração SCL necessários para implementação da IEC 61850 em um SAS.

Figura 8 - Arquivos em linguagem de SCL para configuração da automação pela IEC 61850.



Fonte: (LOPES; FRAZ; MOLANO, 2012)

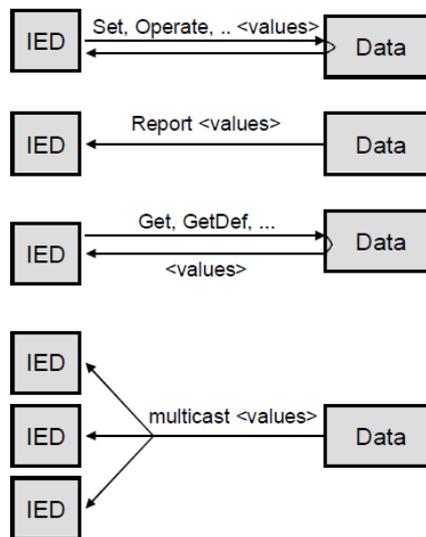
Os arquivos utilizados na configuração de comunicação de uma subestação são (GIROUX, 2012):

- IED capability Description (ICD): Arquivo que descreve as capacidades e pré-configurações dos IEDs, apresentando o estado padrão do dispositivo no que se refere a comunicação. Este arquivo é enviado à ferramenta de configuração do sistema.
- Configured IED Description (CID): Descreve a configuração específica de um IED para aquela aplicação, após realizadas as alterações, ajustes e parametrizações. Este arquivo é enviado ao IED.
- Substation Configuration Description (SCD): Responsável por descrever a configuração de toda a rede de comunicação e fluxo de dados da subestação.
- System Specification Description (SSD): Este último arquivo, por fim, descreve todo o diagrama e funcionalidades da automação da subestação.

3.5 Serviços de Comunicação Previstos na Norma IEC 61850

Como mencionado, a norma IEC 61850 objetiva a interoperabilidade entre os dispositivos do SAS, através de padronizações de procedimentos e ferramentas utilizadas. Com seu modelo de dados bem definido, a norma IEC 61850 apresenta o seu modelo de troca de informações, padronizando a maneira como são enviadas e recebidas mensagens pelos dispositivos abrangidos. A parte 7-1 da norma especifica os métodos de troca de informações, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo de troca de informações proposto pela norma IEC 61850.



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

A troca de informações entre dispositivos IEC 61850 pode ser realizada de maneira simples através dos serviços denominados *Get/Set-Operate*, presentes nos dispositivos caracterizados como servidores pela norma. O serviço *Get* (aquisição) é responsável pela coleta de informações nos IED por sistemas de monitoramento e controle, como supervisórios SCADA, por exemplo, já a alteração de dados ou envio de comando ao IED é realizado pelo serviço *Set-Operate*. Ambos os serviços são realizados por meio do protocolo MMS (MELO, 2015).

O monitoramento de grandes quantidades de informações, em um dispositivo servidor IEC 61850, pode ser realizado ainda por meio dos relatórios, ou *reports*, que podem ser compreendidos como pacotes de informação baseados em *Datasets* e que são gerados e enviados ao(s) usuário(s) de interesse sempre que um dos itens dentro do *dataset* sofre alteração. Outra maneira de realizar troca de informações é por meio de serviços baseados em *multicast*, ou seja, em compartilhamento (envio) de informações por parte de um remetente para

diversos pontos distintos da rede de comunicação, cabendo aos dispositivos captar e utilizar a informação, caso estejam pré-configurados para tal. Exemplos de mensagens/protocolos compreendidos através de serviço *multicast* são mensagens GOOSE e *Sampled Values* – SV.

Em resumo, a norma IEC 61850 proporciona dois principais mecanismos de realização de comunicação entre dispositivos e aplicações (sistemas supervisórios e de automação, por exemplo), são eles:

- Comunicação cliente-servidor para a visualização e comando, realizado geralmente entre as aplicações presentes no nível de estação e os dispositivos presentes no nível de vão ou bay e é implementada através de MMS;
- Comunicação de alta velocidade em tempo real, geralmente entre dispositivos do mesmo nível (bay), como IED de proteção e controle, sendo realizadas principalmente por meio de mensagens GOOSE e SV.

Dentro destas características, a norma classifica o tipo de mensagens a serem trocadas entre os dispositivos que formam a rede de comunicação de acordo com a relevância dessas mensagens para a rede. Na Tabela 2 estão mostradas as classificações dos tipos de mensagens previstos pela norma, deste as mensagens com maior prioridade e de maior velocidade, geralmente utilizadas para comunicação entre IEDs com propósitos de atuação em tempo real no sistema elétrico, até mensagens utilizadas simplesmente para realização de transferência de arquivos, configurações ou sincronização de tempo.

Tabela 2 - Tipos de mensagens e sua classificação em nível de prioridade.

Tipo	Classificação
1	Mensagens rápidas
1 A	Trip
2	Velocidade média
3	Velocidade baixa
4	Dados em rajada (<i>raw data</i>)
5	Transferência de arquivo
6	Sincronização de tempo

Fonte: (IEC/TR 61850-8-1, 2003).

3.6 Protocolos de Comunicação da Norma IEC 61850

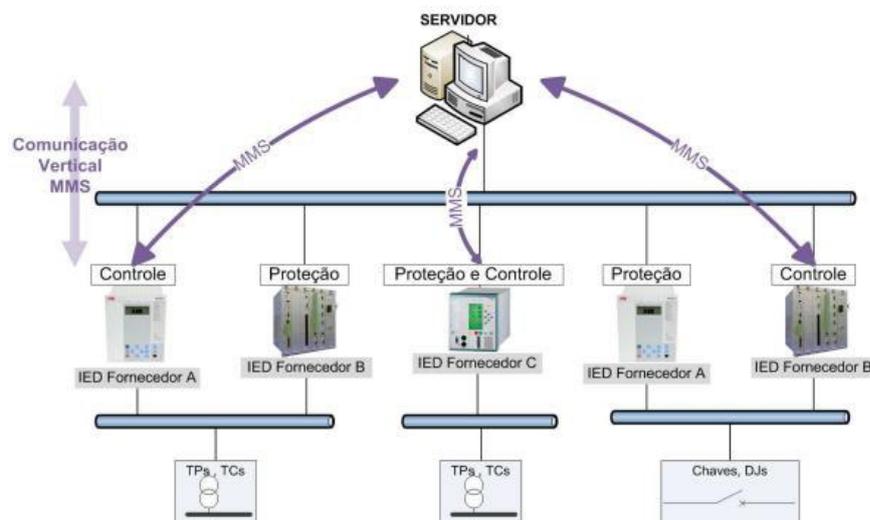
Dentre os protocolos de comunicação presentes na norma IEC 61850, dois protocolos têm destaque por sua familiarização com os conceitos de comunicação vertical (entre níveis do SAS) e comunicação horizontal (entre os próprios dispositivos do nível de vão): protocolo MMS e mensagens GOOSE, respectivamente.

3.6.1 Protocolo MMS

Manufacturing Message Specification - MMS é um protocolo presente na camada de aplicação do modelo OSI de comunicação, escolhido pelo comitê de desenvolvimento da norma IEC 61850 como a mais eficiente forma de implementar a comunicação vertical entre IED e aplicações no nível de estação. O MMS é um padrão internacional (ISO 9506) para realização de troca de mensagens em tempo real e para aquisição de dados e disparo de comandos por sistemas supervisórios entre dispositivos e aplicações computacionais. MMS é considerado um canal de tráfego independente das informações que serão trocadas e dos dispositivos envolvidos, ao mesmo tempo que é focado na conexão entre dispositivos, de modo a garantir a entrega das informações de maneira correta e sem perdas (MELO, 2015).

Na Figura 10 está ilustrado o esquema de comunicação entre dispositivos de automação e proteção (nível de *bay*) com o nível de estação.

Figura 10 - Comunicação vertical através da troca de mensagens entre o cliente e o servidor.



Fonte: (LOPES; FRAZ; MOLANO, 2012)

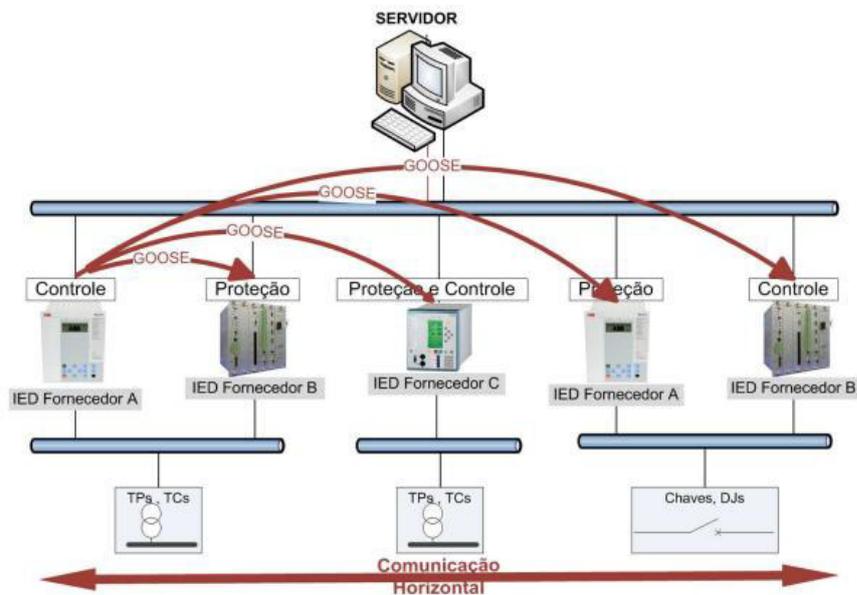
Por se basear no modelo de comunicação OSI, considera-se o protocolo MMS não rápido o bastante para ser usado na identificação da atuação de funções de proteção, pois emprega uma rotina para tratamento de erros que aumenta consideravelmente o tempo de envio dos dados, haja visto sua construção ser destinada a priorizar a conexão entre os dispositivos e o envio correto de informações (SOARES, 2016).

3.6.2 Mensagens GOOSE

Mensagens do tipo *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) são classificadas de extrema prioridade e possuem limitações de tempo máximo. As mensagens

GOOSE devem ser trocadas entre IEDs, satisfazendo a necessidade de alta velocidade de comunicação por serem dispositivos de atuação direta no sistema elétrico. O protocolo GOOSE é um protocolo da camada de enlace, no modelo OSI, devido sua limitação de tempo e sua construção se basear no objetivo de entregar a informação o mais rápido possível. Diferentemente do protocolo MMS, mensagens GOOSE não seguem a arquitetura cliente/servidor, mas sim a arquitetura editor/assinante, que se baseia 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 (ou percebem) a mensagem, porém apenas aqueles que a assinam utilizarão. Na Figura 11 está ilustrado o esquema de troca de informações entre IEDs, de maneira horizontal, principalmente através de mensagens GOOSE.

Figura 11 - Comunicação horizontal entre IEDs seguindo o padrão editor-assinante.

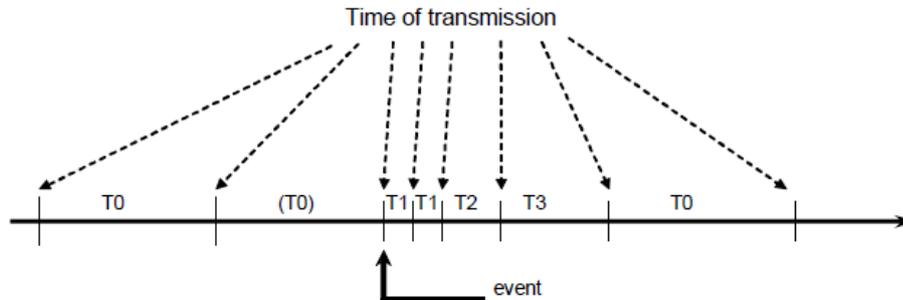


Fonte: (LOPES; FRAZ; MOLANO, 2012)

Uma vez que as mensagens GOOSE não apresentam a mesma construção em função da conexão e entrega de informações, como no protocolo MMS, uma estratégia é utilizada para garantir a entrega das informações aos interessados, dentro do barramento de comunicação. As mensagens GOOSE possuem um 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. O dispositivo sinaliza falha de comunicação caso não receba a informação dentro do tempo especificado. 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. O tempo de repetição do disparo das mensagens é então gradativamente diminuído até atingir o tempo máximo pré-configurado.

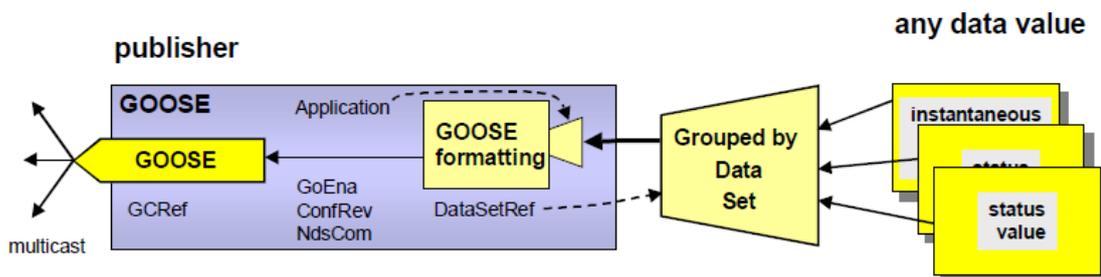
Figura 12 - Padrão de envio de mensagens GOOSE.



Fonte: (IEC/TR 61850-8-1, 2003).

Na Figura 13 está mostrada uma abstração do modelo de editor de mensagens GOOSE. Na ocorrência de evento, as informações agrupadas dentro de um *Dataset* são formatadas em mensagens e são então lançadas em *multicast* no barramento de comunicação.

Figura 13 - Representação do Modelo do editor de mensagens GOOSE.



Fonte: (IEC/TR 61850-8-1, 2003).

A configuração das mensagens GOOSE possui alguns parâmetros importantes que possibilitam a instanciação de blocos de controle GOOSE e, conseqüentemente, o envio das mensagens, sendo estes (IEC/TR 61850-8-1, 2003):

- **GoEna:** ativar / desativar remotamente a publicação;
- **AppID:** identificador da mensagem para o aplicativo de recebimento reconhecer a mensagem e a origem;
- **DatSet:** faz referência ao conjunto de dados cujos valores devem ser publicados,
- **ConfRev:** contém a revisão de configuração para indicar a exclusão de um membro do conjunto de dados;
- **NdsCom:** indica na mensagem que algum comissionamento é necessário.

3.7 Tecnologia de Virtualização aplicada ao SAS

A virtualização, no contexto da computação, pode ser compreendida como a capacidade de estender ou substituir um recurso de hardware ou software através da imitação de um comportamento. É geralmente referenciada como uma camada de software que abstrai as características físicas do hardware que se deseja virtualizar, possibilitando a execução de diversas instâncias distintas do hardware simulado em um mesmo dispositivo físico, como um computador ou servidor (WOTTRICH; GENEZ; PEREIRA, 2012).

Como visto anteriormente, os SAS são desenvolvidos com propósitos de garantir robustez e confiabilidade, condições que em geral, representam altos custos de implementação e de manutenção. Estes custos, quando relacionados com sistemas informatizados, *hardwares* de processamento rápido e plataformas de computação de armazenamento de alta capacidade projetadas para operar em um ambiente de subestação, não deve ser subestimado, sendo muitas vezes, um fator desencorajador para o aprimoramento e evolução do SAS. Contudo, a redução de custos pode ser possível através da adoção de soluções modernas baseadas em virtualização, dentro do contexto de *smart-grids*. Historicamente, essas soluções estiveram limitadas ao setor de Tecnologia da Informação (TI) corporativo, apenas recentemente os benefícios advindos dessas tecnologias tem sido agregados aos setores de Tecnologia de Operação (TO), como o próprio SAS de modo geral (DAYABHAI; DIAMANDIS, 2015).

No contexto do SAS propriamente dito, é possível verificar a virtualização através do uso dos chamados *hypervisors*, ou em uma tradução não direta, monitores de máquinas virtuais, que são sistemas responsáveis por criar e gerenciar diversas máquinas virtuais hospedadas, compartilhando entre si os recursos de hardware e processamento de uma mesma plataforma computacional.

Segundo Dayabhai e Diamandis (2015), existem dois tipos de *hypervisors* que podem ser aplicados, a depender das características e necessidades inerentes ao SAS:

- Tipo 1 - *Bare Metal*: Topologia em que o *hypervisor* é executado diretamente no *hardware* hospedeiro, ao passo que realiza a gerência de vários sistemas operacionais convidados.
- Tipo 2 - *Hosted Hypervisor*: O *hypervisor* é executado sobre um sistema operacional convencional, abstraindo as máquinas virtuais através do *hardware* hospedeiro.

A escolha entre os dois tipos de *hypervisor* leva em conta critérios como os sistemas operacionais suportados pelas máquinas virtuais, capacidade de processamento, relativo a

memória RAM e número de processadores, quantidade de máquinas virtuais a serem executadas, otimização de memória, além de questões relacionadas a licenciamento do *hypervisor* e o tipo de suporte disponibilizado pelo fornecedor.

3.7.1 Arquitetura de Virtualização em Subestações

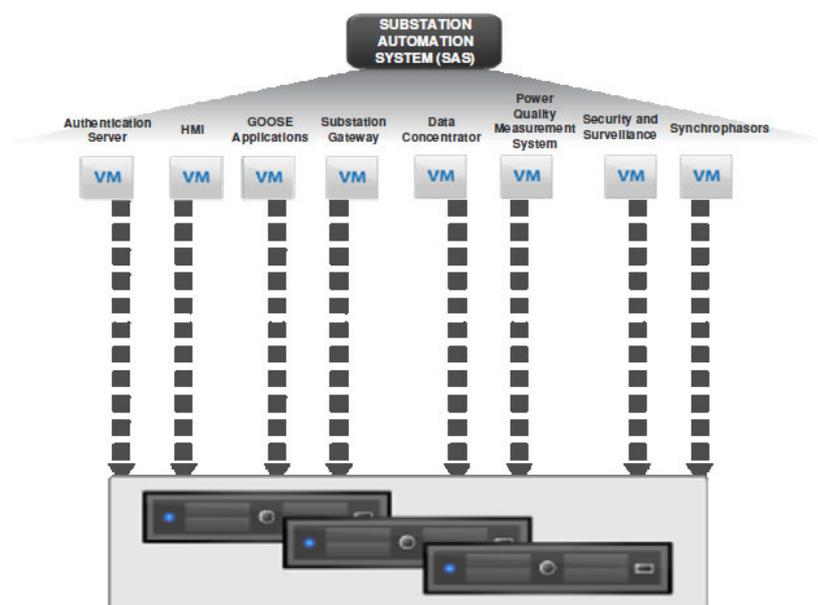
As arquiteturas desenvolvidas para ambientes corporativos são geralmente de alta disponibilidade, baseando-se nas seguintes características (DAYABHAI; DIAMANDIS, 2015):

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

As máquinas virtuais que operam nessa arquitetura precisam ser hospedadas em servidores distintos e distribuídos, utilizando a técnica de *clustering*, que proporciona replicação, a tolerância a falhas e a recuperação de desastres. Embora a arquitetura de alta disponibilidade apresente características importantes para utilização em ambientes de subestações, a arquitetura economicamente 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.

Na Figura 14 está mostrada uma representação da arquitetura de virtualização. As máquinas virtuais podem ser executadas através de *hypervisor*, e executam funções semelhantes à dispositivos físicos encontrados em SAS convencionais.

Figura 14 - Arquitetura de Virtualização do Sistema de Automação de Subestações.



