



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

NATHÁLIA CRISTINA VALADÃO DUARTE

Estudos baseados na IEC 61850 90-17 para  
Monitoramento e Proteção em Eventos de  
Qualidade de Energia em Geração Distribuída.

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

NATHÁLIA CRISTINA VALADÃO DUARTE

**Estudos baseados na IEC 61850 90-17 para  
Monitoramento e Proteção em Eventos de  
Qualidade de Energia em Geração Distribuída.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientadora:  
Yona Lopes

Co-orientador:  
Márcio Zamboti Fortes

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFF - SDC/UFF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586t Silva Junior, José Lins da  
Título do Trabalho: subtítulo do trabalho / José Lins da  
Silva Junior; Orientador Sobrenome, orientador; Coorientador  
Sobrenome, co-orientador. Niterói, 2017.  
120 f.

Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) -  
Universidade Federal Fluminense, Laboratório de Tecnologia,  
Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Niterói, 2017.

1. Primeiro assunto. 2. Produção intelectual. I. Título  
II. Sobrenome, Orientador, orientador. III. Sobrenome,  
Coorientador, co-orientador. IV. Universidade Federal  
Fluminense. Laboratório de Tecnologia, Gestão de Negócios e  
Meio Ambiente.

CDD -

# NATHÁLIA CRISTINA VALADÃO DUARTE

Estudos baseados na IEC 61850 90-17 para Monitoramento e Proteção em Eventos de Qualidade de Energia em Geração Distribuída

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Aprovada em Abril de 2022.

## BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>.D.Sc Yona Lopes - Orientadora (UFF)

---

Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes - Coorientador (UFF)

---

Prof. D.Sc Henrique de Oliveira Henriques (UFF)

---

Prof<sup>ª</sup>. D.Sc Janaína Gonçalves de Oliveira (UFJF)

Niterói, Abril de 2022

*"Ensina-me o bom senso e o conhecimento, pois confio em teus mandamentos."*

*Salmos 119:66.*

*"E o enchi do Espírito de Deus, de sabedoria, e de entendimento, e de ciência, em todo o labor, Para elaborar projetos..."*

*Êxodo 31: 3,4 a.*

*"E peço isto: que o vosso amor cresça mais e mais em ciência e em todo o conhecimento"*

*Filipenses 1:9.*

*"Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos!" R*

*Romanos 11:33.*

*"Porque dele e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente.*

*Amém." R*

*Romanos 11:36.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao Meu Deus, Senhor de todo conhecimento e saber, que me permitiu chegar até aqui. Sustentando-me ao longo da minha vida, não somente nestes anos como mestranda, mas em todos os momentos, principalmente nos dias mais penosos. Toda honra e glória a Deus.

Em especial ao meu marido, Diego, por todo amor, paciência, suporte e auxílio durante este período, passamos por muitos momentos complicados, mas apesar de tantas adversidades, chegamos até aqui. Aos meus pais, Natalino e Eliane, por todo amor, por me apoiarem na minha formação como pessoa e principalmente para que eu pudesse levar meus estudos adiante. A minha irmã e amiga, Nayara, que sempre me incentivou a chegar até aqui, sempre com amabilidade. Por não me deixarem desistir. Gratidão pelo apoio de vocês.

À minha amiga e colega de mestrado M.Sc. Keyla Rezende, Keylinha, obrigada por todo apoio, em todos os momentos que eu pensei que não conseguiria, você sempre esteve ao meu lado. Pelo ombro amigo, por toda força. Você é uma pessoa incrível, obrigada por tanto.

À minha orientadora, Professora Doutora Yona Lopes, pela inspiração, pelo apoio e pelo dom de ensinar com energia e destreza. Ao meu coorientador, Professor Doutor Márcio Zamboti Fortes, pela dedicação e generosidade em compartilhar seu conhecimento. Agradeço pelos ensinamentos dos senhores ao longo deste trabalho.

Aos meus companheiros de mestrado: Engenheira Mariana Moraes, M.Sc. Paulo Henrique, Engenheiro Matheus Felipe Ayello, M.Sc. Letícia Fritz e M.Sc. Tiago Abud por dividirem momentos de aprendizados e desafios. Bem como, às minhas amigas M.Sc. Amanda Sabino, PsyD Milse Furtado, M.Sc. Raquel Sampaio e M.Sc. Isabela Azevedo. E a todas as pessoas incríveis que conheci no FRIENDS LAB.

Ao Engenheiro Thiago Mira, que atua no Suporte Técnico da Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial Ltda de Campinas, em São Paulo, pelo auxílio em sanar todas as

minhas dúvidas em relação aos equipamentos da SEL.

Ao meu cunhado e amigo Igor Paciello, agradeço pelo carinho e apoio. À minha sogra por todo carinho e por preparar minhas refeições na reta final do mestrado. À minha amiga Pollyana Cadilhe por toda positividade, carinho e preocupação em saber se cheguei ou não ao nosso condomínio, principalmente nos dias que saía bem tarde da UFF. Aos meus amigos M.Sc. André Antunes, M.Sc. Juzian Azevedo, Ana Catarina e Gisele Sarmiento, sou grata por todo incentivo, por me fazerem acreditar que era possível e que eu conseguiria colocar em prática meus projetos.

Ao *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES), ao *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicação* (PPGEET) da *Universidade Federal Fluminense* (UFF) por me possibilitar compor seu quadro de discentes, pelo suporte financeiro e por prover os meios necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

À faculdade de Engenharia Elétrica da *Universidade do Estado do Rio de Janeiro* (UERJ), instituição na qual me graduei e estruturei meu conhecimento.

A todos que contribuíram e me apoiaram, de alguma forma, possibilitando, assim, a conclusão do meu mestrado.

# Resumo

A qualidade de energia tornou-se uma questão significativa devido à crescente sensibilidade dos equipamentos eletrônicos e aos elevados custos resultante da perda de fornecimento, além de mudanças na geração de energia, como por exemplo, implantação de GD. Resultando em uma maior sensibilidade do sistema de energia ao mau funcionamento, portanto, o uso de instrumento de análise de qualidade de energia está se tornando gradativamente comum. Sendo assim, as concessionárias de distribuição enfrentam novos desafios no planejamento e controle de suas rede. A consideração de redes inteligentes mostra resultados promissores no aumento da capacidade de inserção para recursos distribuídos e renováveis. Os sistemas padronizados de automação, controle e comunicação são recursos relevantes para realizar esses métodos inteligentes, neste novo cenário. O problema abordado nesta dissertação é o a possibilidade do qualímetro, o IED SEL 735, realizar além das suas funções já pré-estabelecidas como um instrumento de medição de qualidade de energia, poder atuar também como um elemento de proteção. Pretende-se resolver tal problema com a proposta de implementação , a partir de parâmetros de uma rede real , em que uma tecnologia de GD é emulada por uma carga trifásica resistiva e posteriormente, por uma mala de teste. Para a comprovação da hipótese, três cenários de curto-circuito são realizados e medidos pelo IED SEL 735, e posteriormente pelo IED 451, que deve identificar tal evento de QEE e enviar uma mensagem GOOSE (Norma IEC 61850) para o IED SEL 421 que atuará com a sua devida proteção. A prova de conceito do que foi proposto visa alcançar um tempo de atuação rápida e mais confiável . Como contribuição, espera-se apontar que se o uso de equipamentos de proteção e medidores de qualidade de energia como suporte às gerações distribuídas possibilitem acelerar o processo de atuação da proteção, garantindo a qualidade do produto.

**Palavras-chave:** Condomínios Solares, IEC 61850, Geração Distribuída, Qualidade de Energia, Proteção de Sistemas Elétricos.

# Abstract

Power quality has become a significant issue due to the increasing sensitivity of electronic equipment and the high costs resulting from loss of supply, as well as changes in power generation, such as DG implementation. Resulting in a greater sensitivity of the power system to malfunction, therefore, the use of power quality analysis instrument is gradually becoming common. Thus, distribution concessionaires face new challenges in planning and controlling their network. The consideration of smart grids shows promising results in increasing the insertion capacity for distributed and renewable resources. Standardized automation, control and communication systems are relevant resources to carry out these intelligent methods in this new scenario. The problem addressed in this dissertation is the possibility of the qualimeter, the IED SEL 735, to perform, in addition to its already pre-established functions as an instrument for measuring energy quality, it can also act as a protection element. It is intended to solve this problem with the implementation proposal, from parameters of a real network, in which a DG technology is emulated by a three-phase resistive load and later, by a test case. To prove the hypothesis, three short-circuit scenarios are performed and measured by the IED SEL 735, and later by the IED 451, which must identify such a QEE event and send a GOOSE message (IEC Standard 61850) to the IED SEL 421 that will act with due protection. The proof of concept of what has been proposed aims to achieve a faster and more reliable uptime. As a contribution, it is expected to point out that if the use of protection equipment and energy quality meters as support for distributed generations make it possible to accelerate the protection action process, guaranteeing the quality of the product.

**Keywords:** Solar Condominiums, IEC 61850, Distributed Generation, Power Quality, Power system protection.

# Lista de Figuras

1.1	Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil . . . . .	6
1.2	Ranking da Instalação da Geração Distribuída dos Estados e Municípios brasileiros . . . . .	7
1.3	Geração Distribuída Solar FV no Brasil por Classe de Consumo . . . . .	8
1.4	Geração total de Micro e Minigeração Distribuídas . . . . .	8
1.5	Matriz Energética Brasileira . . . . .	9
2.1	Tela do Software . . . . .	11
3.1	Representação do Modelo de Dados . . . . .	22
3.2	Composição do padrão IEC 61850 . . . . .	24
4.1	- Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil . . . . .	34
4.2	Fonte próprio Autor - Parte da Rede Búzios modelada no Software ATP - Imagem da Tela do Software . . . . .	35
4.3	Perfil de carregamento das barras. . . . .	35
4.4	IED SEL-735 utilizado para medição de qualidade de energia de GD . . . . .	36
4.5	IED SEL-421 utilizado para o recebimento da GOOSE e realização de fun- ção de TRIP . . . . .	37
4.6	- IED SEL-451 utilizado para identificação para a da função de sobrecorrente	38
5.1	Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Vertical . . . . .	41
5.2	Fonte própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet, aba IHM	42
5.3	Fonte própria Autora - Tela do Software Elipse Power . . . . .	42
5.4	Fonte própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet, aba IHM	43
5.5	Fonte própria Autora - Tela do Software Elipse Power . . . . .	43

---

5.6	Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Vertical . . . . .	44
5.7	Elaborado pela própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet - Diagrama Fasorial . . . . .	45
5.8	Elaborado pela própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet - Forma de Onda . . . . .	45
5.9	Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer . . . . .	46
5.10	Fonte própria Autora - Teste de Comunicação de acordo com IEC 61850 .	47
5.11	Fonte própria Autora -Envio da Mensagem GOOSE . . . . .	47
5.12	Fonte própria Autora - Configuração da mensagem GOOSE no software acselerator architect. . . . .	48
5.13	Fonte própria Autora - Modelagem do nó lógico para o envio da mensagem GOOSE . . . . .	49
5.14	Elaborado pela própria Autora - Nomenclatura do IED SEL 735 utilizado, de acordo com os campos da Norma. . . . .	49
5.15	Fonte própria Autora - SER do SEL 735 - Identificação da Sobrecorrente SEL 735 . . . . .	50
5.16	Fonte própria Autora - SER do SEL 421 . . . . .	50
5.17	Fonte própria Autora - Recebimento da GOOSE verificado no Software Wireshark . . . . .	51
5.18	Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Horizontal . . . . .	52
5.19	Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer . . . . .	53
5.20	Fonte própria Autora - Configuração da mensagem GOOSE no software acselerator architect . . . . .	53
5.21	Elaborado pela própria Autora - Nomenclatura do IED SEL 451 utilizado, de acordo com os campos da Norma. . . . .	53
5.22	Fonte própria Autora - Acseerator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 . . . . .	54

---

5.23	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 . . . . .	54
5.24	Fonte próprio Autor - Software wireshark, Mensagens GOOSE capturadas como valor booleano "TRUE" . . . . .	54
5.25	Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer . . . . .	55
5.26	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 10 ciclos . . . . .	55
5.27	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 10 ciclos . . . . .	56
5.28	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 15 cilos . . . . .	56
5.29	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 15 ciclos . . . . .	56
5.30	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 20 ciclos . . . . .	56
5.31	Fonte próprio Autor - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 20 ciclos . . . . .	57
5.32	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 30 ciclos . . . . .	57
5.33	Fonte próprio Autor - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 30 ciclos . . . . .	58
5.34	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 35 ciclos . . . . .	58
5.35	Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 35 ciclos . . . . .	59
6.1	Fonte próprio Autor - Documento gerado no Software TransPlayer - Forma de Onda . . . . .	60
6.2	Fonte próprio Autor - Documento gerado no Software TransPlayer - Bit de entrada da GOOSE . . . . .	61
6.3	Fonte próprio Autor - As cem amostras do teste realizado . . . . .	61

---

6.4	Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE entre SEL 735 e SEL 421 Instantâneo . . . . .	62
6.5	Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE 451 entre o SEL 421 Instantâneo . . . . .	63
6.6	Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE entre SEL 451 e SEL 421 Temporizado . . . . .	64

# Lista de Tabelas

2.1	Revisão da Literatura II . . . . .	12
3.1	Termos abreviados . . . . .	30
A.1	Revisão da literatura . . . . .	82

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>ABSOLAR</b>	<i>Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica</i> . . . . .	5
<b>BEN</b>	<i>Balanco Energético Nacional</i> . . . . .	8
<b>CAPES</b>	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i> . . . . .	iv
<b>ERV</b>	<i>Energia Renovável Variável</i> . . . . .	4
<b>Fiocruz</b>	<i>Fundação Oswaldo Cruz</i> . . . . .	5
<b>GOOSE</b>	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i> . . . . .	3
<b>GD</b>	<i>Geração Distribuída</i> . . . . .	17
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i> . . . . .	20
<b>IEDs</b>	<i>Intelligent Electronic Device</i> . . . . .	3
<b>INEE</b>	<i>Instituto Nacional de Eficiência Energética</i> . . . . .	5
<b>VSI</b>	<i>Inversor de Fonte de Tensão, do inglês Voltage Source Inverter</i> . . . . .	2
<b>PQ</b>	<i>Inversor controla a potência ativa e reativa</i> . . . . .	2
<b>PQI-A</b>	<i>Instrumento de Qualidade de Energia de classe A, do inglês Power Quality Instrument class A</i> . . . . .	29
<b>PQI-S</b>	<i>Instrumento de Qualidade de Energia de classe S, do inglês Power Quality Instrument class S</i> . . . . .	29
<b>PQI</b>	<i>Instrumento de Qualidade de Energia, do inglês Power Quality Instrument</i> . . . . .	29
<b>PPGEET</b>	<i>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicação</i> . . . . .	iv
<b>UFF</b>	<i>Universidade Federal Fluminense</i> . . . . .	iv
<b>UERJ</b>	<i>Universidade do Estado do Rio de Janeiro</i> . . . . .	iv
<b>PLCC</b>	<i>Power Line Carrier Communication</i> . . . . .	3
<b>PERS</b>	<i>Programa de Energia Renovável Social</i> . . . . .	17
<b>QEE</b>	<i>Qualidade de Energia Elétrica</i> . . . . .	3

---

<b>SCEE</b>	<i>Sistema de Compensação de Energia Elétrica</i> . . . . .	17
<b>SCADA</b>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> . . . . .	3
<b>Uc</b>	<i>Tensão de alimentação declarada</i> . . . . .	30
<b>Udin</b>	<i>Tensão de entrada declarada</i> . . . . .	29
<b>VSI</b>	<i>Voltage Source Inverter</i> . . . . .	2

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	3
1.2	Organização do Texto . . . . .	4
1.3	Energia Renovável Variável . . . . .	4
1.4	Contextualização IEC 61850 . . . . .	9
1.5	Artigos Relacionados ao Trabalho . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>11</b>
2.1	Considerações Iniciais . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Contextualização</b>	<b>16</b>
3.1	Considerações Iniciais . . . . .	16
3.2	Geração Distribuída Compartilhada - Condomínios Solares . . . . .	16
3.2.1	Marco Legal da Geração Distribuída . . . . .	17
3.3	Qualidade de Energia elétrica e Geração Distribuída . . . . .	18
3.3.1	Qualidade do Produto . . . . .	19
3.4	Utilizando a IEC 61850 para transmitir dados de qualidade de energia . . .	20
3.4.1	A norma IEC 61850 . . . . .	20
3.4.1.1	Modelo de Dados . . . . .	21
3.4.1.2	Protocolo e Tipos de Mensagens . . . . .	22
3.4.2	A norma IEC 61850-90-17 . . . . .	26
3.5	Supervisório Eclipse Power . . . . .	32

---

3.6	Proteção de sistemas elétricos na presença de GD . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Metodologia para Análise de QEE em GD</b>	<b>33</b>
4.1	Considerações Iniciais . . . . .	33
4.2	Dimensionamento da GD . . . . .	33
4.3	Utilização de carga para os limites de QEE . . . . .	36
4.3.1	Aparelho de teste de segurança elétrica CMC 356 . . . . .	36
4.4	Programação SEL . . . . .	36
4.4.1	SEL 735 . . . . .	36
4.4.2	SEL 421 . . . . .	37
4.4.3	SEL 451 . . . . .	38
4.4.4	AcSELerator Quickset –SEL-5030 e AcSELerator Architect . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>40</b>
5.1	Comunicação Vertical . . . . .	40
5.1.1	Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs . . . . .	40
5.1.2	Cenário 1: Elipse e SEL 735 . . . . .	41
5.1.3	Acompanhamento de Dados de Qualidade de Energia por Supervi- sório . . . . .	42
5.1.3.1	Carga Monofásica . . . . .	42
5.1.3.2	Carga Bifásica . . . . .	43
5.1.4	Cenário 2: Mala de teste . . . . .	43
5.1.4.1	Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs . . . . .	44
5.2	Comunicação horizontal - GOOSE . . . . .	46
5.2.1	Cenário 3: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para mala de teste . . . . .	46
5.2.2	Cenário 4: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para SEL 421 . . . . .	49

---

5.2.3	Cenário 5: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para SEL 421 - Instantâneo . . . . .	52
5.2.3.1	Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs	52
5.2.3.2	Cenário 6: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para SEL 421 - Temporizado . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Avaliação e Resultados</b>	<b>60</b>
6.1	Comunicação Horizontal . . . . .	60
6.2	Comunicação Vertical . . . . .	60
6.2.1	Cenário 3: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para a mala .	60
6.2.2	Cenário 4: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para 421 . . .	61
6.2.3	Cenário 5: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para 421 - Instantâneo . . . . .	62
6.2.4	Cenário 6: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para 421 - Temporizado . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>65</b>
	<b>Referências</b>	<b>67</b>
	<b>Apêndice A – Apêndice</b>	<b>82</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Diante das modificações enfrentadas em todos os âmbitos da sociedade, nas quais a digitalização está modificando os aspectos da vida, do trabalho e de uma forma geral de como a sociedade se relaciona e se organiza, o que de igual forma, tange o setor de energia elétrica. Atualmente, no cenário nacional, enfrentam-se inúmeras adversidades no setor que podem ser alteradas em oportunidades, por meio do emprego assertivo de conjuntos de dados que as tecnologias recentes ofertam, possibilitando dessa forma um completo planejamento, controle e mitigação de investimentos aplicando uma maior eficiência.

As mudanças mais recentes que englobam, o setor elétrico estão centradas em três vertentes: a digitalização, a descentralização e conseqüentemente a descarbonização, permitindo que a energia que consumida torne-se cada vez mais renovável, limpa e sustentável.

Bem como diante dessas novas perspectivas, em diferentes âmbitos da sociedade, onde as questões ambientais estão sendo tratadas de maneira relevante, com foco na busca pela diminuição da degradação dos ecossistemas, têm-se buscado gerar energia elétrica a partir de fontes alternativas, menos poluentes, com destaque para a energia solar, que é uma das melhores fontes de energia renovável, com o menor impacto sobre o meio ambiente [1].

Encontrando-se nas políticas energéticas, formas de inovação e desenvolvimento a partir das fontes renováveis, com o objetivo de conciliar a viabilidade econômica e tecnológica com a socioambiental. A GD apresenta-se como um meio factível de atender a esta forma de geração de energia elétrica, apesar dos estímulos à implantação da GD, a instalação de tal sistema é complexa, visto que a inserção nas redes de distribuição de energia elétrica necessita de maiores investimentos e procedimentos operacionais se comparado às redes convencionais, tal como parâmetros e técnicas de planejamento de expansão de rede [2].

A partir das Resoluções Normativas ANEEL [3, 4], possibilitou-se uma crescente no

quantitativo de empreendimentos de GDs no cenário nacional. A maior relevância trazida pela resolução de 2015 foi a inclusão de três novas modalidades para a geração distribuída: Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, Autoconsumo remoto e Geração compartilhada; as quais impulsionaram o mercado, pois criaram novos nichos de consumidores e possibilidades de negócios. Uma nova forma de implantação, trazida pela modalidade de geração compartilhada, é a criação dos condomínios solares que são constituídos através de cooperativas ou consórcios de investidores.

Segundo [5, 6, 7, 8, 9], os principais desafios na inserção da GD em redes de distribuição são a topologia do sistema, a intermitência das fontes; o(s) tipo (s) de GD no sistema; o nível de tensão em que as unidades serão conectadas; o nível de geração que foi previamente conectado à rede; a robustez elétrica da rede no ponto de conexão, bem como o tamanho da instalação conectada à rede, o nível de curto-circuito da rede no ponto de instalação, fluxo de energias bidirecionais e eventos que interferem na qualidade de energia. Tais desafios trazem complexidades de Operação, Controle e Proteção da rede, subsistemas ilhados na presença do sistema de GD.

A qualidade de energia tornou-se uma questão significativa devido à crescente sensibilidade dos equipamentos eletrônicos e aos elevados custos resultantes da perda de fornecimento, além de mudanças na geração de energia, como por exemplo, a GD, resultando em uma maior sensibilidade do sistema de energia ao mau funcionamento. Portanto, o uso de instrumento de análise de qualidade de energia está se tornando gradativamente comum. Novos regulamentos como o padrão IEC 62586 [10] estão em vigor para orientar o teste e a calibração de dispositivos utilizados para realizar a medição da qualidade de energia.

Em [11], através do software Matlab/Simulink, uma GD eólica e fotovoltaica. Os resultados da simulação mostram o desempenho do controlador e o comportamento dinâmico do sistema para diferentes cargas, usando estratégias de controle *Voltage Source Inverter* (VSI) e de controle *Inversor controla a potência ativa e reativa* (PQ); conectado à rede. Esse sistema apresentou um fornecimento de energia confiável, de alta qualidade e mais eficiente ao consumidor.

Ravazi et al. em [12], fazem uma revisão ampla sobre os diferentes tipos de GDs e investigam os maiores desafios encontrados na presença de GD em redes elétricas.

Uma pesquisa é realizada em [13], após revisar a influência da GD na operação de proteção das redes de distribuição, uma análise de risco da operação do sistema de proteção em uma rede de distribuição de teste de acordo com as várias localizações e capacidades

das GDs. São introduzidos três índices de apresentação de risco do sistema, calculados nos diversos casos investigados. São analisados todos os tipos de falha de coordenação de proteção entre seus dispositivos, ocorridos devido à penetração de GDs.

De acordo com [14], técnicas de detecção de ilhamento remotas são implementadas utilizando sistemas de comunicação entre a subestação alimentadora da concessionária e o gerador distribuído. São exemplos de técnicas remotas, a tecnologia *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), *Power Line Carrier Communication* (PLCC) e redes de comunicação entre os dispositivos. A referida técnica apresenta elevada eficácia, contudo, os custos de implantação podem inviabilizar o empreendimento de GD de baixa potência de geração.

Em seu estudo, [15] apresenta uma nova metodologia à proteção de ilhamento da GD. Utilizando a interligação entre dois ou mais *Intelligent Electronic Device* (IEDs) por meio de rede, intercambiando mensagens com alta velocidade e substituindo diversas ligações por meios de fios metálicos, pela rede local de comunicação. Salienta que atualmente, dentre as tecnologias disponíveis, a norma IEC 61850 traz o melhor valor agregado ao sistema de proteção, em especial com o protocolo *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE).

Em suma, os pontos positivos da implantação da GD podem ser redução da perda de potência devido à proximidade de carga e geração, redução considerável do consumo de combustível fóssil, redução de gases de efeito estufa, diferimento de longo prazo do investimento na expansão do sistema de transmissão, redução da queda de tensão e melhoria do perfil de tensão e aumento da confiabilidade do sistema de energia, além disso, a GD pode desempenhar o papel de backup para sistemas de potência que podem promover PQ em sistemas de distribuição.

Enquanto que os aspectos negativos podem ser identificados, em resumo, como religamento não sincronizado, o não religamento automático, ilhamento indesejado, contribuição para o aumento do nível de curto-circuito, não identificação das falhas ao sistema de proteção e mau operação da proteção do alimentador.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é analisar os eventos de *Qualidade de Energia Elétrica* (QEE) em Condomínios Solares, uma nova modalidade na micro e mini geração distribuída, segundo as diretrizes da Norma IEC61850. Como contribuição, espera-se apontar que se o

uso de equipamentos de proteção e medidores de qualidade de energia como suporte às gerações distribuídas possibilitem acelerar o processo de atuação da proteção, garantindo a qualidade do produto.

## 1.2 Organização do Texto

A estrutura desta dissertação está estabelecida em seis capítulos, corresponde-se a este, a introdução, o primeiro Capítulo. No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte da temática em questão. O Capítulo 3 permite ao leitor o entendimento amplo acerca dos principais tópicos deste estudo.

