



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Nathália Ledra Turnes Bitencourt

**Redes elétricas inteligentes: desenvolvimento de um dispositivo para detecção de falhas no domínio da distribuição de energia elétrica**

Araranguá  
2022

Nathália Ledra Turnes Bitencourt

**Redes elétricas inteligentes: desenvolvimento de um dispositivo para detecção de falhas no domínio da distribuição de energia elétrica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr.

Araranguá  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bitencourt, Nathália

Redes elétricas inteligentes: desenvolvimento de um dispositivo para detecção de falhas no domínio da distribuição de energia elétrica Araranguá 2022 / Nathália Bitencourt ; orientador, Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes Alexandre Reinaldo de Moraes, 2022.

171 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Redes elétricas inteligentes. . 3. Rede sem fio. . 4. Detecção de Falhas..  
I. Alexandre Reinaldo de Moraes, Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. III. Título.

Nathália Ledra Turnes Bitencourt

**Redes elétricas inteligentes: desenvolvimento de um dispositivo para detecção de falhas no domínio da distribuição de energia elétrica**

O presente trabalho ao nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Marcelo Daniel Berejuck, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

---

Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de  
Moraes, Dr.  
Orientador

Araranguá, 5 de dezembro de 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus pais Fernanda e Alexandre, ao meu irmão Matheus, aos meus avós Neli e Paulo e ao meu esposo Gabriel.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, pela paciência e apoio contínuo. Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Moraes, pela paciência, confiança, acompanhamento durante todo o processo de aprendizado, pela ajuda, dedicação com o desenvolvimento dessa dissertação. Agradeço aos colaboradores e sócios das empresas Three Pixels Sistemas LTDA e Octopus Atuadores Eletrônicos LTDA pela colaboração na idealização e desenvolvimento dos protótipos, com conhecimento técnico e materiais disponibilizados. Agradeço também a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), em especial ao Departamento de Operação do Sistema Elétrico - DPOP e a Divisão de Automação e Proteção do Sistema Elétrico - DVAS pela colaboração relacionada à validação da necessidade e ideia, e à Unidade CELESC Chapecó pela disponibilização de informações sobre a arquitetura de distribuição de energia na cidade e pela cedência de uma Chave Fusível para realização dos testes em bancada. A todos que de alguma forma contribuíram para a realização do presente trabalho. Agradeço por fim a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), visto que o presente trabalho foi realizado com apoio da mesma.

*"There is a driving force stronger  
than steam, electricity and  
atomic energy: the willpower."  
(Albert Einstein)*

## RESUMO

A implementação de tecnologias relacionadas às Redes Elétricas Inteligentes (Redes Elétricas Inteligentes (REI)'s) pode trazer inúmeros benefícios para o sistema elétrico. Entre as tecnologias que podem ser aplicadas, estão as voltadas ao monitoramento da rede de distribuição que facilitam identificação de falhas no fornecimento de energia. O objetivo principal da dissertação foi demonstrar que podem ser utilizadas tecnologias de comunicação sem fio de longa distância aplicadas a dispositivos que identifiquem faltas na rede de distribuição de energia, para a detecção de falhas com agilidade, proporcionando maior eficiência nos processos de manutenção. A execução do projeto se realizou através de algumas etapas, sendo elas: os estudos relacionados com os temas da dissertação, o desenvolvimento e os testes de um dispositivo identificador de falhas. Os resultados mostraram ser possível implementar tecnologias de comunicação sem fio em um dispositivo identificador de falhas no domínio das redes de distribuição de energia, assim como desenvolver um protótipo de baixo custo do dispositivo. Assim, a principal contribuição da dissertação foi a revisão bibliográfica dos assuntos relacionados à implementação de redes sem fio no domínio das redes elétricas inteligentes e a demonstração da possibilidade de aplicação das tecnologias sem fio em dispositivos para detecção de falhas na rede, objetivando a redução do tempo de resposta da equipe responsável pelos reparos na rede.

**Palavras-chave:** Redes elétricas inteligentes. Rede sem fio. Detecção de Falhas.

## **ABSTRACT**

The implementation of technologies related to Smart Grids (REI's) can bring numerous benefits to the electrical system. Among the technologies that can be applied are those aimed at monitoring the distribution network, which facilitate the identification of failures in the energy supply. The main objective of the dissertation was to demonstrate that long-distance wireless communication technologies can be used applied to devices that identify faults in the energy distribution network, for the detection of faults with agility, providing greater efficiency in the maintenance processes. The execution of the project took place through a few stages, namely: studies related to the themes of the dissertation, development and testing of a fault identification device. The results showed that it is possible to implement wireless communication technologies in a fault identifier device in the domain of power distribution networks, as well as to develop a low-cost prototype of the device. Thus, the main contribution of the dissertation was the bibliographic review of subjects related to the implementation of wireless networks in the field of smart electrical networks and the demonstration of the possibility of applying wireless technologies in devices for detecting network failures, aiming at reducing the response time of the team responsible for network repairs.

**Keywords:** Smart grid. Wireless network. Fouts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo conceitual de Rede Inteligente . . . . .	36
Figura 2 – Redes elétricas inteligentes: elementos e funcionalidades . . . . .	36
Figura 3 – Elementos da cadeia de REIs . . . . .	37
Figura 4 – Arquitetura da rede de comunicação em REI . . . . .	39
Figura 5 – Distribuição regional dos projetos catalogados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) . . . . .	48
Figura 6 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional em Operação 2019 . . . . .	66
Figura 7 – Distribuidoras de energia no estado de Santa Catarina . . . . .	72
Figura 8 – Sistema elétrico de atendimento à região Oeste de Santa Catarina . . . . .	74
Figura 9 – Região de distribuição de energia da CELESC . . . . .	76
Figura 10 – Região de distribuição de energia da Cooperativa Distribuidora de Energia Vale do Araçá (CERAÇÁ) . . . . .	76
Figura 11 – Região de distribuição de energia da Distribuidora Catarinense de Energia Elétrica (DCELT) . . . . .	77
Figura 12 – Chave Fusível . . . . .	85
Figura 13 – Chave Fusível Religadora . . . . .	86
Figura 14 – Sistema porta fusível ou cartucho . . . . .	88
Figura 15 – Elo Fusível . . . . .	88
Figura 16 – Índices de Compensação de Continuidade CELESC DIS 2022 . . . . .	97
Figura 17 – Nodo desenvolvido para testes de comunicação e monitor serial sendo executado. . . . .	98
Figura 18 – Cases plásticos utilizados para proteção e mapa da rede com demarcações de distância em 1 km, 2 km, 4 km, 5 km. . . . .	99
Figura 19 – Testes realizados em campo em Urussanga na rede Empresa de Força e Luz de Urussanga Ltda (EFLUL) . . . . .	100
Figura 20 – Dispositivo instalado na rede da EFLUL . . . . .	100
Figura 21 – Esquema com principais aspectos do protótipo . . . . .	102
Figura 22 – ESP32-DevKitC V4 com o módulo ESP32-WROOM-32 . . . . .	103
Figura 23 – ESP32-DevKitC Layout de pinos . . . . .	104
Figura 24 – Módulo SIM800L . . . . .	105
Figura 25 – Módulo MPU6050 . . . . .	106
Figura 26 – Pinagem MPU6050 . . . . .	107
Figura 27 – MT3608 . . . . .	107
Figura 28 – LM2596 . . . . .	108
Figura 29 – Esquemático do protótipo proposto . . . . .	109
Figura 30 – Protótipo montado e acoplado no cartucho da chave-fusível . . . . .	111
Figura 31 – Evento da queda do cartucho constatado pelo MPU6050 . . . . .	111

Figura 32 – Transformadores com ambas as chaves fechadas. . . . .	112
Figura 33 – Transformadores com chaves fechadas e abertas, respectivamente. . . . .	112
Figura 34 – Taxa de erro de pacotes (PER) para rede <i>Long Range</i> (LoRa) urbana e rural. . . . .	125
Figura 35 – Taxa de erro de pacotes para rede LoRa urbana e rural . . . . .	126
Figura 36 – Cobertura das redes móveis Segunda Geração (2G), Terceira Geração (3G), 4G e Quinta Geração (5G) - VIVO em Chapecó . . . . .	127
Figura 37 – Cobertura das redes móveis 2G, 3G, Quarta Geração (4G) e 5G CLARO em Chapecó . . . . .	127
Figura 38 – Cobertura das redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G TIM em Chapecó . . . . .	128
Figura 39 – Etapas no processo de <i>Energy Harvesting</i> (EH) . . . . .	133
Figura 40 – T-KiBaM <sub>EH</sub> com capacidade de carregamento . . . . .	134
Figura 41 – 1 <sup>a</sup> validação do modelo T-KiBaM <sub>EH</sub> . . . . .	137
Figura 42 – Erro relativo (%) da 1 <sup>a</sup> validação . . . . .	137
Figura 43 – Vista panorâmica da estação meteorológica. . . . .	139
Figura 44 – Níveis de exposição de radiação . . . . .	139
Figura 45 – Níveis de Temperatura . . . . .	139
Figura 46 – Comparação entre estações: (a) exposição à radiação e (b) níveis de temperatura . . . . .	140
Figura 47 – Corrente fornecida pelo painel solar considerando a exposição radiante em cada estação. . . . .	140
Figura 48 – Comportamento da bateria em cada estação. . . . .	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da rede elétrica atual com as Redes Elétricas Inteligentes . . . . .	35
Tabela 2 – Relações entre os diferentes níveis de rede, equipamentos e tecnologias de comunicação . . . . .	41
Tabela 3 – Tabela comparativa das REIs, com ponto de foco e motivação de diferentes países . . . . .	56
Tabela 4 – Resumo das tensões usuais em sistemas de potência. . . . .	71
Tabela 5 – Valores dos itens utilizados no protótipo . . . . .	113
Tabela 6 – Requisitos de comunicação em uma <i>Smart Grid</i> . . . . .	118
Tabela 7 – Ciclo de trabalho utilizado nas avaliações numéricas. . . . .	141
Tabela 8 – Duração das baterias em cada estação do ano . . . . .	142

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
6G	Sexta Geração
ACON	<i>Again Connected Networks</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ADMS	Advanced Distribution Management System - Sistema de Gestão de Distribuição Avançado
ADR	Resposta de Demanda Automatizada
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCIT	Instituto de Tecnologia de British Columbia
BMS	<i>Battery Management System</i>
BOM	Lista de Materiais
BR	<i>Basic Rate</i>
CC	Corrente Contínua
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
CERAÇA	Cooperativa Distribuidora de Energia Vale do Araçá
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
CREDEN	Câmara de Relações Exteriores e Defesa Nacional
CTG ELETRO-SUL	Companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DCELT	Distribuidora Catarinense de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
DGC	Desempenho Global de Continuidade
DIC	Duração Individual de Interrupção
DIT	Demais Instalações de Transmissão

DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DMP	Processador de Movimento Digital
DNP3	Distributed Network Protocol
DOE	Departamento de Energia
DPOP	Departamento de Operação do Sistema Elétrico
DRC	Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica
DRP	Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária
DSL	Linha Digital do Subscritor
DVAS	Divisão de Automação e Proteção do Sistema Elétrico
EDGE	<i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution</i>
EDR	<i>Enhanced Data Rate Radio</i>
EFLUL	Empresa de Força e Luz de Urussanga Ltda
EGPRS	GPRS aprimorado
EH	<i>Energy Harvesting</i>
EH-WSNs	Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks
EMS	<i>Energy Management Systems</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETs	Estações Transformadoras
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
FIC	Frequência Individual de Interrupção
Gbps	Gigabits por segundo
GE	<i>General Electric</i>
GIS	Sistema de Informação Geográfica
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSI	Gabinete de Segurança Institucional
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTSI	Grupo Técnico de Segurança de Infraestruturas Críticas
GUI	Interface Gráfica do Usuário
HAN	<i>Home Area Network</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	<i>Inter Integrated Circuit</i>
ICP	<i>Interconector de Componentes Periféricos</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IoT	Internet das Coisas
IP	<i>Protocolo de Internet</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>

LAN	<i>Local Area Network</i>
LE	<i>Low Energy</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LIB	Bateria de íon-Lítio
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Networks</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	Machine to Machine
MDM	Mobile Device Management
MEMS	Sistema Micro Eletromecânico
ML	<i>Machine Learning</i>
MPV	Mínimo Produto Viável
NAN	<i>Neighbourhood Area Network</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NB-IoT	<i>Narrowband-IoT</i>
Ni-MH	níquel-hidreto metálico
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NP	<i>Network protector</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PCI	Projetos de Interesse Comum
PDNP	Processo de Desenvolvimento de Novos Produtos
PLC	Comunicação por Linha de Energia
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
REI	Redes Elétricas Inteligentes
ROI	Retorno sobre o Investimento
ROM	Memória Somente de Leitura
RSSF	Rede de sensores sem fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTE-E	Redes Transeuropeias de Energia
RTP	<i>Real-Time Pricing</i>
RTUs	Unidades Terminais Remotas
Rx	<i>Receive Across</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>

SC-FDMA	<i>Singe Carrier - Frequency Division Multiple Access</i>
SCL	<i>Serial Clock</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SDIO	<i>Secure Digital Input Output</i>
SE	Subestação
SIG	Sistema de Informações Gerenciais
SIM	<i>Subscriber Identity Modulde</i>
SIMO	Sistema Integrado de Manutenção e Operação
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINDEC	Sistema Nacional de Informações de Defesa do Consumidor
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SMS	Short Message Service
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	Memória de Acesso Randômico Estática
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TOU	<i>Time-Of-Use</i>
Tx	<i>Transmit Across</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Transmitter</i>
UE	União Europeia
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAN	<i>Wide area networks</i>
WCDMA	Acesso Múltiplo à Divisão de Código de Banda Larga
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	Wireless Sensor Networks

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>km</i>	Quilômetro
<i>MW</i>	Megawatt
<i>kV</i>	Quilovolt(s)
<i>W</i>	Watt
<i>MVA</i>	Megavolt-ampère
<i>KW</i>	Quilowatt
<i>V</i>	Volt(s)
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora
<i>m</i>	Metro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>km/h</i>	Quilômetro por hora
<i>kVA</i>	Quilovolt(s)-ampère(s)
<i>A</i>	Ampère
<i>Ah</i>	Ampère-hora
<i>Wh</i>	Watt-hora
<i>kB</i>	Kilobyte
<i>MB</i>	Megabyte
<i>MHz</i>	Megahertz
<i>mA</i>	Miliampère
<i>rad/s</i>	Radiano por segundo
<i>m/s<sup>2</sup></i>	Metro por segundo ao quadrado
<i>KHz</i>	Kilohertz
<i>mAh</i>	Miliampère-hora
<i>ms</i>	Milisegundo
<i>kbps</i>	Kilobits por segundo
<i>s</i>	Segundo
<i>h</i>	Hora
<i>Mb/s</i>	Kilobits por segundo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E PROBLEMÁTICA	23
1.2	OBJETIVO GERAL	28
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>28</b>
1.3	MÉTODO DE PESQUISA	29
1.4	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	29
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	30
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES</b>	<b>31</b>
2.1	INTRODUÇÃO	31
2.2	MOTIVAÇÃO E CONCEITO	31
2.3	ELEMENTOS E ESTRUTURA	35
2.4	CENÁRIO INTERNACIONAL	42
2.5	CENÁRIO NACIONAL	46
<b>2.5.1</b>	<b>Motivadores</b>	<b>51</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Desafios</b>	<b>51</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Aspectos Regulatórios</b>	<b>51</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Aspectos Tecnológicos</b>	<b>53</b>
2.6	CONCLUSÃO	54
<b>3</b>	<b>SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO</b>	<b>63</b>
3.1	INTRODUÇÃO	63
3.2	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	64
<b>3.2.1</b>	<b>Distribuição</b>	<b>66</b>
3.2.1.1	Distribuição Primária	68
3.2.1.2	Distribuição Secundária	70
3.3	DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM SANTA CATARINA	72
<b>3.3.1</b>	<b>Transmissão de energia na Região Oeste de Santa Catarina</b>	<b>74</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Distribuição de energia na Região Oeste de Santa Catarina</b>	<b>75</b>
3.3.2.1	CELESC	75
3.3.2.2	CERAÇÁ	75
3.3.2.3	DCELT Energia	76
3.3.2.4	Sistema Elétrico em Chapecó	78
3.3.2.4.1	<i>O município de Chapecó</i>	78
3.4	CONCLUSÃO	79
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDO: PROTÓTIPO DE UM DISPOSITIVO PARA DETECÇÃO DE FALHAS</b>	<b>81</b>
4.1	EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO	84
<b>4.1.1</b>	<b>Chave Fusível</b>	<b>84</b>

4.1.2	<b>Elo Fusível</b> . . . . .	<b>88</b>
4.1.3	<b>Disjuntores</b> . . . . .	<b>91</b>
4.1.4	<b>Religadores</b> . . . . .	<b>91</b>
4.1.5	<b>Seccionador automático</b> . . . . .	<b>93</b>
4.1.6	<b>Relês</b> . . . . .	<b>94</b>
4.2	TIPOS DE FALTA . . . . .	95
4.2.1	<b>Faltas Transitórias</b> . . . . .	<b>96</b>
4.2.2	<b>Faltas permanentes</b> . . . . .	<b>96</b>
4.2.3	<b>Indicadores de qualidade do serviço</b> . . . . .	<b>96</b>
4.3	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DO PROTÓTIPO A SER DESENVOLVIDO. . . . .	97
4.4	PROJETO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO . . . . .	101
4.4.1	<b>Unidade de Processamento</b> . . . . .	<b>102</b>
4.4.2	<b>Unidade de Comunicação</b> . . . . .	<b>104</b>
4.4.3	<b>Unidade de Detecção</b> . . . . .	<b>105</b>
4.4.4	<b>Unidade de Alimentação</b> . . . . .	<b>107</b>
4.4.4.1	MT3608 . . . . .	107
4.4.4.2	LM2596 . . . . .	108
4.4.4.3	Baterias . . . . .	108
4.5	DISPOSITIVO DESENVOLVIDO . . . . .	108
4.6	TESTES FUNCIONAIS . . . . .	111
4.7	VIABILIDADE ECONÔMICA . . . . .	112
4.7.1	<b>Custo para implementação em Chapecó - SC</b> . . . . .	<b>113</b>
4.8	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO . . . . .	114
<b>5</b>	<b>REDES SEM FIO E MODELO DE BATERIA</b> . . . . .	<b>117</b>
5.1	REDES SEM FIO . . . . .	117
5.1.1	<b>Comunicação de rede celular em <i>Smart Grids</i></b> . . . . .	<b>119</b>
5.1.1.1	Panorama do uso da tecnologia <i>Global System for Mobile Communications (GSM)/General Packet Radio Service (GPRS)</i> em <i>smart grids</i> . . . . .	123
5.1.1.2	A tecnologia GSM/GPRS no protótipo desenvolvido . . . . .	125
5.2	MODELO DE BATERIA . . . . .	128
5.2.1	<b>An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research</b> . . . . .	<b>130</b>
5.2.1.1	Seção 2 - Conceitos . . . . .	132
5.2.1.2	Seção 3 - Modelagem de Baterias com capacidade de EH . . . . .	134
5.2.1.3	Seção 4 - Aplicação de Prova de Conceito . . . . .	138
5.2.1.4	Considerações finais sobre o artigo. . . . .	142
5.3	CONCLUSÃO . . . . .	144

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>146</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>149</b>
	<b>ANEXO A – ANEXO . . . . .</b>	<b>170</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de energia elétrica é um setor em constante evolução e enfrenta grandes desafios. Estes desafios estão relacionados com a necessidade de diversificar as fontes de geração de energia, adaptar-se à demanda, conservar energia e reduzir as emissões de carbono, a indústria está em constante movimento para encontrar soluções inovadoras. E uma dessas soluções é a Rede Elétrica Inteligente, ou REI (LOPES *et al.*, 2020).

Mas o que é uma REI? Bem, imagine uma rede de distribuição de energia elétrica que é capaz de se adaptar às necessidades dos usuários, fornecer eletricidade de alta qualidade e, simultaneamente, reduzir as emissões de carbono. Parece impossível? Não é! A REI é um conceito revolucionário que utiliza tecnologia de ponta, como sensores e dispositivos de monitoramento em tempo real, para melhorar a eficiência e a confiabilidade da rede de distribuição elétrica (CAMPAGNA *et al.*, 2020).

A rede de distribuição elétrica é um elemento vital na cadeia de fornecimento de energia elétrica, mas foi projetada há cerca de um século e, desde então, passou por poucas mudanças significativas. Com isso, os sistemas de distribuição elétrica vêm apresentando deficiências na sua infraestrutura, o que pode prejudicar a eficiência e a confiabilidade do serviço.

A REI surge como uma solução inovadora e sustentável para essas deficiências. Com ela, é possível fornecer eletricidade segura, confiável, limpa e de alta qualidade, adaptando-se às necessidades dos usuários e garantindo a conservação de energia. E o melhor de tudo: com a redução das emissões de carbono, a REI contribui para a preservação do meio ambiente e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Portanto, a REI é um conceito fascinante e promissor que pode transformar a indústria de energia elétrica. Com ela, é possível melhorar a eficiência e a confiabilidade da rede de distribuição elétrica, atender às necessidades dos usuários e, simultaneamente, contribuir para a preservação do meio ambiente.

A implantação das REI promove o fornecimento de energia com altos índices de confiabilidade, continuidade e segurança. Para tanto, busca-se desenvolver e implantar nas redes elétricas ferramentas de monitoramento, comunicação, informação, controle e medição (KUMAR *et al.*, 2019).

Estas ferramentas podem identificar interrupções não programadas no fornecimento de energia, sendo que este é um dos maiores desafios no setor elétrico. Essas podem ser provocadas por diversos motivos, tais como: contato com árvores, descargas atmosféricas, clima adverso, interferências externas, problemas registrados no Sistema Interligado Nacional Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pela interconexão dos sistemas elétricos do país, falta de suprimento, entre outros (ALIZA-

DEH *et al.*, 2021).

A localização de faltas na rede primária de distribuição é importante para a melhoria de alguns indicadores de qualidade do serviço, possibilitando a diminuição da Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor (FEC) e da Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC). Reduzir estes parâmetros significa, na prática, aumentar a satisfação dos clientes e o faturamento das distribuidoras de energia (ANEEL, 2021).

A identificação da falta pode ocorrer através do monitoramento da rede em tempo real. A implementação de sensores que identifiquem a falta e comuniquem, imediatamente, as deficiências do sistema é de fundamental importância nesta área. Os sistemas devem conseguir identificar a falta antes mesmo que os consumidores comecem a reclamar nas centrais de atendimento. O emprego de sistemas mais eficientes diminui o tempo de reparo e previne multas às distribuidoras (ALIZADEH *et al.*, 2021).

Devido à necessidade de comunicação remota e sem fio, estes dispositivos necessitam de uma infraestrutura e um protocolo de comunicação, ambos eficazes, rápidos, confiáveis e seguros. Os dados obtidos podem ser armazenados e transferidos de acordo com diferentes protocolos de comunicação, tais como o GSM, GPRS, ZigBee, LoRaWAN, SigFox, Sub-GHz, entre outros (SENDIN; MATANZA; FERRUS, 2021; ALIZADEH *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2021).

Cada tecnologia de comunicação possui suas características próprias em relação a diversos aspectos, tais como: área de cobertura, desempenho, benefício em função do custo, segurança, confiabilidade da operação, capacidade de transferência de dados, entre outras. A definição da tecnologia de comunicação é altamente orientada ao tipo de aplicação alvo. Assim, conforme a aplicação, dispositivos de baixa taxa de transferência de dados ou de um baixo nível de qualidade de sinal podem ser tolerados, requerendo neste caso, por exemplo, múltiplas retransmissões para completar a transferência de uma determinada informação. Por outro lado, uma melhor qualidade na comunicação permite implementar programas que demandam maiores taxas de transmissão, tais como a de precificação dinâmica de energia. Por consequência destas questões levantadas, é preciso ponderar entre confiabilidade, velocidade de transferência de dados e custos necessários para atender uma determinada aplicação (CHEN *et al.*, 2021).

A comunicação é a base e o suporte para que as redes elétricas inteligentes alcancem a informatização, a automação e a interatividade. Então, com o uso massivo de medidores inteligentes<sup>1</sup>, ao longo de todos os domínios das redes elétricas, há uma emergente necessidade de uma infraestrutura de comunicação de dados ao longo de

<sup>1</sup> Neste trabalho, os termos medidores inteligentes e *Smart Meters* são utilizados de forma intercambiável, representando qualquer equipamento com sensores, atuadores e/ou outros dispositivos e dotados de capacidade de transmissão de fluxos de dados elétricos.

toda a cadeia produtiva de energia. Neste contexto, as redes elétricas também seguem e se enquadram nas últimas tendências que estão influenciando as tecnologias de automação, as quais são a Internet das Coisas (IoT) e os *Cyber-Physical System* (CPS). Esses conceitos não são inteiramente novos e surgiram no contexto das Tecnologias da Informação e Comunicação há vários anos. Porém, eles estão, recentemente, mudando a forma de se olhar para os sistemas de automação. A aplicação das ideias de CPS e IoT conduz para a definição do conceito de Indústria 4.0, onde 4.0 refere-se à quarta revolução industrial possibilitada pelas tecnologias da Internet para criar produtos inteligentes, uma produção inteligente e serviços inteligentes. Esse termo foi criado, originalmente na Alemanha, mas rapidamente, se tornou um termo utilizado em escala global (ZHANG *et al.*, 2022; MISHRA *et al.*, 2022; BONAVOLONTA *et al.*, 2019; HOSSAIN; BADSHA; SHEN, 2020).

De uma forma simplificada, IoT é um conceito que se refere à conexão entre objetos e a Internet por meio de uma rede de baixa potência incorporada por sensores, transformando objetos comuns em dispositivos conectados. A conexão destes objetos à Internet promove melhorias relacionadas à sustentabilidade e a segurança das indústrias e da sociedade, além de permitir uma interação eficiente entre o mundo físico e o digital, ou seja, os CPS. Além disso, IoT é geralmente descrita como uma tecnologia que possui potencial para resolver várias questões atuais da sociedade, como cidades inteligentes, transporte inteligente, monitoramento de poluição, cuidados de saúde conectados, entre outros (BONAVOLONTA *et al.*, 2019; CHAUDHARY *et al.*, 2019).

Conforme afirma Tuttokmai e Kaygusuz (2019), o conceito de REI é semelhante em muitos pontos com o conceito de Indústria 4.0, visto que ambos baseiam-se no uso intenso de tecnologias de automação, computação e comunicação. A efetiva implantação da Indústria 4.0 e da REI depende, entre outras coisas, da efetiva implantação das redes 5G, a qual é uma geração de redes que combina as comunicações com e sem fios de provedores de acessos públicos e privados. Para lidar com a diversidade de sistemas de IoT sem fio, a tecnologia 5G precisará integrar diferentes tecnologias de redes, garantindo o mesmo nível de *Quality of Service* (QoS) oferecido pelas tecnologias com fio. Neste contexto, diversas tecnologias de redes sem fio estão sendo abordadas; então, é provável que num futuro próximo, a ampla disponibilidade de soluções de redes sem fios irá também gerar um padrão *de facto* para as comunicações sem fio (BHAJANTRI; GANGADHARAI AH, 2020).

O presente trabalho de mestrado se enquadra na área de pesquisa relacionada à distribuição da energia elétrica e processos de comunicação, conforme as áreas do conhecimento estabelecidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). No decorrer do percurso de desenvolvimento deste projeto, que abrangeu todo o período da pandemia da Covid-19, diversos redirecionamentos foram

realizados. De maneira geral, o foco do trabalho está relacionado com estudos relacionados à aplicação de tecnologias de rede sem fio em dispositivos de identificação de falhas na rede de distribuição de energia elétrica. Neste contexto, os estudos abrangem aspectos relacionados com baterias recarregáveis para a alimentação dos dispositivos que podem ser empregados a esta função, as tecnologias de comunicação sem fio que podem ser aplicadas nas redes de distribuição de energia, comparando-as com relação a diferentes parâmetros ligados a sua aplicabilidade e desempenho e, por fim, o desenvolvimento de um protótipo de um equipamento com aplicação real no contexto das REI's.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E PROBLEMÁTICA

Os sistemas de distribuição de energia fornecem energia elétrica aos clientes finais, como exemplo, hospitais, fábricas e residências. Consequentemente, estes sistemas são classificados como infraestruturas críticas, visto que as estas são instalações, serviços e bens públicos ou privados, considerados essenciais e podem provocar sérios impactos sociais, econômicos, políticos, internacionais ou à segurança nacional, caso tiverem suas atividades interrompidas ou sua integridade afetada (BRASIL, 2022; LOPES *et al.*, 2020; PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA/CONSELHO DE GOVERNO/CÂMARA DE RELAÇÕES EXTERIORES E DEFESA NACIONAL, 2019).

De acordo com o Instituto Acende Brasil (2021), a frequência de interrupções no fornecimento de energia está associado principalmente às condições físicas dos ativos da distribuidora, a configuração da rede, o grau de redundância e o estado dos equipamentos (idade dos equipamentos e qualidade de sua manutenção). Assim, a frequência está mais associada aos investimentos realizados pela empresa ao longo dos anos. Já a duração das interrupções está associada principalmente aos recursos humanos e materiais disponibilizados para realizar reparos visando à recomposição e ao reparo da rede, ou seja, está mais associada aos custos operacionais incorridos pela distribuidora (MAESTRI; ANDRADE, 2019).

Devido ao esgotamento energético e as falhas na rede serem um problema mundial, vários países ao redor do mundo vem desenvolvendo alternativas para tornar sua rede mais inteligente, além de atingir sustentabilidade e eficiência no uso de eletricidade. Cada país adota diferentes abordagens de acordo com suas necessidades individuais. Na Europa e nos Estados Unidos da América (EUA), a implantação de REI está acontecendo de forma mais intensa.

Na Europa os principais motivadores estão relacionados à utilização de fontes distribuídas e renováveis, assim como sustentabilidade e meio ambiente. O continente se mostra bastante avançado quando comparado a outras regiões do mundo quando se trata da instalação de medidores inteligentes. Nos Estados Unidos da América a motivação parte da infraestrutura da rede de energia se mostrar obsoleta perante

o cenário tecnológico, além disso, buscam maior segurança e eficiência do sistema. O país investe em parcerias com as empresas de distribuição de energia elétrica, fabricantes de equipamentos, empresas de telecomunicações e grandes empresas de tecnologia da informação para acelerar os investimentos na modernização da rede (NIST, 2019; AL-BADI *et al.*, 2020).

Japão e China se destacam pela busca pela eficiência energética e diversificação da rede. Já a Coreia do Sul e a Austrália se destacam em avanços relacionados à implementação de *Smart Meters*. O Canadá vem desenvolvendo estudos que visam geração distribuída, integração com microgeradores e também projetos de *Smart Grids* em pequena escala (AL-BADI *et al.*, 2020).

O governo brasileiro tem voltado suas atenções aos sistemas de infraestrutura crítica, entre estes sistemas enquadra-se o sistema energético. Os principais motivadores que levam o Brasil a implementação das REI's são a busca por eficiência energética, o aumento da confiabilidade do sistema, a segurança operacional e sistêmica e a sustentabilidade econômica. Espera-se que as *Smart Grids* estejam em um nível intermediário até 2030. O principal tema abordado no país são os sistemas de medição inteligente. Este tema vem sendo motivador para a maioria dos projetos desenvolvidos pelas concessionárias no país. Já quando os projetos partem de empresas que trabalham em parceria com concessionárias, as principais áreas de atuação são a de geração distribuída e a automação na distribuição (BRASIL, 2022; HECK *et al.*, 2021; GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

De acordo com dados de 2019 do Sistema Nacional de Informações de Defesa do Consumidor (SINDEC), que integra os Procons dos 26 estados do país, do Distrito Federal e de 560 municípios, reclamações sobre o setor elétrico estavam entre os cinco maiores temas abordados. Foram registradas mais de 150 mil reclamações, entre elas estão as falhas no fornecimento do serviço. Este tipo de ocorrência acarreta penalizações e perdas financeiras para as concessionárias, destacando a necessidade de soluções que melhorem o fornecimento de energia e a identificação de falhas (SINDEC, 2020).

Uma falha pode ocorrer no sistema de distribuição devido a diversos fatores, resultando na interrupção do fornecimento de energia. Geralmente, as falhas são transitórias, corrigidas em menos de dois ciclos. Algumas falhas persistem e não interrompem o fornecimento contínuo de eletricidade, mas podem danificar os equipamentos, prejudicando a segurança do sistema. É sempre desejável que esses tipos de falhas sejam identificados e corrigidos o mais cedo possível. No contexto da evolução das redes inteligentes, a operação segura e a localização de falhas são os primeiros passos para um sistema de energia "autocurativo". Algumas alternativas podem ajudar a reduzir o tempo de interrupção, reduzir o custo operacional da rede e aumentar sua confiabilidade (SAPOUNTZOGLU; RAISON; SILVA, 2019; SREERAMA; SWARUP,

2018).

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia são normalmente gerenciados pelos sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e/ou *Energy Management Systems* (EMS). O monitoramento em tempo real desses sistemas viabiliza a implementação de ferramentas para diagnosticar faltas. As técnicas de localização de falhas disponíveis na literatura podem ser divididas em cinco grandes categorias, sendo elas os métodos baseados em impedância (os mais populares), os métodos baseados em conhecimento (principalmente inteligência artificial), os métodos de ondas viajantes, os métodos baseados em medições esparsas (principalmente tensão e corrente) e os métodos híbridos que combinam dois ou mais dos métodos acima (SAPOUNTZOGLU; RAISON; SILVA, 2019; ENEH; ONYEKACHI ORAH; EMEKA, 2019; JIANG, 2021).

Os métodos híbridos de localização de falhas são baseados em medições esparsas. Os dispositivos inteligentes, como medidores inteligentes e *Phasor Measurement Unit* (PMU)'s têm sido utilizados nesta metodologia para medir tensões pré-falha e identificar faltas. Um dos maiores problemas destes dispositivos está relacionado ao grande número de perturbações e dados registrados. Tal problema pode ser contornado com o desenvolvimento de rotinas capazes de distinguir faltas transitórias e outros eventos transitórios que não representem uma falta permanente (ENEH; ONYEKACHI ORAH; EMEKA, 2019; SAPOUNTZOGLU; RAISON; SILVA, 2019).

Em caso de falha no sistema, o sistema de detecção deve determinar o tipo de falha (por exemplo, fase monofásica-terra e curto-circuito trifásico), a fase da falha em falhas desequilibradas e a localização da falha. Além de identificar o ramo defeituoso, localizar o setor defeituoso e estimar a distância da falha até o início do alimentador (SAPOUNTZOGLU; RAISON; SILVA, 2019; JIANG, 2021).

As técnicas tradicionais para localização de falhas na rede elétrica baseiam-se em indicações físicas ou métodos de força bruta, sendo eles: tentativas de recomposição da rede através de chaveamentos, indicação da ocorrência de falta por queima de fusíveis ou dispositivos indicadores de falta, quedas de condutores, inspeções visuais ao longo das linhas e, principalmente, reclamações de consumidores. O estado da técnica dos dispositivos indicadores de faltas compreende principalmente os sinalizadores, os quais são dispositivos instalados nos postes de energia elétrica e, na ocorrência de uma falta, acionam sinais luminosos intermitentes para indicar onde está o problema (ZHAO; BARATI, 2021; MACHADO, 2017).

Entretanto, a técnica atual apresenta uma série de problemas e inconvenientes associados, uma vez que é necessária uma inspeção visual *in loco* para encontrar qual sinalizador está piscando e descobrir onde ocorreu o problema. Além da falta de praticidade, tal procedimento demanda tempo, aumentando o tempo total necessário para restabelecer a energia elétrica (ZHAO; BARATI, 2021; RUIRONG *et al.*, 2022).

Recentes avanços tecnológicos permitem que os sistemas de distribuição sejam beneficiados por uma estrutura supervisionada que explora o uso de equipamentos inteligentes, capazes de fornecerem informações em tempo real sobre a operação da rede. No Brasil se destacam iniciativas pontuais de monitoramento da rede de distribuição, entre elas está a da Enel Distribuição. A empresa possui um plano de investimentos da empresa focado na automação e digitalização da rede de distribuição. Em todo o estado de Goiás já foram instalados cerca de 3,8 mil equipamentos, os quais permitem identificar e corrigir, remotamente, eventuais falhas na rede de distribuição, otimizando o trabalho e diminuindo os impactos sentidos pelos clientes (DISTRIBUIÇÃO, 2019).

Cabe também destacar a tecnologia de automação de redes de energia desenvolvida pela empresa *Elektro*, denominada *Self-Healing* Dinâmico. A tecnologia permite que as falhas decorrentes das interrupções sejam isoladas rapidamente por meio da interação entre os equipamentos que compõem o sistema. Possui capacidade de identificar o ponto onde houve a interrupção, isola somente a área afetada e recompõe o fornecimento de energia automaticamente aos demais clientes impactados (ELEKTRO, 2019).

Em Santa Catarina, o sistema de monitoramento predominante é o desenvolvido pela CELESC, devido à empresa possuir a maior área de concessão. A mesma utiliza o Sistema Integrado de Manutenção e Operação (SIMO) Online, esta ferramenta fornece um panorama sobre a situação em tempo real do sistema elétrico no estado, por meio de informações sobre o número de unidades consumidoras sem energia elétrica na área de concessão da CELESC Distribuição, com gerenciamento distribuído por 16 Agências Regionais. O sistema foi desenvolvido no ano de 2014, e caso a falha seja acidental o sistema ainda depende das ligações e SMS dos consumidores para ser identificada e atualizada no sistema, calcula-se que demore cerca de 10 minutos para a ocorrência aparecer no sistema. Se o problema for em uma subestação, aparece automaticamente (CELESC, 2020; ND, 2014).

Além disso, em entrevista com os responsáveis pelo Departamento de Operação do Sistema Elétrico (DPOP) e a Divisão de Automação e Proteção do Sistema Elétrico (DVAS) da CELESC, foram relatadas algumas tentativas de monitoramento da rede e algumas falhas nos dispositivos empregados. Os dispositivos não possuíam autonomia em caso de falta de alimentação (energia), por isso a recomendação da empresa seria a implementação de um sistema com baterias e alimentação externa à rede, para ocorrer a transmissão de dados mesmo em casos de falta de energia. Além disso, ocorriam falhas na comunicação com o dispositivo por falta de infraestrutura de comunicação confiável.

A maioria das soluções propostas para monitoramento da rede de distribuição de energia apresentam a necessidade de grandes investimentos para incorporá-los à

rede, por conta da falta de infraestrutura de comunicação pré-existente. Além disso, os componentes atuais da rede de distribuição de energia não são inteligentes, ou seja, não transmitem dados e não atuam diretamente na solução em caso de faltas. Os novos recursos da REI requerem comunicação de dados e várias tecnologias aparecem como candidatas para esse fim, visto isso, pesquisas devem ser realizadas com a finalidade de entender quais tecnologias apresentam as melhores vantagens em termos técnicos e econômicas (ODONGO *et al.*, 2022).

Enquanto a geração e transmissão de energia elétrica são minuciosamente monitoradas por tecnologias altamente avançadas e informatizadas, o segmento de distribuição carece em tecnologia. No processo de construção de redes inteligentes no século XXI, as redes de distribuição de energia devem garantir máxima confiabilidade, maior vida útil e menor custo de manutenção para a transferência de energia de forma mais eficiente e acessível. Entretanto, como na maior parte dos casos não há meios automatizados para monitorar a entrega de energia aos consumidores, essa falta de *feedback* impede o gerenciamento eficiente da rede de distribuição de energia. No caso de uma falta, as concessionárias permanecem alheias ao fato, e recebem o *feedback* dos consumidores insatisfeitos que foram afetados (ODONGO *et al.*, 2022; RUIRONG *et al.*, 2022). Essa falta de informação também atrasa o início das atividades reparadoras e restaurativas e causa prejuízos monetários às concessionárias. Em resposta a esse problema, as concessionárias de energia estão buscando empregar estratégias que tentam mantê-las informadas sobre problemas relacionadas à distribuição de energia na rede, a fim de reduzir os efeitos negativos causados por falhas (ODONGO *et al.*, 2022; RUIRONG *et al.*, 2022).

Portanto, o presente trabalho justifica-se pelo fato que o processo de automação da detecção de falhas no sistema de distribuição de energia, no estado de Santa Catarina, ainda é muito incipiente. O estudo realizado no âmbito desta dissertação de mestrado contribui para o desenvolvimento regional do setor elétrico (SILVA LESSE *et al.*, 2019).

Dentro deste contexto e considerando a problema apresentada, a questão fundamental a ser respondida nesta dissertação é a seguinte: **É viável desenvolver um dispositivo de baixo custo para identificar falhas na rede de distribuição de energia?** É importante destacar que o curso de pós-graduação em Energia e Sustentabilidade está enquadrado, junto a CAPES, na área de Engenharias III e que, apesar de se tratar de um mestrado acadêmico, há um grande incentivo desta área da CAPES para o desenvolvimento de tecnologias. Com especial destaque para desenvolvimentos com impactos regionais e/ou locais.

Ainda no âmbito das pesquisas nesta área, algumas questões adicionais foram definidas:

- Como identificar falhas na rede de distribuição de energia elétrica?

- Como os equipamentos podem auxiliar no reestabelecimento da rede?
- Como tornar o equipamento autônomo em casos de falta de energia/ alimentação?
- Quais aspectos devem ser considerados para a escolha da tecnologia de comunicação a ser empregada nos equipamentos?

A expectativa é que a presente pesquisa contribua para o estado da arte da temática em questão e que, principalmente, contribua para o fomento à pesquisa científica e tecnológica em questões relacionadas ao aprimoramento dos sistemas de distribuição de energia, promovendo uma solução para diminuir o tempo de detecção de falhas em sistemas de distribuição de energia e auxiliar no processo de reestabelecimento do fornecimento, contribuindo para uma distribuição de energia confiável e de qualidade.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A principal contribuição científica deste trabalho foi identificar qual ou quais tecnologias de rede sem fio podem ser empregadas em dispositivos de identificação de falhas na rede de distribuição de energia e abordar aspectos relacionados com sistemas de baterias recarregáveis, os quais possuem um importante papel em diversos tipos de aplicações de monitoramento.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Identificar as necessidades relacionadas ao monitoramento e detecção de falhas das redes de distribuição de energia;
- Avaliar as tecnologias de redes sem fio mais promissoras a serem utilizadas em dispositivos de detecção de falhas das redes de distribuição de energia;
- Definir os principais requisitos do protótipo a ser desenvolvido;
- Avaliar o protótipo desenvolvido em um teste de bancada que simula a detecção de falhas das redes de distribuição de energia;
- Avaliar as tecnologias de redes sem fio mais promissoras a serem utilizadas neste tipo de dispositivo/aplicação;
- Modelar um sistema de bateria recarregável que pode ser utilizado neste tipo de dispositivo/aplicação.
- Desenvolver um modelo analítico de baterias recarregáveis alimentadas por módulo solar.

### 1.3 MÉTODO DE PESQUISA

A classificação da pesquisa pode ser realizada sob vários aspectos, conforme Gil (2017). Do ponto de vista de seus **objetivos**, a presente pesquisa se classifica em pesquisa explicativa, pois neste tipo de pesquisa, além de registrar e analisar os fenômenos estudados, busca-se identificar suas causas através da aplicação de métodos experimentais ou matemáticos (SEVERINO, 2017).

Do ponto de vista de sua **natureza**, classifica-se como uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos. Do ponto de vista da **abordagem ao problema**, é uma pesquisa qualitativa, pois o processo e seu significado são os focos principais de abordagem. Neste tipo de classificação, os autores buscam explicar o porquê das coisas, exprimindo o que convém ser feito, mas não quantificam os valores e as trocas simbólicas nem se submetem à prova de fatos, pois os dados analisados são não-métricos e se valem de diferentes abordagens. A pesquisa qualitativa preocupa-se, portanto, com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e explicação da dinâmica das relações (GIL, 2017).

Segundo Gil (2017), do ponto de vista dos **procedimentos técnicos**, esta pesquisa é considerada bibliográfica e experimental. Em sua primeira etapa é classificada como bibliográfica, pois foi realizado levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. O procedimento bibliográfico foi o principal método de análise das redes sem fio. Porém, nos aspectos relacionados com o modelo de bateria e desenvolvimento do dispositivo trata-se de uma pesquisa experimental, pois se determinou um objeto de estudo, foram analisadas variáveis que influenciam o objeto e definiram-se as formas de controle e de observação dos efeitos que as variáveis produziram no mesmo.

### 1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição desta dissertação, foi o estudo desenvolvido referente às REI's e o caso de estudo onde foi desenvolvido um protótipo onde foram aplicadas tecnologias de redes sem fio. O protótipo foi capaz de identificar faltas permanentes na rede de distribuição de energia e informou de forma rápida a abertura de chaves fusível e enviar a localização exata onde ocorreu a abertura, objetivando a redução do tempo de resposta da equipe responsável pelos reparos na rede.

Em termos científicos, destaco a minha participação nas seguintes publicações científicas, as quais estão diretamente e/ou indiretamente relacionadas com a formação durante o período de mestrado.

- RODRIGUES, LEONARDO M.; BITENCOURT, NATHÁLIA L.; RECH, LUCIANA; MONTEZ, CARLOS; MORAES, RICARDO. *An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research*, v. 44, n.7, p. 5243-5258, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5269>.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em mais 5 capítulos. O capítulo 2 trata de uma revisão do estado da arte das redes elétricas inteligentes, apresentando motivação e conceito das REI's, elementos da sua estrutura e o cenário internacional e nacional. Este capítulo também destaca a motivação da implementação das redes elétricas inteligentes no Brasil e os desafios referentes aos aspectos regulatórios e tecnológicos encontrados.