Fonte: (DAYABHAI; DIAMANDIS, 2015)

3.7.2 Benefícios da Virtualização em SAS

Como citado anteriormente, utilizar tecnologias de virtualização podem representar redução de custos no que refere a *hardware* e sistemas informatizados. Contudo, os benefícios não se restringem à redução de custos, mas envolvem outros pontos importantes para o SAS (DAYABHAI; DIAMANDIS, 2015):

- Maior eficiência operacional e menores dependências 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;

Somando – se estes benefícios à redução de custos já enunciada, as vantagens para o SAS podem se tornar cada vez mais evidentes. Todavia, algumas limitações para a utilização de virtualização ainda são perceptíveis quando se trata de SAS, tais como licenciamento de *hardware* e *softwares*, o gerenciamento e o suporte técnico de *hardwares*, mais especificamente, os *hypervisors*, além do próprio aprofundamento das técnicas e ferramentas de virtualização com complexidade mais elevada, sendo um processo ainda necessário para que se avance na convergência entre tecnologias de informação e de operação.

3.8 Considerações Finais

Neste capítulo abordou-se a Norma IEC 61850, através da revisão de suas definições, histórico de construção, modelagem de dados, serviços de comunicação, principais funcionalidades e componentes, além dos protocolos de comunicação definidos como padrões para utilização, verificando como a norma foi construída com intuito final de promover interoperabilidade dentro do setor de SAS. Foi abordado o conceito de virtualização de processos e dispositivos aplicada ao SAS, mostrando como essa tecnologia pode trazer benefícios operacionais e econômicos os SEPs. As informações tratadas neste capítulo são base para o desenvolvimento da plataforma de testes apresentada no capítulo 4.

4. PLATAFORMA DE TESTE E VALIDAÇÃO DE FUNÇÕES DE COMUNICAÇÃO PADRÃO IEC 61850

Neste capítulo é mostrado o desenvolvimento da plataforma proposta, destinada a possibilitar o teste e validação das funções de comunicação previstas no escopo da Norma IEC 61850, seja através da integração com dispositivos reais ou por meio da virtualização de dispositivos compatíveis com a norma.

A plataforma foi concebida para proporcionar testes em IEDs padrão IEC 61850, tanto do ponto de vista do nível cliente, quanto do ponto de vista de servidor. Para o nível cliente, o intuito é permitir a comunicação com IEDs reais disponíveis no local dos testes, de qualquer fabricante, com intuito de realizar comandos e ter acesso à estrutura de dados por meio de coleta de informações por *polling* ou por meio de relatórios (*reports via dataset*). Do ponto de vista do nível servidor, o objetivo é possibilitar a virtualização de dispositivos padrão IEC 61850, a partir de um modelo de dados obtido através de um arquivo ICD, CID ou SCL, proporcionando a simulação da estrutura de dados do dispositivo em questão, bem como das funcionalidades de comunicação, mensagens MMS e GOOSE, principalmente.

Adicionalmente, foi incluída no escopo da plataforma, a funcionalidade do simulador de mensagens GOOSE em massa, destinado à geração de grande quantidade de mensagens com intuito de testar a rede de comunicação em meio a uma situação de grande tráfego.

4.1 Divisão da Plataforma de Testes padrão IEC 61850: Nível Cliente e Nível Servidor

As funcionalidades cliente incluem a estrutura de dados de qualquer IED padrão IEC 61850, por meio do acesso às variáveis internas (dados e atributos de dados) presentes nos nós lógicos, que carregam informações como status de equipamentos primários (dispositivos seccionadores e de disjunção), valores de medição de grandezas elétricas e status de atuação das funções de proteção presentes no IED. A ativação e recepção dos *reports via datasets* é outra funcionalidade do tipo cliente, sendo, geralmente, a maneira adotada pelas aplicações de automação, como o SCADA, para monitoramento da operação de um IED. Existe ainda a funcionalidade de realização de comandos via IEDs, tais como abertura e fechamento de equipamentos primários, ou ainda a mudança de grupos de ajustes. A grande maioria destas funcionalidades voltadas a cliente se dá através da troca de mensagens MMS, correspondentes à comunicação vertical no sistema hierárquico de automação de subestações e redes elétricas.

As funcionalidades de servidor são basicamente as mesmas do tipo cliente, porém, ao invés de destinadas à integração com IEDs reais, são na realidade, voltadas a virtualizar o comportamento de um IED real, no que se refere à comunicação IEC 61850, isto é, a criação de um modelo virtual de toda a estrutura de dados do IED, composta pelos dispositivos e nós lógicos, dados e atributos de dados, a troca de mensagens GOOSE com outros IEDs reais ou virtualizados, a troca de mensagens MMS, através do envio de *reports* via *datasets* e de dados individuais, ou por meio da recepção de comandos advindos de Sistemas Supervisórios e de Controle e Automação,.

4.2 Importância da plataforma de teste de IEDs padrão IEC 61850

Conforme descrito no Capítulo 3, a norma IEC 61850 define e padroniza testes de conformidade (aqueles voltados aos fabricantes para certificação de que os dispositivos estão adequados à norma), além dos testes funcionais, voltados a testar se os IEDs logram êxito na execução das funções pretendidas. Contudo, os testes de conformidade não asseguram a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes, bem como os testes funcionais não se destinam a verificar a compatibilidade entre IEDs e sistemas supervisórios e de controle, sendo estas, premissas de testes de interoperabilidade (SILVA, 2015). Adicionalmente, Souto et al. (2009) afirma que os testes de interoperabilidade permitem medir qual seria o esforço necessário para realizar a configuração da comunicação para substituir um IED de um determinado fabricante por um IED de outro fabricante, em uma subestação em operação.

Observa-se, portanto, que contar com uma ferramenta computacional que permita realizar testes de comunicação baseados nos protocolos abrangidos na IEC 61850 pode ser uma grande vantagem para operadores e mantenedores de subestações e redes de distribuição. As funcionalidades do tipo cliente se aplicam a testar se os IEDs reais disponíveis estão de acordo com as necessidades de sistemas supervisórios e de controle e aquisição de dados, ou, de modo mais generalista, de aplicações de controle e automação presentes no nível de estação.

Já as funcionalidades do tipo servidor, através da virtualização de IEDs, são necessárias para proporcionar flexibilidade em situações em que implementar um ambiente de teste complexo, com um número maior de IEDs padrão IEC 61850, sem que se faça necessário possuir um número elevado de dispositivos reais, como por exemplo, os testes de integração com IEDs (nível de vão ou *bay*) e validação de um Sistema de Automação de Redes de Distribuição, como o desenvolvido em (MELO, 2015; SAMPAIO, 2017), os quais, em seus testes de validação, utilizaram informações de redes de distribuição reais, que contém um

elevado número de IEDs, além de levarem em conta uma grande quantidade de situações (estudos de caso), envolvendo, na maioria das vezes, um número maior de IEDs do que os disponíveis em laboratório. Outro ponto importante a se considerar com a virtualização de IEDs é a possibilidade de testar a integração entre aplicações desenvolvidas e os IEDs que serão utilizados em campo, sem a necessidade de se retirar o equipamento de campo, ou ainda, em situações de projeto de novas instalações, constatar a adequação dos IEDs a serem inseridos, antes mesmo de adquiri-los, minimizando prazos e custos de implementação.

4.3 Estrutura da plataforma de testes de IEDs padrão IEC 61850

Como já mencionado no início do capítulo, a plataforma de testes possui um conjunto de funcionalidades baseadas nos protocolos de comunicação da norma IEC 61850, estando tal conjunto dividido entre aquelas funções destinadas para o nível de cliente, e as desenvolvidas com foco no nível de servidor. Para implementação computacional dos protocolos de comunicação na plataforma de testes, é necessário pacote de desenvolvimento dedicado ao padrão de comunicação IEC 61850, que disponibilize os serviços estabelecidos pela ACSI dentro do contexto da norma (MELO, 2015).

O projeto libIEC61850, que possui as características citadas anteriormente e que no contexto do GREI, foi utilizado para desenvolvimento das ferramentas de integração com IEDs padrão IEC 61850 em (BARBOSA, 2017; MELO, 2015; SAMPAIO, 2017), foi utilizado para implementação da plataforma de testes.

Para consolidação das funcionalidades da plataforma de testes proposta, foi desenvolvida uma interface gráfica em Python, através do módulo de desenvolvimento gráfico PySide2. A interface gráfica está mostrada e descrita ao final do capítulo.

4.3.1 Biblioteca libIEC61850

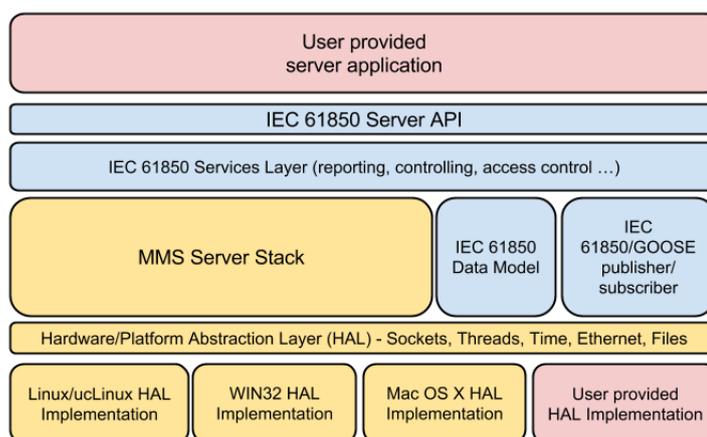
O ponto de partida para o desenvolvimento da plataforma de testes é a biblioteca computacional libIEC61850, concebida em linguagem de programação C. Segundo Zillgith (2019), o projeto libIEC61850 é um conglomerado de funcionalidades de código aberto, baseadas nos protocolos IEC 61850/MMS, IEC 61850/GOOSE e de maneira mais recente, o protocolo IEC 61850-9-2/Sampled Values, possuindo as seguintes funcionalidades:

- Implementação dos protocolos MMS/GOOSE utilizando a pilha de protocolos TCP/IP;
- Implementação estática do modelo de dados do IED por meio da geração de código em C a partir de um arquivo em SCL;
- Implementação dinâmica do modelo de dados do IED por meio de chamadas de API ou por arquivo de configuração;
- Serviços de leitura e escrita tanto para variáveis MMS simples como para variáveis complexas;
- Implementação de serviços para identificação de modelo de dados (self-identification);
- Implementação de serviços para manipulação de Data Sets inclusive criação e exclusão dinâmica de Data Sets;
- Implementação das APIs de clientes e servidores IEC 61850;
- Implementação dos serviços de Relatórios;
- Suporte para todos os modelos de controle descritos pela IEC 61850;
- Implementação dos serviços GOOSE editor/assinante;
- Implementação de camada de abstração de hardware que permite a execução dos serviços disponibilizados pela biblioteca nas plataformas Linux, OS X e Windows;
- Ferramenta de conversão de arquivos SCL para modelos de dados estáticos e dinâmicos de IED;
- Possibilidade de funcionamento em sistemas embarcados, que possuem limitações de hardware.
- Possibilidade de codificação de lógicas de editor e assinante de mensagens IEC 61850-9-2 (Sampled Values) de maneira independente.

No projeto libIEC61850 estão definidas partes relativas ao desenvolvimento de funcionalidades tanto em nível de cliente, quanto em nível de servidor. Ainda segundo Ziilgith (2019), a parte relativa a cliente apresenta, dentre outras possibilidades, a capacidade de geração

automática do modelo de dispositivo MMS fora do modelo de dados IEC 61850, suporte para o modelo de controle IEC 61850, serviços de log, além de modelo de grupo de ajustes. A pilha de implementação para cliente IEC 61850, que também suporta conjuntos de dados, criação de log e relatórios, está mostrada na Figura 15.

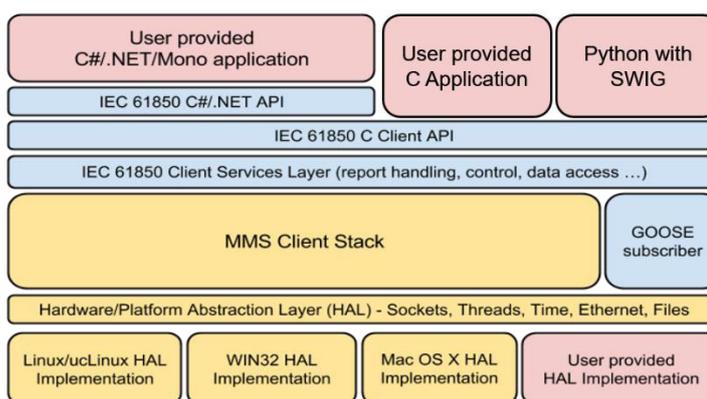
Figura 15 - Pilha de implementação da API de servidor da libIEC61850.



Fonte: (ZILLGITH, 2019).

Em funcionalidades do nível cliente, a libIEC61850 propicia implementação de aplicações clientes compatíveis com a norma IEC 61850, por meio de funções de descoberta de modelo, leitura e gravação de variáveis, além de relatórios e serviços de controle. A Figura 16 demonstra a pilha de implementação da API cliente da biblioteca.

Figura 16 - Pilha de implementação da API de cliente da libIEC61850.



Fonte: (ZILLGITH, 2019).

A libIEC61850 teve seu desenvolvimento baseado, principalmente, nos serviços de comunicação especificados no texto da norma, principalmente na parte 7-2, Serviços de Comunicação Abstratos – ACSI (ZILLGITH, 2019). Uma visão geral destes serviços está mostrada na Tabela 9 presente no anexo A, em que estão especificados os serviços destinados

a cada componente da IEC 61850, sua disponibilidade para uso em aplicações Cliente (C) e/ou Servidor (S) e comentários pertinentes.

A sigla “AA - *Application Association*” destina-se a descrever sobre quais tipos de endereçamento foram implementados os serviços:

- TP - *Two part application association*: Relativo à associação de dois tipos de endereçamento, sendo estes MMS sobre TCP /IP ou *Unicast Sampled Value* na parte superior da Ethernet.
- MC - *Multicast application association*: Relativo a uso de mensagens *multicast* na parte superior da Ethernet, sendo estas GOOSE ou *Sampled Value*.

Em redes de computadores e de comunicação, mensagens enviadas de um ponto ou nó em uma rede de comunicação e que se destinam a um grupo constituído de outros nós distintos na mesma rede são denominadas *multicast*. Em contrapartida, mensagens que partem de um nó ou ponto e se destinam a um nó ou ponto individual da mesma rede são denominadas *unicast* (KUROSE; ROSS, 2013).

Tal como para os serviços abrangidos, a libIEC61850 apresenta em sua documentação, um descritivo da sua divisão em função dos módulos e submódulos existentes, estando estes divididos de maneira mais clara sob o aspecto do nível de aplicação, isto é, quais módulos se destinam a processos de nível cliente e quais se referem aos processos de nível servidor, bem como os módulos que podem ser comuns aos dois níveis, como os módulos que definem tipos de variáveis, funções e objetos a serem utilizados.

NA Tabela 3 está mostrada a lista com os módulos e submódulos (listados abaixo dos módulos principais) contidos no escopo da libIEC61850.

Tabela 3 - Lista de todos os módulos e submódulos pertencentes a 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 report handling services, functions, and data types
1.5	Client side data access (read/write) service functions
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 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 sampled values control block (SVCB) handling
3.7	Handle external access to data model and access control
3.8	General data model definitions, access and iteration functions
3.9	General dynamic model creation functions
3.10	Create data models by configuration files
3.11	Helper functions to create common data classes (CDC) using the dynamic model API
3.12	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	Definitions and functions related to functional constraints (FCs)
4.6	Definitions and functions related to data attribute quality
4.7	Definitions and functions related to IEC 61850 Dbpos (a CODED ENUM) data type
4.8	Definitions and functions related to IEC 61850 Timestamp (UTC Time) data type
4.9	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 server API (for IEC 61850 use IEC 61850 server API instead!)
6.4	MMS client API (for IEC 61850 use IEC 61850 client API instead!)

Fonte: Adaptado de (ZILLGITH, 2019).

Na implementação da plataforma de testes, foi utilizada uma porção considerável dos serviços descritos na Tabela 9 do anexo A, bem como os módulos apresentados na Tabela 3, de modo que estes serão comentados à medida que forem apresentadas as funcionalidades e sua implementação.

Nas versões mais recentes da libIEC61850 foi incluída, de modo nativo, uma API em Python, baseada em um *binding* (link de funções) de toda a biblioteca em C para a linguagem Python, implementada através do compilador de interface “Swig”, um software de

interfaceamento de programas e bibliotecas em C ou C++ com outras linguagens de programação, como Pearl, Python e Ruby (SWIG, 2019).

4.3.2 Desenvolvimento das funcionalidades da plataforma de testes padrão IEC 61850

No desenvolvimento da plataforma de testes foram utilizadas ambas as linguagens de programação disponíveis na libIEC61850, C e Python. As funcionalidades da plataforma destinadas ao nível de cliente (conexão e integração com dispositivos físicos reais) foram implementadas tomando como base a API Python definida em (MELO, 2015), a qual foi atualizada com a inclusão de funcionalidades e reconstruída através do pacote *SWIG*. A atualização da API Python foi definida pela facilidade de integração posterior, da ferramenta desenvolvida, com outras aplicações de nível cliente, desenvolvidas em linguagem Python. Contudo, toda a implementação das funcionalidades destinadas à virtualização de IEDs foi realizada utilizando-se a estrutura básica da libIEC61850 em linguagem C, visando a manutenção das prerrogativas temporais pré-definidas na biblioteca em seu formato padrão.

4.3.2.1 Funcionalidades de nível cliente

No que se refere às funcionalidades de nível cliente, o desenvolvimento foi realizado, basicamente, através do incremento e da adequação da API apresentada em (MELO, 2015), que continha as seguintes funcionalidades traduzidas para o Python:

- Estabelecimento e encerramento de conexão MMS;
- Descoberta de modelo de dados dos IEDs;
- Envio de comandos;
- Leitura de dados analógicos e digitais.

Considerando os propósitos definidos para a plataforma de teste neste trabalho, observou-se vantajosa a adesão de três funcionalidades consideradas importantes para os testes no âmbito da IEC 61850:

- Monitoramento do status de conexão e tentativa de reconexão automática em caso de interrupção indesejada;
- Gerenciamento de múltiplas conexões MMS com IEDs através de um mesmo processo em execução, não necessitando uso de *threads* paralelas à execução principal;

- Ativação e Monitoramento de relatórios (*Buffered ou Unbuffered*) gerados automaticamente através dos *datasets* pré-configurados nos IED, enviados via MMS.

Embora prático e eficaz na implementação das funcionalidades originais e nas duas primeiras funcionalidades adicionais mostradas anteriormente, o uso do SWIG na implementação da funcionalidade de ativação e monitoração de *reports* MMS (terceira funcionalidade adicional) não foi realizada, devido a funcionalidade depender diretamente de características intrínsecas da linguagem C e que não são diretamente traduzíveis para Python. A terceira funcionalidade adicional, foi implementada com sucesso através do uso da metodologia original definida em (MELO, 2015), sendo a única funcionalidade de nível cliente desenvolvida em linguagem C, para a plataforma de testes.

A importância da adesão das funcionalidades descritas se dá pelo fato de que a estratégia de monitoramento de IEDs padrão IEC 61850 mais recomendada é a baseada em *reporting* (registro e alerta de eventos na medida que ocorrem) em detrimento à técnica de varredura (*polling*), uma vez que para a primeira opção, há ganho de eficiência operacional, permitindo ainda o tratamento de Sequências de Eventos (SOE) em aplicações como sistemas supervisórios SCADA e centros de controle (GRAZZIOTIN, 2014).

A Tabela 4 traz um comparativo resumido entre as técnicas de monitoramento possíveis para aplicação em IEDs padrão IEC 61850, a qual reforça ainda o argumento do uso de relatórios pelo fato da possibilidade da tolerância a perdas de comunicação momentâneas, quando do uso de relatórios do tipo *Buffered*, os quais possibilitam a guarda das informações geradas em meio a uma perda de comunicação, sendo estas repassadas quando do restabelecimento da comunicação (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Tabela 4 - Comparação entre monitoramento de IEDs por meio de Varredura e Relatórios.