O capítulo 4 apresenta a modelagem proposta e utilizada no estudo, com intuito de obter contribuição relevante sobre o tema. O capítulo 5 apresenta as simulações e os registros. No Capítulo 6, são apresentados os resultados gerados a partir das simulações realizadas no estudo de caso. Por último, o Capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

## 1.3 Energia Renovável Variável

A demanda por energia elétrica vem crescendo, a níveis mundiais, e questões ambientais, sociais e financeiras constituem reveses para implementação de empreendimentos e projetos de grande porte. Para atender a essa demanda, a GD apresenta um considerável papel ao conectar unidades geradoras aos sistemas de distribuição ou transmissão [16, 17, 18, 19, 20].

Em todo o mundo, os sistemas de energia estão passando por modificações relevantes, estimuladas principalmente pela disponibilidade *Energia Renovável Variável* (ERV) de baixo custo, implantação de recursos de GD, avanços na digitalização e oportunidades crescentes de expansão de redes. Essas modificações requerem uma acentuada alteração no sistema de energia [21].

A crescente integração de ERV, como eólica e solar fotovoltaica, em sistemas elétricos é essencial para reduzir os níveis de emissões de carbono devido à geração de energia, bem como para atender à sua crescente demanda. Em virtude da redução nos custos e das políticas públicas, a implantação do ERV aumentou nos últimos anos. No entanto, a imprevisibilidade na geração a partir de fontes eólica e solar fotovoltaica traz dificuldades na operação e regulação do sistema elétrico [19, 21].

Segundo o *Instituto Nacional de Eficiência Energética* (INEE), [22], a GD consiste num categoria de geração elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, ou seja, mais próximo ao centro de carga, independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias da GD têm avançado para incluir potências gradualmente menores. A GD inclui:

- Cogeneradores;
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.

O relatório de combustível, publicado em maio de 2021 pela IEA (International Energy Agency), relata que as energias renováveis foram a única fonte de energia, apesar da pandemia no ano de 2020, a apresentar aumento em sua demanda, enquanto que o consumo dos demais combustíveis diminuiu [23].

No Brasil, a atual situação pandêmica enfrentada é classificada como a pior crise sanitária e de saúde da história pelo país, de acordo com a edição, publicada em 16 de março de 2021, do Boletim Extraordinário do Observatório Covid-19 da *Fundação Oswaldo Cruz* (Fiocruz) [24].

Diante desse cenário apresentado, no último ano, em todo o mundo e principalmente pelo Brasil, com enfrentamento pandêmico do novo coronavírus, houve muitas mudanças em todas as esferas organizações da sociedade. Dentre as quais se destacam o fechamento de setores comerciais e industriais, bem como incentivos à implementação de trabalho de forma remota por inúmeras empresas. Inevitavelmente, uma instabilidade nas atividades econômicas, não apenas brasileiras, mas em todo o mundo. Desta forma, gerando atenuação e inseguranças nas perspectivas de expansão em diferentes segmentos.

Contudo, a geração de energia, na modalidade de GD, ao contrário dos demais setores, encontrou condições favoráveis. Especialmente, em alternativas que envolvem a fonte solar. Tal fato pode ser observado, de acordo com os dados informados pela *Associação*

*Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR)*, em junho de 2021. A partir da Figura 1.1 pode-se observar a evolução da fonte solar em capacidade cumulativa da potência instalada no Brasil, com dados históricos anteriores a 2012 até a base de dados maio de 2021 [25].

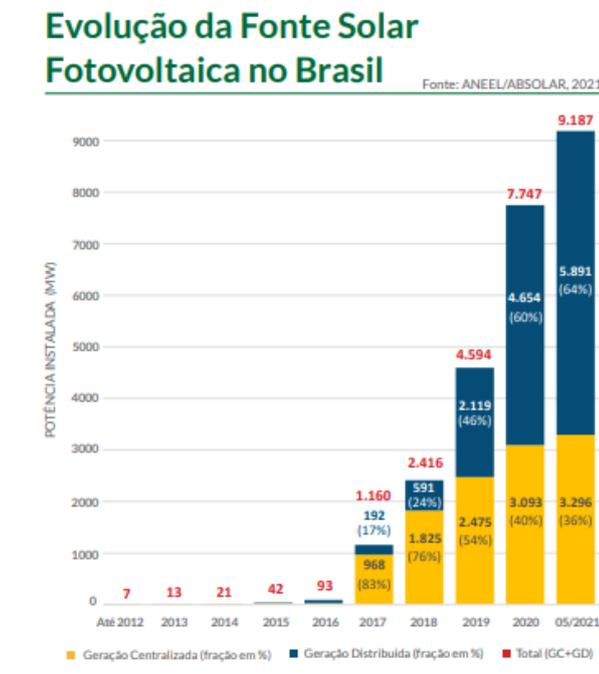


Figura 1.1: Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil [25].

Ainda no âmbito nacional, a Figura 1.2 apresenta um ranking com a contribuição na capacidade de potência instalada, a partir da geração distribuída, em cada Estado brasileiro, bem como, as dez cidades que, de acordo com [25], apresentam os maiores índices de geração na modalidade, para base de dados de junho 2021.



Figura 1.2: Ranking da Instalação da Geração Distribuída dos Estados e Municípios brasileiros [25].

De acordo com a Figura 1.3, apresenta-se a distribuição dos valores de potência instalada da GD, assim como o percentual acerca de cada classe de consumo, no território nacional.

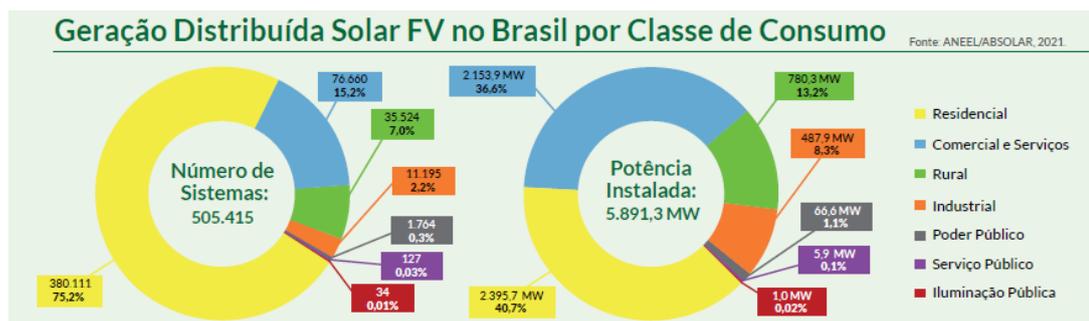


Figura 1.3: Geração Distribuída Solar FV no Brasil por Classe de Consumo [25].

De acordo com o *Balanço Energético Nacional (BEN)* de 2021, ano base 2020, a micro e a mini geração distribuída alcançaram, neste período, 5.269 GWh, apresentando uma potência instalada de 4.768,3 MW, destaca-se a energia solar fotovoltaica, que ofertou 4.764GWh de geração e, 4.635 MW de potência instalada [19], contribuindo em 1,7% na Matriz Elétrica Brasileira por fonte no ano de 2020 [26], contra 1,0% no ano anterior [27] e 0,01% no ano de 2015 [28]. Neste ano de referência, houve um aumento de 137% na GD, a fonte solar representou 90,4% dessa geração, sendo seguida por 7,3 % de outras renováveis, 1,3% da hidráulica, 0,7% da eólica e 0,4% do gás natural. A Figura 1.4 apresenta o histórico da contribuição da fonte solar no total da GD no Brasil.

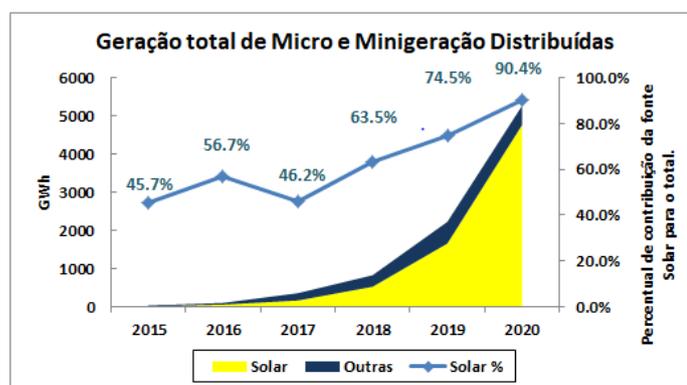


Figura 1.4: Geração total de Micro e Minigeração Distribuídas. (Adaptado de [26]).

A partir dessas informações da Figura 1.4 é possível observar que a fonte solar apresenta a maior contribuição na geração de micro e minigeração distribuída no Brasil; sendo responsável por cerca de 45,7% do total de geração em 2012 e 90,4% em 2020. A crescente contribuição da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, ainda que pouco significativa se comparada a outras fontes de geração, como por exemplo, a hidráulica que contribui em cerca de 65,2% na oferta interna de energia elétrica por fonte, demonstra expressiva capacidade de desdobramento nacional, segundo os aspectos climáticas que de-

notam níveis favoráveis à geração de energia elétrica a partir de fontes solares. A matriz energética brasileira em 2020, classificada por fonte, pode ser observada de acordo com a Figura 1.5, com base nos dados de [26].

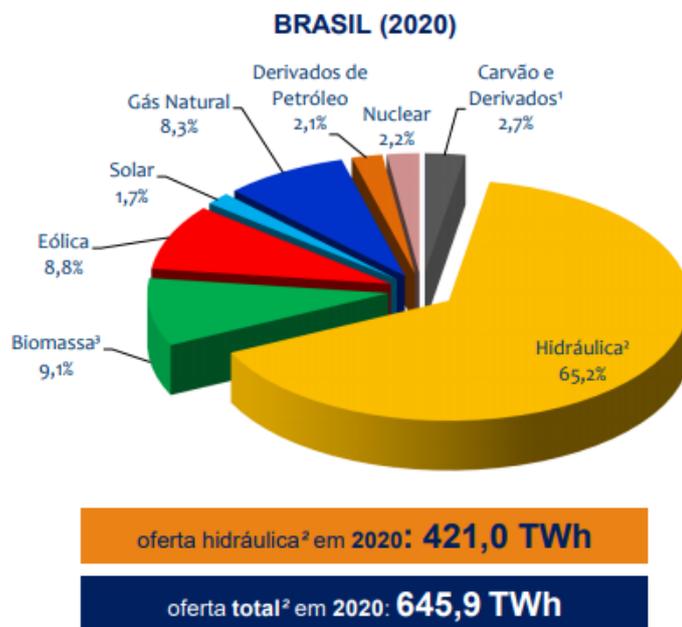


Figura 1.5: Matriz Energética Brasileira [26].

## 1.4 Contextualização IEC 61850

A primeira edição da Norma IEC 61850, que foi publicada em 2005, foi aceita por concessionárias de energia elétrica em todo o mundo a uma taxa notavelmente rápida. Este padrão foi originalmente desenvolvido para comunicações em sistemas de automação de subestações. À medida que a IEC 61850 evoluiu, suas áreas de aplicação foram estendidas para sistemas hidrelétricos, sistemas de energia eólica e sistemas de energia distribuída. Novas seções do padrão foram adicionadas para essas áreas estendidas, e o título do padrão foi alterado de “Redes e sistemas de comunicação em subestações” para “Redes e sistemas de comunicação para automação de concessionárias de energia”. Como o padrão IEC 61850 tem algumas vantagens em termos de interoperabilidade e estabilidade a longo prazo, ele foi adotado como um dos principais padrões de comunicação para a rede inteligente [29], que é um exemplo especial de infraestrutura ciberfísica [30].

A Norma IEC 61850 está emergindo como o padrão de comunicação do sistema de energia mais promissor e popular [31]. A Norma IEC 61850, um padrão internacional para redes de comunicação, está se tornando predominante no ambiente de sistemas ciber-físicos

(CPS), especialmente no que diz respeito à rede elétrica

## 1.5 Artigos Relacionados ao Trabalho

DUARTE, N. C. V., Cardoso, K. R., FORTES, M. Z., 2020, "Avaliação da viabilidade técnico-econômica de fontes eólica e solar fotovoltaica em geração distribuída, considerando aspectos geográficos", XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Evento Online, setembro 2020.

DUARTE, N. C. V., GONÇALVES, B. C., FORTES, M. Z., 2020, "Análise Técnico-Econômica de Sistema de Geração Distribuída Híbrida", XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Evento Online, setembro 2020.

DUARTE, N. C. V., "Previsão de Geração Eólica Baseada na Classificação DO Tipo de Clima em Parque Eólico", Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, Ano 06, Ed. 06, Vol. 04, pp. 124-141. Junho de 2021. ISSN: 2448-0959.

DUARTE, N. C. V., MORAES, M. M., FORTES, M. Z., ABUD T. P., L. F. Henrique, 2021, "Análise do impacto de geração distribuída híbrida nos níveis de tensão - Estudo de Caso", XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Evento Online, agosto e setembro 2021.

Nathália Cristina Valadão Duarte, Mariana Moraes Oliveira Rocha, Márcio Zamboti Fortes, Tiago Pires Abud, Letícia Fritz Henrique. "Avaliação do perfil de tensão de um sistema de geração distribuída fotovoltaico-eólico": Estudo de caso, Editora Poisson, Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 1. Março de 2022. DOI:10.36229/978-65-5866-159-7.CAP.10

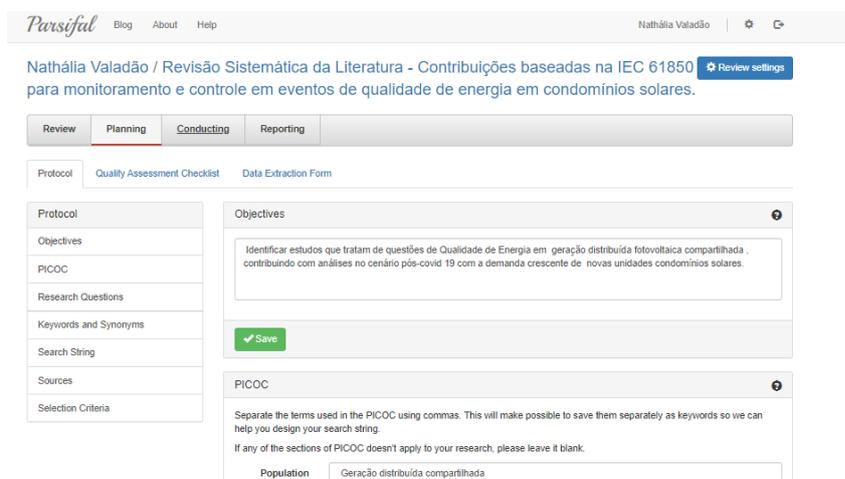
# Capítulo 2

## Estado da Arte

### 2.1 Considerações Iniciais

Uma revisão da literatura foi realizada para o tema Condomínios Solares, utilizando a Parsifal [32], uma ferramenta online desenvolvida a fim de apoiar pesquisadores na elaboração de revisões sistemáticas da literatura na conjuntura da Engenharia de Software.

Possibilitando uma equipe trabalhar em paralelo, em locais distintos, em uma revisão sistemática da literatura, ou seja, possibilita planejar, conduzir e relatar a revisão de forma otimizada e conjunta. A plataforma oferece uma bem-apresentada interface para publicar informações extras relevantes ao trabalho, como o resultado completo da *string* de pesquisa, todas as modificações da *string* de pesquisa, mais detalhes sobre o protocolo, etc [32].



The screenshot displays the Parsifal web application interface. At the top, the logo 'Parsifal' is visible along with navigation links for 'Blog', 'About', and 'Help'. The user's name 'Nathália Valadão' and a settings icon are on the right. Below the header, the current protocol is identified as 'Revisão Sistemática da Literatura - Contribuições baseadas na IEC 61850 para monitoramento e controle em eventos de qualidade de energia em condomínios solares'. A progress bar shows four stages: 'Review', 'Planning', 'Conducting' (which is active and highlighted in red), and 'Reporting'. Underneath, there are tabs for 'Protocol', 'Quality Assessment Checklist', and 'Data Extraction Form'. The 'Protocol' tab is selected, showing a sidebar with options like 'Objectives', 'PICOC', 'Research Questions', 'Keywords and Synonyms', 'Search String', 'Sources', and 'Selection Criteria'. The main content area is divided into two sections: 'Objectives' and 'PICOC'. The 'Objectives' section contains a text box with the goal: 'Identificar estudos que tratam de questões de Qualidade de Energia em geração distribuída fotovoltaica compartilhada, contribuindo com análises no cenário pós-covid 19 com a demanda crescente de novas unidades condomínios solares.' Below this is a green 'Save' button. The 'PICOC' section provides instructions on how to format the search string and includes a text input field with the value 'Geração distribuída compartilhada' entered under the 'Population' label.

Figura 2.1: Tela do Software [32].

O período temporal analisado foi fixado em 2016 a 2021, para que pudesse ser avaliado o crescente avanço da tecnologia de geração fotovoltaica. As palavras chaves, string,

definidas foram: Geração Distribuída de Energia, Sistemas GD, Impacto da geração distribuída na proteção e regulação de tensão de sistemas de distribuição, Geração Distribuída Solar, PV Solar, Sistemas de Energia Solar, Sistemas de Energia Fotovoltaica, Rede de Supervisão, Qualidade de energia, Condomínio solar, Condomínio de painéis solares, Associação de condomínio solar, Sistema fotovoltaico, IEC 61850, IEC 61850-9017.

A partir da base de dados da ACM Digital Library, da El Compendex, da Scopus, da Elsevier, do IEEE, da Science@Direct e do Scopus 433 artigos foram encontrados pela string, dentro os quais foram selecionados 103 estudos, no período de 2019 a 2021, para compor a Tabela A.1 que apresenta a revisão de literatura do assunto em questão. Esta primeira pesquisa consta no Apêndice deste trabalho.

Posteriormente, foi realizada uma nova pesquisa a fim de refinar o estudo. O novo período temporal analisado foi fixado entre 2020 a 2022, para que pudesse ser verificado como o setor vem estudando e laborando a IEC 61850. As palavras chaves, string, definidas foram: GOOSE OR IEC 61850 OR IEC 61850-9017 OR IED OR Power quality. A partir da base de dados da Biblioteca Digital IEEE, da Science@Direct e do Scopus 99 artigos foram encontrados pela string, dentro os quais foram selecionados 44 estudos para compor a Tabela 2.1 que apresenta a segunda revisão.

Tabela 2.1: Revisão da Literatura II

<b>Título</b>	<b>Referência</b>
Distributed energy resources on distribution networks: A systematic review of modelling, simulation, metrics, and impacts	[33]
Data Analytics Based Power Quality Investigations in Emerging Electric Power System Using Sparse Decomposition	[34]
A method to quantify the logical node importance for IEC 61850 based substation automation system	[35]
Controls of hybrid energy storage systems in microgrids: Critical review, case study and future trends	[36]
Cyber-enabled grids: Shaping future energy systems	[37]
Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – A research review and future trends	[38]
Evolutionary structural optimization in energy absorption structures	[39]
Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration	[40]

A comprehensive review of improving power quality using active power filters	[41]
Grid tied solar PV system with power quality enhancement using adaptive generalized maximum Versoria criterion	[42]
A Forecasting Approach for IoT-Based Energy and Power Quality Monitoring in Buildings	[43]
Multifunctional bidirectional charging system for EVs and the grid with improved power quality using sparse proportionate -NLMF based method	[44]
Reweighted L0 norm variable step size continuous mixed p-norm control scheme for mitigating power quality problems of grid coupled solar PV system	[45]
A novel multiple impact factors based accuracy analysis approach for power quality disturbance detection	[46]
A lightweight key management protocol for secure communication in smart grids	[47]
IEC 61850 communication protocol with the protection and control numerical relays for optimum substation automation system	[36]
Implementing Secure Routable GOOSE and SV Messages Based on IEC 61850-90-5	[48]
Data-centric communication framework for multicast iec 61850 routable GOOSE messages over the WAN in modern power systems	[49]
Event-based simulation of a decentralized protection system based on secured GOOSE messages	[50]
A model-based design of distributed automation systems for the smart grid: Implementation and validation	[51]
A Review of IEC 62351 Security Mechanisms for IEC 61850 Message Exchanges	[52]
Performance analysis of iec 61850 messages in lte communication for reactive power management in microgrids	[53]
Controller Hardware-in-the-Loop Testing of an IEC 61850 GOOSE Based Control for Seamless Transition of a Microgrid between Island and Grid-Connected Modes	[54]
IEC 61850 interface for real time power system simulation	[51]

Implementation of resilient self-healing microgrids with iec 61850-based communications	[55]
Vulnerability and impact analysis of the IEC 61850 goose protocol in the smart grid	[56]
Teaching Digital Control of Substation and IEC 61850 with a Test Bench Validation	[57]
Performance assessment of a line protection implemented with process bus and GOOSE through transient closed loop tests	[58]
Denial-of-service attack on iec 61850-based substation automation system: A crucial cyber threat towards smart substation pathways	[59]
Initialization Vector for application of IEC 61850-90-5 security features on R-GOOSE and R-SV messages	[60]
Precision timing and communication networking experiments in a real-time power grid hardware-in-the-loop laboratory	[61]
Network Architecture for IEC61850-90-5 Communication: Case Study of Evaluating R-GOOSE over 5G for Communication-Based Protection	[62]
Real-Time Modeling and Testing of Distance Protection Relay Based on IEC 61850 Protocol	[63]
A Method for Achieving Confidentiality and Integrity in IEC 61850 GOOSE Messages	[48]
Research on distributed feeder automation communication based on XMPP and GOOSE	[64]
Iec 61850-based centralized protection against single line-to-ground faults in ungrounded distribution systems	[65]
A Security Gateway for power distribution systems in open networks	[66]
Cyber-physical testbed for Wide Area Measurement System employing IEC 61850 and IEEE C37.118 based communication	[31]
Hardware Development and Interoperability Testing of a Multivendor-IEC-61850-Based Digital Substation	[67]
A feasibility study of using Manufacturing Message Specification report gateway model for IEC61850 inter-substation type-1 messaging over Wide Area Network	[68]
Unified Power Quality Management for Traction Substation	

Groups Connected to Weak Power Grids	[69]
The influence of IEC 61850 standard: implementation and development of a functional substation automation simulator	[70]
Mission critical safety functions in IEC-61850 based substation automation system-a reliability review	[71]
Cascading failure prevention in electrical power protection system of nuclear power plant using IEC61850	[72]

Através das revisões de literatura foi possível verificar a importância do tema. Segundo [48], os sistemas de energia da próxima geração são redes ativas que lidam com fluxo de energia bidirecional. Eles precisam ser equipados com amplos recursos de comunicação para realizar operações dinâmicas de monitoramento, proteção e controle.

Os estudos apresentados em [48] apresentam os sincrofasores fornecendo uma representação em tempo real do estado atual da rede. As Unidades de Medição Fasorial (PMU) colocadas em diferentes partes da rede coletam periodicamente dados dos sincrofasores. Em seguida, eles o enviam para um Concentrador de Dados Fasoriais (PDCs) por meio de Sistemas de Monitoramento de Área Alargada (WAMS). Todo o sistema formado como PMU Communication Network (PMU-CN) é baseado em dois frameworks disponíveis: IEEE C37.118.2 e IEC 61850-90-5.

Em [65] uma nova biblioteca de simulação é desenvolvida no OMNeT++ para modelar falhas em sistemas de distribuição. A biblioteca proposta possibilita o cálculo do estado de linhas e barramentos do ponto de vista de um sistema de proteção, possibilitando a modelagem de indicadores de sobrecorrente, falta de energia e passagem de faltas. A biblioteca é aplicada para modelar um sistema de proteção descentralizado baseado na troca de mensagens IEC 61850 Generic GOOSE entre dispositivos eletrônicos inteligentes responsáveis pela operação de disjuntores e seccionadoras. O tempo necessário para proteger e transmitir mensagens GOOSE pela Internet é caracterizado e incluído no modelo. Vários estudos são realizados para analisar o efeito de diferentes parâmetros, como tempos de retransmissão GOOSE e taxas de falha de dispositivos de comutação e canais de comunicação, sobre o desempenho do sistema de proteção.

# Capítulo 3

## Contextualização

### 3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apontados os conceitos globais e definições básicas acerca de GD compartilhada, especificamente em condomínios solares e os aspectos regulatórios envolvidos, bem como, os principais desafios enfrentados pelas concessionárias de Energia em eventos de Qualidade de Energia elétrica e a proteção de sistemas elétricos ao se inserir uma GD.

Outro item apresentado é a utilização da IEC 61850 para transmitir dados de qualidade de energia. Sendo especificamente tratado na IEC 61850-90-17. Apresenta-se também o programa supervisor utilizado, o ELIPSE através do qual foi possível realizar a comunicação vertical.

### 3.2 Geração Distribuída Compartilhada - Condomínios Solares

A Resolução Normativa [4] trouxe modificações relevantes à Resolução Normativa [3]. De acordo com [4], a geração compartilhada é a reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com micro ou mini geração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Ainda de acordo com [4], o autoconsumo remoto caracteriza-se por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com micro ou mini geração distribuída em local

diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Isso posto, torna-se possível a implantação de modelos dos condomínios solares, os quais são definidos pela associação de indivíduos, que visam a realização de investimentos em projetos de instalações de energia solar fotovoltaica, podendo estes empreender (vender) ou utilizar os créditos gerados.

Oportunizar a consumidores, que se interessam pela implantação da tecnologia, beneficiar-se do compartilhamento dessa forma de geração de energia, ainda que estes não possuam espaço físico para a instalação dos módulos fotovoltaicos em seus telhados ou não desejem a instalação em seu imóvel.

### 3.2.1 Marco Legal da Geração Distribuída

A publicação da Lei [73] definiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, *Sistema de Compensação de Energia Elétrica* (SCEE) e o *Programa de Energia Renovável Social* (PERS). Esta realizou-se em seguida a sanção presidencial do Projeto de Lei nº 5.829/2019.