O capítulo 3, apresenta uma revisão bibliográfica referente ao sistema elétrico brasileiro, descrevendo tecnicamente o sistema elétrico de potência nacional e seus principais aspectos no âmbito da proteção contra faltas. Abordando também o sistema de distribuição de energia elétrica no estado de Santa Catarina, com maior destaque à região oeste do estado e na cidade de Chapecó, utilizada como modelo para o presente trabalho.

O capítulo 4 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os equipamentos de proteção utilizados na rede elétrica atual e as classificações de falta de energia. Neste capítulo também discorre-se sobre a metodologia de desenvolvimento do dispositivo proposto e os testes de comunicação e funcionamento realizados em bancada.

No capítulo 5 apresenta-se uma revisão sobre a tecnologia de comunicação via celular (GSM/GPRS) e também discute-se os principais aspectos do artigo desenvolvido e publicado durante o programa de Mestrado, intitulado "*An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities*" o qual propõe um modelo analítico de bateria dependente da temperatura capaz de estimar alguns parâmetros de baterias que utilizam tecnologias de captação de energia renovável.

Por fim, são encontradas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação e o anexo.

## 2 ESTADO DA ARTE DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

### 2.1 INTRODUÇÃO

As cidades estão em constante evolução, e as novas tecnologias desempenham um papel importante nessa transformação, melhorando a qualidade de vida dos cidadãos. A eficiência na oferta de serviços essenciais, como energia, água e mobilidade, é fundamental para atender às necessidades crescentes das populações urbanas. Além disso, a busca por práticas sustentáveis, segurança e o uso de fontes renováveis de energia são cada vez mais importantes.

A comunicação e a tecnologia da informação são ferramentas poderosas que podem ser usadas para aprimorar a eficiência, a confiabilidade, a segurança e a qualidade dos serviços públicos. As empresas de energia elétrica estão se reinventando tecnologicamente para melhor gerenciar a geração, distribuição e consumo de energia elétrica, resultando em inovações no setor e na maneira como as concessionárias de energia interagem com seus clientes (SINGH *et al.*, 2022; MORELLO *et al.*, 2017).

As REI's têm o potencial de revolucionar o setor de energia elétrica, oferecendo uma solução sustentável e eficiente para a geração, distribuição e consumo de energia. A implementação de REI já é uma realidade em todo o mundo, com iniciativas crescentes também no Brasil.

Neste contexto, este capítulo aborda diversos aspectos relacionados às REI, desde os conceitos e motivadores para o seu desenvolvimento até os benefícios, estrutura e desafios relacionados à sua implementação. Além disso, serão apresentadas iniciativas mundiais e nacionais relevantes que buscam aprimorar a eficiência energética e promover práticas sustentáveis em prol da qualidade de vida das populações urbanas.

### 2.2 MOTIVAÇÃO E CONCEITO

A infraestrutura de energia elétrica, como se conhece hoje, atendeu às necessidades da população, quase inalterada, por aproximadamente um século. Entretanto, esta infraestrutura está inevitavelmente se tornando obsoleta, ela se torna cada vez menos eficiente, enfrentando repetidamente limitações e constantemente se sobrecarrega para acompanhar a demanda crescente por energia. Visto isso, como os outros serviços, o sistema elétrico público está passando por transformações (BANAR *et al.*, 2022; MORELLO *et al.*, 2017).

O cenário atual torna necessária uma rede elétrica moderna e inteligente. O novo modelo de rede deve ter capacidade de gerenciar um fluxo bidirecional entre vários nós, de acordo com mudanças repentinas na demanda, e deve atender a geração difusa ocasionada pela metodologia de geração distribuída e das fontes renováveis.

Ao mesmo tempo, precisa gerenciar flutuações e interrupções no fornecimento, a fim de evitar apagões. Ou seja, as necessidades estão relacionadas à confiabilidade, escalabilidade, capacidade de gerenciamento, geração de energia ambientalmente amigável, interoperabilidade e relação custo-benefício. Logo, esta nova modalidade de infraestrutura de energia, conhecida como Rede Elétrica Inteligente (REI), deve ser confiável, eficiente, flexível e segura (BACNAR *et al.*, 2022; MORELLO *et al.*, 2017).

O conceito de REI difere de acordo com quem o define. Segundo Kabalci (2016) REI é o termo mais recente usado para descrever as instalações de comunicação e controle integradas à rede convencional no século XXI. Embora haja várias denominações como *inteli-grid*, *smart grid* ou *inter-grid*, o termo Rede Elétrica Inteligente é amplamente aceito para as redes e incluem infra-estruturas de medição e de comunicação com e sem fio.

Para Bacnar *et al.* (2022) e Asaad *et al.* (2019), as REIs são sistemas que integram tecnologia da informação e comunicações avançadas em sistemas de energia. Com a finalidade de aumentar a eficiência do sistema e a relação custo-benefício, fornecer ferramentas ao cliente para gerenciar o uso de energia, melhorar a confiabilidade, a resiliência e qualidade da energia, além de permitir o uso de tecnologias inovadoras, incluindo as que promovem a geração de energia a partir de fontes renováveis, o armazenamento de energia (por exemplo, baterias) e veículos elétricos. É a integração inteligente de distribuição, transmissão, geração para a entrega eficiente de informações seguras, eletricidade sustentável e econômica.

De acordo com Asaad *et al.* (2019) estas redes permitem diversas aplicações inteligentes e automáticas, como infraestrutura de medição avançada, resposta à demanda, gerenciamento inteligente de distribuição, armazenamento inteligente de energia, marketing avançado de eletricidade, comércio de emissões e integração de veículos elétricos. Usando dispositivos de controle automatizado, equipamentos inteligentes de sensoriamento e medição, métodos de gerenciamento de energia, conversores inteligentes e tecnologia de comunicação de ponta.

Como visto, as REIs podem trazer inúmeros benefícios para o sistema elétrico. Em relação à fase de geração, estas redes possibilitam que geradoras que estão fora da rede já existente possam ser incorporadas à rede nacional de maneira racional e equilibrada. Como exemplo, a central de gerenciamento de energia pode despachar a geração fora da rede e usá-la apenas nos horários de alta demanda (ASAAD *et al.*, 2019).

A implementação destas redes também podem auxiliar no monitoramento do grande volume de energia e seu fluxo bidirecional, causado pelo crescimento da geração distribuída a partir de energia renovável. Além disso, a alta penetração dos geradores de energia renovável pode causar falhas na regulação da tensão, as quais podem ser identificadas por dispositivos da REI. Assim, auxiliando na integração de

recursos renováveis, desde as instalações do consumidor até as plantas centralizadas, promovendo a sustentabilidade energética global (VERMA; GOSWAMI, 2021).

O desperdício de energia nos sistemas tradicionais de transmissão e distribuição de energia, o qual inclui o sistema elétrico de potência entre a geração e o consumo, também é uma forte motivação para a implementação das REIs. O desperdício ocorre devido ao transporte ineficiente e a dispensação de eletricidade. As perdas de transporte que são consideradas normais em uma rede tradicional podem resultar em grandes desperdícios de receita nas empresas que prestam estes serviços (SANUSI *et al.*, 2022).

As REIs podem auxiliar na redução das perdas de transporte através da capacidade de monitoramento, tornando a distribuição de energia elétrica mais eficaz. Outra questão a ser ressaltada, é que a maior parte da energia elétrica gerada na rede não pode ser armazenada e, mesmo que seja possível, muita eletricidade será perdida nos processos de conversão de energia. Portanto, as REIs são necessárias, pois através do monitoramento a geração de eletricidade tende a corresponder à demanda, reduzindo perdas (SANUSI *et al.*, 2022).

Estas ações de controle autônomo podem aumentar a confiabilidade, aumentando a resiliência contra falhas de componentes e desastres naturais, minimizando a frequência e magnitude das quedas de energia relacionadas a requisitos operacionais, limitações de equipamentos e consumo do cliente (BACNAR *et al.*, 2022).

Interrupções também podem ser reconhecidas e resolvidas de maneira eficiente através das REIs. Os sistemas de gerenciamento de interrupções podem gerar e registrar dados históricos relevantes, também permitem que o consumidor receba alertas sobre a situação da interrupção e a situação da restauração, contrariando a maioria dos casos, onde o consumidor notifica a distribuidora inicialmente (ASAAD *et al.*, 2019; BACNAR *et al.*, 2022).

Técnicas de gerenciamento de carga, como esquemas baseados em preços, controle direto de carga, serviços limitáveis e licitação de demanda também podem ser aplicadas neste tipo de rede. Estas podem ser utilizadas para auxiliar os consumidores a reduzirem seus pagamentos e contribuem também para a redução da necessidade de plantas de pico (ASAAD *et al.*, 2019; BACNAR *et al.*, 2022).

O controle da qualidade da energia elétrica também pode ser realizado com a implementação das REIs. Podem ser analisados parâmetros de harmônicas e distorções, transitórios, fator de potência, quedas de tensão e instabilidade de corrente e tensão. Estes aspectos podem influenciar na vida útil de equipamento e o monitoramento destes pode evitar a sobrecarga do sistema, o que pode danificá-lo, além de também auxiliar na redução da incidência destas alterações, as quais podem ocasionar a falta de energia (ASAAD *et al.*, 2019; BACNAR *et al.*, 2022).

Em alguns casos são implementados recursos de armazenamento de energia,

com a finalidade de armazenar o excesso de eletricidade da rede. O armazenamento pode equilibrar as flutuações de tensão e frequência em caso de variação de carga na rede, o sistema de armazenamento de energia inteligente pode receber ou distribuir energia em milissegundos após acionado (ASAAD *et al.*, 2019; MOSLEHI; KUMAR, 2010).

As redes inteligentes também utilizam sistemas de gerenciamento de distribuição, e na maioria dos casos, estes sistemas são compostos por vários aplicativos projetados para monitorar e controlar toda a rede de distribuição de maneira eficiente e confiável. Estes sistemas minimizam a frequência e a duração das interrupções, mantendo os níveis padrão de frequência e tensão, e facilitam o monitoramento e o controle do sistema de distribuição elétrica (ASAAD *et al.*, 2019; BACNAR *et al.*, 2022).

O monitoramento também possibilita a inclusão de taxas dinâmicas e ininterruptíveis, o cálculo de preços em tempo real, preços críticos de pico, preços de tempo de uso para achatar a curva da demanda geral ao longo do tempo e, assim, reduzir a carga de pico (ASAAD *et al.*, 2019).

Além de promoverem uma melhor consciência situacional e darem assistência aos operadores da rede, as REIs promovem uma comunicação bidirecional entre consumidor e a concessionária, com a finalidade de que os usuários finais possam participar ativamente e adaptar seu consumo de energia com base em suas preferências individuais (preço, preocupações ambientais, etc.)(SANUSI *et al.*, 2022).

As REIs possuem resiliência aprimorada contra ataques maliciosos, por meio de segurança física e cibersegurança de última geração para manter a integridade, confidencialidade e autenticidade dos dados e do sistema. Além disso, estas redes conseguem tornar os veículos elétricos em cargas dinâmicas consumindo energia da rede (durante o carregamento) ou sistema dinâmico de armazenamento de energia, fornecendo energia à rede elétrica quando não estiverem em uso (ASAAD *et al.*, 2019; BACNAR *et al.*, 2022).

A tabela 1 resume a rede elétrica atual e a compara com as REIs.

Tabela 1 – Comparação da rede elétrica atual com as Redes Elétricas Inteligentes

<b>Rede Atual</b>	<b>Rede Inteligente</b>
Os consumidores estão desinformados e não participam do sistema.	As informações de preços estão disponíveis, assim o cliente tem a escolha de muitos planos, preços e opções de compra e venda.
Dominada pela produção centralizada, muito limitada na geração e armazenamento.	Recursos energéticos <i>plug-and-play</i> para complementar a produção centralizada.
Concentra-se em falhas ao invés de na qualidade da energia.	Qualidade é prioridade, com uma variedade de opções de preço de acordo com as necessidades do cliente.
Inteligência da rede limitada.	Integração inteligente da rede com a gerência.
Foco na proteção após a falha.	Evita interrupções, minimiza o impacto, e se recupera rapidamente de falhas.
Vulnerável a vândalos e a desastres naturais.	Detecta, atenua e se restaura rápida e eficientemente após desastres.
Mercado limitado e não integrado.	Mercado integrado que possibilita inovação.

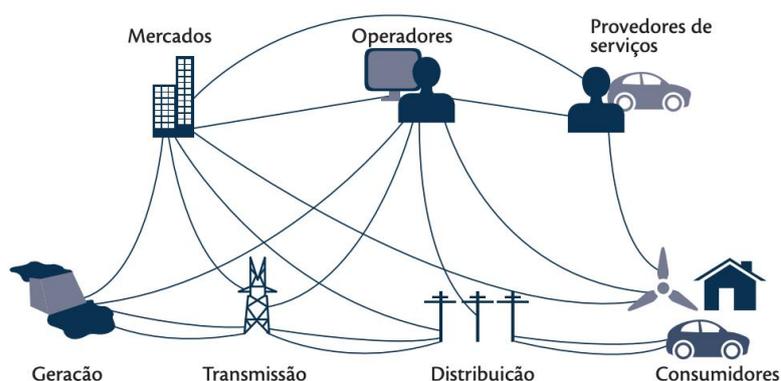
Fonte: Calhau *et al.* (2014)

Em síntese, as REIs objetivam otimizar a produção, distribuição e o consumo de energia, viabilizando a entrada de novos fornecedores e consumidores na rede, com melhorias significativas em monitoramento, gestão, automação e qualidade da energia ofertada, por meio de uma rede elétrica caracterizada pelo uso intensivo das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). Podem promover uma maior qualidade de serviço em todo o sistema de energia, além de alimentar uma economia cada vez mais digital (SANUSI *et al.*, 2022; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

### 2.3 ELEMENTOS E ESTRUTURA

Segundo NIST (2019), as Redes Elétricas Inteligentes compreendem sete principais domínios interligados entre si através de tecnologias de comunicação, sendo eles: geração, transmissão, distribuição, consumidor, mercados, operadores de rede e provedores de serviço, conforme pode ser observado na Figura 1.

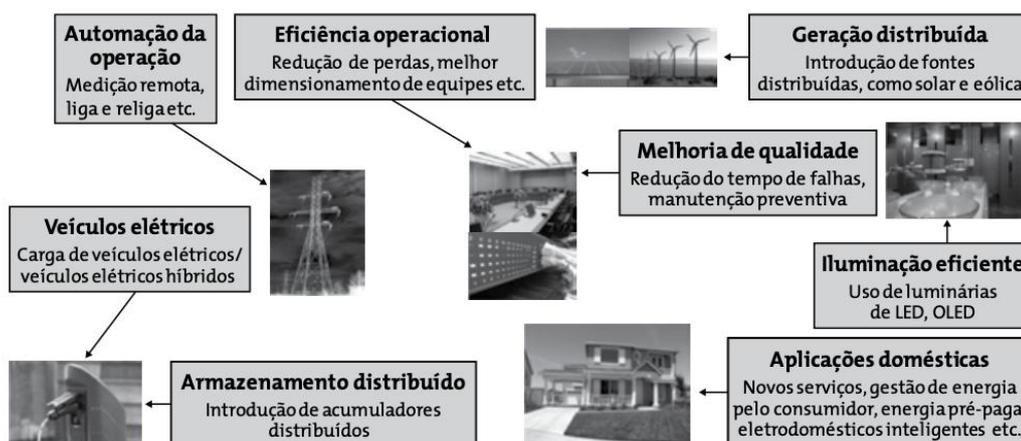
Figura 1 – Modelo conceitual de Rede Inteligente



Fonte: CGEE, 2012

A infraestrutura de uma REI inclui sistemas de energia inteligente, além de comunicação inteligente e sistemas de informação inteligentes (KABALCI, 2016). A Figura 2 destaca alguns dos elementos destas redes e suas funcionalidades.

Figura 2 – Redes elétricas inteligentes: elementos e funcionalidades



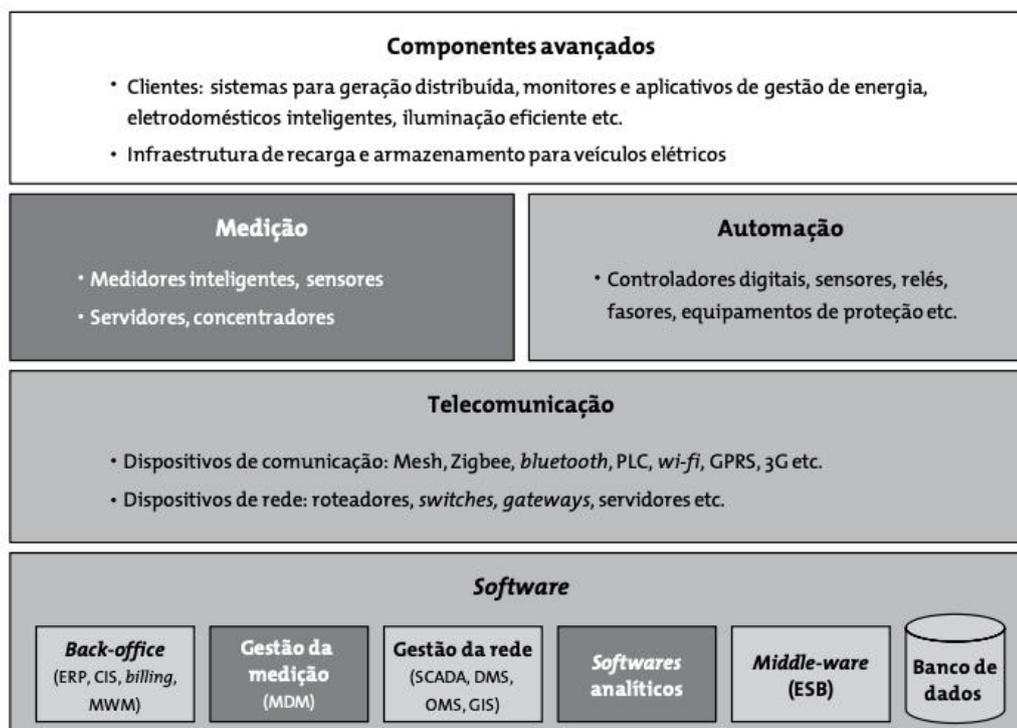
Fonte: Rivera, Esposito e Teixeira (2013)

Rivera, Esposito e Teixeira (2013) dividiram as tecnologias e infraestruturas capazes de implementar as características básicas das redes elétricas inteligentes em: componentes avançados, dispositivos de medição, automação, telecomunicação e *Software*, como pode ser observado na Figura 3.

Em componentes avançados, se destacam os dispositivos como inversores e demais equipamentos para geração distribuída, os eletrodomésticos inteligentes e

os dispositivos que promovem iluminação eficiente como a tecnologia *Light-Emitting Diode* (LED). Também se incluem os equipamentos e componentes avançados que podem ser utilizados para melhorar o desempenho global dos sistemas elétricos de potência, como os reguladores de tensão, compensadores estáticos, compensadores síncronos estáticos, controladores unificados de fluxo de potência. Materiais supercondutores, condutores compostos, métodos de armazenamento de energia, micro-redes, veículos elétricos e suas infraestruturas de apoio também se enquadram como componentes avançados, entre outros equipamentos (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Figura 3 – Elementos da cadeia de REIs



Fonte: Rivera, Esposito e Teixeira (2013)

Na categoria de medição se destacam os medidores inteligentes, os quais são dispositivos utilizados para medir o consumo de energia elétrica regularmente. O que difere esses equipamentos de medidores mais simples é o fato de que os medidores inteligentes permitem o fluxo bidirecional de energia, além de coletar uma quantidade de informações sobre o consumo muito maior do que os medidores comuns. Assim, pode ser feito o monitoramento e a tarifação mais detalhada da energia, assim a integração da rede elétrica na totalidade é facilitada pelo grande fluxo de informações (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013; SIDDIQUI *et al.*, 2017).

Sensores e transdutores também possuem um papel fundamental na realização de medições e fornecem informações em cada nó da rede elétrica. Essas informações podem ser usadas para configurar dinamicamente a rede sob demanda. Os sensores fornecem informações úteis usadas na tomada de decisões para transformar um sistema atual em um sistema aprimorado. Estes equipamentos comumente são de baixo custo, autoalimentados e flexíveis, pois são implantados em grandes números (MORELLO *et al.*, 2017).

Também na área de automação, as diferentes topologias, arquitetura de redes e tecnologias adotadas demandam soluções específicas para cada situação e localidade, gerando oportunidades de desenvolvimento local dos dispositivos (SANUSI *et al.*, 2022).

Os dados obtidos através dos componentes avançados aliados aos dispositivos de medição e automação são modulados de acordo com um protocolo de comunicação, sendo transmitidos por redes de comunicação com ou sem fio. Os dispositivos e metodologias responsáveis pela comunicação se enquadram como elementos de telecomunicação, estes se dividem em dispositivos de comunicação e dispositivos de rede (KABALCI, 2016; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

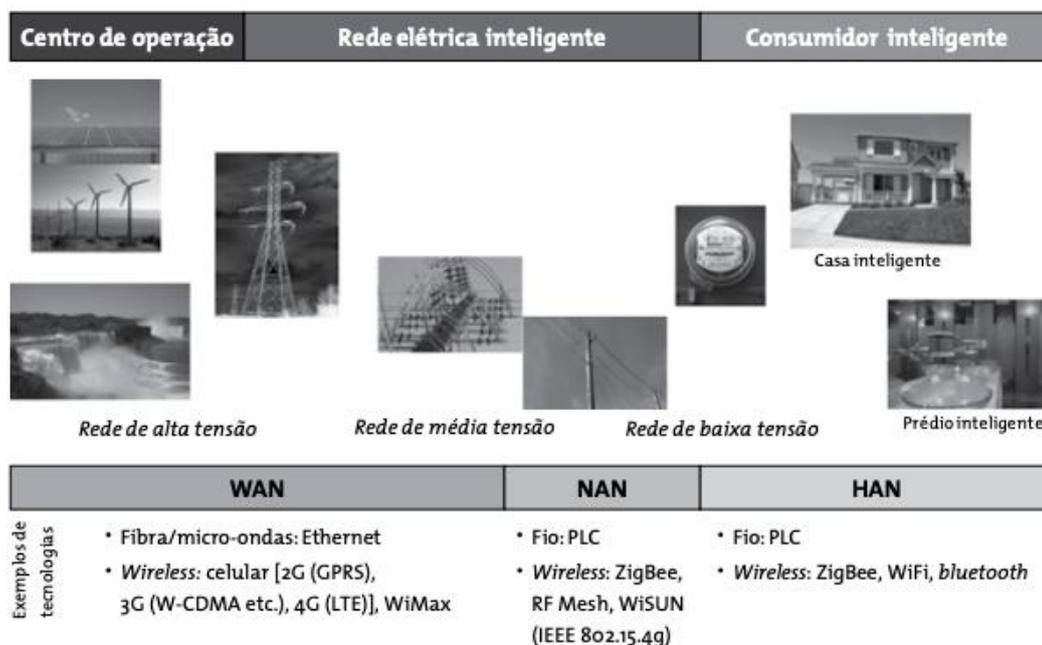
Para haver interconexão entre os usuários e o fornecedor dos serviços, é necessário implementar uma arquitetura computacional, chamada de *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), de forma a facilitar a comunicação automática e bidirecional entre o consumidor e a concessionária dos serviços através do uso de medidores inteligentes. A AMI é uma arquitetura para comunicação automatizada bilateral entre um medidor inteligente e a concessionária. O objetivo da AMI é medir, adquirir e analisar os dados sobre consumo de energia e a qualidade da energia entregue para cada consumidor. Possibilitando melhorias relacionadas à manutenção, gerenciamento de demanda e capacidade de planejamento do fornecedor (ASAAD *et al.*, 2019).

A estrutura da AMI se divide em três redes: *Home Area Network* (HAN), *Neighbourhood Area Network* (NAN) e *Wide area networks* (WAN), conforme a Figura 4. As redes próprias dos domicílios são as HAN, que conectam os dispositivos inteligentes internos à residência, como os medidores, tomadas e eletrodomésticos, além dos dispositivos de micro-geração (KABALCI, 2016; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013; HECK *et al.*, 2021).

As informações armazenadas nos medidores vizinhos compõe a rede NAN, esta rede suporta várias aplicações avançadas, como controle remoto de carga, monitoramento e controle de recursos energéticos distribuídos e veículos elétricos, exibição doméstica do uso do cliente e leitura de medidores que não são de energia (por exemplo, água e gás). Cada rede desse tipo envia as informações para um concentrador de dados, conectado à central de gerenciamento de medição através da rede WAN (KABALCI, 2016; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013; HECK *et al.*, 2021; KHAN;

KHAN, 2013).

Figura 4 – Arquitetura da rede de comunicação em REI



Fonte: Rivera, Esposito e Teixeira (2013)

Embora tenha sido difícil chegar a um consenso sobre a arquitetura e o escopo de uma infra-estrutura altamente dinâmica como a de uma REI, o padrão Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) está sendo amplamente aceito e é a primeira diretriz do setor em relação à arquitetura e interoperabilidade do sistema de comunicação nestas redes (KHAN; KHAN, 2013).

Para criar uma REI dinâmica são necessárias tecnologias de comunicação de alta velocidade, integradas e com vias bidirecionais para as trocas de informações em tempo real. Em relação ao meio onde se trafega a informação, existem soluções cabeadas ou sem fio (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Na literatura há diversas considerações sobre qual tecnologia de rede deve ser empregada, as características comumente consideradas são os custos envolvidos, a distância entre os sensores até o ponto concentrador de dados, as características da rede da concessionária, a topologia física do local, a área de cobertura, a taxa de transmissão, o desempenho do sistema, e a atenuação de ruídos (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

De acordo com Kabalci (2016), existem diversas tecnologias de comunicação que podem ser utilizadas em REIs. As tecnologias de comunicação com fio mais utilizadas são, Comunicação por Linha de Energia (PLC), fibra ótica e Linha Digital do Subscritor (DSL). A tecnologia PLC utiliza as linhas de transmissão e distribuição para

comunicação, é confiável e resistente a interferências. Já a fibra ótica possui maior taxa de transferência de dados e pode enviar os pacotes por vários quilômetros sem interferências. Já a DSL utiliza linhas telefônicas já existentes, evitando custo de implementação da rede.

Segundo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), as melhores alternativas de comunicação a serem utilizadas nas redes inteligentes são as tecnologias sem fio, suas vantagens estão relacionadas à instalação e cobertura, e suas desvantagens à sensibilidade, interferências e largura de banda limitada. As tecnologias mais utilizadas são *Wireless Personal Area Network* (WPAN), *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), rede de celular e satélite (KABALCI, 2016).

De acordo com Kabalci (2016), a tecnologia WPAN possui como vantagem o consumo de energia muito baixo, a implantação de baixo custo e a total compatibilidade com redes baseadas em IPv6, já a desvantagem está relacionada com a baixa largura de banda e suas limitações para construir redes grandes. A Wi-Fi, possui baixo custo de implementação, alta flexibilidade, adequada para diferentes casos de uso, entretanto seu espectro é de alta interferência e o seu consumo de energia é muito alto para muitos dispositivos de rede inteligente. A WiMAX suporta grandes grupos de usuários simultâneos, distâncias maiores e uma QoS mais sofisticada que a Wi-Fi, também oferece um controle orientado a conexão da largura de banda do canal, mas o gerenciamento de rede é complexa, os equipamentos possuem um alto custo e necessita de espectro licenciado.

As vantagens das redes de celular estão relacionadas a sua capacidade de suportar milhões de dispositivos, possuir baixo consumo de energia do equipamento terminal, possuir alta flexibilidade, ser adequada para diferentes casos de uso e possuir padrões abertos da indústria. Suas desvantagens são os preços altos para usar redes de provedores de serviços e o aumento contínuo dos custos. Por fim, a tecnologia de satélite possui longo alcance e é altamente confiável, mas possui um alto custo do equipamento terminal e alta latência (KABALCI, 2016).

Como visto, as redes de celulares possuem diversas vantagens, entre as tecnologias de redes de celulares mais usuais estão: a GSM, GPRS, *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (EDGE), *High Speed Packet Access* (HSPA) e *Long Term Evolution* (LTE). Onde se destaca a tecnologia GPRS, que tem sido bastante utilizada para transmissões de pacotes de dados na rede celular, em médias e longas distâncias (HECK *et al.*, 2021; KABALCI, 2016)

Tabela 2 – Relações entre os diferentes níveis de rede, equipamentos e tecnologias de comunicação

Rede	Equipamento e sistemas	Tecnologias de comunicação
Global	Clientes, Reguladores, Associações, etc.	Protocolos de internet
Corporativa	Sistemas MDM, OMS, EMS, etc.	IEC61970, IEC61968, web services
WAN	Roteadores e Repetidores	SONET, MPLS, Satélite, Microondas, IEC61850, DNP3
<i>Local Network</i> (LAN)	Medidores inteligentes, Relés, IEDs	WiMAX, PLC, Mesh, DSL, celular, cabo
HAN	Veículo Elétrico, eletrodomésticos inteligentes	ZigBee, WiFi, LonWorks, BACNet

Fonte: Gestão e Estudos Estratégicos (2012)

As redes de comunicação podem pertencer às empresas prestadoras de serviços de energia, como distribuidoras, ou a empresas terceirizadas, como empresas de internet ou de telefonia. A primeira opção requer investimento em infraestrutura, gestão própria garantindo segurança, confiabilidade e desempenho. Na segunda opção, o investimento em infraestrutura é menor e o uso se dá mediante pagamento ou convênio, e aspectos como a segurança e confiabilidade dependem de terceiros (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

Atualmente existem diversos métodos avançados de controle em REIs disponíveis no mercado e em desenvolvimento, entre estes métodos estão os agentes de *software* distribuídos. Os agentes de *software* são uma evolução das técnicas de inteligência artificial distribuída e inteligência artificial paralela. São *softwares* que atuam localmente e que possuem a capacidade de comunicação com outros agentes, e de aprendizado. Eles podem desempenhar diversas funções de supervisão, automação, controle e proteção nas redes elétricas (HECK *et al.*, 2021; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Estes *softwares* conseguem monitorar os parâmetros dos sistemas elétricos e os preços praticados pelas concessionárias de energia elétrica. Podem atuar automaticamente no gerenciamento do consumo de energia elétrica, utilizando parâmetros como preço e qualidade. São compatíveis com programas de resposta pelo lado da demanda baseados na precificação em tempo real, entre outras funcionalidades (HECK *et al.*, 2021; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Já os *softwares* dos medidores inteligentes são, em geral, proprietários e disponibilizados pelo fabricante. Na maior parte dos casos os dados são mantidos em um formato proprietário, o que implica que os usuários poderão acessá-los somente

utilizando ferramentas de gerenciamento do fornecedor dos equipamentos (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Por fim, devido à alta demanda de medições e necessidades, a cada minuto ou hora, surge a necessidade do desenvolvimento de *softwares* que recolham, armazenem, analisem, gerem respostas automáticas e conversem com os sistemas legados e de operações. Por isso, existem diversos *softwares* surgindo no mercado que podem ser utilizados nas REIs (HECK *et al.*, 2021).

## 2.4 CENÁRIO INTERNACIONAL

O desenvolvimento do sistema e da implementação das REIs nas redes de energia elétrica atuais é um processo gradual e em desenvolvimento no mundo. Considerando os diversos conceitos e benefícios, e as principais motivações para a implantação destas tecnologias diferentes em cada país.

Na União Europeia (UE) há um grande número de projetos voltados à pesquisa e implantação de redes inteligentes, sendo que os principais motivadores para a implementação das REI's, de acordo com IERC (2012), são a utilização de fontes distribuídas e renováveis de energia, segurança, a qualidade da energia, a renovação da infraestrutura que já está envelhecida e o uso dos veículos elétricos. e o meio ambiente. O Centro Conjunto de Pesquisa da Comissão Europeia, no ano de 2014, coletou informações sobre 459 projetos de redes inteligentes da UE. Sendo que o maior projeto já financiado é o *GRID4EU FP7-ENERGY*, o qual incluiu Operadores de Sistemas de Distribuição da República Tcheca, França, Alemanha, Itália, Espanha e Suécia, em parceria estrita com varejistas de eletricidade, fabricantes e organizações de pesquisa. Os grandes exemplos da região são a Itália, a qual já instalou medição eletrônica em praticamente todo o país, a Suécia, Portugal e Espanha, sendo que a instalação de REIs nestes locais iniciou-se com a implantação de medição eletrônica e sistemas de comunicação associados. Vários outros países membros da União Europeia também já iniciaram a instalação de medidores eletrônicos, o que permitirá posteriormente a criação de uma plataforma com funcionalidades avançadas que irão concretizar as REI (AL-BADI *et al.*, 2020).

Um estudo de dezembro de 2019 sobre a implantação de *Smart Meters* na UE concluiu que cerca de 225 milhões de *Smart Meters* para eletricidade e 51 milhões para gás serão implementados na UE até 2024. Isto representa um investimento potencial de 47 milhões de euros até 2024, espera-se que quase 77% dos consumidores europeus tenham um *Smart Meters* de eletricidade. Cerca de 44% terão um para gás, o custo de instalação de um *Smart Meter* na UE é, em média, entre 180 euros e 200 euros, os *Smart Meters* proporcionam uma economia de 230 euros para gás e 270 euros para eletricidade por ponto de medição (distribuídos entre consumidores, fornecedores, operadores de redes de distribuição, etc.), bem como uma economia média

de energia de pelo menos 2% e até 10% com base em dados provenientes de projetos piloto (COMMISSION, E. *et al.*, 2020).

Alguns países que se anteciparam se destacaram, como a Itália, com sua principal distribuidora, a Enel, que em 1999 implantou um projeto-piloto com solução e medidores desenvolvidos internamente. Em cinco anos, concluiu o projeto que custou mais de 2 bilhões de euros, e em 2010, cerca de 85% dos lares italianos já dispunham de medidores inteligentes (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Na Suécia, todos os lares dispõem de medidores inteligentes instalados desde 2012. Na França, por meio de um decreto, as distribuidoras com mais de cem mil clientes deveriam instalar os medidores inteligentes em 95% dos lares até 2016.(RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

A implantação de REIs é uma das três áreas temáticas prioritárias no âmbito das Redes Transeuropeias de Energia (RTE-E) com o objetivo de ajudar a integrar as energias renováveis, completar o mercado europeu da energia e permitir que os consumidores monitorem o seu consumo de energia. Os projetos de REIs que contribuem para isso e têm um impacto significativo nos mercados de energia e na integração do mercado em pelo menos dois países da UE são identificados como Projetos de Interesse Comum (PCI) sendo considerados fundamentais para a implementação de infraestruturas energéticas transfronteiriças na UE (COMMISSION, 2022a,b).

Atualmente, a lista PCI inclui 6 projetos relacionados à REIs:

- *SINCRO.GRID*(Eslovênia, Croácia): Uma integração inovadora de soluções baseadas em tecnologia madura e sinérgica para aumentar a segurança das operações dos sistemas de eletricidade da Eslovênia e da Croácia simultaneamente.
- *Again Connected Networks* (ACON) (Tcheca, Eslováquia): O principal objetivo da ACON é promover a integração dos mercados de eletricidade tcheco e eslovaco.
- Iniciativa de Fronteira Inteligente (França, Alemanha): A Iniciativa de Fronteira Inteligente conectará políticas concebidas pela França e Alemanha para apoiar suas cidades e territórios em suas estratégias de transição energética e integração do mercado europeu.
- *Danube InGrid* (Hungria, Eslováquia): O projeto melhora a coordenação transfronteiriça da gestão da rede elétrica, com foco na coleta e intercâmbio de dados inteligentes.
- *Data Bridge* (Estônia, Letônia, Lituânia, Dinamarca, Finlândia, França): Visa construir uma Plataforma Europeia de Data Bridge comum, para permitir a integração de diferentes tipos de dados (dados de medição inteligente, dados operacionais

de rede, dados de mercado), com vista a desenvolver soluções escaláveis e replicáveis para a UE.

- Projeto de flexibilidade transfronteiriça (Estônia, Finlândia): Visa apoiar a integração de fontes de energia renováveis e aumentar a segurança do abastecimento através da prestação transfronteiriça de serviços de flexibilidade para a Estônia, Finlândia e Ilhas Åland fornecidos por geração distribuída (COMMISSION, 2022a; HOME - DANUBE INGRID. . . , 2022; ACON - SMART GRIDS CZ/SK | ACON - SMART GRIDS CZ/SK. . . , 2022; SINCRO. . . , 2022; SMART GRIDS AND METERS. . . , 2022).

As principais motivações dos Estados Unidos da América estão relacionadas com a infraestrutura de energia existente que já está obsoleta, a inserção da geração distribuída no sistema, a confiabilidade, segurança e a eficiência do sistema, além do crescimento do uso de veículos elétricos e híbridos no país (NIST, 2014).

O governo federal dos Estados Unidos estabeleceu duas principais políticas voltadas à *Smart Grid*, a primeira delas foi a Lei de Independência e Segurança Energética de 2007, que especifica e estabelece um programa de fundos coordenados para atrair investimentos em redes inteligentes. Já a segunda política foi a Lei Americana de Recuperação e Reinvestimento de 2009, que incluía grandes investimentos e incentivos fiscais para apoiar a energia limpa. O Departamento de Energia (DOE) e o NIST estão investindo em parcerias com as empresas de distribuição de energia elétrica, fabricantes de equipamentos, empresas de telecomunicações e grandes empresas de tecnologia da informação para acelerar os investimentos na modernização da rede. Estas parcerias resultaram em cerca de oitenta padronizações que objetivam a interoperabilidade de protocolos e equipamentos em diversas áreas das REIs, como telecomunicações, tecnologia da informação e energia. Além disso, o governo também disponibilizou recursos para empresas de energia realizarem projetos demonstrativos como meio de avaliar as várias tecnologias disponíveis, e medir a resposta do consumidor a essa nova forma de fornecimento de energia elétrica (AHMAD *et al.*, 2022; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019; SISSINE, 2007; ACT, 2009).

O DOE dos Estados Unidos e seus Laboratórios Nacionais também vem desenvolvendo tecnologias de *Machine Learning* (ML) para evitar ataques cibernéticos maliciosos em infraestruturas críticas de energia a fim de reduzir as interrupções e desligamentos da rede. As tecnologias ML facilitam a modernização da rede de distribuição de energia usando sistemas autônomos. O objetivo ao longo prazo é tornar a rede: segura, flexível, escalável, robusta, resiliente, acessível, confiável, e interoperável em tempo real (AHMAD *et al.*, 2022).

Já no Japão a necessidade se dá devido aos acidentes nucleares que acarretaram diversificação da matriz energética, ao uso dos veículos elétricos e a imple-

mentação das cidades inteligentes. Na China, destaca-se seu protagonismo mundial relacionado à IoT e a implementação das cidades inteligentes, além da busca pela eficiência e diversificação (renováveis) energética.

A Coreia do Sul tinha como objetivo introduzir *Smart Meters* em metade das residências coreanas até 2016, bem como integrar 10% da geração a partir de fontes renováveis até 2022. A Austrália está comprometida com a implantação de *Smart Meters* após a crise energética que passou em 2006 e 2007. O país visava integrar 20% de sua energia com fontes renováveis até 2020. A Austrália está atualmente reformando os incentivos para REIs e desenvolvendo estratégias para estabelecer regulação referente à demanda e prazos para tarifas de utilização (AL-BADI *et al.*, 2020).

Já o progresso da instalação destes dispositivos na Índia e no sudeste da Ásia tem sido lento até o momento, mas a perspectiva é de forte crescimento até 2025. Reduções de custos em AMI e lições aprendidas em instalações de larga escala em outras regiões podem acelerar a implantação em mercados emergentes (IEA, 2019).

Entre os países em destaque está o Canadá, que investe em diversos tipos de projetos de estudo que visam geração distribuída, integração de microgeradores, medidores inteligentes, e também em projetos de redes inteligentes de pequena escala. Como os criados no Instituto de Tecnologia de British Columbia (BCIT) na cidade de *British Columbia* em Vancouver. Estes projetos servem para estudo de sensores e treinamento de habilidades para um futuro aumento de escala da rede, a fim de promover o atendimento de todos os consumidores de Vancouver. No mesmo instituto existem estudos de fontes intermitentes nas micro-redes criadas, a fim de fazer testes de estresse da mesma (SMARTGRID CANADÁ, 2020).

Em relação à automação e ao monitoramento das redes de distribuição, o investimento tem aumentado nos últimos anos, em 2017 o crescimento foi de 3%, com quase US \$ 13 bilhões em investimentos concentrados na China, Europa e Estados Unidos. Já os investimentos em sistemas de transmissão aumentaram significativamente em 2017, com a construção do triplo de linhas anuais (em quilômetros) comparado com 2016 (IEA, 2019).

Como visto, a maioria dos países que desenvolve tecnologia já traçou metas ou iniciou a implantação em massa das REIs. Os *early adopters*, como a Itália, e países tradicionais no setor de energia e tecnologias de comunicação, como a Alemanha, Japão, Estados Unidos, entre outros, já se beneficiam dessa vantagem, fortalecendo empresas nativas, que lideram processos de consolidação em escala global. (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

## 2.5 CENÁRIO NACIONAL

Grandes empresas veem as REIs como o futuro do setor da energia, e no Brasil não é diferente. Os projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de REIs estão sendo realizados por parcerias entre as concessionárias de energia, as universidades, os laboratórios e as empresas fabricantes. Existem projetos-piloto em quase todas as regiões do Brasil, principalmente devido ao projeto de pesquisa e desenvolvimento de redes inteligentes dado pela ANEEL.

No Brasil as questões de segurança relacionadas a infraestruturas críticas recebem uma grande atenção por parte do governo federal nos últimos anos. Desde 2007, a Câmara de Relações Exteriores e Defesa Nacional (CREDEN) vinculada ao Gabinete de Segurança Institucional (GSI) da Presidência da República, instituiu um Grupo Técnico de Segurança de Infraestruturas Críticas (GTSI), para propor medidas e ações de segurança específicas para os setores da água, energia, transportes, telecomunicações e finanças. Espera-se que as redes inteligentes estejam em um nível intermediário de desenvolvimento no Brasil até 2030 (BRASIL, 2022).

A medição inteligente é considerada um sistema tecnológico emergente e em desenvolvimento no Brasil. Atualmente, o uso de *Smart Meters* no país está restrito a projetos piloto de *Smart Grids* de concessionárias de distribuição específicas. Um projeto disruptivo para um sistema elétrico de rede inteligente foi recentemente proposto por uma empresa estatal de energia elétrica do país, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Este projeto baseia-se na implementação de um Sistema Avançado de Gestão da Distribuição que apoiará a otimização das redes de distribuição do estado do Paraná, viabilizando também o processo de autocura, do inglês *Self-Healing*. A implantação desse projeto está prevista para iniciar em 2019 e tem duração de cerca de três anos. Até então foi concluída a implementação do sistema em todas as subestações de distribuição, agora as equipes do projeto vão se concentrar em novas frentes. Primeiro o Advanced Distribution Management System - Sistema de Gestão de Distribuição Avançado (ADMS) será estendido a outros equipamentos da rede elétrica utilizados para restabelecer a energia em caso de desligamento. Com isso, haverá uma maior integração entre as redes, linhas, subestações e outras estruturas. Em um segundo momento, as manobras da operação serão automatizadas. Quando isso ocorrer, a rede de distribuição terá capacidade para identificar problemas, acionar respostas e restabelecer a energia sem que precise de um comando humano (COPEL, 2022b,a; DRANKA; FERREIRA, 2020).

Os principais temas abordados pelos projetos são os sistemas de medição inteligente, incluindo novos modelos e testes de novas funcionalidades de medidores eletrônicos de energia, automação da distribuição, incluindo sistemas de supervisão das redes de distribuição de energia elétrica, geração distribuída, micro-geração e micro-redes, sistemas de armazenamento distribuídos e baterias, veículos elétricos e

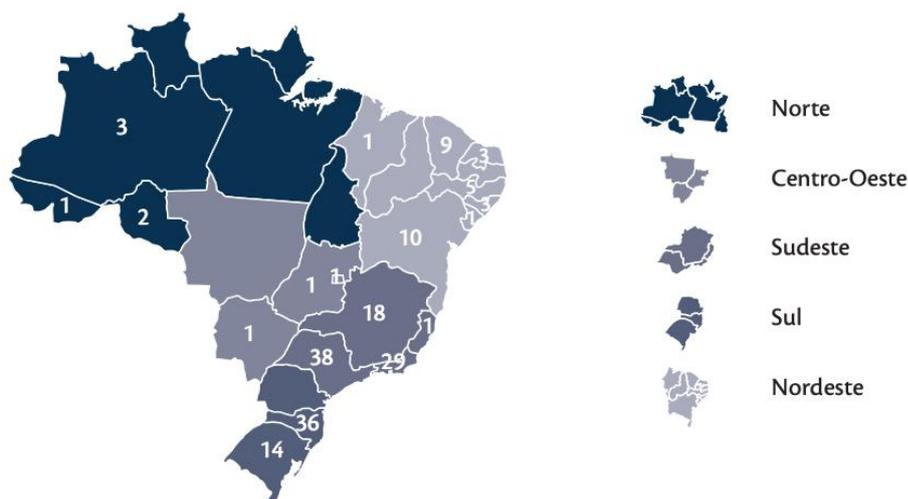
híbridos plugáveis, além de sistemas de carregamento e supervisão associados, telecomunicações para REIs, TIC para REI, incluindo sistemas de *BackOffice*, prédios e residências inteligentes e interação do consumidor com a REI, novos serviços para o consumidor final, como medição de serviços de água e gás, serviços de segurança, serviços de comunicação e serviços de eficiência energética, entre outros (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

Esses projetos existentes estão espalhados nas regiões sul, sudeste, norte e nordeste, principalmente. O projeto com maior número de consumidores, tendo no planejamento atual 400 mil participantes, é o projeto-piloto realizado pela LIGHT na Área Metropolitana do Rio de Janeiro (CEMIG, 2020).