Método	Possível perda de mudança de estado	Múltiplos Clientes	Armazenamento da Última Mudança de Estado	Cliente Típico
Polling (Sob Demanda)	Sim	Sim	-	Browser
Unbuffered Reporting	Sim*	Sim**	-	GUI Tempo Real
Buffered Reporting	Não	Sim**	Server	SOE

* No caso de falha de comunicação

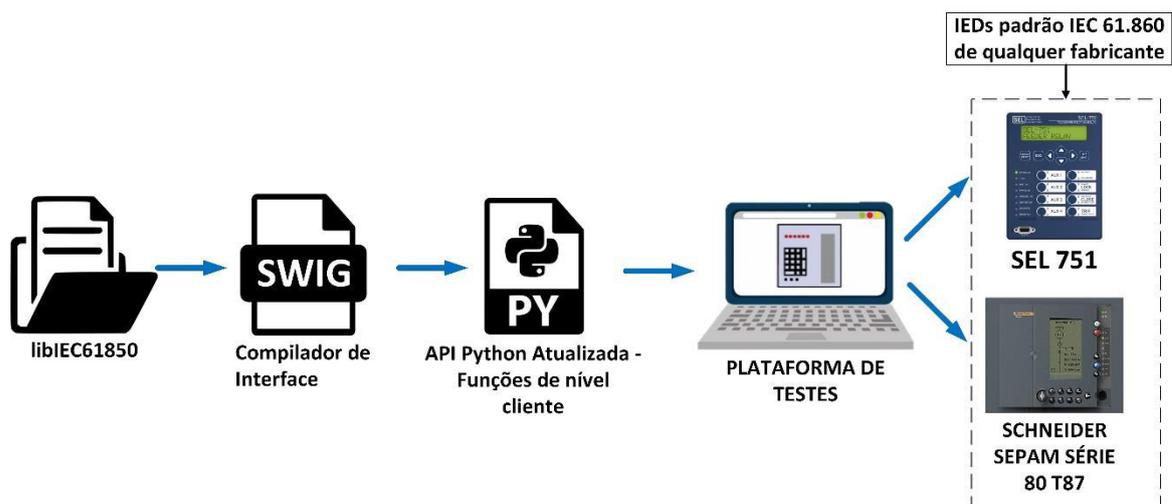
** Com múltiplas instâncias de control blocks, um por cliente.

Fonte: Adaptado de (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2012).

Na Figura 17 é ilustrado o procedimento realizado para adaptação da API Python preexistente para utilização no desenvolvimento das funcionalidades de nível cliente da plataforma proposta. Partindo da biblioteca nativa em linguagem C, em sua versão 1.1.2, utilizou-se o compilador de interface *SWIG*, já disponibilizado pela libIEC61850, para gerar uma tradução para Python de todos os módulos disponíveis na biblioteca original. Baseando-se na API Python inicial desenvolvida em (MELO, 2015), foram implementadas as mesmas funcionalidades, acrescentando-se as duas novas funcionalidades citadas, utilizando-se das funções traduzidas de C para Python através do *SWIG*.

Por fim, as funcionalidades de nível cliente obtidas encontram-se consolidadas na interface gráfica desenvolvida e mostrada mais adiante neste capítulo. As funcionalidades estão disponíveis, ainda, em formato de módulo Python de modo que possam ser utilizadas em quaisquer aplicações em Python destinadas à comunicação com IEDs padrão IEC 61850.

Figura 17 - Esquema de implementação das funcionalidades de cliente da plataforma de testes.

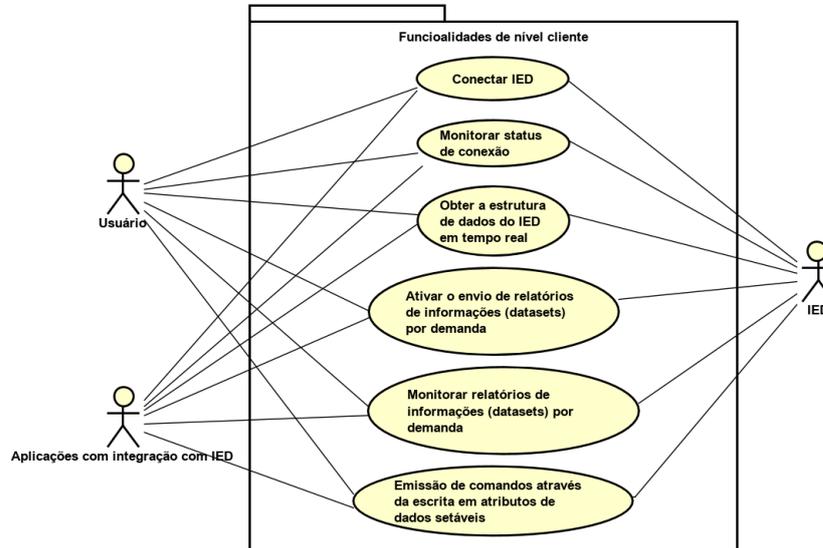


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 é mostrado o diagrama de caso de uso, baseado na linguagem de Modelagem Unificada – UML, das funcionalidades de nível cliente da plataforma desenvolvida, levando em conta o adendo das duas funcionalidades supracitadas. Estão destacados os atores (usuários) que interagem e utilizam as funcionalidades citadas. Observa-se que todas as funcionalidades estão diretamente ligadas ao(s) IED(s) conectado(s), considerando que todas são relativas ao monitoramento e controle de IEDs, assim como estão diretamente ligadas aos usuários, sendo estes, possíveis aplicações de controle e automação que

necessitem de integração com dispositivos padrão IEC 61850, além claro, dos usuários que realizarem os testes com a plataforma.

Figura 18 - Diagrama de caso de uso das funcionalidades de nível cliente da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As funcionalidades listadas no diagrama de caso de uso da Figura 18 estão descritas a seguir, no que se refere à implementação, destinação e modo de operação:

- A. **Conectar IED:** Destina-se a realizar a conexão e desconexão com IED, sendo sua implementação baseada no submódulo 1.1 - *General client side connection handling functions and data types*, da Tabela 3. Para permitir a conexão de qualquer dispositivo, uma instância MMS principal deve ser criada para manipular a conexão com um IED, através da função `IedConnection_create()`, que não possui argumentos. Logo após, utiliza-se a função `IedConnection_connect(IedConnection self, hostname, tcpPort)`, para iniciar a conexão com um IED específico, usando como argumentos a instância MMS criada, o endereço de rede (IP) ou *hostname*, além da porta TCP do IED, que geralmente é igual a 102 para dispositivos padrão IEC 61850. Como citado anteriormente, foi inclusa no escopo da plataforma de testes, a possibilidade de gerenciamento de múltiplas conexões com IEDs distintos sem necessidade de uso de recursos adicionais, sendo essa característica alcançada pelo uso do SWIG para as funcionalidades de nível cliente.

A desconexão é realizada simplesmente pelo uso da função `IedConnection_close()`, sem argumentos, interrompendo a conexão TCP estabelecida. Na API Python, a função de

conexão de IED engloba as duas funções citadas inicialmente, já a de desconexão utiliza somente a última citada, sendo estas funções denominadas *createConnection(hostname, tcpPort)* e *closeConnection()*, respectivamente.

B. Obter a estrutura de dados do IED em tempo real: Funcionalidade desenvolvida com intuito de descobrir (em caso de conexão a novos IEDs) e navegar/coletar informações através estrutura de dados IEC 61850 contida nos IED, considerando a grande quantidade de nós lógicos, dados e atributos de dados existentes. Na implementação desta funcionalidade foram utilizados principalmente os serviços relativos a Dispositivo Lógico (*Logical Device – S5*), Nós Lógicos (*Logical Nodes – S6 e S7*), Dados (*Data – S8 a S11*) e *Dataset* (S12, S13 e S16), mostrados na Tabela 9 do anexo A. Estes serviços compõem parte dos serviços do tipo **Get/Set Operate**, baseados no protocolo MMS e que se mostram a maneira mais prática de realizar aquisição de informações e registro de comandos para os IED (IEC/TR 61850-7-1, 2003).

Os principais submódulos utilizados na implementação desta funcionalidade são 1.5, 1.6 e 1.8 dentre os citados na Tabela 3. As principais funções relativas à descoberta da estrutura de dados, que compõem esta funcionalidade são:

- *getLogicalDeviceList()*: Revela a lista de todos os dispositivos lógicos existentes dentro do IED;
- *getLogicalDeviceDirectory (LogicalDevice)*: Lista todos os nós lógicos contidos dentro do dispositivo lógico passado como argumento;
- *getLogicalNodeDirectory (LogicalNode)*: Mostra os dados existentes dentro do nó lógico passado como argumento;
- *getDataDirectory(Data)*: Mostra dos atributos de dados contidos no dado passado como argumento. Essa função deve ser utilizada consecutivamente até o último atributo de dado existente, seguindo a sequência do caminho de referência do dado.
- *getDataSetDirectory(Dataset)*: Mostra a composição do *dataset* passado como argumento, entre nós lógicos, dados e atributos de dados.

C. Ler dados do IED em tempo real: Compreende funcionalidades relativas à obtenção das informações em tempo real, advindas da estrutura de dados:

- *readMmsFloatValue (Data, FC)*: Retorna o valor do dado do tipo float (*Data*) passado como argumento, sendo utilizado para aquisição de dados analógicos. O argumento FC se refere à *Functional Constraint* que identifica o dado;
- *readMmsStatusValue(Data,FC)*: Semelhante à função anterior, porém, destinada à obtenção de dados do tipo inteiro.
- *readDataSetValues (Dataset)*: Retorna os valores contidos nos dados e atributos de dados do respectivo *dataset* passado como argumento.

Associadas às funcionalidades de obtenção de estrutura de dados, as funcionalidades de leitura de dados permitem implementar monitoramento baseado na metodologia de varredura ou *polling*, que coleta informações constantemente, mediante um pequeno intervalo de tempo pré-definido.

D. Ativar e Monitorar *reports* (relatórios via *Datasets*) através de MMS e supervisionar status de conexão com possibilidade de reconexão automática:

Funcionalidade destinada a possibilitar o monitoramento e captura dos relatórios gerados automaticamente por um IED, à medida que algum dado sofra alteração de valor, como por exemplo, na atuação de alguma função de proteção ou o próprio sinal de *TRIP* do IED, desde que os respectivos nós lógicos, dados ou atributos de dados estejam contidos no *dataset* monitorado quando da detecção de contingência pelo IED.

Para construção desta funcionalidade, os serviços utilizados são todos aqueles relativos à *Reporting*, isto é, os serviços S24 a S29 da Tabela 9 do anexo A, que compreendem funções de identificação, configuração e ativação de *Reporting Control Blocks* (RCB). Já em termos de módulos da libIEC61850, foram utilizados o submódulos 1.1, no que se refere às funções de monitoramento da conexão MMS e de reconexão automática em caso de perda temporária de comunicação, e 1.4, relativo às funções de gerenciamento dos relatórios (*reporting*) dos IED.

Nesta funcionalidade, as funções que correspondem aos serviços *SetBRCBValues* (*Buffered reports*) ou *SetURCBValues* (*Unbuffered reports*) são utilizados para ativar a geração dos relatórios relativos aos RCB já criados quando da configuração dos *datasets* no momento da preparação dos IED. Uma vez ativados no IED, os relatórios são monitorados através de uma função do tipo *call-back*, ou seja, uma função destinada a realizar alguma tarefa quando da ocorrência de algum evento detectável, sendo o evento, neste caso, o recebimento de um relatório vindo do IED. Os relatórios relacionados à

mudança de valor/estado dentro do *dataset* monitorado são tratados e disponibilizados para o usuário ou aplicação através de um arquivo em formato .json contendo um dicionário em Python com a identificação e os valores dos dados do *dataset* monitorado, no momento da geração do relatório.

Para monitorar um *dataset* específico de um IED conectado, basta informar a referência do *dataset*, bem como a referência do RCB vinculado a este. No que se refere ao monitoramento de conexão MMS com o IED e a reconexão automática, o funcionamento também se baseia em uma função *call-back*, que após ser inicializada, monitora o status da comunicação com o IED observado, ativando as funções de conexão com o IED em caso de perda de comunicação, limitando as tentativas a um número de vezes razoável para considerar a falha permanente, indicando a necessidade de intervenção para o reestabelecimento da conexão.

- E. **Emitir comandos para o IED através da escrita em atributos editáveis (escrita e leitura):** Funcionalidade definida com objetivo de controlar o IED através do envio de comandos por meio do protocolo MMS. Considerando a modelagem de dados característica da norma IEC 61850, os comandos em um IED podem ser realizados editando os valores de atributos de dados que possuam a característica de escrita/leitura, isto é, atributos editáveis, como atributos relativos a controle de chaves/disjuntores, *trip* e grupos de ajuste. Os serviços utilizados nessa funcionalidade são do tipo **Control**, principalmente o serviço S4 – *Operate* mostrado na Tabela 9 do anexo A. Para implementação dessa etapa, foram utilizados os submódulos de escrita de atributos de dados e controle (1.5 e 1.7, respectivamente) citados na Tabela 3.

Para enviar um comando a um IED conectado, basta possuir a referência (caminho) do atributo a ser modificado. Caso o atributo informado não seja editável ou esteja bloqueado para tal, a função *operate* retorna um valor negando a ação. Há ainda as funções de escrita em atributos editáveis, porém, relacionados a valores analógicos, sendo utilizados em edição de grupos de ajuste e informações de identificação do IED.

4.3.2.2 Funcionalidades de nível servidor

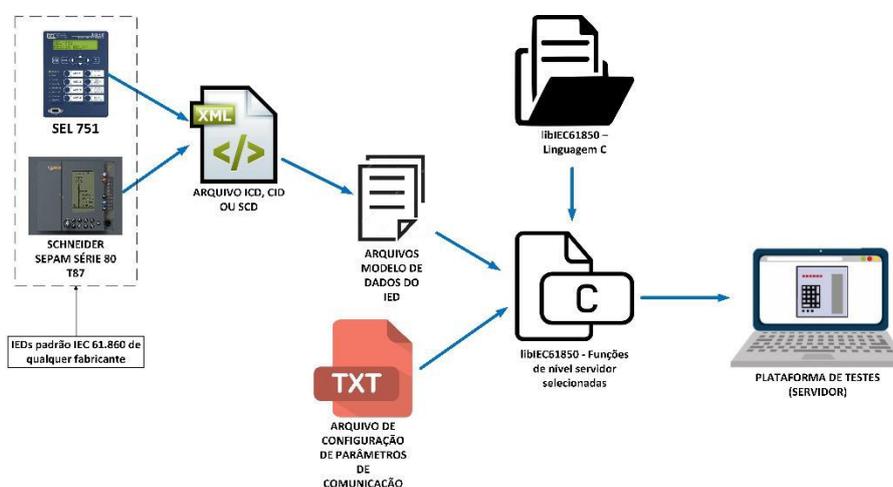
Para realizar a virtualização de um dispositivo qualquer, são necessárias ferramentas que possam reproduzir o comportamento do sistema/processo original. Este é o objetivo principal das funcionalidades de nível servidor da plataforma, reproduzir, a nível de

comunicação no padrão IEC 61850, qualquer IED existente ou ainda, de maneira mais complexa, uma proposta de estrutura de dados para um IED em desenvolvimento.

Na Figura 19 está ilustrado o procedimento realizado no desenvolvimento das funcionalidades de nível servidor da plataforma de testes. Uma vez que o intuito desta parte da plataforma é proporcionar uma ou mais instâncias virtuais de servidores IEC 61850 (IEDs), é necessário partir de um arquivo descritivo de um IED (real ou fictício). Como explicado no Capítulo 3, a norma IEC 61850 define alguns formatos de arquivos que compõem a linguagem de configuração de uma rede de comunicação implementada, tais arquivos descrevem cada etapa desta rede.

O formato mais recomendado para o arquivo descritivo de IED que se deseja virtualizar, a ser usado na plataforma para virtualização, é o formato CID, justamente por carregar todas as configurações já realizadas no IED. Conforme será descrito mais à frente, uma das funcionalidades é responsável por converter o arquivo CID (ou outro disponível, como ICD ou SCL) em dois arquivos que carregam o modelo de dados do IED em formato desejável para o uso na libIEC61850. Todas as funcionalidades foram desenvolvidas diretamente na linguagem C, como já mencionado, sendo posteriormente integradas à interface gráfica por meio do módulo Python “subprocess” que permite a execução de arquivos compilados em C, chamados diretamente do Python. Foi utilizado, para dar suporte à etapa de virtualização e proporcionar um nível razoável de genericidade ao processo de virtualização, um arquivo do tipo .txt que carrega parâmetros básicos para a virtualização e que são inerentes ao modelo do IED a ser virtualizado. O modelo deste arquivo está mostrado no apêndice A.

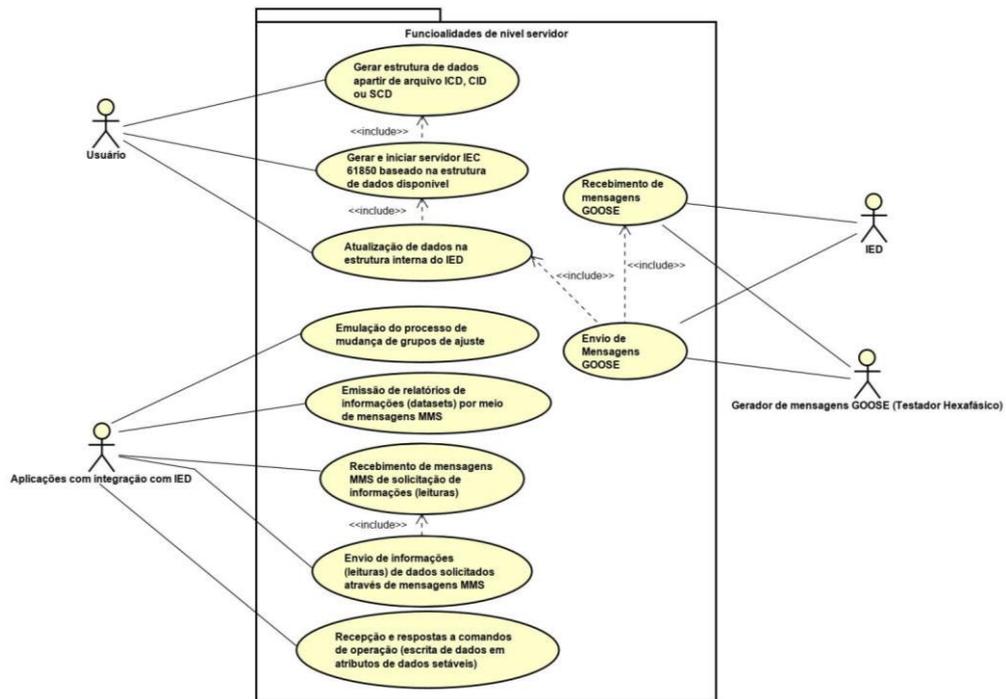
Figura 19 - Esquema de implementação das funcionalidades de servidor da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 20 está mostrado o diagrama de caso de uso, em linguagem UML, das funcionalidades de nível servidor da plataforma de testes desenvolvida, estando estas mostradas de maneira mais detalhada. São mostrados os atores envolvidos, sendo estes os próprios usuários que realizam os testes com a plataforma, ou aplicações que necessitem integração com IEDs padrão IEC 61850.