A [73] instituiu diretrizes com maiores detalhes aplicáveis ao mercado de *Geração Distribuída* (GD), que é atualmente regulamentado pelas [3, 4]. De acordo com [74], as principais medidas da Lei [73] são as seguintes:

- Limites da potência instalada da minigeração distribuída;
- Fontes despacháveis;
- Direito adquirido e período de transição;
- Novo regime tarifário das unidades consumidoras participantes do SCEE;
- Apresentação da garantia de fiel cumprimento;
- Impossibilidade de comercializar parecer de acesso e transferir titularidade da unidade consumidora;
- Exposição contratual involuntária das distribuidoras;
- Contratação de serviços ancilares de GD ;

- Não incidência das bandeiras tarifárias sobre os excedentes Controle de disjuntores, através de chaves remotas;
- Chamadas públicas de comercialização de excedentes;
- Custo de disponibilidade;
- Grupo B optante;
- Instalações de iluminação pública no SCEE;
- Definição de diretrizes, custos e benefícios da GD;
- Criação do Programa de Energia Renovável Social;
- Vetos presidenciais.

Dentre as quais destacam-se os novos institutos jurídicos de reunião de consumidores na geração compartilhada:

A Lei apresentou mudanças dentre as quais ressalta-se que além dos consórcios e cooperativas já destacados por [3, 4], há a possibilidade, da mesma forma, a associação de consumidores por meio de condomínio civil voluntário e edifício [75] e [76] do Código Civil ou qualquer forma de associação civil, composta por pessoas físicas ou jurídicas, contanto que sejam criadas estritamente para geração compartilhada, sendo a totalidade de suas unidades consumidoras abastecida pela mesma concessionária.

Desse modo, de acordo com as decisões recentes da Procuradoria da ANEEL, passa-se a apreciar mais a finalidade da reunião dos consumidores, do que a forma jurídica, permitindo-lhes maior autonomia para opção da forma mais adequada às suas demandas.

### 3.3 Qualidade de Energia elétrica e Geração Distribuída

Conforme visto no Capítulo 1, a inserção da GD traz diversos benefícios ao sistema, dentre as principais vantagens, podemos citar o adiamento dos investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, diversificação da matriz energética, redução das perdas ativas e contribuição para a melhoria do perfil de tensão [77].

No entanto, a presença da geração distribuída na rede de distribuição adicionou complexidade operacional, principalmente no âmbito da proteção de sistemas elétricos. Complexidade esta incorporada tendo em vista que o sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil foi implantado para operar numa configuração na qual o fluxo de corrente e potência é unidirecional, ou seja, em um alimentador de distribuição somente há fonte de energia do lado da concessionária, com o fluxo de corrente e potência somente no sentido da subestação de distribuição para as cargas.

Nesse novo contexto, a configuração unidirecional deixa de existir e o sistema passa a ser alimentado não só pela concessionária, mas também, pelos geradores distribuídos [78]. Dentre os novos desafios na rede de distribuição destacam-se: a perda da seletividade dos religadores, aumento dos níveis de curto-circuito da rede de distribuição e possibilidade de formação de subsistemas ilhados [77].

Com essas relevantes modificações, indicadores de QEE se tornam essenciais para o bom funcionamento de redes elétricas e precisam ser compreendidos para análise adequada dos impactos técnicos na mesma. Segundo [79], a temática qualidade da energia compreende um conjunto de fenômenos, englobando desde sistemas da energia elétrica até adversidades concernentes com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessarte, necessitam ser propagado e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica. A interpretação destes fenômenos, principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PACs (ponto de acoplamento comum) como, dentro das instalações dos próprios consumidores, está relacionada diretamente à correção do fator de potência, racionalização da energia e aumento da produtividade. A ocorrência destes reverses indica a necessidade de uma busca mútua de soluções, entre todos os setores relacionados, para a realização de práticas que visem viabilidade técnica e econômica.

Assim sendo, a definição da diminuição da qualidade da energia empregada por especialistas do setor, como sendo: “qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos” [79].

### 3.3.1 Qualidade do Produto

Os fenômenos de QEE estabelecem os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do produto. Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência;

## 3.4 Utilizando a IEC 61850 para transmitir dados de qualidade de energia

Em todo o mundo, as redes elétricas inteligentes (smart grids) estão sendo amplamente implantadas [80]. O gerenciamento e controle das subestações é feito remotamente pela concessionária através de redes de comunicação privada e restritas aos administradores do sistema, sem qualquer interferência externa. Neste estudo, a IEC é aplicada para o monitoramento de uma condomínios solares com alto nível de penetração.

### 3.4.1 A norma IEC 61850

A norma *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61850 define um padrão para comunicação de dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs, Intelligent Electronic Device) em subestações de energia elétrica (SEs) [15].

Os IEDs são relés digitais que permitem implementação de lógicas para chaveamento, bloqueio e abertura. A comunicação entre os IEDs é responsável pela automação e controle de toda a subestação e também pela operação realizada pela concessionária. A partir da rede de comunicação entre os IEDs que as falhas são resolvidas localmente na SE, não permitindo que não se estendam por toda a rede nacional de energia elétrica [15].

Os IEDs de uma SE se comunicam com outros IEDs através do protocolo de comunicação Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) [81]. O GOOSE é implementado diretamente na camada de enlace da pilha de protocolos TCP/IP, pois suas mensagens transportam conteúdos genéricos e possuem requisitos estritos de tempo. Sendo essa a razão pela qual os IEDs enviam mensagens GOOSE.

A fim de controlar os níveis de tensão e corrente em conformidade na subestação, os IEDs podem emitir comandos de controle como um disjuntor, por exemplo, caso detectem fora do limite corrente, tensão ou frequência provenientes dos sensores e equipamentos de energia conectados aos mesmos. Estes equipamentos de padrão industrial são desenvolvidos com pequena capacidade de processamento, apenas o suficiente para suas funções básicas [15].

Segundo a norma IEC 61850, a comunicação entre IEDs com o protocolo GOOSE no requisito mais estrito define uma faixa temporal de 3 ms para sua realização. Sendo assim, este protocolo é considerado de tempo real publisher/subscriber. Justificando a questão do GOOSE ser implementado sobre a camada de enlace, reduzindo os tempos de geração, recebimento e processamento das mensagens; contudo, acarreta falta de segurança que poderia ser provida por camadas superiores da pilha TCP/IP. Tornando-se uma preocupação uma vez que não há controle na integridade e na confidencialidade dos dados enviados através de mensagens GOOSE, facilitando ação de hackers [82].

As subestações tornaram-se mais conectadas às redes externas devido a novas demandas emergentes das smart grids, como por exemplo medidores inteligentes com comunicação bidirecional com a subestação, gerando potencial para atacantes externos à rede da concessionária [15].

Infelizmente, a segurança da comunicação em tempo real de redes de automação de subestação de energia continua sendo uma adversidade. Os algoritmos criptográficos podem auxiliar na implementação e garantir maior segurança na utilização do protocolo GOOSE. Porém, a aplicação desses algoritmos interfere nos tempos gastos para comunicação, pois são inseridos tempos de cifragem, decifragem e para cálculos de hash, por exemplo. Em virtude da baixa capacidade de processamento dos dispositivos IEDs, a influência desses algoritmos pode ser ainda maior [15].

#### 3.4.1.1 Modelo de Dados

A modelagem de dados, a partir da norma IEC 61850, visa suprir as funcionalidades encontradas em Automação de Subestações. Para esta finalidade é empregada uma abordagem orientada a objetos que estabelece, entre outros, os seguintes objetos:

- Nós lógicos: Pode ser definido por um agrupamento funcional de dados. Sendo a menor parte de uma função com capacidade de trocar dados com outros objetos (funções de proteção, disjuntor, medições, etc). Em que cada nó lógico possui

uma estrutura de dados definida pela norma, estes dados são compartilhados entre outros nós lógicos através de um conjunto de regras denominada serviços;

- Dispositivos lógicos: É constituído de um conjunto de nós lógicos;
- Dispositivos físicos: Compõe o referido IED sendo constituído por um conjunto de dispositivos lógicos.

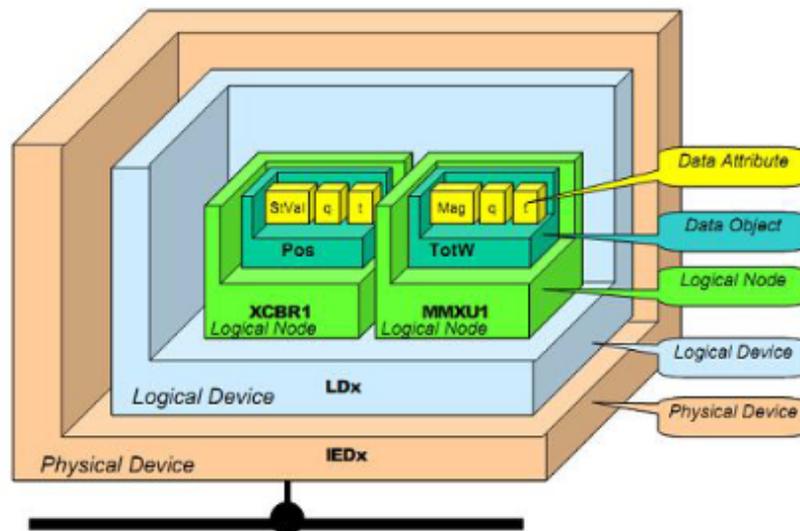


Figura 3.1: Representação do Modelo de Dados [81].

### 3.4.1.2 Protocolo e Tipos de Mensagens

Em uma arquitetura baseada na IEC 61850, de acordo com o protocolo, são possíveis distintos modelos de mensagens, que são utilizadas de acordo com a categoria de comunicação. Destacam-se os principais tipos como:

- Comunicação Vertical;
- Comunicação Horizontal;

Em [83] define-se Comunicação vertical como tipo de comunicação ocorre entre dispositivos pertencentes a níveis funcionais distintos e são realizadas no modo cliente-servidor. A configuração de IEDs, informações e medições de processo são exemplos de comunicação vertical. Neste caso, o servidor corresponde aos IEDs (nível de vão), que fornecem informações para o sistema SCADA, que corresponde ao cliente da comunicação (nível de estação). Sendo, geralmente, esta comunicação, não constituída por restrições críticas de tempo.

Um tipo de comunicação vertical entre IEDs e sistemas SCADA são as mensagens MMS (Manufacturing Message Specification). Essas mensagens podem ser solicitadas via pooling ou via reports (relatórios). Na leitura via pooling o sistema SCADA solicita as informações dos IEDs, já via reports estas informações são disponibilizadas pelos IEDs para o sistema SCADA, mediante ao cumprimento de condições pré-configuradas, como banda morta ou o vencimento de um tempo de integridade (tempo máximo entre amostras).

Assim como, estabelece a comunicação vertical como sendo aquela que ocorre entre os dispositivos pertencentes à mesma camada funcional. As mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) e GSSE (Generic Substation Status Event) compõem esse grupo de mensagens de alta prioridade. A troca dessas mensagens é realizada no modo produtor-consumidor, em que determinado IED disponibiliza as informações na rede e o IED consumidor trata as mensagens que lhe forem necessárias [83].

A fim de que dois IEDs distintos enviem um ao outro informação, é necessária a utilização de Protocolo de Comunicação que pode ser definido como o conjunto de diretrizes estabelecido e seguido pelos dispositivos inteligentes (IEDs), determina o tipo de mensagens e a ordem que as mesmas devem seguir. Esse conjunto de diretrizes possibilita aos equipamentos de diferentes fabricantes e de arquiteturas internas distintas a troca de informações relevantes para o correto funcionamento e monitoramento do sistema como um todo [84].

A norma é dividida em 10 principais partes, como pode ser observado através da figura 3.2, sendo cada uma delas referentes a um documento que aponta o uso do protocolo.

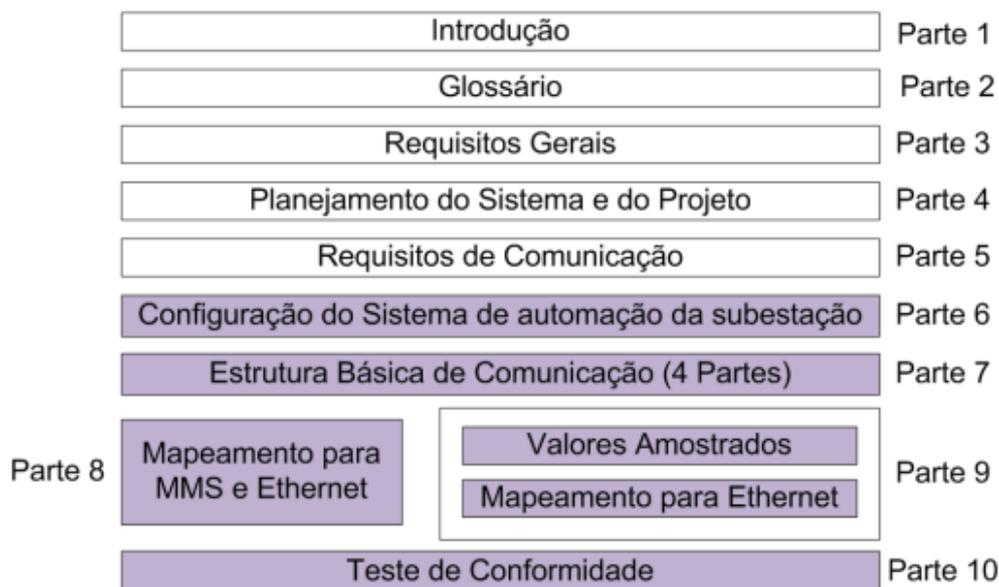


Figura 3.2: Composição do padrão IEC 61850 [85].

De acordo com [86], a IEC-61850 é um modelo de dados padronizado totalmente voltado aos conceitos de orientação a objetos. Sendo assim, utiliza funções e atributos de dispositivos físicos (IEDs) encontrados em uma subestação ou usina. As funções e suas respectivas categorias formam o que se denomina Nó Lógico, e um conjunto de nós lógicos constituem um dispositivo lógico, que por sua vez compõe internamente um IED.

Exemplificando, pode-se citar o caminho para encontrar uma variável analógica. Neste caso utilizaremos a frequência. Acessando-se o dispositivo físico (ou IED) através do seu endereço de rede, temos acesso em princípio ao Dispositivo Lógico. Este, uma vez acessado disponibiliza a localização de vários tipos de Logical Devices, que podem ser proteções, comandos, retornos digitais, configurações do próprio IED e o que nos interessa nesse exemplo, que são os tags analógicos (MET). Em seu interior estão os “Nós Lógicos”. O nó a ser utilizado será o MMXU. Ali é possível visualizar cada uma das classes que compõe o referido “nó lógico”, para em seguida, encontrar o dado que se está procurando. Na figura xxx, nota-se de forma mais objetiva como essa arquitetura é representada, utilizando-se o caractere “\$” como divisor das camadas.

A norma classifica o tipo de mensagens a ser trocadas entre os dispositivos que compõem a rede conforme a importância dessas mensagens para a rede. No quadro 1 é possível verificar qual a importância dada a cada uma das mensagens que trafegam pela rede [87].

#### a. Protocolo MMS

Essas mensagens são do tipo unicast, enviadas a um consumidor apenas e que em geral pode ser um supervisor, um cartão IEC-61850 ou, a um conversor de protocolo (Relab). As mensagens MMS (Manufacturing Message Specification) são utilizadas para troca de informações como sinais analógicos ou digitais, porém, com o único intuito de indicar o status de um determinado equipamento. Como esse protocolo emprega o modelo TCP, ele acaba não se tornando rápido o suficiente para identificar a atuação de uma proteção, por exemplo, pois sua concepção emprega um mecanismo de tratamento de erros.

#### b. Protocolo GOOSE

As mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) podem ser classificadas como mensagens do tipo multicast que levam as informações entre os IEDs. Sendo responsáveis apenas pelo tráfego de mensagens que informam sobre a atuação de qualquer proteção ou sinal digital. Tais mensagens conseguem ser mais rápidas do que a própria atuação física de uma proteção de um relé para outro. Tudo isso por empregarem em sua concepção o padrão UDP, ou seja, não faz a verificação para saber se houve erro na transmissão da mensagem

#### c. Protocolo SV

O protocolo SV (Sampled Variables) é responsável pelo tráfego das leituras analógicas da subestação. Por meio desse protocolo, TPs e TCs conseguem enviar suas medições para os relés através de leituras digitais pela própria rede ethernet. Os relés, por sua vez, com um conversor AD incorporado, tratam esse dado e o utilizam em suas proteções.

#### d. SCL (Substation Configuration Language)

Estabeleceu-se um padrão para o formato dos arquivos de configuração de subestações. Do inglês Substation Configuration Language, foi baseado na estrutura XML (eXtensible Markup Language) e criou-se uma padronização que permitiu o compartilhamento de informações entre equipamentos e ferramentas de software de engenharia. Com isso, cada fabricante possui um arquivo .SCL que deve ser fornecido junto com o equipamento, assim como acontece em outras redes industriais (Profibus e Devicenet). Há 4 diferentes tipos de arquivos aceitos pela norma:

- SSD (System Specification Description) – apresenta as funções de energização do sistema, contendo o diagrama unifilar com as funções de cada relé;
- SCD (Substation Configuration Description) – determina o local no qual os dados

se encontram e para onde devem ir, ou seja, a configuração da subestação;

- ICD (IED Capability Description) – define a disponibilidade de dados s em cada IED;
- CID (Configured IED Description) – indicas as informações que o IED disponibilizará na rede.

A estrutura de um relé

- ANN – encontram-se os status digitais como os leds frontais do relé, valor das entradas e saídas digitais, valor das memórias internas e outros parâmetros programados em função do estudo de seletividade do mesmo.
- CFG – nesta pasta encontram-se as configurações dos “reports” que serão utilizados e também tags com informações de Proxy e do ID do relé;
- CON – aqui ficam os tags utilizados como comandos para o relé, chamados de “Remote Bits”, além dos seus respectivos status;
- MET – nesta pasta encontram-se todas as medições analógicas feitas pelo relé. Nela é possível encontrar grandezas elétricas como corrente, tensão, frequência, fator de potência, energia (ativa e reativa) e em alguns relés até mesmo temperaturas;
- PRO – contem os tags responsáveis pelas indicações de atuação das proteções do relé. Nele deve conter a descrição completa de cada uma das proteções disponíveis para serem lidas no sistema supervisório.

### 3.4.2 A norma IEC 61850-90-17

A IEC 61850-90-17 parte do IEC 61850, que é um relatório técnico, fornece uma maneira de trocar dados de qualidade de energia entre instrumentos cujas funções incluem medição, registro e possivelmente monitoramento de fenômenos de qualidade de energia em sistemas de fonte de alimentação e clientes usando-os de uma forma que está conformidade com os conceitos da IEC 61850.

Em 2017, foi publicado o referido relatório técnico IEC , definindo as estruturas de nós lógicos para os parâmetros básicos de PJ, que devem ser medidos por instrumentos classe A. na faixa de 2 kHz a 9 kHz e na faixa de 9 kHz a 150 banda kHz, bem como para harmônicos, inter-harmônicos de corrente, gravação de corrente. [88]

Neste relatório, uma das seções especifica a transmissão de eventos PQ. Estruturas de nós lógicos para afundamentos, aumentos, interrupções de energia e mudanças rápidas de tensão (RVC) foram definidas. Também foi dado o nome do novo nó LN QITR para "transitórios", afirmando ao mesmo tempo que o registro desse tipo de transtorno não é obrigatório, mas recomendado pode fornecer informações valiosas. No ponto 6, o relatório descreve os princípios de criação de nós lógicos para a transmissão de parâmetros JEE agregados em 200 ms, 3 s, 10 s, 10 min, 120 min. [88]

Segundo [88], a aplicação de fontes renováveis de energia e a reestruturação da demanda de energia elétrica envolvem também os requisitos para o monitoramento e avaliação de sobretensões e transitórios. Uma avaliação de distúrbios conduzidos por corrente em frequências de até 150 kHz também é postulada. Assim, as grandezas relevantes em dispositivos de medição da QEE devem ser medidas. A falta de padronização dos protocolos de transmissão de dados para dispositivos QEE se torna muito importante. Isso introduz limitações no crescimento dos sistemas de monitoramento e avaliação QEE. Existem atividades destinadas a introduzir o padrão de comunicação baseado no protocolo IEC 61850 para dispositivos de medição QEE. O relatório IEC sobre a norma relevante já está disponível. Os requisitos de segurança de TI para aquisição, transmissão e coleta de dados PQ também aumentaram significativamente.

Para os autores, a padronização dos protocolos de transmissão de dados é inevitável. O anúncio dessa tendência se deu pela publicação do relatório IEC TR 61850-90-17 e a presença no mercado de dispositivos que podem funcionar de acordo com os requisitos de sua proposta - possivelmente após a complementação do software. Por essas razões, eles julgaram a publicação deste relatório, e possivelmente do padrão relevante no futuro, deve ser considerada como um fator que necessita de mudanças muito significativas no projeto de hardware, protocolos de comunicação e estrutura do sistema. Portanto, o relatório merece uma discussão mais ampla mais adiante no artigo [88].

O estudo trata da solução para monitoramento e análise de qualidade de energia selecionada pela Enel Global Infrastructure & Networks. A abordagem tradicional para interfacear instrumentos de qualidade de energia (PQIs) foi baseada em sistemas centrais proprietários desenvolvidos por fabricantes de PQIs. Segundo os autores ao contrário do tradicional, a Enel sempre defendeu soluções não proprietárias para fazer a interface desses dispositivos e seus dados. No entanto, o upload, a análise e o relatório de quaisquer dados de gravação para um local central nunca haviam sido completamente otimizados antes. Com base na análise de longo prazo do tamanho dos bancos de dados e dos métodos

de interface proprietários, a Enel Global Infrastructure & Networks decidiu uma nova abordagem válida para toda a empresa em uma perspectiva de longo prazo [89].

Como resultado, um conjunto de padrões globais para PQIs e sistemas foi desenvolvido para o grupo Enel, aproveitando dispositivos compatíveis e substituíveis tanto em nível de hardware quanto de software. Segundo [89], esta nova abordagem reduzirá os custos de implementação e integração dos próximos sistemas de qualidade de energia.

Os métodos de medição de qualidade de energia (PQ) são definidos em IEC 61000-4-30. Na qual, os instrumentos de medição de qualidade de energia são usados para avaliar a qualidade da eletricidade (características de tensão) fornecida pelos sistemas de distribuição e transmissão e para avaliar o desempenho manutenção (emissão) dos equipamentos.

Esses instrumentos fornecem diferentes tipos de dados para diferentes aplicações de dados PQ:

- Monitoramento de qualidade de energia:
  - Continuidade do monitoramento de fornecimento;
  - Monitoramento de diferentes características de tensão: A qualidade de tensão (VQ) cobre uma ampla faixa de distúrbios de tensão e desvios na magnitude da tensão ou forma de onda dos valores ótimos.
- Relatório de conformidade de qualidade de energia:
  - Monitoramento contínuo e relatórios de conformidade de diferentes características de tensão no ponto de conexão.
  - Dados adicionais são úteis para:
    - a) Análise detalhada do problema (por exemplo, registros de forma de onda ou transitórios),
    - b) Avaliação de dados flexível (por exemplo, códigos de rede para pós-processamento de dados).

A IEC 61850-90-17 fornece as diretrizes acerca do envio de dados de qualidade de energia entre instrumentos cujas funções incluem medição, registro e possivelmente monitoramento de fenômenos de qualidade de energia em sistemas de fonte de alimentação e clientes usando-os de uma forma que está conformidade com os conceitos da Norma IEC 61850.

Sendo O objetivo principal a interoperabilidade entre instrumentos de qualidade de energia. Na qual, algumas considerações são relevantes:

1 - A medição dos fenômenos PQ pode ser fornecida por comunicação, por exemplo, a IEC 61 850-9-2 ou transformadores de medição. Contudo, Sua aplicação está fora do escopo deste documento.

2 - Este documento não define nenhum limite para os valores de qualidade de energia, considera os limites de outras fontes (por exemplo, 50160, IEC TS 62749) como valores adequados.

3 - O documento fornece recomendações para convenções de nomenclatura para medições PQ fornecidas por instrumentos de qualidade de energia para manifestar o uso de métodos de medição de qualidade de energia e para garantir interoperabilidade.

#### Termos e definições

- Instrumento de Qualidade de Energia

*Instrumento de Qualidade de Energia, do inglês Power Quality Instrument (PQI)*

Instrumento de acordo com a IEC 62586-1 cuja principal função é medir, registrar e possivelmente monitorar parâmetros de qualidade de energia em sistemas de alimentação elétrica, e cujos métodos de medição (classe A ou classe S) são definidos em IEC 61000-4-30.

- Instrumento de Qualidade de Energia- Classe A

*Instrumento de Qualidade de Energia de classe A, do inglês Power Quality Instrument class A (PQI-A)* PQI de acordo com I EC 62586-1 cujos métodos de medição estão em conformidade com a classe A de I EC 61 000-4-30.

- Canais

Caminho de medição individual por meio de um instrumento.

- Instrumento de Qualidade de Energia- Classe S

*Instrumento de Qualidade de Energia de classe S, do inglês Power Quality Instrument class S (PQI-S)* PQI de acordo com I EC 62586-1 cujos métodos de medição estão em conformidade com a classe S de I EC 61 000-4-30.

- Tensão de Entrada Declarada

*Tensão de entrada declarada (U<sub>din</sub>)*

Valor obtido através da tensão da fonte declarada por uma relação de conversão.

- Tensão de Alimentação Declarada

*Tensão de alimentação declarada* ( $U_c$ )

Tensão nominal do Sistema.

- Flicker

Impressão de instabilidade da sensação visual induzida por um estímulo de luz cuja luminância ou distribuição espectral flutua com o tempo.

[FONTE: IEC 60050-1 61:1990, 161-08-13]

- Qualidade de Energia

Características da energia elétrica em um determinado ponto de um sistema elétrico, avaliadas em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência.

- Valor r.m.s.

raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores instantâneos de uma quantidade tomada em um intervalo de tempo especificado e uma largura de banda especificada

Para efeitos deste documento, aplicam-se os termos abreviados indicados em IEC TS 61 850-2 e IEC 61 850-7-2 e seguintes.