O segundo projeto em número de consumidores atendidos foi realizado pela Eletropaulo, com 84 mil consumidores, envolvendo os municípios de Barueri, Vargem Grande e Caucaia do Norte. Outros projetos relevantes no país são o Cidade Inteligente Aquiraz, implementado pela Enel Distribuição Ceará em Fortaleza/CE, atendendo 19.000 consumidores, o Paraná *Smart Grid* da COPEL em Curitiba/PR que atende 10.000 consumidores, o Cidades do Futuro da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (Cemig), em Sete Lagoas/MG que atende 8.000 consumidores, o Parintins da Eletrobras Amazonas Energia em Parintins/AM que atende 5.000 consumidores e o projeto do Arquipélago de Fernando de Noronha desenvolvido pela Neoenergia Pernambuco na Ilha de Fernando de Noronha/PE atendendo 1.000 consumidores (CEMIG, 2020).

A 40 ilustra a distribuição regional e estadual dos projetos na área de REIs catalogados pela ANEEL. A concentração de recursos e número de projetos é maior na Região Sudeste do país, quando a análise é efetuada por unidade federativa, São Paulo e Santa Catarina lideram o número de projetos.

Figura 5 – Distribuição regional dos projetos catalogados pela ANEEL



Fonte: Gestão e Estudos Estratégicos (2012)

Observa-se que as principais ações realizadas pelas concessionárias de energia são focadas inicialmente na implantação da AMI e na inserção das micro-redes geradoras baseadas nas fontes eólica e solar fotovoltaica. As ações relacionadas com o desenvolvimento dos veículos elétricos, da reconfiguração automática da rede e dos novos serviços, tendem a ser enfatizadas posteriormente, facilitados pela plena implantação das etapas anteriores (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

As universidades e os centros de pesquisa brasileiros estão desenvolvendo projetos em diferentes áreas, como a de sistemas de comunicação para medidores, sistemas de gerenciamento de demanda, conversores para o acoplamento de geração renovável à rede elétrica e veículos elétricos. Observa-se que a Região Sudeste apresenta o maior número de projetos em universidades e são bem distribuídos por área de conhecimento. Enquanto na Região Sul, um terço dos projetos está concentrado na área de geração distribuída e micro-redes, no Nordeste metade dos projetos estão concentrados na área de automação da distribuição (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

Já as empresas, na maioria das vezes, trabalham em parceria com as concessionárias de energia nos grandes projetos de P&D, que atualmente é a principal fonte de investimento em redes inteligentes no Brasil. No Sudeste estão em torno de 70% das empresas atuantes no país, reflexo da quantidade de projetos e dos investimentos na região, que concentra 71% do investimento e aproximadamente 48% dos projetos. As empresas atuam principalmente nas áreas de geração distribuída e automação na distribuição. É importante também ressaltar o desenvolvimento de medidores intelligen-

tes, apesar de ser o quarto tema com maior número de empresas, foi o único tema que apresenta empresas em quatro regiões (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

Nota-se um déficit no que diz respeito às pesquisas relacionadas aos novos serviços para o consumidor final de energia, seguimento onde atuam principalmente as pequenas empresas. Os setores de carregamento de baterias e de veículos elétricos também são setores que apresentam uma pequena quantidade de empresas dedicadas, e as existentes estão concentradas na região sudeste do país (GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012).

Destaca-se também o Projeto Estratégico de P&D PROGRAMA BRASILEIRO DE REDE ELÉTRICA INTELIGENTE Chamada ANEEL n. 011/2010, o qual tem como objetivo realizar a migração tecnológica do setor elétrico brasileiro do estágio atual, para a adoção plena do conceito de REI em todo o país. Os cenários elaborados durante a pesquisa procuraram dar prioridade aos itens de carência imediata e aos que poderiam agregar maior valor ao processo de distribuição de energia elétrica. O projeto foi estruturado em 7 Blocos de Pesquisa (BP) com metodologias próprias, mas completamente integrados entre si, nomeados de:

- BP1: governança e Integração do Projeto;
- BP2: medição Inteligente;
- BP3: automação da Distribuição e da Transmissão;
- BP4: geração Distribuída; Armazenamento e Veículos Elétricos;
- BP5: TI e Telecom;
- BP6: políticas Públicas e Regulação;
- BP7: perspectiva do Consumidor.

O BP3, referente à Automação da Distribuição e da Transmissão, teve como foco as principais linhas de pesquisa para a definição de arquitetura, funcionalidades, tecnologias e cenários para a Automação da Distribuição no conceito de REI, avaliando também a infraestrutura informacional e de comunicação necessária.

Ao final do Projeto Estratégico 011/2010 foi gerada uma agenda de P&D em REI com sugestões de temas e tecnologias a serem desenvolvidas, dentre os temas estão: o desenvolvimento de ferramenta para a implantação de redes inteligentes em concessionárias; Código do Futuro automação, supervisão e telecomando inteligente; eficiência, perdas e fraudes; serviços públicos integrados pela rede de distribuição de energia elétrica; rede autogerenciadas (restabelecimento autógeno, perdas, reconfiguração); padrões de rede adequados para RI; desenvolvimento de algoritmos e sistemas computacionais para suporte aos processos da distribuidora a partir dos dados

adquiridos; desenvolvimento de integrações de sistemas legados e novos sistemas computacionais desenvolvidos em função da implantação de REI, entre outros.

Os projetos pilotos possuem um papel fundamental de fomentar a criação de diretivas de implantação das REIs, o desenvolvimento de arquiteturas conceituais, a comprovação prática de interoperabilidade entre as tecnologias, bem como a elaboração alternativas de segurança relacionadas às informações que provindas das redes (FILHO; FILHO; PINTO, 2016).

Em Santa Catarina, a CELESC investiu em 2020 cerca de R\$ 14,7 milhões em Pesquisa e Desenvolvimento, visando a continuidade de projetos nos temas de Mobilidade Elétrica, Robótica, Subestação, Geração Eólica, Mercado, Regulação, Meio Ambiente, Novos Materiais, entre outros. O tema destaque no estado é o início da ampliação do corredor de eletro postos para carregamento de veículos elétricos (CELESC, 2020).

O Projeto Eletroposto CELESC, esta sendo realizado através de uma parceria da CELESC D com a Fundação CERTI e com financiamento do programa de P&D da ANEEL para a difusão da mobilidade elétrica no Estado de Santa Catarina e no País, a empresa visa estabelecer uma infraestrutura Corredores elétricos de recarga veicular que englobe mais de 680 km de extensão cobertos com 8 estações de carregamento rápido e mais 22 estações semirrápidas em cidades de todas as regiões do Estado de Santa Catarina. O objetivo é a integração dos três estados da região Sul, abrindo caminho para a interligação ao nível Mercosul através da Argentina. Em 2021, foram investidos R\$ 938.368,33 em 23 novas estações de recarga. Sendo 18 semirrápidas e 5 rápidas (CELESC, 2021).

A CELESC passa pela diversificação da matriz energética com energia limpa. A empresa já está trilhando esse caminho através da implementação de usinas fotovoltaicas, mas ainda há muito espaço para diversificar e ficar menos refém de situações hídricas (CELESC, 2021).

Relacionado à *Smart Cities*, a CELESC vem desenvolvendo um projeto-piloto em Araranguá, que tem grande vínculo com o futuro da distribuição e que fez com que a empresa começasse a entender como operar novas tecnologias e os ganhos em relação às tecnologias atuais. Em julho de 2021, começou a ser desenvolvida, no município localizado no sul do Estado, a primeira cidade com medição inteligente de energia, projeto pioneiro que dá o primeiro passo para inserir o Estado de Santa Catarina no mapa das *Smart Cities*. Com investimento aproximado de R\$ 23 milhões, o projeto-piloto irá substituir medidores de energia convencionais por equipamentos inteligentes, que disponibilizam dados sobre a qualidade da energia que chega ao cliente, permitindo a melhor gestão do seu consumo e perdas, bem como a realização de alguns serviços comerciais de maneira remota, proporcionando a identificação instantânea de ocorrências na rede elétrica, dando mais agilidade aos atendimentos

(CELESC, 2021).

### 2.5.1 Motivadores

As principais motivações que o Brasil tem para a implantação das REIs são: a busca das eficiências comercial e energética, o aumento da confiabilidade do sistema elétrico nacional, a segurança operacional e sistêmica e a sustentabilidade econômica e ambiental (HECK *et al.*, 2021).

A eficiência comercial e energética seria alcançada através da redução de perdas técnicas e comerciais, na melhoria na qualidade da energia ofertada e do serviço prestado pelas distribuidoras ao consumidor e pela gestão do horário de consumo de energia pelo consumidor (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

A confiabilidade do sistema elétrico aumentaria com a interoperabilidade dos diversos componentes da rede e das subestações, da gestão de ativos e do planejamento da capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia. Já a segurança operacional e sistêmica pode ser atingida com o controle de acesso dos usuários de rede, da redução do uso de energia centralizada e das perdas por fraudes, bem como viabilizaria a geração distribuída e a gestão para contingências. Por fim, a sustentabilidade econômica e ambiental seria resultado da diversificação dos negócios, das fontes energéticas e das oportunidades para novos serviços de valor agregado ofertados pelas concessionárias (FILHO; FILHO; PINTO, 2016).

### 2.5.2 Desafios

Autores destacam os esforços do governo brasileiro para viabilizar a implantação de redes inteligentes desde 2008. Os principais desafios do país são reforçados por suas dimensões continentais que dificultariam a implantação de redes inteligentes em áreas remotas, como na Amazônia e áreas rurais (DRANKA; FERREIRA, 2020).

O problema das conexões ilegais, a necessidade de padronização de produtos e a falta de regulamentação no setor também são considerados barreiras adicionais à implantação de redes inteligentes, bem como uma maior atratividade financeira para a comercialização dos produtos e serviços relacionados (DRANKA; FERREIRA, 2020).

### 2.5.3 Aspectos Regulatórios

No Brasil, os principais atores responsáveis pela regulação são as agências ANEEL e Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel).

As primeiras iniciativas de regulamentação foram publicadas pela ANEEL, sendo elas a Resolução Normativa *n.º* 464 de novembro de 2011, que regulamenta o uso de tarifas diferentes por horário de consumo, a Resolução Normativa *n.º* 482 de abril de 2012, que define as condições gerais de acesso a micro e mini geração de eletri-

cidade e a Resolução Normativa n.º 502 de agosto de 2012, que definiu que em 18 meses, caso seja de interesse dos consumidores residenciais, à exceção daqueles pertencentes aos grupamentos de baixa renda, deverão ser instalados medidores inteligentes com as seguintes características mínimas: mensuração de energia ativa, a diferenciação tarifária em quatro postos (conhecida por tarifa branca), e a visualização, para o consumidor, por meio de mostrador no medidor ou em dispositivo interno à residência. Entretanto, esta resolução não versa pela obrigatoriedade de existência de um sistema de comunicação de dados nos medidores do grupo B (ANEEL, 2012b,a, 2011).

Também cabe destacar a Resolução Normativa n.º 687, de 24 de novembro de 2015, que alterou a Resolução Normativa n.º 482. De acordo com as novas regras, é permitido o uso de qualquer fonte renovável para geração de energia, além da cogeração qualificada, denominando-se micro-geração distribuída a central geradora com potência instalada até 75KW e mini-geração distribuída aquela com potência acima de 75KW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Como o investimento nas REIs não apresenta grande retorno financeiro para as distribuidoras nas condições regulatórias vigentes. As concessionárias indicam ser necessário definir legislações que permitam o equacionamento dos gastos envolvidos na implementação das REIs com o consumidor e o governo (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Também sugere-se uma alteração na regulação sobre os lucros envolvidos em novos negócios que envolvam as REIs. As normativas atuais só permitem que as concessionárias obtenham 10% dos ganhos na prestação de serviços diferentes da comercialização de energia. Alterando-se esta regra, seria possível tornar mais atrativa a prestação de serviços que agreguem valor, como a venda de serviços de medição para outros serviços públicos (por exemplo, água e gás) auxiliando no financiamento da implantação destas redes (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Conforme a regulamentação da ANEEL, as distribuidoras de energia tem como obrigação legal a realização de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias, soluções e oportunidades. No estado de Santa Catarina, a CELESC realiza chamadas públicas de projetos com o objetivo de identificar problemas, desafios tecnológicos, oportunidades e soluções para o setor de distribuição de energia. Cabe destacar a Chamada Pública P&D CELESC n.º 002/2019 que entre as linhas temáticas específicas e chamadas de desafios, incluiu os temas: automatização do processo de medição; novos equipamentos e soluções; novas configurações e sistemas de geração de energia com fontes alternativas; soluções com comunicação integrada e de baixíssimo custo e consumo para medição de grandezas elétricas em transformadores de baixa tensão; monitoramento

inteligente do sistema elétrico de distribuição; desenvolvimento de soluções em mobilidade elétrica eficiente; *Smart City*; entre outros. Como visto, os assuntos de interesse da distribuidora catarinense para desenvolvimento de projetos estão estritamente relacionados com os temas que permeiam as REIs (CELESCDistribuiçãoS.A.2020; CELESCDistribuiçãoS.A.2019).

A implantação dos *Smart Meters* é considerada um passo fundamental para a implantação de redes inteligentes no país a fim de viabilizar a implantação do sistema de Tarifa Horária Branca. A ANEEL editou a RN n.º 502/2012 ANEEL (2012b) que regulamenta os sistemas de medição de energia para consumidores do grupo B (consumidores de eletricidade doméstica). Dois tipos de medidores inteligentes foram propostos pela ANEEL. O primeiro é direcionado para os consumidores que optaram pelo esquema da tarifa branca. Neste caso, o contador inteligente deve ser instalado sem custos iniciais para os consumidores. O outro tipo de *Smart Meter* apresenta funcionalidades adicionais e permite o acesso a informações específicas aos consumidores. Os consumidores que optarem por este último medidor inteligente deverão pagar uma diferença de preço entre este e o primeiro ANEEL (2012b). A implantação do *Smart Meter* é considerada um importante facilitador para a adoção de novas tarifas como, por exemplo, *Time-Of-Use* (TOU), *Critical Peak Pricing* (CPP) e *Real-Time Pricing* (RTP). As tarifas TOU já foram implementadas no mercado brasileiro de eletricidade (Tarifa Horária Branca). No entanto, CPP e RTP ainda não foram implementados no mercado brasileiro de eletricidade (DRANKA; FERREIRA, 2020).

O crescimento da influência da IoT em todo o mundo estimulou o governo brasileiro a implementar sua primeira regulamentação sobre esse importante tema por meio da Lei 9.854/2019, que estabeleceu o plano nacional de IoT no país. Esta regulamentação está focada primeiramente nos setores da indústria, cidade, saúde e rural. É importante destacar que essas ações de IoT devem ser desenvolvidas de acordo com as diretrizes apresentadas pelo Decreto 9.319/2018, que apresenta as estratégias brasileiras para sua transformação digital e destaca o setor de energia como um dos principais pilares da regulação IoT (BRASIL, 2019, 2018).

Atualmente as soluções de telemedição por meio aéreo para REIs não utilizam uma frequência regulada específica. Por trabalharem com frequências abertas, à medida que o número de dispositivos conectados aumentarem, aumentam também os riscos de interferência e ruídos nos sinais, tornando necessária uma nova regulamentação e estabelecimento de uma frequência específica para as REIs (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

#### 2.5.4 Aspectos Tecnológicos

É importante salientar que os benefícios proporcionados pelas REIs poderão ser plenamente usufruídos somente após a superação das dificuldades e dos desafios

intrínsecos ao desenvolvimento, da implantação e da operação das redes.

Os principais desafios no Brasil para a implementação das REIs estão relacionados com o desenvolvimento de um modelo para o mercado que torna a REI viável, o estabelecimento de padrões de interoperabilidade e de segurança de equipamentos e sistemas, o desenvolvimento de novos equipamentos, sistemas de comunicação e aplicações de *software* para suporte às funcionalidades requeridas e a promoção da segurança, por meio de mecanismos de proteção e de controle da privacidade dos dados de consumo trafegados na rede. O país também necessita ganhar experiência com projetos de tecnologia de informações e comunicação em larga escala, obter velocidade de desenvolvimento de tecnologias, promover a interação e o envolvimento dos consumidores, com o objetivo de construir consciência e consenso sobre a importância das REIs e também promover políticas de ciências, tecnologias e inovação de forma promover tecnologias nacionais, infraestrutura de pesquisa e a formação de profissionais qualificados (HECK *et al.*, 2021).

Outros desafios estão relacionados com os investimentos em redes inteligentes, pois ainda apresentam um alto risco cambial. Devido boa parte de seus componentes e equipamentos serem importados, os investimentos em redes inteligentes ficam condicionados às variações cambiais (PEREIRA; WEISS, 2017).

Por isso surgem oportunidades para inovações locais. Principalmente em áreas como *software*, telecomunicações, segurança, automação de rede e dispositivos para micro-geração, automação residencial, iluminação eficiente, veículos elétricos, armazenamento de energia, entre outros, há um conjunto amplo de inovações que deverão ser desenvolvidas para o atendimento do ritmo de adesão e conhecimento dos consumidores e demais atores ligados às REIs (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Outro entrave identificado comumente relacionado aos investimentos nas redes inteligentes é a rápida obsolescência dos equipamentos. Devido a tecnologia de medição estar em processo de desenvolvimento e melhoramentos, um equipamento instalado, pode se mostrar obsoleto em termos de funcionalidades e desempenho em um curto prazo. Como exemplo pode-se citar a Itália, um dos primeiros países a fazer a adoção massiva de medidores inteligentes, a atualmente já existem dispositivos mais eficientes que os instalados no país (PEREIRA; WEISS, 2017).

Visto isso, muitas distribuidoras de energia no país ainda preferem aguardar modernizarem a sua rede quando as tecnologias já estiverem consolidadas e assim não arcar com o possível custo do pioneirismo (PEREIRA; WEISS, 2017).

## 2.6 CONCLUSÃO

O cenário de desenvolvimento atual vem exigindo uma rede elétrica moderna e inteligente. Para que as novas demandas sejam atendidas no setor, a indústria vem desenvolvendo tecnologias que aumentam eficiência, a confiabilidade, a segurança

e a qualidade dos serviços energéticos. Esta nova modalidade de infraestrutura de energia é conhecida como Rede Elétrica Inteligente (REI). Como visto no decorrer deste capítulo, as REIs possuem diversas definições e seu conceito é amplo, mas de uma forma geral, é o termo mais recente usado para descrever as instalações de comunicação e controle integradas à rede convencional.

A implementação das REIs podem acarretar inúmeros benefícios para o sistema elétrico. Entre eles se destacam a possibilidade de monitoramento do fluxo de energia na rede, assim como a disponibilidade de informações sobre a qualidade do serviço. A REI também se torna menos vulnerável as interrupções e falhas, minimiza seus impactos e se recupera de maneira mais eficaz. Em síntese, este novo modelo de rede elétrica visa otimizar a produção, a distribuição e o consumo de energia, promovendo melhorias no monitoramento, na gestão, automação e na qualidade da energia elétrica ofertada.

A estrutura das REIs pode ser dividida em diferentes áreas, sendo elas: componentes avançados, medição, automação, telecomunicação e *Software*. Os componentes avançados são os sistemas que promovem a geração distribuída, os dispositivos de monitoramento da energia e os aplicativos de gestão. Também incluem-se os eletrodomésticos inteligentes e as infraestruturas relacionadas aos veículos elétricos. Nos elementos de medição incluem-se os *smart meters*, sensores, servidores e concentradores. Já os controladores digitais, sensores, relés, fasores e equipamentos de proteção são elementos de automação. Na área de telecomunicação estão os dispositivos que promovem a transferência de dados e informações, além de dispositivos de rede, como roteadores, *switches*, servidores, entre outros. Por fim, os *Softwares* utilizados em REIs podem ser de gestão de medição, gestão de rede, analíticos, bancos de dados, etc. Entre os *Softwares* mais utilizados estacam-se os de gestão de rede SCADA, ADMS e Sistema de Informação Geográfica (GIS), e de medição, destaca-se o Mobile Device Management (MDM).

Os principais motivadores para a implementação das REIs se diferem em cada país, como pode ser observado na 3. De uma forma geral, os motivadores estão relacionados com a integração da geração distribuída na rede atual, a implementação de cidades inteligentes e de veículos elétricos, a renovação de infraestruturas obsoletas e o aumento da confiabilidade, eficiência e segurança do sistema. Percebe-se que a maior parte das iniciativas de implementação de REIs estão em países da Europa, no Estados Unidos da América, Canadá e no Japão, como visto, a maioria dos países que desenvolve tecnologia já possuem metas e iniciaram a implantação em massa de dispositivos que compõem as REIs.

No Brasil, os principais motivadores estão relacionados com a busca da eficiência do serviço de fornecimento de energia, incluindo o aumento da confiabilidade do sistema, a segurança e a sustentabilidade econômica e ambiental. A maior parte

das iniciativas estão concentradas nas regiões sul e sudeste, e os principais temas abordados pelos projetos são os sistemas de medição inteligente e na inserção de micro-redes baseadas em geração eólica e solar. Entre os desafios para a implementação das REIs no Brasil estão a falta de regulamentação no setor, como exemplo, a não existência de uma frequência de comunicação regulada específica para as soluções de telemedição.

Tabela 3 – Tabela comparativa das REIs, com ponto de foco e motivação de diferentes países

País	Políticas	Foco	Motivação
EUA	Lei de Independência e Segurança Energética de 2007; Lei Americana de Recuperação e Reinvestimento de 2009; Política de Energia Segura para o Futuro 2011.	Independência e segurança energética, geração de energia, proteção ao consumidor, melhoria da eficiência de produtos, edifícios e veículos. Aumentar, promover a pesquisa e implantação do meio de captura e armazenamento de gases de efeito estufa e melhorar o desempenho energético nacional; Energia e Estrangeira Fornecem Fontes e Fontes de Energia Privilegiada Local para reduzir a dependência de fontes de energia para reduzir o custo e o uso da maneira acessível e pesquisar e desenvolver tecnologias limpas aos clientes para alcançar o futuro da energia.	Crise energética na Califórnia no início dos anos 2000; Apagão no Nordeste em 2003; Super tempestade Sandy em 2012.

*Continua na próxima página*

Tabela 3 -Continuação da tabela

País	Políticas	Foco	Motivação
Europa	Políticas da UE, Comissão das Comunidades Europeias em 2007; Os objetivos de <i>Smart Grid</i> na UE (Comissão Europeia em abril de 2010);	<p>Fornecer uma abordagem centrada no usuário e novos serviços para entrar no mercado;</p> <p>Estabelecer <i>drivers</i> inovadores e econômicos para a renovação da rede elétrica;</p> <p>Criar mercado liberalizado e valorizar a concorrência;</p> <p>Manter o fornecimento seguro e garantir a integridade e a interoperabilidade;</p> <p>Permitir a utilização de gerações de energia renovável e a melhor utilização da geração centralizada;</p> <p>Considerar o impacto adequado das limitações ambientais e aspectos sociais;</p> <p>Capacitar a cooperação do lado da demanda.</p>	<p>Avanço nas operações e eficiência dos mercados internos de energia europeus;</p> <p>Manter e melhorar a qualidade e a segurança do abastecimento;</p> <p>Combater as mudanças climáticas e apoiar o Protocolo de Kyoto incluindo outros compromissos.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 -Continuação da tabela

País	Políticas	Foco	Motivação
Coreia do Sul	Roteiro de <i>Smart Grid</i> da Coreia 2030;	<p>Desenvolvimento de sistema de monitoramento e controle da rede elétrica;</p> <p>Rede de energia autorregenerativa;</p> <p>Introduzir medidores inteligentes para as casas coreanas;</p> <p>Sistema inteligente de gerenciamento de energia;</p> <p>Estabelecer instalações de carregamento em todo o país e sistema operacional de veículos elétricos baseado em TIC;</p> <p>Desenvolver um sistema de armazenamento de energia em larga escala;</p> <p>Desenvolver um sistema inteligente de preços e comércio de eletricidade.</p>	<p>Estabelecer <i>Smart Grid</i> em todo o país até 2030;</p> <p>10% de integração energética com fontes renováveis até 2022.</p>
Austrália	Padrões e legislação para Redes Inteligentes	<p>Estabelecer <i>Smart Grid</i> em todo o país até 2030;</p> <p>Padrões básicos, como protocolos de segurança de dados, protocolos de comunicação e interconexão, e demais aspectos voltados à rede inteligente;</p> <p>Estabelecer <i>Smart Grid</i> em todo o país até 2030;</p> <p>Apoiar ações de fundação, como operação de micro redes, segurança do sistema, conexão de micro redes à rede elétrica nacional, automação do sistema de distribuição e protocolos Sistema de Informações Gerenciais (SIG) para redes inteligentes.</p>	<p>Implantação de medidores inteligentes após escassez de energia em 2006 e 2007;</p> <p>20% de integração energética com fontes renováveis até 2020;</p> <p>Estabelecer regulação de demanda e tarifas de tempo de uso.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 -Continuação da tabela

País	Políticas	Foco	Motivação
Canadá	O desenvolvimento de políticas em dois níveis (Federal e Provincial) está em andamento pelas autoridades reguladoras de ambos os níveis.	-Infraestrutura de medição avançada; Desenvolvimento de redes <i>self-healing</i> ; Desenvolvimento de micro redes; Gerenciamento de resposta à demanda; Estrutura de taxas múltiplas ou preços por tempo de uso; Controle de tensão e potência reativa.	-Introdução da legislação de energia limpa; Programa de tarifa <i>Feed-in</i> , a qual é uma política pública voltada a incentivar a adoção de fontes de energia renováveis. Consiste no pagamento de tarifas para as unidades geradoras que utilizam meios alternativos de produção energética.
Japão	-O Plano Estratégico de Energia do Japão: política (3E+S).	Investimento em rede inteligente <i>Last Mile</i> ; Gerenciamento de energia pelo próprio consumidor; Energia solar residencial; Integração de mais fontes de energia renováveis; Foco no consumidor.	Construir uma sociedade de baixa emissão de carbono; Atingir independência energética em 70%; Desenvolvimento tecnológico.
China	12 <sup>o</sup> Plano Quinquenal de Desenvolvimento Econômico e Social Nacional; Decisão do Conselho de Estado sobre a Aceleração do Fomento e Desenvolvimento de Indústrias Estratégicas Emergentes.	Política e padronização; Fortalecer o planejamento das redes inteligentes; Acelerar a construção de redes inteligentes; Reduzir o crescimento da emissão de Gases de efeito estufa; Melhorar o mecanismo de precificação de energia; Melhorar a utilização de ativos de rede.	Segurança no fornecimento; Redes de distribuição inteligentes com sensores avançados e tecnologias de controle.

Continua na próxima página

Tabela 3 -Continuação da tabela

<b>País</b>	<b>Políticas</b>	<b>Foco</b>	<b>Motivação</b>
Alema- nha	Roteiro alemão e- <i>energy/smart grids 2.0</i>	<p>Padronização dos requisitos ale- mães para redes inteligentes;</p> <p>Gerenciamento do sistema de energia;</p> <p>Armazenamento de energia e ge- rações distribuídas;</p> <p>Segurança e proteção;</p> <p>Tecnologias para sistemas de ener- gia e automação residencial;</p>	<p>Criar futura rede de energia sustentável;</p> <p>Estabelecer uma in- fraestrutura de energia mais verde.</p>

*Continua na próxima página*

Tabela 3 -Continuação da tabela

País	Políticas	Foco	Motivação
Brasil	Sistema de Bandeira Tarifária (RN nº 547/2013);	Obter eficiência comercial e energética por meio da redução de perdas técnicas e comerciais, melhoria na qualidade da energia ofertada e gestão do horário de consumo;	Busca por maior eficiência operacional; Existem políticas de inovação e fontes de financiamento existentes (P&D, ANEEL, BNDES, Finep) e apoio institucional; País amplo geográfica, climática, sócio e culturalmente, apresenta barreiras especiais que representam um desafio a ser superado, mas constitui uma oportunidade para inovações locais; Reduzir as perdas técnicas e comerciais (fraudes); Melhorar o planejamento da expansão da rede.
	Tarifa Hora Branca (RN nº 733/2016);	Aumentar a confiabilidade do sistema elétrico com a interoperabilidade entre os componentes da rede e as subestações, gestão de ativos e do planejamento da capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia;	
	Pré-pagamento de Eletricidade (RN nº 610/2014);	Garantir a segurança operacional e sistêmica por meio do controle de acesso dos usuários de rede, da redução de energia não distribuída e das perdas por fraudes, bem como viabilizar a geração distribuída e a gestão para contingências e auto recomposição;	
	Medição inteligente (RN nº 502/2012);	Promover sustentabilidade econômica e ambiental através da diversificação dos negócios e das oportunidades para novos serviços ofertados pelas concessionárias, tais como a recente regulamentação do <i>net metering</i> (uma forma de inserção de geração distribuída na qual os consumidores de energia, ao instalarem equipamentos de micro e mini geração podem trocar com as concessionárias de energia os montantes de energia) e o uso de veículos elétricos e híbridos conectados às redes.	
	Geração Distribuída (RN nº 482/2012 e RN nº 687/2015);		
	Projeto Estratégico de P&D PROGRAMA BRASILEIRO DE REDE ELÉTRICA INTELIGENTE Chamada ANEEL nº 011/2010.		

Fonte: **eletricas2012**; Al-Badi *et al.* (2020), Rivera, Esposito e Teixeira (2013), Energia Elétrica (2013), ANEEL (2012a, 2015) e Energia Elétrica (2012, 2014, 2016)

Embora tenha havido alguns avanços na estrutura regulatória brasileira, muitas lacunas ainda são uma barreira para o desenvolvimento de redes inteligentes. Estudos futuros devem medir a propensão do consumidor a adotar medidores inteligentes em edifícios residenciais e investigar as percepções e comportamentos dos consumidores de energia elétrica em relação à potencial implantação de medidores inteligentes no setor elétrico brasileiro. A falta de um modelo de mercado viável, que estabeleça padrões de interoperabilidade e de segurança, e comunicação em larga escala, também são desafios a serem enfrentados no país.

O próximo capítulo descreverá, em linhas gerais, o sistema elétrico brasileiro, e apresentará as características do sistema elétrico de potência do estado de Santa Catarina, local de desenvolvimento deste trabalho. Espera-se que presente capítulo tenha contribuído para melhor entendimento do tema das Redes Elétricas inteligentes, apresentando diferentes aspectos relacionados ao tema em questão.

### 3 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso vital para a sociedade moderna, influenciando a competitividade entre os países e afetando diretamente a qualidade de vida das pessoas. Desde a revolução industrial, a demanda por energia elétrica vem aumentando em todo o mundo, inclusive no Brasil, o que levou ao desenvolvimento e evolução do Sistema Elétrico Brasileiro.

Antes da primeira metade do século XX, o sistema era composto por sistemas isolados e independentes que atendiam apenas os principais centros urbanos. Nessa época, a indústria de eletricidade no Brasil era majoritariamente exercida pelo capital privado, e empresas como Light, Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), Cemig, Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e *General Electric* (GE) foram instaladas e continuam a participar ativamente do mercado elétrico até hoje.

Com o passar do tempo, houve uma maior regulamentação das atividades do setor elétrico, e a criação de leis para controlar o uso de fontes de energia. Hoje, a energia elétrica é essencial para o funcionamento de diversos setores da economia e para a qualidade de vida da população em geral.

O setor elétrico continua evoluindo e se adaptando às novas tecnologias e demandas da sociedade, como a geração de energia limpa e renovável, a eficiência energética e a modernização da infraestrutura elétrica. Nesse contexto, é importante entender a história e as características do Sistema Elétrico Brasileiro para compreender melhor as mudanças e desafios enfrentados pelo setor (ALMEIDA, 2008; CACHAPUZ, 2003).

Já os anos entre 1950 e 1980 foram marcados pela intervenção intensa do Estado através da criação de empresas, agentes reguladores e financiamentos para empreendimentos de geração de energia, a fim de buscar a estruturação do setor elétrico. A partir da década de 90 até os dias de hoje o governo deixou, em grande parte, o papel de executor dos serviços para ter a função de regulador do mercado (ALMEIDA, 2008).

Atualmente o sistema elétrico brasileiro é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, onde usinas hidrelétricas de múltiplos proprietários predominam. Para geração e transmissão o país conta com um sistema principal composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição, o Sistema Interligado Nacional (SIN). Esta grande "malha elétrica" abrange a maior parte do território brasileiro, constituída por conexões realizadas ao longo do tempo e de instalações inicialmente restritas ao atendimento exclusivo das regiões de origem: Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Além disso, há diversos sistemas de menor porte, não-conectados ao SIN, chamados de Sistemas Isolados, que se concentram prin-

principalmente na região Amazônica, no Norte do país (ONS, 2020a).

O presente capítulo abordará o sistema elétrico brasileiro, descrevendo tecnicamente o sistema elétrico de potência nacional e seus componentes: geração, transmissão e distribuição, dando maior ênfase na rede de distribuição de energia no país e seus sistemas de proteção. Será discutido também o sistema de distribuição de energia elétrica no estado de Santa Catarina, com maior destaque à região oeste do estado, a qual é foco do trabalho.

### 3.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os Sistemas Elétricos de Potência são formados por geradores, transformadores, elevadores/abaixadores, linhas de transmissão e pelos alimentadores de distribuição. Estes componentes podem ser divididos em três grandes blocos, sendo eles: geração, transmissão e distribuição. Sua função é fornecer energia elétrica aos consumidores, com a qualidade adequada e no instante em que for solicitada. Ou seja, o sistema tem funções de produtor no setor da geração, transformando energia de alguma natureza (hidráulica, térmica, mecânica, entre outras) em energia elétrica e funções de distribuidor, entregando aos usuários a quantidade de energia demandada a cada instante (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

Ainda não sendo possível de forma prática e eficiente o armazenamento da energia, o sistema elétrico deve contar com uma capacidade de produção e transporte que atenda a demanda em um determinado tempo. Deve-se então dispor de dispositivos de controle da produção e da distribuição, a fim de comprovar que em cada instante seja produzida e entregue a energia necessária para o atendimento à demanda, considerando as perdas na produção e no transporte (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

O Brasil possui no total 8.946 empreendimentos em operação, totalizando 185.245.088 kW de potência instalada. Além disso, está prevista uma adição de 86.206,59 MW na capacidade de geração nos próximos 6 anos, esta produção será proveniente dos 396 empreendimentos em construção e mais 1688 em empreendimentos com construção ainda não iniciada (ANEEL, 2022b).

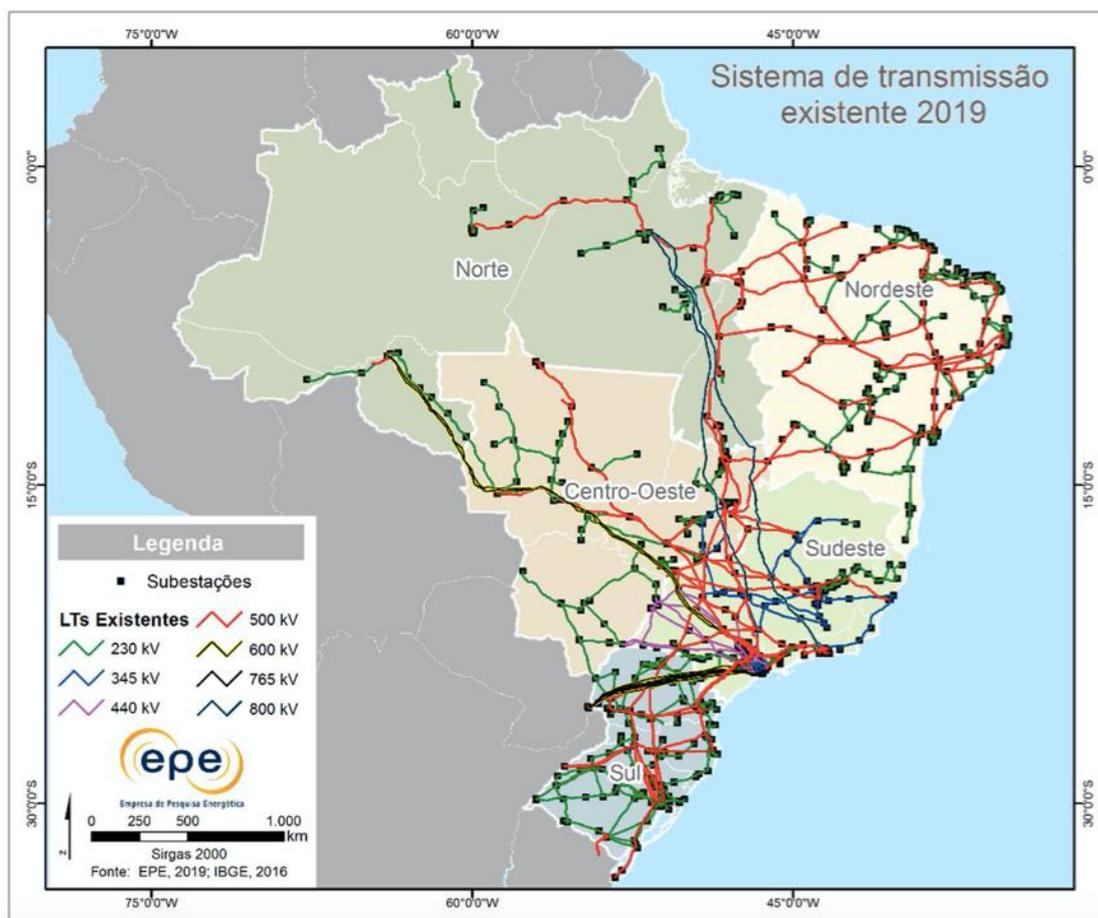
O potencial de geração hídrica é bastante relevante, cerca de 66,6% da energia é produzida através da transformação de energia cinética hidráulica em elétrica. Estes geradores de eletricidade necessitam de energia mecânica para ocorrer o giro dos rotores das turbinas, nos quais estão acoplados no mesmo eixo, os rotores dos geradores de eletricidade. Então a geração de energia em usinas hidrelétricas necessita de uma turbina e um gerador síncrono. Estando estas centrais geradoras comumente longe dos centros de consumo, é imprescindível a existência de um elemento de interligação entre ambos, a rede de transmissão (BRASIL; MME; EPE, 2019; CREDER, 2007; KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

As redes de transmissão permitem transferências entre os blocos de energia para o atendimento das regiões em situações conjunturais desfavoráveis, enquanto outras se encontram em períodos de boas afluências. Essas interconexões funcionam como reservatórios virtuais, onde a água presente em uma bacia pode ser transferida, em forma de energia elétrica, através das linhas de transmissão, para utilização no atendimento à demanda de outra região, evitando a redução excessiva dos reservatórios (HERMES TRIGO DIAS DA SILVA, 2012).

No Brasil, a Rede Básica de transmissão do SIN compreende as tensões de 230 kV a 800 kV. Sua função compreende a transmissão da energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga; a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede; a interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica; e a integração energética com os países vizinhos (EPE; MME, 2019).

Devido ao montante das potências e das distâncias percorridas, para que a transmissão da energia gerada se torne viável torna-se necessária a elevação do valor da tensão para o transporte, este novo valor de tensão é chamado de tensão de transmissão. As padronizações mais usuais em corrente alternada para as linhas de transmissão são: 69kV, 138 kV, 230 kV, 400 kV e 500 kV. Acima de 500 kV, necessita-se de estudos econômicos comparativos entre o uso de corrente alternada ou contínua (CREDER, 2007; KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

Figura 6 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional em Operação 2019



Fonte: EPE, 2019

No Brasil, as redes de energia são classificadas de acordo com a classe de tensão que transportam: A1 tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; A2 tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV, A3 tensão de fornecimento de 69 kV. A classe A1 representa o sistema de transmissão interligado, mais conhecido como SIN. A rede básica do SIN possui mais de 100 mil quilômetros de linhas de transmissão que distribuem a energia elétrica ao longo do país. As classes A2 e A3 são as redes de subtransmissão, administradas por empresas de distribuição que operam com tensões de 69 a 138 kV (ANEEL, 2020b).

### 3.2.1 Distribuição

O sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil é regulamentado pelas resoluções elaboradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, as quais, no que lhe concerne, se orientam pelas diretrizes estabelecidas nas leis aprovadas pelo congresso Nacional e nos decretos estabelecidos pelo Executivo Federal (ANEEL,

2021).

A ANEEL através das normas elaboradas no Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), também é responsável por acompanhar os serviços prestados pela distribuidora através de indicadores de qualidade, como: DEC, FEC, Duração Individual de Interrupção (DIC), Frequência Individual de Interrupção (FIC) e Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC) (ANEEL, 2021).

DEC duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, que indica o intervalo de tempo, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora do conjunto considerado, no período de apuração, em horas;

FEC frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, que indica o número de vezes, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora do conjunto considerado, no período de apuração;

DIC duração de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o intervalo de tempo em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração, em horas;

FIC frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o número de vezes em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração;

DMIC duração máxima de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o intervalo de tempo máximo em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração, em horas.

As distribuidoras tem como objetivo manter estes indicadores sempre dentro das metas estabelecidas pela ANEEL, evitando assim multas e o ressarcimento aos consumidores.

A distribuição se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão, à conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica aos grandes, médios e pequenos consumidores. A distribuição é a parte do sistema elétrico já nos centros de utilização, como cidades, bairros e indústrias (CREDER, 2007).

Chegando nos centros de consumo, encontra-se uma grande diversidade no montante de potência demandada pelos consumidores. A variável é da ordem de centenas de  $W$  até centenas de  $MW$ , tornando inviável a entrega da energia para todos os usuários na tensão de transmissão. Portanto, necessita-se do abaixamento do ní-

vel de tensão para um valor compatível com a demanda dos grandes consumidores, como grandes instalações industriais e estações de tratamento e bombeamento de água, chamada tensão de sub transmissão (138 kV ou 69 kV ou, raramente em 34,5 kV), mais conhecida como alta tensão. Este abaixamento ocorre nas subestações de sub transmissão, as quais são supridas pelas linhas de transmissão e alimentam as linhas trifásicas de alta tensão (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

O sistema de sub transmissão pode operar em configuração radial, a fim de haver transferência de blocos de carga em casos de contingências, e também em malha, porém neste formato a rede necessita de cuidados especiais relacionados a sistemas de proteção.

### 3.2.1.1 Distribuição Primária

Após o primeiro abaixamento ocorrido nas subestações de sub transmissão, a tensão de sub transmissão sofre mais um abaixamento, este em função das características dos pequenos e médios consumidores. Este processo ocorre nas subestações conhecidas como abaixadoras ou de distribuição, estas são responsáveis pelo abaixamento no nível de tensão de sub transmissão para o nível de tensão primária ou média tensão (13,8 kV e 34,5 kV). A rede de distribuição primária supre os transformadores de distribuição, dos quais, por fim, se deriva a rede de distribuição secundária, conhecida como rede de baixa tensão ou tensão secundária (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015; CREDER, 2007).

O sistema de distribuição é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos operando em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV). Este sistema opera, em caso de rede aérea, radialmente, possibilitando a transferência de blocos de carga entre os circuitos para o atendimento da operação em condições de falta e manutenção corretiva ou preventiva (ANEEL, 2020b; KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

As redes de distribuição primária (ou média tensão), suprem aos consumidores primários e os transformadores de distribuição, conhecidas como estações transformadoras Estações Transformadoras (ETs). Estas redes empregam condutores de seção de 336,4 MCM, os quais permitem na tensão de 13,8 kV o transporte de potência máxima de 12 MVA, entretanto, visto a necessidade de transferência entre os blocos de carga entre os alimentadores, a rede se limita a cerca de 8 MVA. Esta rede pode ser aérea ou subterrânea, para as redes aéreas os arranjos mais comuns são a rede primária radial com socorro e a rede aérea radial seletiva. Já as redes subterrâneas podem ser primário seletivo, primário operando em malha aberta ou *spot network* (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015; ANEEL, 2020a).

As redes primárias radiais são constituídas de postes de concreto ou madeira

tratada, os quais possuem em seu topo a cruzeta na qual são fixados os isoladores de pino. Geralmente são utilizados condutores de alumínio com alma de aço, ou sem alma de aço, nus ou protegidos. Estas redes contam com um tronco principal do qual se derivam ramais, os quais são usualmente protegidos por fusíveis. Dispõem de chaves de seccionamento, que operam na condição normal fechadas, chaves normalmente fechadas, NF, que se destinam a isolar blocos de carga, para permitir sua manutenção corretiva ou preventiva. É comum a instalação em um mesmo circuito ou entre circuitos diferentes, chaves que operam abertas, chaves normalmente abertas, NA, as quais podem ser fechadas em manobras de transferência de carga (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

Nas redes primárias seletivas, as quais se aplicam a redes aéreas e subterrâneas, a linha é construída em circuito duplo e os consumidores são ligados a ambos por chaves de transferência, isto é, chaves que, na condição de operação normal, conectam o consumidor a um dos circuitos e, em emergência, transferem-no para o outro. Estas chaves usualmente são de transferência automática, contando com relés que detectam a existência de tensão nula em seus terminais, verificam a inexistência de defeito na rede do consumidor, e comandam o motor de operação da chave, transferindo automaticamente o consumidor para o outro circuito (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

As redes que possuem arranjo primário operando em malha aberta possuem um custo mais elevado comparado às redes primárias seletivas, é aplicada em regiões de altas densidades de carga e com grandes consumidores. Os consumidores são agrupados em barramentos que contam com dois disjuntores em suas extremidades e o alimentador, que se deriva de duas subestações diferentes ou de dois disjuntores da mesma Subestação (SE) e está seccionado através de um disjuntor operando em aberto na condição normal. Este sistema apresenta um sistema de proteção mais sofisticado, operando em sua condição normal com 50% da sua capacidade (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

Nas redes subterrâneas com arranjo *spot network*, cada transformador de distribuição com potência nominal de 0,5 a 2 MVA, é alimentado por dois ou três circuitos. Estes circuitos podem derivar-se de uma subestação ou de subestações distintas. No barramento paralelo destas redes e nos transformadores a existência de uma chave especial, a *Network protector* (NP), a qual impede o fluxo de potência no sentido inverso. Em caso de curto-circuito, todos os NP são percorridos por corrente em sentido inverso, logo, irão abrir isolando-se após a abertura do disjuntor da SE, e as cargas do sistema serão alimentadas por outro circuito. A confiabilidade deste sistema é muito elevada, mas seu custo muito alto, utilizada somente em áreas com grande densidade de carga. Este tipo de arranjo foi utilizado no Plano Piloto de Brasília, contando com dois e três circuitos derivados de subestações diferentes (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA,

2015).