Figura 20 - Diagrama de caso de uso das funcionalidades de nível servidor da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Basicamente, as funcionalidades se dividem em 5 grupos principais: Geração do modelo de dados do IED, Criação de servidor IEC 61850 a partir da estrutura de dados obtida, Comunicação MMS, Comunicação GOOSE e Grupos de ajustes editáveis. Os grupos de funcionalidades mencionados são formados pelas características das funcionalidades que os compõem, não estando um grupo dissociado do outro, uma vez que há muitos pontos em comum entre as funcionalidades. Estão detalhadas abaixo, as funcionalidades mostradas na Figura 19, em sua divisão em grupos, mostrando o objetivo da funcionalidade, quais os serviços IEC 61850 abrangidos e quais ferramentas da libIEC61850 foram utilizadas:

- A. **Geração do modelo de dados do IED:** Como mencionado anteriormente, o primeiro passo para instanciar um servidor IEC 61850, por meio da libIEC61850, é possuir um modelo do IED (*ied model*) que será virtualizado, estando esta funcionalidade dedicada

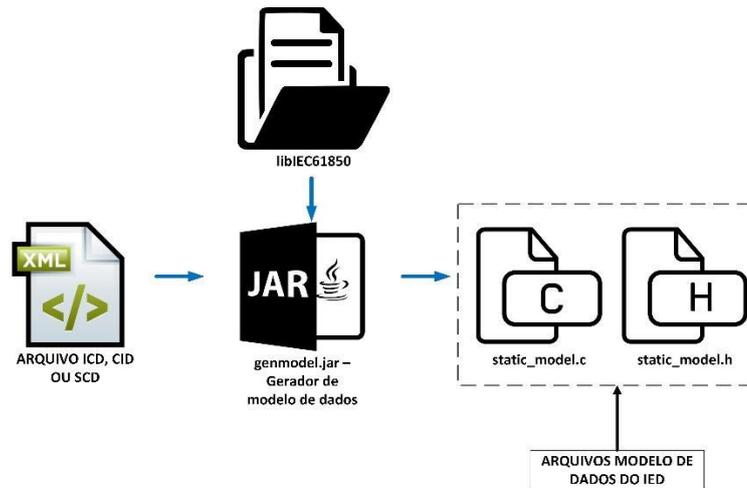
a obtenção desde modelo de dados. Neste momento, há de se observar que, de acordo com (ZILLGITH, 2019), há três formas de criar um modelo de dados para um servidor IEC 61850, sendo a primeira delas, a criação de um modelo estático do IED, isto é, uma representação do IED físico que não pode ter sua estrutura alterada em tempo de execução da virtualização, sendo esta opção a utilizada neste trabalho.

A segunda maneira se dá através das funções de criação de estruturas de dados presentes na API de servidor, em que o modelo de IED é criado durante a execução da virtualização, podendo-se alterá-lo mediante o código implementado. O terceiro meio utiliza-se de um arquivo de configuração simples para alimentar a aplicação com o modelo do IED de interesse, porém, de modo menos eficiente e robusto, oferecendo menos possibilidades de implementação.

Considerando o objetivo da virtualização proposta neste trabalho, de possibilitar a simulação de um IED real no que se refere à comunicação padrão IEC 61850, a primeira opção é a que melhor se encaixa por retratar fielmente o IED de interesse, permitindo manipulações nos valores dos atributos de dados contidos na estrutura e por possibilitar simular todas as funcionalidades de comunicação possíveis. A criação do modelo de dados se dá pelo uso de uma ferramenta denominada gerador de modelo (*model generator*), desenvolvida em linguagem Java e que está presente na libIEC6150 no diretório *tools/model_generator*, no formato de um arquivo Java executável (*Executable Jar File - .jar*).

Na Figura 21 está ilustrado o processo de obtenção do modelo de dados do IED para a virtualização, em que é inserido o arquivo CID, ICD ou SCL no diretório do gerador de modelo e utilizado o comando “*java -jar genmodel.jar my_model*” no terminal (Linux) ou no CMD (Windows), em que “*my_model*” é o nome do arquivo original. O retorno do comando de geração de modelo é a criação de dois arquivos nos formatos .c (arquivo de codificação em linguagem C) e .h (arquivo de biblioteca, onde se localizam funções). Estes arquivos passam a carregar todas as informações do IED, inicialmente contidas no arquivo CID/ICD/SCL, no formato oriundo da modelagem de dados da libIEC61850, servindo de base para toda a virtualização a ser executada.

Figura 21 - Esquema de geração do modelo de dados do IED a partir da libIEC61850.



Fonte: Elaborado pelo autor.

B. Criação de servidor IEC 61850 a partir da estrutura de dados obtida: Refere-se à funcionalidade de instanciar um servidor IEC 61850 em si, baseado na estrutura de dados do IED obtida dos arquivos ICD/CID e convertida para a modelagem necessária. Essa funcionalidade é a base para execução das demais funcionalidades de nível servidor da plataforma, pois captura o modelo de dados disponível externamente, realiza configurações iniciais e inicia a virtualização. A virtualização se mantém em execução por meio de um loop infinito, de modo a permitir a execução paralela das demais funcionalidades implementadas, como as comunicações MMS e GOOSE, a atualização de valores da estrutura interna do IED e a simulação do recurso de grupos de ajustes editáveis.

De modo geral, o submódulo da libIEC61850 utilizado nesse conjunto de funcionalidades é o de número 3.1 - *General server setup and management functions*, da Tabela 3. Este submódulo se baseia em funções libIEC61850 de prefixo *IedServer*, que compreendem configuração inicial de comunicação (interface Ethernet e endereço IP), ativação do servidor IEC 61850, monitoramento das conexões TCP (clientes conectados ao servidor) e encerramento do servidor (quando necessário).

C. Comunicação MMS: Neste conjunto de funcionalidades estão representadas as capacidades, dentro do processo de virtualização, de enviar e receber mensagens de maneira vertical, através do protocolo MMS. Os principais serviços presentes nas funcionalidades de comunicação MMS são os do tipo *Get/Set-Operate* e serviços relativos à *dataset*, sendo estes S8 a S11 e S12 a S16, respectivamente, mostrados na

Tabela 9 do anexo A. O submódulo 3.3 - *Data model access and data update*, da Tabela 3, foi utilizado para permitir a atualização dos valores de atributos de dados na estrutura interna do IED virtualizado. O submódulo possui funções de prefixo *IedServer* voltadas à alteração/atualização dos valores de atributos de dados, conforme o tipo do atributo de dado (inteiro, decimal, string, entre outros).

No contexto da plataforma, ao se inicializar a virtualização, automaticamente já estará disponível a conexão ao servidor IEC 61850 criado, através do protocolo MMS, em que os clientes podem realizar aquisição e alteração (quando aplicada) de dados da estrutura interna, além de leitura e monitoramento de *datasets*. Considerando que o modelo de dados inicialmente criado através de arquivos de configuração ICD ou CID que possuam RCBs pré-cadastrados, a atualização de dados na estrutura interna do IED irá “disparar” *reports* automaticamente, disponibilizando a informação aos clientes que estiverem monitorando o *dataset* respectivo.

A atualização de dados na estrutura interna do IED virtualizado está disponível na plataforma através da interface gráfica, facilitando o acesso aos atributos de dados e a sua atualização. Ainda no contexto da comunicação MMS, a libIEC61850 permite a criação de modelos de controle, através de funções *call-back*, para definir respostas automáticas do servidor a alterações de valor de atributos de dados realizadas por clientes conectados, aumentando a possibilidade de simulações de comportamento de IEDs.

- D. **Comunicação GOOSE:** As funcionalidades relativas à comunicação por meio de mensagens GOOSE são responsáveis pela comunicação horizontal, entre IEDs, tendo no contexto da plataforma de testes, o intuito de testar a comunicação do IED virtualizado com os outros IEDs (físicos ou também virtualizados) pertencentes aos testes em questão. Para o seu desenvolvimento, foram utilizados os serviços relativos a *GOOSE Control Blocks*, sendo estes os serviços S35 a S39 da Tabela 9 do anexo A, dentre os quais, destacam-se *SendGOOSEMessage* (S35), *GetGoCBValues* (S38) e *SetGoCBValues* (S39), uma vez que o primeiro se refere à ação de enviar (editor) e receber (assinante) mensagens GOOSE propriamente dita, já os dois últimos se referem à leitura (S38) e edição (S39) de parâmetros do GoCB relativo a mensagens a serem capturadas (assinadas) ou enviadas (publicadas).

Os submódulos utilizados na implementação da comunicação GOOSE foram, principalmente, 3.1 - *General server setup and management functions* e 4.9 - *IEC 61850*

GOOSE subscriber API. O primeiro módulo, além de possuir as funcionalidades de instanciação do servidor como já mencionado anteriormente, possui também as funções relativas ao comportamento de editor de mensagens GOOSE, isto é, a configuração do envio de mensagens GOOSE relativas aos GoCB pré-configurados nos arquivos CID/ICD originais e que passam a compor a estrutura de dados do IED virtual. Tais funções se referem à definição da interface Ethernet que deverá ser utilizada, através da função *IedServer_setGooseInterfaceId*, e a ativação do envio de mensagens GOOSE, através da função *IedServer_enableGoosePublishing*, seguindo o algoritmo padrão de envio mostrado no capítulo 3, no momento em que os atributos de dados contidos nos *dataset* do IED virtualizado sejam alterados através da interface gráfica, por exemplo. O módulo *IEC 61850 GOOSE subscriber API* possui as funções relativas ao comportamento de assinante de mensagens GOOSE, ou seja, a configuração da captura de mensagens GOOSE vindas de outros dispositivos. As principais funções destinam-se a criar e configurar o *subscriber* (assinante) das mensagens a serem recebidas, o qual precisa da identificação (*AppId*) das referidas mensagens GOOSE para correta captura e posterior ativação das ações de resposta. Tais ações de resposta podem ser criadas, novamente, através de funções do tipo *call-back*, que no contexto da libIEC61850, são denominadas *Listener* e foram utilizadas no desenvolvimento da plataforma para permitir testes com sequência de eventos (envio e recebimento de mensagens GOOSE). Assim como no primeiro módulo deste grupo de funcionalidades, é utilizada uma função para definir a interface Ethernet utilizada, denominada *GooseReceiver_setInterfaceId*. Vale registrar que no caso de não configuração da interface Ethernet, será utilizada a interface padrão *eth0*, ou seja, a placa de rede padrão presente no computador em uso.

- E. **Grupos de ajustes editáveis:** Esta funcionalidade se destina à realização da emulação do processo de mudança e edição de grupos de ajustes, quando o IED em questão possui esta capacidade também no contexto da norma IEC 61850, através do protocolo MMS, em que é possível, por meio de atributos de dados setáveis, mudar o grupo de ajustes ativo no IED e ainda, editar os grupos de ajustes disponíveis (valores parametrizados) através da manipulação destes atributos.

Estão contemplados nesta etapa, os serviços do tipo *Setting group control*, isto é, os serviços S18 ao S23 da Tabela 9 presente no anexo A, assim como foram utilizados o submódulo 3.4 - *Server side setting group handling*, que se destinam exclusivamente à criação, edição e seleção dos grupos de ajustes dentro do servidor IEC 61850

instanciado. O princípio de funcionamento se baseia na existência, dentro do servidor IEC 61850, de no mínimo um *Setting Group Control Block* - SGCB, serviço responsável pelo manuseio e controle dos grupos de ajustes dentro de um IED ou, mais genericamente, um servidor IEC 61850. No contexto da virtualização, o controle dos grupos de ajuste se dá pelo uso de funções do tipo *call-back* que monitoram o(s) SGCB(s) existente(s), gerando uma sequência pré-definida de ações quando for detectada ação de mudança ou edição por parte do usuário.

É importante notar que, diferentemente dos RCBs, que são inerentes a *datasets* e portanto, flexíveis a ponto de poderem ser criados e editados, no IED, à vontade do usuário, os SGCBs estão diretamente ligados à capacidade do IED para manipulação de grupos de ajustes, ou seja, se o IED não possui esta característica, o modelo de dados criado a partir do arquivo CID disponibilizado não apresentará um SGCB, não sendo viável a emulação desta característica.

No aspecto da mudança de grupos de ajustes, a virtualização desenvolvida é uma maneira eficiente de demonstrar a factibilidade da troca ou edição de grupos de ajustes em IEDs, através do padrão IEC 61850, por representar de modo efetivo o processo necessário para mudar o grupo de ajustes ativo ou editar os grupos de ajustes através da escrita em atributos de dados editáveis, dentro da estrutura de dados do IED.

4.3.2.3 Simulador de mensagens GOOSE

Embora já exista dentro das funcionalidades de nível servidor, a comunicação por meio de mensagens GOOSE, a criação do simulador de mensagens GOOSE genéricas se baseou no sistema de testes de interoperabilidade mostrado na Figura 1, presente no Capítulo 1, em que a disponibilidade dessa funcionalidade é motivada pela possibilidade de gerar grande quantidade de tráfego na rede de comunicação em que os equipamentos serão instalados e possivelmente, verificar a influência da sobrecarga de informações na rede sobre a atuação dos equipamentos existentes. Em (PEREIRA JÚNIOR; MARTINS; LOURENÇO, 2009) foram estudadas as consequências para uma rede de comunicação IEC 61850 da sobrecarga com mensagens GOOSE. O experimento baseou-se na geração de 15.000 mensagens por segundo, ao passo que se executavam testes de seletividade lógica entre dois IEDs conectados na rede, a fim de medir a performance em meio ao grande tráfego.

A construção do simulador de mensagens GOOSE genéricas também utilizou a biblioteca libIEC61850, assim como toda a plataforma de testes, diferindo da funcionalidade de comunicação GOOSE da plataforma apenas no que se refere à direcionalidade e no modo de

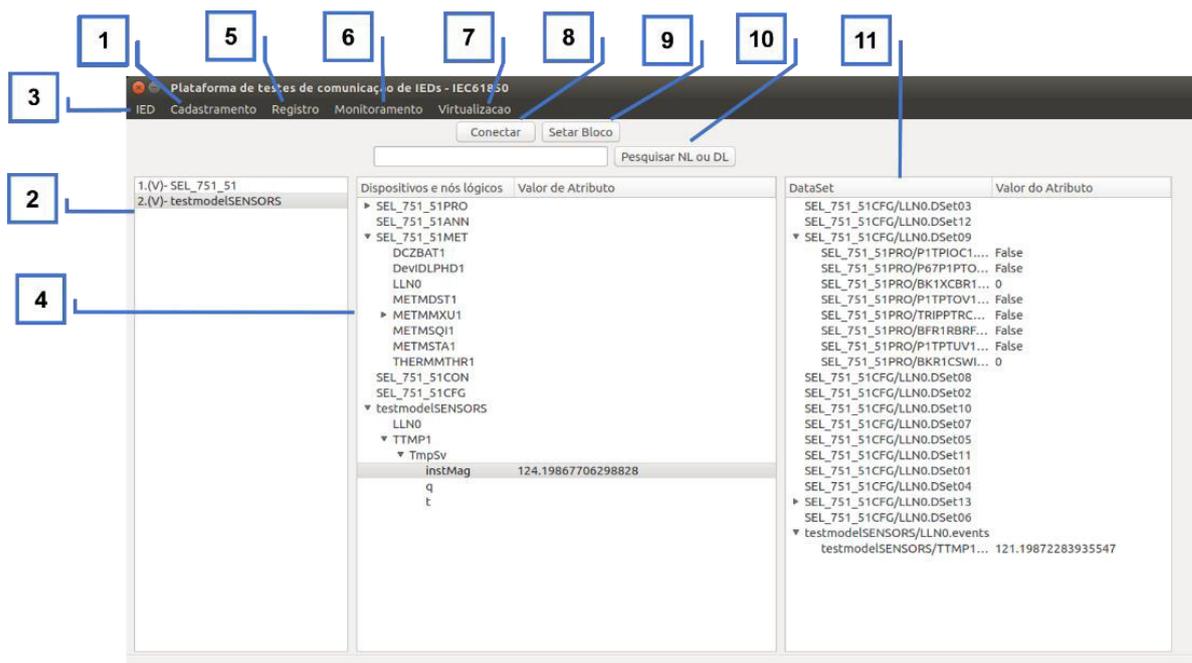
criação das mensagens. As mensagens são geradas (publicadas) sem preocupação com os destinatários, contendo informações arbitrárias e que não deverão, a priori, ser assinadas por outro equipamento membro da rede de comunicação. O processo de geração das mensagens não utiliza uma base de dados de um IED, tal como na virtualização, apenas cria uma instância de conexão com a rede Ethernet e através de um *dataset* arbitrário, publica as informações na rede em formato de mensagens GOOSE.

É possível escolher, a cada simulação, quantos disparos deverão ser realizados dentro do intervalo de 1 (um) segundo, tomando-se previamente, o cuidado de respeitar o tempo que a plataforma leva para realizar o disparo de um pacote de mensagens. O simulador de mensagens GOOSE genéricas encontra-se também integrado à interface gráfica da plataforma de testes.

4.3.2.4 Interface gráfica da plataforma de testes

Para consolidação das funcionalidades da plataforma de testes foi desenvolvida uma interface gráfica, em linguagem Python, através do pacote PySide. O intuito principal da interface é permitir o teste e integração com IEDs reais disponíveis, visualizando sua estrutura interna e executando o monitoramento por meio de *report*, bem como disponibilizar as funcionalidades de virtualização de IEDs de maneira mais prática. A Figura 22 ilustra a interface gráfica implementada, indicando numericamente os seus componentes.

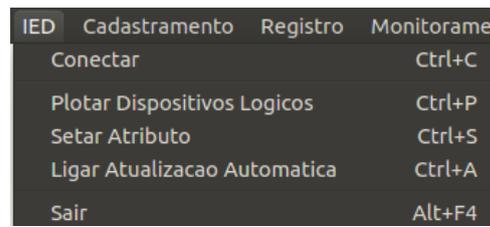
Figura 22 - Interface gráfica da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1. Menu de cadastramento de IED: Permite o cadastro do dispositivo a ser conectado mediante a inserção do endereço IP e Porta de comunicação.
2. Lista dos IEDs cadastrados e/ou conectados: Uma vez cadastrado, o IED aparece na lista através das informações inseridas (IP e Porta), e quando a conexão for estabelecida, o nome do IED é inserido.
3. Menu relativo aos IEDs a serem conectados (reais e virtuais), contendo as opções de interesse para conexão de IEDs, plotagem da estrutura interna do IED e atualização automática de leituras já realizadas (técnica de varredura por *polling*). Nesse menu está também a opção de emitir comandos ao(s) IED(s), através da opção de escrita em atributos de dados ajustáveis. A Figura 23 ilustra o menu de IED e suas funções disponíveis.

Figura 23 - Menu de IED da interface gráfica da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. Lista de plotagem da estrutura dos IED conectados: Mostra, na primeira coluna, os dispositivos lógicos, nós lógicos, dados e atributos de dados dos respectivos IEDs e os seus valores dos atributos de dados na segunda coluna. Tais valores são atualizados automaticamente, caso a função contida no Menu de IED estiver ativada. Esse componente mostra importância na plataforma não apenas na exibição de dados dos IEDs conectados, mas também da alteração de atributos de dados, no caso de IEDs virtualizados, uma vez que selecionando um atributo de dado qualquer, é possível realizar a atualização através da função contida no Menu de virtualização (item 7) que está mencionado adiante;
5. Menu de registo relativo: Permite guardar as informações já coletadas do(s) IED(s) conectados, criando um log de registro de informações;
6. Menu de Monitoramento: Destina-se à ativação e supervisão de relatórios (*reports*) dos(s) IED(s) de interesse. Para uso desta funcionalidade, o IED precisa ter sido cadastrado informando o *dataset* que se pretende ativar e monitorar os relatórios;

7. Menu de virtualização: Dedicado a representar o conjunto das funcionalidades de virtualização da plataforma, permitindo emular um IED como descrito anteriormente, estando também disponível o simulador de mensagens GOOSE para testes de capacidade da rede de comunicação;
8. Botão de atalho para conectar IED: Permite conectar IED que possua informações inseridas na plataforma através do menu de cadastramento;
9. Botão de atalho para escrita em atributos editáveis: Altera o valor de um atributo de dado editável quando este estiver pré-selecionado; quando o atributo não for editável, um aviso é informado;
10. Barra e botão de pesquisa de Dispositivo ou Nó Lógico: Pesquisa no IED selecionado, o atributo de dado de interesse que já tiver sido localizado anteriormente na lista de plotagem;
11. Lista de plotagem da estrutura dos *datasets* disponíveis em um determinado IED: Quando cadastrado, se as informações de identificação dos *datasets* estiverem disponíveis, a lista é preenchida com os *datasets* configurados no IED conectado, atualizando os valores dos atributos automaticamente, caso a função esteja ativada.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as funcionalidades que compõem a plataforma de testes desenvolvida neste trabalho, dividida entre funcionalidades de nível cliente e servidor. As funcionalidades relativas ao nível cliente se destinam a testes e integração com IEDs reais, mediante a conexão, obtenção da estrutura interna com leitura dos dados em tempo real, monitoramento de relatórios (*reports*) via MMS e monitoramento do status de conexão do IED. No que se refere a funcionalidades de nível servidor, seu intuito é a virtualização/simulação de IEDs não disponíveis fisicamente, através da instanciação de um servidor IEC 61850, possuindo as capacidades de comunicação nos protocolos MMS e GOOSE, além de possibilitar a troca e edição de grupos de ajustes editáveis.