Tabela 3.1: Termos abreviados

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
ACSI	Interface de serviço de comunicação abstrata
CDC	Classe de Dados Comum
CONFEDER	Formulário comum para troca de dados de eventos
COMTRADE	Formulário comum para troca de dados transitórios
Ds	estatísticas derivadas
BD	Base de dados
DMS	Sistema de Gestão de Distribuição
DO	Objeto de dados
EHV	Extra alta Tensão
EMS	Sistema de gerenciamento de energia
EMC	Compatibilidade eletromagnética

F	O elemento é proibido
GMS	Sistema de Gerenciamento de Geração
AT	Alta tensão e ( $> 35$ kV)
I ED	Dispositivo Eletrônico Inteligente
IP	Protocolo de internet
LAN	Rede local
LD	Dispositivo lógico
LN	Nó lógico
LV	Baixa tensão ( $< 1$ kV)
M	Elemento é obrigatório
MMS	Especificação de mensagens de fabricação . Veja I EC 61 850 -8-1
M-O-C	mandatório – opcional – condicional
MS	Sistema de gestão
MSV	Tensão de sinalização da rede (controle de ondulação)
MV	Média tensão (1 kV a 35 kV)
n / D	Não aplicável
nds	estatísticas não derivadas
O	O elemento é opcional.
Pins	Sensação instantânea de flickers. Veja I EC 61 000 -4 -1 5
Plt	Avaliação de flicker de longo prazo. Veja I EC 61000-4-1 5
QP	Qualidade de Energia
PQI	Instrumento de Qualidade de Potência. Veja I EC62586-1
PQDI F	Formato de intercâmbio de dados de qualidade
PST	Avaliação de flicker de curto prazo com base em um período de observação de 1 0 minutos. Veja I EC 61 000-4-1 5
PQI	Instrumento de qualidade de energia
RMS	valor médio da raiz quadrada
r. m. s.	valor médio da raiz quadrada
RVC	Mudança rápida de tensão
SAI-FI	Índice de Frequência de Interrupção Média do Sistema
SBM	Especificado pelo fabricante
SCADA	Controle Supervisório e Aquisição de Dados
SCD	Descrição da Configuração da Subestação
SCL	Idioma de Configuração da Subestação

TCP	protocolo de Controle de Transmissão
THD	Distorção Harmônica Total
TR	Relatório técnico
TS	Especificação técnica
Uc	Tensão de alimentação declarada
Udin	Tensão de entrada declarada
Un	Tensão nominal
XML	Linguagem de marcação extensível

### 3.5 Supervisório Elipse Power

O software Elipse Power é um programa SCADA que segundo [90] fornece um ambiente integrado de comunicação, modelagem e análise, constituindo um moderno sistema EMS (Energy Management System)/ADMS (Advanced Distribution Management System), com aplicação em centros de operação para geração, transmissão, distribuição e grandes plantas industriais. Com sua arquitetura integrada, o software possibilita facilidade no acesso a todas as informações necessárias para o processo de operação de redes de energia, proporcionando a melhor solução para o aumento da eficiência e redução de custos operacionais.

### 3.6 Proteção de sistemas elétricos na presença de GD

Ao se inserir uma GD em um sistema de distribuição, a configuração do fluxo de potência pode ser modificada. Assim sendo, há a possibilidade da coordenação dos relés existentes ser perturbada ou até mesmo se tornar ineficaz [91]. Ressalta-se também que a contribuição para a falta de apenas uma pequena unidade de GD pode ser considerada irrelevante; contudo, as contribuições ao se considerar o somatório de pequenas unidades, ou algumas unidades com gerações mais expressiva podem apresentar alterações consideráveis aos níveis de curto-circuito o suficiente para causar a descoordenação entre os dispositivos de proteção, comprometendo a segurança e a seletividade da rede de distribuição.

# Capítulo 4

## Metodologia para Análise de QEE em GD

### 4.1 Considerações Iniciais

A metodologia aplicada a este trabalho é o teste com equipamentos reais em bancada, os IEDs, com a emulação da GD. O estudo contempla a possibilidade do qualímetro apresentar além das funções de medições de dados de qualidade de energia, funções de proteção e envio de mensagem para outro IED, baseado na IEC 61850. As medições feitas no sistema de GD foram realizadas no Laboratório multidisciplinar da Universidade Federal Fluminense – Friends Lab, que tem por objetivo o desenvolvimento de soluções em redes de energia elétrica baseados em três pilares: Inteligência Computacional Aplicada, Automação de Sistemas de Energia e Smart Grids.

### 4.2 Dimensionamento da GD

O dimensionamento é realizado a partir da análise, em regime permanente, de uma rede de distribuição real na cidade Armação de Búzios no Rio de Janeiro, Brasil onde a média histórica do nível de irradiação solar é de  $5,05\text{kWh/m}^2.\text{dia}$  [92]. A rede é constituída por 343 barras arranjadas em um alimentador radial. A disposição dessa rede é vista na Figura 4.1 representada a seguir.



Figura 4.1: Configuração Rede de Distribuição, Armação de Búzios [93], [94] .

A implementação apresentada neste trabalho se baseia em uma tecnologia de GD solar fotovoltaico, conectado a uma das barras de baixa tensão deste circuito, modelado no software ATP Draw ,conforme figura que se segue. O sistema, condomínio solar, foi determinado em 5MW. O ATP Draw (Alternative Transient Program) é um software utilizado em estudos eletromagnéticos, apresentando uma série de aplicações e vantagens. Empregando o programa é possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo de forma exata a configuração de redes elétricas reais, permitindo ainda a apresentação do diagrama unifilar em um ambiente gráfico. Apresenta funcionalidade para a modelagem tanto dos sistemas de transmissão como os de distribuição em uma mesma plataforma, garantindo as análises de transitórios eletromagnéticos para distintas configurações operacionais [95].

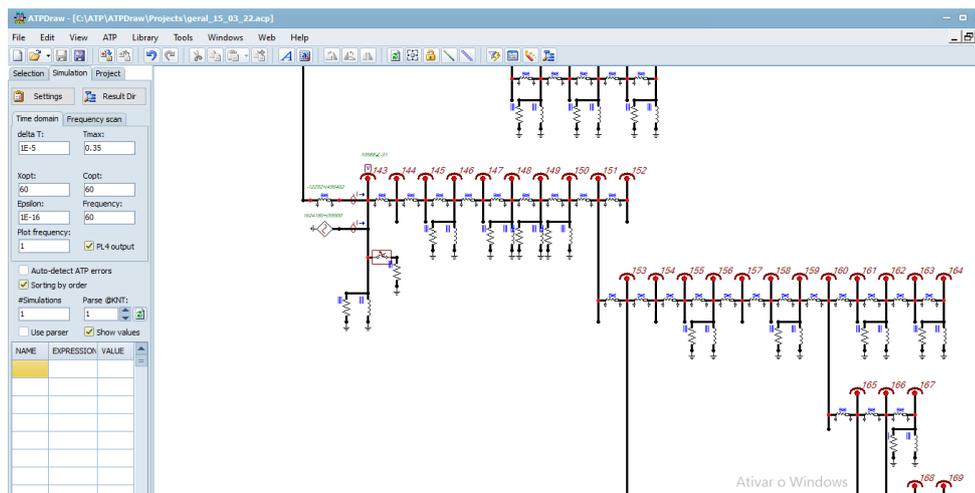


Figura 4.2: Fonte próprio Autor - Parte da Rede Búzios modelada no Software ATP - Imagem da Tela do Software

A Figura 4.3 apresenta o perfil de carga, isto é, o perfil da potência ativa, em p.u., ao longo do tempo (h) em todas as barras conectadas ao barramento principal, de média tensão, o qual foi medido na subestação nas datas de 01 de setembro de 2013 até 31 de agosto de 2014.

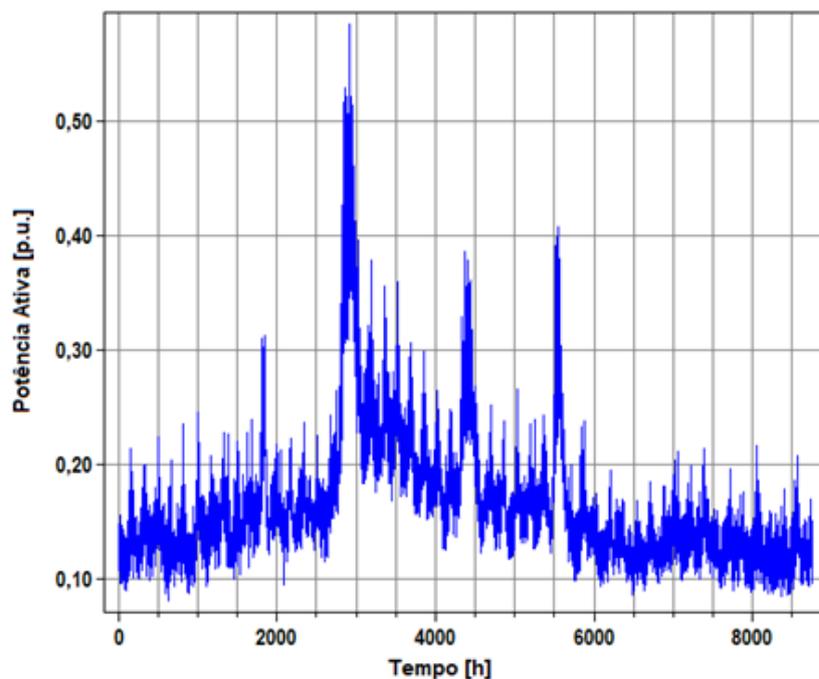


Figura 4.3: Perfil de carregamento das barras.

## 4.3 Utilização de carga para os limites de QEE

A fase experimental deste estudo foi realizada em duas etapas. Primeiramente, utilizou-se uma carga trifásica resistiva, e posteriormente uma mala de teste para emular a GD em testes em laboratório.

### 4.3.1 Aparelho de teste de segurança elétrica CMC 356

O equipamento pode ser descrito como um conjunto universal de teste de relé e ferramenta de comissionamento. Apresentando seis fontes de corrente (modo trifásico: até 64 A/860 VA por canal). Pode-se ressaltar como suas principais características:

- Fontes de corrente para testar até mesmo relés eletromecânicos de alta carga - Amplitudes de corrente elevadas para testes de relé de 5 A - Alta precisão e versatilidade para testar relés estáticos e numéricos de todos os tipos - Rede integrada para testes IEC 61850 IEDs - Medição analógica de 10 canais e funcionalidade de gravação transitória (opção)

## 4.4 Programação SEL

Para os testes foram utilizados dois relés da SEL

### 4.4.1 SEL 735



Figura 4.4: IED SEL-735 utilizado para medição de qualidade de energia de GD [96].

O qualímetro utilizado neste estudo é o IED 735, Medidor de Faturamento e Qualidade de Energia. O IED apresenta além de uma combinação de recursos de qualidade de energia com precisão adequada de medição e faturamento e as seguintes funcionalidades:

- Acesso a dados facilmente. Uma interface de tela sensível ao toque opcional exibe formas de onda em tempo real, dados medidos, alarmes, notificações e configurações.
- Alocação os custos de energia com precisão. O SEL-735 apresenta os requisitos padrão de precisão ANSI e IEC com uma garantia de 0,06 por cento Wh. Ele está em conformidade com os requisitos de classe de precisão ANSI C12.20-2015 Classe 0.1 e IEC 62053-22 0.1 s em uma faixa de operação estendida.
- Captura todos os distúrbios de qualidade de energia. Relatórios de qualidade de energia em conformidade com IEC 61000-4-30 Classe A e até 1 GB de armazenamento integrado ajudam a visualizar as condições do sistema e armazenar anos de dados.
- Compartilhamento de informações críticas com segurança. Comunicação simultaneamente com até dez outros dispositivos usando protocolos padrão do setor, incluindo DNP3, medições de sincrofasores IEEE C37.118.1a-2014, Modbus e IEC 61850. As configurações de segurança da porta permitem três níveis de permissão que fornecem acesso controlado de leitura e gravação.
- Um metro para várias aplicações. Padronização em um medidor em várias aplicações com amplas faixas de medição de corrente e tensão, capacidade de atualização em campo, opções de retrofit e alterações de forma de fiação baseadas em software.

#### 4.4.2 SEL 421



Figura 4.5: IED SEL-421 utilizado para o recebimento da GOOSE e realização de função de TRIP [97].

O SEL-421 é utilizado para proteção de distância e direcional de alta velocidade e controle completo de um bay com dois disjuntores.

Segundo [97], o SEL 421 proteja qualquer linha de transmissão usando uma combinação de cinco zonas de elementos de distância de fase e terra e elementos de sobrecorrente

direcional. Um sistema de interface gráfica do usuário fornece modelos (“templates”) de aplicações e lógicas para esquemas típicos de proteção de linha. Lógica patenteada que melhora a segurança do elemento de Zona 1 de distância para problemas de sobre alcance transitório devido aos transformadores de potencial capacitivos. A lógica de Escolha do Melhor Elemento Direcional de Terra (“Best Choice Ground Directional Element”<sup>®</sup>) otimiza o desempenho do elemento direcional e elimina a necessidade de muitos ajustes direcionais. Lógica opcional previne que a Zona 1 sobre alcance em linhas com compensação série Componentes incrementais opcionais fornecem operação de subciclo para aplicação em linhas críticas que requerem alta velocidade na eliminação de faltas. A tecnologia de link no domínio do tempo (TiDL) opcional e valores amostrados (SV) SEL utilizando IEC 61850-9-2 transformam a maneira como você moderniza sua subestação.

### 4.4.3 SEL 451

De acordo com [98], o SEL-451 é um sistema autônomo completo. Ele tem velocidade, potência e flexibilidade para combinar o controle completo do bay da subestação com a proteção de disjuntor de alta velocidade em um sistema econômico. É possível utilizar o SEL-451 como parte integrante de uma solução completa de proteção, controle e monitoramento de subestações. Ele reduz os custos de manutenção rastreando com precisão a operação do disjuntor. Ao monitorar o número de interrupções e a função acumulada do disjuntor, o SEL-451 ajuda a determinar facilmente a necessidade de manutenção preventiva. Integre informações com sistemas SCADA ou de automação por meio de um processador de comunicações ou diretamente através da porta Ethernet. A tecnologia de link no domínio do tempo (TiDL) opcional e os valores amostrados (SV) SEL que utilizam IEC 61850-9-2 transformam a maneira como você moderniza sua subestação.



Figura 4.6: IED SEL-451 utilizado para identificação para a da função de sobrecorrente [98].

#### 4.4.4 AcSELErator Quickset –SEL-5030 e AcSELErator Architect

O software acSELErator Quickset –SEL-5030 é aplicado a fim de realizar a parametrização do dispositivo. Enquanto que as configurações da comunicação por meio da Norma IEC61850 (Goose ou MMS) são executadas no software AcSELErator Architect®–SEL-5032. A fabricante, SEL, disponibiliza o manual desses softwares e destaca as seguintes aplicabilidades:

- Criar e gerenciar ajustes do relé;
- Desenvolver ajustes off-line;
- Programar lógicas de controle facilmente através das equações SELogic;
- Coletar e armazenar eventos de oscilografias;
- Armazenar e coletar ajustes através de computadores pessoais;
- Ler e enviar todos os ajustes ao relé;
- Analisar eventos e oscilografias;
- Utilizar a interface homem máquina (IHM) para visualizar medições, Relay Word Bits e controle
- Controle de disjuntores, através de chaves remotas.

O software acSELErator Architect é utilizado para configurar os links para trocas de mensagens IEC 61850 GOOSE entre relés SEL ou de outros fabricantes. Permite a criação de mensagens GOOSE e a definição de VLANs para otimização do tráfego de rede dos relés SEL. O software gerencia dados de nós lógicos de todos os dispositivos com IEC 61850 conectados à rede. Este software propicia telas de fácil utilização para identificação e associação dos dados entre os nós lógicos da rede IEC 61850, usando os arquivos CID (“Configured IED Description”) em conformidade com IEC 61850. Os arquivos CID são usados pelo software ACSELERATOR Architect para descrever os dados que serão fornecidos pelos nós lógicos do IEC 61850 de cada relé [99].

# Capítulo 5

## Estudo de Caso

Neste capítulo, a metodologia proposta é aplicada em laboratório. Neste estudo realizou-se testes em bancada com arranjos composto por IEDs e switch, objetivando a avaliação da aplicabilidade da norma IEC 61850 e a comprovação do bom desempenho da comunicação vertical e comunicação horizontal.

### 5.1 Comunicação Vertical

A comunicação vertical verifica-se entre dispositivo atinentes a níveis funcionais distinto, sendo realizada no formato cliente-servidor. Neste contexto, o servidor refere-se aos IEDs (nível de vão), que fornecem informações para o sistema SCADA, neste estudo utilizou-se o software Elipse Power, que corresponde ao cliente da comunicação (nível de estação).

#### 5.1.1 Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs

O arranjo experimental foi elaborado de acordo com a Figura 5.1 no qual os seguintes equipamentos o compõe:

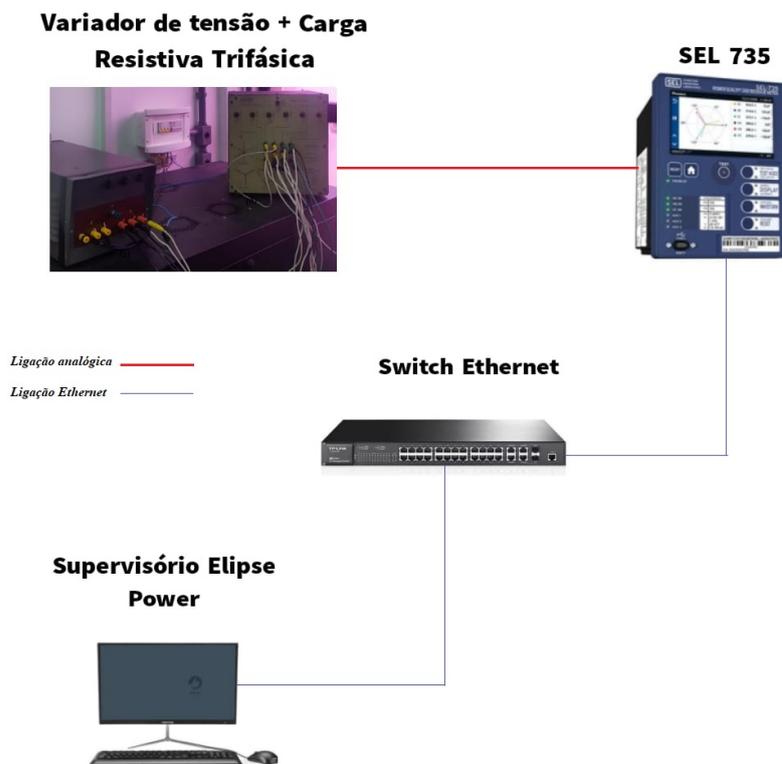


Figura 5.1: Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Vertical

- IED SEL 735: qualímetro, medidor de faturamento e qualidade de energia;
- Variador de tensão e carga resistiva trifásica : Arranjo utilizado para injetar sinais analógicos de tensão e corrente no IED SEL 735 com intuito de emular uma GD e simular grandezas elétricas a serem medidas pelo equipamento ;
- Supervisório Elipse Power: Software SCADA utilizado para o acompanhamento e supervisão das medições feitas pelo SEL 735.

### 5.1.2 Cenário 1: Elipse e SEL 735

Foi utilizado o IED SEL 735, pois este está em conformidade com a Norma IEC 61850. Existe uma proposta na norma IEC 61850 no envio de dados para qualidade de energia de acordo com a mesma, como fora citado no capítulo 3, isso traz escalabilidade, modularidade. Escalabilidade que permite a troca a qualquer momento de equipamentos, estes sendo interoperáveis, há a possibilidade de envio para supervisórios, apresentando todos as vantagens de um sistema supervisório interoperável.

### 5.1.3 Acompanhamento de Dados de Qualidade de Energia por Supervisório

Primeiramente, utilizando o variador de tensão injetou-se na carga trifásica resistiva, fechada em delta 220V, valores entre 95 e 129V. Foram realizados dois ensaios, alimentação em uma, e posteriormente em duas fases que foram verificados na Interface Homem Máquina do IED e acompanhadas no supervisório Elipse Power.

#### 5.1.3.1 Carga Monofásica

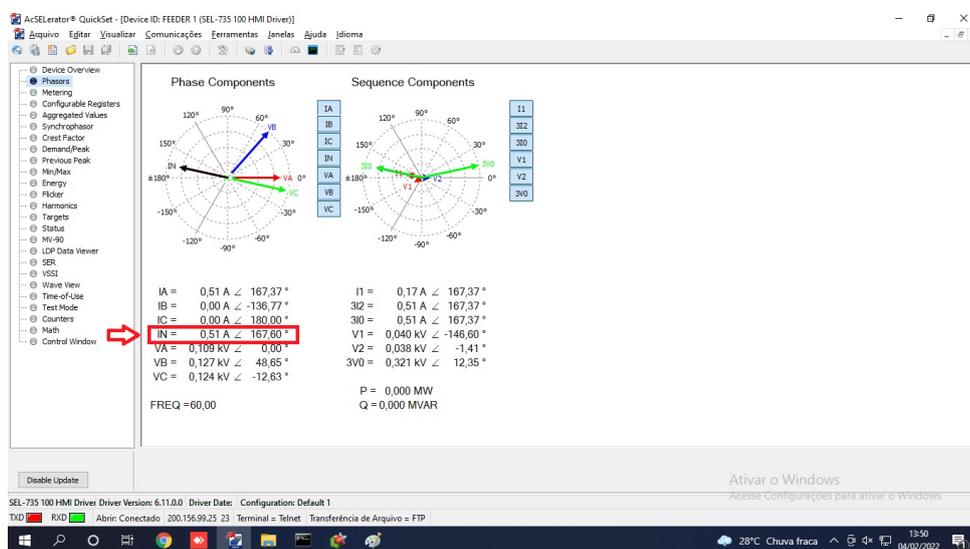


Figura 5.2: Fonte própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet, aba IHM

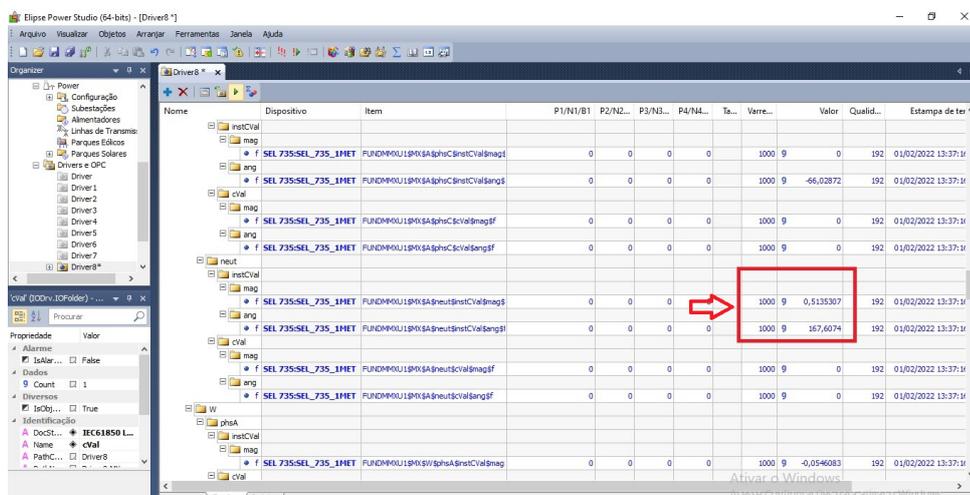


Figura 5.3: Fonte própria Autora - Tela do Software Elipse Power

### 5.1.3.2 Carga Bifásica

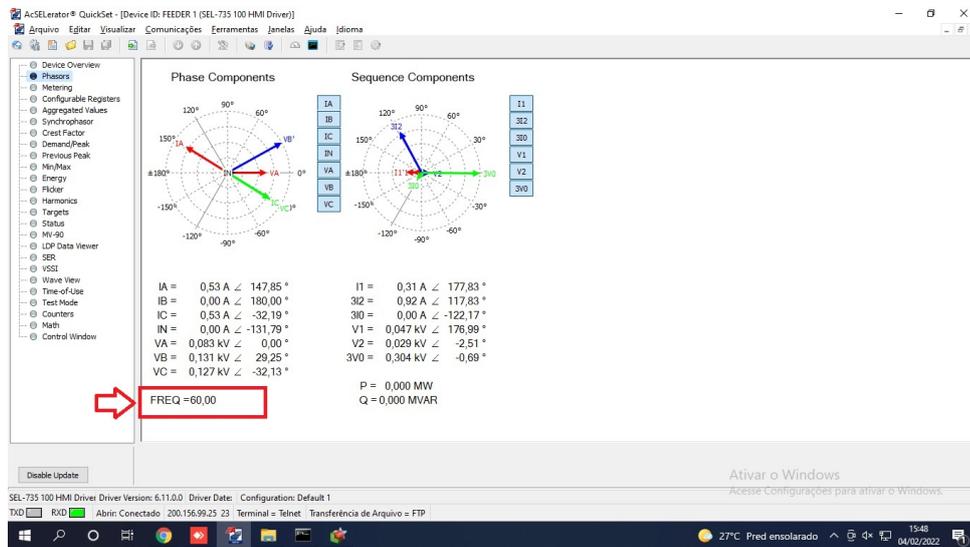


Figura 5.4: Fonte própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet, aba IHM

Nome	Dispositivo	Item	P1/...	P...	'...	P4/...	T...	Varre...	Valor	Qu...	Estampa de tempo	Valor (sem ^		
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$ToIPF\$instMag\$f	0	0	0	0		1000	9	1,2737136	192	04/02/2022 12:53:27,681	9	0,
mag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$ToIPF\$mag\$f	0	0	0	0		1000	9	1,2737136	192	04/02/2022 12:53:27,681	9	0,
Hz														
instMag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$Hz\$instMag\$f	0	0	0	0		1000	9	60,0356	192	04/02/2022 13:02:24,852	9	
mag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$Hz\$mag\$f	0	0	0	0		1000	9	60,0399	192	04/02/2022 13:02:24,852	9	
PPV														
phsAB														
instCVal														
mag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsAB\$instCVal\$m	0	0	0	0		1000	9	0,0293E-02	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	7,160
ang														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsAB\$instCVal\$a	0	0	0	0		1000	9	-115,6645	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	-1
cval														
mag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsAB\$cval\$mag\$f	0	0	0	0		1000	9	0	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	
ang														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsAB\$cval\$ang\$f	0	0	0	0		1000	9	0	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	
phsBC														
instCVal														
mag														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsBC\$instCVal\$m	0	0	0	0		1000	9	1,1321159	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	0,
ang														
f	SEL 735:SEL_735_1MET	FUNDMMXU1\$MX\$PPV\$phsBC\$instCVal\$a	0	0	0	0		1000	9	87,50938	192	01/02/2022 13:37:16,091	9	8
cval														

Figura 5.5: Fonte própria Autora - Tela do Software Elipse Power

Os fasores apresentados nesta etapa não apresentavam coerência e semelhança com os valores encontrados em uma instalação elétrica real. Assim sendo, um novo arranjo foi realizado com uma mala de teste, buscando-se maior conformidade.