As redes de distribuição primária e secundária normalmente são trifásicas, e as ligações aos consumidores são estabelecidas de acordo com a sua carga, podendo ser monofásicas (2 condutores até 4 KW), bifásicas (3 condutores entre 4 e 8 KW) ou trifásica (3 ou 4 condutores maior que 8 KW). Entretanto, em algumas concessionárias existem tolerância entre 8 e 15 kW para ligação bifásica, porém acima de 15 kW somente ligação trifásica. Entre os consumidores primários, alimentados pela rede primária, estão as indústrias de porte médio, conjuntos comerciais (*shopping centers*), iluminação pública, entre outros (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015; CREDER, 2007).

### 3.2.1.2 Distribuição Secundária

No Brasil a distribuição secundária está padronizada em 220/127 V e 380/220 V, havendo predomínio de 220/127 V no sudeste e sul e de 380/220 V no restante do país. As estações transformadoras (ETs), são compostas por transformadores responsáveis por baixar a tensão primária para o suprimento das redes secundárias, ou de baixa tensão. Usualmente são utilizados transformadores trifásicos, com resfriamento a óleo, com enrolamentos do primário ligados em triângulo e os do secundário em estrela, com centro estrela aterrado. Em alguns sistemas são utilizados transformadores monofásicos e bancos de transformadores monofásicos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015; CREDER, 2007).

Como visto, das ETs se derivam as redes secundárias, as quais podem ser radiais ou construídas como uma malha. Normalmente essas redes são inicialmente construídas em malha. À medida que as cargas crescem, a rede é dividida em duas, com a colocação de outro transformador de distribuição. Nesse caso, a rede secundária em malha é transformada em duas redes radiais (ANEEL, 2020a).

As redes secundárias suprem os consumidores de baixa tensão, principalmente residências, além de pequenos comércios e indústrias, seu comprimento pode ser da ordem de centenas de metros. Esta rede usualmente não conta com recursos para o atendimento de contingências (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015; CREDER, 2007).

A concessão e permissão são certamente as mais importantes formas prestação de serviço público. A Lei 8.987, art. 2<sup>o</sup>, apresenta as seguintes definições para a concessão de serviço público a delegação de sua prestação, feita pelo poder concedente, mediante licitação, na modalidade de concorrência, à pessoa jurídica ou consórcio de empresas que demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco e por prazo determinado. Já a permissão de serviço público é a delegação, a título precário, mediante licitação, da prestação de serviços públicos, feita pelo poder concedente à pessoa física ou jurídica que demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco (BRASIL, 1995).

Atualmente, a energia elétrica no Brasil é distribuída através de 105 distribui-

Tabela 4 – Resumo das tensões usuais em sistemas de potência.

Tensão (kV)		Campo de aplicação	Área do sistema de potência
<b>Padronizada</b>	<b>Existente</b>		
0,220/0,127	0,110	Distribuição secundária (BT)	Distribuição
0,380/0,220	0,230/0,115	Distribuição secundária (BT)	Distribuição
13,8	11,9	Distribuição primária (MT)	Distribuição
34,5	22,5	Distribuição primária (MT)	Distribuição
34,5	88,0	Subtransmissão (AT)	Distribuição
69,0	88,00	Subtransmissão (AT)	Distribuição
138,0	88,00	Subtransmissão (AT)	Distribuição
138,0	440,0	Distribuição primária (MT)	Transmissão
	750,00		
230,0	440,0	Distribuição primária (MT)	Transmissão
	750,00		
345,0	440,0	Distribuição primária (MT)	Transmissão
	750,00		
500,0	440,0	Distribuição primária (MT)	Transmissão
	750,00		

Fonte: Kagan, Oliveira e Robba (2015)

doras, sendo 54 concessionárias e 38 permissionárias, além de 13 cooperativas de eletrificação rural, que atuam sob autorização precária e estão em processo de regularização para serem concessionárias ou permissionárias (ANEEL, 2020b).

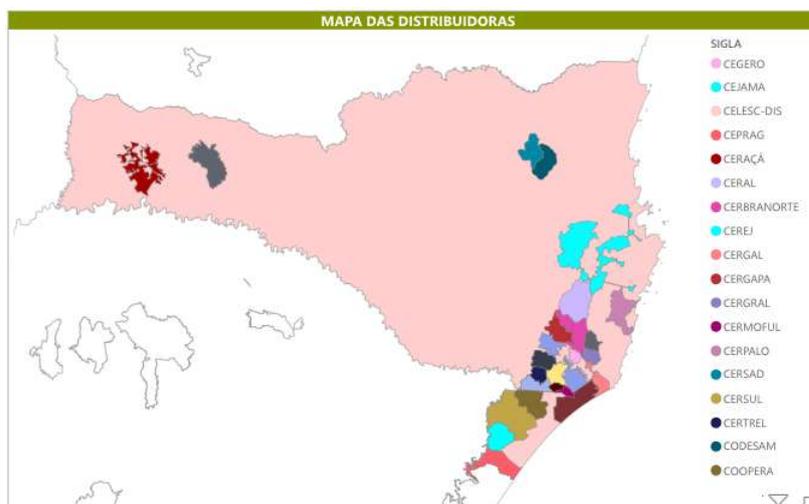
### 3.3 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM SANTA CATARINA

O estado de Santa Catarina possui área territorial de 95.736,16 km<sup>2</sup>, correspondendo à 1,1% do território nacional. Está dividido em 6 mesorregiões, sendo elas: oeste catarinense, norte catarinense, planalto serrano, vale do Itajaí, grande Florianópolis e sul catarinense. Totalizando 295 municípios e com população estimada de 7.164.788 habitantes (IBGE, 2020).

Sua economia é diversificada e organiza-se em polos distribuídos pelas diferentes regiões do estado. Os diversos climas, paisagens e relevos estimulam o desenvolvimento de inúmeras atividades. A região da Grande Florianópolis se destaca no ramo da tecnologia, turismo, serviços e construção civil. O Norte do estado é polo tecnológico, moveleiro e metal-mecânico. No Oeste concentram-se atividades de produção alimentar e de móveis. O Planalto Serrano possui indústrias de papel, celulose e da madeira. O Sul do estado destaca-se pelos segmentos do vestuário, plásticos descartáveis, carbonífero e cerâmico. Já no Vale do Itajaí, a indústria têxtil e do vestuário, naval e de tecnologia predominam (ESTADO DE SANTA CATARINA, 2020).

A energia elétrica é fornecida para o estado através de 26 distribuidoras, sendo 5 concessionárias e 21 permissionárias (SIGEL, 2020).

Figura 7 – Distribuidoras de energia no estado de Santa Catarina



Fonte: ANEEL,2022

O atendimento elétrico é realizado principalmente pela empresa Companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil (CTG ELETROSUL) através de instalações da Rede Básica nas tensões de 525 kV e 230 kV, e por Demais Instalações de Transmissão (DIT) nas tensões 138 kV, de propriedade da CTG ELETROSUL. No estado se destacam as SEs 525 kV Campos Novos, Abdon Batista, Biguaçu e Blumenau (EPE, 2017; MME; EPE, 2018; ELETROSUL, 2020).

O estado se divide em quatro regiões geo-elétricas, a região Leste, planalto norte, Sul e oeste. O atendimento à estas regiões é feito da seguinte forma:

Na região Leste se concentra a maior parte do consumo industrial do estado, cerca de 60% da carga de energia elétrica de Santa Catarina. Esta região é atendida a partir da SE 525/230/138 kV Blumenau, a qual possui 2634 MVA de potência instalada. Esta área é suprida pelas SEs 230/138 kV Joinville, Blumenau, Itajaí e Palhoça, interligadas mediante duas linhas de 230 kV, localizadas próximas ao litoral do estado e por um sistema de DITs em 138 kV interligando as SEs Jorge Lacerda A, Blumenau e Joinville. A empresa CTG ELETROSUL também possui transformação em 138/69 kV integrante das DITs nas SEs Jorge Lacerda A, Ilhota e Joinville, bem como um compensador síncrono (2 x 15 MVAR) instalado na SE Ilhota (ONS, 2020b; MME; EPE, 2006).

A região do planalto norte é atendida pelas SEs 230/138 kV Canoinhas e Joinville. A SE Canoinhas está conectada em 230 kV por um circuito simples na SE São Mateus e a SE Joinville está interligada em 230 kV as SEs de Blumenau e Curitiba (ONS, 2020b; MME; EPE, 2006).

Já a região Sul é suprida principalmente pela UTE Jorge Lacerda, que está conectada por dois circuitos de 230 kV que percorrem o Litoral do Estado, pela SE 230/138/69 kV Jorge Lacerda A e pela SE 230/69 kV Siderópolis, a qual está interligada em 230 kV às SEs Jorge Lacerda B e Lajeado Grande (ONS, 2020b; MME; EPE, 2006).



### 3.3.2 Distribuição de energia na Região Oeste de Santa Catarina

A região do Oeste de Santa Catarina é atualmente atendida por três distribuidoras de energia elétrica, a CELESC, a CERAÇÁ e a empresa DCELT Energia, empresas estas distribuídas por todo o oeste de Santa Catarina, visando atender a demanda elétrica da região.

#### 3.3.2.1 CELESC

Entre as empresas de destaque no setor estão as Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), que atua na produção e distribuição da energia elétrica em Santa Catarina, atendendo a maior parte da Região Oeste. Antes da CELESC, até a metade dos anos 1950, a produção e distribuição de energia elétrica era suprida por pequenos e médios sistemas elétricos regionalizados, geralmente mantidos pela iniciativa privada.

Em 1955, por meio do Decreto Estadual nº 22, o Governador Irineu Bornhausen criou a CELESC. A nova empresa foi criada com a atribuição de planejar, construir e explorar o sistema de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica do Estado, operando diretamente ou por subsidiárias, ou empresas associadas (CELESC, 2020).

Entre 1961 e 1962 várias empresas, situadas em diversas regiões do estado, tornam-se subsidiárias da CELESC, entre elas as empresas do Oeste Cia. Oeste de Eletricidade de Concórdia e, em 1973, houve a incorporação dos serviços de distribuição da Companhia Bom Sucesso de Eletricidade (Caçador). E em 1974 a Empresa inicia o processo de incorporação da empresa Força e Luz de Chapecó S.A.

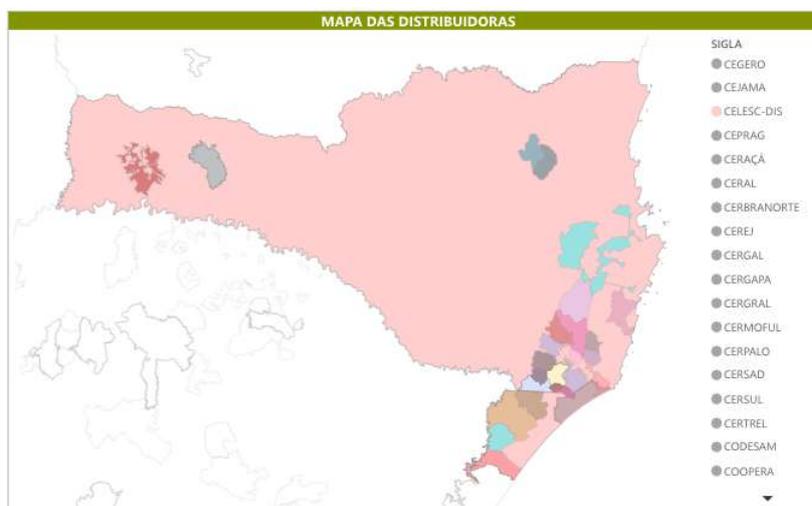
A CELESC Distribuição S.A., foi instituída em 2006, é a responsável pela distribuição e fornecimento da energia elétrica até o consumidor final. Atualmente, a empresa fornece energia elétrica a aproximadamente 3,041 milhões de unidades consumidoras, sendo umas das maiores distribuidoras de energia do país. A empresa atua na maior proporção do território catarinense, conforme mostra a Figura 9 (CELESC, 2020).

#### 3.3.2.2 CERAÇÁ

O Cooperativismo é marca registrada da ocupação e colonização do Oeste Catarinense. Surge em 1974 a CERAÇÁ, fundada por 127 pessoas, a maioria agricultores. A cooperativa foi criada com a missão de levar energia elétrica para as propriedades rurais do Vale do Araçá. Os sócios fundadores eram oriundos dos municípios de Maravilha, Cunha Porã, Pinhalzinho e Saudades (CERAÇÁ. . . , s.d.).

A empresa CERAÇÁ (Cooperativa Distribuidora de Energia Vale do Araçá) tem abrangência de atuação e zonas rurais de 17 municípios no oeste de Santa Catarina,

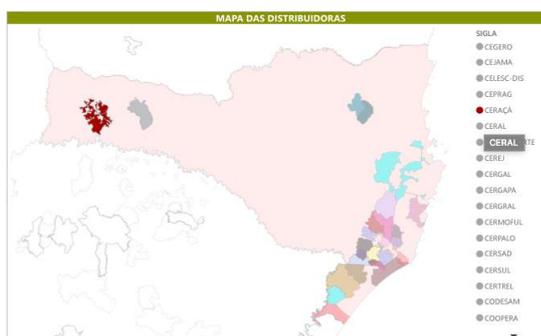
Figura 9 – Região de distribuição de energia da CELESC



Fonte: ANEEL, 2022

como mostra a 10. Fornece energia elétrica ainda em sua totalidade aos municípios de Tigrinhos, Sul Brasil, Cunhataí e parte das áreas urbanas de Pinhalzinho, Nova Erechim e Saudades. Atualmente fornece energia elétrica para 11.510 unidades consumidoras, entre unidades residências, comerciais, industriais e propriedades rurais. Além da distribuição, cooperativa também atua como sócia da Pequena Central Hidroelétrica (PCH) Flor do Sertão Construída no Rio das Antas no município de Flor do Sertão (SC), com potência instalada de 16,48 MWh (CERAÇA... , s.d.).

Figura 10 – Região de distribuição de energia da CERAÇA



Fonte: ANEEL, 2022

### 3.3.2.3 DCELT Energia

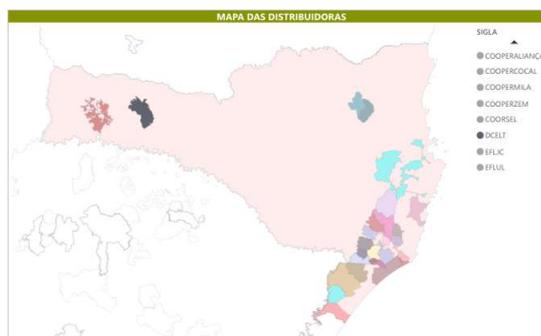
Outra importante empresa que atual, há décadas, no Oeste Catarinense é a DCELT Energia, que surgiu em 1959 como Iguaçu Distribuidora de Energia Elétrica,

ou simplesmente Iguaçu Energia, por iniciativa de um grupo de empresários de Xanxerê e de Xaxim (SC). O objetivo principal da criação da empresa foi o de suprir a escassez de energia elétrica existente na região e, dessa forma, viabilizar a promoção do desenvolvimento que, até então, estava ameaçado (DCELT, 2022).

Na época, havia apenas uma pequena usina localizada no curso do Rio Xanxerê. A capacidade de geração dela era de 120 *kWh*. Durante o dia, a energia produzida era toda destinada ao funcionamento da serraria e somente à noite é que a energia era distribuída para um pequeno grupo de residências para iluminação. A primeira iniciativa da empresa foi construir a usina Passo Velho no Rio Chapecozinho, interior de Xanxerê, hoje Bom Jesus, e a segunda unidade foi construída no Rio Chapecozinho, Linha Voltão, interior de Xanxerê. Os recursos para a construção foram oriundos por meio da venda de cotas (DCELT, 2022).

Atualmente a DCELT Energia presta serviços para mais de 80 mil habitantes, em sua área de concessão de 1.252 km<sup>2</sup> na região oeste de Santa Catarina, abrangendo os municípios de Xanxerê, Xaxim, Marema, Entre Rios, Bom Jesus, Lajeado Grande, além de porção de Ipuacu, Cordilheira Alta e Coronel Freitas. O setor primário é a grande base da economia desses municípios (ABRADEMP. . . , s.d.).

Figura 11 – Região de distribuição de energia da DCELT



Fonte: ANELL, 2022

### 3.3.2.4 Sistema Elétrico em Chapecó

#### 3.3.2.4.1 O município de Chapecó

Como modelo para o presente trabalho, utilizaremos o município de Chapecó. Sendo esta uma cidade de médio porte, localizada no Oeste de Santa Catarina. A cidade possui 227.587 habitantes e 624,846 km<sup>2</sup> (CHAPECÓ (SC) | CIDADES E ESTADOS | IBGE. . . , 2022), e destaca-se economicamente pela produção de carne suína e de frango, sendo um dos maiores produtores e exportadores do país.

O município faz parte da região do Planalto Meridional do Brasil, sendo suas características locais: 20% plano e suave ondulado, 30% ondulado, 40% forte ondulado e 10% montanha e escarpado. A sede do município encontra-se na altitude 679 m em relação ao nível do mar, conforme IBGE. O bioma é da mata Atlântica, caracterizado pela floresta subtropical, composta pela floresta com araucária e floresta estacional (IBGE, 2022).

O clima no município é do tipo subtropical considerado mesotérmico úmido, com verão quente, com temperatura média anual de 19,6C<sup>0</sup>. A umidade relativa do ar fica na média de 71,8%. A precipitação pluviométrica anual de 2.600 mm é bem distribuída ao longo do ano. Os ventos predominantes são na direção sudeste e nordeste, com velocidade média anual de 56 km/h (IBGE, 2022).

O município de Chapecó é o polo da Região Metropolitana de Chapecó, composta por 25 municípios que, juntos, influenciam cerca de duzentos municípios gaúchos e catarinenses, somando mais de um milhão de habitantes (IBGE, 2022).

Nele deu-se início e continua até a atualidade a instalação de unidades industriais, processadoras e exportadoras de carnes de suínos, aves e derivados. O parque industrial é diversificado, com destaque para os setores, metalomecânicos de plásticos e embalagens, transportes, móveis, bebidas, software e biotecnologia. Com uma economia forte e um alto giro de capital, o setor da construção civil e comércio se intensificaram (IBGE, 2022).

Devido as diferentes atividades econômicas que compõem a cidade e a centralização das principais estruturas de transporte (aéreo e rodoviário), saúde e entretenimento da região Oeste de Santa Catarina ocorrer na cidade de Chapecó. Cabe destacar a importância do fornecimento de energia elétrica para a região, visto que a mesma possui o papel de insumo básico nos processos de produção industrial, assim como no setor de prestação de serviços, saúde e comércio em geral, além do conforto que proporciona aos domicílios da região.

Atualmente Chapecó possui três subestações para fornecimento de energia, a SE Santo Antônio (Chapecó III), implementada em 2022, que garante o fornecimento de energia elétrica mais estável pelos próximos 20 anos, propiciando o crescimento da região. O objetivo desta subestação é aliviar a demanda das SE's Chapecó e Chapecó

II, que atendiam sozinhas cerca de 113,2 mil unidades consumidoras, nos municípios de Chapecó, Guatambú, Cordilheira Alta, Nova Itaberaba, Coronel Freitas e Águas de Chapecó (IBGE, 2022).

De acordo com dados do Anexo A, a rede de distribuição da cidade cobre  $624.759,16\text{km}^2$ . A rede primária possui  $1.296.851,149\text{ m}$ , sendo  $526.195,518\text{ m}$  de rede monofásica,  $645,061\text{ m}$  de rede bifásica e  $770.010,570\text{ m}$  de rede trifásica. Já a rede secundária possui  $1.513.412,608\text{m}$ , sendo que  $121.134,043\text{ m}$  possui uma fase,  $271.184,069\text{ m}$  duas fases e  $1.121.094,495\text{ m}$ .

Na cidade existem 44.097 postes, sendo divididos em: 12.218 do modelo concreto circular, 29.611 do modelo duplo T, 800 de madeira e 1.468 de outros modelos. O sistema é composto por 3.947 transformadores da CELESC e 541 transformadores particulares. Os transformadores da CELESC instalados são de diferentes potências, existem 416 transformadores de  $15\text{kVA}$ , 239 unidades de  $30\text{kVA}$ , 471 unidades de  $45\text{kVA}$ , 826 unidades de  $75\text{kVA}$ , 589 unidades de  $112\text{kVA}$ , 193 unidades de  $150\text{kVA}$ , 58 unidades de  $225\text{kVA}$  e 1.155 unidades de outras potências. Os transformadores particulares são divididos em Uso Coletivo (436 unidades), Uso Individual (28 unidades) e Não Definido (77 unidades).

No sistema de distribuição de Chapecó existem 26 unidades de alimentadores, 400 unidades de chaves seccionadoras, 1.308 unidades de chaves fusível, 81 unidades de religadores, 3 unidades de reguladores de tensão, 5.058 unidades de para-raios de média tensão e 223 unidades de para-raios de baixa tensão, 34 unidades de capacitores e 3 subestações.

### 3.4 CONCLUSÃO

No presente capítulo procurou-se descrever, em linhas gerais, o sistema elétrico brasileiro, e principalmente, mostrar as características do sistema elétrico de potência do estado de Santa Catarina. Cabe destacar que o sistema elétrico nacional é interligado, atendendo a maior parte do país e composto por usinas, linhas de transmissão e de distribuição, sendo que os sistemas de distribuição são o foco do presente trabalho.

Os sistemas de distribuição foram definidos como a parte do sistema elétrico presente nos centros de utilização, como cidades, bairros e indústrias. Este sistema inicia-se na subestação abaixadora, onde a tensão da linha de transmissão é abaixada para valores de  $13,8\text{kV}$  e  $34,5\text{kV}$ , sendo estes os valores adequados para tensões em redes de distribuição primária. A distribuição primária supre aos consumidores primários e os transformadores de distribuição. Após os transformadores de distribuição a rede formada é chamada de Distribuição Secundária, onde no Brasil está padronizada em  $220/127\text{ V}$  e  $380/220\text{ V}$  e supre os consumidores de baixa tensão, como residências, pequenos comércios e indústrias.

Em Santa Catarina, a energia é transmitida principalmente por linhas de trans-

missão da CTG ELETROSUL e distribuída através de 26 distribuidoras, sendo 5 concessionárias e 21 permissionárias. A região Oeste do estado é atendida por três distribuidoras de energia elétrica, a CELESC, a qual atende grande parte da região, a CERAÇÁ e a empresa DCELT Energia, empresas estas distribuídas por todo o oeste de Santa Catarina, visando atender a demanda elétrica da região.

O capítulo a seguir descreverá um caso de estudo, sendo este do processo de desenvolvimento de um protótipo de um dispositivo para detecção de falhas neste domínio das REIs. Espera-se que com o desenvolvimento do protótipo possa ser validada a utilização de redes de comunicação sem fio em dispositivos de detecção de falhas na rede de distribuição de energia elétrica.

#### 4 CASO DE ESTUDO: PROTÓTIPO DE UM DISPOSITIVO PARA DETECÇÃO DE FALHAS

O sistema de distribuição de energia elétrica é complexo. Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver um protótipo de um dispositivo para detecção de falhas neste domínio das REIs.

O Processo de Desenvolvimento de Novos Produtos (PDNP) é uma sequência de etapas e atividades realizadas para conceber, projetar, fabricar e comercializar um produto. Tomando como exemplo os produtos de engenharia, o processo de desenvolvimento inclui diferentes estágios, como entendimento da área de aplicação, levantamento de requisitos, planejamento do produto, projeto conceitual, projeto detalhado, fabricação, teste e melhoria, produção e assim por diante. Cada estágio e missões de design do estágio são bem definidos com o objetivo de alcançar a devida eficiência (YIN; ZHANG, 2021).

Uma mudança no locus da concorrência de um foco no processo para um foco no cliente (atender de perto às diversas necessidades do cliente com produtos personalizados e configuráveis), com grandes avanços nas tecnologias de informação e comunicação, resultou em aumentos drásticos na escala e complexidade dos sistemas de engenharia. Essas mudanças trouxeram muitos novos desafios e oportunidades para as comunidades de desenvolvimento de produtos (P&D) e design de engenharia. A P&D complexa é caracterizada pelo desenvolvimento de sistemas grandes, multidisciplinares, distribuídos e em rede que não podem ser adotados por um único grupo ou organização (YASSINE, 2021).

As empresas estão mudando a forma como abordam a inovação, deixando de lado a pesquisa e desenvolvimento puramente internos para envolver clientes, fornecedores, parceiros e outros constituintes nas atividades de inovação. Esses desenvolvimentos se fundiram no fenômeno e no estudo da inovação aberta, e focam no processo de avaliação do produto através de etapas analíticas repetitivas para fins de otimização. Cada etapa analítica avalia a proposta do produto para marcadores de sucesso antes do início das etapas seguintes e envolver diversos atores. Portanto, as deficiências reveladas exigirão a reversão às etapas anteriores para reavaliação e melhoria até que resultados positivos sejam estabelecidos (ABHARI; DAVIDSON; XIAO, 2022).

Se destacam três principais fases de avaliação no processo de desenvolvimento de produto, sendo elas:

- **Fase I Estágio Conceitual** O processo começa gerando um conceito de produto. A ideia inicial para um novo produto pode se originar de uma grande variedade de fontes que incluem vendas, marketing, engenharia, fabricação, clientes, feiras, uma experiência casual ou qualquer combinação dessas. É importante

discutir uma nova ideia de produto com um grupo diversificado de indivíduos representando diferentes disciplinas. Essa discussão resulta na criação de uma lista de desejos que captura muitos atributos e funções sem a exclusão de sugestões. Assim, durante a Fase I, um conceito do produto é avaliado por especialistas em engenharia e vendas/marketing em reuniões de conceito de produto com *brainstorms* para surgir um produto viável. Para avaliar os riscos de mercado e tecnológicos, este produto viável é então apresentado a clientes potenciais com interesses variados para seu *feedback*. Os resultados da pesquisa podem revelar os problemas do produto, bem como sugestões de recursos adicionais considerados benéficos pela equipe de design. Em seguida realiza-se uma análise de risco de mercado, que explora a ideia do produto, a capacidade de apresentar todos os recursos solicitados, a lucratividade, a concorrência com produtos similares existentes, a viabilidade e os efeitos de questões regulatórias e de conformidade. Uma vez definidas as características do produto, as complexidades técnicas e os riscos tecnológicos são avaliados para gerar um produto que atenda às metas de marketing, desempenho e custo. As etapas de avaliação de risco tecnológico seguem paralelas à análise de mercado e exploram a operação e o desempenho do produto. Normalmente, as avaliações de risco tecnológico exploram o tipo de circuito de controle, por exemplo, analógico ou digital, componentes que podem se tornar obsoletos, tipo de interface do cliente, memória necessária, alimentação e alimentação de reserva necessária. Após as etapas de avaliação da Fase I, é importante estabelecer uma faixa de preço que o produto em questão deve atender. Esta faixa de preço servirá como um guia para as próximas duas fases (MARQUIS; DEEB, 2018).

- **Fase II Fase de Desenvolvimento** As etapas nesta fase incluem a avaliação de abordagens de projeto de engenharia para um produto em questão, produzindo um projeto de prova de conceito ou um Mínimo Produto Viável (MPV). Com base na escolha do método de desenvolvimento, o custo de desenvolvimento deve ser estimado e uma análise preliminar do retorno sobre o Investimento (ROI) deve ser realizada. Nesta fase também é realizada etapa de análise de expectativa de desempenho. Esta etapa deve primeiro ser realizada internamente pelo grupo de projeto usando o dispositivo escolhido na etapa de desenvolvimento. A análise deve atender a todas as expectativas de desempenho. Ao concluir com sucesso a análise interna de desempenho, o produto deve ser testado em campo com um grupo diversificado de clientes em potencial. Este é um processo reiterativo e pode ser realizado até que todas as expectativas sejam atendidas ou superadas, assim que finalizado, o próximo passo é a estimativa de custo do produto. Um projeto de prova de conceito pode ser mais econômico do que um MPV, embora não forneça informações suficientes para determinar o

custo de desenvolvimento, análise de ROI, expectativa de desempenho ou estimativa de custo do produto. Como o projeto do MPV é quase completo e muito semelhante ao projeto final, é mais fácil realizar a estimativa de custos utilizando o mesmo. É importante ressaltar que os riscos financeiros podem aumentar se qualquer uma das etapas não for realizada com sucesso. Alcançar um equilíbrio entre as etapas da Fase II depende da experiência e da capacidade de uma equipe de projeto de estimar o custo de desenvolvimento em 10% a 100% do custo real. Para análise de ROI, a precisão dependerá das vendas e do conhecimento do mercado, bem como da extensão da pesquisa realizada no mercado do usuário. Os mesmos critérios de precisão também se aplicam à etapa de expectativa de desempenho (MARQUIS; DEEB, 2018).

- **Fase III Estágio de Design de Pré-Produto** As etapas da Fase III começam com conceitos de design industrial. No caso de produtos de consumo, bons conceitos de design industrial são fundamentais para tornar o produto competitivo no mercado. Os conceitos de design industrial são menos críticos para produtos comerciais/industriais, como no caso do produto desenvolvido neste trabalho. No entanto, é importante que o conceito de projeto considere os custos de ferramenta, facilidade de montagem e reparo, a ergonomia da interface do cliente e a durabilidade do produto, bem como muitos outros aspectos do uso do produto. O projeto eletrônico e a interface de fiação terão um efeito direto no custo de fabricação do produto e na potencial obsolescência do produto, portanto, devem ser analisados adequadamente. Cada etapa da Fase III requer uma análise financeira rigorosa que culmina em uma estimativa de custo de fabricação projetada. Se o custo de fabricação for muito alto, um retorno à Fase I ou Fase II antes da criação do projeto final do produto deve ser considerado. É essencial que especialistas em engenharia e marketing avaliem os méritos de cada abordagem de projeto contra os custos necessários para produzir o conceito de projeto industrial recomendado. Também é importante pensar a estética em relação aos custos de ferramentas e fabricação e considerar o custo de montagem, teste e reparo. Uma vez que um conceito de projeto surge, é possível solidificar o custo do projeto mecânico e isso inclui o custo da interface do cliente. Custos adicionais incluem custos de desenvolvimento de software, design da Interface Gráfica do Usuário (GUI) e custos de engenharia elétrica. Nesta etapa da Fase III do processo, os custos de fabricação são estimados. Esta é muitas vezes uma tarefa desafiadora, uma vez que o produto é bem-conceituado, mas não fisicamente criado. Neste estágio de desenvolvimento, uma Lista de Materiais (BOM) que calcula antecipadamente o custo total de fabricação ainda não está disponível. Durante as etapas da Fase III, se os custos de fabricação estimados se aproximarem dos custos máximos do produto definidos inicialmente, será im-

portante considerar ajustes. Isso pode incluir a redução dos recursos de design do produto que podem exigir uma reavaliação do conceito do produto durante a Fase I ou Fase II do processo de desenvolvimento do produto, reavaliação do design do produto conforme previsto durante as etapas iniciais da Fase III, desistência do projeto ou reavaliar o custo de fabricação permitido. Portanto, as etapas da Fase III servem para minimizar o risco de surpresas de custo/desempenho antes que custos significativos do desenvolvimento real do produto sejam realizados (MARQUIS; DEEB, 2018).

O processo de desenvolvimento de produtos é composto por diversas etapas, sendo que algumas delas foram citadas anteriormente. Estas etapas se inicia com o entendimento completo da área de aplicação e com o levantamento de requisitos junto aos diversos atores representantes de diferentes disciplinas que se envolvem no projeto, seja como clientes ou fornecedores. O presente trabalho se conteve em realizar a Fase I Estágio Conceitual e as primeiras etapas da Fase II Fase de Desenvolvimento do processo de desenvolvimento do produto, por entrevistas com atores relacionados, estudo do estado da arte do tema onde o produto será aplicado e o desenvolvimento de um projeto de prova de conceito. Neste capítulo descrevem-se aspectos do ambiente onde o produto será aplicado, o levantamento de requisitos e a avaliação da prova de conceito.

#### 4.1 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO

O equipamento de proteção em um sistema de distribuição de energia tem como finalidades não somente evitar danos permanentes aos equipamentos, mas também, diminuir o tempo de interrupção do fornecimento de energia causado por falhas. Nesta seção são descritos os equipamentos utilizados no âmbito desse sistema pela CELESC, concessionária responsável pela maior parte da rede elétrica de distribuição em Santa Catarina.

##### 4.1.1 Chave Fusível

Chaves fusíveis são os elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção que se deseja (FILHO; MAMEDE, 2011).

A chave fusível é um dispositivo mecânico com a finalidade de interromper o circuito elétrico quando ocorre a fusão do elo fusível. Devido ao baixo custo e o desempenho satisfatório, é o equipamento mais utilizado na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais. As características das chaves fusíveis aplicadas em redes de distribuição são: corrente nominal, tensão nominal, nível básico de isolamento para

impulso, frequência, capacidade de interrupção simétrica e assimétrica (FILHO; MAMEDE, 2011)

Figura 12 – Chave Fusível



Fonte: Proteção Smart, 2022

A chave fusível religadora, é um sistema de duas ou três chaves fusíveis em um único conjunto, como visto na Figura 33. A chave religadora trabalha em conjunto com outros dispositivos de proteção e de manobra, para que a quantidade de consumidores afetados em uma possível situação de falha seja reduzida. Ela tem como finalidade atestar se o defeito na linha é de origem passageira ou não, e religar o circuito automaticamente caso o defeito seja passageiro (FILHO; MAMEDE, 2011).

Este dispositivo funciona da seguinte maneira, ao atingir um valor máximo determinado de corrente elétrica, o condutor da linha de distribuição aquece e funde os contatos da chave religadora. Esta, no que lhe concerne, sofre uma abertura impedindo a passagem de corrente elétrica (FILHO; MAMEDE, 2011).

As chaves religadoras são fabricadas de forma que as suas propriedades sejam mantidas durante a passagem de corrente elétrica nominal, e de maneira que se restabeleça automaticamente a corrente no circuito até duas vezes após um defeito, que pode ser um curto-circuito ou uma sobrecarga (FILHO; MAMEDE, 2011).

Em um primeiro momento a carga fica submetida ao primeiro porta-fusível que é o elemento que contém todo o conjunto do fusível e com isso, os demais permanecem como reserva. Ao ocorrer um defeito e conseqüentemente uma operação no primeiro porta-fusível, ao final da sua abertura este deverá acionar um dispositivo de manobra que transfira a carga para o segundo porta-fusível, reestabelecendo o circuito o mais rápido possível (FILHO; MAMEDE, 2011).

Caso o defeito permaneça ao final da abertura do segundo porta-fusível, outro dispositivo de manobra deverá ser acionado e a carga deverá ser transferida para o terceiro porta-fusível. Caso o defeito persista, o circuito será desligado até que o problema seja avaliado e resolvido (FILHO; MAMEDE, 2011).

O tempo entre a abertura dos porta-fusíveis são determinados para que caso seja de origem passageira, o problema possa ser resolvido naturalmente. Por exemplo,

em caso de galhos de árvores empurrados pelo vento ou em pássaros pousados nos cabos das linhas (FILHO; MAMEDE, 2011).

Figura 13 – Chave Fusível Religadora



Fonte: Hubbell, 2022

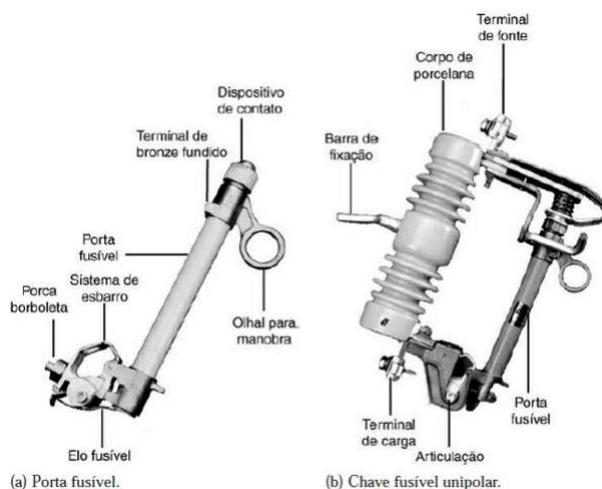
O sistema porta fusível ou chave fusível é composto pelos seguintes componentes:

- Isolador: Tem por finalidade garantir a isolação da chave fusível. São constituídos de porcelana vitrificada que apresentam uma resistência mecânica condizente para suportar a abertura e o fechamento da chave. Podem ser de corpo único (aplicados em sistemas cuja corrente é menor ou igual a 200 A), ou do tipo pedestal (com dois isoladores), sendo estes utilizados em subestações para poder ser feita a manutenção de disjuntores e religadores automáticos, sem a interrupção no fornecimento de energia elétrica (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Gancho para abertura em carga: é acoplado nos terminais da chave fusível e tem por função possibilitar a abertura da mesma em carga. Sem este gancho não é possível manobrar a chave sob carga, uma vez que ela não possui um sistema para extinção do arco elétrico (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Cartucho ou porta-fusível: é o elemento principal da chave fusível. É constituído por uma fibra de vidro revestida internamente por uma fibra óssea, que aumenta a sua robustez e gera, em parte, os gases desionizantes (hidrogênio e monóxido de carbono) que provocam a interrupção do arco elétrico. Existem cartuchos onde a saída destes gases ocorre em sua parte inferior e outros pela parte inferior e superior. A escolha de um ou de outro está diretamente relacionada com a capacidade de interrupção almejada para a chave fusível (FILHO; MAMEDE, 2011).

- Suporte de fixação: tem por finalidade dar sustentação à chave para que a mesma seja fixada em uma estrutura metálica (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Articulação: corresponde à estrutura responsável pela movimentação da chave fusível, exercendo uma função fundamental na operação da mesma. É composta pelas seguintes partes: Limitador de recuo, cuja função é intertravar diretamente o cartucho no corpo da chave; amortecedor, cuja função é minimizar o impacto decorrente da abertura do porta fusível; limitador de abertura de 180°, cuja função é a de não permitir que o cartucho atinja a estrutura adjacente inferior durante a sua abertura; batentes dos contatos, cuja função é proteger os contatos contra choques e deformações permanentes (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Terminal superior: é composto por três partes metálicas com a finalidade de garantir um engate perfeito do cartucho e também um bom contato elétrico. Em suma, as três partes são: contatos principais, constituídos por uma liga de cobre com alta resistência aos esforços mecânicos e térmicos decorrentes da corrente de curto-circuito.

A sua forma construtiva permite uma autolimpeza durante as operações de abertura e fechamento. Tranca de contato, têm por funções: impedir a abertura acidental da chave fusível, evitar a queima dos contatos principais durante uma interrupção normal, reduzir a queima dos contatos principais quando a chave é fechada em condições de curto-circuito. Guarda do contato, cuja função é guiar o cartucho durante o fechamento da chave, evitando que ele se solte e também proteger os contatos principais contra avarias durante o manuseio e operação da chave (FILHO; MAMEDE, 2011).

Figura 14 – Sistema porta fusível ou cartucho



Fonte: Filho, 2011

#### 4.1.2 Elo Fusível

O Elo fusível é o componente mais básico de proteção aplicado em sistemas de distribuição. É o elemento ativo da chave fusível que, quando exposto a sobrecorrentes em conjunto com cartucho, interrompe o circuito. São aplicados para proteção de ramais, bancos capacitores e transformadores de distribuição (FILHO; MAMEDE, 2011).

Figura 15 – Elo Fusível



Fonte: Proteção Smart, 2022

O elo fusível atua quando percorrido por uma intensidade de corrente elétrica superior à capacidade de sua curva de atuação, momento em que o elemento fusível funde e, após a extinção do arco elétrico, o circuito é interrompido. Com a fusão do

fusível, ocorre a formação de arco elétrico que ioniza a camada de ar, dificultando sua extinção.

A interrupção só é conseguida através da formação de gases formados pela decomposição da fibra isolante e das altas temperaturas. Os gases formados propiciam elevação da rigidez dielétrica, que acarreta elevada resistência, interrompendo a corrente quando esta passar pelo valor zero, impedindo a reignição do arco (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

A camada interna do cartucho é consumida progressivamente a cada interrupção. A erosão da fibra varia 1% para interrupções de correntes baixas e 15% da espessura para interrupções com correntes máximas. Seus pontos positivos são:

- Serem componentes simples e de baixo custo;
- Rápidos para operar com correntes elevadas e lentos em sobrecargas;
- Podem ser vantajosos alimentando cargas monofásicas quando ocorrer defeitos nas demais fases (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

As principais desvantagens são:

- Não tem ação repetitiva, precisa ser trocado quando queima;
- São dispositivos monofásicos, portanto susceptíveis a causar danos em motores trifásicos;
- Sua curva corrente x tempo não é ajustável, só pode ser alterada pela substituição do fusível (GIGUER, 1988).

O elo fusível continua sendo o componente de proteção mais empregado em sistemas de distribuição devido ao baixo custo, é um componente que ainda não evoluiu. Sua interrupção depende de condições físicas e químicas, ou seja, a sua fusão depende da temperatura, da extinção do arco elétrico e da formação de gases, fatores que mudam em cada condição do curto-circuito (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2015).

É necessário seguir alguns critérios básicos na aplicação dos elos fusíveis em um sistema de distribuição. Deve-se dimensionar o elo fusível de maneira a prever o crescimento da carga em um período de pelo menos cinco anos (ENERGISA, 2022).

Dimensionar o elo fusível para suportar cargas eventualmente transferidas, em casos de manobras na rede de distribuição, nos casos de manutenções. Para a proteção de ramal é necessário que a corrente nominal do elo fusível seja superior ou igual a 150% da corrente máxima da carga prevista no projeto no ponto de instalação da chave fusível.

A chave fusível deve ter uma corrente nominal igual ou pelo menos a 150% da corrente nominal da corrente do elo fusível. É necessário o cálculo para determinar as correntes de curto-circuito trifásicas, bifásicas e fase-terra nos pontos onde estão instaladas

as chaves fusíveis. O elo fusível deve possuir a corrente nominal igual ou inferior a 25% da corrente de curto-circuito fase-terra mínima que ocorrer no fim do trecho. Conforme a equação abaixo:

$$I_{nef} \geq 0,25 \times I_{ft} \quad (1)$$

onde,  $I_{ft}$  = corrente de curto-circuito fase-terra, em A.

Em cada trecho da rede de distribuição, deve-se determinar a corrente de carga máxima. Os elos fusíveis são fabricados e utilizados em função das suas características tempo  $\times$  corrente, o que permite que sejam codificados nas seguintes classificações:

- Tipo H: denominados fusíveis de alto surto, apresentam tempo de atuação lento, utilizados somente na proteção de transformadores de distribuição. A característica de atuação lenta é necessária para não operarem durante a energização do transformador devido à corrente de surto ou corrente de *inrush*. Sua relação de rapidez varia entre 11,4 para elos fusíveis de corrente de 0,5 A, a 36,4 para fusíveis de 5A. São fabricados com as seguintes correntes nominais: 0,5A 1A 2A 3A 5A (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Tipo K: apresentam tempo de atuação rápido, utilizados normalmente na proteção de ramais de alimentadores de distribuição ou mesmo instalados ao longo desses alimentadores, porém na sua trajetória final. Têm uma relação de rapidez variando entre 6A, para elos fusíveis de corrente nominal de 6 A, e 8,1 A para elos fusíveis de corrente nominal de 200 A. São agrupados em dois diferentes tipos: elos fusíveis preferenciais e elos fusíveis não preferenciais. Essa classificação torna-se necessária para indicar ao usuário que somente há coordenação entre os elos fusíveis listados dentro de um mesmo grupo. Os elos fusíveis de grupos diferentes não são seletivos. Os elos fusíveis preferenciais são fabricados com as seguintes correntes nominais: 6 10 15 25 40 65 100 140 200 A. Já os elos fusíveis não preferenciais são fabricados com as seguintes correntes nominais: 8 12 20 30 50 80 A (FILHO; MAMEDE, 2011).
- Tipo T: apresentam tempo de atuação lento. Têm relação de rapidez variando entre 10, para elos fusíveis de corrente nominal de 6 A, e 13A, para elos fusíveis de corrente nominal de 200 A. No entanto, os elos fusíveis K e T apresentam os mesmos valores de corrente nominal. Os elos fusíveis do tipo T são destinados à proteção de alimentadores de distribuição e seus ramais correspondentes (FILHO; MAMEDE, 2011).

### 4.1.3 Disjuntores

Os disjuntores são dispositivos utilizados na proteção de sistemas elétricos e que todo alimentador de distribuição deve conter. Essa proteção pode ser feita por meio de disjuntores de média tensão, associada a relés de sobrecorrente. Sua função é desacoplar o circuito caso ocorra uma corrente excessiva, e também realiza a função de chaveamento (FILHO; MAMEDE, 2011).