A virtualização proporciona a instanciação de toda a estrutura de dados do IED virtualizado, permitindo simular a comunicação predefinida através do uso da estrutura de dados virtualizada. A estrutura de dados interna do IED virtualizado pode ser editada via interface gráfica ou por meio de testes sequenciados através de mensagens GOOSE, utilizando um testador universal ou outro dispositivo capaz de emitir mensagens GOOSE.

Foi mostrada a principal ferramenta utilizada no desenvolvimento da plataforma, a biblioteca computacional libIEC61850, um projeto de código aberto, disponível nas linguagens C e Python, além da interface gráfica desenvolvida para consolidação das funcionalidades desenvolvidas.

5. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTES

Neste Capítulo são apresentadas simulações realizadas com a plataforma de testes. Para tanto, foi montada em laboratório, uma estação de trabalho completa para uso da plataforma, permitindo a realização de testes para validação de todas as funcionalidades desenvolvidas.

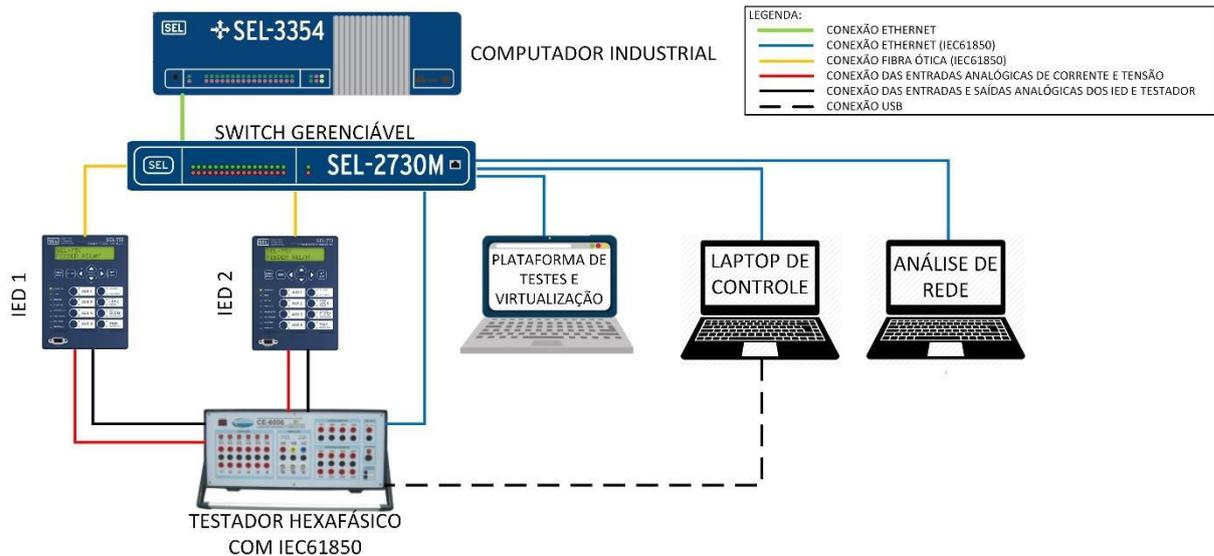
5.1 Montagem da Estação de Trabalho para Realização dos Testes

A estação montada é formada por testador hexafásico CE-6006 do fabricante Conprove, que possui pacote completo de softwares para teste e calibração de dispositivos de proteção, além de suporte para comunicação por meio de mensagens GOOSE, um switch gerenciável SEL 2730M, com funcionalidades de comunicação no padrão IEC 61850, além de 2 IEDs reais, modelo SEL 751 da Schweitzer Engineering Laboratories. Adicionalmente, compõem a estação de trabalho, três laptops, o primeiro destinado ao controle e configuração dos IEDs e da mala de testes, o segundo destinado a comportar a plataforma de testes desenvolvida, o terceiro configurado para analisar e capturar o tráfego da rede de computadores, por fim, um computador industrial SEL-3354 que possui um sistema SCADA do fabricante Elipse.

Na realização dos testes e validações da plataforma desenvolvida, foram utilizados software de análise de tráfego de redes de comunicação (*Wireshark*), softwares de controle e operação da mala de testes (*Conprove Control Center*), os softwares de parametrização dos respectivos IED (*AcSELerator QuickSet*, *AcSELerator Architect* e *CET850*), além de software comercial dedicado à comunicação padrão IEC 61850, denominado OMICRON *IEDScout*. Na Figura 24 está ilustrada a estação de trabalho montada para validação da plataforma. De modo geral, a própria estação de trabalho montada pode ser vista como a plataforma de testes de IED padrão IEC 61850 completa, a exemplo do que foi mostrado na Figura 1.

Todos os equipamentos da Figura 24, conectados diretamente ao *switch* gerenciável, estão, portanto, conectados à rede Ethernet fornecida pelo *switch*. Para permitir melhor organização dos testes e consecutiva praticidade de análise de tráfego da rede de comunicação, optou-se por utilizar o endereçamento manual (IP fixo), em cada equipamento conectado, visto a importância de conhecer o IP utilizado por cada equipamento, além da quantidade de equipamentos ser pequena. No apêndice B estão mostrados os passos para configuração da comunicação entre dispositivos envolvidos nos testes.

Figura 24 – Plataforma montada em bancada para validação da plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5 estão mostrados os equipamentos diretamente conectados à rede Ethernet e seus respectivos endereços IP configurados.

Tabela 5 – Endereços IP dos dispositivos conectados à rede Ethernet para realização dos testes.

Dispositivo	Função	Endereço IP
Relé SEL 751	Dispositivo de proteção e controle	192.168.1.51
Relé SEL 751	Dispositivo de proteção e controle	192.168.1.52
Relé SEPAM T87	Dispositivo de proteção e controle	192.168.1.53
Laptop 1	Plataforma de testes de IED	192.168.1.10
Laptop 2	Controle e configuração da mala de testes	192.168.1.200
Laptop 3	Análise de tráfego da rede de comunicação	192.168.1.57

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Casos de Teste

Para testar e validar as funcionalidades desenvolvidas para a plataforma de testes de IEDs, foram criados 5 casos de testes, divididos de acordo com as funcionalidades da plataforma e o tipo de comunicação a ser validada, no que se refere a MMS e mensagens GOOSE. Na Tabela 6 estão descritos os casos de testes utilizados na validação da plataforma de testes IEC 61850.

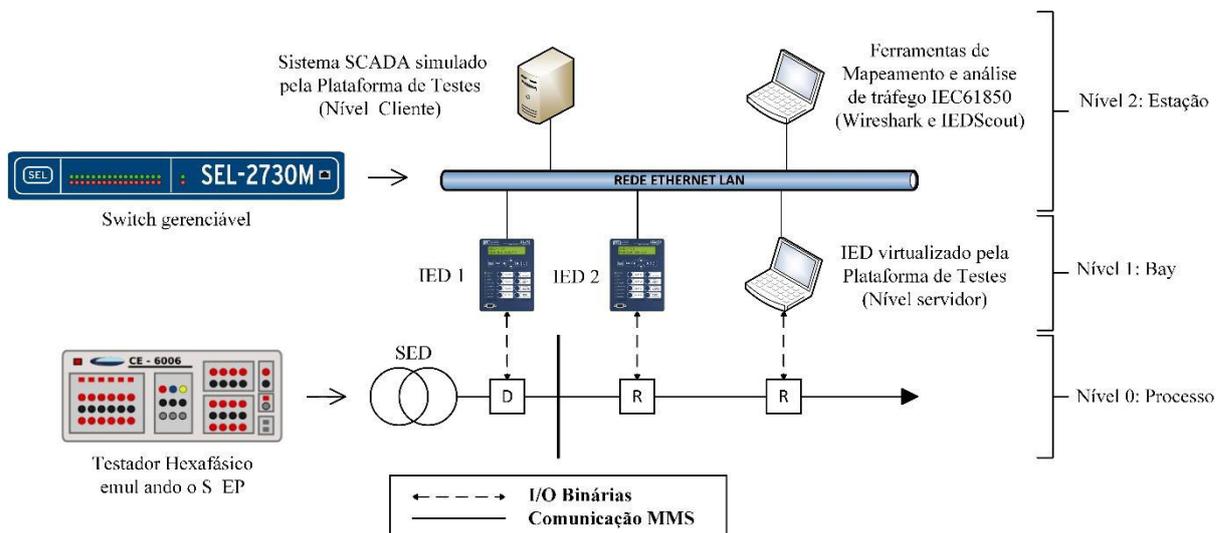
Tabela 6 – Casos de teste utilizados na validação da plataforma.

Nº	Caso de Teste	Tipo de Comunicação	Nível das Funcionalidades da Plataforma
I	Comunicação Vertical entre a plataforma (simulando atuação de um SCADA) e IEDs	MMS	Cliente
II	Recebimento de <i>reports</i> MMS pela plataforma	MMS	Cliente
III	Envio de <i>reports</i> MMS pela plataforma via virtualização	MMS	Servidor
IV	Comunicação Horizontal entre IEDs reais e virtuais	GOOSE	Servidor
V	Geração de mensagens GOOSE em grande quantidade para testes de performance da rede de comunicação	GOOSE	NA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25 está ilustrada a estrutura de testes e validação para os casos de uso que se referem à comunicação pelo protocolo MMS, em que se observa a abrangência dos três níveis do sistema de automação de subestações e redes elétricas, uma vez que se trata de uma comunicação vertical. A rede ethernet é estabelecida pelo switch gerenciável, conectando a Plataforma de testes e suas funcionalidades aos IEDs e as ferramentas de mapeamento e análise de tráfego, já o nível de processo (considerado aqui como sendo o SDMT) é emulado pelo Testador Hexafásico.

Figura 25 – Esquemático da estrutura de validação das funcionalidades relativas à comunicação MMS.

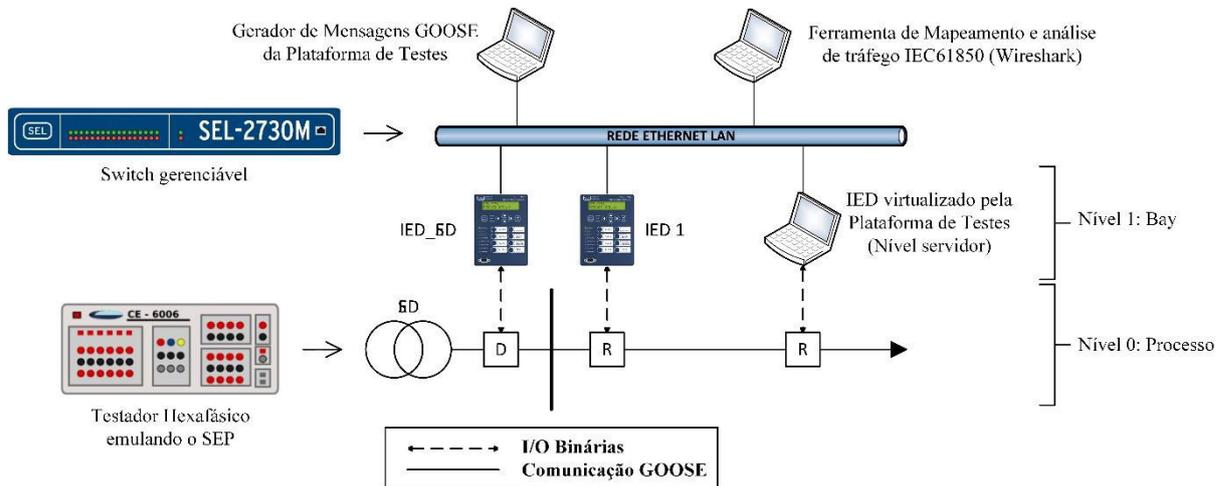


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 26 está ilustrada a estrutura de testes e validação para os casos de uso que se referem à comunicação por mensagens GOOSE, que por se tratar apenas de comunicação horizontal, entre IEDs, abrange apenas os níveis Processo e Bay. De maneira semelhante à estrutura anterior, a rede ethernet é estabelecida pelo switch gerenciável, conectando entre si, a Plataforma de testes e suas funcionalidades, os IEDs, as ferramentas de mapeamento e análise

de tráfego e o gerador de mensagens GOOSE, além da presença do nível de processo (considerado aqui como sendo o SDMT) que está emulado pelo Testador Hexafásico.

Figura 26- Esquemático da estrutura de validação das funcionalidades relativas à comunicação GOOSE.



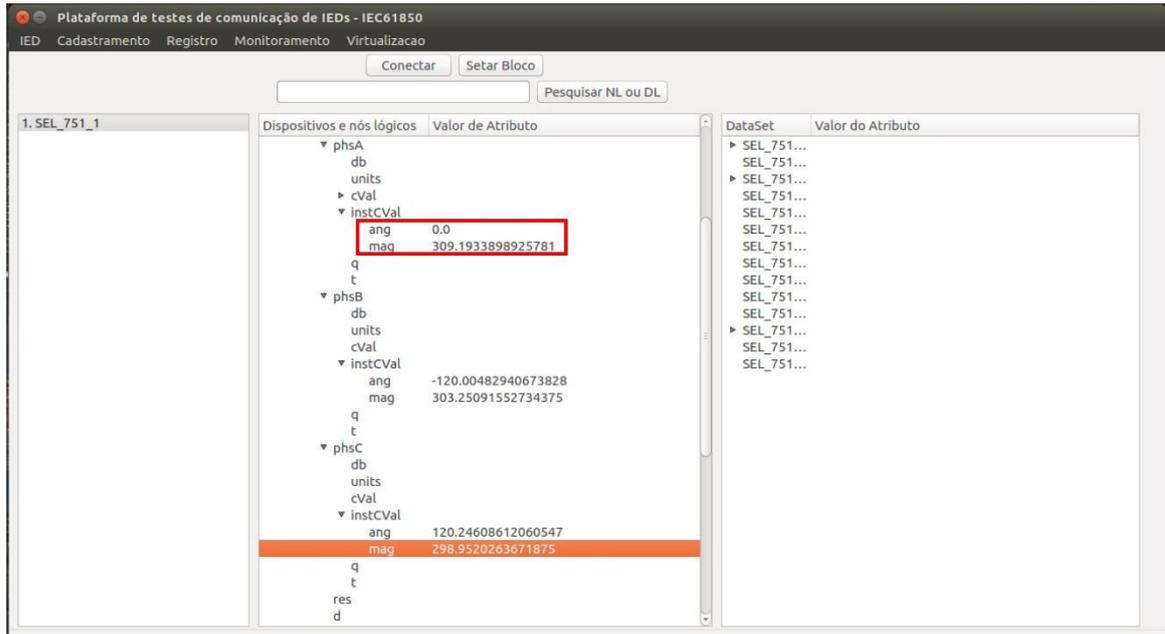
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Caso de Teste I - Comunicação Vertical entre a plataforma (simulando atuação de um SCADA) e IEDs

Para o caso de teste I, com base na Figura 25, considerou-se a situação de dois IED que controlam seus respectivos religadores e disjuntores existentes em um alimentador pertencente à uma subestação do SMDT arbitrária, os IED são monitorados e controlados por um sistema SCADA, emulado pelas funcionalidade de nível cliente da plataforma (alvo do teste). Foram consideradas duas etapas principais para realização deste caso teste, a leitura de valores dos IED do alimentador e a emissão de comandos para os respectivos IED. Tais ações compreendem funcionalidades baseadas no protocolo de comunicação MMS.

Para a realização da primeira etapa, foram aplicadas, usando o testador hexafásico CE-6006, correntes nas três fases do IED 1 (SEL 751), o qual já estava conectado e monitorado pela plataforma de testes através da interface gráfica. Na Figura 27 está mostrada a leitura instantânea de corrente nas três fases do IED 1, conforme a estrutura de dados (nós lógicos, dados e atributos de dados), estando destacada a leitura referente à fase A.

Figura 27 - Leitura de valores de corrente no IED 1 (SEL 751) pela plataforma de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28 está mostrado o painel frontal do IED 1, no qual em sua IHM está mostrada a medição de corrente da fase A. O valor medido está de acordo com o valor mostrado na Figura 27, para a medição de corrente na fase A.

Figura 28 - Painel frontal do IED 1 (SEL 751).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A captura de rede mostrada na Figura 29 enfatiza a troca de mensagens entre o IED 1 e a plataforma de testes. No primeiro destaque da imagem, em vermelho, estão os IP de cada

dispositivo envolvido, percebe-se uma troca de mensagens por meio de uma solicitação (*request*) de informações e sua respectiva resposta (*response*) que contém a informação requerida, em caso de sucesso. O segundo destaque da imagem mostra os parâmetros relativos à comunicação pelos protocolos TCP e IPV4: IPs de origem e destino, além de porta de comunicação. O terceiro destaque mostra o caminho, em notação padrão IEC 61850, do atributo de dado medido relativo à corrente instantânea na fasA, que para o IED 1 (SEL 751) é *SEL_751_IMET/MMXU\$A\$phsA\$instCVal\$mag\$f*.