### 5.1.4 Cenário 2: Mala de teste

A primeira implementação realizada, nesta etapa, foi um teste para a verificação do diagrama fasorial que pode ser observado conforme figura abaixo.

#### 5.1.4.1 Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs

O arranjo experimental foi elaborado de acordo com a Figura 5.6 no qual os seguintes equipamentos o compõem:

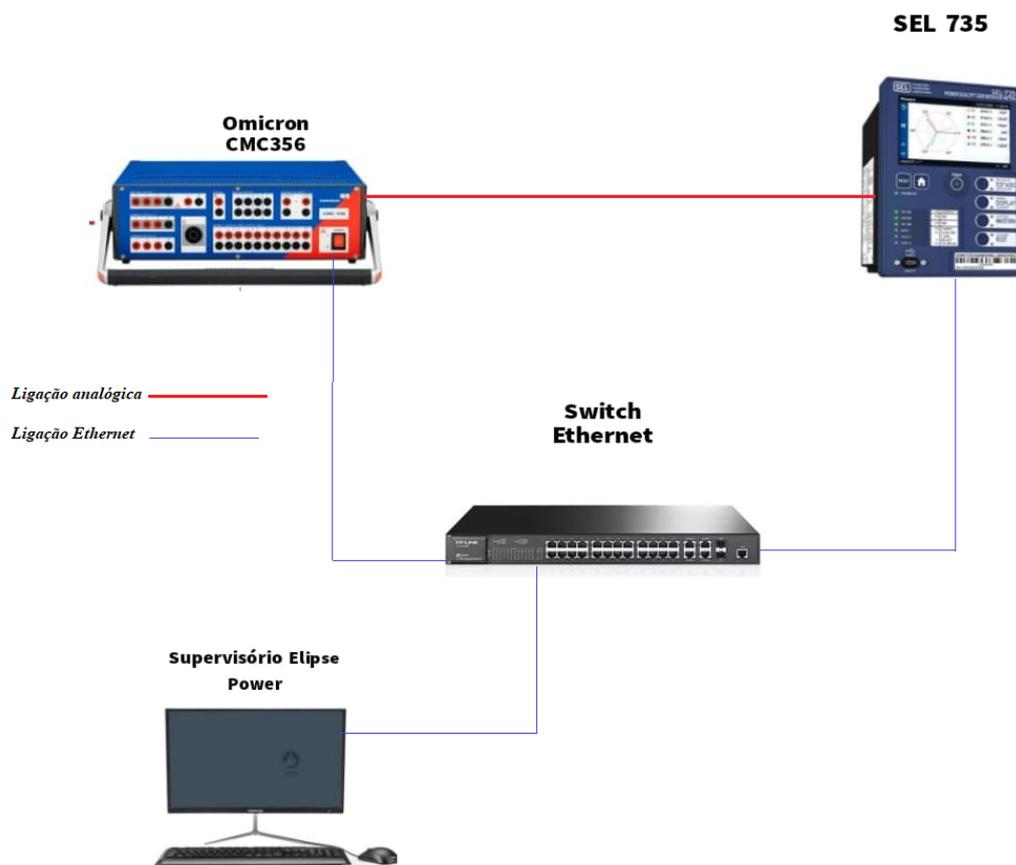


Figura 5.6: Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Vertical

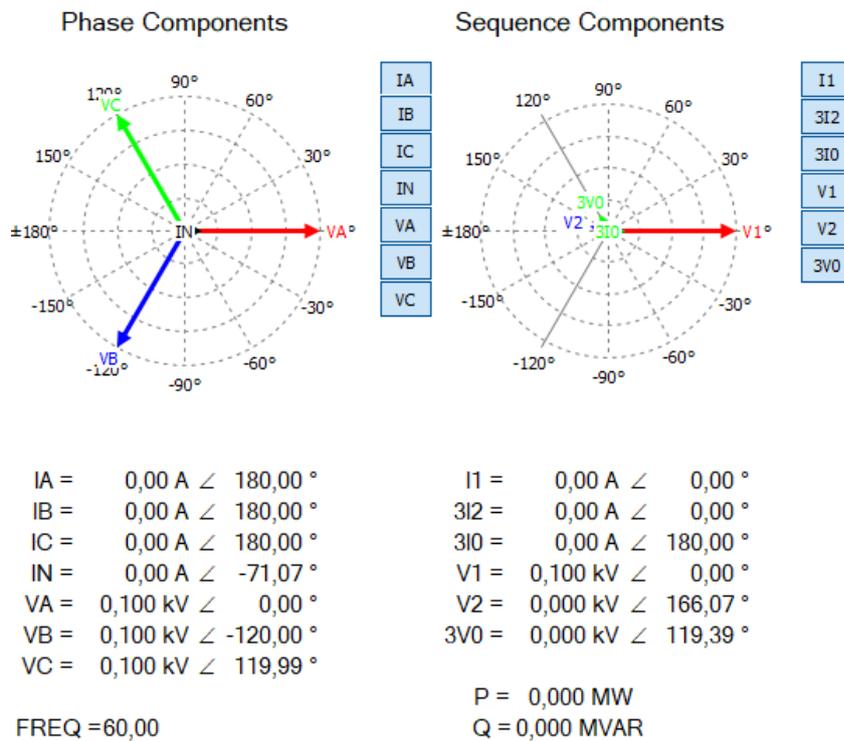


Figura 5.7: Elaborado pela própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet - Diagrama Fasorial

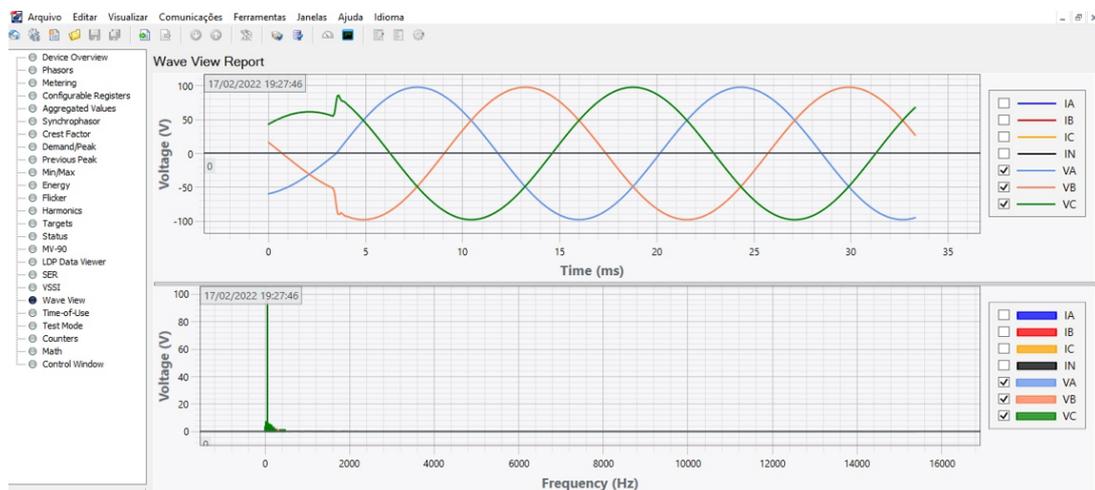


Figura 5.8: Elaborado pela própria Autora - Tela do Software AcSElaration QuickSet - Forma de Onda

Pode-se comprovar a hipótese através dos dados coletados no qualímetro. Contudo, a proposta se baseia na possibilidade do qualímetro também apresente a função de proteção para que seja possível melhorar a qualidade da proteção na subestação, pois será implementado um IED da GD comunicando com o IED da barra, permitindo a tomada de ações mais rápidas de proteção, o que irá trazer mais economia com equipamentos, no

sentindo que estes terão menos desgastes , por exemplo, pois eles atuaram mais rápido.

Sendo assim, os testes descritos na próxima seção apresentam o detalhamento dos ensaios realizados para a verificação do tempo de atuação da proteção.

## 5.2 Comunicação horizontal - GOOSE

A comunicação horizontal ocorre entre os dispositivos contidos na mesma camada funcional. As mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) e GSSE (Generic Substation Status Event) compõe esse grupo de mensagens de alta prioridade. Essa troca de mensagens é realizada no modo produtor - consumidor

### 5.2.1 Cenário 3: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para mala de teste

Neste cenário, utilizou-se a mala de teste e o qualímetro SEL 735. Visando realizar a proteção na GD, a partir do modelo da rede Búzios no software ATP, foi gerado um documento COMTRADE que foi inserido no software TransPlayer da mala, conforme figura 5.9, e injetando-se uma sobrecorrente identificada pelo lógica do IED que atuou desarmando com o envio de uma mensagem GOOSE para a mala.

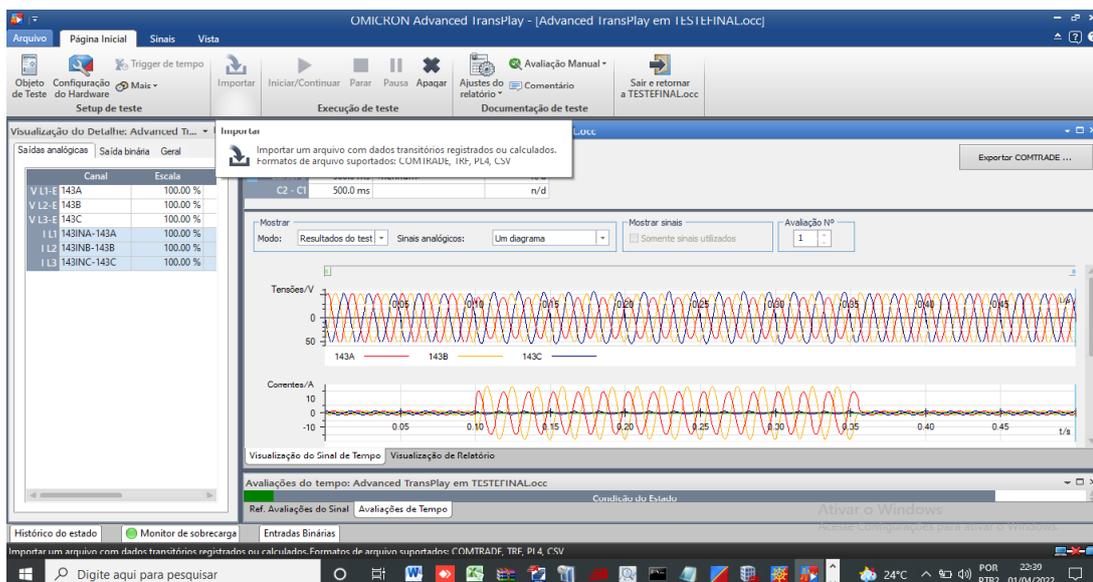


Figura 5.9: Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer

O envio da mensagem GOOSE foi realizado no próprio software da OMICRON, Test

Universe, na aba IEC 61850, GOOSE configuration, conforme pode ser observado na figura 5.10. e figura 5.11.



Figura 5.10: Fonte própria Autora - Teste de Comunicação de acordo com IEC 61850

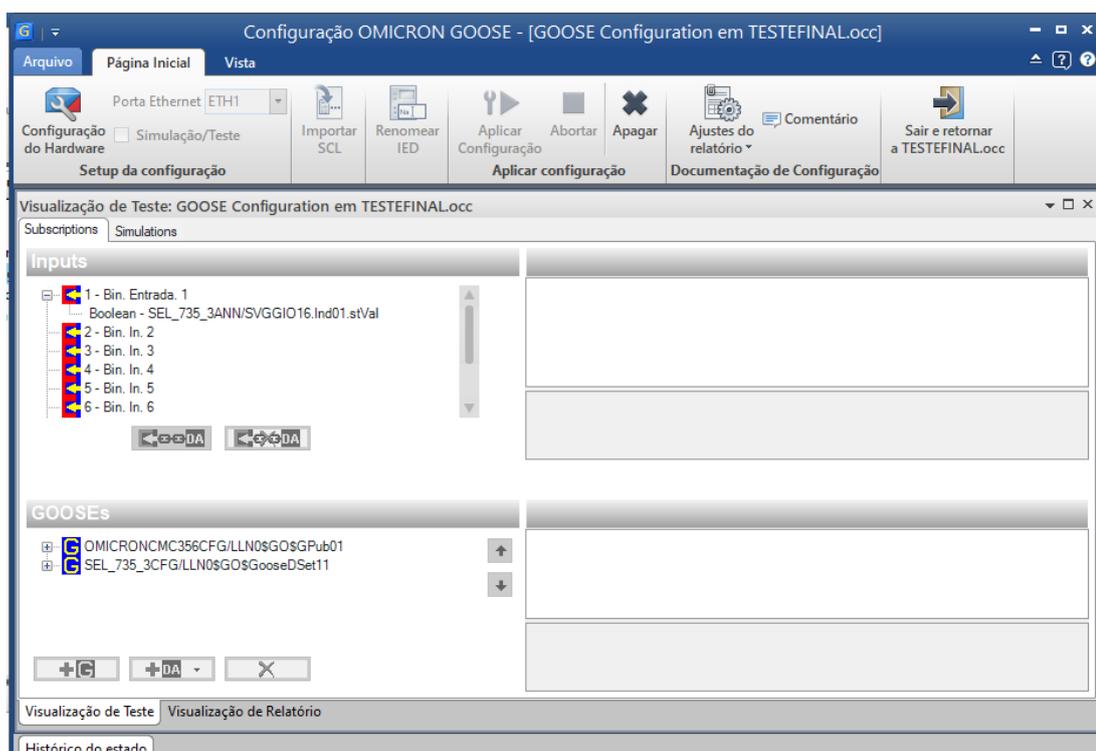


Figura 5.11: Fonte própria Autora -Envio da Mensagem GOOSE

A configuração da mensagem GOOSE foi realizada no software acselerator architect conforme mostrado na figura 5.12.

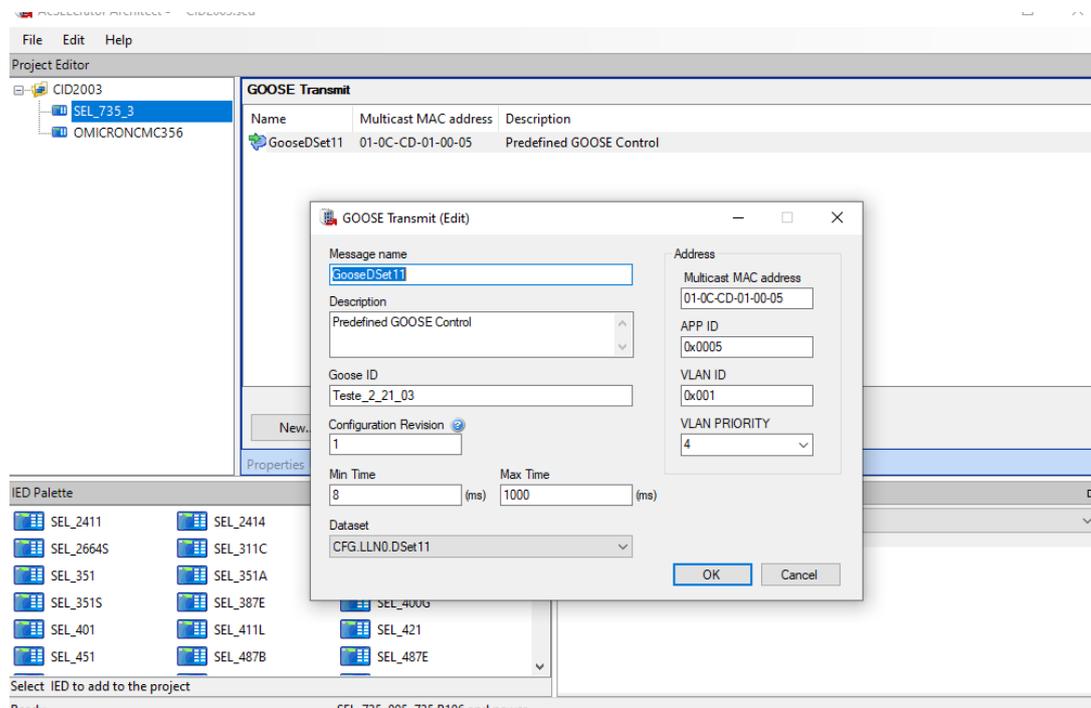


Figura 5.12: Fonte própria Autora - Configuração da mensagem GOOSE no software acselerator architect.

A modelagem do nó lógico para o envio da mensagem GOOSE pode ser verificado de acordo com a figura 5.13.

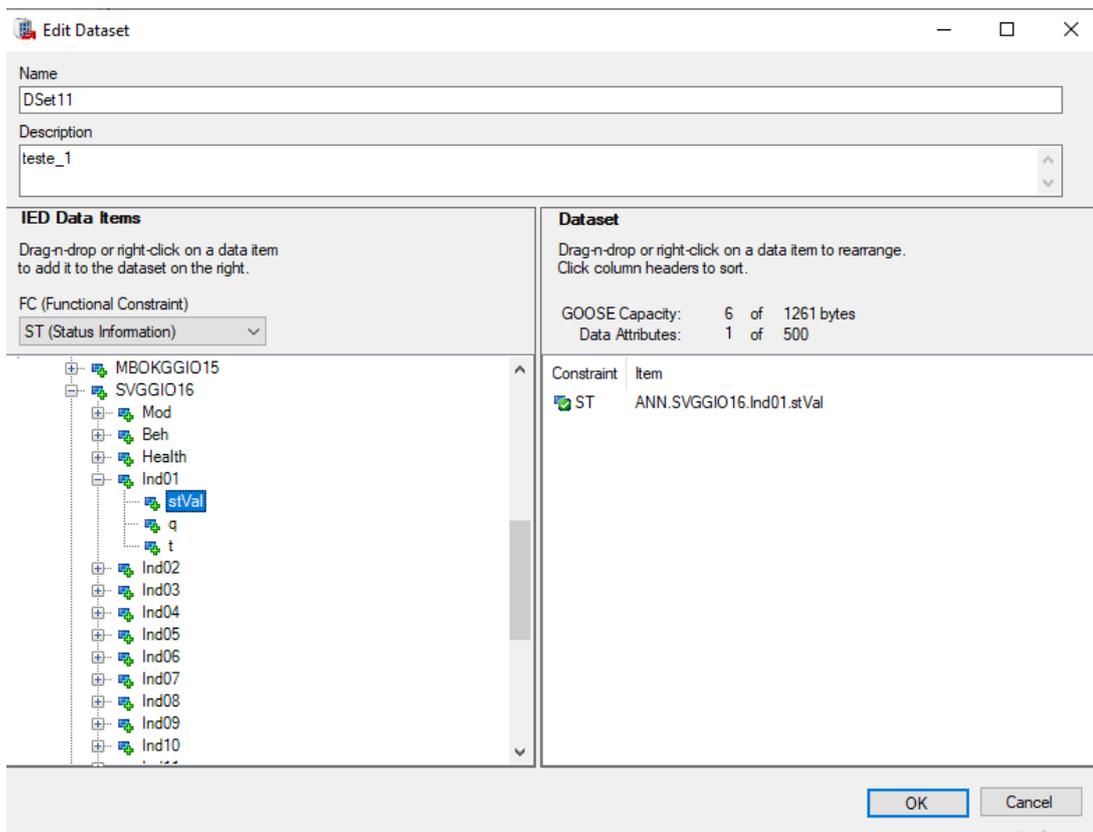


Figura 5.13: Fonte própria Autora - Modelagem do nó lógico para o envio da mensagem GOOSE



Figura 5.14: Elaborado pela própria Autora - Nomenclatura do IED SEL 735 utilizado, de acordo com os campos da Norma.

## 5.2.2 Cenário 4: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para SEL 421

Neste cenário, utilizou-se a mala de teste, qualímetro SEL 735 e o IED SEL 421. Visando realizar a proteção na Barra, a partir do modelo da rede Búzios no software ATP, foi gerado um documento COMTRADE que foi inserido no software TransPlayer da mala, conforme figura 5.1, e injetando-se uma sobrecorrente identificada pelo lógica do SEL 735 que envia uma mensagem GOOSE para o IED 421 que atua de forma instântanea dando TRIP .

```

FEEDER 1                               Date: 03/22/22   Time: 11:42:22.076
STATION A                               Time Source: int

FID=SEL-735-R205-V2-Z10210C-D20210305   CID=DE87

```

#	Date	Time	Elenent	State
4	03/21/00	10:50:29.617	Time changed by IRIG-D	>-10000.0s
3	03/22/22	10:56:18.335	Time changed by HMI	>+10000.0s
2	03/22/22	10:57:37.127	SALARM	Asserted
1	03/22/22	10:57:38.127	SALARM	Deasserted



Figura 5.15: Fonte própria Autora - SER do SEL 735 - Identificação da Sobrecorrente SEL 735

```

SEL-421                               Date: 03/22/2022   Time: 11:37:51.738|
SE                                       Serial Number: 2001285094

FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627

```

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
20	03/22/2022	10:16:07.962	Settings changed	Class R CC
19	03/22/2022	10:17:38.087	Relay	Disabled
18	03/22/2022	10:17:38.142	Settings changed	Class I CC
17	03/22/2022	10:17:38.142	Relay	Enabled
16	03/22/2022	10:17:42.392	Settings changed	Class R CC
15	03/22/2022	10:19:09.434	Relay	Disabled
14	03/22/2022	10:19:09.490	Settings changed	Class I CC
13	03/22/2022	10:19:09.490	Relay	Enabled
12	03/22/2022	10:19:12.100	Settings changed	Class R CC
11	03/22/2022	10:19:18.702	Settings changed	Class P 5
10	03/22/2022	10:21:58.842	TRIP	Asserted
9	03/22/2022	10:21:59.242	TRIP	Deasserted
8	03/22/2022	10:26:24.251	TRIP	Asserted
7	03/22/2022	10:26:24.640	TRIP	Deasserted
6	03/22/2022	10:46:05.932	TRIP	Asserted
5	03/22/2022	10:46:06.332	TRIP	Deasserted
4	03/22/2022	10:56:28.074	TRIP	Asserted
3	03/22/2022	10:56:28.474	TRIP	Deasserted
2	03/22/2022	10:57:14.274	TRIP	Asserted
1	03/22/2022	10:57:14.674	TRIP	Deasserted



Figura 5.16: Fonte própria Autora - SER do SEL 421

Apesar da realização dessa série de testes, conforme as figuras anteriores, o qualímetro não apresentou comportamento adequado do ponto de vista de precisão de tempo. Sendo assim, não foi possível medir os valores exatamente.

A interface do programa WireShark possibilita constatar as mensagens GOOSE capturadas como valor booleano “TRUE”, de acordo com a figura 5.12. Certifica-se que são mensagens enviadas pelo IED SEL 735 que se prova através da visualização no WireShark.

The screenshot shows a Wireshark capture of GOOSE frames. The top pane displays a list of frames with columns for No., Time, Source, Destination, Protocol, and Length. Frame 23847 is highlighted. The bottom pane shows the expanded details for frame 23847, including the GOOSE structure and its fields. Two red boxes and arrows highlight specific fields: the 'goID' field and a 'Data: boolean (3)' field set to 'True'.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
23714	2687.069993	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23790	2688.074232	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23847	2689.012549	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	148	
23848	2688.620334	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	148	
23850	2688.629341	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23852	2688.649232	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23881	2689.011990	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	148	
23882	2689.019811	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	148	
23884	2689.029334	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23888	2689.049235	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
23944	2690.054305	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
24017	2691.061081	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
24105	2692.064244	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	
24173	2693.068030	Schweitz_27:f6:6d	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	149	

Frame 23847: 148 bytes on wire (1184 bits), 148 bytes captured (1184 bits) on interface \Device\NPF\_{22565F94-3A38-4D5E-A110-248B40381529}, id 0  
 Ethernet II, Src: Schweitz\_27:f6:6d (00:30:a7:27:f6:6d), Dst: Iec-Tc57\_01:00:03 (01:0c:cd:01:00:03)

GOOSE  
 APPID: 0x0003 (3)  
 Length: 134  
 Reserved 1: 0x0000 (0)  
 Reserved 2: 0x0000 (0)  
 goosePdu  
 gocbRef: SEL\_735\_2CFG/LLN0\$GO\$TESTE\_3  
 timeAllowedtoLive: 24  
 datSet: SEL\_735\_2CFG/LLN0\$DSet11  
 goID: TESTE\_2\_21\_03  
 t: Mar 22, 2022 10:57:14.268596649 UTC  
 stNum: 14  
 sqNum: 0  
 test: False  
 confRev: 1  
 ndsCom: False  
 numDatSetEntries: 1  
 allData: 1 item  
 Data: structure (2)  
 structure: 3 items  
 Data: boolean (3)  
 boolean: True  
 Data: bit-string (4)  
 Padding: 3  
 bit-string: 0000  
 Data: utc-time (17)  
 utc-time: Mar 22, 2022 10:57:14.268596649 UTC

Figura 5.17: Fonte própria Autora - Recebimento da GOOSE verificado no Software Wireshark

No sequencial de eventos foi possível verificar que os tempos não estão sincronizados, conforme as figuras 5.15 e 5.16. Logo, não há a possibilidade de realizar os testes de proteção com o qualímetro, pois ele pode estar apresentando algum defeito por ser um equipamento doado ou por ele de fato não ter essa capacidade. Então, não se pode afirmar com certeza o porquê deste fato.