Para que o sistema de proteção seja eficaz, ele deve respeitar os seguintes requisitos:

- A tensão nominal do disjuntor deve ser no mínimo igual a do sistema;
- A capacidade de corrente do disjuntor deve ser superior a corrente máxima que possa fluir pelo disjuntor, calculada pelo planejamento a longo prazo;
- A capacidade de interrupção do disjuntor deve ser no mínimo igual à máxima corrente de curto-circuito no ponto de instalação do disjuntor;
- Os níveis de isolamento do disjuntor e do sistema devem ser compatíveis (ENERGISA, 2022).

### 4.1.4 Religadores

Os religadores são equipamentos automáticos de interrupção da corrente elétrica dotados de uma determinada capacidade de repetição em operações de abertura e fechamento de um circuito, durante a ocorrência de um defeito.

Ele opera quando detecta correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos um número predeterminado de vezes. Quando um religador detecta uma condição de sobrecorrente, a circulação dessa corrente é interrompida pela abertura de seus contatos. Os contatos são mantidos abertos durante determinado tempo, chamado tempo de religamento, após o qual se fecham automaticamente para reenergização da linha. Se, no momento do fechamento dos contatos, a corrente persistir, a sequência abertura/fechamento é repetida até três vezes consecutivas e, após a quarta abertura, os contatos ficam abertos e travados e o novo fechamento só poderá ser manual.

Os religadores podem ser classificados de acordo com o número de fases, sendo os monofásicos utilizados para proteção de linhas monofásicas ou ramais de alimentadores trifásicos (uma para cada fase), onde as cargas são predominantemente monofásicas, pois, na eventualidade de ocorrer uma falha permanente para terra, será bloqueada somente a fase com falha, enquanto é mantido o serviço aos consumidores ligados às outras duas fases. Normalmente, a saída de um ramal sob essas condições não deverá introduzir suficiente desequilíbrio no alimentador para abrir um equipamento de proteção de retaguarda.

Já os trifásicos são utilizados onde é necessário o bloqueio das três fases simultaneamente, para qualquer tipo de falha permanente, a fim de evitar que cargas trifásicas sejam alimentadas com apenas duas fases. Podem ser:

- Trifásicos com Operação Monofásica e Bloqueio Trifásico. São constituídos de três religadores monofásicos, montados num único tanque, com os mecanismos interligados apenas para ser processado o bloqueio trifásico. Cada fase opera independentemente em relação às correntes de defeito. Se qualquer das fases operar o número pré-ajustado para bloqueio, as duas outras fases são abertas e bloqueadas através do mecanismo que as interliga;
- Trifásicos com Operação Trifásica e Bloqueio Trifásico. São constituídos de um único religador, que opera e bloqueia sempre as três fases, independentemente do tipo de falha ocorrida, isto é, mesmo que a falha afete uma das fases, todos os contatos realizam a operação de abertura e religamento;

Os religadores também podem ser classificados de acordo com seu tipo de controle. No religador de controle hidráulico as correntes são detectadas pelas bobinas de disparo que estão ligadas em série com a linha. Quando, através da bobina, flui uma corrente igual ou superior à corrente mínima de disparo do religador (*pick-up*), o núcleo da bobina é atraído para o seu interior, provocando a abertura dos contatos principais do religador. O mecanismo de fechamento dos religadores com controle hidráulico pode ser de dois tipos, nos religadores com corrente nominal de até 200 A, são empregadas molas de fechamento, carregadas pelo movimento do núcleo da bobina-série; Em religadores de correntes nominais de 250, 280, 400 e 560 A, o fechamento é realizado pela bobina de fechamento, energizada pela tensão da linha. O sistema de controle hidráulico é econômico e simples, eficiente e de grande vida útil. Essas características são extremamente importantes para áreas de baixa densidade de carga ou para outras áreas que não requeiram níveis de precisão acentuados na operação do equipamento, corrente de disparo muito pequenas, tanto para fase, como para neutro, ou grande velocidade na interrupção. Controle Eletrônico. Com este tipo de controle, o religamento apresenta maior flexibilidade e mais facilidade para ajustes e ensaios, além de ser mais preciso, comparativamente ao de controle hidráulico. Contudo, essas vantagens devem ser economicamente avaliadas antes de ser procedida à escolha entre um religador com controle hidráulico e um com controle eletrônico.

O religador de controle eletrônico é abrigado numa caixa separada do religador e permite as seguintes modificações de ajustes no equipamento, sem que seja necessário sua abertura:

- Característica tempo x corrente;
- Níveis de corrente de disparo;

- Sequência de operação.

Para que estas alterações sejam efetuadas, não é preciso desenergizar o religador nem retirar o seu mecanismo do interior do tanque. Outro modo de classificação dos religadores é quanto ao meio de interrupção, os religadores se classificam em:

- Religadores com interrupção a óleo;
- Religadores com interrupção a vácuo.

Os religadores do segundo tipo apresentam possibilidade de período de trabalho de cerca de três a quatro vezes o do primeiro tipo, entre manutenções. Contudo, as garrafas de vácuo que substituem o óleo são importadas e seu uso deve ser economicamente avaliado.

#### **4.1.5 Seccionador automático**

O seccionador automático é um equipamento utilizado para interrupção automática de circuitos, que abre seus contatos quando o circuito é desenergizado por um equipamento de proteção situado à sua retaguarda e equipado com dispositivo para religamento automático.

Ele é um equipamento basicamente construído de um elemento sensor de sobrecorrentes e de um mecanismo para contagem de desligamentos do equipamento de retaguarda, além de contatos e de dispositivos para travamento na posição aberto. Quando ocorre uma sobrecorrente no circuito passando através do seccionador, cujo valor seja maior ou igual à corrente de acionamento, o equipamento é armado e preparado para a contagem. A contagem se inicia quando a corrente que circula por ele é interrompida pelo equipamento de retaguarda ou cai abaixo de determinado valor. Após um certo número dessas ocorrências, que corresponde ao ajuste do equipamento, ele abre os contatos e permanece travado na posição aberto, isolando o trecho com falha.

Os seccionadores podem ser classificados de acordo com o número de fases, sendo que os monofásicos são utilizados exclusivamente para seccionamento automático de sistemas monofásicos primários de distribuição. Os trifásicos são utilizados exclusivamente para seccionamento automático de sistemas trifásicos primários de distribuição.

Também podem ser classificados quanto ao tipo de controle. O seccionador de controle Hidráulico compõe-se de uma bobina-série e do respectivo êmbolo, um pistão de disparo, uma mola e duas válvulas de retenção. Um seccionador hidráulico opera, quando sua bobina-série é percorrida por um fluxo de corrente que exceda 160% de sua corrente nominal. A operação de contagem de um seccionador típico se faz quando o religador de retaguarda interrompe uma sobrecorrente. O equipamento pode ser ajustado para mais de uma contagem e caso o número programado seja

completado no período de memória, o dispositivo abrirá seus contatos e só poderá ser fechado manualmente. O tempo de rearme dos seccionadores com controle hidráulico é de 1 a 1,5 minutos por contagem. Como a corrente mínima de acionamento é 160% da corrente nominal da bobina, podem-se obter determinadas correntes mínimas de atuação através da simples troca da bobina série do equipamento.

Já o seccionador de controle eletrônico possui suas unidades controladas eletronicamente, preparam-se para contar quando ocorre uma sobrecorrente e completam a contagem quando o circuito for desenergizado. A diferença está no fato de que os seccionadores com controle eletrônico têm suas operações supervisionadas por circuitos de estado sólido. Ocorrendo uma falta permanente, o seccionador irá disparar após o número prefixado de contagens. Caso a falta seja temporária, o circuito armazena a contagem em uma memória eletrônica até o tempo preestabelecido, para depois, gradativamente, esquecê-la.

#### 4.1.6 Relês

Os Relês temporizadores de sobrecorrentes são os dispositivos com características de tempo definido ou inverso que atuam quando a corrente em um circuito de corrente alternada excede a um valor prefixado. Estes dispositivos supervisionam constantemente todas as grandezas de um sistema elétrico, ou seja, tensões, correntes, frequências, potências, bem como grandezas inerentes aos próprios componentes, como temperatura.

Os relês, ao detectarem uma perturbação que comprometa os equipamentos ou o funcionamento normal do sistema, enviam um sinal elétrico que comanda a abertura de um ou mais disjuntores, de modo a isolar o equipamento ou parte do sistema afetado pela falha, impedindo que a perturbação danifique equipamentos, comprometa a operação ou propague-se para outros componentes não defeituosos. Fundamentalmente, existem dois princípios de operação de relês eletromagnéticos, sendo eles a atração e a indução. A operação por atração ocorre por conta da atração de uma haste para interior de uma bobina ou pela atração de uma armadura pelos polos de um eletroímã. Este tipo de relê pode ser usado em circuitos de corrente contínua e corrente alternada. Sua operação é instantânea. Já os relês de indução operam baseados no mesmo princípio do medidor de energia elétrica, ou seja, pela interação dos fluxos magnéticos defasados que atravessam um disco ou tambor com as correntes neles induzidas. Só funcionam com corrente alternada, podendo ser instantâneos ou temporizados.

Os relês mais utilizados em sistemas elétricos são:

- Relê de sobrecorrente;
- Relê de sobrecorrente direcional;

- Relê de sobretensão;
- Relê de subtensão;
- Relê direcional de potência;
- Relê de distância;
- Relê diferencial;
- Relê de religamento.

Para efeito de proteção, em sistemas de distribuição, são mais importantes os relês de sobrecorrente e os relês de religamento.

Os relês de sobrecorrente supervisionam a corrente do circuito, comandando a abertura de um ou mais disjuntores, quando esta corrente ultrapassa um valor prefixado. A bobina do relê pode estar ligada diretamente em série no circuito ou por um transformador de corrente. Os relês de sobrecorrente, de acordo com os tempos de atuação, podem ser classificados em:

- Relê de Sobrecorrente Instantâneo. A operação se completa em um intervalo de tempo muito curto, após a ocorrência de sobrecorrentes, e, praticamente, independe de suas variações. Não há retardo de tempo propositalmente incluído na sequência detecção-operação. O tipo construtivo que mais se adapta a este modo de operação é o de atração magnética;
- Relê de Sobrecorrentes de Tempo Definido. O tempo de atuação, neste caso, independe do valor da corrente;
- Relê de Sobrecorrente de Tempo Inverso. O tempo de operação é inversamente proporcional ao valor da corrente;
- Relês de Sobrecorrente de Tempo Muito Inverso. São relês que apresentam variações mais acentuadas das características do tempo de atuação com a corrente de atuação;
- Relê de Religamento. Os relês de religamento são relês auxiliares, usados para comandar o religamento dos disjuntores correspondentes, após terem sido abertos por acionamento dos relês de sobrecorrente. Há possibilidade de diversas combinações de ordens instantâneas e temporizadas.

## 4.2 TIPOS DE FALTA

Falta é o termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Há dois tipos de faltas, as faltas transitórias e faltas permanentes (MASSMANN; JÚNIOR, 2021). Nesta seção apresentam-se,

em suma, esses tipos de faltas e os indicadores de qualidade, definidos pelas ANEEL, para as faltas permanentes.

#### **4.2.1 Faltas Transitórias**

As faltas transitórias são aquelas que afetam o circuito temporariamente, ou seja, após a operação de um dos equipamentos de proteção ocorre o religamento do circuito, e a falha é eliminada.

As causas mais comuns das falhas transitórias são:

- Contato momentâneo entre os cabos condutores;
- Descargas atmosféricas;
- Abertura de arco elétrico;
- Isolação precária dos materiais.

#### **4.2.2 Faltas permanentes**

Faltas permanentes são aquelas que necessitam da intervenção do homem para a correção da falha, antes do religamento do circuito. Eventualmente uma falha transitória pode virar uma falta permanente. Algumas causas das falhas permanentes são:

- Queda de uma árvore em cima da linha de distribuição;
- Acidentes de trânsito envolvendo postes de energia elétrica;
- Atos de vandalismo.

#### **4.2.3 Indicadores de qualidade do serviço**

A ANEEL, por meio do PRODIST, estabelece alguns indicadores de qualidade do serviço da concessionária, da energia elétrica entregue e atendimento ao consumidor. Dentre os indicadores de qualidade do produto energia elétrica, estão os indicadores de continuidade do serviço, ou seja, que medem se a energia foi disponibilizada ao consumidor ininterruptamente ou com grandes períodos de falta de energia. Dois dos principais indicadores coletivos são o DEC, a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora e o FEC, a frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora. O DEC nada mais é que a média das durações de interrupção em um conjunto de consumidores. Cada consumidor possui o indicador DIC, no que lhe concerne, o FEC é a média do número de interrupções do conjunto. Da mesma maneira, cada consumidor possui o indicador FIC (ANEEL, 2021).

A ANEEL publica anualmente o Ranking de Continuidade, instrumento que compara o desempenho de uma distribuidora em relação às demais empresas do país no quesito de continuidade do fornecimento de energia elétrica. A classificação é elaborada com base no Desempenho Global de Continuidade (DGC), formado a partir da comparação dos valores apurados de DEC e FEC das concessionárias em relação aos limites estabelecidos pela ANEEL para esses indicadores. A partir dessa comparação, há um incentivo para que as concessionárias busquem a melhoria contínua da qualidade do serviço. As concessionárias que mais perderam colocações foram a EQUATORIAL MA, que registrou queda de 20 posições, e a CELESC, com o recuo de 9 posições em comparação a 2020, ocupando o 24<sup>o</sup> lugar do ranking (ANEEL, 2022a).

De acordo com o módulo 8 da Resolução Normativa ANEEL n<sup>o</sup> 956/2021, que estabelece o PRODIST, a distribuidora deve compensar os titulares das unidades consumidoras que, de acordo com as medições, estiveram submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária (DRP) ou Índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica (DRC), assim como os titulares das unidades consumidoras atendidas pelo mesmo ponto de conexão (ANEEL, 2021).

O valor das compensações de continuidade pagas pelas concessionárias diretamente aos consumidores registrou aumento em 2021, passando de R\$ 634 milhões, em 2020, para R\$ 718 milhões, em 2021. A quantidade de compensações também apresentou leve incremento, de 79,49 para 79,97 milhões. Em 2022, a CELESC já acumula o valor das compensações de R\$ 7.773.524,71, conforme a imagem a seguir (ANEEL, 2022b).

Figura 16 – Índices de Compensação de Continuidade CELESC DIS 2022

Índices de Compensação de Continuidade					
Região SUL					
CELESC-DIS - 2022					
Compensações	DIC, FIC e DMIC			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	324.723	0	0	25.070	349.793
Valor das compensações (R\$)	7.368.697,42	0,00	0,00	404.827,29	7.773.524,71
As informações para o ano corrente são parciais, pois o envio dos dados ainda não está completo					

Fonte: ANEEL, 2022

#### 4.3 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS DO PROTÓTIPO A SER DESENVOLVIDO.

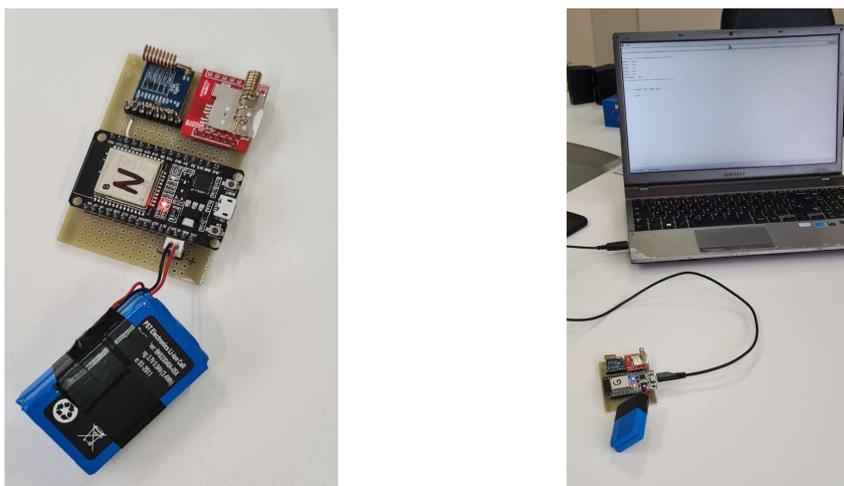
Esta dissertação descreve a realização da Fase I de desenvolvimento de produto. Inicialmente, o projeto se propunha a modelar um sistema de detecção de falhas

das redes de distribuição de energia, desenvolver um protótipo de dispositivo para realizar esta detecção de falhas, avaliar o protótipo desenvolvido em testes de bancada com a simulação das falhas e selecionar e avaliar experimentalmente tecnologias de redes sem fio para suporte as comunicações de um sistema de detecção de falhas das redes de distribuição de energia.

Os primeiros testes realizados a fim de cumprir a proposta inicial foram referentes a tecnologias de comunicação sem fio. Os testes foram realizados na cidade de Urussanga, Santa Catarina. Inicialmente a rede de distribuição desta cidade seria utilizado como modelo. Foi realizada uma avaliação experimental do desempenho das tecnologias de comunicação LoRa/*Long Range Wide Area Networks* (LoRaWAN) e GSM, para isso, cinco redes de comunicação foram montadas na cidade de Urussanga, Santa Catarina. Cada rede foi composta por dois nodos, um da tecnologia GSM, outro da tecnologia LoRa/LoRaWAN e um *Gateway*. Nas redes onde a distância entre o *Gateway* e os nodos foi maior de 2 km também foram utilizados repetidores de sinal LoRa. A topologia aplicada pelo protocolo LoRaWAN é a estrela, onde o gateway atua como antena emissora e estação principal, enquanto os dispositivos finais (nodos), atuam como estações secundárias.

Os nodos de comunicação, foram alimentados por um *Battery Management System* (BMS) de duas baterias de 3,7 V e 0,9 Ah (3,4Wh) ligadas em série, totalizando o fornecimento de 7,2 V para os dispositivos, protegidos por uma case de plástico injetado, a fim de prevenir danos.

Figura 17 – Nodo desenvolvido para testes de comunicação e monitor serial sendo executado.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dispositivos foram controlados por um monitor serial sendo executado em um notebook conectado via porta serial. O fio que pode ser visto nas imagens é responsável pela conexão. Inicialmente, o *Gateway* foi posicionado em um ponto fixo, a

sede da EFLUL. Já os nodos de comunicação foram deslocados aos pontos estipulados previamente, e instalados nos postes por meio de cintas plásticas.

Para uma simulação aproximada da comunicação entre a central receptora de dados e um dispositivo identificador de falhas da rede elétrica, foi utilizada como modelo a rede de distribuição de energia da EFLUL, empresa distribuidora de energia da cidade de Urussanga. Cabe ressaltar que no relevo da cidade, predominam os terrenos de topografia acidental, havendo 30% de terrenos planos ondulados e 70% da área possuem declividade acima de 20%. Urussanga está localizada a uma altitude de 49 metros acima do nível do mar. O ponto escolhido para a localização da central receptora dos dados (*Gateway*) foi a sede da EFLUL, já os pontos escolhidos para a instalação dos dispositivos de comunicação (nodos) foram postes de 11 metros de altura localizados à 1 km, 2 km, 4 km, 5 km e 14 km da central receptora dos dados, conforme a Figura 25. Sendo que os pontos a 4 km, 5 km e 14 km se encontravam em área rural, ou seja, haviam "barreiras" de comunicação como o relevo e a vegetação.

Figura 18 – Cases plásticos utilizados para proteção e mapa da rede com demarcações de distância em 1 km, 2 km, 4 km, 5 km.



Fonte: Elaborada pelo autor

Em cada ponto, foi testada a transmissão de pacotes de 50, 100 e 200 bytes, sendo que foram realizadas três transmissões de pacotes com a duração de 10 minutos para cada tamanho de pacote, totalizando 9 testes de 10 minutos em cada ponto. Em cada teste foram analisados o total de bytes recebidos, a quantidade de pacotes recebidos, a quantidade de pacotes perdidos, a quantidade de pacotes recebidos com erro e o tempo médio de atraso dos pacotes.

Figura 19 – Testes realizados em campo em Urussanga na rede EFLUL



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – Dispositivo instalado na rede da EFLUL



Fonte: Elaborada pelo autor

Os testes realizados não obtiveram êxito com a rede LoRa/LoRaWAN, constatou-se que o relevo da cidade em questão e o fator climático do dia dos testes não foram fatores favoráveis. Após a realização dos testes, houve dificuldades relacionadas ao desenvolvimento da proposta inicial, as quais estavam relacionadas às restrições devido à pandemia da Covid-19, a complexidade de deslocamento e custos envolvidos para a realização dos testes, por isso optou-se por desenvolver um dispositivo baseado na experiência do usuário. Neste caso, foi realizado um contato com a CELESC, a qual é a concessionária responsável pela distribuição de energia da cidade onde este trabalho está sendo desenvolvido.

Em entrevista com a equipe da CELESC Distribuição S.A. - Núcleo Oeste/Sede Chapecó e o chefe (em exercício) da Agência Regional da CELESC e com o responsável pelo DPOP e a DVAS, foram estabelecidos os principais requisitos para o desenvolvimento do equipamento, sendo eles: custo de implementação e manutenção, praticidade de instalação e autonomia na alimentação do dispositivo.

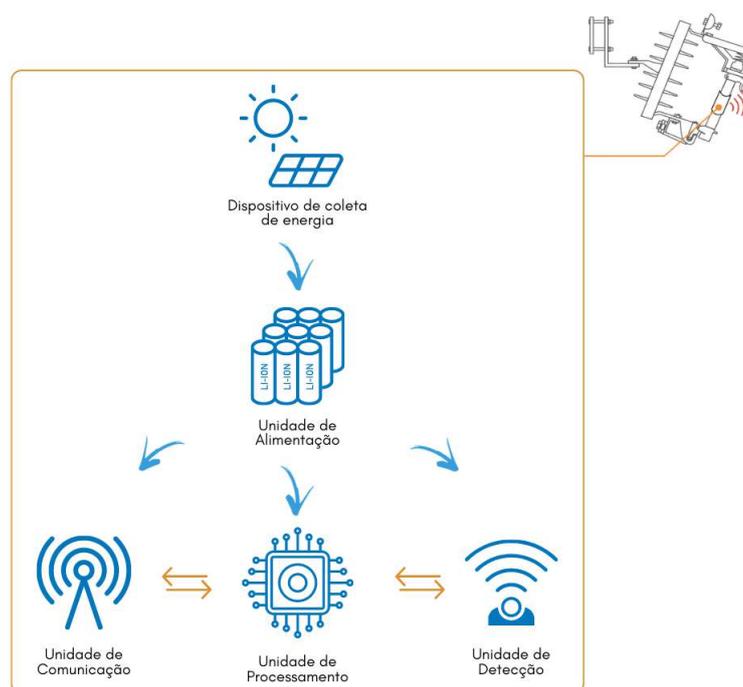
Após entrevista estabeleceu-se a nova finalidade do dispositivo a ser desenvolvido, sendo esta reduzir o tempo de duração das faltas de energia e auxiliar na solução deste grande problema que vem causando enormes prejuízos para as concessionárias. Visto isso, o presente trabalho se propõe a desenvolver um protótipo que visa informar a distribuidora de energia locais com falta de energia permanente, através da identificação das chaves fusíveis abertas, visto que estas são os dispositivos de proteção acionados em casos de curto-circuito ou uma sobrecarga. No levantamento de requisitos também foram relatadas algumas tentativas de monitoramento da rede que não obtiveram sucesso por parte da concessionária, onde o dispositivo empregado apresentou falhas da comunicação e também não possuía autonomia de alimentação após falta de energia, por ser alimentado diretamente pela rede e não possuía baterias ou forma de alimentação auxiliar. Por fim, foram elencados os seguintes requisitos a serem atendidos pelo dispositivo:

- 1) Enviar bilhetes de confirmação com tempo pré-estabelecido, para aferição diária do dispositivo e do sistema de comunicação empregado, assim como para confirmar o fornecimento de energia naquela região;
- 2) Detectar o deslocamento do elo fusível;
- 3) Comunicar o evento de deslocamento ao centro de operações;
  - 3.1) Comunicar a localização geográfica;
  - 3.2) Comunicar horário do evento;
  - 3.3) Comunicar código da chave de ocorrência (Fase);
- 4) Comunicar o evento de deslocamento mesmo no caso de uma falha permanente (comunicar sem alimentação direta);

#### 4.4 PROJETO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Com base nos requisitos levantados e apresentados na seção anterior, foi projetado um dispositivo para a detecção de falhas permanentes do sistema de distribuição de energia elétrica. A Figura 21 ilustra as principais partes do dispositivo.

Figura 21 – Esquema com principais aspectos do protótipo



Fonte: Elaborada pelo Autor

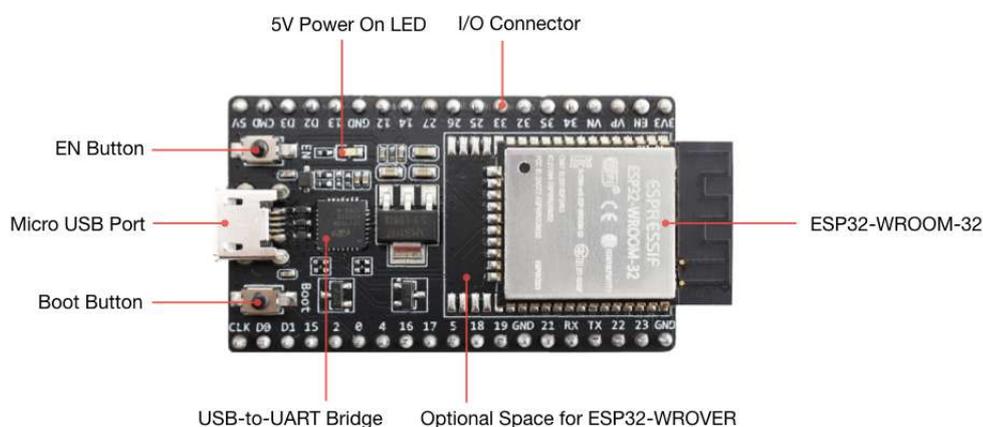
O protótipo se propõe a monitorar as redes de distribuição de energia elétrica em média tensão (13,8kV à 34,5kV), sua finalidade é detectar o deslocamento (abertura) da porta fusível causado pelo rompimento do elo fusível em casos de curto-circuitos ou de sobrecarga. Nestes casos o fusível se funde e queima, interrompendo a passagem de corrente que danificaria o circuito. Este evento de acionamento de fusíveis na rede de distribuição será informado em uma central de monitoramento através da rede de comunicação sem fio. Após o envio deste evento de detecção de abertura é verificada a posição do fusível, o equipamento permitirá verificar a continuidade do fornecimento de energia, ou seja, se a chave permanece fechada ou se foi aberta interrompendo o fornecimento, provocando uma falta permanente. Nas seguintes seções serão apresentados os principais aspectos tecnológicos acerca do desenvolvimento do protótipo.

#### 4.4.1 Unidade de Processamento

A unidade de processamento é o núcleo de um nó sensor, é responsável por processar os dados localmente e tomar decisões sobre onde e quando encaminhá-los. Para o desenvolvimento do protótipo do dispositivo foi utilizado o microcontrolador ESP32, fabricado pela *ESPRESSIF* Systems. A família de microcontroladores ESP32

é bastante utilizada em aplicações de internet das coisas (IoT) por conta do baixo consumo de energia, alto desempenho e custo reduzido. Este microcontrolador contém *Wi-Fi* e *Bluetooth* integrado, bem como as interfaces: *Secure Digital* (SD) card, *Universal Asynchronous Receiver / Transmitter* (UART), *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Secure Digital Input Output* (SDIO), *Inter Integrated Circuit* (I2C), *LED Pulse Width Modulation* (PWM), *Motor PWM*, *I2C*, *Infravermelho*, contador de pulso, *General Purpose Input/Output* (GPIO), sensor de *touch* capacitivo, *Analog-to-Digital Converter* (ADC) e *Digital-to-Analog Converter* (DAC). (ESPRESSIF, 2021; MELO *et al.*, 2019).

Figura 22 – ESP32-DevKitC V4 com o módulo ESP32-WROOM-32

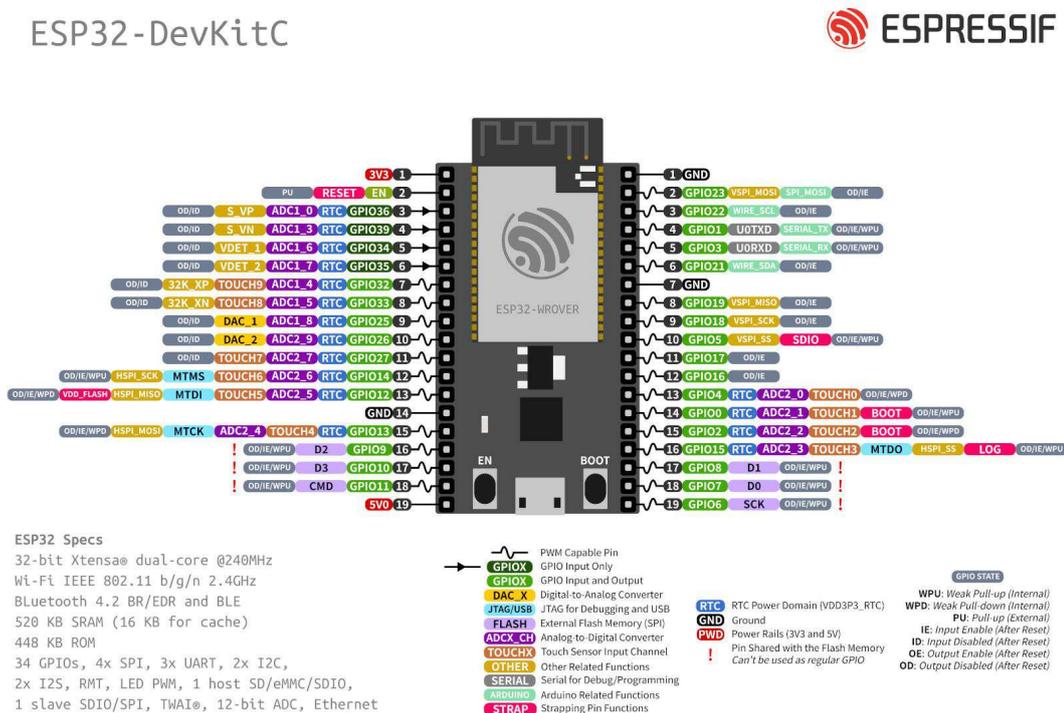


(ESPRESSIF, 2021)

O Kit de desenvolvimento da ESP32 utilizado foi o *DevKitC*, apresentado na Figura 22. Este Kit facilita a prototipagem ao ser utilizada com *protoboard*, pois conta com conversor e conector USB para a comunicação UART, LED's e botões para interface e pinos *Interconector de Componentes Periféricos* (ICP), o layout de pinos é apresentado na Figura 23.

Como recursos, o microcontrolador ESP32 possui um microprocessador *Xtensa* dual-core de 32-bit LX6 com velocidade de até 240 MHz, 448 kB de memória Memória Somente de Leitura (ROM) para o *booting* e controle de núcleos e 520 kB Memória de Acesso Randômico Estática (SRAM) dados e instruções. Possui 4 MB de memória flash SPI, Wi-Fi 802.11b/g/n, *Bluetooth* V4.2 *Basic Rate* (BR)/*Enhanced Data Rate Radio* (EDR) e *Low Energy* (LE), Tensão de operação entre 3,0 a 3,6 V e temperatura de operação de 40 a 85 °C (ESPRESSIF, 2021).

Figura 23 – ESP32-DevKitC Layout de pinos



(ESPRESSIF, 2021)

#### 4.4.2 Unidade de Comunicação

Após a realização de pesquisa referente às tecnologias possíveis a serem empregadas no dispositivo, apresentada no Capítulo 5 do presente trabalho, optou-se em utilizar a tecnologia GSM/GPRS no equipamento através de um módulo SIM800L. O SIM800L é um módulo celular em miniatura, sua principal característica é que ele é pequeno e de baixo custo. Este módulo suporta quad-band rede GSM/GPRS, disponível para GPRS e dados de mensagens SMS de transmissão remota. A placa possui tamanho compacto e baixo consumo de energia. Com a técnica de economia de energia, este módulo consome somente 1 mA no modo de suspensão (KANANI; PADOLE, 2020).

Esta unidade converte uma sequência de bits recebidos da unidade de processamento ESP32 através da porta UART, suporta comandos incluindo 3GPP TS 27007, 27005 e SIMCOM reforçada comandos AT. O SIM800L é Quad-band 850 / 900 / 1800 / 1900 MHz, ou seja, se conecta em qualquer rede GSM global, com qualquer *Subscriber Identity Module* (SIM) e com qualquer operadora. Este módulo também consegue fazer e receber chamadas de voz usando um fone de ouvido ou um alto-falante externo, envia e recebe mensagens SMS, envia e recebe dados GPRS (*Transmission Control Protocol* (TCP)/*Protocolo de Internet* (IP), *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), entre outros), digitaliza e recebe transmissões de rádio FM. Sua tensão de operação varia

de 3,7V a 4,2V e a corrente máxima suportada é de 2A. O módulo também funciona na rede 3G, mas não transmite nesta velocidade (KANANI; PADOLE, 2020; MELO *et al.*, 2019).

- Tensão de alimentação: 3,7V até 4,2V
- Picos de consumo: Até 2A
- Consumo médio em conexão: 300mA

A alimentação do módulo pode ser realizada por baterias de *lithium* que costumam fornecer uma tensão de nominal de 3,6V, na faixa do componente, porém este não é um valor comum para fontes padrões disponíveis no mercado. Além disso, o fabricante informa que o módulo pode consumir até 2A, o que deve ser considerado no dimensionamento do sistema de alimentação.

Figura 24 – Módulo SIM800L



Fonte: (KANANI; PADOLE, 2020)

Após a inicialização do módulo de energia, o SIM800L procura redes celulares e faz login automaticamente. O LED integrado exibe o estado da conexão em que piscar rápido indica não haver cobertura de rede e piscar lentamente indica que se está conectado.

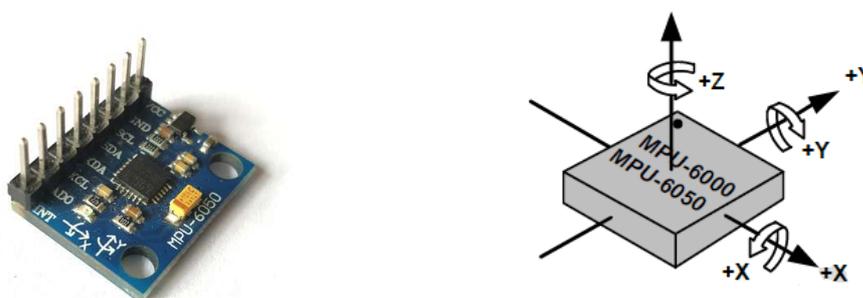
Com o módulo, optou-se em utilizar um chip de comunicação multi operadora Machine to Machine (M2M), o qual é uma tecnologia desenvolvida com a finalidade de transmitir e receber dados por meio da comunicação entre sistemas e equipamentos remotos. Essa comunicação é utilizada comumente em rastreadores e diversos equipamentos IoT. Estes chips funcionam nas redes da Tim, Oi, Claro, Vivo e Algar e possuem em média 20 MB mensais para transmissão de dados.

#### 4.4.3 Unidade de Detecção

Neste protótipo, optou-se em utilizar o MPU6050 Sistema Micro Eletromecânico (MEMS), que consiste em um acelerômetro de três eixos e um giroscópio de três

eixos, ou seja, um sensor de movimento de seis eixos, que pode obter diretamente a velocidade do ângulo de rotação de três eixos e a aceleração de três eixos com o módulo como origem da coordenada. É composto por um Processador de Movimento Digital (DMP), que possui propriedade de resolver cálculos complexos (TANWAR *et al.*, 2021; MELO *et al.*, 2019).

Figura 25 – Módulo MPU6050

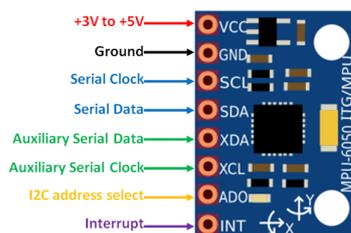


Fonte: (AVE, 2012)

O giroscópio mede a velocidade de rotação ( $rad/s$ ), esta é a mudança da posição angular ao longo do tempo ao longo dos eixos X, Y e Z. Isso nos permite determinar a orientação de um objeto. O acelerômetro mede a aceleração (taxa de variação da velocidade do objeto). Ele detecta forças estáticas como a gravidade ( $9,8 m/s^2$ ) ou forças dinâmicas como vibrações ou movimento. O MPU6050 mede a aceleração nos eixos X, Y e Z. Idealmente, em um objeto estático, a aceleração no eixo Z é igual à força gravitacional e deve ser zero nos eixos X e Y. Usando os valores do acelerômetro, é possível calcular os ângulos de rotação e inclinação. No entanto, não é possível calcular a guinada, ou ainda, mudanças e desvios bruscos de orientações. Podem ser combinadas as informações de ambos os sensores para obter informações mais precisas sobre a orientação do sensor.

O MPU6050 consiste em um hardware conversor analógico para digital de 16 bits. Devido a esse recurso, ele captura movimento tridimensional simultaneamente. Este módulo possui alguns recursos relevantes e facilmente acessíveis (PENGFEI; SHIWEN; ZHANG, 2021). Para que fosse realizada a comunicação entre o MPU6050 e a ESP32 foi utilizado o protocolo de comunicação I2C. Além disso, o módulo possui sensor de temperatura embutido, sua tensão de operação varia de 3V a 5V, possui endereço I2C configurável e pode ser usado para interface com outros dispositivos I2C como magnetômetro (AVE, 2012).

Figura 26 – Pinagem MPU6050



Fonte: (AVE, 2012)

#### 4.4.4 Unidade de Alimentação

Apresentar-se-á uma discussão mais aprofundada sobre os aspectos relacionados à fonte de alimentação do protótipo no Capítulo 5. Para os testes iniciais foram escolhidos os componentes listados a seguir para compor o protótipo.

##### 4.4.4.1 MT3608

O MT3608 é um conversor *step-up* de modo de corrente de frequência constante SOT23 de 6 pinos, projetado para aplicações de baixa potência. O MT3608 opera a 1,2 MHz e permite o uso de capacitores e indutores pequenos e de baixo custo. O *soft-start* interno reduz a corrente de pico de entrada, portanto, aumenta a vida útil da bateria (AEROSEMI TECHNOLOGY CO, 2017).

Este conversor possui um MOSFET de potência de 80  $m\Omega$  integrado, sua tensão de entrada é de 2V a 24V, seu limite de corrente do interruptor interno 4A, sua tensão de saída é ajustável e vai até 28V. Apresenta eficiência máxima de 97%, sua frequência de comutação fixa é de 1,2 MHz, está disponível em um encapsulamento SOT23-6 de 6 pinos e possui um modo de modulação automática de frequência de pulso em cargas leves (AEROSEMI TECHNOLOGY CO, 2017).

Figura 27 – MT3608



Fonte: (AEROSEMI TECHNOLOGY CO, 2017)

#### 4.4.4.2 LM2596

O Módulo Regulador de Tensão LM2596 trabalha como um conversor DC-DC no modo Step Down, ele consegue reduzir uma carga de até 3A com ótima eficiência, sendo que 2A é sua corrente nominal e 3A a máxima. Estes reguladores foram projetados para minimizar o número de componentes externos para simplificar o projeto da fonte de alimentação (DESCRIPTION; APPLICATION, 1999).

A tensão de saída pode ser ajustada entre 1,5 a 35V (ajustável, entrada deve ser 1,5V maior que a saída), tendo como entrada de 3,2 a 40V. Possui uma velocidade de comutação de 150KHz e pode ser aplicado em circuitos onde a saída de um sensor é superior a 5V. Sua eficiência de conversão é de até 92% (quanto maior a tensão de saída, maior a eficiência), a velocidade de resposta dinâmica é de 5% e sua temperatura de operação é de 0 a 85 °C (DESCRIPTION; APPLICATION, 1999).

Figura 28 – LM2596



Fonte: (DESCRIPTION; APPLICATION, 1999)

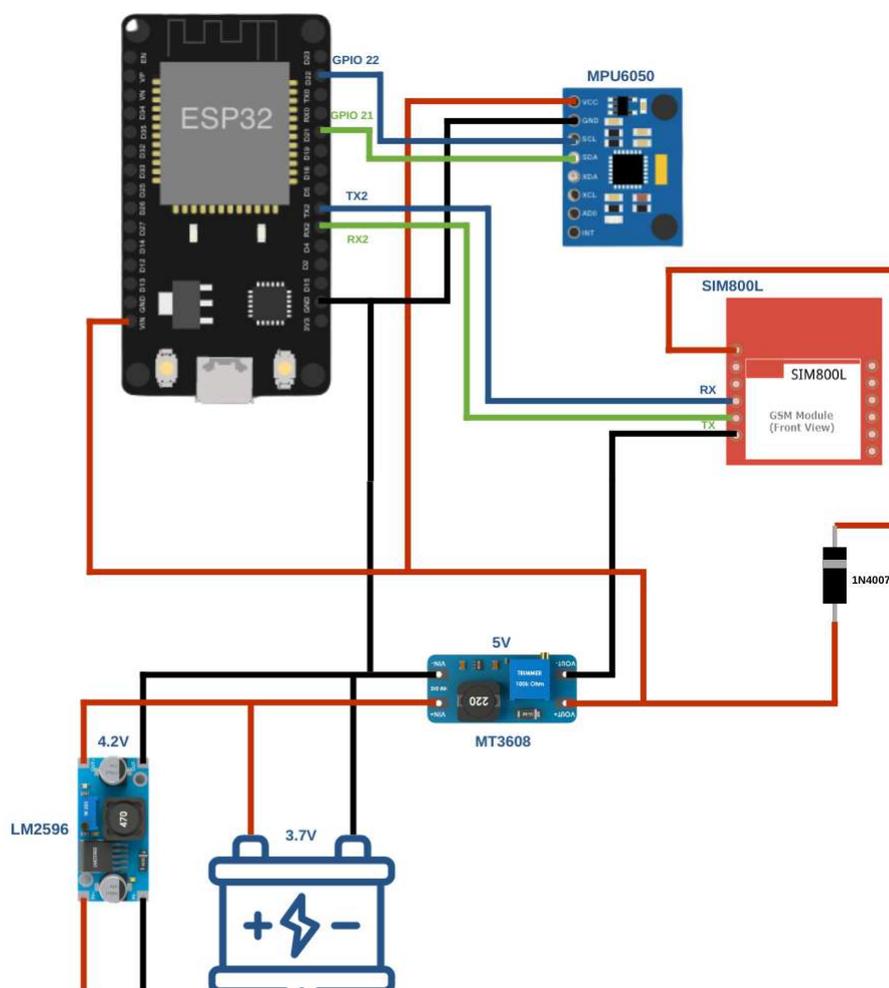
#### 4.4.4.3 Baterias

Para haver autonomia do equipamento em caso de falta de energia, foi acoplado ao protótipo um banco com três baterias recarregáveis de *Lithium-ion* conectadas em paralelo, com tensão de 3,7V e corrente de 0,9Ah (potência: 3,4W) do modelo BK633048A-05X, do fabricante PST Electronics.

### 4.5 DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Após os componentes escolhidos, deu-se a etapa de montagem do equipamento, conforme esquema a seguir.

Figura 29 – Esquemático do protótipo proposto



Fonte: Elaborada pelo Autor

O sistema de alimentação foi composto por uma fonte de tensão Step Down, a qual pode ser energizada por uma fonte de alimentação comum ou por outro dispositivo de colheita de energia, como um módulo solar. Esta fonte suporta até 40V Corrente Contínua (CC) sendo regulada para 5V a fim de carregar o banco de baterias conectado. O modelo de baterias utilizadas possuem BMS interno, os quais são alimentados por 5 Volts.

Para estabilizar o funcionamento do equipamento, utilizamos o módulo conversor de tensão *Step Up MT3608*, ele permite o pleno funcionamento do circuito mesmo em baixa carga de bateria. Conforme apresentado nas características da unidade de comunicação, o módulo SIM800L necessita de 3,5 a 4,5V para seu funcionamento, para que esta faixa de tensão seja respeitada foi conectado um diodo 1N4007, este diodo tem a função de manter a tensão na faixa desejada, visto que reduz em 0,7V a

tensão de operação, sem que seja necessária a adição de mais um regulador.

Ao módulo *Step Up* também foi conectado o dispositivo ESP32 através do pino  $V_{in}$  e ao MPU6050 utilizando o pino  $V_{CC}$ , conectando também todos os *Ground's* em comum.

Foram utilizadas 3 baterias de 900mAh totalizando assim 2,700 Ah de energia, podendo alimentar o dispositivo por em média de 27 horas sem otimizações no código ou modo de economia de energia.

O ESP32 foi conectado ao sensor MPU6050 conforme mostrado no diagrama esquemático apresentado anteriormente, foi conectado o pino *Serial Clock* (SCL) ao  $GPIO_{22}$  e o pino *Serial Data* (SDA) para  $GPIO_{21}$ . O processo de alimentação do MPU6050 ocorre pela conexão do pino  $V_{CC}$  ao módulo *Step Up* e, conjunto com o  $V_{in}$  da ESP32, o pino *Ground* foi conectado ao negativo comum dos módulos.

Foi utilizada a biblioteca Adafruit, o código utilizado obtém a velocidade angular (giroscópio) nos eixos x, y e z, a aceleração nos eixos x, y e z e a temperatura. Foram realizados eventos de movimento semelhantes com o esperado em caso de abertura do porta fusível e obtiveram-se leituras onde os eixos x e z se inverteram após a realização do movimento.