Figura 29 - Tela do Wireshark com captura de tráfego para primeira etapa do caso de teste I.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
512	6.539312895	192.168.1.51	192.168.1.10	PRES	103	DATA TRANSFER (DT) SPDU
513	6.539335914	192.168.1.10	192.168.1.51	TCP	66	33452 → 102 [ACK] Seq=11398 Ack=4848 Win=1444 Len=0 TSval=1240169685 TSecr=4351860
514	6.547300812	192.168.1.10	192.168.1.51	PRES	153	DATA TRANSFER (DT) SPDU
515	6.551801303	192.168.1.51	192.168.1.10	TCP	66	102 → 33452 [ACK] Seq=4848 Ack=11485 Win=11091 Len=0 TSval=4351890 TSecr=1240169693
516	6.554674911	192.168.1.51	192.168.1.10	PRES	103	DATA TRANSFER (DT) SPDU
517	6.596027820	192.168.1.10	192.168.1.51	TCP	66	33452 → 102 [ACK] Seq=11485 Ack=4885 Win=1444 Len=0 TSval=1240169742 TSecr=4351890
518	6.637171905	192.168.1.10	192.168.1.51	PRES	153	DATA TRANSFER (DT) SPDU
519	6.641928072	192.168.1.51	192.168.1.10	TCP	66	102 → 33452 [ACK] Seq=4885 Ack=11572 Win=11004 Len=0 TSval=4351980 TSecr=1240169783

> Frame 514: 153 bytes on wire (1224 bits), 153 bytes captured (1224 bits) on interface 0

> Ethernet II, Src: Dell fb:b0:e7 (a4:1f:72:fb:b0:e7), Dst: Schweitz 08:54:33 (00:30:a7:08:54:33)

> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.10, Dst: 192.168.1.51

> Transmission Control Protocol, Src Port: 33452, Dst Port: 102, Seq: 11398, Ack: 4848, Len: 87

> TPCKT, Version: 3, Length: 87

```

0000  00 30 a7 08 54 33 a4 1f 72 fb b0 e7 08 00 45 00  .0..T3.. r....E.
0010  00 8b b6 77 40 00 40 06 00 68 c0 a8 01 0a c0 a8  ..w@. .h.....
0020  01 33 82 ac 00 66 f0 1f de b7 e6 b8 4c 58 80 18  .3...f. ....LX..
0030  05 a4 e7 e0 00 00 01 01 08 0a 49 eb 7c dd 00 42  .....I.|..B
0040  67 74 03 00 00 57 02 f0 80 01 00 01 00 61 4a 30  gt...W. ....aJ
0050  48 02 01 03 a0 43 a0 41 02 02 01 93 a4 3b a1 39  h...C.A .....9
0060  a0 37 30 35 a0 33 a1 31 1a 0c 53 45 4c 5f 37 35  .705.3.1. SEL_75
0070  31 5f 31 4d 45 54 1a 21 4d 45 54 4d 4d 58 55 31  1_IMET:1 MET/MMXU1
0080  24 4d 58 24 41 24 70 68 73 41 24 69 6e 73 74 43  $MX$A$ph s$instC
0090  56 61 6c 24 6d 61 67 24 66  Val$mag$ f

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a segunda parte do caso de teste I, foi utilizada a funcionalidade de emissão de comandos via alteração de atributos de dados editáveis para emular as ações de controle de IED por meio de um sistema SCADA. Considerando novamente o IED 1(SEL 751) conectado à plataforma via interface gráfica e em operação (disjuntor associado em posição fechado), foi emitido comando de abertura de disjuntor, executando o comando “setar atributo” do menu IED da interface gráfica com o atributo de dado correspondente pré-selecionado. O atributo de dado em questão tem o caminho *SEL_751_IPRO/BKR1CSWI1\$Pos\$Oper\$ctVal*.

Na Figura 30 está mostrada a captura de tráfego de rede para a segunda parte do caso de teste I, destacando, para a mensagem enviada da plataforma para o IED 1, as informações relativas aos endereço IP dos dispositivos envolvidos (IED 1 e laptop 1), o tipo de serviço IEC 61850 realizado, no caso *write* – escrita, o atributo de dado correspondente ao caminho citado anteriormente e o valor enviado, um booleano de valor *False*, que corresponde ao comando de abertura de disjuntor relacionado ao IED comandado. Na sequência, há uma confirmação emitida pelo IED para a plataforma, com status de sucesso.

Figura 30 - Tráfego de rede para segunda parte do caso de teste I.

The figure displays two network traffic analysis screenshots. The left screenshot shows a packet capture entry for MMS (No. 1529) with a 'confirmed-RequestPDU' structure. The structure includes a 'write' action, a 'listOfVariable' with a 'domain-specific' item containing 'domainId: SEL_751_1PRO' and 'itemId: BKRICSW11\$COSPos50per', and a 'listOfData' with a 'boolean: False' value. The right screenshot shows a packet capture entry for MMS (No. 1531) with a 'confirmed-ResponsePDU' structure, including a 'Write-Response Item: success (1)' value. A blue arrow points from the left screenshot to the right one.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 31 está mostrado o painel frontal do IED 1(SEL 751) no instante da emissão do comando de abertura de disjuntor (TRIP), o qual indica a atuação do TRIP do respectivo IED através da sinalização do LED específico.

Figura 31 - Painel frontal do IED 1 (SEL 751) após emissão de comando de abertura de disjuntor (TRIP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Caso de Teste II - Recebimento de *reports* MMS pela plataforma

No caso de teste II, baseando-se novamente na estrutura da Figura 25, tem-se um IED arbitrário em um alimentador do SDMT, monitorado através de um sistema supervisor SCADA ou outro sistema de automação, o qual recebe do referido IED, informações relativas aos estados dos seus equipamentos primários, informações de medição de grandezas e estados das funções de proteção ativadas. Tais informações chegam para o supervisor por meio dos relatórios (*reports*) emitidos pelo IED, à medida que algum dos dados componentes do *dataset* de origem tem valor alterado, como por exemplo, a atuação de uma função de proteção específica e o TRIP do IED. As funcionalidades de cliente da plataforma de teste simulam o sistema supervisor, ativando o envio dos *reports* pelo IED e monitorando-os continuamente.

Para a realização do caso de teste II, foram aplicadas, usando o testador hexafásico CE-6006, correntes nas três fases do IED 1 (SEL 751), o qual já estava conectado e monitorado pela plataforma de testes através da interface gráfica. Simulando uma sequência de 3 eventos, aplicou-se inicialmente correntes de maneira representativa ao que seria o estado permanente do SDMT, seguido de uma elevação repentina de corrente, superando os valores de pick-up parametrizados na função de sobrecorrente instantânea de fase do IED 1, provocando sua atuação e conseqüentemente, a geração e envio do *report* pelo IED, e por último, a situação de pós-defeito, com correntes nulas após a abertura dos contatos do disjuntor associado ao IED 1.

O monitoramento do IED 1 se baseou na captura de *reports* configurados através do *dataset* número 9 (nove). Na Figura 32 está mostrado o *report* capturado pela plataforma, em arquivo de formato JSON, contendo as informações do *dataset* pré-configurado.

Figura 32 - *Report* em estrutura de *dataset* capturado pela plataforma.

```

1 {
2   "SEL_751_1PRO/P1TPIOC1.ST.Str.general[ST]":true,
3   "SEL_751_1PRO/TRIPPTRC1.ST.Tr.general[ST]":true,
4   "SEL_751_1PRO/BFR1RBRF1.ST.OpEx.general[ST]":false,
5   "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsA.instCVal.mag.f[MX]":2400.0223,
6   "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsA.instCVal.ang.f[MX]":0.00,
7   "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsB.instCVal.mag.f[MX]":2399.9883,
8   "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsB.instCVal.ang.f[MX]":-120.01,
9   "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsC.instCVal.mag.f[MX]":2400.0133,
10  "SEL_751_1MET/METMMXU1.MX.A.phsC.instCVal.ang.f[MX]":120.01,
11  "SEL_751_1PRO/P67P1PTOC1.ST.Str.general[ST]":false,
12  "SEL_751_1PRO/BK1XCBR1.ST.Pos.stVal[ST]":2
13 }

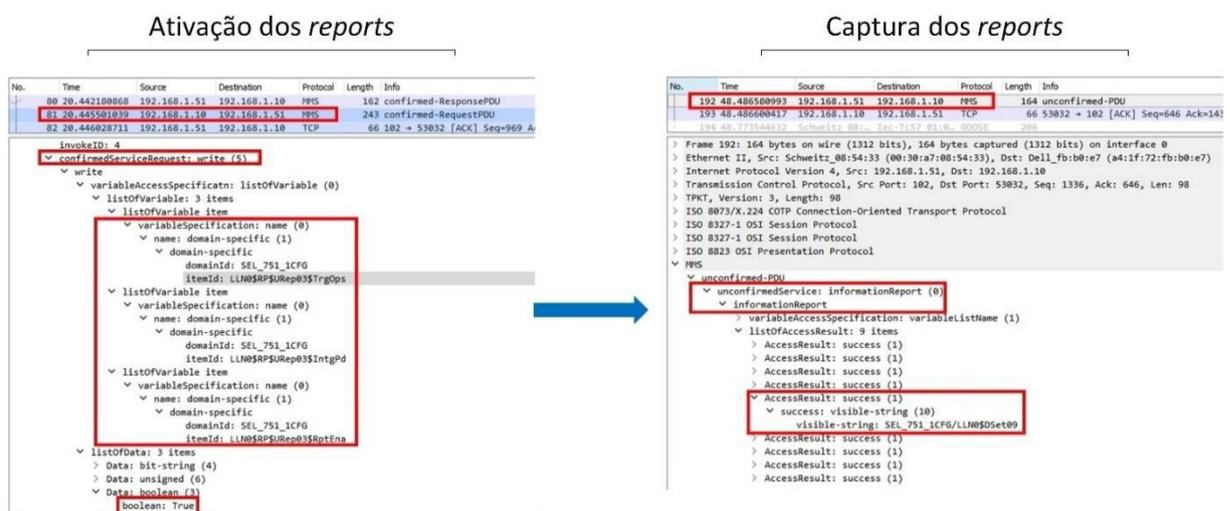
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A geração do report se deu pela alteração de status (para nível alto) da função de proteção de sobrecorrente instantânea de fase (caminho de atributo: *SEL_751_IPRO/PITPIOCI\$ST\$Str\$general*) e consequentemente a atuação do *TRIP* do IED 1 (caminho de atributo: *SEL_751_IPRO/TRIPPTRCI\$ST\$Tr\$general*). O *report* capturado mostra ainda os níveis de magnitude e defasagem das correntes e a posição do disjuntor associado, no momento da sua geração.

Na Figura 33 está mostrado o tráfego na rede, analisado através do Wireshark, no que se refere às duas etapas de execução da funcionalidade de recebimento de *reports* via MMS, a ativação do envio nos IEDs e a captura quando gerados.

Figura 33 - Análise de tráfego na rede para o caso de teste II.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, ocorre a solicitação de ativação por parte da plataforma (IP: 192.168.1.10) para o IED 1 (IP:192.168.1.51) através da escrita de valores em três atributos de dados relativos à configuração do RCB em questão, o primeiro, denominado *TrgOps*, determina quais condições provocam a geração de um *report*, o segundo de sigla *IntgPd*, especifica o tempo de integridade para geração de reports periódicos (gerados mesmo sem ocorrência de alterações) e o terceiro, com a sigla *RptEna*, é o atributo de habilitação (*enable*) dos *reports*. Quando a atuação do IED 1, o *report* foi gerado, partindo o pacote deste dispositivo para a plataforma, carregando as informações contidas no *dataset* de número 9 (nove) e caminho: *SEL_751_ICFG/LLN0.DSet09*.

5.2.3 Caso de Teste III - Envio de reports MMS pela plataforma via virtualização

O caso teste III é voltado às funcionalidades nível servidor, embora tenha praticamente o mesmo contexto e estrutura do caso de teste II, exceto pelo alvo deste caso ser a verificação da funcionalidade de envio de reports MMS pela virtualização de IEDs desenvolvida no âmbito da plataforma. Como forma prática para viabilizar este teste, a funcionalidade de recebimento de *reports* MMS (testada no caso anterior) foi utilizada para captura dos *reports* gerados pelo modelo virtual de IED gerado pelo nível de servidor da plataforma de testes.

Como mencionado durante a descrição das funcionalidades de nível servidor, no capítulo 4, a virtualização de IEDs permite que a troca de mensagens GOOSE ou MMS (*reports*) entre um dispositivo virtualizado e outros equipamentos ou aplicações se dê através de alteração de valores (status e grandezas analógicas) da estrutura interna do IED Virtual, via interface gráfica, ou utilizando o testador hexafásico conectado aos dispositivos virtualizados através de mensagens GOOSE, por meio de testes em formato de sequências de eventos, uma vez que o IED Virtual não tem leitura de corrente como os IED reais, sendo necessário sincronizar o início dos testes com os demais IED através de sinal emitido via mensagem GOOSE auxiliar. Caso o dataset pré-configurado no modelo de dados do IED virtual contenha os atributos de dados envolvidos nos testes, a virtualização realiza o envio de mensagens GOOSE e *reports* MMS, de acordo com os atributos de dados em questão.

Para permitir a análise do tráfego de rede e verificar a troca de mensagens (pacotes) MMS, a plataforma de testes foi embarcada também em um segundo computador (Laptop 2 com IP: 192.168.1.157), para emular o sistema supervisor, como no caso de teste II, através das funcionalidades de nível cliente. A virtualização foi executada pela plataforma embarcada no Laptop 1 (IP: 192.168.1.10), utilizando o modelo de dados criado pela própria biblioteca, a partir de um arquivo CID do relé SEL 751. Utilizando a mala de teste em comunicação com a virtualização, foi simulada, através de uma sequência de eventos, situação de TRIP do IED virtual, originada pela atuação de sua função de sobrecorrente instantânea, estando mostrado na Figura 34, o *report* emitido pelo IED virtual, coletado pelo nível cliente da plataforma de testes, em arquivo de formato JSON. O identificador (nome do dispositivo) atribuído ao IED virtual foi *SEL_751_51* e o *dataset* configurado para o report no IED virtual foi o de número 9, sendo que este *dataset* carrega as informações das funções de proteção existentes no SEL 751, além do sinal de TRIP.