Visando garantir que a proteção está com a parte temporal em conformidade, pois a função já foi comprovada nos testes anteriores, utilizou-se um outro IED, o SEL 451, a fim de garantir que no quesito tempo é possível comprovar sua funcionalidade. Trocou-se de IED pela incapacidade das medidas temporais que são necessárias.

### 5.2.3 Cenário 5: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para SEL 421 - Instantâneo

#### 5.2.3.1 Arranjo, Detalhamento do Teste e Parametrização dos IEDs

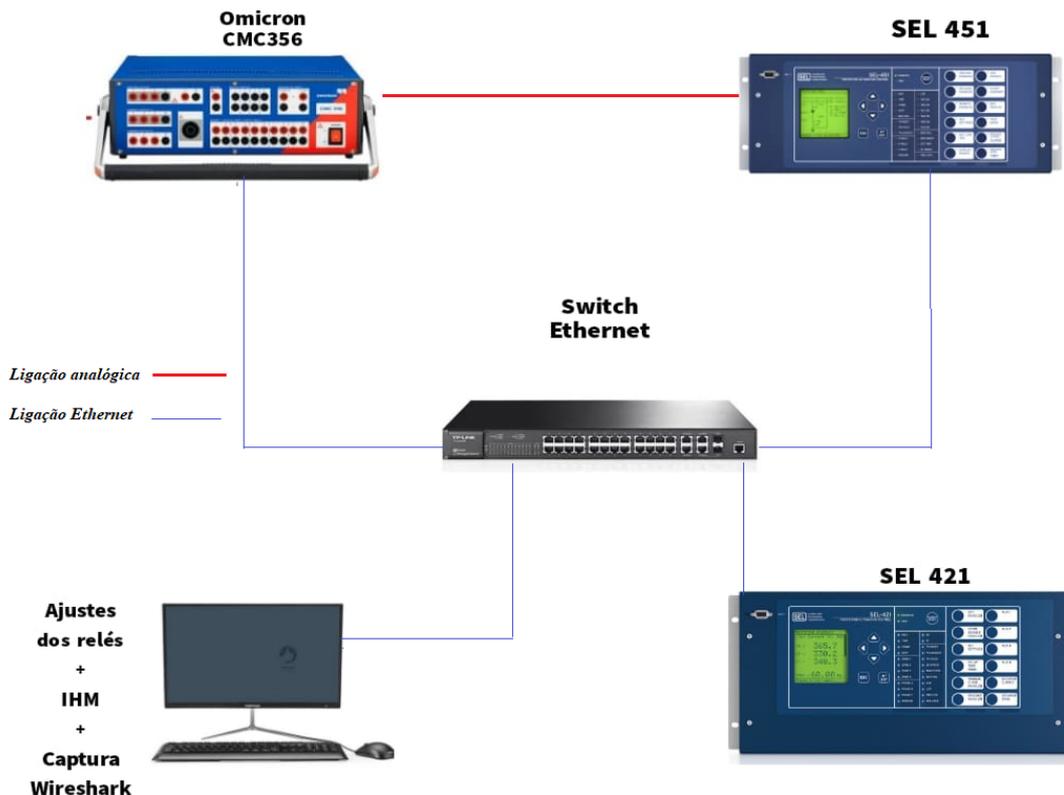


Figura 5.18: Elaborado pela autora - Arranjo Experimental aplicado para a verificação da Comunicação Horizontal

Neste cenário, utilizou-se a mala de teste, IED SEL 451 e o IED SEL 421. A partir do modelo da rede Búzios no software ATP, foi gerado um documento COMTRADE que foi inserido no software TransPlayer da mala, conforme figura, e injetando-se uma sobrecorrente identificada pela função 50P do IED SEL451 que atuou e enviou mensagem GOOSE para o IED SEL 421 que atuou de forma temporizada, em seis diferentes ciclos, realizando a função de TRIP.

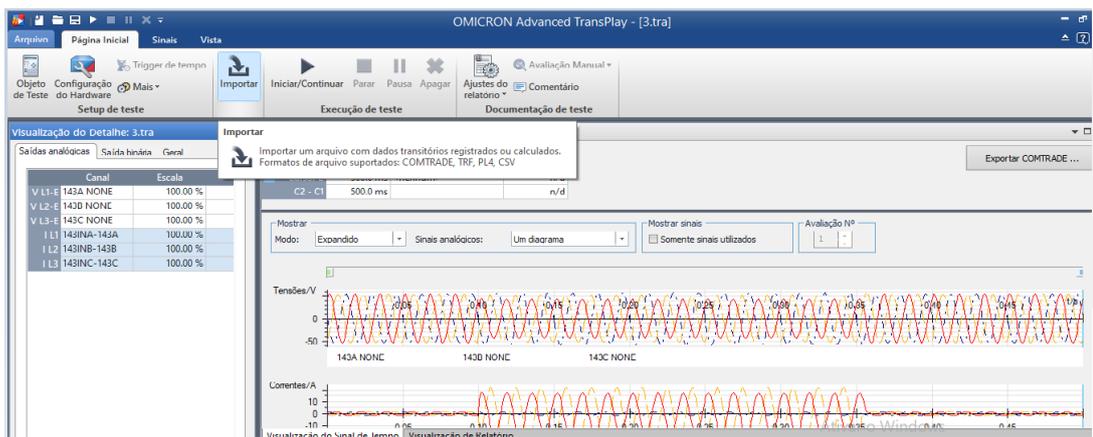


Figura 5.19: Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer

A configuração da mensagem GOOSE foi realizada no software acselerator architect conforme mostrado na figura 5.19.

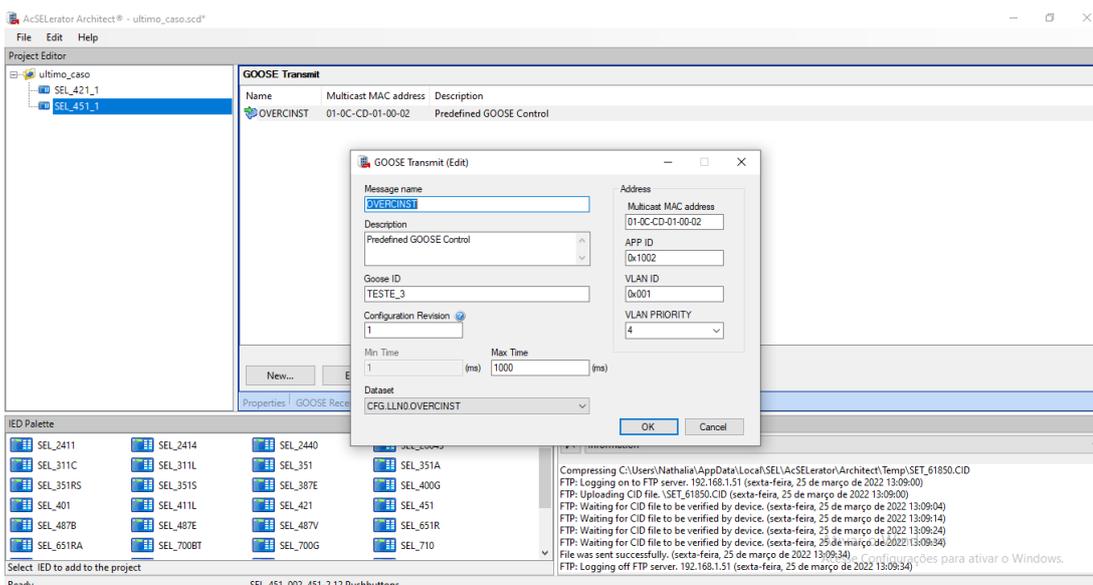


Figura 5.20: Fonte própria Autora - Configuração da mensagem GOOSE no software acselerator architect



Figura 5.21: Elaborado pela própria Autora - Nomenclatura do IED SEL 451 utilizado, de acordo com os campos da Norma.

A mensagem GOOSE foi enviada, como pode-se verificar através dps sequenciais de evento dos IEDs do software acselerator quickset nas figuras 5.20 e 5.21., assim como a figura 5.22 que apresenta mensangens GOOSE capturadas como valor booleano “TRUE”,

```
=>>SER
SEL-451                               Date: 03/25/2022 Time: 12:25:27.200
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207

#      DATE      TIME      ELEMENT      STATE
2      03/25/2022 12:24:48.293 50P1         Asserted
1      03/25/2022 12:24:48.553 50P1         Deasserted

=>>
```

Figura 5.22: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451

```
=>>SER
SEL-421                               Date: 03/25/2022 Time: 12:25:20.403
SE                                     Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627

#      DATE      TIME      ELEMENT      STATE
2      03/25/2022 12:24:49.039 TRIP         Asserted
1      03/25/2022 12:24:49.539 TRIP         Deasserted

=>>|
```

Figura 5.23: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421

```
> Ethernet II, Src: Schweitz_00:85:59 (00:30:a7:00:85:59), Dst: Iec-Tc57_01:00:02 (01:0c:cd:01:00:02)
v GOOSE
  APPID: 0x1002 (4098)
  Length: 117
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  v goosePdu
    gocbRef: SEL_451_ICFG/LLN0$GO$OVERCINST
    timeAllowedtoLive: 768
    datSet: SEL_451_ICFG/LLN0$OVERCINST
    goID: TESTE_3
    t: Mar 25, 2022 20:24:49.293022155 UTC
    stNum: 2
    sqNum: 6
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDatSetEntries: 1
  v allData: 1 item
    v Data: boolean (3)
      boolean: True
```

Figura 5.24: Fonte próprio Autor - Software wireshark, Mensagens GOOSE capturadas como valor booleano “TRUE”

### 5.2.3.2 Cenário 6: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para SEL 421 - Temporizado

Neste cenário, utilizou-se a mala de teste, o IED SEL 451 e o IED SEL 421. A partir da modelagem da rede Búzios no software ATP, foi gerado um documento COMTRADE que foi inserido no software TransPlayer da mala, conforme figura 5.23, e injetando-se uma sobrecorrente identificada pela função 50P do IED SEL451 que atuou e enviou mensagem GOOSE para o IED SEL 421 que atuou de forma instantânea realizando a função de TRIP.

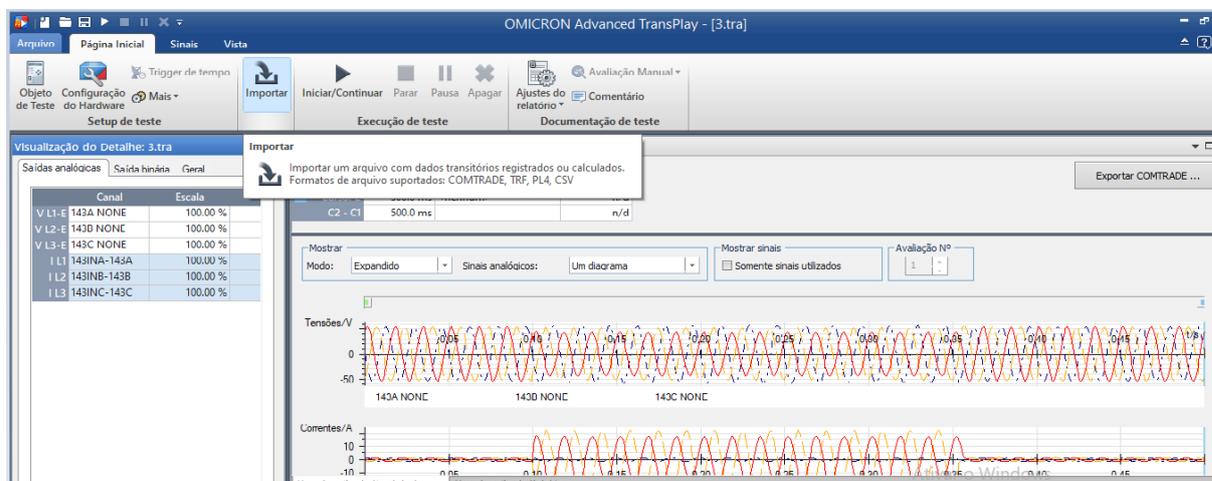


Figura 5.25: Fonte própria Autora - Tela do Software TranPlayer

A configuração da mensagem GOOSE foi realizada no software acselerator architect de igual forma ao 3º cenário.

A mensagem GOOSE foi enviada, em cinco ensaios com ciclos distintos. Verifica-se através dos sequenciais de evento dos IEDs do software acselerator quickset nas figuras 5.24 a 5.33.

- 10 ciclos

```

=>>>ER
SEL-451                               Date: 03/28/2022 Time: 19:10:32.373
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207

#   DATE       TIME           ELEMENT      STATE
2   03/28/2022  19:10:26.508  50P1        Asserted
1   03/28/2022  19:10:26.766  50P1        Deasserted
=>>>

```

Figura 5.26: Fonte própria Autora - Acselerator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 10 ciclos

```

=>>SER
SEL-421                               Date: 03/28/2022 Time: 19:11:07.829
SE                                     Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627
#   DATE       TIME       ELEMENT      STATE
2   03/28/2022  19:10:27.293  TRIP        Asserted
1   03/28/2022  19:10:27.624  TRIP        Deasserted

```

Figura 5.27: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 10 ciclos

- 15 ciclos

```

=>>SER
SEL-451                               Date: 03/28/2022 Time: 20:06:02.209
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207
#   DATE       TIME       ELEMENT      STATE
2   03/28/2022  20:05:56.834  50P1        Asserted
1   03/28/2022  20:05:57.094  50P1        Deasserted
=>>|

```

Figura 5.28: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 15 ciclos

```

=>>SER
SEL-421                               Date: 03/28/2022 Time: 20:06:45.736
SE                                     Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627
#   DATE       TIME       ELEMENT      STATE
2   03/28/2022  20:05:57.828  TRIP        Asserted
1   03/28/2022  20:05:58.078  TRIP        Deasserted
=>>|

```

Figura 5.29: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 15 ciclos

- 20 ciclos

```

=>>SER
SEL-451                               Date: 03/28/2022 Time: 16:10:21.100
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207
#   DATE       TIME       ELEMENT      STATE
2   03/28/2022  16:10:13.980  50P1        Asserted
1   03/28/2022  16:10:14.241  50P1        Deasserted

```

Figura 5.30: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 20 ciclos

```

=>>SER
SEL-421                               Date: 03/28/2022 Time: 20:02:27.812
SE                                     Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627

#    DATE        TIME        ELEMENT        STATE
20  03/28/2022   19:50:50.268  Relay          Enabled
19  03/28/2022   19:50:52.891  Settings changed Class R CC
18  03/28/2022   19:51:30.087  Relay          Disabled
17  03/28/2022   19:51:30.143  Settings changed Class I CC
16  03/28/2022   19:51:30.143  Relay          Enabled
15  03/28/2022   19:51:34.081  Settings changed Class R CC
14  03/28/2022   19:52:14.612  Relay          Disabled
13  03/28/2022   19:52:14.668  Settings changed Class I CC
12  03/28/2022   19:52:14.668  Relay          Enabled
11  03/28/2022   19:52:17.256  Settings changed Class R CC
10  03/28/2022   19:52:56.337  Relay          Disabled
9   03/28/2022   19:52:56.392  Settings changed Class I CC
8   03/28/2022   19:52:56.392  Relay          Enabled
7   03/28/2022   19:52:58.988  Settings changed Class R CC
6   03/28/2022   19:53:38.511  Relay          Disabled
5   03/28/2022   19:53:38.567  Settings changed Class I CC
4   03/28/2022   19:53:38.567  Relay          Enabled
3   03/28/2022   19:53:41.357  Settings changed Class R CC
2   03/28/2022   20:00:46.607  TRIP           Asserted
1   03/28/2022   20:00:46.861  TRIP           Deasserted

```

Figura 5.31: Fonte próprio Autor - Acselelator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 20 ciclos

- 30 ciclos

```

=>>SER
SEL-451                               Date: 03/28/2022 Time: 16:42:21.557
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207

#    DATE        TIME        ELEMENT        STATE
10  03/28/2022   16:20:49.177  50P1          Asserted
9   03/28/2022   16:20:49.435  50P1          Deasserted
8   03/28/2022   16:33:53.129  50P1          Asserted
7   03/28/2022   16:33:53.388  50P1          Deasserted
6   03/28/2022   16:41:08.057  Relay          Disabled
5   03/28/2022   16:41:08.113  Settings changed Class I CC
4   03/28/2022   16:41:08.113  Relay          Enabled
3   03/28/2022   16:41:10.738  Settings changed Class R CC
2   03/28/2022   16:41:53.815  50P1          Asserted
1   03/28/2022   16:41:54.073  50P1          Deasserted

```

Figura 5.32: Fonte própria Autora - Acselelator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 30 ciclos

```
=>>SER
SEL-421                               Date: 03/28/2022 Time: 16:42:48.026
SE                                     Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-V0-Z100011-D20130627
```

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
20	03/28/2022	16:32:16.047	Relay	Enabled
19	03/28/2022	16:32:19.749	Settings changed	Class R CC
18	03/28/2022	16:32:58.424	Relay	Disabled
17	03/28/2022	16:32:58.481	Settings changed	Class I CC
16	03/28/2022	16:32:58.481	Relay	Enabled
15	03/28/2022	16:33:01.049	Settings changed	Class R CC
14	03/28/2022	16:33:39.893	Relay	Disabled
13	03/28/2022	16:33:39.948	Settings changed	Class I CC
12	03/28/2022	16:33:39.948	Relay	Enabled
11	03/28/2022	16:33:42.525	Settings changed	Class R CC
10	03/28/2022	16:35:10.557	Relay	Disabled
9	03/28/2022	16:35:10.612	Settings changed	Class I CC
8	03/28/2022	16:35:10.612	Relay	Enabled
7	03/28/2022	16:35:13.179	Settings changed	Class R CC
6	03/28/2022	16:40:14.402	Relay	Disabled
5	03/28/2022	16:40:14.458	Settings changed	Class I CC
4	03/28/2022	16:40:14.458	Relay	Enabled
3	03/28/2022	16:40:17.014	Settings changed	Class R CC
2	03/28/2022	16:41:54.635	TRIP	Asserted
1	03/28/2022	16:41:55.137	TRIP	Deasserted

Figura 5.33: Fonte próprio Autor - Acselevator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 30 ciclos

- 35 ciclos

```
=>>SER
SEL-451                               Date: 03/28/2022 Time: 19:31:02.217
SE                                     Serial Number: 2007310197
FID=SEL-451-2-R126-V0-Z100011-D20121207
```

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
6	03/28/2022	19:10:26.508	50P1	Asserted
5	03/28/2022	19:10:26.766	50P1	Deasserted
4	03/28/2022	19:19:44.475	50P1	Asserted
3	03/28/2022	19:19:44.736	50P1	Deasserted
2	03/28/2022	19:28:21.122	50P1	Asserted
1	03/28/2022	19:28:21.383	50P1	Deasserted

Figura 5.34: Fonte própria Autora - Acselevator quickset, Sequencial de Evento do IED 451 - 35 ciclos

```
SEL-421                               Date: 03/28/2022 Time: 19:34:01.459
SE                                       Serial Number: 2001285094
FID=SEL-421-3-R131-W0-Z100011-D20130627

#    DATE        TIME          ELEMENT          STATE
20  03/28/2022   19:25:00.302  Relay            Enabled
19  03/28/2022   19:25:02.921  Settings changed Class R CC
18  03/28/2022   19:25:42.608  Relay            Disabled
17  03/28/2022   19:25:42.664  Settings changed Class I CC
16  03/28/2022   19:25:42.664  Relay            Enabled
15  03/28/2022   19:25:46.339  Settings changed Class R CC
14  03/28/2022   19:26:24.817  Relay            Disabled
13  03/28/2022   19:26:24.872  Settings changed Class I CC
12  03/28/2022   19:26:24.872  Relay            Enabled
11  03/28/2022   19:26:27.457  Settings changed Class R CC
10  03/28/2022   19:27:05.340  Relay            Disabled
9   03/28/2022   19:27:05.396  Settings changed Class I CC
8   03/28/2022   19:27:05.396  Relay            Enabled
7   03/28/2022   19:27:07.971  Settings changed Class R CC
6   03/28/2022   19:27:46.677  Relay            Disabled
5   03/28/2022   19:27:46.733  Settings changed Class I CC
4   03/28/2022   19:27:46.733  Relay            Enabled
3   03/28/2022   19:27:49.319  Settings changed Class R CC
2   03/28/2022   19:28:22.337  TRIP             Asserted ←
1   03/28/2022   19:28:22.762  TRIP             Deasserted ←
```

Figura 5.35: Fonte própria Autora - Acseleator quickset, Sequencial de Evento do IED 421 - 35 ciclos

# Capítulo 6

## Avaliação e Resultados

### 6.1 Comunicação Horizontal

Nos cenários 1 e 2 foram feitas apenas medições. As informações geradas já foram apresentadas no capítulo anterior.

### 6.2 Comunicação Vertical

#### 6.2.1 Cenário 3: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para a mala

A mensagem GOOSE foi enviada do SEL 735 para a mala de teste e pode ser observado conforme a figura 6.10 o documento gerado ao se finalizar o teste.

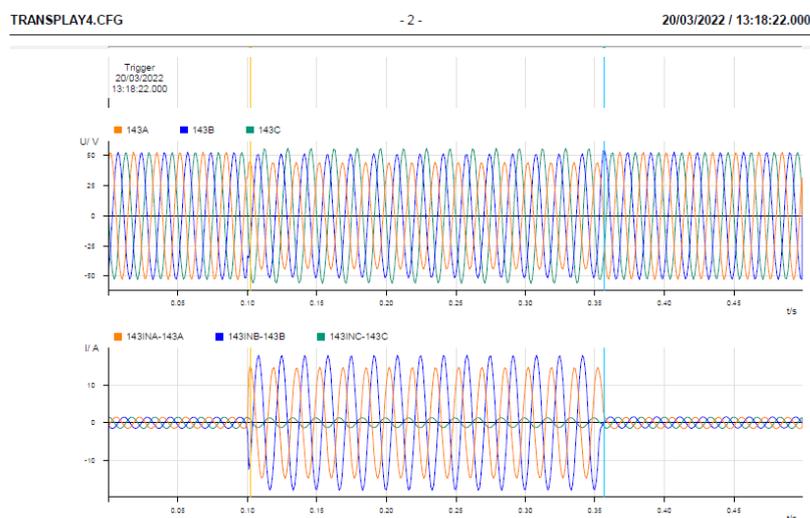


Figura 6.1: Fonte próprio Autor - Documento gerado no Software TransPlayer - Forma de Onda



Figura 6.2: Fonte próprio Autor - Documento gerado no Software TransPlayer - Bit de entrada da GOOSE

Como o qualímetro não apresentou comportamento adequado do ponto de vista de precisão de tempo, não sendo possível medir os valores exatamente, realizou-se o teste novamente, por cem vezes, com os mesmos parâmetros de rede, buscando-se entender o comportamento dessa mensagem GOOSE enviada. A estampa de tempo não estava condizente com o esperado, pois em todas as cem amostras a mensagem GOOSE chegou apenas após a extinção da falta. A figura 6.3 apresenta os o tempo de envio dessas mensagens

### Envio da GOOSE - SEL 735 e CMC 356

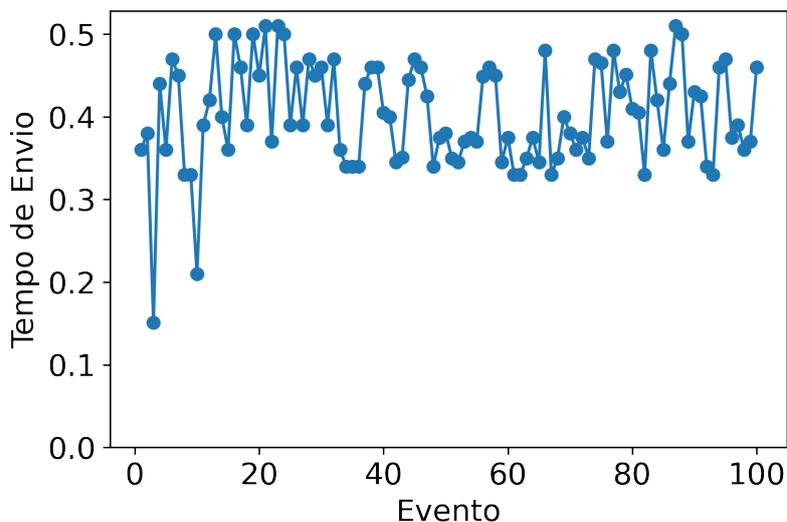


Figura 6.3: Fonte próprio Autor - As cem amostras do teste realizado

#### 6.2.2 Cenário 4: Envio da mensagem GOOSE do SEL 735 para 421

A mensagem GOOSE foi enviada do SEL 735 para o SEL 421, como pode ser observado no capítulo anterior, na subseção 5.2.3.2, através do SER dos IEDs, o horário do IED que envia a mensagem (SEL 735) é posterior ao IED 421 que recebe a mensagem. Neste ensaio, foi comprovado não ser possível a avaliação do tempo. A figura 6.4 apresenta o

tempo de envio de acordo com que foi ensaiado, apresentando um tempo negativo, o que não é aceitável.