Foram realizados testes de movimento do sensor para validação dos dados obtidos através da obtenção de uma amostra a cada 500 ms. Assim que detectada a inversão dos eixos X e Z é verificado nas próximas 10 amostras se o padrão dos eixos permanece, em caso afirmativo o evento de movimento é validado.

A alimentação do SIM800L foi realizada como citada anteriormente, alimentação provém do *Step Up*, passa pelo diodo e chega até ao pino  $V_{CC}$  do módulo para alimentação do mesmo. As conexões relativas à comunicação foram realizadas através do pino *Receive Across* (Rx) do SIM800L, o qual foi conectado no pino *Transmit Across* ( $Tx$ )<sub>2</sub> da ESP32 e do pino Tx do SIM800L, o qual foi conectado ao pino  $Rx_2$  da ESP32.

O dispositivo se conecta através da rede GSM/GPRS, esta conexão acontece periodicamente. Este período das conexões pode ser pré-definido pelo usuário responsável pelo monitoramento da rede. Estas conexões possuem a finalidade de validar a comunicação e a situação da posição do cartucho na chave fusível.

Após as conexões realizadas, o protótipo foi acoplado no cartucho de uma chave-fusível, como pode ser observado na Figura 30, para que os testes funcionais pudessem ser realizados.

Figura 30 – Protótipo montado e acoplado no cartucho da chave-fusível

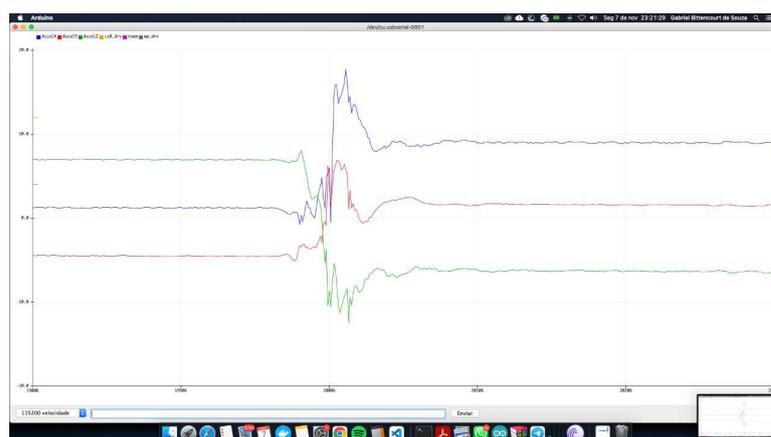


Fonte: Elaborada pelo Autor

#### 4.6 TESTES FUNCIONAIS

As falhas que causam a abertura da chave-fusível, como curto-circuitos ou sobrecargas, podem ser detectadas, pois o evento da queda do cartucho é constatado pelo MPU6050. O acelerômetro gera um evento de interrupção para a ESP32 que comparará o sinal do giroscópio (posição inicial e final) confirmando a abertura da chave. A alteração de estado é enviada para um servidor através da rede GPRS, além da notificação de falha, também são enviadas as coordenadas geográficas do transformador onde a chave está alocada e o *status* da bateria do dispositivo.

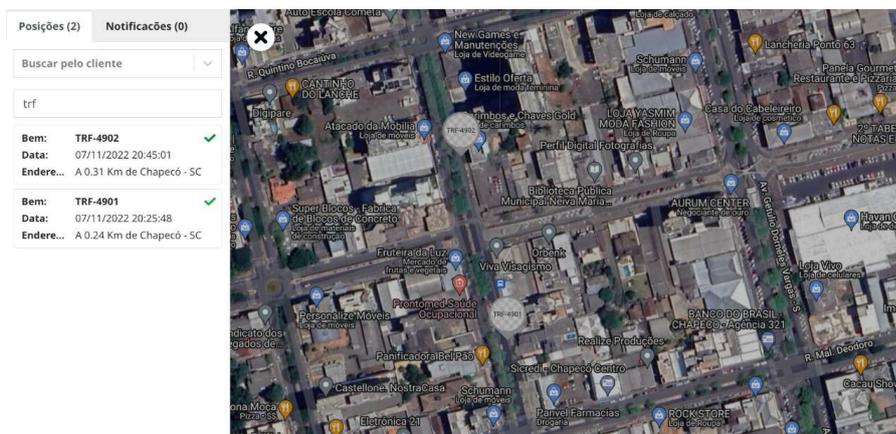
Figura 31 – Evento da queda do cartucho constatado pelo MPU6050



Fonte: Elaborada pelo Autor

Para apresentação dos resultados, foi utilizada uma plataforma desenvolvida para demonstrar o funcionamento do dispositivo e cadastrar a localização de dois transformadores reais da cidade de Chapecó/SC.

Figura 32 – Transformadores com ambas as chaves fechadas.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 33 – Transformadores com chaves fechadas e abertas, respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Os transformadores com as chaves fechadas são demonstrados no sistema através do símbolo "check" em verde ao lado da sua identificação, quando as chaves estiverem na condição de abertas este mesmo símbolo aparece na cor vermelha, na barra lateral esquerda. Além do sinal de "check" (verde ou vermelho), quando um transformador possui alguma chave aberta, aparece com um ícone de antena de comunicação na parte superior da sua identificação diretamente no mapa.

#### 4.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

O protótipo do dispositivo desenvolvido teve um custo final de U\$27.25, sendo que os custos por cada componente estão descritos na tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos itens utilizados no protótipo

Item	Valor	Referências
<i>LM2596</i>	U\$ 0.64	(ALIEXPRESS, 2023d)
<i>MT3608</i>	U\$ 0.38	(ALIEXPRESS, 2023e)
<i>SIM800L</i>	U\$ 2.55	(ALIEXPRESS, 2023)
<i>1N4007</i>	U\$0.01	(ALIEXPRESS, 2023b)
<i>ESP32</i>	U\$7.44	(ALIEXPRESS, 2023a)
<i>MPU8050</i>	U\$4.79	(ALIEXPRESS, 2023c)
<i>Baterias 3,7V</i>	U\$11.44	(ALIEXPRESS, s.d.)
<b>Total</b>	U\$27.25	

Além dos custos de desenvolvimento, seu custo de funcionamento mensal seria de R\$4,90 por unidade, considerando a contratação de um SIM multi operadoras com pacote de dados de 10 MB mensais.

Foram utilizados módulos disponíveis no mercado para facilitar a prototipação, para desenvolver um produto final se faz necessária a fabricação de uma placa *Printed Circuit Board* (PCB) com a montagem do tipo *Surface Mounted Device* (SMD) dos componentes necessários, bem como necessitaríamos da homologação do dispositivo na Anatel, mesmo o módulo SIM800L já sendo certificado pelo órgão.

Utilizando estas formas de produção em larga escala de produção, estima-se, baseado na experiência das empresas apoiadoras do projeto envolvidas, uma redução de custo de produção de 15% a 30%. Além disso, a adesão de SIM multi operadoras em grandes quantidades também abre margem para a negociação dos valores mensais dos pacotes de dados.

#### 4.7.1 Custo para implementação em Chapecó - SC

De acordo com documento fornecido pela CELESC Núcleo Oeste/Sede Chapecó, ANEXO 1 deste trabalho, a cidade possui atualmente instalados em sua rede de distribuição de energia 44.097 postes, 3.947 transformadores e 1.308 chaves fusíveis. Visto isso, o custo estimado para desenvolver o dispositivo a ser implementado na rede da cidade seria de U\$ 35.643,00. Considerando uma redução mínima de 15% no custo para produção em larga escala, o valor de produção para as 1.308 unidades seria de U\$ 30.296,55.

Comparando com o custo de uma chave fusível, a qual no momento da realização do presente trabalho estava no valor de U\$ 90,41 (**teky**) o protótipo apresenta um incremento de 30% no custo inicial da aquisição da chave. O custo relacionado ao uso da rede celular e da adesão de um pacote de dados mensal voltado a equipamentos

IoT, como o mencionado no capítulo anterior, seria estimado em um valor aproximado à R\$ 6.409,20 reais mensais.

#### 4.8 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Tomando como exemplo os produtos de engenharia, o processo de desenvolvimento de produtos inclui diferentes estágios, como entendimento da área de aplicação, levantamento de requisitos, planejamento do produto, projeto conceitual, projeto detalhado, fabricação, teste e melhoria, produção e assim por diante. O presente trabalho se conteve em realizar as fases do processo de desenvolvimento do produto, por entrevistas com atores relacionados, estudo do estado da arte do tema onde o produto será aplicado e o desenvolvimento de um protótipo ao nível de prova de conceito.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para melhor entendimento do contexto onde o protótipo seria inserido. Foram descritos os equipamentos de proteção utilizados no âmbito da rede de distribuição da CELESC, concessionária responsável pela maior parte da rede elétrica de distribuição em Santa Catarina. Os dispositivos descritos foram a Chave Fusível, os elementos mais utilizados na proteção de redes de distribuição urbanas e rurais, por apresentar preços reduzidos e desempenho satisfatório para o nível de proteção que se deseja. Os Disjuntores, dispositivos utilizados na proteção de sistemas elétricos e que todo alimentador de distribuição deve conter. E os religadores, equipamentos automáticos de interrupção da corrente elétrica dotados de uma determinada capacidade de repetição em operações de abertura e fechamento de um circuito, durante a ocorrência de um defeito. Ele opera quando detecta correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos um número predeterminado de vezes.

Em seguida foram elencados os principais motivos de faltas, falta é o termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Sendo que estas podem ser classificadas em: faltas transitórias e faltas permanentes. Também foram descritos alguns indicadores de qualidade do serviço da concessionária neste capítulo.

Após realizada a revisão bibliográfica, deu-se início ao desenvolvimento do protótipo. Inicialmente, o projeto se propunha a modelar um sistema de detecção de falhas da rede de distribuição de energia e desenvolver um protótipo de *Smart Meter* para realizar esta detecção de falhas. Os primeiros testes realizados a fim de cumprir a proposta inicial foram referentes a tecnologias de comunicação sem fio. Os testes foram feitos na cidade de Urussanga, Santa Catarina, mas não foi obtido êxito neste primeiro experimento.

Por entrevistas foram estabelecidos os novos requisitos a serem atendidos pelo dispositivo, os quais foram principalmente relacionados a autonomia energética do dispositivo e a utilização de uma tecnologia de comunicação que pudesse fornecer

informações com segurança sobre ocorrências de falha na rede (comunicar sem informação direta).

A partir dos requisitos estabelecidos, foram escolhidos os componentes para o desenvolvimento do protótipo. Estes componentes foram divididos em, unidade de processamento, unidade de comunicação, unidade de detecção e unidade de alimentação. Após os componentes escolhidos, deu-se a etapa de montagem do equipamento e a realização dos testes funcionais.

Pode-se observar nos testes funcionais do protótipo que o objetivo de identificar a abertura de uma chave fusível foi atendida, visto que foram obtidas leituras onde os eixos x e z do giroscópio se inverteram após a realização do movimento. A comunicação do dispositivo foi validada também através da apresentação dos dados em uma plataforma web. Mais informações sobre a conexão do dispositivo com a interface WEB não foram citadas no presente trabalho devido à propriedade intelectual dos códigos utilizados.

Por fim, foram apresentados dados de viabilidade econômica do dispositivo, sendo que pode ser considerada uma redução de custos de 15% a 30% do valor do protótipo caso o dispositivo seja produzido em larga escala. Com a realização das etapas propostas neste capítulo, pode-se constatar que é possível o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo que cumpre a finalidade de identificar falhas permanentes da rede elétrica.

O capítulo seguinte nos traz informações referentes as redes de comunicação sem fio. Estas desempenham um papel vital nas redes inteligentes de energia, permitindo a transmissão de dados em tempo real entre diferentes dispositivos conectados à rede. Essas redes são necessárias para garantir a eficiência operacional da rede elétrica e a coleta de dados importantes sobre o consumo de energia, além de permitir a monitorização e controle remoto de dispositivos e sistemas.

A tecnologia sem fio também facilita a implementação de dispositivos de controle de carga em tempo real, a análise de dados e a tomada de decisões para garantir o fornecimento de energia mais eficiente e seguro. Além disso, as redes sem fio permitem a expansão e a escalabilidade da infraestrutura de rede inteligente, ao ser possível adicionar dispositivos e expandir a cobertura sem precisar de cabos adicionais ou de uma grande intervenção na infraestrutura existente. O foco maior do capítulo se dará na rede GPRS, visto que esta quando utilizadas em sensores aplicados na rede elétrica pode oferecer vantagens como a comunicação remota e em tempo real.

A utilização de baterias recarregáveis em sensores aplicados na rede elétrica traz diversos benefícios, principalmente quando se trata de dispositivos de detecção de faltas de energia. As baterias recarregáveis são ideais para esse tipo de aplicação porque permitem que os sensores funcionem mesmo durante uma queda de energia, garantindo a continuidade da monitoração. Além disso, elas são uma opção mais sus-

tentável e econômica em comparação com as baterias descartáveis, já que podem ser recarregadas várias vezes e não precisam ser substituídas com frequência. visto isso, no capítulo seguinte será apresentado um modelo matemático desenvolvido para analisar a durabilidade de baterias recarregáveis que utilizam EH.

## 5 REDES SEM FIO E MODELO DE BATERIA

Esse capítulo apresenta as contribuições científicas desta dissertação de mestrado. Na primeira parte, apresenta-se uma pesquisa bibliográfica, realizada para determinar a melhor tecnologia de comunicação sem fio a ser empregada no dispositivo em desenvolvimento. Na sequência, descreve-se, sumariamente, um modelo analítico de baterias recarregáveis que foi proposto e validado no decorrer deste trabalho. O modelo de bateria foi publicado em:

- RODRIGUES, LEONARDO M.; BITENCOURT, NATHÁLIA L.; RECH, LUCIANA; MONTEZ, CARLOS; MORAES, RICARDO. *An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research*, v. 44, n.7, p. 5243-5258, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5269>.

### 5.1 REDES SEM FIO

A principal ideia por trás da arquitetura de *Smart Grid* é integrar as redes elétricas e as infraestruturas de comunicação. Como consequência dessa integração, muitas tecnologias modernas e estratégias de controle, como geração distribuída, gerenciamento de demanda, diagnóstico de falhas e recursos de monitoramento, estão sendo inseridas nas redes elétricas tradicionais. Para atingir os requisitos básicos relacionados à modernização das redes elétricas, deve-se haver investimentos e melhorias nas áreas de medição de energia (*Smart Meters*), de comunicação sem fio e em métodos de controle inteligentes (COLAK; GULER; AHMED, 2021).

As tecnologias de comunicação são determinantes para uma operação de sucesso em uma *Smart Grid*. O principal critério avaliado para estabelecer um bom desempenho das técnicas de comunicação utilizadas no gerenciamento de uma rede elétrica inteligente é a efetiva transferência de dados entre operadoras, agregadores, sistemas de monitoramento e controladores. Visto que os sistemas de comunicação são um dos pilares das redes inteligentes, foram desenvolvidos alguns padrões para definir as regras de comunicação. Algumas das normas e sua relação com as partes das redes inteligentes estão listadas abaixo:

- A IEEE 1547 define a interconexão de várias fontes distribuídas, diretrizes de controle e comunicação (PHOTOVOLTAICS; STORAGE, 2009);
- A IEEE P2030 define, principalmente, regras de interoperabilidade de redes inteligentes (PHOTOVOLTAICS; STORAGE, 2011);
- A IEC 608705 define a transferência de dados das estações para as unidades de monitoramento e controle (COMMISSION, I. E. *et al.*, 1995);

- A IEC 61850 é um dos padrões mais importantes para a automação de estações de energia e transferência de dados de estações para operadores de rede. O protocolo é atualmente utilizado nas redes tradicionais existentes (COMMISSION, I. E. *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de padrões das infraestruturas de comunicação, como os acima mencionados, é fundamental para a operação confiável de uma rede inteligente. As diferentes tecnologias de comunicação existentes podem ser empregadas nas diversas camadas existentes em uma *Smart Grid*, visto que cada camada possui características e demandas diferentes, como exemplo, para os sistemas de automação, a resposta à demanda e o gerenciamento de fontes de energia distribuídas, baixa latência e alta confiabilidade na transmissão dos dados são importantes, já a taxa de transferência de dados é um fator importante para o SCADA. Os requisitos de comunicação e suas características ideais para serem empregadas em cada camada da *Smart Grid* são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Requisitos de comunicação em uma *Smart Grid*

Aplicação	Largura de Banda	Latência	Confiabilidade e Segurança	Reserva de Energia
AMI	10 100kbps por dispositivo	2s 15s	Alta	Não é necessário
Resposta à demanda	14 100kbps por dispositivo	500 ms- alguns minutos	Alta	Não é necessário
Geração distribuída	9,6 56 kbps	20 ms 15s	Alta	1h
Veículos Elétricos	9,6 56 kbps	2ss 5m	Alta	Não é necessário
Rede de Distribuição de Energia	9.6 100 kbps	100 ms- 2s	Alta	De 24 a 72h

Fonte: DOE (2010)

- **Largura de banda:** Determina a velocidade que os dados irão trafegar através de uma rede específica, ou seja, quanto maior a largura de banda, maior será a velocidade da conexão, visto que por ela passará mais dados simultaneamente. É de suma importância definir as necessidades de largura de banda da rede de comunicação em *Smart Grids*, pois é um fator determinante na decisão sobre o meio de transmissão (por exemplo, cabos coaxiais, ondas de rádio, fibra ótica, entre outros) e tecnologia de comunicação (por exemplo, 3G/2G, LTE, WiMAX, entre outros)(TIGHTIZ; YANG, 2020; COLAK; GULER; AHMED, 2021);
- **Latência:** A latência ou atraso, é definido como o tempo que um pacote leva para viajar de um ponto a outro na rede. Para que uma infraestrutura de comunicação

funcione de forma otimizada, há necessidade de características de latência excepcionalmente rígidas. Se houver um atraso que faça com que o centro de controle perca alguma entrada, existe o risco de substituir a entrada ausente por entradas de outros sensores, culminando em ações diferentes e resultados não intencionais (TIGHTIZ; YANG, 2020; COLAK; GULER; AHMED, 2021);

- **Confiabilidade e Segurança:** O principal aspecto relacionado à confiabilidade e segurança da rede é garantir a integridade das informações trafegadas, entretanto, os principais requisitos de segurança analisados na escolha de uma tecnologia são a autenticação, privacidade, disponibilidade, confidencialidade e integridade. Os processos de autenticação dos dispositivos IoT são necessários para suportar métodos de autenticação leves e mútuos, como exemplo, a criptografia de dados. A privacidade dos dados do cliente e do sistema precisa ser preservada durante a comunicação por diferentes tipos de métodos de tecnologia sem fio. A rede deve fornecer conectividade robusta e sempre ativa aos dispositivos IoT. Os protocolos de comunicação precisam fornecer métodos seguros para garantir a confidencialidade dos dados transmitidos. A integridade dos dados de comunicação também precisa ser protegida (BORGAONKAR; JAATUN, 2019);
- **Reserva de Energia:** Para que as redes de sensores sem fio operem por um longo período é necessário que os métodos de comunicação realize um uso eficiente de energia. Além disso, em caso de falta de fornecimento de energia alguns dispositivos devem permanecer atuando. Uma alternativa a estes casos são as baterias recarregáveis, estas são úteis em sistemas que possuem mecanismos de recuperação de energia, que consiste em aproveitar a energia do ambiente que pode ser encontrada em diversas formas Melo *et al.* (2019), este assunto será melhor abordado na próxima seção.

### 5.1.1 Comunicação de rede celular em *Smart Grids*

De acordo com Zheng *et al.* (2020), a melhor opção para comunicação entre dispositivos distantes, infraestrutura e medidores inteligentes é a tecnologia de comunicação celular. A GSM é a infra-estrutura de telecomunicações mais usada atualmente no mundo e a rede GPRS é uma das formas mais utilizadas para comunicação M2M no Brasil. A rede GSM se caracteriza pelo sinal digital sendo utilizada principalmente para a conversação por telefones celulares, é a rede conhecida por tecnologia de segunda geração ou 2G. Porém, em relação ao uso da internet móvel, esta rede acabou ficando defasada. É neste contexto que surge a rede GPRS, para melhorar o acesso à internet em dispositivos conectados na rede de telefonia celular. Muitos se referem

à rede GPRS como tecnologia 2,5G, ou seja, entre a 2G e a 3G de tecnologia de telefonia móvel.

A rede GPRS utiliza a mesma estrutura de comunicação do sistema GSM com a finalidade de possibilitar o tráfego de dados por meio de pacotes de dados, de modo a possibilitar que a rede de telefonia celular seja integrada à internet. O surgimento da rede GPRS permitiu que a telemetria, por meio da rede de telefonia celular, se tornasse muito mais rápida e estável do que ocorria na rede GSM. Para aplicações que utilizam apenas códigos binários (texto), os dados são transmitidos facilmente pela rede GPRS, como ocorre no maior caso de comunicações M2M.

A utilização de rede GSM/GPRS tem um dos melhores custo-benefício do mercado, principalmente porque tem baixo custo de instalação. Assim como para *smartphones*, para seu funcionamento é contratado um pacote de dados, consumido ao longo do mês e pode ser ajustado conforme o consumo. Além da implementação ser mais barata, não é necessário investir na manutenção da rede GPRS, visto que as operadoras são as detentoras de sua estrutura física, a manutenção da rede também é de sua responsabilidade.

A infra-estrutura de comunicações existente evita que as concessionárias gastem custos operacionais e tempo adicional para construir uma infra-estrutura de comunicações dedicada, não causando custos extras na implementação do sistema de comunicação. Além disso, possuem alta velocidade de transferência de dados e estratégias de segurança existentes já sendo aplicadas. Estes sistemas de comunicação funcionam através do envio e recebimento de ondas de radiofrequência, atualmente os padrões mais utilizados são o GSM, GPRS, 2G, 3G, 4G e WiMAX e estes apresentam diferentes taxas de transferência de dados, capacidade e aplicações (GUNGOR *et al.*, 2011; SHARMA *et al.*, 2022).

Um SIM ou módulo GPRS de operador de rede incorporado dentro de uma unidade de rádio celular integrada em medidores inteligentes pode permitir comunicações entre medidores inteligentes e utilitários.

Como a rede GPRS é uma das opções mais utilizadas no mercado, as operadoras, em conjunto com outras empresas, vêm desenvolvendo novas tecnologias e soluções para atender à demanda crescente de aparelhos conectados à internet. Um exemplo é a liberação dos protocolos de comunicação *Narrowband-IoT* (NB-IoT), Cat-M1 e Cat-1 (na rede LTE). Cada protocolo possui características específicas de cobertura, latência e consumo de energia, e a sua escolha deve ser feita conforme a necessidade da operação. As principais operadoras no Brasil já disponibilizam essas redes, exclusivas para o tráfego de dados de aplicações M2M e IoT (TIGHTIZ; YANG, 2020).

Em casos de coleta de dados em intervalos pequenos, uma enorme quantidade de dados pode ser gerada, e as redes celulares fornecem largura de banda suficiente

para tais aplicações. Quando a segurança entra em discussão, as redes celulares estão prontas para proteger as transmissões de dados com fortes controles de segurança. A tecnologia GSM atinge até 14,4 *kbps*, GPRS até 170 *kbps* e ambos suportam aplicações implementadas na AMI, resposta à demanda, HAN. Serviços de segurança, autenticação, proteção de sinalização e proteção de dados do usuário são os pontos fortes de segurança da tecnologia GSM. Cabe destacar também que com esta tecnologia pode-se obter comunicações satisfatórias com medidores inteligentes em áreas rurais ou urbanas, a ampla capacidade de implantação de redes inteligentes torna-se possível com a utilização desta rede e uma vez que a cobertura de redes celulares já atingiu quase 100% da população no Brasil.

Custo mais baixo, melhor cobertura e recursos de instalação rápida destacam por que as redes celulares podem ser as melhores candidatas como tecnologia de comunicação de *Smart Grid* para aplicações como gerenciamento de resposta à demanda, infraestruturas de medição avançada, HAN, gerenciamento de interrupções, entre outros (ANATEL, 2022; GUNGOR *et al.*, 2011; SHARMA *et al.*, 2022).

Baseado nas tecnologias GSM/EDGE e Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), cabe destacar também o padrão de comunicação sem fio LTE. Este padrão de comunicação sem fio oferece transferência de dados em alta velocidade (até 300Mb/s de download e 75,4Mb/s de upload, dependendo da tecnologia utilizada) com baixa latência. A primeira implantação comercial de LTE foi experimentada em Oslo e Estocolmo em dezembro de 2009. Ele usa *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) para usar o mínimo de energia. LTE é totalmente compatível com outros padrões legados como GSM/EDGE, UMTS. A forma mais recente de LTE, é conhecida como *LTE Advanced*, e oferece velocidade de download de aproximadamente 3,3 Gigabits por segundo (Gbps). O *LTE Advanced* também está em uso comercial desde outubro de 2012. O LTE também pode atender aos requisitos de taxa de transferência, taxa de erro e latência para emergências (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

A tecnologia LTE tem duas áreas de aplicação principais em redes inteligentes. Primeiro, pode ser usado para medição automatizada e, em segundo lugar, para automatizar e controlar o sistema de distribuição. Mahmood, Javaid e Razzaq (2015) cita análises da aplicação de LTE para sistemas automatizados de distribuição de eletricidade que descobriram que esta tecnologia é viável para aplicações de rede inteligente NAN com alta confiabilidade e baixa latência (SHARMA *et al.*, 2022).

As redes celulares podem ser usadas para fornecer comunicações para aplicativos inteligentes de área ampla, como Resposta de Demanda Automatizada (ADR), AMI e gerenciamento de interrupção de fornecimento de energia. Pode fornecer comunicações entre as Unidades Terminais Remotas (RTUs) nas subestações e no servidor SCADA das concessionárias, pode ser empregadas para permitir a supervisão

de recursos de energia distribuída. Além disso, informações não críticas podem ser comunicadas via mensagens Short Message Service (SMS) e os recursos de energia distribuída podem ser monitorados com sistemas GPRS (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

As limitações das tecnologias celulares são exploradas quando algum aplicativo crítico precisa de disponibilidade contínua de comunicações. No entanto, os serviços das redes celulares são compartilhados pelo mercado de clientes e isso pode resultar em congestionamento da rede ou diminuição do desempenho da rede em emergências. Portanto, essas considerações podem levar as concessionárias a construir sua própria rede de comunicação privada. Ao contrário da rede privada e dos padrões Wireless Sensor Networks (WSN) emergentes, a disponibilidade da rede não é garantida em condições ambientais adversas e calamidades naturais. Portanto, a confiabilidade da comunicação celular torna-se questionável em tais situações (SHARMA *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022).

Cabe destacar também que o uso de redes de terceiros significa cobranças recorrentes mensais para cada conexão, o que se traduz em maiores custos operacionais para a concessionária. Para garantir a qualidade e confiabilidade do serviço e evitar custos operacionais adicionais, uma concessionária pode decidir construir redes celulares dedicadas (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

A tecnologia celular vem melhorando em termos de taxas de dados e cobertura e se inclinando para os próximos padrões, 5G e Sexta Geração (6G). Como citado, devido ao grande número de usuários, o problema de congestionamento da rede pode surgir. Nos últimos anos, muita pesquisa foi realizada sobre como aproveitar a alta taxa de transferência e a baixa latência oferecidas por estas novas tecnologias de comunicação (CHETTRI; BERA, 2020).

A 5G é a rede de comunicação mais multifuncional e flexível. Ela fornece plataformas maiores para suportar vários problemas críticos e resolve muitas complicações relacionadas à análise de custos e aplicações de energia elétrica. Espera-se que a 5G estabeleça uma escala maior na qual a quarta revolução industrial é articulada. Esta rede fornece convergência, inteligência e detecção de banda larga universal; provoca maior modificação nos mercados social e industrial. No futuro mercado de energia, a IoT pode fazer uma grande mudança ao avançar para uma nova rede de comunicação que beneficia altamente o consumidor e as concessionárias de energia elétrica. Observa-se que nos últimos anos o 5G estabelece uma tendência para suprir as necessidades relacionadas ao paradigma energético. Nos países em desenvolvimento, no entanto, essas tecnologias ainda não foram (totalmente) implementadas e mesmo suas antecessoras têm abrangência restrita às áreas urbanas das cidades (BORGANONKAR; JAATUN, 2019; CHETTRI; BERA, 2020).

A tecnologia 5G já apresenta alguns diferenciais relacionados a sistemas de

automação na rede de distribuição de energia, sendo eles: O 5G possui consumo energético por bit menor que o 4G. Isto pode ser aplicável a aparelhos alimentados por baterias, mesmo aqueles dispositivos cujas baterias são carregadas por indução eletromagnética da própria linha de energia. Dispositivos para automação na rede de distribuição podem enviar mensagens não solicitadas, como, por exemplo, aquelas que utilizam o protocolo Distributed Network Protocol (DNP3). O 5G se mostra adequado nesta situação devido a sua confiabilidade superior a 99,99%. O uso do 5G diretamente nos sensores e atuadores dispensa o uso de *gateways* para conversão de tecnologias para a rede IP, como as tecnologias: *Bluetooth*, *Zigbee* e *LoRa*. 5G também pode atingir taxa de dados na faixa de Gbps, o que viabiliza monitoramentos em escalas maiores. Isto o torna viável para *gateways* e coletores de dados remotos, eles podem ter volumes significativos de informação a serem trocadas com o SCADA. Além disso, o 5G é uma tecnologia que viabiliza atualização de *firmware* em dispositivos que estejam em campo, visto que a quantidade de dados nessa situação é bastante elevada (RODRIGUES, 2022).

#### 5.1.1.1 Panorama do uso da tecnologia GSM/GPRS em *smart grids*

As tecnologias 2G, 2.5G, 3G, WiMAX e LTE são as tecnologias de comunicação celular mais utilizadas em concessionárias para implantações de medição inteligente. Como exemplo, pode-se citar a parceria entre a Echelon Corporation e a T-Mobile USA, as empresas firmaram aliança a fim de acelerar a adoção da rede inteligente no mercado norte-americano, reduzindo o custo de comunicação dos medidores inteligentes por meio da implantação do sistema de serviços de energia em rede da Echelon na rede celular GSM da T-Mobile (SHARMA *et al.*, 2022; USA, 2009).

Como parte do acordo entre as duas empresas, a Echelon utilizará um SIM da T-Mobile embutido em um módulo de rádio celular para permitir que todos os medidores inteligentes Echelon em um determinado transformador de baixa tensão se comuniquem de volta com a concessionária pela rede sem fio. Como a rede GSM da T-Mobile atenderá a todos os requisitos de comunicação da rede de medição inteligente, não há necessidade de investimento em uma nova rede de comunicações dedicada pelas concessionárias (SHARMA *et al.*, 2022; USA, 2009).

A Telenor, Telecom Italia, China Mobile e Vodafone também concordaram em colocar sua rede GSM disponível para fluxo de dados de comunicações de *Smart Meters*. O *Smart Meter* SENITEL da Itron é integrado a um módulo GPRS e se comunica com um servidor que executa o Sistema de gerenciamento de transações SmartSynch. As tecnologias sem fio de acesso Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA), Acesso Múltiplo à Divisão de Código de Banda Larga (WCDMA) e UMTS também são usadas em projetos de *smart grid* (SHARMA *et al.*, 2022).

Uma solução de *smart grid* CDMA para o mercado de serviços públicos resi-

denciais foi introduzida pela Verizon, e a rede 3G CDMA da Verizon será usada como a espinha dorsal das comunicações de *smart grid* com as soluções da SmartSynch. A Telenor com tecnologia Cinclus também está oferecendo tecnologia UMTS para comunicações de redes inteligentes (SHARMA *et al.*, 2022).

Uma empresa australiana de fornecimento de energia, a SP AusNet, está construindo uma rede de comunicações dedicada para aplicações de rede inteligente e escolheu a tecnologia WiMAX para as necessidades de comunicação dos medidores inteligentes. Os conjuntos de chips WiMAX estão embutidos nos medidores inteligentes e as comunicações sem fio são dedicadas entre os medidores inteligentes e o sistema central no sistema da SP AusNet (SHARMA *et al.*, 2022).

Uma operadora de telefonia estadunidense, a Sprint Nextel, assinou uma parceria com o provedor de software de rede inteligente, *Grid Net*, em um projeto para fornecer comunicação entre medidores inteligentes e roteadores inteligentes em sua rede sem fio 4G. A GE está desenvolvendo medidores inteligentes baseados em WiMAX com a *CenterPoint Energy* e colaborou com *Grid Net*, Motorola e Intel para focar em soluções de conectividade WiMAX. No projeto de medidor inteligente da GE com a *CenterPoint Energy*. Além disso, algumas grandes empresas, como Cisco, *Silver Springs Network* e Verizon, também implementam aplicativos de rede inteligente WiMAX. A maior fornecedora de WiMAX do mundo, a Alvarion, anunciou sua parceria com uma empresa de serviços públicos dos Estados Unidos, a *National Grid*, para um projeto de *Smart Grid* baseado em WiMAX. Custos operacionais e de implantação mais baixos, protocolos de segurança adequados, comunicações suaves, altas velocidades de dados (até 75 Mb/s), largura de banda adequada e escalabilidade são as vantagens da tecnologia WiMAX atual (SHARMA *et al.*, 2022).

Gungor *et al.* (2011) forneceram uma pesquisa detalhada de várias empresas que estão usando as tecnologias GSM, GPRS, CDMA, WCDMA e UMTS para comunicação de redes inteligentes. Telenor, Telecom Itália, China Mobile e Vodafone estão a caminho de usar sua rede GSM para comunicações de medição inteligente. A Itron SENITEL explorou o uso de 2.5G GPRS integrado ao seu medidor de eletricidade. As soluções de *smart grid* da Verizon e SmartSynch estão explorando a rede 3G, enquanto a Telenor com a tecnologia Cinclus está explorando o uso de UMTS para comunicação de *smart grid*.

No Brasil, tanto as áreas urbanas quanto as rurais ainda têm uso massivo de redes de dados de baixo custo baseadas no padrão do GSM de segunda geração (2G), como GPRS e GPRS aprimorado (EGPRS), apesar da disponibilidade de tecnologias sem fio 3G e 4G (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Isso motivou as empresas de energia a realizar as tarefas necessárias de monitoramento e controle de *smart grids*, por meio dessas tecnologias 2G. Complementarmente, GPRS e EGPRS têm sido atualmente o foco principal dos sistemas M2M,

sendo importante destacar que existem diversos trabalhos acadêmicos referenciando o uso de padrões móveis em um esquema multicamada para *end-to-end* conectividade em aplicações industriais, ou para monitorar sistemas de energia eólica baseados em redes de sensores. Além disso, GPRS e EGPRS têm sido amplamente utilizados para oferecer serviços de baixa e média taxa de dados, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

#### 5.1.1.2 A tecnologia GSM/GPRS no protótipo desenvolvido

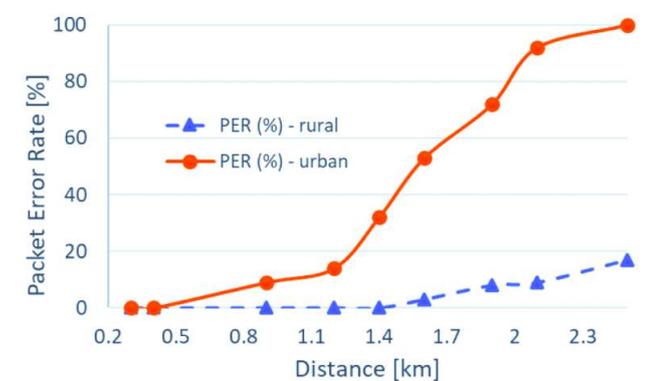
Inicialmente no presente trabalho seriam analisadas as tecnologias LoRa/LoRaWAN e GSM/GPRS. Entretanto, baseando-se em pesquisa bibliográfica, concluiu-se que a tecnologia LoRa vem apresentando mal desempenho em centros urbanos. Como observado na pesquisa de Petrariu, Lavric e Coca (2019), que realizaram a instalação completa e compararam duas arquiteturas LoRa/LoRaWAN, uma em perímetro urbano e outra em área rural. Ao utilizar os mesmos equipamentos, constatou de forma explícita a diferença existente entre as duas áreas. A 2,5 km de distância, os equipamentos não conseguiam trocar nenhuma mensagem no perímetro urbano, enquanto em área rural, para a mesma distância, as comunicações mantiveram-se com menos de 17% de perdas no envio das mensagens, conforme figuras 34 e 35.

Figura 34 – Taxa de erro de pacotes (PER) para rede LoRa urbana e rural.

<b>Distance (km)</b>	<b>PER (%) rural</b>	<b>PER (%) urban</b>
0.3	0	0
0.4	0	0
0.9	0	9
1.2	0	14
1.4	0	32
1.6	3	53
1.9	8	72
2.1	9	92
2.5	17	100

Fonte: (PETRARIU; LAVRIC; COCA, 2019)

Figura 35 – Taxa de erro de pacotes para rede LoRa urbana e rural



Fonte: (PETRARIU; LAVRIC; COCA, 2019)

Villarim *et al.* (2019) também descrevem estudos experimentais realizados para medir o alcance da comunicação LoRa com base na métrica *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), tanto em ambientes naturais quanto urbanos. Os experimentos aconteceram em dois lugares diferentes do mundo, no hemisfério norte e outro no hemisfério sul: no arquipélago português dos Açores (na Ilha de São Miguel) e na cidade de João Pessoa, no Nordeste do Brasil, respectivamente. Como resultado, os autores relataram que o LoRa é bastante robusto em ambientes urbanos densos, onde foi possível estabelecer conexões de longa distância de no máximo aproximadamente 2,1 km. No entanto, os resultados foram inconclusivos em ambientes florestais, pois nos Açores a ligação LoRa variou cerca de 800m através da floresta/lago, enquanto no Brasil foi cerca de 230 m.

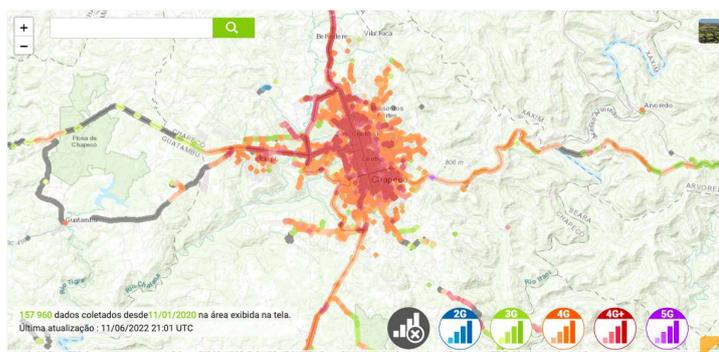
De acordo com resultados de outros projetos de comunicação para *Smart Grid* no Brasil e em regiões do mundo com características semelhantes, as opções de tecnologias sem fio existentes para o projeto foram as mais variadas. Após pesquisa bibliográfica e análise de viabilidade local, optou-se em utilizar GSM/GPRS. Com esta tecnologia de comunicação sem fio se pode atender os requisitos estabelecidos pelo DOE (2010) para tecnologias de comunicação a serem empregadas na rede de distribuição de energia.

Além deste fator, nota-se um crescente interesse da comunidade científica em Comunicação sem fio de rede celular em *smart grids* devido à chegada do 5G, visto que esta tecnologia tem características importantes para as aplicações de redes elétricas inteligentes e que a comunidade científica tem investigado na sua utilização. O avanço da 5G pode viabilizar novas utilizações das redes de geração anteriores como 2G, 3G e 4G (RODRIGUES, 2022).

O protótipo foi desenvolvido na cidade de Chapecó SC, sendo que esta cidade é atendida pela distribuidora CELESC, as entrevistas de validação do problema também ocorreram com funcionários desta distribuidora de energia. A concessionária em questão, já utiliza de comunicação sem fio em outros dispositivos utilizados em suas redes, como exemplo pode-se citar os equipamentos implementados no projeto-piloto que visa substituir os medidores de energia convencionais por medidores inteligentes na cidade de Araranguá SC, estes equipamentos utilizarão a comunicação por radiofrequência entre os medidores.

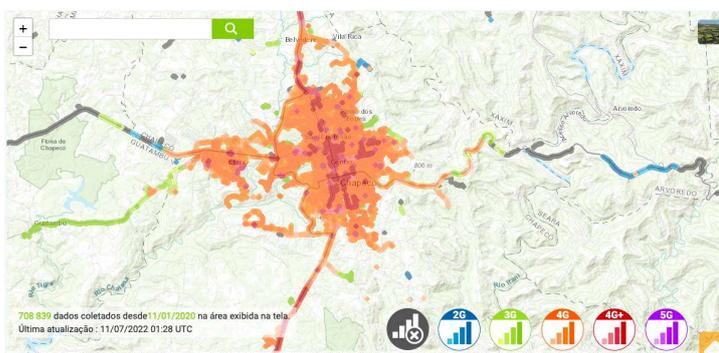
Atualmente, na cidade de Chapecó, as principais operadoras de telefonia móvel utilizadas são Vivo, Claro e TIM. Estas operadoras possuem uma boa cobertura na região, como pode ser observado nas Figuras 36, 37 e 38.

Figura 36 – Cobertura das redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G - VIVO em Chapecó



Fonte: (COBERTURA 3G / 4G / 5G A CHAPECÓ - NPERF..., 2022)

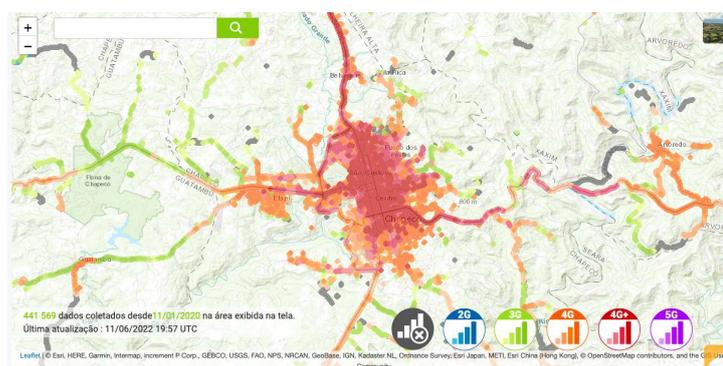
Figura 37 – Cobertura das redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G CLARO em Chapecó



Fonte: (COBERTURA 3G / 4G / 5G A CHAPECÓ - NPERF..., 2022)

Visto a alta cobertura da rede GSM e GPRS da cidade em questão, assim como de todo território brasileiro, além dos demais aspectos positivos da tecnologia anteriormente citados, optou-se em empregar a tecnologia de comunicação sem fio

Figura 38 – Cobertura das redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G TIM em Chapecó



Fonte: (COBERTURA 3G / 4G / 5G A CHAPECÓ - NPERF..., 2022)

GSM e GPRS no protótipo desenvolvido. A utilização da tecnologia deu-se através do uso do módulo SIM800L, o qual foi melhor descrito no Capítulo 4 do presente trabalho.

## 5.2 MODELO DE BATERIA

As redes de sensores sem fio conectadas a uma estrutura IoT são normalmente compostas por sensores, um microcontrolador, um transceptor sem fio e uma fonte de energia (por exemplo, uma bateria) para monitorar seu ambiente e enviar/receber dados. A conectividade sem fio, a eletrônica de baixa potência e a fonte de alimentação da bateria permitem um certo grau de operação autônoma destes sensores. Os sensores implementados em *Smart Grids* estão frequentemente situados em locais de difícil acesso com a lógica de configure e esqueça (JUSHI; PEGATOQUET; LE, 2016; RAMIS-BIBILONI; CARRASCO-MARTORELL, 2021).

Na maioria das redes de sensores sem fio, a unidade de alimentação é composta por baterias e a quantidade de energia é limitada. Portanto, é de grande importância preparar protocolos centrados em energia, pois a substituição de baterias pode ser uma operação cara e difícil. Além disso, um sensor alimentado por baterias também requer manutenção regular quando uma bateria descarregada precisa ser substituída (RAMIS-BIBILONI; CARRASCO-MARTORELL, 2021).

A necessidade de eficiência energética em IoT e em redes de sensores sem fio vem atraindo atenção significativa e, até então, uma extensa variedade de mecanismos sustentáveis e conscientes de energia em todas as camadas da pilha de protocolos foram apresentadas na academia. Na maioria das aplicações de monitoramento, estes sensores detectam constantemente o ambiente ao redor e trocam um intenso tráfego de dados, cuja transmissão esgotaria rapidamente as baterias dos nós. Uma forma de poupar alguma energia de transmissão consiste em reduzir o volume de dados a serem enviados é, aplicando técnicas de processamento dos mesmos. En-

tre os vários métodos para obter eficiência energética em Rede de sensores sem fio (RSSF)s, também estão o uso de protocolos de comunicação leves ou a adoção de transceptores de rádio de baixa potência. Além disso, o uso de coletores de energia (do inglês: *energy harvesting* - EH) também abriram novas possibilidades em projetos de gerenciadores de energia: em vez de minimizar a energia consumida para maximizar a vida útil de sistemas de sensores sem fio alimentados por baterias (JUSHI; PEGATOQUET; LE, 2016; PANAHI; PANAHI; HESHMATI *et al.*, 2019).

Para alcançar uma operação verdadeiramente autônoma e a fim de superar esta desvantagem relacionada a limitação de energia, os sistemas de EH para ambientes RSSFs são o foco de atenção da academia recentemente. Os sistemas EH captam energia de fontes externas sendo associados a baterias recarregáveis, a coleta de energia para redes de sensores sem fio (do inglês: *Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks* Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs)) pode ser realizada através de diversas fontes de energia, e essa energia pode ser acumulada em baterias. O potencial de geração disponível dependerá da localização dos sensores (interior ou exterior), bem como do clima e da hora do dia em que os sensores deverão funcionar (UEDA; IDOUE; UTSUNOMIYA, 2019; MELO *et al.*, 2019).