Figura 34 - Report capturado pela plataforma em estrutura de dataset referente a IED virtual.

```

1  {
2    "SEL_751_51PRO/TRIPTRC1.Tr.general[ST]":true,
3    "SEL_751_51PRO/BFR1RBRF1.Str.general[ST]":false,
4    "SEL_751_51PRO/P1TPIOC1.Str.general[ST]":true,
5    "SEL_751_51PRO/P67P1PTOC1.Str.general[ST]":false,
6    "SEL_751_51PRO/P1TPTUV1.Str.general[ST]":false,
7    "SEL_751_51PRO/P1TPTOV1.Str.general[ST]":false
8  }

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 35 está mostrado o tráfego na rede, analisado através do Wireshark, tal como realizado no caso de teste II.

Figura 35 - Análise de tráfego na rede para o caso de teste III.

Ativação dos reports

→

Geração e captura dos reports

Fonte: Elaborado pelo autor.

A plataforma a nível de cliente (embarcada no IP:192.168.1.157) faz a ativação dos reports do IED virtual configurando os três atributos de dado relativos à ativação dos relatórios. No segundo momento, a mala é acionada para ativar a atuação do IED virtual, por meio de mensagens GOOSE de sinalização sincronizadas com a injeção de correntes nos demais IEDs da estrutura, o IED virtual (embarcado no IP: 192.168.1.10) dispara suas funções de proteção, no caso, a de sobrecorrente instantânea e conseqüentemente, o sinal de TRIP. A análise da rede mostra o envio bem-sucedido do report pelo IED virtual, destinado à plataforma de testes em nível cliente, embarcada no outro computador.

5.2.4 Caso de Teste IV - Comunicação Horizontal entre IEDs reais e virtuais

O caso de teste IV também é voltado às funcionalidades de nível servidor, baseando-se na comunicação horizontal entre IEDs no nível de *Bay* do sistema de automação de subestações e redes elétricas, através de mensagens GOOSE. O contexto utilizado para a realização do referido teste está mostrado na Figura 26. Para realização deste caso de testes, foi montada situação hipotética de implementação de seletividade lógica em um alimentador arbitrário, em que se possui um IED associado ao disjuntor geral de barra da subestação (IED_SED modelo SEL 751), um IED associado ao primeiro religador do alimentador (IED 1 modelo SEL 751) e um terceiro IED associado ao segundo religador do alimentador (IED virtualizado pela plataforma). Supondo níveis de curto-circuito parecidos para os dois pontos da rede em que se localizam os religadores, considera-se o uso da seletividade lógica como maneira de garantia da correta atuação dos dispositivos, principalmente para faltas localizadas após o segundo religador, em que apenas este deverá atuar, garantindo que o bloco de carga compreendido entre a saída do alimentador e o segundo religador se mantenham energizados. Para simular a situação proposta, foram envolvidos três elementos, o IED virtual gerado pela plataforma de testes embarcada no Laptop 1, o IED 1 (SEL 751) e o testador hexafásico emulando o SDMT.

As parametrizações necessárias relativas as mensagens GOOSE foram feitas nos três dispositivos, de modo que a comunicação fosse possível, na Tabela 7 estão listadas os principais parâmetros das mensagens GOOSE para os elementos envolvidos no caso de teste, sendo estes, o *APPID*, código hexadecimal que identifica a aplicação publicadora da mensagem e o *gocbRef*, que nomeia o bloco de controle da mensagem GOOSE.

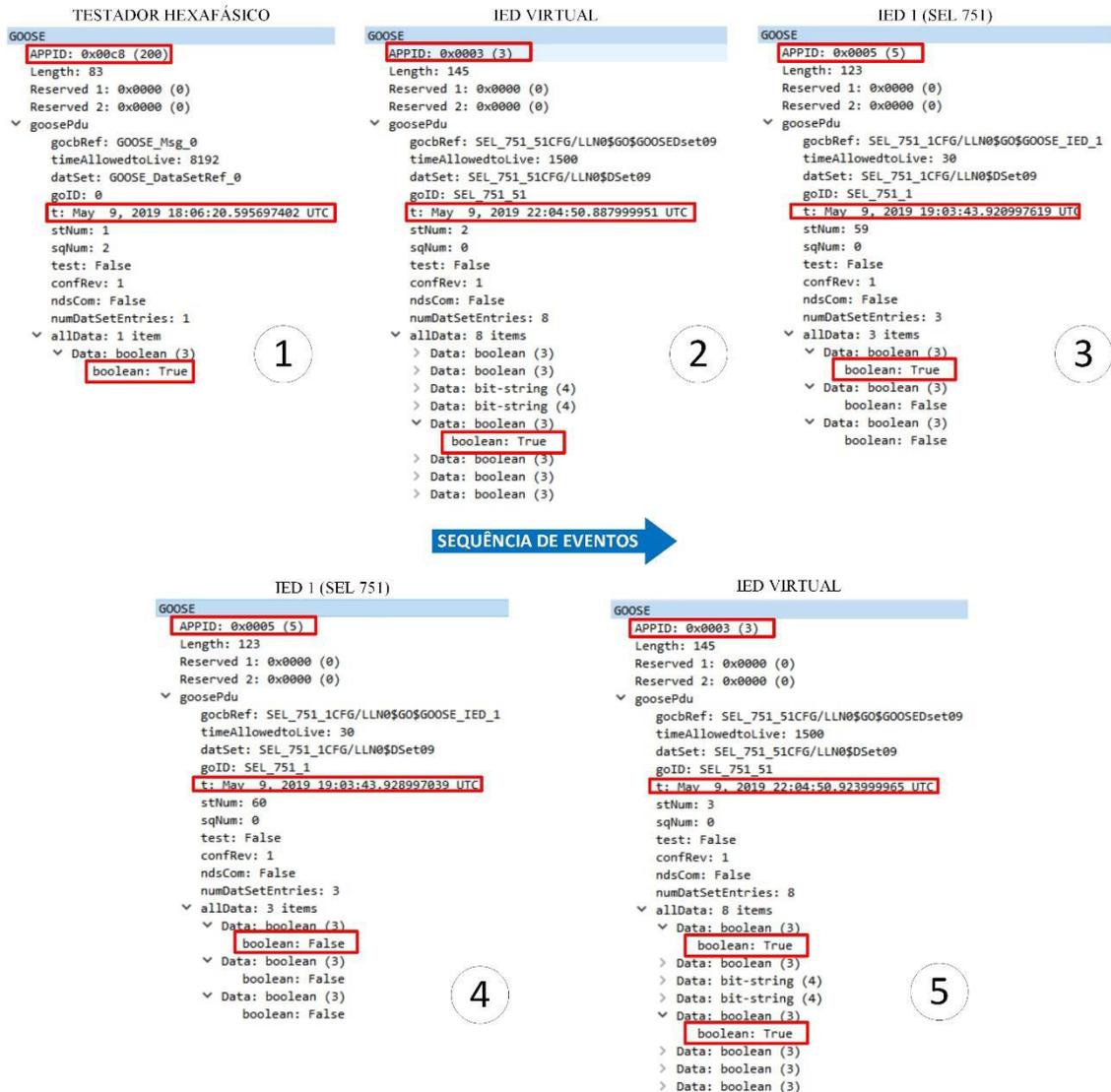
Tabela 7 - Parâmetros principais das mensagens GOOSE dos dispositivos envolvidos no caso de teste IV.

Dispositivo	Equipamento	APPID	gocbRef
IED 1	Relé SEL 751	0x005	SEL_751_1CFG/LLN0\$GO\$GOOSE_IED_1
IED Virtual	Laptop 1	0x003	SEL_751_51CFG/LLN0\$GO\$GOOSEset09
SDMT	Testador Hexafásico	0x0c8	GOOSE_Msg_0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de gerar sinais de corrente para o IED 1, o testador hexafásico foi configurado para mandar mensagens GOOSE sincronizadas com a geração de corrente, emulando a leitura de correntes pelo IED virtual. Semelhante aos casos de teste anteriores, foram injetadas correntes no IED 1, com o intuito de provocar sua atuação, através do testador hexafásico, além da mensagem GOOSE para o IED Virtual, emulando a injeção de corrente. Na Figura 36 está mostrada a sequência de eventos capturadas no *Wireshark*, com etapas numeradas de 1 a 5.

Figura 36 - Sequência de eventos do caso de teste IV capturados no *Wireshark*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

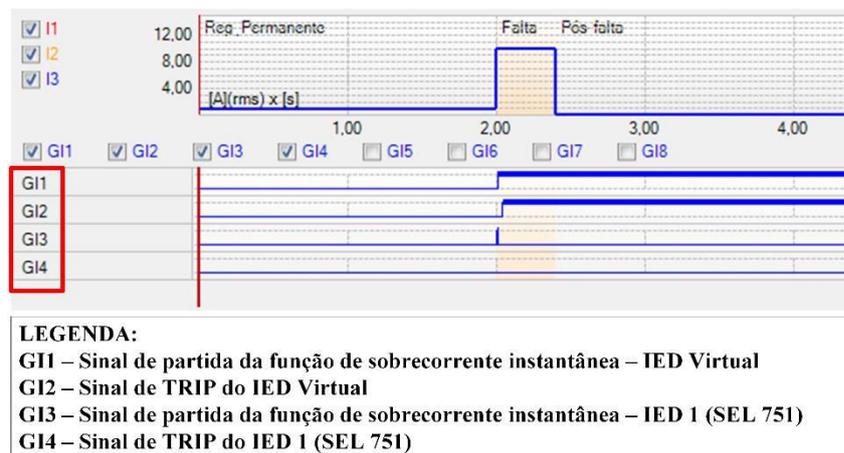
Em cada etapa do teste, na Figura 36, estão destacados o AppID do dispositivo editor da mensagem GOOSE, a estampa de tempo de cada mensagem, evidenciando a sequência de cada ação e os valores do atributos de dados de interesse de cada dispositivo. Ao iniciar o teste, novamente utilizando sequências de acontecimentos programados no testador hexafásico, é gerada após a situação de estado permanente do SDMT, uma elevação repentina de corrente indicada pelo atributo de dado *True*, na primeira etapa da sequência de eventos.

O IED Virtual, logo em seguida, identifica a mensagem GOOSE que emula a falta no SDMT e seta seu atributo de dado referente à partida da função de sobrecorrente instantânea. Na sequência, é a vez do IED 1 perceber a elevação de corrente e setar seu atributo de dado referente à partida da função de proteção de sobrecorrente instantânea. Como o atributo de dado referente à função de sobrecorrente do IED Virtual é a variável de entrada da lógica de bloqueio

de atuação do IED 1 e esta já se encontra em nível alto, o IED 1 rapidamente bloqueia a atuação de sua função de proteção, impedindo que o sinal de *TRIP* seja gerado. Por fim, o atributo de dado referente à partida da função de proteção do IED 1 volta a nível baixo e o IED Virtual conclui setando seu atributo de dado referente ao *TRIP*.

A mesma sequência de eventos mostrada na Figura 36 foi registrada através do software de teste de sequências (*Sequenc*) pertencente ao testador hexafásico. Na Figura 37 está mostrada a sequência de mensagens GOOSE capturadas e apresentadas graficamente, através do software *Sequenc*, do testador hexafásico. Percebe-se novamente, agora através do gráfico, que a função de sobrecorrente instantânea do IED 1 chega a partir, mas acaba sendo rapidamente bloqueada, de modo que o *TRIP* não fosse ativado. As duas primeiras mensagens GOOSE registradas são justamente a emulação da função de sobrecorrente instantânea e do sinal do *TRIP* do IED Virtual.

Figura 37 - Sequência de mensagens GOOSE registradas pelo testador hexafásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

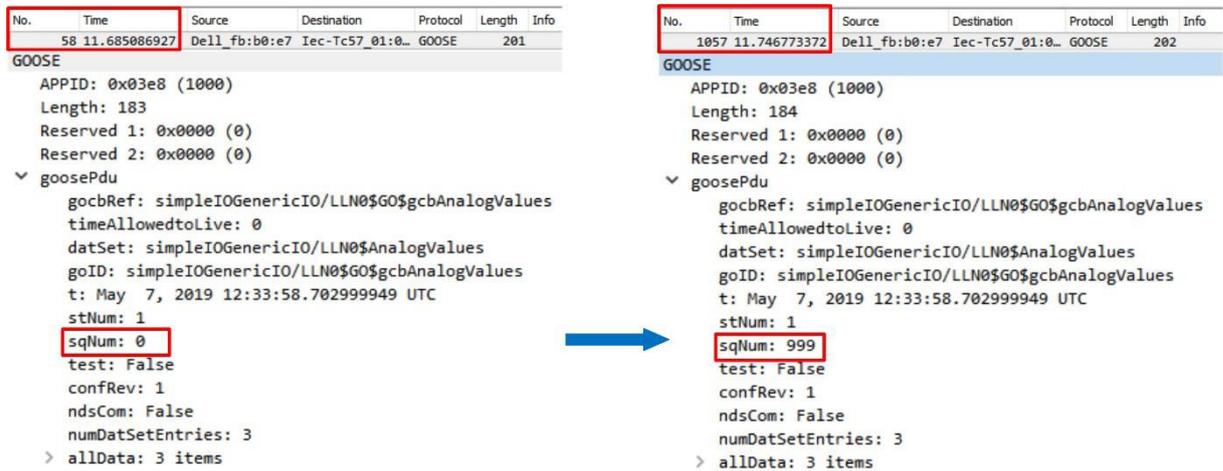
5.2.5 Caso de Teste V - Geração de mensagens GOOSE em grande quantidade para testes de performance da rede de comunicação

Para o caso de teste V, o intuito foi testar a funcionalidade auxiliar da plataforma de testes referente ao simulador de mensagens GOOSE arbitrárias, voltado à geração de tráfego intenso de informações nas redes de comunicação para teste de desempenho. Novamente a estrutura utilizada foi a da Figura 26, contando apenas o Laptop 1 com a plataforma de testes embarcada e o software *Wireshark* para análise de rede.

Com a plataforma de testes conectada à rede ethernet, através da interface gráfica foi inserida a informação de quantos disparos deveriam ser feitos no intervalo de tempo de 1s,

durante a duração de todo o teste, sendo essa de 1000 disparos de mensagens GOOSE a cada 1 (um) segundo. Na Figura 38 está mostrado o tráfego de mensagens em um intervalo de tempo menor que 1 segundo.

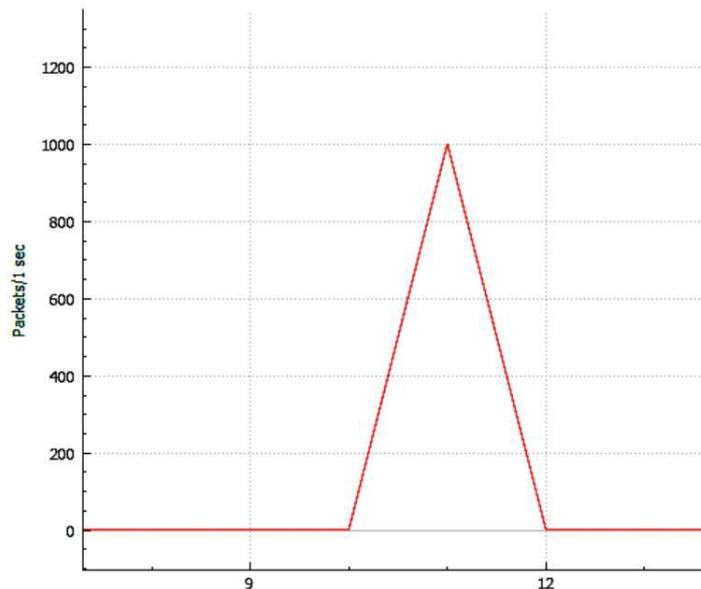
Figura 38 - Captura de tráfego de mensagens GOOSE para o teste V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 39 está mostrado o gráfico do tráfego de rede gerado através do *Wireshark*, em pacotes por segundo, quando do uso da funcionalidade de disparo em massa de mensagens GOOSE. Inicialmente na rede quase não havia fluxo de informações, logo em seguida, verificou-se uma elevação até cerca de 1000 pacotes/segundo, correspondendo ao valor almejado inicialmente.

Figura 39 - Gráfico de pacotes x tempo da rede de comunicação para o caso de teste V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Considerações finais

Neste Capítulo foram apresentadas as etapas de teste e validação das funcionalidades de nível cliente e servidor da plataforma de testes de IEDs IEC61850. Os resultados dos testes mostraram êxito das funcionalidades da plataforma em conectar e comunicar-se com outros IEDs de quaisquer fabricantes, tanto para aplicações que utilizam MMS, quanto aplicações voltadas para a comunicação horizontal, através de mensagens GOOSE. Foi verificada ainda, a eficácia da funcionalidade de geração de mensagens GOOSE arbitrárias, que é muito importante para testar a robustez e desempenho de sistemas e redes de comunicação.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma plataforma de testes de funcionalidades de comunicação, via protocolo MMS e GOOSE, aplicável em nível cliente, para conexão e interação com dispositivos físicos reais, e em nível servidor, para conexão e interação IEDs virtualizados.

Com a definição das funcionalidades que deveriam ser testadas através da plataforma, o desenvolvimento levou em conta a possibilidade de realização de testes de quaisquer IEDs com compatibilidade à norma IEC 61850, tanto do ponto de vista de dispositivos físicos disponíveis em bancada, quanto da virtualização de IEDs através de seus modelos de dados obtidos por meio dos arquivos em linguagem SCL (ICD ou CID).

Os objetivos foram alcançados através da implementação de algoritmos, nas linguagens Python e C, que permitiram a instanciação e manipulação dos principais protocolos de comunicação (MMS e GOOSE), em associação à modelagem de dados preconizados pela norma IEC 61850. As funcionalidades foram consolidadas em interface gráfica desenvolvida em linguagem Python, visando melhor organização e visualização das informações durante os testes.

A implementação da plataforma foi realizada com uso da libIEC61850, uma biblioteca de desenvolvimento de código aberto, em linguagem de programação C e focada na norma IEC 61850. A própria divisão da API da libIEC61850 em níveis cliente e servidor beneficiou o desenvolvimento da plataforma de teste quanto à disponibilização de funções específicas para cada funcionalidade da plataforma.

A validação da plataforma desenvolvida foi realizada utilizando a infraestrutura de testes do Grupo de Redes Elétrica Inteligentes (GREI) da Universidade Federal do Ceará (UFC), a qual dispõe de testador hexafásico com comunicação IEC 61850, dois IED de proteção, switch gerenciável padrão IEC 61850 e computador industrial do fabricante SEL. Os testes foram realizados em 5 casos divididos entre os tipos de comunicação (MMS ou GOOSE), abrangendo as funcionalidades de nível cliente e servidor, desde realização de leituras nos IED, envio e recebimento de *reports* via MMS, além de comunicação horizontal por meio de mensagens GOOSE. Os resultados obtidos foram satisfatórios comprovando a eficácia da plataforma desenvolvida.

Embora a norma IEC 61850, com foco na interoperabilidade, especifique com detalhes a composição necessária da estrutura de dados interna que os IEDs precisam possuir,

alguns pontos ainda tornam complexa e muitas vezes difícil a integração entre dispositivos de diferentes fabricantes, visto que a norma não determina quantos e quais devem ser os dispositivos lógicos - LD de um IED, além da possibilidade de uso de prefixos e sufixos nos nomes dos nós lógicos - LN, o que dificulta também a integração destes IEDs com sistemas supervisórios ou aplicações de automação que venham a ser desenvolvidas. Por estes fatos, a disponibilidade da plataforma de testes de comunicação representa um ganho substancial, facilitando a interpretação da estrutura interna e a identificação das dificuldades a serem enfrentadas para realizar a integração de IED a outros IED ou a sistemas de controle e automação, principalmente quando do desenvolvimento de novas ferramentas.

6.2 Trabalhos Futuros

Os resultados alcançados com esse trabalho representam evolução no estudo, aplicação e expansão do contexto da Norma IEC 61850 em automação de SEPs, porém, existem alguns pontos que podem ser aprofundados, melhorados e acrescentados no contexto do sistema desenvolvido:

1. Inclusão da comunicação por meio de mensagens *Sampled Values*, principalmente no que se refere ao nível de servidor (virtualização);
2. Inclusão de lógica de identificação automática do modelo de dados utilizado na virtualização, aumentando a genericidade do processo de virtualização de IED;
3. Implementação do processo de virtualização em linguagem Python, tendo como sugestão, o uso do recurso *SWIG*, disponibilizado pela própria libIEC61850, tal como realizado para o nível cliente da plataforma de testes;
4. Inclusão das funcionalidades de cadastro de *datasets* e visualização/configuração das mensagens GOOSE para o nível de cliente da plataforma de testes;
5. Inclusão das funcionalidades de verificação, edição e mudança de grupos de ajustes na plataforma.

REFERÊNCIAS

ATIZANI, J. A. et al. Simulador de IEDs utilizando arquivos ICD/SCD. XI SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, p. 1–7, 2015.

BARBOSA, T. M. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RECOMPOSIÇÃO AUTOMÁTICA BASEADO EM SISTEMAS MULTIAGENTES PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO. v. 1, p. 75, 2017.

CARDOSO, P. E. P. Avaliação do Impacto em Comissionamento e Testes de Funcionamento numa Subestação com Protocolo CEI 61850. p. 153, 2013.

CORP, A. CENTER MONITORING AND CONTROL SOLUTIONS General description. Disponível em: <<http://aitcorp.com.vn/center-monitoring-and-control-solutions.htm>>.

DAYABHAI, S.; DIAMANDIS, P. The role of virtualization in a smart-grid enabled substation automation system . Quadnet Computer Systems, Protection, Automation & Control World Africa Conference, p. 1–15, 2015.

DE LA HOZ LEÓN, H. E. MODELAGEM DE DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES PARA BARRAMENTO DE PROCESSOS BASEADO NA NORMA IEC 61850. Dissertação - (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, v. 1, p. 177, 2015.

DE MELLO, F. N. B. Automação Digital de Subestações de Energia Elétrica. Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 90, 2006.

EPE. CONSUMO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE POR CLASSE: 1995 - 2018.

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.

GRAZZIOTIN, E. L. Reports e Datasets: IEC61850. Disponível em: <<http://kb.elipse.com.br/pt-br/questions/5184/Reports+e+Datasets%3A+IEC61850>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

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 61850-5. IEC 61850-5: Communication Networks and Systems in Substations, Part 5: Communication requirements for functions and device models. 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, , 2003a. 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, , 2003a. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/6021>>

IEC/TR 61850-9-1. IEC 61850-9-1: Communication Networks and Systems in Substations, Part: 9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link International Electrotechnical Commission. 2003a. Disponível em: <<http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/033549!opendocument>>

IEC/TR 61850-10. IEC 61850-10-1: Communication Networks and Systems in Substations, Part: 10: Conformance testing. International Electrotechnical Commission, , 2012. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/6008>>

KHAVNEKAR, A.; WAGH, S.; MORE, A. Comparative analysis of IEC 61850 Edition-I and II standards for substation automation. 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC 2015, p. 1–6, 2016.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. Redes de Computadores e a Internet. [s.l.: s.n.].
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 - SBTr'12, n. October, p. 45, 2012.

MELO, L. S. Desenvolvimento de uma Plataforma para Implementação de Sistemas Multiagentes com aplicação para Recomposição Automática de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2015.

PEREIRA JÚNIOR, P. S.; MARTINS, C. M.; LOURENÇO, G. E. Experimento de Sobrecarga com 15.000 Mensagens GOOSE por segundo em uma rede IEC 61850 e a investigação de suas consequências. p. 8, 2009.

SAMPAIO, R. F. Sistema de Automação Distribuído: Uma Abordagem Baseada em Multiagente Aplicada a Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, v. 91, p. 225, 2017.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Introdução a Norma IEC 61850. [s.l.] Universidade SEL, 2012.

SILVA, G. C. M. DA. Definição de Requisitos Necessários à Interoperabilidade entre IED 's na Rede Elétrica de Distribuição. p. 109, 2015.

SOARES, D. M. METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO, TESTE E VALIDAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DOS NÍVEIS HIERÁRQUICOS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÃO. v. 62, n. 1, p. 48, 2016.

SOUTO, A. DE O. et al. TESTES DE DESEMPENHO E INTEROPERABILIDADE UTILIZANDO A NORMA IEC 61850. XIII Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, 10 a 12 de novembro de 2009 - São Paulo - Brasil, p. 12, 2009.

SWIG. Executive Summary. Disponível em: <<http://www.swig.org/exec.html>>.

ZILLGITH, M. libIEC61850. Disponível em: <<http://libiec61850.com/libiec61850/>>.

APÊNDICES

Apêndice A: Arquivo de dados .txt usado para virtualização de IEDs e modelo de entrada de dados

Este apêndice contém um exemplo do arquivo .txt que contém a descrição do IED a ser virtualizado pela plataforma desenvolvida neste trabalho. A divisão das informações no corpo do arquivo se dá pelo tipo dos dados, que seguem a ordem:

- Configurações Gerais, como nome do IED, endereço IP do dispositivo virtualizado, interface Ethernet de conexão, identificação de mensagens GOOSE a serem assinadas, enviadas por outros IEDs ou por um dispositivo de geração como a mala de testes (testador hexafásico), identificação de mensagens GOOSE destinadas ao bloqueio de atuação ou falha de equipamentos externos;
- Mapeamento das variáveis internas, como funções de proteção, grandezas de medição e informações de status de equipamentos;
- Mapeamento das variáveis internas voltadas a grupos de ajustes editáveis, quando disponíveis, como funções de proteção, grandezas de medição e informações de status de equipamentos;
- Grupos de ajustes a serem inicializados, quando disponíveis, em que são inseridos os valores de parametrização das funções de proteção que se deseja iniciar no IED virtualizado.

As informações de interesse devem ser inseridas no arquivo de maneira que apareçam após os dois pontos (:) e precedidas de espaço. No caso de não haver necessidade de uso de algum tipo de informação predefinida no modelo de entrada, os campos devem ser deixados vazios.