### Envio da mensagem GOOSE entre 735 e 421 - Instantâneo

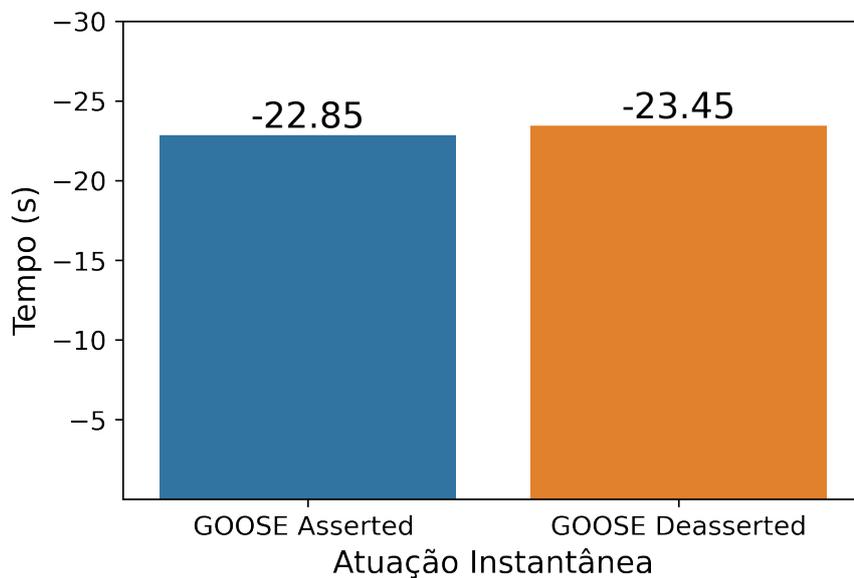


Figura 6.4: Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE entre SEL 735 e SEL 421 Instantâneo

### 6.2.3 Cenário 5: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para 421 - Instantâneo

Pode-se comprovar a conformidade do elemento temporal a partir da utilização do IED SEL 451. A figura 6.5 apresenta o tempo de envio da mensagem GOOSE para o IED 421 que atuou de forma instantânea realizando a função de TRIP.

## Envio da mensagem GOOSE entre 451 e 421 - Instantâneo

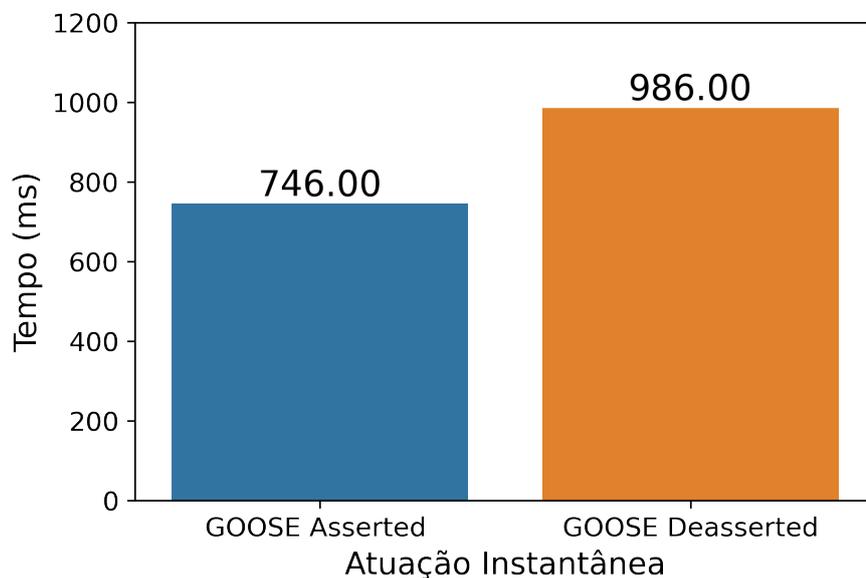


Figura 6.5: Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE 451 entre o SEL 421 Instantâneo

#### 6.2.4 Cenário 6: Envio da mensagem GOOSE do SEL 451 para 421 - Temporizado

A comprovação da conformidade do elemento temporal a partir da utilização do IED SEL 451 foi verificada , mais uma vez. A figura 6.6 apresenta o tempo de envio da mensagem GOOSE para o IED 421 que através de uma lógica configurada internamente, atuou de maneira temporizada em cinco diferentes ciclos.

## Envio da mensagem GOOSE entre 451 e 421 - Temporizado

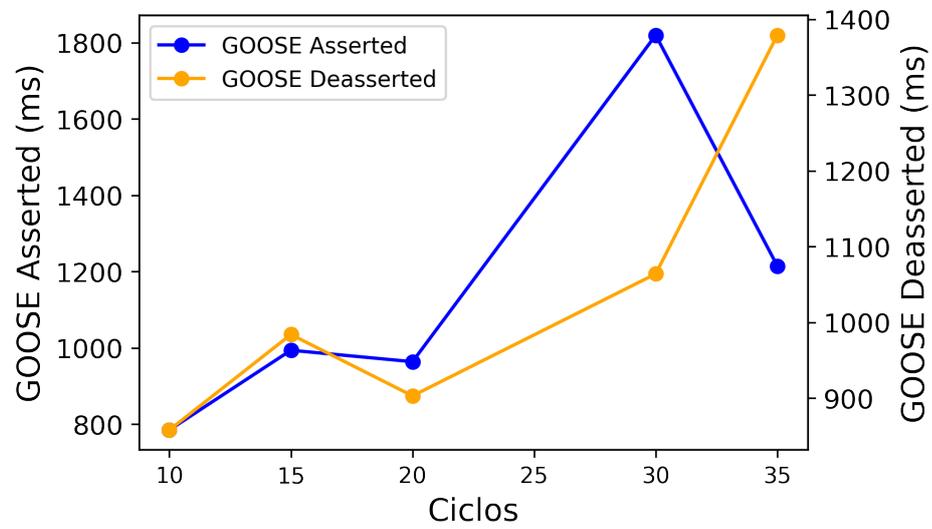


Figura 6.6: Fonte próprio Autor - Envio da mensagem GOOSE entre SEL 451 e SEL 421 Temporizado

# Capítulo 7

## Conclusão

A utilização Norma IEC 61850 em sistemas elétricos apresenta uma série de ganhos para a configuração do sistema, como pode se exemplificar a padronização de protocolos e infraestrutura de rede, além da versatilidade na integração entre os dispositivos de proteção, os sistemas supervisórios e os sistemas de gerenciamento.

A utilização do qualímetro SEL 735 foi realizada pois este está em conformidade com a Norma IEC 61850. Existe uma proposta na norma para o envio de dados para qualidade de energia. Foram coletados dados no qualímetro, utilizando a comunicação vertical.

Contudo, a hipótese também se baseava na possibilidade do qualímetro apresentar a função de proteção visando a melhoraria na qualidade da proteção na subestação, pois seria implementado um IED da GD comunicando com o IED da Barra da SE, permitindo a tomada de ações mais rápidas da proteção do sistema. Realizou-se uma série de testes, porém o qualímetro não apresentou comportamento adequado do ponto de vista de precisão de tempo. Desse modo, não foi possível medir os valores exatamente e para comprovação da estampa temporal a utilização de outro equipamento.

A prova de conceito, desse estudo, alcançou um tempo de atuação satisfatório, para o arranjo entre os IEDs 451 e 421, tanto para uma atuação instantânea quanto para uma atuação temporizada. Como contribuição, aponta-se que se a comunicação entre dispositivo na GD e um outro dispositivo na Barra SE, utilizando a IEC 61850 (mensagem GOOSE), pode possibilitar uma atuação rápida e mais confiável.

Dessa forma, observa-se que o tempo para identificar a ocorrência de sobrecorrente segundo a metodologia proposta é rápida. Salienta-se que a metodologia elaborada pode ser prontamente aplicada similarmente em outros projetos ou estudo. Contudo, entende-se que cada aplicação, enfrentará distintos desafios, em virtude das características das

---

redes elétricas, bem como padrões diversões de instalações destas tecnologias e, portanto, influenciando o impacto dos condomínios solares em redes de distribuição.

Para trabalhos futuros, os testes para cenários de sobre e subtensão, sobre e sub-frequência e conteúdos harmônicos num comparativo com os valores especificados para as concessionárias locais.

# Referências

- [1] SOLANGI, K.; ISLAM, M.; SAIDUR, R.; RAHIM, N.; FAYAZ, H. A review on global solar energy policy. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 15, n. 4, p. 2149–2163, 2011.
- [2] KAGAN, N.; GOUVEA, M.; MAIA, F.; DUARTE, D.; LABRONICI, J.; GUIMARÃES, D.; NETO, A. B.; SILVA, J.; PARTICELLI, F. Redes elétricas inteligentes no brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação. *Rio de Janeiro: Synergia Editora*, v. 260, 2013.
- [3] AGÊNCIA Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, Brasil, 2012.
- [4] AGÊNCIA Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, Brasil, 2012.
- [5] DELFANTI, M.; FALABRETTI, D.; MERLO, M. Dispersed generation impact on distribution network losses. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 97, p. 10–18, 2013.
- [6] FIROUZ, Y.; FARHADKHANI, S.; LOBRY, J.; VALLÉE, F.; KHAKPOUR, A.; DURIEUX, O. Numerical comparison of the effects of different types of distributed generation units on overcurrent protection systems in mv distribution grids. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 69, p. 271–283, 2014.
- [7] XYNGI, I.; POPOV, M. An intelligent algorithm for the protection of smart power systems. *IEEE Transactions on smart grid*, IEEE, v. 4, n. 3, p. 1541–1548, 2013.
- [8] RAZAVI, S.-E.; RAHIMI, E.; JAVADI, M. S.; NEZHAD, A. E.; LOTFI, M.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 105, p. 157–167, 2019.
- [9] SHARMA, A.; RAJPUROHIT, B. S.; WANG, L. Dg integration with power quality improvement feature for smart grid. In: SPRINGER. *Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving*. [S.l.], 2016. p. 901–913.
- [10] IEC. *Power quality measurement in power supply systems - Part 1: Power quality instruments (PQI)*. <https://webstore.iec.ch/publication/26711>. Acesso em: 23 maio 2017.
- [11] NOLDEN, C.; BARNES, J.; NICHOLLS, J. Community energy business model evolution: A review of solar photovoltaic developments in england. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 122, p. 109722, 2020.

- [12] HESS, D. J.; LEE, D. Energy decentralization in california and new york: Conflicts in the politics of shared solar and community choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 121, p. 109716, 2020.
- [13] JAVADIAN, S.; HAGHIFAM, M.-R.; FIROOZABAD, M. F.; BATHAEE, S. Analysis of protection system's risk in distribution networks with dg. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 688–695, 2013.
- [14] VIEIRA, A. D.; SANTOS, E. A. P.; QUEIROZ, M. H. de; LEAL, A. B.; NETO, A. D. de P.; CURY, J. E. R. A method for plc implementation of supervisory control of discrete event systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 25, n. 1, p. 175–191, 2017.
- [15] SCARSELLI, R. B.; SOARES, L. F.; MORAES, I. M. Uma avaliação de algoritmos criptográficos em redes iec 61850: Uma abordagem prática. In: SBC. *Anais do II Workshop de Segurança Cibernética em Dispositivos Conectados*. [S.l.], 2019. p. 37–50.
- [16] HASSAN, A. S.; SUN, Y.; WANG, Z. Optimization techniques applied for optimal planning and integration of renewable energy sources based on distributed generation: Recent trends. *Cogent Engineering*, Taylor & Francis, v. 7, n. 1, p. 1766394, 2020.
- [17] QUADRI, I. A.; BHOWMICK, S.; JOSHI, D. A hybrid teaching–learning-based optimization technique for optimal dg sizing and placement in radial distribution systems. *Soft Computing*, Springer, v. 23, n. 20, p. 9899–9917, 2019.
- [18] CONSIDERAÇÕES sobre taxas relacionadas à geração distribuída solar. In: 2018 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC). [S.l.: s.n.], 2018.
- [19] QUINT, R.; DANGELMAIER, L.; GREEN, I.; EDELSON, D.; GANUGULA, V.; KANESHIRO, R.; PIGEON, J.; QUAINANCE, B.; RIESZ, J.; STRINGER, N. Transformation of the grid: The impact of distributed energy resources on bulk power systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 35–45, 2019.
- [20] SMIL, V. Distributed generation and megacities: Are renewables the answer? *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 37–41, 2019.
- [21] IEA PARIS, . “System integration of renewables Decarbonising while meeting growing demand”. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/system-integration-of-renewables>. Acesso em: 15 junho 2021.
- [22] ENERGÉTICA, I. N. de E. *O que é Geração Distribuída*. 2021. Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp). Acesso em: 14 julho 2021.
- [23] AGENCY, R. . I. E. *Renewables 2020*. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>. Acesso em: 15 junho 2021.
- [24] CRUZ, F. O. *Observatório COVID - 2019*. 2021. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/observatorio-covid-19>. Acesso em: 02 junho 2021.
- [25] FOTOVOLTAICA, A. B. de E. S. *Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Atualizado em 10/06/2021, n<sup>o</sup> 32, Infográfico ABSOLAR*. 2021. Disponível em: [https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Infografico\\_junho.pdf](https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Infografico_junho.pdf). Acesso em: 06 julho 2021.

- [26] ENERGETICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional 2021*. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 23 maio 2019.
- [27] ENERGETICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional 2020*. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 14 julho 2021.
- [28] ENERGETICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional 2016*. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2016>. Acesso em: 12 julho 2021.
- [29] GAO, J.; XIAO, Y.; LIU, J.; LIANG, W.; CHEN, C. P. A survey of communication/networking in smart grids. *Future generation computer systems*, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 391–404, 2012.
- [30] YOO, H.; SHON, T. Challenges and research directions for heterogeneous cyber-physical system based on iec 61850: Vulnerabilities, security requirements, and security architecture. *Future generation computer systems*, Elsevier, v. 61, p. 128–136, 2016.
- [31] HUSSAIN, S. S.; USTUN, T. S.; KALAM, A. A review of iec 62351 security mechanisms for iec 61850 message exchanges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 16, n. 9, p. 5643–5654, 2019.
- [32] PARSIFAL. *About Parsifal*. 2021. Disponível em: <https://parsif.al/about/>. Acesso em: 13 julho 2021.
- [33] CABALLERO-PEÑA, J.; CADENA-ZARATE, C.; PARRADO-DUQUE, A.; OSMA-PINTO, G. Distributed energy resources on distribution networks: A systematic review of modelling, simulation, metrics, and impacts. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 138, p. 107900, 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521011133>>.
- [34] SHARMA, M.; RAJPUROHIT, B. S.; AGNIHOTRI, S.; SINGH, S. Data analytics based power quality investigations in emerging electric power system using sparse decomposition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2022.
- [35] LIN, X.; ZAMORA, R. Controls of hybrid energy storage systems in microgrids: Critical review, case study and future trends. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, v. 47, p. 103884, 2022.
- [36] ANDRADE, F. M. de; MAGALHÃES, C. A. Evolutionary structural optimization in energy absorption structures. *Advances in Engineering Software*, Elsevier, v. 169, p. 103145, 2022.
- [37] PANJAITAN, S. D.; TJEN, J.; SANJAYA, B. W.; WIGYARIANTO, F. T. P.; KHOUW, S. A forecasting approach for iot-based energy and power quality monitoring in buildings. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, IEEE, 2022.
- [38] JARANIYA, D.; GUPTA, U.; KUMAR, S.; MITTAL, A. Multifunctional bidirectional charging system for evs and the grid with improved power quality using sparse proportionate-nlmmf based method. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, 2022.

- [39] VERMA, P.; KUMAR, A.; GARG, R.; MAHAJAN, P. Reweighted l 0 norm variable step size continuous mixed p-norm control scheme for mitigating power quality problems of grid coupled solar pv system. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, 2022.
- [40] JAFARY, P.; SUPPONEN, A.; REPO, S. Network architecture for iec61850-90-5 communication: Case study of evaluating r-goose over 5g for communication-based protection. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, n. 11, p. 3915, 2022.
- [41] CHAWLA, A.; AFTAB, M. A.; HUSSAIN, S. S.; PANIGRAHI, B.; USTUN, T. S. Cyber-physical testbed for wide area measurement system employing iec 61850 and iee c37. 118 based communication. *Energy Reports*, Elsevier, v. 8, p. 570–578, 2022.
- [42] BHATTACHARJEE, T.; JAMIL, M.; ALOTAIBI, M. A.; MALIK, H.; NASSAR, M. E. Hardware development and interoperability testing of a multivendor-iec-61850-based digital substation. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 5, p. 1785, 2022.
- [43] WONG, T.-Y.; LAU, W.-H.; CHUNG, H. S.-H.; SHUM, C. A feasibility study of using manufacturing message specification report gateway model for iec61850 inter-substation type-1 messaging over wide area network. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Elsevier, v. 30, p. 100612, 2022.
- [44] CHEN, M.; CHEN, Y.; CHEN, Y.; DAI, X.; LIU, L. Unified power quality management for traction substation groups connected to weak power grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2022.
- [45] YANG, J.; GUO, Y.; GUO, C.; CHEN, Z.; WANG, S. A method to quantify the logical node importance for iec 61850 based substation automation system. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, 2021.
- [46] PONG, P. W.; ANNASWAMY, A. M.; KROPOSKI, B.; ZHANG, Y.; RAJAGOPAL, R.; ZUSSMAN, G.; POOR, H. V. Cyber-enabled grids: Shaping future energy systems. *Advances in Applied Energy*, Elsevier, v. 1, p. 100003, 2021.
- [47] CHANDRA, A.; SINGH, G. K.; PANT, V. Protection of ac microgrid integrated with renewable energy sources—a research review and future trends. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 193, p. 107036, 2021.
- [48] USTUN, T. S.; FAROOQ, S. M.; HUSSAIN, S. S. Implementing secure routable goose and sv messages based on iec 61850-90-5. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 26162–26171, 2020.
- [49] BADONI, M.; SINGH, A.; SINGH, A. K.; SAXENA, H.; KUMAR, R. Grid tied solar pv system with power quality enhancement using adaptive generalized maximum versoria criterion. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, 2021.
- [50] WESTMAN, J.; HADIDI, R.; FOX, C.; LEONARD, J.; HARRELL, A. Controller hardware-in-the-loop testing of an iec 61850 goose based control for seamless transition of a microgrid between island and grid-connected modes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 57, n. 1, p. 61–69, 2020.

- [51] KUREK, K.; NOGAL, Ł.; KOWALIK, R.; JANUSZEWSKI, M. Iec 61850 interface for real time power system simulation. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, v. 69, n. 3, 2021.
- [52] HONG, J.; ISHCENKO, D.; KONDABATHINI, A. Implementation of resilient self-healing microgrids with iec 61850-based communications. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 3, p. 547, 2021.
- [53] REDA, H. T.; RAY, B.; PEIDAEI, P.; ANWAR, A.; MAHMOOD, A.; KALAM, A.; ISLAM, N. Vulnerability and impact analysis of the iec 61850 goose protocol in the smart grid. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 4, p. 1554, 2021.
- [54] LABONNE, A.; CAIRE, R.; BRACONNIER, T.; GUISE, L.; JARDIM, M.; HADJ-SAÏD, N. Teaching digital control of substation and iec 61850 with a test bench validation. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 36, n. 2, p. 1175–1182, 2020.
- [55] ASHRAF, S.; SHAWON, M. H.; KHALID, H. M.; MUYEEN, S. Denial-of-service attack on iec 61850-based substation automation system: A crucial cyber threat towards smart substation pathways. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 19, p. 6415, 2021.
- [56] USTUN, T. S.; FAROOQ, S. M.; HUSSAIN, S. S. Initialization vector for application of iec 61850-90-5 security features on r-goose and r-sv messages. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 132, p. 107189, 2021.
- [57] ADHIKARI, P. M.; HOOSHYAR, H.; FITSIK, R. J.; VANFRETTE, L. Precision timing and communication networking experiments in a real-time power grid hardware-in-the-loop laboratory. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Elsevier, v. 28, p. 100549, 2021.
- [58] SUN, L.; CHEN, Y.; KONG, C.; WANG, J. Research on distributed feeder automation communication based on xmpp and goose. *Scientific Programming*, Hindawi, v. 2021, 2021.
- [59] NAM, S.-R.; KO, W.-H.; KEY, S.; KANG, S.-H.; LEE, N.-H. Iec 61850-based centralized protection against single line-to-ground faults in ungrounded distribution systems. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 3, p. 722, 2021.
- [60] ANDRADE, E.; GRANJAL, J.; VILELA, J. P.; ARANTES, C. A security gateway for power distribution systems in open networks. *Computers & Security*, Elsevier, v. 111, p. 102492, 2021.
- [61] YANG, Z.; HUA, H.; CAO, J. A novel multiple impact factors based accuracy analysis approach for power quality disturbance detection. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, 2020.
- [62] MOGHADAM, M. F.; NIKOOGHADAM, M.; MOHAJERZADEH, A. H.; MOVALI, B. A lightweight key management protocol for secure communication in smart grids. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 178, p. 106024, 2020.
- [63] ELBASET, A. A.; MOHAMED, Y. S.; ELGHAFAR, A. N. A. Iec 61850 communication protocol with the protection and control numerical relays for optimum substation automation system. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, v. 13, n. 2, 2020.

- [64] YOUSSEF, T. A.; ESFAHANI, M. M.; MOHAMMED, O. Data-centric communication framework for multicast iec 61850 routable goose messages over the wan in modern power systems. *Applied Sciences*, MDPI, v. 10, n. 3, p. 848, 2020.
- [65] LEDESMA, P.; JAFARY, P.; REPO, S.; ÁLVAREZ, A.; RAMOS, F.; GIUSTINA, D. D.; DEDÈ, A. Event-based simulation of a decentralized protection system based on secured goose messages. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 12, p. 3250, 2020.
- [66] GIUSTINA, D. D.; SOTOMAYOR, A. Alvarez de; DEDÈ, A.; RAMOS, F. A model-based design of distributed automation systems for the smart grid: Implementation and validation. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 14, p. 3560, 2020.
- [67] HUSSAIN, S. S.; AFTAB, M. A.; USTUN, T. S. Performance analysis of iec 61850 messages in lte communication for reactive power management in microgrids. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 22, p. 6011, 2020.
- [68] DELAVARI, A.; BRUNELLE, P.; MUGOMBOZI, C. F. Real-time modeling and testing of distance protection relay based on iec 61850 protocol. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, IEEE, v. 43, n. 3, p. 157–162, 2020.
- [69] HUSSAIN, S. S.; FAROOQ, S. M.; USTUN, T. S. A method for achieving confidentiality and integrity in iec 61850 goose messages. *IEEE transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 35, n. 5, p. 2565–2567, 2020.
- [70] CLAVERIA, J.; KALAM, A. The influence of iec 61850 standard: implementation and development of a functional substation automation simulator. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Taylor & Francis, v. 17, n. 1, p. 28–35, 2020.
- [71] MATHEBULA, V. C.; SAHA, A. K. Mission critical safety functions in iec-61850 based substation automation system-a reliability review. In: TRANS TECH PUBL. *International Journal of Engineering Research in Africa*. [S.l.], 2020. v. 48, p. 149–161.
- [72] MOUSTAFA, M. A.; CHANG, C.-k. Cascading failure prevention in electrical power protection system of nuclear power plant using iec61850. *Journal of Electrical Society*, v. 69, n. 1, p. 203–210, 2020.
- [73] UNIÃO, D. O. D. *LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022 Energia Cooperativa MAPA DE INICIATIVAS*. january 2022. Url <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821//>.
- [74] ELÉTRICA, I. E. *Lei nº 14.300/2022: Marco Legal da Geração Distribuída*. january 2022. Url <https://www.mayerbrown.com/-/media/files/perspectives-events/publications/2022/01/informativo-do-setor-eletrico-lei-n-14300-de-2022-marco-legal-da-gd.pdf>.
- [75] JUSBRASIL. "Art. 1.314 - Subseção I. Dos Direitos e Deveres dos Condôminos". january 2020. Url <https://thomsonreuters.jusbrasil.com.br/doutrina/secao/1196961768/art-1314-subsecao-i-dos-direitos-e-deveres-dos-condominos-codigo-civil-comentado-ed-2020>.
- [76] JUSBRASIL. "Artigo 1331 da Lei nº 10.406 de 19 de Janeiro de 2002". january 2002. Url <https://www.jusbrasil.com.br/topicos/10646451/artigo-1331-da-lei-n-10406-de-19-de-janeiro-de-2002> 0.

- [77] OCHOA, L. F.; DENT, C. J.; HARRISON, G. P. Distribution network capacity assessment: Variable dg and active networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 25, n. 1, p. 87–95, 2009.
- [78] MOTA, I. L. Análise de alternativas de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos. Universidade Federal de Goiás, 2015.
- [79] ELÉTRICO, O. S. "Conceitos gerais sobre qualidade da energia". February 2013. [http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84\\_fasc\\_qualidade\\_energia\\_cap1.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf).
- [80] FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 18–28, 2009.
- [81] IEC, T. Communication networks and systems in substations. *IEC61850*, 2003.
- [82] LOPES, Y.; FERNANDES, N.; CASTRO, T.; MUCHALUAT-SAADE, V. Desafios de segurança e confiabilidade na comunicação para smart grids. *XVI Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*, 2016.
- [83] SOUTO, A. de O.; GUIEIRO, G. A.; KIERULFF, J. de P.; ABREU, L. F. de; CARVALHO, S. G. Testes de desempenho e interoperabilidade utilizando a norma iec 618501.
- [84] NOGUEIRA, B. Protocolo de comunicação iec 61850. *Trabalho Fim de Curso, Universidade Salvador, UNIFACS, Brasil*, 2007.
- [85] LOPES, Y.; FRANCO, R. H. F.; MOLANO, D. A.; SANTOS, M. A. dos; CALHAU, F. G.; BASTOS, C. A. M.; MARTINS, J. S.; FERNANDES, N. C. Smart grid e iec 61850: Novos desafios em redes e telecomunicações para o sistema elétrico. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2012.
- [86] PECENIN, M. Modelo de arquitetura base para implementação de aplicações baseadas na iec-61850. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- [87] INDUSTRIAL, A. "Redes IEC-61850 – Estudo de Protocolo e Exemplo de Aplicação (Parte I)". June 2021. <https://www.automacaoindustrial.info/redes-iec-61850-estudo-de-protocolo-e-exemplo-de-aplicacao/#:~:text=Protocolo%20G00SE,qualquer%20prote%C3%A7%C3%A3o%20ou%20sinal%20digital>.
- [88] BRELIŃSKA, J.; GIL, W. Nowe rozwiązania w urządzeniach i systemach on-line monitorowania i oceny jakości energii elektrycznej. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2019.
- [89] GORDON, J. M. R.; NOCE, C. Enel global solution for power quality monitoring and analysis. *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, IET, v. 2017, n. 1, p. 612–616, 2017.
- [90] POWER, E. "ELIPSE POWER". February 2021. Url <https://www.elipse.com.br/produto/elipse-power/>.