Entre as fontes de energia que podem ser utilizadas para a recarga das baterias, pode-se citar fontes de radiofrequência, fotovoltaica e fontes térmicas. Há uma grande variedade de fontes de radiofrequência ambiente, incluindo transmissão de TV e rádio, sistemas de telefonia celular, roteadores Wi-Fi, transmissões *Industrial Scientific and Medical* (ISM). O procedimento para a geração de energia elétrica a partir de radiofrequência começa com a coleta de ondas eletromagnéticas irradiadas usando antenas. O sinal de radiofrequência capturado é transformado em CC usando circuitos retificadores. A energia fotovoltaica pode ser retirada da luz solar ou de qualquer fonte de luz artificial. Como a tensão de saída de uma célula fotovoltaica está na forma de CC, ela pode ser armazenada diretamente ou usada sem ser retificada. Os geradores termoelétricos podem aproveitar a energia da diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente, conforme o efeito *Seebeck*, que afirma que uma força eletromotriz pode ser gerada a partir do gradiente de temperatura entre duas superfícies (RAMIS-BIBILONI; CARRASCO-MARTORELL, 2021; PANAHI; PANAHI; OHTSUKI, 2020).

Uma das fontes primárias de energia é a radiação eletromagnética emitida pelo sol, por isso, é uma das fontes de energia renovável mais utilizadas. A radiação solar é usada em sistemas conectados à rede e autônomos fora da rede para produzir energia elétrica com a potência de pico variando de quilo a gigawatts. No entanto, a radiação solar pode ser usada para fornecer energia elétrica para eletrônicos de baixa potência e permitir a operação autônoma dos nós sensores sem qualquer interação humana física por muitos anos (RAMIS-BIBILONI; CARRASCO-MARTORELL, 2021; PANAHI; PANAHI; OHTSUKI, 2020).

Entretanto, fornecer energia adequada para operar a rede de maneira autossuficiente sem comprometer a qualidade de serviço é um problema crítico para RSSFs alimentadas por bateria. Em geral, a transmissão de dados consome mais energia do que a computação, portanto, protocolos de comunicação robustos são vitais. As pesquisas relacionadas à comunicação através de rede celular têm tradicionalmente centrado no tema da eficiência espectral ou no atendimento de certos requisitos de qualidade de serviço em vez de melhorar a eficiência energética deste tipo de comunicação. Por isso, os métodos de EH em *smart grids* tem sido sugeridos para aumentar a vida útil de dispositivos de baixa potência (PANAHI; MOSHIRVAZIRI *et al.*, 2018; PANAHI; PANAHI; OHTSUKI, 2020; PANAHI; PANAHI; HATTAB *et al.*, 2018; JUSHI; PEGATOQUET; LE, 2016; RAMIS-BIBILONI; CARRASCO-MARTORELL, 2021).

A tecnologia de comunicação (GSM/GPRS) empregada no protótipo desenvolvido no presente trabalho demanda de um maior consumo de energia para seu funcionamento, quando comparado com outras tecnologias de rede sem fio como LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT. E além desse fator, a qualidade de serviço é prioridade para a tecnologia, e não aspectos relacionados a melhorias da sua eficiência energética. Além disso, o DOE (2010) recomenda autonomia de 24 a 72h horas para sensores empregados na rede de distribuição de energia. Diante destes aspectos, paralelamente ao presente trabalho foi desenvolvido um artigo científico com a finalidade de propor um novo modelo analítico de bateria, considerando baterias que utilizam tecnologias de EH (solar ou eólica) e operam sob diferentes temperaturas. Ou seja, um modelo de bateria dependente da temperatura, chamado de *T-KiBaM for Energy Harvesting (T-KiBaM<sub>EH</sub>)*. Este modelo visa estimar a vida útil das baterias, modelando concomitantemente os processos de carga e descarga, e será apresentado na próxima seção.

### **5.2.1 An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research**

A conclusão do mestrado em Energia e Sustentabilidade depende do cumprimento de duas etapas principais: a curricular e a de desenvolvimento e defesa da dissertação. A parte curricular, que inclui a realização de créditos em disciplinas, estágio Docência e prova de proficiência em língua estrangeira, foi finalizada em 2019. No decorrer do ano de 2019, no período de agosto até novembro, destaca-se a minha contribuição na revisão da formulação matemática de um modelo analítico de bateria, capaz de estimar o estado de carga, tensão e tempo de vida de baterias recarregáveis, resultando na seguinte publicação (RODRIGUES *et al.*, 2020).

- RODRIGUES, LEONARDO M.; BITENCOURT, NATHÁLIA L.; RECH, LUCIANA; MONTEZ, CARLOS; MORAES, RICARDO. *An analytical model to estimate the*

*state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research*, v. 44, n.7, p. 5243-5258, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5269>.

Como mencionado na seção anterior, as tecnologias de captação de energia surgem como uma forma de carregar e prolongar a vida útil das baterias, reduzindo significativamente seus custos de manutenção. Independentemente da aplicação, os sistemas alimentados por bateria precisam de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (do inglês: BMS), necessário para diversas finalidades, variando de aplicativos simples para telefones celulares, a aplicativos complexos no contexto de veículos Elétricos. Um BMS consiste em vários sensores, atuadores e controladores (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Um dos primeiros passos para desenvolver um BMS está relacionado ao estabelecimento de um modelo de bateria que reflita corretamente as características da bateria ao longo do tempo. No entanto, alguns subsistemas do BMS, particularmente os modelos de bateria utilizados para estimar o estado interno da bateria, não conseguem lidar com tecnologias de EH, dificultando tolerar falhas de energia porque não podem prever com precisão quando as baterias pararão de funcionar (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Idealmente, qualquer modelo de bateria deveria permitir a carga e a descarga de energia em simultâneo, ou seja, recarregar a bateria enquanto o sistema consome energia para realizar suas tarefas. Apesar disso, modelar o comportamento da bateria é uma tarefa complexa, principalmente quando envolve a contabilização do fluxo de energia de entrada e saída. Assim, o desenvolvimento de um modelo para estimar o comportamento da bateria é de extrema importância (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Motivado pelos estudos e desafios relacionados ao desenvolvimento de modelos de baterias, o artigo desenvolvido propôs um modelo analítico de bateria dependente da temperatura para uso em conjunto com dispositivos de EH, permitindo a estimativa de parâmetros de estado da bateria de Bateria de íon-Lítio (LIB)s e níquel-hidreto metálico (Ni-MH), onde a bateria está ligada a um sistema de EH. Uma versão modificada do modelo de bateria cinética dependente de temperatura (T-KiBaM) foi usada para essa finalidade. A principal novidade deste modelo de bateria proposto é que ele suporta o processo de carregamento de células eletroquímicas concomitantemente ao seu processo de descarga, o que é fundamental para a aplicação do conceito de captação de energia junto com o BMS. As principais contribuições deste artigo podem ser resumidas da seguinte forma:

- Proposição de um novo modelo analítico de bateria, considerando baterias que utilizam tecnologias de captação de energia e operam sob diferentes temperaturas. Especificamente, um modelo de bateria dependente da temperatura, cha-

mado *T-KiBaM* para coleta de Energia *T-KiBaM<sub>EH</sub>*, é apresentado neste artigo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

- Validação do modelo de bateria proposto, incluindo uma comparação com dados experimentais e uma demonstração por meio de um exemplo de prova de conceito de como o uso de tecnologias de coleta de energia pode ser benéfico para as aplicações (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Para atingir estes objetivos, o artigo foi organizado da seguinte forma: A seção 2 apresentou, resumidamente, conceitos importantes para um melhor entendimento das extensões propostas no artigo. A Seção 3 do artigo apresentou o modelo *T-KiBaM<sub>EH</sub>* proposto, incluindo as extensões para sua formulação matemática e sua validação. A Seção 4 demonstrou a utilidade desse modelo de bateria por meio de um exemplo numérico de prova de conceito. Por fim, a Seção 5 discutiu direções para estudos futuros e concluiu o artigo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

#### 5.2.1.1 Seção 2 - Conceitos

O *T-KiBaM* é um modelo analítico de bateria dependente da temperatura que foi proposto para aumentar a precisão das estimativas do comportamento da bateria em ambientes com temperaturas diferentes (ou variáveis). Este modelo foi baseado no modelo *KiBaM* original, o qual é uma abordagem intuitiva que usa conceitos de cinética eletroquímica para avaliar o comportamento de baterias de chumbo-ácido de alta capacidade. O *KiBaM* usa uma analogia baseada em dois tanques interconectados para modelar o comportamento da bateria ao longo do tempo. Um tanque é usado para modelar a carga armazenada que sai ou entra na bateria. Outro tanque mantém uma reserva de carga que pode ser transposta para o tanque de carga disponível (no caso de descarga da bateria) por meio de uma válvula, o qual é uma constante que representa a taxa de um processo de difusão/reação química. A transferência de carga entre tanques ocorre toda vez que há uma diferença de altura entre os níveis de carga de cada tanque. A Figura 40 (parte azul mais clara) mostra o modelo *KiBaM* (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O modelo *KiBaM* original tem duas grandes vantagens:

- O comportamento de diferentes células eletroquímicas é modelado usando algumas constantes, que podem ser obtidas por meio de avaliações experimentais ou usando a folha de dados da bateria;
- Trata dos principais efeitos intrínsecos das baterias: capacidade de carga e recuperação, fundamentais em algumas aplicações.

No entanto, o modelo *KiBaM* original não considera a influência da temperatura nas baterias, o que pode alterar significativamente seu comportamento ao longo do

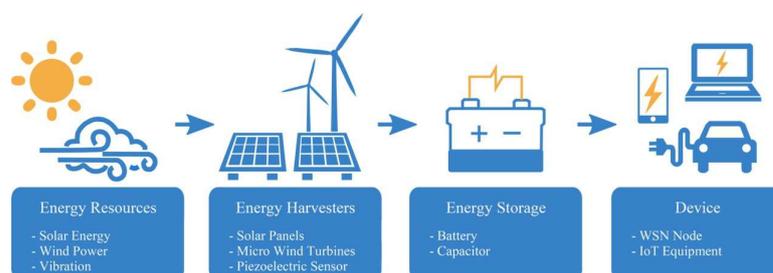
tempo especificamente, ao longo de sua vida útil. Além disso, as curvas de tensão fornecidas pelo modelo *KiBaM* original não são compatíveis com as principais tecnologias de baterias utilizadas atualmente, como Ni-MH e LIB. Neste caso, o modelo *T-KiBaM* propõe melhorias para os aspectos mais sensíveis do modelo *KiBaM* original, a fim de aumentar a precisão das estimativas sobre o comportamento da bateria em ambientes onde o efeito térmico desempenha um papel crucial (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Relatos na literatura indicam que o efeito térmico pode acelerar ou desacelerar a taxa de reações no interior das baterias e fazem com que as baterias forneçam capacidade de carga relativamente efetiva, dependendo de sua temperatura de operação (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Os resultados obtidos com o modelo *T-KiBaM* mostraram-se úteis para estimar a vida útil de LIBs e baterias Ni-MH. No entanto, a possibilidade de recarregar a bateria (enquanto ela é usada para alimentar dispositivos) não havia sido avaliada em estudos anteriores. Esta é uma característica importante ao considerar o uso de uma bateria equipada com tecnologias de EH (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Os dispositivos mais promissores para realizar EH incluem sensores piezoelétricos (captação de energia elétrica a partir da energia gerada por vibração, movimento ou som) e piroelétricos (captação de energia elétrica a partir da energia gerada pelo calor). No entanto, esses dispositivos e tecnologias ainda estão em desenvolvimento. Atualmente, as tecnologias em estágio de desenvolvimento mais avançadas para captação de energia são os painéis solares (captação de energia elétrica da luz) e as turbinas eólicas (captação de energia elétrica do vento). A Figura 39 mostra as etapas do processo de EH (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Figura 39 – Etapas no processo de EH



Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

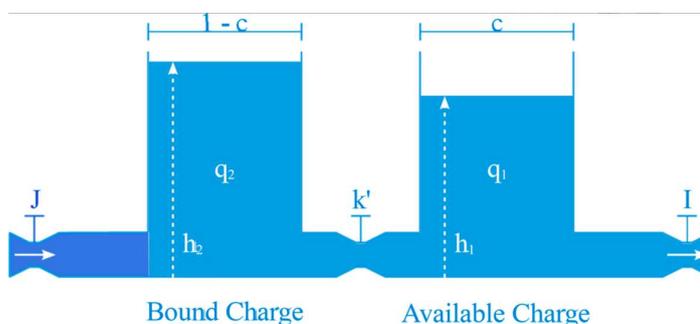
A intermitência relacionada à geração de energia utilizando EH torna importante a utilização de modelos de bateria capazes de contabilizar a energia fornecida por dispositivos de captação de energia adequadamente, para que a vida útil das baterias possa ser estimada com mais precisão (RODRIGUES *et al.*, 2020).

### 5.2.1.2 Seção 3 - Modelagem de Baterias com capacidade de EH

O  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  proposto estende o modelo  $T\text{-}KiBaM$  apresentado anteriormente e adiciona a este modelo de bateria a possibilidade de carregar a bateria. Todos os conceitos apresentados na Seção 2 permanecem válidos. No entanto, o modelo proposto inclui a adição de uma válvula, J, que permite a entrada de carga na bateria. Essa carga pode ser fornecida por um dispositivo de EH. A Figura 40 (parte azul mais escura) mostra o modelo de bateria estendida (RODRIGUES *et al.*, 2020).

No  $T\text{-}KiBaM_{EH}$ , a carga regenerada através da válvula J não está imediatamente disponível para uso pelo dispositivo conectado (que drena a carga da válvula I). Conforme a ideia original do modelo  $KiBaM$ , a carga que entra na bateria é armazenada no tanque de carga ligada e somente quando há uma diferença de altura entre as cargas do tanque, a carga extra pode ser transferida do tanque de carga vinculada para o tanque de carga disponível. Observe também que se não houver nenhuma carga (ou seja,  $J=0$ ) o modelo segue o mesmo comportamento do modelo  $KiBaM$  original, que se mostrou confiável na modelagem do comportamento de baterias reais. Portanto, a principal vantagem dessa abordagem reside no fato de que é possível modelar simultaneamente as funções de carga e descarga da bateria (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Figura 40 –  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  com capacidade de carregamento



Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

O comportamento descrito foi modelado através das equações apresentadas a seguir. Em suma, as Equações (2) e (3) apresentam, respectivamente, o principal sistema de equações diferenciais (que representa o comportamento da carga nos tanques do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$ ) e o novo sistema de equações diferenciais após a substituição das variáveis  $h_1 = \frac{q_1(t)}{c}$ ,  $h_2 = \frac{q_2(t)}{(1-c)}$ , and  $k = \frac{k'}{c \cdot (1-c)}$  (RODRIGUES *et al.*, 2020).

- Sistema de equações diferenciais

$$\begin{cases} \frac{dq_1}{dt} = -I - k' \cdot (h_1 - h_2) \\ \frac{dq_2}{dt} = +J + k' \cdot (h_1 - h_2) \end{cases} \quad (2)$$

- Substituindo  $h_1$ ,  $h_2$  e  $k$  na Equação (2)

$$\begin{cases} \frac{dq_1}{dt} = -I - k \cdot (1 - c) \cdot q_1(t) + k \cdot c \cdot q_2(t) \\ \frac{dq_2}{dt} = +J + k \cdot (1 - c) \cdot q_1(t) - k \cdot c \cdot q_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

O sistema de equações diferenciais descrito acima foi resolvido aplicando as transformadas de *Laplace*, onde são consideradas as seguintes condições iniciais:  $q_1(0) = c \cdot q_0$  and  $q_2(0) = (1 - c) \cdot q_0$ . Observe que  $q_0 = q_1(0) + q_2(0)$ , onde  $q_0$  é a quantidade de carga na bateria em  $t = 0$ . Assim, a Equação (4) apresenta a solução final. A resolução completa deste sistema de equações diferenciais pode ser acessada em <http://github.com/leomr85/tkibameh> (RODRIGUES *et al.*, 2020).

- Solução final

$$\begin{cases} q_1(t) = \frac{c \cdot k \cdot q_0 + c \cdot (1 - k \cdot t) \cdot (I - J) - I}{k} \\ \quad - \frac{e^{-k \cdot t} \cdot (c \cdot k \cdot q_0 + c \cdot (I - J) - I - k \cdot q_1(0))}{k} \\ q_2(t) = \frac{k \cdot q_0 \cdot (1 - c) + e^{-k \cdot t} \cdot (k \cdot q_2(0) + k \cdot q_0 \cdot (c - 1) + c \cdot (I - J) - I)}{k} \\ \quad + \frac{c \cdot (I - J) \cdot (k \cdot t - 1) + I \cdot (1 - k \cdot t) + J \cdot k \cdot t}{k} \end{cases} \quad (4)$$

O modelo *T-KiBaM* permite a representação dos principais efeitos causados pela temperatura. Tal modelagem pode ser incorporada ao modelo *T-KiBaM<sub>EH</sub>*. Assim, o primeiro passo foi tornar o comportamento da válvula  $k$  dependente da temperatura. Esta relação foi feita usando a equação de *Arrhenius*, representada pela Equação (5) (RODRIGUES *et al.*, 2020).

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (5)$$

onde  $k$  é a constante que representa a velocidade de uma reação química,  $A$  é o fator pré-exponencial (em  $s^{-1}$ ),  $E_a$  é a energia de ativação (em KJ/mol),  $R$  é a constante universal dos gases ( $8.314 \cdot 10^{-3}$  KJ/mol  $\cdot$  K) e  $T$  é a temperatura (em Kelvin). A equação (5) indica que o parâmetro  $k$  do modelo *KiBaM* agora varia em função da

temperatura. Os parâmetros  $A$  e  $E_a$  podem ser obtidos através de um número reduzido de experimentos em duas temperaturas diferentes (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O segundo passo para incluir a dependência da temperatura no modelo de bateria proposto foi o uso de uma função para corrigir a capacidade de carga inicial da bateria de acordo com sua temperatura de operação, a qual pode ser acessada no trabalho completo em <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.5269> (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Seguindo as etapas mencionadas acima, tornou-se possível adicionar dependência de temperatura ao modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$ . Isso possibilita o uso deste modelo de bateria em uma ampla gama de aplicações, pois permite tanto a adição de dispositivos de captação de energia quanto a aplicação em ambientes com variações de temperatura ao longo do tempo. A validação do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  foi feita por comparação com experimentos de carga e descarga em LIBs por um conjunto de dados chamado *Randomized Battery Usage Data Set*, que está disponível no repositório de dados do site da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Este conjunto de dados foi escolhido por conter uma quantidade contínua de experimentos de carga e descarga com baterias Li-íon, sendo apropriado para representar a aplicação-alvo do modelo de bateria padrão neste trabalho. A seguir, descrevem-se as características do experimento realizado (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O experimento consistiu em aplicar correntes de carga e descarga à bateria, sendo o valor escolhido aleatoriamente de acordo com o seguinte conjunto:  $\{-4.5 A, -3.75A, -3A, -2.25A, -1,5A, -0,75A, 0,75A, 1,5A, 2,25A, 3A, 3,75A, 4,5A\}$ . Os valores negativo e positivo representam, respectivamente, a carga e a descarga da bateria. Ao final de cada ciclo de carga ou descarga, enquanto um novo ponto de ajuste é escolhido, uma corrente de 0 A é aplicada à bateria por 1 segundo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Essa combinação de valores é aplicada para estressar a bateria em diferentes intensidades de corrente para os ciclos de carga e descarga. Este cenário se encaixa no caso de uso do modelo de bateria proposto. Ou seja, o modelo de bateria pode simplesmente contabilizar a descarga da bateria ou pode contabilizar sua recarga, sendo adequado para testar o modelo de bateria proposto (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Neste artigo, foi utilizado o Matlab<sup>®</sup> (Mathworks, Inc.) para reproduzir os dados experimentais e executar o modelo analítico. Desta forma, apresentou-se uma comparação entre os dados experimentais e os resultados obtidos após a execução do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  (que foi configurado com os mesmos parâmetros de entrada dos dados experimentais). A Figura 41 ilustra o comportamento analítico do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  com base nas características dos experimentos realizados (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Os resultados mostraram que o modelo proposto pode reproduzir satisfatória-

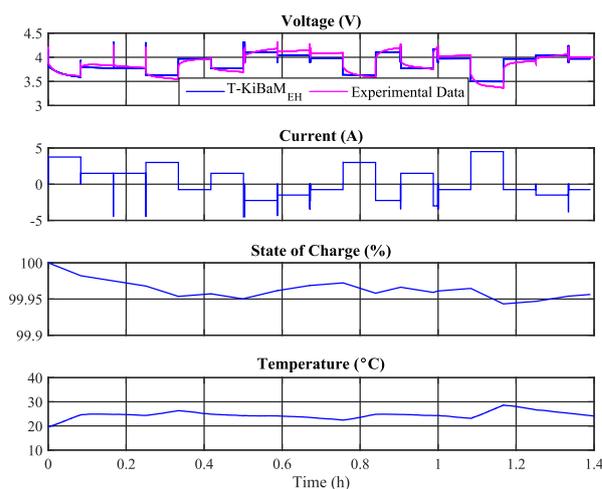


Figura 41 – 1ª validação do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

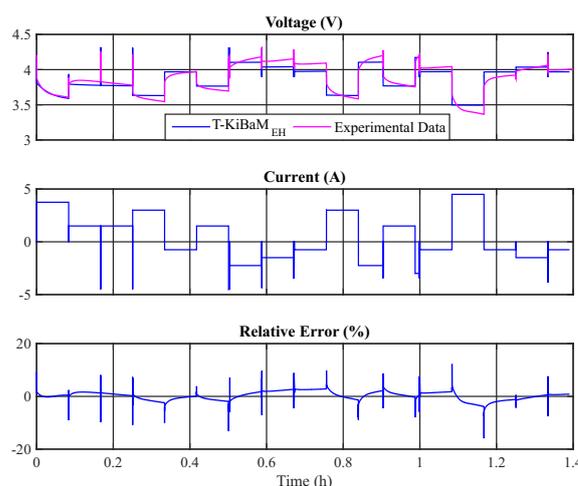


Figura 42 – Erro relativo (%) da 1ª validação

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

mente o comportamento real de uma bateria quando esta é operada em condições de carga e descarga. Da Figura 42, vale a pena notar que a média de erro relativo é 0,24%, e o desvio padrão é 1,75%. Além disso, note que o erro relativo mínimo e o máximo são, respectivamente,  $-15,90\%$  e  $12,24\%$ . No entanto, esses valores foram alcançados apenas quando há uma grande diferença entre as correntes de carga/descarga (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Considerando o conjunto de resultados apresentados nesta seção, o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  foi validado para uso em conjunto com dispositivos de EH, pois permite contabilizar adequadamente o fluxo de energia da bateria (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Esta seção apresentou um exemplo de aplicação usando o modelo analítico  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  como prova de conceito. Em suma, descrevemos o cenário de aplicação e as características das avaliações numéricas, como capacidade da bateria e consumo de energia do nó sensor. Finalmente, incluímos os resultados obtidos com avaliações numéricas usando o modelo de bateria proposto (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  foi validado por meio de comparação com dados experimentais e uma prova de conceito. As baterias utilizadas na prova de conceito são recarregáveis e LIBs assim como no presente trabalho, visto isso podemos relacioná-las ao modelo matemático proposto no artigo. Além disso, os nodos (sensores) da prova de conceito desenvolvida no artigo são alimentados por baterias integradas a painéis solares, os quais são os tipos mais comuns de dispositivos de captação de energia atualmente, visto isso, esta forma de alimentação das baterias também pode ser aplicada no presente trabalho (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O artigo desenvolvido mostrou que  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  é um modelo apropriado para estimar o nível de tensão de baterias usando dispositivos de coleta de energia, e

futuramente pode ser aplicado para auxiliar na estimativa de durabilidade das baterias deste protótipo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

### 5.2.1.3 Seção 4 - Aplicação de Prova de Conceito

A última seção do artigo desenvolvido apresentou um exemplo de aplicação usando o modelo analítico  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  como prova de conceito. Em suma, foi descrito o cenário de aplicação e as características das avaliações numéricas, como capacidade da bateria e consumo de energia do nó sensor. Finalmente, foram incluídos os resultados obtidos com avaliações numéricas usando o modelo de bateria proposto (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O exemplo de aplicação escolhido como prova de conceito para este trabalho é baseado no uso de um painel solar, um dos tipos mais comuns de dispositivo de captação de energia. Sendo esta escolha arbitrária, visto que qualquer outro dispositivo poderia ser utilizado para EH para a demonstração do funcionamento do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O trabalho baseou-se principalmente no nível de exposição radiante (ou seja, a energia radiante recebida por uma superfície por unidade de área, em  $J/m^2$ ) para definir a saída do painel solar. A variação de temperatura também foi importante nesse contexto, pois influencia diretamente no comportamento das baterias usadas nas aplicações. Portanto, os dados coletados por uma estação meteorológica, localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria RS Brasil, foram utilizados como parâmetros de entrada para a definição tanto da carga gerada pelo painel solar quanto da temperatura atuante nas baterias dos nós sensores. A figura 43 mostra uma visão panorâmica do local onde os dados foram coletados (coordenadas:  $-29.724960$ ,  $-53.720469$ ) (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Foram separados os dados entre as diferentes estações do ano para obter um comportamento geral da exposição solar radiante e da temperatura em cada período no local de análise. Em seguida, realizou-se um procedimento de ajuste de curva a partir dos pontos de dados obtidos usando (i) um modelo gaussiano para níveis de exposição radiante no seguinte formato:  $gaussiano(x, a, b, c) = a \cdot e^{-((x-b)/c)^2}$ , onde  $x$  é a hora do dia e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os coeficientes da curva gaussiana; e (ii) um modelo de *Fourier* para níveis de temperatura no seguinte formato:  $Fourier(x, m, n, o, p) = m + n \cdot \cos(x \cdot p) + o \cdot \sin(x \cdot p)$ , onde  $x$  é a hora do dia e  $m$ ,  $n$ ,  $o$  e  $p$  são os coeficientes da curva de *Fourier* (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Com estes dados foi desenvolvida uma tabela para apresenta o valor dos coeficientes para os modelos Gaussiano e *Fourier* em cada estação do ano. As figuras 44 e 45 retratam o comportamento da exposição radiante e da temperatura, respectivamente, em todas as estações do ano na estação meteorológica (RODRIGUES *et al.*, 2020).



Figura 43 – Vista panorâmica da estação meteorológica.

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

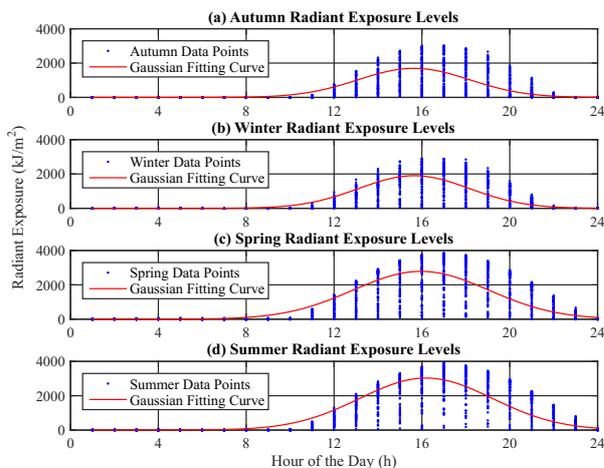


Figura 44 – Níveis de exposição de radiação

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

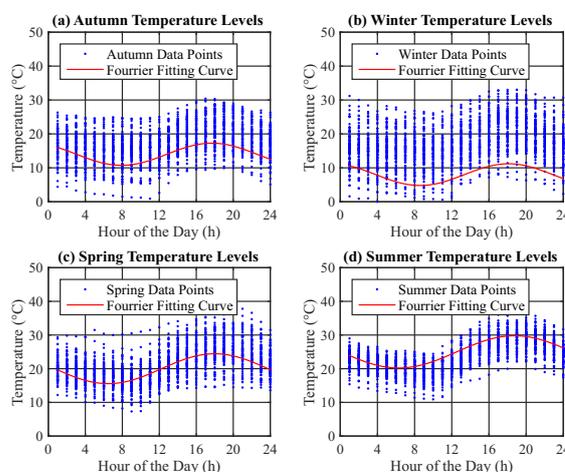


Figura 45 – Níveis de Temperatura

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

Na Figura 44, pode-se observar que a exposição radiante é mais significativa entre 12:00 e 20:00, quando seu nível é de cerca de 500 kJ/m<sup>2</sup> em todas as estações. Isso é melhor observado na Figura 46 (a), que apresenta todas as curvas gaussianas para cada estação do ano no local mencionado anteriormente. A partir deste nível de exposição radiante, ou seja, 500 kJ/m<sup>2</sup>, tornou-se possível observar a geração de valores mais significativos de correntes de recarga, ou seja, acima de 10 mA (RODRIGUES *et al.*, 2020).

A Figura 45 ilustra um comportamento semelhante em todas as estações do ano no que diz respeito aos níveis de temperatura. Em geral, as temperaturas ficam entre 5 °C e 30 °C ao longo do ano na região analisada. A Figura 46 (b) descreve o comportamento geral da temperatura em cada estação (RODRIGUES *et al.*, 2020).

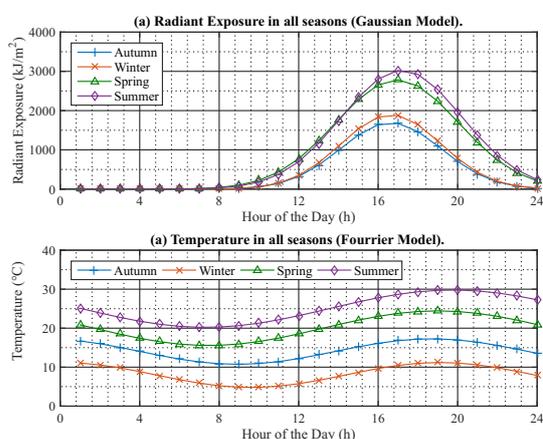


Figura 46 – Comparação entre estações: (a) exposição à radiação e (b) níveis de temperatura

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

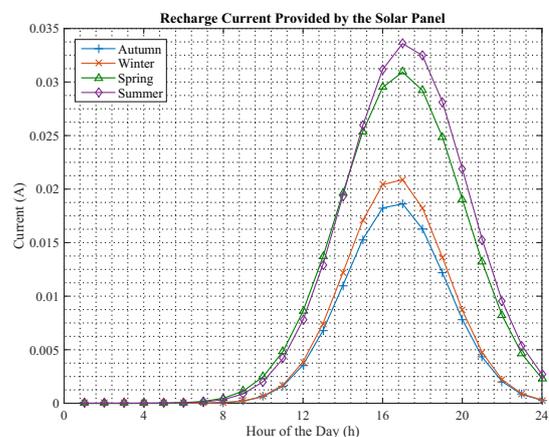


Figura 47 – Corrente fornecida pelo painel solar considerando a exposição radiante em cada estação.

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

Foram implementados e simulados todos os modelos em Matlab. Primeiramente, foram descritas algumas características sobre as avaliações, como a capacidade da bateria e o consumo de energia do nó sensor, bem como o modelo usado para converter a exposição radiante em corrente de recarga. Em seguida, foram apresentados e discutidos os resultados obtidos ao executar diferentes casos de teste (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O nodo emulado na simulação possui uma bateria de 750 mAh. Além disso, os modos de operação do rádio transceptor têm as seguintes características de consumo de corrente: Tx = 30 mA, Rx/Idle = 27 mA e Sleep = 12  $\mu$ A. Por fim, o nó sensor também utiliza um sensor de temperatura, que tem um consumo de corrente de 6 mA quando habilitado. Com base nessas características, foi criado um ciclo de trabalho para avaliar o comportamento da bateria do nodo, principalmente sua vida útil. Este ciclo de trabalho utilizou os seguintes tempos para cada tarefa: 2s para leitura de amostras de dados de temperatura (neste caso, o rádio permanece em modo hibernação, sendo o consumo total igual a 12  $\mu$ A + 6 mA = 6.012 mA), 750 ms para enviar dados (neste caso, o rádio permanece em modo Tx, sendo o consumo total igual a 30 mA), 750 ms para receber dados (neste caso, o rádio permanece em Rx modo, sendo o consumo total igual a 27 mA), e 500 ms para economizar energia (neste caso, o nó sensor não realiza nenhuma ação, sendo o consumo total igual a 12  $\mu$ A). Portanto, o consumo médio de corrente do nó é igual a

$\{(6 \cdot 2.0) + (30 \cdot 0.75) + (27 \cdot 0.75) + (0.012 \cdot 0.5)\} / (2,0 + 0,75 + 0,75 + 0,5) = 13,689 \text{ mA}$ . A tabela 7 resume as atividades realizadas no ciclo de trabalho (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Tabela 7 – Ciclo de trabalho utilizado nas avaliações numéricas.

Atividade	Ciclo de trabalho	
	Consumo mA	Tempo(s)
Leitura do sensor	6	2.00
Rádio Tx	30	0.75
Rádio Rx	27	0.75
Rádio Sleep	0.012	0.50

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

A variação de temperatura no ambiente seguiu o padrão encontrado durante todas as estações do ano, como citado anteriormente. Esses dados foram utilizados para alimentar o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$ , fazendo com que o comportamento da bateria corresponda ao perfil de temperatura em cada estação do ano (RODRIGUES *et al.*, 2020).

A potência média gerada pelo painel solar em uma hora ( $P_{\text{solar}}$ , em  $\text{W}/\text{m}^2$ ) foi obtida usando a Equação (6).

$$P_{\text{solar}} = \frac{E_{\text{solar\_hourly}}}{3600}, \quad (6)$$

onde  $E_{\text{solar\_hourly}}$  é a energia horária integrada (em  $\text{J}/\text{m}^2$ ) e 3600 representa o período de uma hora (em segundos). Da Equação (6), foi possível obter a corrente real fornecida pelo painel solar ( $I_{\text{panel\_t}}$ , em A) usando a Equação 7 (RODRIGUES *et al.*, 2020).

$$I_{\text{panel\_t}} = I_{\text{panel\_max}} \cdot \frac{P_{\text{solar}}}{1000}, \quad (7)$$

Onde  $I_{\text{panel\_max}}$  é a corrente máxima fornecida pelo painel solar conforme a especificação do fabricante e 1000 (em  $\text{W}/\text{m}^2$ ) corresponde à densidade de energia solar recebida na Terra, superfície sem nuvens ao meio-dia e sol no zênite ( $\pm 1,5\%$  de erro) (RODRIGUES *et al.*, 2020). Considerando  $I_{\text{panel\_max}} = 0,04 \text{ A}$  e os dados coletados pela estação meteorológica, o painel solar pode fornecer um pico de corrente na ordem de 33 mA no verão, conforme ilustrado na Figura 47 (RODRIGUES *et al.*, 2020).

A métrica avaliada nesta seção foi a vida útil da bateria. Em outras palavras, o interesse esteve na comparação entre o tempo de vida da bateria usando ou não um dispositivo de EH o que permitiu demonstrar o funcionamento do modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Desconsiderando a influência da temperatura e o uso de um dispositivo de coleta de energia (EH desligado), a avaliação indicou uma vida útil da bateria de 54,81 horas em todas as estações. Por outro lado, usando um dispositivo de coleta de energia (EH, neste caso, um painel solar), a avaliação indica diferentes tempos de vida da bateria. Por exemplo: (a) 81,17 horas para os dados de outono; (b) 85,67 horas para os dados de inverno; (c) 177,49 horas para os dados da primavera; e (d) 222,72 horas para os dados de verão. Particularmente no verão, observou-se um aumento de aproximadamente 306,3% na vida útil da bateria. A tabela 8 mostra um resumo de todos os resultados (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Tabela 8 – Duração das baterias em cada estação do ano

Estação	Vida útil da Bateria (h)		Incremento (%)
	EH desligado	EH ligado	
<b>Outono</b>	54.8153	81.1708	48.08
<b>Inverno</b>	54.8153	85.6764	56.30
<b>Primavera</b>	54.8153	177.4942	223.8
<b>Verão</b>	54.8153	222.7251	306.3

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

A figura 48 mostra o comportamento da bateria em cada estação. Esses resultados enfatizam o benefício do uso de tecnologias de EH em RSSF. No entanto, note que os gráficos com “EH ligado” só apresentaram curvas de descarga bem comportadas por termos utilizado dados cíclicos ao longo do tempo, ou seja, considerando diferentes características de recarga ao longo do tempo, os gráficos apresentariam maiores ou menores variações (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Além disso, o objetivo deste trabalho foi mostrar que o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  pode contabilizar com precisão a entrada e saída de carga da bateria, com base nas validações feitas anteriormente. Ao concluir este exemplo de prova de conceito, mostrou-se que o modelo de bateria proposto consegue lidar com dispositivos de EH, e pode servir como uma forma de viabilizar as baterias em RSSF em uma ampla gama de aplicações sustentáveis (RODRIGUES *et al.*, 2020).

#### 5.2.1.4 Considerações finais sobre o artigo.

Dispositivos de EH são cada vez mais comuns em muitas aplicações, incluindo o contexto de RSSF. No entanto, é complexo estimar o comportamento de baterias quando esses dispositivos são utilizados como fonte de alimentação para sensores. Como consequência, seus modelos de bateria ou energia não descrevem com precisão o comportamento dos processos de carga e descarga da bateria ao longo do tempo, dando origem a diferenças substanciais no tempo de vida dos nós sensores,

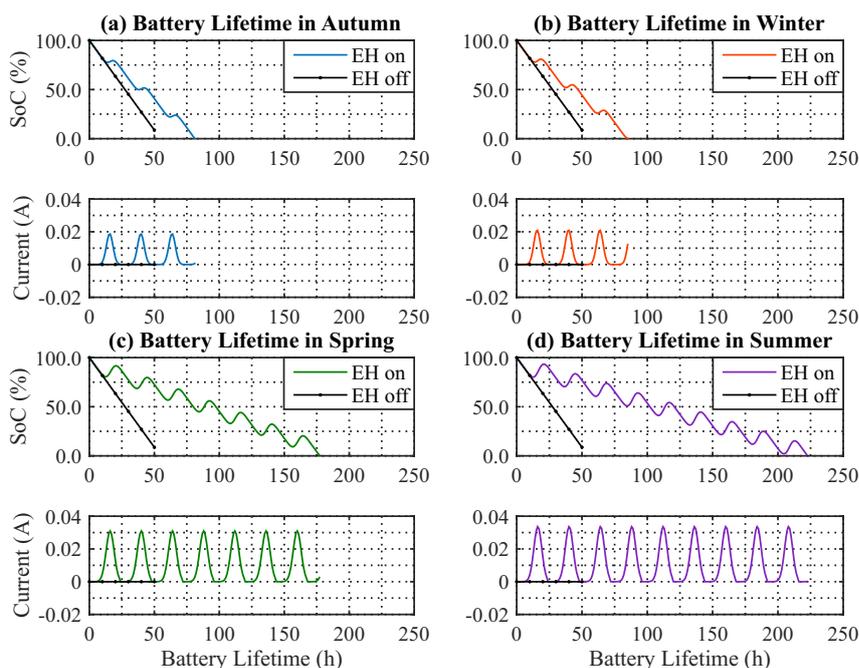


Figura 48 – Comportamento da bateria em cada estação.

Fonte: (RODRIGUES *et al.*, 2020)

dificultando tolerar falhas de energia em simulações ou reais implantações mundiais. O artigo desenvolvido explorou o uso de um modelo analítico preciso de bateria para ambientes que permitem o uso de tecnologias de captação de energia. O  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  considera a influência da temperatura e dos dispositivos de captação de energia na vida útil das baterias, modelando concomitantemente os processos de carga e descarga (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Inicialmente, o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  foi validado através de uma comparação com dados experimentais usando LIBs. Em seguida, um exemplo usando o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  foi apresentado como uma aplicação de prova de conceito. Como esperado, os resultados obtidos mostraram os benefícios que as tecnologias de captação de energia podem proporcionar em situações reais (neste caso, usando dados coletados por uma estação meteorológica). No entanto, o objetivo deste artigo foi enfatizar que o modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  consegue contabilizar o estado de carga da bateria enquanto os aplicativos alimentados por bateria executam suas tarefas e os dispositivos de coleta de energia recarregam suas baterias. Ou seja, o  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  é um modelo que conta com precisão o fluxo de carga e descarga das baterias, simultaneamente. Além disso, este artigo mostrou que  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  é um modelo apropriado para estimar o nível de tensão de baterias usando dispositivos de EH. A abordagem  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  poderá ajudar, por exemplo, projetistas de RSSF a estimar o comportamento da bateria, ao longo do tempo, em simulações (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Uma sugestão para continuidade futura deste trabalho é a implementação de

uma RSSF física que inclua dispositivos de EH para ser possível comparar os tempos de vida reais com os estimados pelo modelo de bateria proposto, bem como a integração de um modelo de desvanecimento de bateria ao modelo  $T\text{-}KiBaM_{EH}$  (RODRIGUES *et al.*, 2020).

### 5.3 CONCLUSÃO

Conforme discutido nesse capítulo, um dos principais aspectos em torno das arquiteturas de *Smart Grid* é integrar as redes elétricas e as infraestruturas de comunicação. As diferentes tecnologias de comunicação existentes podem ser empregadas nas diversas camadas existentes em uma *Smart Grid*, visto que cada camada possui características e demandas diferentes.

A rede GPRS é uma tecnologia de comunicação de dados móveis que utiliza redes de telefonia celular para transmitir informações entre dispositivos. Como citado por Zheng *et al.* (2020), na rede elétrica, a utilização da rede GPRS em sensores pode ser vantajosa por permitir uma comunicação remota e em tempo real dos dados coletados pelos sensores.

Os sensores podem coletar informações sobre o consumo de energia, a qualidade da energia, a presença de falhas e outras informações importantes para o funcionamento da rede elétrica. Com a rede GPRS, esses dados podem ser transmitidos instantaneamente para os sistemas de controle e monitoramento, permitindo uma tomada de decisão rápida e eficiente.

Além disso, a utilização da rede GPRS pode ser uma alternativa mais econômica e flexível do que a implantação de uma rede dedicada para os sensores. Como a rede GPRS utiliza as redes de telefonia celular existentes, não é necessário construir uma infraestrutura própria para a transmissão de dados, o que pode ser especialmente vantajoso em áreas remotas.

As limitações das tecnologias celulares são relacionadas à necessidade de disponibilidade contínua de comunicações. Visto que os serviços das redes celulares são compartilhados com os demais clientes das operadoras e isso pode resultar em congestionamento da rede ou diminuição do desempenho da rede em emergências. Cabe destacar também que o uso de redes de terceiros significa cobranças recorrentes mensais para cada conexão.

A tecnologia celular vem melhorando em termos de taxas de dados e cobertura e se inclinando para os próximos padrões, 5G e 6G. A 5G é a rede de comunicação considerada multifuncional e flexível. Esta tecnologia vem resolvendo muitas complicações relacionadas à análise de custos e aplicações da tecnologia em sistemas de energia elétrica. O 5G também apresenta melhorias relacionadas ao consumo energético, visto que seu consumo por bit é menor que o 4G. Por isso essa tecnologia se torna mais atraente para ser implementada em aplicável a aparelhos alimentados por

baterias. Espera-se que a 5G se estabeleça uma escala maior na qual a quarta revolução industrial é articulada. Destaca-se também que a cobertura de redes celulares já atingiu quase 100% da população no Brasil.

Após revisão bibliográfica sobre o uso tecnologias celulares em *Smart Grids*, foi apresentado o artigo desenvolvido paralelamente ao presente trabalho.

A utilização de baterias recarregáveis em sensores aplicados na rede elétrica traz diversos benefícios, principalmente quando se trata de dispositivos de detecção de faltas de energia. Esses dispositivos são responsáveis por monitorar a rede elétrica em tempo real, identificando eventuais falhas e permitindo que as equipes de manutenção sejam acionadas para corrigir o problema de forma rápida e eficiente.

As baterias recarregáveis são ideais para esse tipo de aplicação porque permitem que os sensores funcionem mesmo durante uma queda de energia, garantindo a continuidade da monitoração. Além disso, elas são uma opção mais sustentável e econômica em comparação com as baterias descartáveis, já que podem ser recarregadas várias vezes e não precisam ser substituídas com frequência.

Outro benefício é a flexibilidade de posicionamento dos sensores, uma vez que não há necessidade de conexão com a rede elétrica, o que reduz os custos de instalação e manutenção. Além disso, as baterias recarregáveis também são mais seguras, já que não apresentam riscos de vazamentos ou explosões, como pode ocorrer com as baterias descartáveis.

Visto que a limitação de energia é um dos principais gargalos durante a operação de muitas aplicações emergentes, como veículos elétricos, medidores de água e gás e diversos sensores usados no contexto da Internet das Coisas e sistemas ciberfísicos. As técnicas de captação de energia surgiram como uma solução promissora para minimizar os problemas de energia encontrados nesses tipos de domínios de aplicação.

Nos sistemas de EH, um desafio crítico é a necessidade de usar modelos de bateria capazes de estimar com precisão a potência de entrada e saída das baterias. O artigo apresentado propôs um modelo analítico de bateria dependente da temperatura capaz de estimar algumas informações, por exemplo, estado de carga, tensão e vida útil de baterias que usam tecnologias de captação de energia.