```
> _CONFIGURAÇÕES_GERAIS_
> IED_NAME: SEL_751_51
> IP_ADRESS: 192.168.1.10
> ETHERNET_INTERFACE: enp7s0
> GOOSE_CBR_MALA_DE_TESTES: GOOSE_Msg_0
> GOOSE_CBR_PRINCIPAL: SEL_751_1CFG/LLN0$GO$GOOSE_IED_1
> APP_ID_MALA_DE_TESTES: 200
> APP_ID_PRINCIPAL: 4
> ACTUATION_BLOCK_INDEX: 0
> BREAKER_FAILURE_INDEX: 1
> PROT_FUNC: PIOC
> SETTING_GROUPS: 3

> _MAPEAMENTO_DAS_VARIÁVEIS_INTERNAS_-
  _FUNÇÕES_DE_PROTEÇÃO_
```

- > TRIP: PRO/TRIPPTRC1.Tr.general
- > PIOC: PRO/P1TPIOC1.Str.general
- > PTOC: PRO/P1TPTOC13.Str.general
- > POPF: PRO/A55POPF1.Str.general
- > PTOV: PRO/P1TPTOV1.Str.general
- > PTUV: PRO/P1TPTUV1.Str.general
- > RBRF_opEx: PRO/BFR1RBRF1.OpEx.general
- > RBRF_str: PRO/BFR1RBRF1.Str
- > B_F_TIME(ms): 250

- > _MAPEAMENTO_DAS_VARIÁVEIS_INTERNAS_-
_GRANDEZAS,MEDICAO_E_ESTADOS_
- > phsA_mag: MET/METMMXU1.A.phsA.cVal.mag.f
- > phsB_mag: MET/METMMXU1.A.phsB.cVal.mag.f
- > phsC_mag: MET/METMMXU1.A.phsC.cVal.mag.f
- > phsA_inst: MET/METMMXU1.A.phsA.instCVal.mag.f
- > phsB_inst: MET/METMMXU1.A.phsB.instCVal.mag.f
- > phsC_inst: MET/METMMXU1.A.phsC.instCVal.mag.f
- > freq_inst: MET/METMMXU1.Hz.instMag.f
- > freq_mag: MET/METMMXU1.Hz.mag.f
- > phsA_t: MET/METMMXU1.A.phsA.t
- > xcbr_pos: PRO/BK1XCBR1.Pos.stVal
- > cws_i_pos: PRO/BKR1CSWI1.Pos

- > _MAPEAMENTO_DAS_VARIÁVEIS_INTERNAS_-
_PARAMETROS_FUNÇÕES_DE_PROTEÇÃO_FASE
- > PTOC_Type_Curve_phs: PRO/P1TPTOC13.TmACrv.setCharact
- > PTOC_I_Ajuste_phs: PRO/P1TPTOC13.StrVal.setMag.f
- > PTOC_Time_Dial_phs: PRO/P1TPTOC13.TmMult.setMag.f
- > PIOC_I_Ajuste_phs: PRO/P1TPIOC1.StrVal.setMag.f

- > _MAPEAMENTO_DAS_VARIÁVEIS_INTERNAS_-
_PARAMETROS_FUNÇÕES_DE_PROTEÇÃO_NEUTRO
- > PTOC_Type_Curve_n: PRO/N1TPTOC15.TmACrv.setCharact
- > PTOC_I_Ajuste_n: PRO/N1TPTOC15.StrVal.setMag.f
- > PTOC_Time_Dial_n: PRO/N1TPTOC15.TmMult.setMag.f
- > PIOC_I_Ajuste_n: PRO/N1TPIOC5.StrVal.setMag.f

- > _DEFINIÇÃO_DOS_GRUPOS_DE_AJUSTES_DAS_FUNÇÕES_DE_FASE
- > PTOC_Type_Curve_values_phs: 10-10-10
- > PTOC_I_Ajuste_values_phs: 1.0-2.0-3.0
- > PTOC_Time_Dial_values_phs: 0.2-0.15-0.1
- > PIOC_I_Ajuste_values_phs: 2.0-3.0-4.0

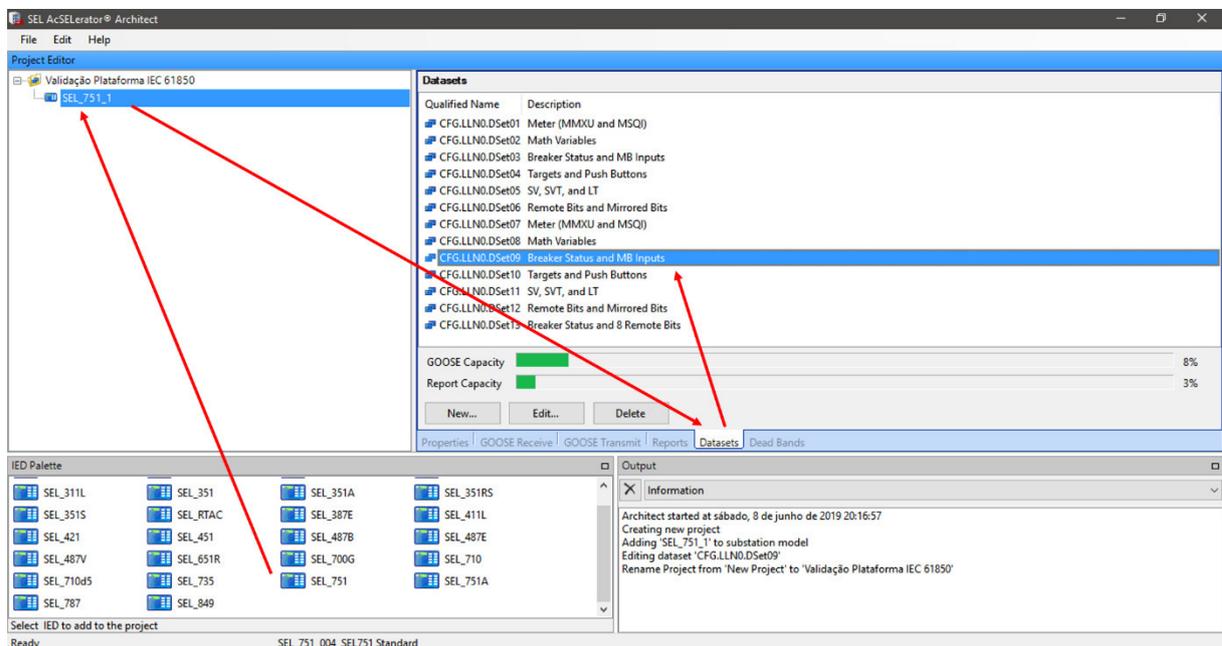
- > _DEFINIÇÃO_DOS_GRUPOS_DE_AJUSTES_DAS_FUNÇÕES_DE_NEUTRO
- > PTOC_Type_Curve_values_n: 10-10-10
- > PTOC_I_Ajuste_values_n: 0.3-0.5-0.8
- > PTOC_Time_Dial_values_n: 0.4-0.35-0.3
- > PIOC_I_Ajuste_values_n: 0.8-1.2-1.6

Apêndice B: Configuração da comunicação entre dispositivos para realização dos testes com a plataforma.

A configuração da comunicação, através de *reports* via MMS ou mensagens GOOSE, entre os dispositivos utilizados nos testes de validação da plataforma desenvolvida, foi realizada por meio dos softwares de configuração IEC 61850 e parametrização do fabricante SEL, denominados respectivamente de *AcSELERator Architect* e *AcSELERator Quickset*. Para ambos os tipos de comunicação (MMS e GOOSE), se faz necessário configurar *datasets* específicos com as variáveis internas (atributos de dados) relativos a cada informação a ser trocada.

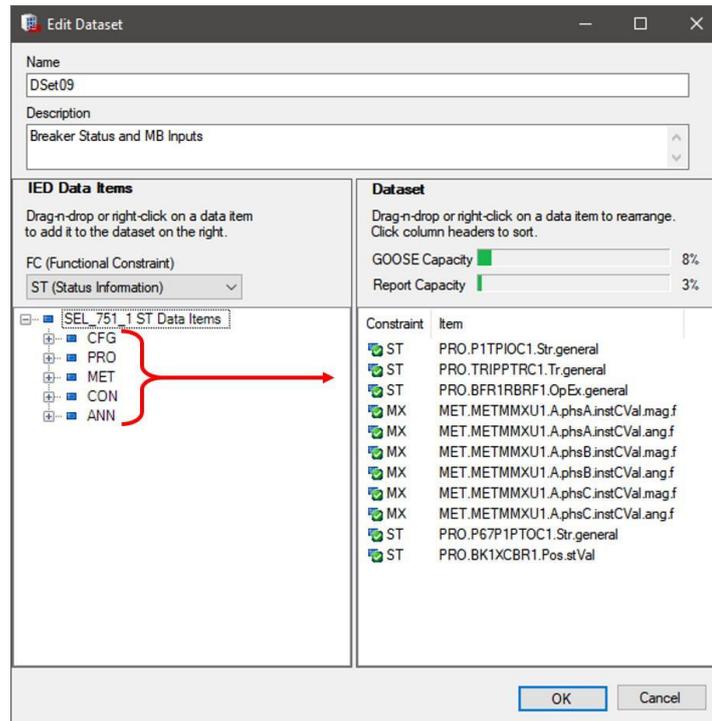
Na Figura 40 está mostrada a tela inicial do software *AcSELERator Architect*, bem como os primeiros passos para criação do *dataset*. Após ser criado o projeto de comunicação, o qual foi denominado “Validação Plataforma IEC 61850”, foram incluídos os dispositivos no projeto para realizar as configurações. Com a inclusão e o renomeio do IED para *SEL_751_1*, a aba **Datasets** deve ser acessada, a qual mostra os *datasets* pré-configurados no dispositivo. O *dataset* de número 9 (nove) foi editado, através da opção “**Edit**”, por já conter dados e atributos de dados necessários para a comunicação.

Figura 40 - Tela inicial do AcSELERator Architect e definição do IED e *dataset*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 41 está mostrada a configuração do *dataset* escolhido. A coluna da esquerda mostra os dados disponíveis, os quais são divididos de acordo com FC e entre os LD disponíveis no IED, devendo ser puxados para a coluna da direita para compor o respectivo *dataset*.

Figura 41 - Configuração do *dataset* no IED.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8 estão detalhados os dados e atributos de dados utilizados na composição do *dataset*. Os dados utilizados se referem a status das funções de proteção de sobrecorrente, da atuação do IED, bem como posição do disjuntor e dados de medição de corrente nas 3 fases do sistema elétrico.

Tabela 8 - Relação dos atributos de dados para composição do *dataset* do IED SEL 751.

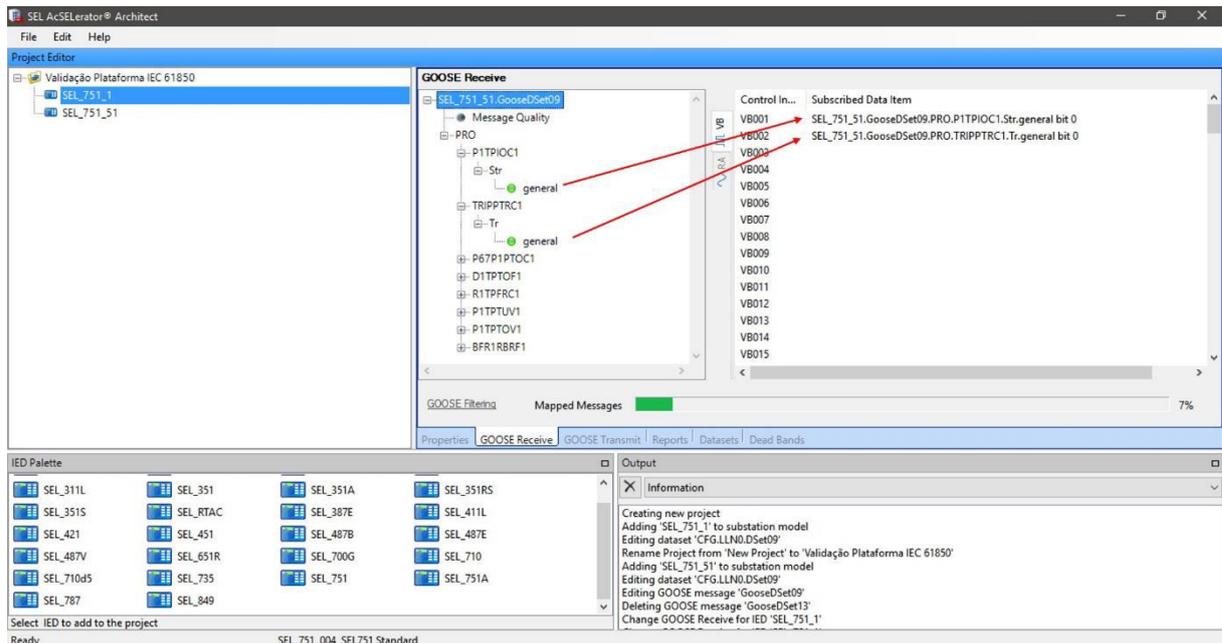
Dado/Atributo de dado	Descrição
PRO.P1TPIOC.Str.general	Indica partida da função de sobrecorrente instantânea de fase.
PRO.TRIPPTRC1.Tr.general	Indica a atuação do TRIP do IED.
PRO.BFR1RBRF1.OpEx.general	Indica a ocorrência de falha na abertura do disjuntor.
MET.METMMXU1.A.phsA.instCVal.mag.f	Indica a medição instantânea da magnitude da corrente eficaz na fase A.
MET.METMMXU1.A.phsA.instCVal.ang.f	Indica a medição instantânea da defasagem da corrente na fase A.
MET.METMMXU1.A.phsB.instCVal.mag.f	Indica a medição instantânea da magnitude da corrente eficaz na fase B.
MET.METMMXU1.A.phsB.instCVal.ang.f	Indica a medição instantânea da defasagem da corrente na fase B.
MET.METMMXU1.A.phsC.instCVal.mag.f	Indica a medição instantânea da magnitude da corrente eficaz na fase C.
MET.METMMXU1.A.phsC.instCVal.ang.f	Indica a medição instantânea da defasagem da corrente na fase C.
PRO.P67P1PTOC1.Str.general	Indica partida da função de sobrecorrente temporizada de fase.
PRO.BK1XCBR1.Pos.stVal	Indica status do equipamento de seccionamento/disjunção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o *dataset* configurado, a troca de mensagens através de *reports* via MMS para comunicação vertical pode ser utilizada, além de poderem ser criadas mensagens GOOSE para comunicação horizontal, conforme descrito anteriormente. A criação e configuração de mensagens GOOSE entre dois dispositivos é feita também no software *AcSElerator Architect*. Para o caso de Teste IV, foi incluído no projeto criado inicialmente, o CID do IED Virtual, que foi gerado pelo mesmo software, sendo denominado *SEL_751_51*.

No IED Virtual, o *dataset* de número 9 (nove) foi configurado com atributos de dados relativos à atuação do IED e funções de proteção de sobrecorrente. Para criar o esquema de seletividade lógica no IED SEL 751 é necessário relacionar os sinais recebidos através das mensagens GOOSE enviadas pelo IED Virtual, às variáveis internas do IED SEL 751, as quais são denominadas *Virtual Bits* (VB). Na Figura 42 estão mostradas as associações feitas entre os atributos de dados enviados via mensagens GOOSE pelo IED Virtual e as VB internas do IED SEL 751.

Figura 42 - Associação de parâmetros de recepção das mensagens GOOSE às variáveis internas do IED.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para implementação da seletividade lógica entre dois IEDs, o IED a montante na deverá ter atuação bloqueada caso seja sensibilizado por corrente de falta que ocorreu na zona de proteção do IED mais a jusante, evitando desligamentos indevidos na rede. Neste esquema, duas informações devem ser trocadas entre os IED envolvidos, a partida da função de sobrecorrente e o sinal de TRIP do IED mais a jusante, os quais indicarão ao IED a montante que este não deve atuar. Para o caso em questão, a VB001 do IED SEL 751 recebeu o sinal do

atributo de dado de partida da proteção de sobrecorrente instantânea, enquanto a VB002 recebeu o sinal do atributo de dado relativo ao TRIP do IED Virtual. Por fim, a lógica de bloqueio do IED SEL 751 deve ser completada através do software *AcSELerator Quickset*.

Na Figura 43 está mostrada a configuração da lógica de bloqueio de atuação da função de sobrecorrente instantânea para seletividade lógica no IED SEL 751, a qual possui equação de atuação editável (50P1TC - *Maximum Phase Overcurrent Torque Control - SELogic*), seguindo o funcionamento convencional da função de proteção em caso de não alteração da equação.

Figura 43 - Configuração da lógica de seletividade lógica no IED a ser bloqueado.

Maximum Phase Overcurrent

Element 1

50P1P Maximum Phase Overcurrent Trip Pickup (amps sec.)
1,70 Range = 0,10 to 20,00, OFF

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

50P1TC Maximum Phase Overcurrent Torque Control (SELogic)
NOT (VB001 OR VB002) ...

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a inserção da expressão NOT (VB001 OR VB002) na equação de lógica de funcionamento, a função de proteção de sobrecorrente instantânea passa a ser bloqueada sempre que VB001 ou VB002 vai para nível alto. O uso das duas variáveis se dá por questões de redundância com objetivo de evitar atuação indevida. Em alguns casos, pode ser necessário acrescentar um pequeno atraso (*delay*), através do campo 50P1D - *Maximum Phase Overcurrent Trip Delay*, na atuação da função de proteção, com vistas a garantir que a mensagem GOOSE consiga realizar o bloqueio, principalmente quando a seletividade lógica for implementada em IED de fabricantes distintos e que podem possuir performances diferentes.

ANEXOS

Anexo A: Lista de serviços de comunicação padrão IEC 61850 suportados pela biblioteca libIEC61850

Tabela 9 - Visão geral dos Serviços de comunicação suportados pela libIEC61850.

IEC61850 component	Services	AA: TP/MC	Client (C)	Server (S)	Comments
Server					
S1	ServerDirectory	TP	Y	Y	
Application association					
S2	Associate	TP	Y	Y	
S3	Abort	TP	Y	Y	
S4	Release	TP	Y	Y	
Logical Device					
S5	LogicalDeviceDirectory	TP	Y	Y	
Logical Node					
S6	LogicalNodeDirectory	TP	Y	Y	
S7	GetAllDataValues	TP	Y (1)	Y	(1) by using multiple read requests
Data					
S8	GetDataValues	TP	Y	Y	
S9	SetDataValues	TP	Y	Y	
S10	GetDataDirectory	TP	Y	Y	
S11	GetDataDefinition	TP	Y	Y	
Data set					
S12	GetDataSetValues	TP	Y	Y	
S13	SetDataSetValues	TP	Y	Y	
S14	CreateDataSet	TP	Y	Y	yes, domain , VMD, or association specific
S15	DeleteDataSet	TP	Y	Y	
S16	GetDataSetDirectory	TP	Y	Y	
Substitution					
S17	SetDataValues	TP	Y	Y	requires application support
Setting group control					
S18	SelectActiveSG	TP	Y	Y	since version 0.8.2
S19	SelectEditSG	TP	Y	Y	
S20	SetSGValues	TP	Y	Y	
S21	ConfirmEditSGValues	TP	Y	Y	
S22	GetSGValues	TP	Y	Y	
S23	GetSGCBValues	TP	Y	Y	
Reporting					
Buffered Report Control Block (BRCB)					

IEC61850 component	Services	AA: TP/MC	Client (C)	Server (S)	Comments
S24	Report	TP	Y	Y	
S24-1	data-change (dchg)		Y	Y	
S24-2	quality-change (qchg)		Y	Y	
S24-3	data-update (dupd)		Y	Y	
S25	GetBRCBValues	TP	Y	Y	
S26	SetBRCBValues	TP	Y	Y	
Unbuffered Report Control Block (URCB)					
S27	Report	TP	Y	Y	
S27-1	data-change (dchg)		Y	Y	
S27-2	quality-change (qchg)		Y	Y	
S27-3	data-update (dupd)		Y	Y	
S28	GetURCBValues	TP	Y	Y	
S29	SetURCBValues	TP	Y	Y	
Logging					
S30	GetLCBValues	TP	Y (1)	Y	(1) using the standard read service
S31	SetLCBValues	TP	Y (1)	Y	(1) using the standard write service
S32	QueryLogByTime	TP	Y	Y	
S33	QueryLogByEntry	TP	Y	Y	
S34	GetLogStatusValues	TP	Y (1)	Y	(1) using the standard read service
Generic Substation Event model (GSE)					
GOOSE-Control-Block					
S35	SendGOOSEMessage	MC	Y	Y	Support for GOOSE subscriber and publisher
S36	GetReference	TP	-	-	
S37	GetGOOSEElementNumber	TP	-	-	
S38	GetGoCBValues	TP	Y	Y	
S39	SetGoCBValues	TP	Y	Y	
GSSE-Control-Block					
S40	SendGSSEMessage	MC	-	-	GSSE is deprecated with Edition 2 of IEC 61850
S41	GetReference	TP	-	-	
S42	GetGSSEElementNumber	TP	-	-	
S43	GetGsCBValues	TP	-	-	
S44	SetGsCBValues	TP	-	-	

IEC61850 component	Services	AA: TP/MC	Client (C)	Server (S)	Comments
Transmission of Sampled Value Model (SVC)					
Multicast SVC					
S45	SendMSVMessage	MC	-	Y	
S46	GetMSVCBValues	TP	Y	Y	
S47	SetMSVCBValue	TP	Y	Y	
Unicast SVC					
S48	SendUSVMessage	TP		Y	
S49	GetUSVCBValues	TP	Y	Y	
S50	SetUSVCBValues	TP	Y	Y	
Control					
S51	Select	TP	Y	Y	
S52	SelectWithValue	TP	Y	Y	
S53	Cancel	TP	Y	Y	
S54	Operate	TP	Y	Y	
S55	Command-Termination	TP	Y	Y	
S56	TimeActivated-Operate	TP	Y	Y	
File transfer					
S57	GetFile	TP	Y	Y	since version 0.7.1
S58	SetFile	TP	Y	Y	since version 1.0
S59	DeleteFile	TP	Y	Y	since version 0.7.3
S60	GetFileAttributeValues	TP	Y	Y	since version 0.7.1
Time					
T1	Time resolution of internal clock		1ms	1ms	
T2	Time accuracy of internal clock				depending on application
T3	Supported TimeStamp resolution		1ms	1ms	

Fonte: Adaptado de (ZILLGITH, 2019).