- [91] GIRGIS, A.; BRAHMA, S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. In: IEEE. *LESCOPE 01. 2001 large engineering systems conference on power engineering. Conference Proceedings. Theme: Powering Beyond 2001 (Cat. No. 01ex490)*. [S.l.], 2001. p. 115–119.
- [92] BRITO, S. d. S. Centro de referência para energia solar e eólica. *CRESESB Informe-Rio de Janeiro*, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.
- [93] MIYAMOTO, H.; BRAGA, F.; SOUZA, G.; FORTES, M.; DIAS, D. Impacts on distributed generation with harmonics analysis—case study. In: IEEE. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- [94] BITENCOURT, L. de A. *Otimização da Carga e Descarga de Veículos Elétricos Considerando Diferentes Modelos Tarifários*. <http://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/01/Leonardo-Arruda.pdf>. Acesso em: 30 janeiro 2018.
- [95] LUME.UFRGS. "Resumo ATP". February 2022. [https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/63871/Resumo\\_25158.pdf?sequence=1](https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/63871/Resumo_25158.pdf?sequence=1).
- [96] SELINC. "Relé SEL 735". February 2022. Url <https://selinc.com/pt/products/735/>.
- [97] SELINC. "Relé SEL 421". February 2022. Url <https://selinc.com/pt/products/421/>.
- [98] SEL. *SEL-451*. January 2022. <https://selinc.com/pt/products/451/>.
- [99] SELINC. "Relé SEL 451". February 2022. Url <https://www.coursehero.com/file/p4pvghg7/Use-o-software-ACSELERATOR-Architect-SEL-5032-para-gerenciar-os-dados-dos-n>
- [100] VIRUPAKSHA, V.; HARTY, M.; MCDONNELL, K. Microgeneration of electricity using a solar photovoltaic system in ireland. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 23, p. 4600, 2019.
- [101] REDDY, R.; PANDIAN, A. Improved rocof relay for islanding detection of solar distributed generation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 14, n. 3, p. 1105–1113, 2019.
- [102] BARROSO, L.; RUDNICK, H. The growth of renewables: Zero-marginal-cost electricity markets [guest editorial]. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 1, p. 16–18, 2021.
- [103] JAISWAL, G. C.; BALLAL, M. S.; TUTAKNE, D.; SURYAWANSHI, H. M. Impact of power quality on the performance of distribution transformers: A fuzzy logic approach to assessing power quality. *IEEE Industry Applications Magazine*, IEEE, v. 25, n. 5, p. 8–17, 2019.
- [104] HU, J.; LI, Z.; ZHU, J.; GUERRERO, J. M. Voltage stabilization: A critical step toward high photovoltaic penetration. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 17–30, 2019.
- [105] STAUCH, A.; VUICHARD, P. Community solar as an innovative business model for building-integrated photovoltaics: An experimental analysis with swiss electricity consumers. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 204, p. 109526, 2019.

- [106] KRISTOV, L. The bottom-up (r) evolution of the electric power system: The pathway to the integrated-decentralized system. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 42–49, 2019.
- [107] MARTINI, P. D. Operational coordination architecture: New models and approaches. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 17, n. 5, p. 29–39, 2019.
- [108] ISLAM, S. A. U.; RATNAM, E. L.; GOEL, A.; BERNSTEIN, D. S. Phasor-based adaptive control of a test-feeder distribution network: Application of retrospective cost adaptive control to the ieeec 13-node test feeder. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 39, n. 4, p. 56–74, 2019.
- [109] MUNOZ, A. Microgrids for disaster management: an ethical risk perspective. *IEEE Technology and Society Magazine*, IEEE, v. 38, n. 4, p. 70–74, 2019.
- [110] MOHAMMED, A.; REFAAT, S. S.; BAYHAN, S.; ABU-RUB, H. Ac microgrid control and management strategies: Evaluation and review. *IEEE Power Electronics Magazine*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 18–31, 2019.
- [111] WU, Y.; WU, Y.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; LI, J. Ac microgrid small-signal modeling: Hierarchical control structure challenges and solutions. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 81–88, 2019.
- [112] JIANG, L.; WANG, C.; XIE, G.; LI, Z.; ZHANG, H.; PEI, Z.; ZENG, P.; KANG, C.; ZHANG, N.; LI, Q. Variable-generation integration in china: An update. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 99–107, 2019.
- [113] MERIDJI, T.; CEJA-GOMEZ, F.; RESTREPO, J.; AZAR, R. High-voltage dc conversion: Boosting transmission capacity in the grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 22–31, 2019.
- [114] SHEN, X.; TAN, D.; SHUAI, Z.; LUO, A. Control techniques for bidirectional interlinking converters in hybrid microgrids: Leveraging the advantages of both ac and dc. *IEEE Power Electronics Magazine*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 39–47, 2019.
- [115] HUNT, R.; FLYNN, B.; SMITH, T. The substation of the future: moving toward a digital solution. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 47–55, 2019.
- [116] SUGUMAR, G.; SELVAMUTHUKUMARAN, R.; NOVAK, M.; DRAGICEVIC, T. Supervisory energy-management systems for microgrids: Modeling and formal verification. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 13, n. 1, p. 26–37, 2019.
- [117] O’NEILL-CARRILLO, E.; MERCADO, E.; LUHRING, O.; JORDÁN, I.; IRIZARRY-RIVERA, A. Community energy projects in the caribbean: Advancing socio-economic development and energy transitions. *IEEE Technology and Society Magazine*, IEEE, v. 38, n. 3, p. 44–55, 2019.
- [118] MACDOWELL, J.; WANG, Y.; QUINT, R.; CHI, Y.; ERNST, B.; SAYLORS, S.; JACOBSON, D.; ANDRESEN, B.; SORENSEN, P. E.; PORTALES, R. A journey through energy systems integration: Trending grid codes, standards, and iec collaboration. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 79–88, 2019.

- [119] LIU, Y.; SEE, K. Y.; YIN, S.; SIMANJORANG, R.; GUPTA, A. K.; LAI, J.-S. Equivalent circuit model of high power density sic converter for common-mode conducted emission prediction and analysis. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 67–74, 2019.
- [120] ESTES, D. Green village electric shines bright: Improving lives in nigeria with aid from ieee smart village. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 47–48, 2019.
- [121] GRAMSCI, A.; ROSENGARTEN, F. *Letters from prison*. [S.l.]: Columbia University Press New York, 1994.
- [122] KAZMIERKOWSKI, M. P. Modeling and control of power electronics converter system for power-quality improvements [book news]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 52–52, 2019.
- [123] NORDRUM, A. At last, a massive solar park for egypt: A 1.8-gw, \$ 4 billion solar power plant is coming on line in the sahara-[news]. *IEEE Spectrum*, IEEE, v. 56, n. 11, p. 8–9, 2019.
- [124] ANZALCHI, A.; SUNDARARAJAN, A.; MOGHADASI, A.; SARWAT, A. High-penetration grid-tied photovoltaics: Analysis of power quality and feeder voltage profile. *IEEE Industry Applications Magazine*, IEEE, v. 25, n. 5, p. 83–94, 2019.
- [125] UNDERWOOD, C.; YIK, F. *Modelling methods for energy in buildings*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [126] HAYAT, M. A.; SHAHNIA, F.; SHAFIULLAH, G. Improving duck curve profile, enabling peak-shaving and increasing self-sufficiency by properly designing community solar projects. In: IEEE. *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.
- [127] MEHTA, P.; GRIEGO, D.; NUNEZ-JIMENEZ, A.; SCHLUETER, A. The impact of self-consumption regulation on individual and community solar pv adoption in switzerland: An agent-based model. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2019. v. 1343, n. 1, p. 012143.
- [128] GRIEGO, D.; CATUNDA, N.; SCHMITT, G. Pilot study of ‘our energy’, an app designed to facilitate self-consumption of community solar photovoltaic systems. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2019. v. 1343, n. 1, p. 012153.
- [129] O’SHAUGHNESSY, E.; NEMET, G. F.; PLESS, J.; MARGOLIS, R. Addressing the soft cost challenge in us small-scale solar pv system pricing. *Energy Policy*, Elsevier, v. 134, p. 110956, 2019.
- [130] DAS, C. K.; BASS, O.; MAHMOUD, T. S.; KOTHAPALLI, G.; MOUSAVI, N.; HABIBI, D.; MASOUM, M. A. Optimal allocation of distributed energy storage systems to improve performance and power quality of distribution networks. *Applied Energy*, Elsevier, v. 252, p. 113468, 2019.

- [131] MITTAL, A.; KREJCI, C. C.; DORNEICH, M. C.; FICKES, D. An agent-based approach to modeling zero energy communities. *Solar Energy*, Elsevier, v. 191, p. 193–204, 2019.
- [132] HEADLEY, A.; HANSEN, C.; NGUYEN, T. Maximizing revenue from electrical energy storage paired with community solar projects in nyiso markets. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- [133] MITTAL, A.; KREJCI, C. C.; DORNEICH, M. C. An agent-based approach to designing residential renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 112, p. 1008–1020, 2019.
- [134] CARLEY, S.; KONISKY, D. M. The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy*, Nature Publishing Group, v. 5, n. 8, p. 569–577, 2020.
- [135] CHAN, G.; MICHAUD, G. Climate action through community solar: Inside minnesota’s community solar program. In: AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY. *48th Annual National Solar Conference: Race to Renewables, ASES SOLAR 2019*. [S.l.], 2019. p. 275–285.
- [136] PREHODA, E.; WINKLER, R.; SCHELLY, C. Putting research to action: Integrating collaborative governance and community-engaged research for community solar. *Social Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 1, p. 11, 2019.
- [137] XI, Z.; ZHAO, F.; ZHAO, X.; PENG, H.; XI, C. Research on islanding detection of solar distributed generation based on best wavelet packet and neural network. *Archives of Electrical Engineering*, v. 68, n. 4, 2019.
- [138] CHEN, X.; ZHAO, J.; HE, M. Pv power generation credit sharing towards sustainable community solar. In: IEEE. *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- [139] GHATAK, S. R.; SANNIGRAHI, S.; ACHARJEE, P. Multi-objective approach for strategic incorporation of solar energy source, battery storage system, and dstatcom in a smart grid environment. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 3038–3049, 2018.
- [140] CHAKRABORTY, P.; BAEYENS, E.; KHARGONEKAR, P. P.; POOLLA, K.; VARAIYA, P. Analysis of solar energy aggregation under various billing mechanisms. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 10, n. 4, p. 4175–4187, 2018.
- [141] WANG, X.; LIU, Z.; ZHANG, H.; ZHAO, Y.; SHI, J.; DING, H. A review on virtual power plant concept, application and challenges. In: IEEE. *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*. [S.l.], 2019. p. 4328–4333.
- [142] SIKORSKI, T.; JASIŃSKI, M.; ROPUSZYŃSKA-SURMA, E.; WEŁGLARZ, M.; KACZOROWSKA, D.; KOSTYLA, P.; LEONOWICZ, Z.; LIS, R.; REZMER, J.; ROJEWSKI, W. A case study on distributed energy resources and energy-storage systems in a virtual power plant concept: Technical aspects. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 12, p. 3086, 2020.

- [143] SCHNEIDER, K.; OLIVEIRA, M. O. M. de; JAPP, C.; MANOEL, P. S.; RÜTHER, R. Community solar in brazil: The cooperative model context and the existing shared solar cooperatives up to date. 2019.
- [144] OGIMOTO, K.; WANI, H. Making renewables work: Operational practices and future challenges for renewable energy as a major power source in japan. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 47–63, 2020.
- [145] QU, M.; DING, T.; HUANG, L.; WU, X. Toward a global green smart microgrid: An industrial park in china. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 55–69, 2020.
- [146] LEMUS, R. G. Back in the race: Achieving 100% renewable energy in the canary islands. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 64–74, 2020.
- [147] VAAHEDI, E.; RAHIMI, F.; AMUNDSON, E. A versatile microgrid management solution for the emerging electricity grid: Catering to the full spectrum of microgrids. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 91–97, 2020.
- [148] STRINGER, N.; BRUCE, A.; MACGILL, I.; HAGHDADI, N.; KILBY, P.; MILLS, J.; VEIJALAINEN, T.; ARMITAGE, M.; WILMOT, N. Consumer-led transition: Australia’s world-leading distributed energy resource integration efforts. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 20–36, 2020.
- [149] LEE, P. T. The software-defined power grid: How software and sensors are bringing century-old grid technology into the modern age. *IEEE Spectrum*, IEEE, v. 57, n. 7, p. 40–46, 2020.
- [150] SHAHIDEHPOUR, M.; YAN, M.; SHIKHAR, P.; BAHRAMIRAD, S.; PAASO, A. Blockchain for peer-to-peer transactive energy trading in networked microgrids: Providing an effective and decentralized strategy. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 80–90, 2020.
- [151] MORENO, R.; BEZERRA, B.; RUDNICK, H.; SUAZO-MARTINEZ, C.; CARVALHO, M.; NAVARRO, A.; SILVA, C.; STRBAC, G. Distribution network rate making in latin america: An evolving landscape. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 33–48, 2020.
- [152] ROGGATZ, C.; POWER, M.; SINGH, N. Power system restoration: Meeting the challenge to resiliency from distributed generation. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 4, p. 31–40, 2020.
- [153] WU, Y.; WU, Y.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; PALACIOS-GARCIA, E. J.; LI, J. Convergence and interoperability for the energy internet: From ubiquitous connection to distributed automation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 91–105, 2020.
- [154] RAZON, A.; THOMAS, T.; BANUNARAYANAN, V. Advanced distribution management systems: Connectivity through standardized interoperability protocols. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 26–33, 2019.

- [155] LI, S.; LIAN, J.; CONEJO, A. J.; ZHANG, W. Transactive energy systems: The market-based coordination of distributed energy resources. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 40, n. 4, p. 26–52, 2020.
- [156] DONG, H.; ZENG, B.; WANG, Y.; LIU, Y.; ZENG, M. China’s solar subsidy policy: Government funding yields to open markets. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 49–60, 2020.
- [157] MCNUTT, P.; SEKULIC, W.; DREIFUERST, G. Solar/photovoltaic dc systems: Information for electrical workers and firefighters. *IEEE Industry Applications Magazine*, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), v. 26, n. NREL/JA-5B00-76374, 2020.
- [158] NIGAM, S.; AJALA, O.; DOMINGUEZ-GARCIA, A. D. A controller hardware-in-the-loop testbed: Verification and validation of microgrid control architectures. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 92–100, 2020.
- [159] MEYER, B.; ASTIC, J.-Y.; MEYER, P.; SARDOU, F.-X.; POUMAREDE, C.; COUTURIER, N.; FONTAINE, M.; LEMAITRE, C.; MAEGHT, J.; STRAUB, C. Power transmission technologies and solutions: The latest advances at rte, the french transmission system operator. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 43–52, 2020.
- [160] NASR-AZADANI, E.; SU, P.; ZHENG, W.; RAJDA, J.; CAÑIZARES, C.; KAZERANI, M.; VENEMAN, E.; CRESS, S.; WITTEMUND, M.; MANJUNATH, M. R. The canadian renewable energy laboratory: A testbed for microgrids. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 49–60, 2020.
- [161] BRENNA, M.; FOIADELLI, F.; KALEYBAR, H. J. The evolution of railway power supply systems toward smart microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 12–23, 2020.
- [162] VUKOJEVIC, A.; LUKIC, S.; WHITE, L. W. Implementing an electric utility microgrid: Lessons learned. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 24–36, 2020.
- [163] GUERRERO, J. I.; PERSONAL, E.; CARO, S. G.; PAREJO, A.; ROSSI, M.; GARCIA, A.; SANCHEZ, R. P.; LEON, C. Evaluating distribution system operators: Automated demand response and distributed energy resources in the flexibility4chile project. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 64–75, 2020.
- [164] KHAN, A.; HOSSEINZADEHTAHER, M.; SHADMAND, M. B.; BAYHAN, S.; ABU-RUB, H. On the stability of the power electronics-dominated grid: A new energy paradigm. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 65–78, 2020.
- [165] LI, Y.; ZHANG, M.; ZHU, W.; CHENG, M.; ZHOU, C.; WU, Y. Performance evaluation for medium voltage mimo-ofdm power line communication system. *China Communications*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 151–162, 2020.

- [166] RUIZ, F.; PEREZ, M. A.; ESPINOSA, J. R.; GAJOWIK, T.; STYNSKI, S.; MALINOWSKI, M. Surveying solid-state transformer structures and controls: Providing highly efficient and controllable power flow in distribution grids. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 56–70, 2020.
- [167] BOSE, B. K. Artificial intelligence techniques: How can it solve problems in power electronics?: An advancing frontier. *IEEE Power Electronics Magazine*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 19–27, 2020.
- [168] MATHER, B.; YUAN, G. Onward and upward: Distributed energy resource integration [guest editorial]. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 16–19, 2020.
- [169] STAUCH, A.; GAMMA, K. Cash vs. solar power: An experimental investigation of the remuneration-related design of community solar offerings. *Energy Policy*, Elsevier, v. 138, p. 111216, 2020.
- [170] SILVA, F. A. Modeling, control, estimation, and optimization for microgrids: A fuzzy-model-based method [book news]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 93–94, 2020.
- [171] KROPOSKI, B.; BERNSTEIN, A.; KING, J.; VAIDHYNATHAN, D.; ZHOU, X.; CHANG, C.-Y.; DALL’ANESE, E. Autonomous energy grids: Controlling the future grid with large amounts of distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 37–46, 2020.
- [172] KEY, T.; KOU, G.; JENSEN, M. On good behavior: Inverter-grid protections for integrating distributed photovoltaics. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 75–85, 2020.
- [173] KLEIN, S. J.; HARGREAVES, A.; COFFEY, S. A financial benefit-cost analysis of different community solar approaches in the northeastern us. *Solar Energy*, Elsevier, v. 213, p. 225–245, 2021.
- [174] ANTONIOLLI<sup>1</sup>, A. F.; LUCAS, G.; MONTENEGRO, A. de A.; RÜTHER, R. Pv virtual power plant: Evaluating the performance of clustered x individual rooftop pv installations. 2019.
- [175] BRAUN, G. W. State policies for collaborative local renewable integration. *The Electricity Journal*, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 106691, 2020.
- [176] MICHAUD, G. Perspectives on community solar policy adoption across the united states. *Renewable Energy Focus*, Elsevier, v. 33, p. 1–15, 2020.
- [177] LUKE, N.; HEYNEN, N. Community solar as energy reparations: abolishing petroracial capitalism in new orleans. *American Quarterly*, Johns Hopkins University Press, v. 72, n. 3, p. 603–625, 2020.
- [178] GHADI, M. J.; AZIZIVAHED, A.; RAJABI, A.; GHAVIDEL, S.; LI, L.; ZHANG, J.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. Day-ahead market participation of an active distribution network equipped with small-scale caes systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 2966–2979, 2020.

- [179] MILUN, K. Solar commons: A “commons option” for the 21st century. *American Journal of Economics and Sociology*, Wiley Online Library, v. 79, n. 3, p. 1023–1057, 2020.
- [180] LAKSHMI, T. L.; NAIK, M. G.; PRASAD, S. R. Tlbo algorithm for multi-level inverter-based multi-terminal hvdc system in grid-tied photovoltaic power plant. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, Springer, v. 101, n. 4, p. 435–442, 2020.
- [181] SCHUNDER, T.; YIN, D.; BAGCHI-SEN, S.; RAJAN, K. A spatial analysis of the development potential of rooftop and community solar energy. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Elsevier, v. 19, p. 100355, 2020.
- [182] OH, E.; SON, S.-Y. Community solar photovoltaic service strategy for commercial buildings considering profit balancing and fairness. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 229, p. 110513, 2020.
- [183] BIROON, R. A.; ABDOLLAHI, Z.; HADIDI, R. Inverter’s nonlinear efficiency and demand-side management challenges. *IEEE Power Electronics Magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 49–54, 2021.
- [184] RENO, M. J.; BRAHMA, S.; BIDRAM, A.; ROPP, M. E. Influence of inverter-based resources on microgrid protection: Part 1: Microgrids in radial distribution systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 36–46, 2021.
- [185] LAGOS, D.; PAPASPILIOTOPOULOS, V.; KORRES, G.; HATZIARGYRIOU, N. Microgrid protection against internal faults: Challenges in islanded and interconnected operation. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 20–35, 2021.
- [186] BOWER, W.; KEY, T. Status of microgrid protection and related standards and codes: Protection supports integration. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 83–92, 2021.
- [187] ROPP, M. E.; RENO, M. J. Influence of inverter-based resources on microgrid protection: Part 2: Secondary networks and microgrid protection. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 47–57, 2021.
- [188] MANSON, S.; MCCULLOUGH, E. Practical microgrid protection solutions: Promises and challenges. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 58–69, 2021.
- [189] HIGGINSON, M.; PAYNE, M.; MOSES, K.; CURTISS, P.; COSTELLO, S. North bay hydro microgrid: Innovative protection of a complex system. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 70–82, 2021.
- [190] DEVAR, S. G. Equitable community solar: California & beyond. *Ecology LQ*, HeinOnline, v. 46, p. 1017, 2019.

## APÊNDICE A - Apêndice

Tabela A.1: Revisão da literatura

Ano	Revista/Jornal/Conferência/Simpósio/Seção de livro	Referência Bibliográfica
2019	Energies	[100]
2019	Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science	[101]
2019	IEEE Industry Applications Magazine	[19]
2019	Electricity Markets [Guest Editorial]	[102]
2019	IEEE Industry Applications Magazine	[103]
2019	IEEE Industrial Electronics Magazine	[104]
2019	Energy and Buildings	[105]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[106]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[107]
2019	IEEE Control Systems Magazine	[108]
2019	IEEE Technology and Society Magazine	[109]
2019	IEEE Power Electronics Magazine	[110]
2019	IEEE Electrification Magazine	[111]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[112]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[113]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[114]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[115]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[116]
2019	IEEE Technology and Society Magazine	[117]
2019	IEEE Power and Energy Magazine	[118]
2019	IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine	[119]
2019	IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine	[120]
2019	Engineering Technology	[121]

2019	IEEE Industrial Electronics Magazine	[122]
2019	IEEE Spectrum	[123]
2019	IEEE Industry Applications Magazine	[124]
2019	Energy and Buildings	[125]
2019	2019 9th International Conference on Power and Energy Systems, ICPES 2019	[126]
2019	Journal of Physics: Conference Series	[127]
2019	Journal of Physics: Conference Series	[128]
2019	Energy Policy	[129]
2019	Applied Energy	[130]
2019	Solar Energy	[131]
2019	51st North American Power Symposium, NAPS 2019	[132]
2019	Renewable and Sustainable Energy Reviews	[133]
2019	48th Annual National Solar Conference, ASES SOLAR 2019: Race to Renewables	[134]
2019	48th Annual National Solar Conference, ASES SOLAR 2019: Race to Renewables	[135]
2019	Social Sciences	[136]
2019	Archives of Electrical Engineering	[137]
2019	2019 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2019	[138]
2019	IEEE Systems Journal	[139]
2019	IEEE Transactions on Smart Grid	[140]
2019	2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019	[141]
2019	Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science	[101]
2019	Energies	[100]
2020	Energies	[142]
2020	Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019	[143]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[144]
2020	IEEE Electrification Magazine	[145]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[146]

2020	IEEE Electrification Magazine	[147]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[148]
2020	IEEE Spectrum	[149]
2020	IEEE Electrification Magazine	[150]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[151]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[152]
2020	IEEE Industrial Electronics Magazine	[153]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[154]
2020	IEEE Control Systems Magazine	[155]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[156]
2020	IEEE Industry Applications Magazine	[157]
2020	IEEE Electrification Magazine	[158]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[159]
2020	IEEE Electrification Magazine	[160]
2020	IEEE Electrification Magazine	[161]
2020	IEEE Electrification Magazine	[162]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[163]
2020	IEEE Industrial Electronics Magazine	[164]
2020	China Communications	[165]
2020	IEEE Industrial Electronics Magazine	[166]
2020	IEEE Power Electronics Magazine	[167]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[168]
2020	Energy Policy	[169]
2020	IEEE Industrial Electronics Magazine	[170]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[171]
2020	IEEE Power and Energy Magazine	[172]
2020	Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019	[143]
2020	2020 AEE World Energy Conference Proceedings	[173]
2020	Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019	[174]
2020	Electricity Journal	[175]

2020	Energy and Buildings	[175]
2020	Energies	[142]
2020	Renewable Energy Focus	[176]
2020	American Quarterly	[177]
2020	IEEE Transactions on Smart Grid	[140]
2020	IEEE Transactions on Smart Grid	[178]
2020	Energy Policy	[169]
2020	Renewable and Sustainable Energy Reviews	[11]
2020	Renewable and Sustainable Energy Reviews	[12]
2020	American Journal of Economics and Sociology	[179]
2020	Journal of The Institution of Engineers (India): Series B	[180]
2020	Remote Sensing Applications: Society and Environment	[181]
2020	Energy and Buildings	[182]
2021	IEEE Power Electronics Magazine	[168]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[183]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[184]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[185]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[186]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[187]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[188]
2021	IEEE Power and Energy Magazine	[189]
2021	IEEE Electrification Magazine	[171]
2021	Solar Energy	[173]
2021	Ecology Law Quarterly	[190]