O modelo desenvolvido foi validado comparando seus resultados analíticos com um conjunto de dados chamado *Randomized Battery Usage Data Set*, que está disponível no repositório de dados do site da NASA. Também foi apresentada uma aplicação de prova de conceito, demonstrando que a utilização destas tecnologias pode servir como um meio eficaz para prolongar o tempo de funcionamento das baterias, resultando em benefícios significativos para uma série de aplicações.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo dos anos, a sociedade vem se desenvolvendo em ritmo acelerado com base no uso de energia. A energia elétrica é responsável pelo desenvolvimento econômico, melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento tecnológico. Isso significa que não apenas o mundo é completamente dependente de energia, mas a demanda por ela está crescendo.

O sistema atual consiste basicamente em grandes unidades geradoras de energia localizadas distantes dos grandes centros consumidores, tornando a rede de transmissão muito longa e cara. Esta rede é unidirecional e não é totalmente automatizada. Os sistemas de geração e transmissão de energia no Brasil possuem pouca automação, supervisão e controle. Diferentemente dos sistemas de transmissão, os sistemas de distribuição já estão em fase inicial de implantação de sistemas de automação, e a maior dificuldade está relacionada ao grande número de clientes conectados nesta rede e a complexidade de seus processos.

Novos requisitos de qualidade, segurança, flexibilidade e sustentabilidade relacionados ao setor de energia exigem redução de perdas não técnicas, melhoria da continuidade e eficiência energética. Portanto, sistemas elétricos mais inteligentes e equipamentos robustos estão se tornando cada vez mais necessários.

A implementação do conceito de *Smart Grid* implica tanto na modernização da infraestrutura de rede, envolvendo todas as questões técnicas inerentes, bem como mudanças nas atitudes e processos dos agentes que compõem a rede de energia.

Iniciativas relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias que promovam a eficiência e o monitoramento do uso de energia se destacam no meio acadêmico, para que através da pesquisa sejam propostas soluções aos desafios relacionados ao tema.

A implantação de sensores para o monitoramento do sistema de distribuição de energia elétrica é uma parte importante das *Smart Grid's*. Estes sensores são responsáveis por capturar informações e enviá-las ao centro de controle da concessionária, onde o operador da rede toma as decisões. Com a automatização e o sensoriamento da rede, o religamento de áreas não afetadas poderá ser feito mais rapidamente, eliminando o desconforto do usuário e melhorando a confiabilidade da rede. Também note-se que, na maioria das redes de sensores sem fio, a fonte de alimentação consiste em uma bateria e a energia da bateria é limitada.

Na REI os sensores inteligentes utilizam os mais variados meios de comunicação, e estando interligados a rede, podem indicar com precisão o local da falha.

A utilização de sensores em redes inteligentes de distribuição de energia requer maior conectividade, pois a cobertura é vasta. As comunicações sem fio têm mostrado vantagens como altas taxas de sucesso, velocidade de comunicação segura e facili-

dade de instalação e manutenção.

Assim, o presente trabalho visou identificar as necessidades relacionadas ao monitoramento e detecção de falhas das redes de distribuição de energia. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos relacionados a redes elétricas inteligentes e seus elementos, assim como os aspectos regulatórios, tecnológicos e os fatores que motivam o desenvolvimento desse setor. Assim como foi realizada pesquisa sobre sistemas de comunicação sem fio, com foco maior nas redes GSM e GPRS. Descreveu-se também o setor elétrico brasileiro e seu panorama atual, com foco no estado de Santa Catarina, estado onde o presente trabalho foi desenvolvido.

A partir da pesquisa bibliográfica e entrevistas realizadas, foram estabelecidos os principais requisitos para o desenvolvimento de um protótipo capaz de identificar faltas na rede de distribuição de energia, os requisitos elencados foram: enviar bilhetes de confirmação com tempo pré-estabelecido, para aferição diária do dispositivo e do sistema de comunicação empregado, assim como para confirmar o fornecimento de energia naquela região, detectar o deslocamento do elo fusível, comunicar o evento de deslocamento ao centro de operações, comunicar a localização geográfica, comunicar horário do evento, comunicar código da chave de ocorrência (Fase) e comunicar o evento de deslocamento mesmo no caso de uma falha permanente (comunicar sem alimentação direta).

Os resultados obtidos durante o presente trabalho permitiram o desenvolvimento de um protótipo capaz de identificar a abertura de uma chave-fusível, atendendo os requisitos pré-estabelecidos. Após a realização da montagem do protótipo e execução dos testes, pode-se constatar que o dispositivo desenvolvido conseguiu identificar o evento de abertura do cartucho da chave fusível, o qual ocorre em casos de faltas permanentes causadas por curto-circuitos ou sobretensão. Além de identificar a falta, o dispositivo transmitiu a informação do evento através da rede GSM/GPRS, possibilitando a identificação do transformador a ser reparado/religado. O cumprimento destas etapas mostrou ser possível implementar tecnologias de comunicação sem fio em um dispositivo identificador de falhas no domínio das redes de distribuição de energia, assim como desenvolver um protótipo de baixo custo do dispositivo. Com isso, percebe-se que o dispositivo desenvolvido pode ser um aliado na redução do tempo de resposta e manutenção da rede em casos de falta de energia.

Por fim, foi apresentado o artigo *"An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. International Journal of Energy Research"*. Este artigo teve como finalidade propor um novo modelo analítico de bateria, considerando baterias que utilizam tecnologias de EH e operam sob diferentes temperaturas. Ou seja, um modelo de bateria dependente da temperatura, chamado de *T-KiBaM for Energy Harvesting (T-KiBaM<sub>EH</sub>)*. O modelo desenvolvido es-

tima a vida útil das baterias, modelando concomitantemente os processos de carga e descarga.

Visto isso, o principal interesse científico do presente projeto foi contribuir através da revisão bibliográfica com estado da arte da temática em questão. Assim como demonstrar a possibilidade de desenvolvimento de um protótipo de baixo custo utilizando tecnologias de comunicação sem fio e buscando a resolução de problemas relacionados a aplicações voltadas ao monitoramento e controle de energia em redes de distribuição de energia.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho identificaram-se questões que permitem o desenvolvimento de estudos futuros. Sugere-se implementação de módulos solares no dispositivo, a fim de torná-los autônomos e propiciar maior segurança no monitoramento da rede, além de possibilitar análises relacionadas ao modelo *T-KiBaM<sub>EH</sub>*. Também considera-se válida a expansão ao estudo relacionado a redes de comunicação sem fio, buscando a redução do custo de manutenção do sistema empregando uma rede proprietária. Além disso, o modelo de bateria recarregável desenvolvido mostrou ser uma alternativa mais sustentável e econômica para o fornecimento de energia aos sensores. Essas tecnologias têm grande potencial para serem aplicadas em larga escala em smart grids, contribuindo para a melhoria da qualidade da energia fornecida e para a redução de custos e impactos ambientais.

Espera-se, por fim, que os resultados deste trabalho possam contribuir com o avanço das pesquisas relacionadas às tecnologias de *Smart Grids* que buscam soluções para problemas específicos do Brasil. De modo a tornar a infraestrutura elétrica moderna para poder, assim, acomodar o uso de novas tecnologias que visam confiança e eficiência do sistema.

## REFERÊNCIAS

ABHARI, Kaveh; DAVIDSON, Elizabeth J.; XIAO, Bo. Modeling Social Product Development Process, Technology, and Governance. **IEEE Transactions on Engineering Management**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 69, p. 409–422, 2 abr. 2022. ISSN 15580040. DOI: 10.1109/TEM.2020.2973234.

ABRADEMP. [S.l.: s.n.]. Disponível em:  
<http://www.abrademp.com.br/associada.php>.

ACON - SMART GRIDS CZ/SK | ACON - SMART GRIDS CZ/SK. [S.l.: s.n.].  
 Disponível em: <https://www.acon-smartgrids.cz/en>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ACT, Recovery. The American Recovery and Reinvestment Act of 2009. **Public Law**, v. 111, n. 5, p. 5–30, 2009.

AEROSEMI TECHNOLOGY CO, Ltd. Arosemi mt3608. **Mt3608**, p. 1–7, 2017.

AHMAD, Tanveer *et al.* Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 160, January, p. 112128, 2022. ISSN 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112128. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112128>.

ALIEXPRESS. **1 pces esp32 placa de desenvolvimento wifi + bluetooth ultra baixo consumo de energia duplo núcleo ESP 32 ESP 32S esp32s semelhante esp8266|Circuitos integrados** | - AliExpress. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:  
[https://pt.aliexpress.com/item/4001340660273.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.21ee422ee0RVja&algo\\_pvid=85ff4093-f4f0-4611-aed8-37f0390ce00a&aem\\_p4p\\_detail=202303021102536210300803521380009446207&algo\\_exp\\_id=85ff4093-f4f0-4611-aed8-37f0390ce00a-0&pdp\\_ext\\_f=](https://pt.aliexpress.com/item/4001340660273.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.21ee422ee0RVja&algo_pvid=85ff4093-f4f0-4611-aed8-37f0390ce00a&aem_p4p_detail=202303021102536210300803521380009446207&algo_exp_id=85ff4093-f4f0-4611-aed8-37f0390ce00a-0&pdp_ext_f=).

ALIEXPRESS. **100PCS 1N4007 10A10 1N5408 1N5819 4001 5822 FR104 307 UF4007 SB560 RL207 SR5100 SR240 HER308 RU4A BYV26D IN4007 diodos Retificadores** | - AliExpress. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:  
[https://pt.aliexpress.com/item/1005005238081474.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.27c325e903UVtR&algo\\_pvid=e10b5d0c-a8e9-42a5-b3c4-](https://pt.aliexpress.com/item/1005005238081474.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.27c325e903UVtR&algo_pvid=e10b5d0c-a8e9-42a5-b3c4-)

09d07e89d908&aem\_p4p\_detail=202303021054471187648797813170009485662&algo\_exp\_id=e10b5d0c-a8e9-42a5-b3c4-09d07e89d908-0&pdp\_ext\_f=.

**ALIEXPRESS. 103450 3.7v 2000mah bateria de polímero de lítio recarregável jst ph 2.0mm 2pin plugue para câmera gps navigator mp5 fone de ouvido bluetooth|Baterias recarregáveis - AliExpress.** [S.l.: s.n.]. Disponível em:

[https://pt.aliexpress.com/item/1005002919536938.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.24ba3c05ld8nHt&algo\\_pvid=4e701404-8430-432d-87b3-974a4a43afb0&aem\\_p4p\\_detail=20230302111548109931276243960009429059&algo\\_exp\\_id=4e701404-8430-432d-87b3-974a4a43afb0-1&pdp\\_ext\\_f=.](https://pt.aliexpress.com/item/1005002919536938.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.24ba3c05ld8nHt&algo_pvid=4e701404-8430-432d-87b3-974a4a43afb0&aem_p4p_detail=20230302111548109931276243960009429059&algo_exp_id=4e701404-8430-432d-87b3-974a4a43afb0-1&pdp_ext_f=)

**ALIEXPRESS. 5pcs DC DC mt3608 step up conversor impulsorador da fonte de alimentação pulso módulo de saída máxima 28v 2a para arduino ajustável 5v/9v/12v/24v| - AliExpress.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

[https://pt.aliexpress.com/item/1005004177149903.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.61742b77vRKC62&algo\\_pvid=78e99d09-9b7d-451b-8ef0-7c3b36609bf9&aem\\_p4p\\_detail=202303021107443150204295534400009478591&algo\\_exp\\_id=78e99d09-9b7d-451b-8ef0-7c3b36609bf9-1&pdp\\_ext\\_f=.](https://pt.aliexpress.com/item/1005004177149903.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.61742b77vRKC62&algo_pvid=78e99d09-9b7d-451b-8ef0-7c3b36609bf9&aem_p4p_detail=202303021107443150204295534400009478591&algo_exp_id=78e99d09-9b7d-451b-8ef0-7c3b36609bf9-1&pdp_ext_f=)

**ALIEXPRESS. Lm2596s DC DC step down módulo de alimentação 3a ajustável step down regulador de tensão 24v 12v 5v 3v módulo lm2596|Reguladores de tensão/estabilizadores - AliExpress.** [S.l.: s.n.], fev. 2023. Disponível em:

[https://pt.aliexpress.com/item/1005003032264323.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.10c92d42miXtYt&algo\\_pvid=c41af38d-a829-4cb3-930a-3df2c445726e&aem\\_p4p\\_detail=202303021037553761670690276030009443678&algo\\_exp\\_id=c41af38d-a829-4cb3-930a-3df2c445726e-0&pdp\\_ext\\_f=.](https://pt.aliexpress.com/item/1005003032264323.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.10c92d42miXtYt&algo_pvid=c41af38d-a829-4cb3-930a-3df2c445726e&aem_p4p_detail=202303021037553761670690276030009443678&algo_exp_id=c41af38d-a829-4cb3-930a-3df2c445726e-0&pdp_ext_f=)

**ALIEXPRESS. Mt3608 DC DC step up conversor impulsorador módulo de fonte de alimentação boost step up placa de saída máxima 28v 2a para arduino kit diy|Circuitos integrados - AliExpress.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

[https://pt.aliexpress.com/item/1005001622010062.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.7549212bAQqFM2&algo\\_pvid=a0f13d2f-b3d5-4cd9-92a3-ae976fb82ac3&aem\\_p4p\\_detail=202303021044355901162949930850009330671&algo\\_exp\\_id=a0f13d2f-b3d5-4cd9-92a3-ae976fb82ac3-0&pdp\\_ext\\_f=.](https://pt.aliexpress.com/item/1005001622010062.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.7549212bAQqFM2&algo_pvid=a0f13d2f-b3d5-4cd9-92a3-ae976fb82ac3&aem_p4p_detail=202303021044355901162949930850009330671&algo_exp_id=a0f13d2f-b3d5-4cd9-92a3-ae976fb82ac3-0&pdp_ext_f=)

**ALIEXPRESS. 1 pces menor sim800l gprs gsm módulo placa de núcleo cartão microsim quad band ttl porta serial|Circuitos integrados.** [S.l.: s.n.], 2023.

Disponível em: [https://pt.aliexpress.com/item/1005003463137583.html?spm=a2g0o.productlist.main.5.6e292971My00FN&algo\\_pvid=f20910a2-da4e-45c2-](https://pt.aliexpress.com/item/1005003463137583.html?spm=a2g0o.productlist.main.5.6e292971My00FN&algo_pvid=f20910a2-da4e-45c2-)

9d7e-5fd64a266032&aem\_p4p\_detail=202303021050123858713960484000009405899&algo\_exp\_id=f20910a2-da4e-45c2-9d7e-5fd64a266032-2&pdp\_ext\_f=.

ALIZADEH, Ali *et al.* A Recurrent Neural Network Approach to Model Failure Rate Considering Random and Deteriorating Failures. **26th International Computer Conference, Computer Society of Iran, CSICC 2021**, p. 1–7, 2021. DOI: 10.1109/CSICC52343.2021.9420545.

ALMEIDA, José Alvaro Jardim de. **P&D NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: UM ESTUDO DE CASO NA COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO**. 2008. F. 99. Dissertação – P&D no setor elétrico brasileiro: um estudo de caso na companhia hidro elétrica do São Francisco. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4441/1/arquivo6061%7B%5C\\_%7D1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4441/1/arquivo6061%7B%5C_%7D1.pdf).

ANATEL. **Anatel - Áreas Cobertas**. [S.l.: s.n.], nov. 2022. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/areas-cobertas1>.

ANEEL. **ANEEL divulga desempenho e ranking das distribuidoras sobre fornecimento de energia em 2021 – Português (Brasil)**. [S.l.: s.n.], mar. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021>.

ANEEL. **ANEXO VIII DA RESOLUÇÃO NORMATIVA N<sup>o</sup> 956, DE 7 DE DEZEMBRO 2021 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL-PRODIST MÓDULO 8-QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA Seção 8.0 Introdução Conteúdo**. [S.l.: s.n.], 2021.

ANEEL. **Curso EAD: Fundamentos do Setor Elétrico**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: [http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4%7B%5C\\_%7Duni1%7B%5C\\_%7Ds116.html](http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4%7B%5C_%7Duni1%7B%5C_%7Ds116.html). Acesso em: 16 mar. 2020.

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição - ANEEL**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>. Acesso em: 27 jan. 2020.

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n.º 464 de 22/11/2011**. [S.l.: s.n.], mai. 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114700>.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N.º 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. [S.l.: s.n.], abr. 2012. P. 1–13.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N.º 502, DE 7 DE AGOSTO DE 2012**. [S.l.: s.n.], ago. 2012. P. 1–3.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N.º 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015**. [S.l.: s.n.], 2015. P. 25.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração**. [S.l.: s.n.], 2022.

ASAAD, Mohammad *et al.* Smart grid and Indian experience: A review. **Resources Policy**, Elsevier Ltd, p. 101499, set. 2019. ISSN 03014207. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101499.

AVE, Borregas. MPU-6050 Datasheet. **InvenSense**, v. 1, n. 408, p. 54, 2012. Disponível em: [www.invensense.com](http://www.invensense.com).

BACNAR, David *et al.* On Security And Privacy In Smart Metering Systems. **2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2022**, 2022. DOI: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854239.

BANAR, David *et al.* On Security And Privacy In Smart Metering Systems. *In: 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. [S.l.: s.n.], 2022. P. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854239.

AL-BADI, Abdullah Hamed *et al.* Survey of Smart Grid Concepts and Technological Demonstrations Worldwide Emphasizing on the Oman Perspective. **Applied System Innovation**, v. 3, n. 1, 2020. ISSN 2571-5577. DOI: 10.3390/asi3010005. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-5577/3/1/5>.

BHAJANTRI, Lokesh B.; GANGADHARAIH, S. A comprehensive survey on resource management in internet of things. **Journal of Telecommunications and Information Technology**, IEEE, v. 2020, n. 4, p. 27–43, 2020. ISSN 18998852. DOI: 10.26636/JTIT.2020.145220.

BONAVOLONTA, Francesco *et al.* Protection of MV smart grid based on IoT technology. **2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings**, p. 112–116, 2019. DOI: 10.1109/METROI4.2019.8792881.

BORGAONKAR, Ravishankar; JAATUN, Martin Gilje. 5G as an Enabler for Secure IoT in the Smart Grid : Invited Paper; 5G as an Enabler for Secure IoT in the Smart Grid : Invited Paper. **2019 First International Conference on Societal Automation (SA)**, 2019. Disponível em: <http://www.nrg5.eu/about-us-2/>..

BRASIL. **Segurança de Infraestruturas Críticas - SIC - Português (Brasil)**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/gsi/pt-br/assuntos/seguranca-de-infraestruturas-criticas-sic>. Acesso em: 12 nov. 2022.

BRASIL. DECRETO N.º 9.319, DE 21 DE MARÇO DE 2018. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 mar. 2018. ISSN 1677-7042. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil%5C\\_03/%5C\\_ato2015-2018/2018/decreto/D9319.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil%5C_03/%5C_ato2015-2018/2018/decreto/D9319.htm). Acesso em: 12 nov. 2022.

BRASIL. DECRETO N.º 9.854, DE 25 DE JUNHO DE 2019. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 jun. 2019. ISSN 1677-7042. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil%5C\\_03/%5C\\_ato2019-2022/2019/decreto/D9854.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil%5C_03/%5C_ato2019-2022/2019/decreto/D9854.htm). Acesso em: 12 nov. 2022.

BRASIL. **LEI N.º 8.987, DE 13 DE FEVEREIRO DE 1995**. [S.l.: s.n.], fev. 1995. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil%7B%5C\\_%7D03/leis/18987cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil%7B%5C_%7D03/leis/18987cons.htm).

BRASIL; MME; EPE. Balanço Energético Nacional 2019, p. 303, 2019.

CACHAPUZ, Paulo Brandi de Barros. **História da operação do Sistema Interligado Nacional**. [S.l.]: Centro da Memória da Electricidade no Brasil. CMEB, 2003. P. 416. ISBN 9788585147594.

CALHAU, Flávio G. *et al.* Smart Grids: Características, Requisitos e Perspectivas. **Educação, Tecnologia e Cultura**, p. 17–30, jul. 2014. DOI: 10.5281/ZENODO.3710976.

CAMPAGNA, N. *et al.* Energy Management Concepts for the Evolution of Smart Grids. **8th International Conference on Smart Grid, icSmartGrid 2020**, p. 208–213, 2020. DOI: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144909.

CELESC. **A Celesc Distribuição**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/a-celesc-distribuicao>. Acesso em: 18 mar. 2020.

CELESC. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2021**. [S.l.], 2021. P. 1–134. Disponível em: <https://api.mzmq.com/mzfilemanager/v2/d/137b4414-3d0c-493e-8b59-0d02bc3e4072/158680f4-7775-0cef-b673-47515b798b3c?origin=1>.

CEMIG. **Projetos Piloto**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <http://redesinteligentesbrasil.org.br/projetos-piloto-brasil.html>. Acesso em: 23 mar. 2020.

CERAÇÁ. [S.l.: s.n.]. [http://www.ceraca.com.br/distribuicao\\_energia/](http://www.ceraca.com.br/distribuicao_energia/). (Accessed on 11/15/2022).

CHAPECÓ (SC) | CIDADES E ESTADOS | IBGE. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/chapeco.html>. Acesso em: 17 set. 2022.

CHAUDHARY, Sapna *et al.* CRAIoT: Concept, Review and Application(s) of IoT. **Proceedings - 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages, IoT-SIU 2019**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., abr. 2019. DOI: 10.1109/IOT-SIU.2019.8777467.

CHEN, Baoren *et al.* Investigations on communication and management techniques for electric internet of things applications in smart grid. **China International Conference on Electricity Distribution, CICED**, IEEE Computer Society, 2021-April, p. 515–518, abr. 2021. ISSN 2161749X. DOI: 10.1109/CICED50259.2021.9556838.

CHETTRI, Lalit; BERA, Rabindranath. A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. **IEEE Internet of Things Journal**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 7, p. 16–32, 1 jan. 2020. ISSN 23274662. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2948888.

COBERTURA 3G / 4G / 5G A CHAPECÓ - NPERF.COM. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.nperf.com/pt/map/BR/3466296.Chapeco/161704.Vivo->

Mobile/signal/?ll=-26.94613082191672%5C&lg=-53.19474399089814%5C&zoom=10.  
Acesso em: 6 nov. 2022.

COLAK, Ayse; GULER, Naki; AHMED, Khaled. Intelligent communication techniques for smart grid systems: A survey. **9th International Conference on Smart Grid, icSmartGrid 2021**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 273–277, jun. 2021. DOI: 10.1109/ICSMARTGRID52357.2021.9551027.

COMMISSION, European. **Key cross border infrastructure projects**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/projects-common-interest/key-cross-border-infrastructure-projects%5C\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/projects-common-interest/key-cross-border-infrastructure-projects%5C_en). Acesso em: 12 nov. 2022.

COMMISSION, European. **Trans-European Networks for Energy**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/trans-european-networks-energy%5C\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/trans-european-networks-energy%5C_en). Acesso em: 12 nov. 2022.

COMMISSION, European *et al.* **Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 : final report**. [S.l.]: Publications Office, 2020. DOI: doi/10.2833/492070.

COMMISSION, International Electrotechnical *et al.* **Communication networks and systems for power utility automation—Part 7-4: Basic communication structure—Compatible logical node classes and data object classes**. [S.l.]: March, 2010.

COMMISSION, International Electrotechnical *et al.* **Telecontrol Equipment and Systems. Part 5: Transmission Protocols. Section 101: Companion Standard for Basic Telecontrol Tasks**. [S.l.], 1995.

COPEL. **Copel implementa sistema pioneiro de operação em todas as subestações - Copel - Pura Energia**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.copel.com/site/noticias/copel-implementa-sistema-pioneiro-de-operacao-em-todas-as-subestacoes/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

COPEL. **Sistema ADMS possibilita à Copel gerenciar de forma remota suas subestações no Paraná Ipesi**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://ipesi.com.br/sistema-adms-possibilita-a-copel-gerenciar-de-forma-remota-suas-subestacoes-no-parana/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. Edição: LTC. 15. ed. [S.l.: s.n.], 2007. P. 440.

DCELT. **DCELT empresa**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.dcelt.com.br/dceltempresa.html>.

DESCRIPTION, General; APPLICATION, Typical. LM2595 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150 kHz 1A Step-Down Voltage Regulator SIMPLE SWITCHER 5 Power Converter 150 kHz 1A Step-Down Voltage Regulator. December, 1999.

DISTRIBUIÇÃO, Enel. **Enel Distribuição Goiás promove operação para instalar equipamentos de telecontrole na região de Uruaçu - enel.com.br**. [S.l.: s.n.], 2019.

Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-goias/midia/news/d201910-enel-distribuicao-goias-operacao-equipamentos-de-telecontrole-uruacu.html>.

Acesso em: 2 abr. 2020.

DOE, Department of Energy. **COMMUNICATIONS REQUIREMENTS OF SMART GRID TECHNOLOGIES**. [S.l.], 2010. Disponível em:

<https://www.energy.gov/gc/downloads/communications-requirements-smart-grid-technologies>.

DRANKA, Géremi Gilson; FERREIRA, Paula. Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, v. 136, p. 111033, 2020. ISSN 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111033>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519306202>.

ELEKTRO. **Elektro - Elektro anuncia tecnologia inédita no país**. [S.l.: s.n.], 2019.

Disponível em: <https://www.elektro.com.br/noticias/10/30/2019/elektro-anuncia-tecnologia-inedita-no-pais>. Acesso em: 2 abr. 2020.

ELETROSUL. **CGT Eletrosul**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em:

<http://www.eletrosul.gov.br/a-empresa/mercado-de-atuacao>. Acesso em: 18 mar. 2020.

ENEH, Joy Nnenna; ONYEKACHI ORAH, Harris; EMEKA, Aka Benneth. Improving the Reliability and Security of Active Distribution Networks Using SCADA Systems.

**IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference: Power Economics and Energy**

**Innovation in Africa, PowerAfrica 2019**, Institute of Electrical e Electronics

Engineers Inc., p. 110–115, ago. 2019. DOI: 10.1109/POWERAFRICA.2019.8928647.

ENERGIA ELÉTRICA, Agência Nacional de. Resolução Normativa ANEEL N<sup>o</sup> 547 DE 16/04/2013. **Diário Oficial da União**, Brasil, 10 mai. 2013. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1%5C&pagina=57%5C&data=10/05/2013>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ENERGIA ELÉTRICA, Agência Nacional de. Resolução Normativa ANEEL N<sup>o</sup> 733, de 12/09/2016. **Diário Oficial da União. Seção 1. p. 96**, Brasil, 12 set. 2016. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1%5C&pagina=96%5C&data=12/09/2016>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ENERGIA ELÉTRICA, Agência Nacional de. RESOLUÇÃO NORMATIVA n<sup>o</sup> 502, de 14/08/2012. **Diário Oficial da União. Seção 1. p. 30**, Brasil, 14 ago. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1%5C&pagina=30%5C&data=14/08/2012>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ENERGIA ELÉTRICA, Agência Nacional de. RESOLUÇÃO NORMATIVA n<sup>o</sup> 610, de 13/05/2014. **Diário Oficial da União. Seção 1. p. 53**, Brasil, 13 mai. 2014. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1%5C&pagina=53%5C&data=13/05/2014>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ENERGISA. **Especificação Técnica Unificada**. [S.l.], 2022. P. 55. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%7B%5C%27%7Be%7D%7Dcnicas/ETU-127%20-%20Elo-fus%7B%5C%27%7Bi%7D%7Dvel%20de%20distribui%7B%5C%27%7Bc%7D%7D%7B%5C%27%7Ba%7D%7Do.pdf>.

EPE. **ESTUDOS PARA A EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE ALTERNATIVAS: RELATÓRIO R1 Estudo de Atendimento Elétrico ao Estado de Santa Catarina: Regiões Sul e Extremos Sul**. - Rio de Janeiro, 2017. P. 316.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA;  
MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2029**. Rio de Janeiro, Brazil, 2019. P. 101–149.

ESPRESSIF. **ESP32 Wi-Fi and Bluetooth Modules I Espressif**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>. Acesso em: 14 ago. 2021.

ESTADO DE SANTA CATARINA, Governo do. **Economia - Governo do Estado de Santa Catarina**. [S.l.: s.n.], 2020. P. 1. Disponível em:

<https://www.sc.gov.br/conhecasc/economia>. Acesso em: 17 mar. 2020.

FILHO, H. G.Schroder; FILHO, J. Pissolato; PINTO, A. J.G. New methodology for smart grids in Brazil. **CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015**, IEEE, p. 573–578, 2016. DOI: 10.1109/Chilecon.2015.7400435.

FILHO, J M; MAMEDE, D R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [S.l.]:

Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 9788521618843. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=8w3SygAACAAJ>.

GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, CGEE Centro de. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional**. Brasília, 2012. P. 172.

GIGUER, Sergio. **Proteção sistemas de distribuição**. [S.l.]: Editora Sagra, 1988. ISBN 8524101954.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. [S.l.]: Atlas, 2017. P. 188.

GUNGOR, Vehbi C. *et al.* Smart grid technologies: Communication technologies and standards. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 7, p. 529–539, 4 nov. 2011. ISSN 15513203. DOI: 10.1109/TII.2011.2166794.

HECK, Giancarlo Covolo *et al.* GRID-CITY: A Framework to Share Smart Grids Communication with Smart City Applications. **2021 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2021**, IEEE, p. 1–4, 2021. DOI:

10.1109/ISC253183.2021.9562794.

HERMES TRIGO DIAS DA SILVA. **Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo**. Mar. 2012. F. 108. Tese (Doutorado) – PUC - Rio, Rio de Janeiro. DOI:

<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.20230>.

HOME - DANUBE INGRID. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://danubeingrid.eu/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

HOSSAIN, Md Tamjid; BADSHA, Shahriar; SHEN, Haoting. PoRCH: A novel consensus mechanism for blockchain-enabled future SCADA systems in smart grids and industry 4.0. **IEMTRONICS 2020 - International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, Proceedings**, p. 0–6, 2020. DOI: 10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216438. arXiv: 2109.09966.

IBGE. **IBGE | Cidades | Santa Catarina | Panorama**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/panorama>. Acesso em: 16 mar. 2020.

IBGE. **IBGE | Cidades | Santa Catarina | Chapecó | Panorama**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/chapeco/panorama%20year%20=%20%7B2022%7D>. Acesso em: 19 set. 2022.

IEA. **Smart grids Tracking Energy Integration Analysis - IEA**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/smart-grids%7B%5C#%7Dabstract>. Acesso em: 23 mar. 2020.

IERC. The Internet of Things: new horizons. *In*: IAN G SMITH (Ed.). Halifax: IERC - Internet of Things European Research Cluster, 2012. v. 1. Disponível em: [www.platinumprint.com](http://www.platinumprint.com).

INSTITUTO ACENDE BRASIL. Matriz elétrica do futuro: diversificada, dispersa e integrada, 2021.

JIANG, Yazhou. Data-Driven Probabilistic Fault Location of Electric Power Distribution Systems Incorporating Data Uncertainties. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 12, n. 5, p. 4522–4534, set. 2021. ISSN 19493061. DOI: 10.1109/TSG.2021.3070550.

JUSHI, Adnant; PEGATOQUET, Alain; LE, Trong Nhan. Wind Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks. **Proceedings - 19th Euromicro Conference on Digital System Design, DSD 2016**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 301–308, out. 2016. DOI: 10.1109/DSD.2016.43.

KABALCI, Yasin. A survey on smart metering and smart grid communication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 302–318, mai. 2016. ISSN 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.114. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115014975>.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. de; ROBBA, E.J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. ISBN 9788521216896. Disponível em:  
<https://books.google.com.br/books?id=cDjWDwAAQBAJ>.

KANANI, Pratik; PADOLE, Mamta. Real-time Location Tracker for Critical Health Patient using Arduino, GPS Neo6m and GSM Sim800L in Health Care. **Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICICCS 2020**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 242–249, mai. 2020. DOI: 10.1109/ICICCS48265.2020.9121128.

KHAN, Reduan H.; KHAN, Jamil Y. **A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network**. v. 57. [S.l.]: Elsevier, fev. 2013. P. 825–845. DOI: 10.1016/j.comnet.2012.11.002.

KUMAR, Pardeep *et al.* Smart Grid Metering Networks: A Survey on Security, Privacy and Open Research Issues. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 3, p. 2886–2927, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2899354.

LOPES, João Abel Peças *et al.* The future of power systems: Challenges, trends, and upcoming paradigms. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 9, n. 3, 2020. ISSN 2041840X. DOI: 10.1002/wene.368.

MACHADO, Bruno de Brito. **Sistema preditivo de detecção de faltas em redes de distribuição de energia elétrica**. 2017. F. 1–117. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em:  
<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/331137>.

MAESTRI, Cláudia Olímpia Neves Mamede;  
ANDRADE, Maria Elisabeth Moreira Carvalho. Indicadores de qualidade do fornecimento de energia no Brasil. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 8, n. 1, p. 40–61, 2019.

MAHMOOD, Anzar; JAVAID, Nadeem; RAZZAQ, Sohail. A review of wireless communications for smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Pergamon, v. 41, p. 248–260, jan. 2015. ISSN 1364-0321. DOI: 10.1016/J.RSER.2014.08.036.

MARQUIS, James; DEEB, Ruba S. Roadmap to a successful product development. **IEEE Engineering Management Review**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 46, p. 51–58, 4 dez. 2018. ISSN 19374178. DOI: 10.1109/EMR.2018.2884275.

MASSMANN, Juliana Costa; JÚNIOR, Dalmo Cardoso Silva. Estudo de proteção em redes de distribuição para minimizar as freqüências simples sustentadas. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, v. 3, n. 2, 2021.

MELO, Erico C.A. *et al.* A low cost data acquisition system based on wireless sensor networks for environmental monitoring in landfills. **INSCIT 2019 - 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., ago. 2019. DOI: 10.1109/INSCIT.2019.8868742.

MISHRA, Manohar *et al.* Intelligent Computing in Electrical Utility Industry 4.0: Concept, Key Technologies, Applications and Future Directions. **IEEE Access**, IEEE, v. 10, August, p. 100312–100336, 2022. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3205031.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília, 2018. P. 345. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027%7B%5C\\_%7Daprovado%7B%5C\\_%7D0FICIAL.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027%7B%5C_%7Daprovado%7B%5C_%7D0FICIAL.pdf).

MME; EPE. **Plano decenal de expansão de energia elétrica 2006/2015**. Brasília, 2006. P. 378. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/plano-decenal-de-expansao-de-energia-eletrica-2006-2015.htm>.

MORELLO, Rosario *et al.* **Advances on sensing technologies for smart cities and power grids: A review**. v. 17. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., dez. 2017. P. 7596–7610. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2735539.

MOSLEHI, Khosrow; KUMAR, Ranjit. A reliability perspective of the smart grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 1, n. 1, p. 57–64, jun. 2010. ISSN 19493053. DOI: 10.1109/TSG.2010.2046346. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5467283/>.

ND. **Sistema on-line permite que consumidor saiba onde falta energia em Santa Catarina | ND**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <https://>

[//ndmais.com.br/noticias/consumidor-pode-ver-onde-ha-falta-de-energia/](http://ndmais.com.br/noticias/consumidor-pode-ver-onde-ha-falta-de-energia/). Acesso em: 2 abr. 2020.

NIST. **NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0**. [S.l.], set. 2014. P. 1–246. DOI: 10.6028/NIST.SP.1108r3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3><http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>.

NIST. **NIST The Smart Grid | NIST**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.nist.gov/el/smart-grid/about-smart-grid/nist-and-smart-grid>. Acesso em: 20 mar. 2020.

ODONGO, George Y. *et al.* An Efficient LoRa-Enabled Smart Fault Detection and Monitoring Platform for the Power Distribution System Using Self-Powered IoT Devices. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 10, p. 73403–73420, 2022. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3189002.

OLIVEIRA, Andre Luiz De *et al.* Co-Simulation of an SRG Wind Turbine Control and GPRS/EGPRS Wireless Standards in Smart Grids. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 656–663, 3 mar. 2021. ISSN 23299274. DOI: 10.1109/JAS.2021.1003883.

ONS. **O que é o SIN**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 15 jan. 2020.

ONS. **SINDAT**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>. Acesso em: 17 mar. 2020.

PANAHI, Farzad H.; MOSHIRVAZIRI, Sogol *et al.* Smart Energy Harvesting for Internet of Things. **Proceedings - 2018 Smart Grid Conference, SGC 2018**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., nov. 2018. DOI: 10.1109/SGC.2018.8777889.

PANAHI, Farzad H.; PANAHI, Fereidoun H.; HESHMATI, Sajad *et al.* Optimal Sleep Wakeup Mechanism for Green Internet of Things. **ICEE 2019 - 27th Iranian Conference on Electrical Engineering**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 1659–1663, abr. 2019. DOI: 10.1109/IRANIANCEE.2019.8786620.

PANAHI, Farzad H.; PANAHI, Fereidoun H.; OHTSUKI, Tomoaki. Energy efficiency analysis in cache-enabled D2D-Aided heterogeneous cellular networks. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 19540–19554, 2020. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968455.

PANAHI, Fereidoun H.; PANAHI, Farzad H.; HATTAB, Ghaith *et al.* Green heterogeneous networks via an intelligent power control strategy and D2D communications. **IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2017-October, p. 1–8, fev. 2018. DOI: 10.1109/PIMRC.2017.8292468.

PENGFEI, Xie; SHIWEN, Chu; ZHANG, Yan. Design of Pose measurement and Display system based on STM32 and MPU6050; Design of Pose measurement and Display system based on STM32 and MPU6050, 2021. DOI: 10.1109/ICICAS53977.2021.00021.

PEREIRA, Guilherme; WEISS, Mariana. **Redes inteligentes principais desafios para o caso brasileiro**. [S.l.], 2017.

PETRARIU, Adrian I.; LAVRIC, Alexandru; COCA, Eugen. LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment. **SIITME 2019 - 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, Proceedings**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 49–53, out. 2019. DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990791.

PHOTOVOLTAICS, Dispersed Generation; STORAGE, Energy. IEEE application guide for IEEE STD 1547. **IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems**, v. 9, 2009.

PHOTOVOLTAICS, Dispersed Generation; STORAGE, Energy. IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads, 2011.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA/CONSELHO DE GOVERNO/CÂMARA DE RELAÇÕES EXTERIORES E DEFESA NACIONAL. **RESOLUÇÃO N.º 7, DE 21 DE AGOSTO DE 2019 - RESOLUÇÃO N.º 7, DE 21 DE AGOSTO DE 2019**. [S.l.]: Câmara de Relações Exteriores e Defesa Nacional, ago. 2019. P. 1–4. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-7-de-21-de-agosto-de-2019-212178826>.

RAMIS-BIBILONI, Jaume; CARRASCO-MARTORELL, Loren. Energy Harvesting Effect on the Sensors Battery Lifespan of an Energy Efficient Smartban Network. *In*: p. 1593–1598. DOI: 10.1109/IWCMC51323.2021.9498935.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local.** [S.l.], 2013. P. 43–84. Disponível em: <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/rivera1.pdf>.

RODRIGUES, Leonardo M. *et al.* An analytical model to estimate the state of charge and lifetime for batteries with energy harvesting capabilities. **International Journal of Energy Research**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 44, p. 5243–5258, 7 jun. 2020. ISSN 1099-114X. DOI: 10.1002/ER.5269. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.5269%20https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5269%20https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.5269>.

RODRIGUES, Wélington Borsato. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO 5G EM APLICAÇÕES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES Analysis of 5G usage in Smart Grids Applications.** 2022. F. 1–92.

RUIRONG, Ding *et al.* Research on Fault Location Technology of Intelligent Distribution Network based on Neural Network. **2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems, ICPICS 2022**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 158–161, 2022. DOI: 10.1109/ICPICS55264.2022.9873778.

SANUSI, Jaafaru *et al.* The Impact of Communication Technologies on the Smart Grid. *In*. DOI: 10.1109/NIGERCON54645.2022.9803162.

SAPOUNTZOGLU, Nikolaos; RAISON, Bertrand; SILVA, Nuno. Fault detection and localization in LV smart grids. *In*: 2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., jun. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810799. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8810799/>.

SENDIN, Alberto; MATANZA, Javier; FERRUS, Ramon. Telecommunication Networks and Systems Concepts. *In*: SMART Grid Telecommunications: Fundamentals and

Technologies in the 5G Era. [S.l.: s.n.], 2021. P. 41–78. DOI: 10.1002/9781119755401.ch2.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. [S.l.]: Cortez Editora, 2017. P. 320.

SHARMA, Dilip Kumar *et al.* A review on smart grid telecommunication system. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 51, p. 470–474, jan. 2022. ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/J.MATPR.2021.05.581.

SIDDIQUI, Isma Farah *et al.* Optimizing Lifespan and Energy Consumption by Smart Meters in Green-Cloud-Based Smart Grids. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 5, p. 20934–20945, set. 2017. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2752242. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8046004/>.

SIGEL. **distribuidoras sc-2.pdf**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/webmap/viewer.html?webmap=49bf6df3ecc9426fa3e32ef25d954d00%7B%5C%7Dextent=-52.5235,-29.1765,-46.459,-26.1361>.

SILVA LESSE, Cairo da *et al.* AVALIAÇÃO DE FALHAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 11, p. 127, 2 ago. 2019. ISSN 2176-7270. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/13047>.

SINCRO.GRID | SINCRO.GRID. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.sincrogrid.eu/en>. Acesso em: 12 nov. 2022.

SINDEC. **Sistema Nacional de Informações de Defesa do Consumidor-Atendimentos em 2019 - SINDEC**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://sindecnacional.mj.gov.br/report/Atendimentos>. Acesso em: 30 mar. 2020.

SINGH, Tarana *et al.* A Decade Review on Smart Cities: Paradigms, Challenges and Opportunities. **IEEE Access**, IEEE, v. 10, July, p. 68319–68364, 2022. ISSN 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3184710.

SISSINE, Fred. Energy Independence and Security Act of 2007: a summary of major provisions. *In*: LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE.

SMART GRIDS AND METERS. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

[https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters%5C\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters%5C_en). Acesso em: 12 nov. 2022.

SMARTGRID CANADÁ. **Smart Grid Canada**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em:

<http://www.sgcanada.org/>. Acesso em: 23 mar. 2020.

SREERAMA, Rajesh; SWARUP, K. Shanti. Detection, localization and fault diagnosis using PetriNets for smart power distribution grids. *In*: 2017 7th International Conference on Power Systems, ICPS 2017. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., jun. 2018. P. 596–600. DOI: 10.1109/ICPES.2017.8387363.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8387363/>.

TANWAR, Deepanshu *et al.* Design of Low-Cost Women Safety System using GPS and GSM, 2021.

TIGHTIZ, Lilia; YANG, Hyosik. A comprehensive review on IoT protocols features in smart grid communication. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 11, p. 2762, 2020.

TUTTOKMAI, Özge; KAYGUSUZ, Asim. Smart Grids and Industry 4.0. *In*: 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., jan. 2019. DOI: 10.1109/IDAP.2018.8620887.

U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY. **Smart Grid**. v. 112. [S.l.: s.n.], 2019. P. 211–212. DOI: 10.1192/bjp.112.483.211-a. Disponível em:

<https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid>.

UEDA, Tetsuro; IDOUE, Akira; UTSUNOMIYA, Eiji. Comparison of routing protocols for wireless sensor networks under battery-powered and energy harvesting conditions. **2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2018**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 433–438, fev. 2019. DOI:

10.1109/APCC.2018.8633534.

USA, T-Mobile. **TMobile Announces First of its Kind Embedded SIM for Machine to Machine Solutions** **TMobile Newsroom**. [S.l.: s.n.], abr. 2009. Disponível em: <https://www.t-mobile.com/news/press/t-mobile-announces-first-of-its-kind-embedded-sim-for-machine-to>.

VERMA, Pradeep Kumar; GOSWAMI, Garima. Power Quality Issues Associated with Smart Grid: A Review. **Proceedings of the 2021 10th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends, SMART 2021**, IEEE, p. 622–627, 2021. DOI: 10.1109/SMART52563.2021.9676312.

VILLARIM, Mariana Rodrigues *et al.* An Evaluation of LoRa Communication Range in Urban and Forest Areas: A Case Study in Brazil and Portugal. **2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2019**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 827–832, out. 2019. DOI: 10.1109/IEMCON.2019.8936194.

YASSINE, Ali A. Managing the Development of Complex Product Systems: An Integrative Literature Review. **IEEE Transactions on Engineering Management**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 68, p. 1619–1636, 6 dez. 2021. ISSN 15580040. DOI: 10.1109/TEM.2019.2929660.

YIN, Chenggang; ZHANG, Wenxia. New Product Development Process Models. **Proceedings - 2021 International Conference on E-Commerce and E-Management, ICECEM 2021**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 240–243, 2021. DOI: 10.1109/ICECEM54757.2021.00054.

ZHANG, Kunwu *et al.* Advancements in Industrial Cyber-Physical Systems: An Overview and Perspectives. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 19, n. 1, p. 716–729, 2022. ISSN 19410050. DOI: 10.1109/TII.2022.3199481.

ZHAO, Meng; BARATI, Masoud. A Real-Time Fault Localization in Power Distribution Grid for Wildfire Detection through Deep Convolutional Neural Networks. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 57, n. 4, p. 4316–4326, jul. 2021. ISSN 19399367. DOI: 10.1109/TIA.2021.3083645.

ZHENG, Weiming *et al.* Cellular Communication for Ubiquitous Internet of Things in Smart Grids: Present and Outlook. **Proceedings of the 32nd Chinese Control and**

---

**Decision Conference, CCDC 2020**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., p. 5592–5596, ago. 2020. DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164273.

# **Anexos**

## ANEXO A – ANEXO

Relatório de Itens Cadastrados CELESC em 25 de novembro de 2022:

Data de Emissão: 25/11/2022 10:37		
Regional: CHAPECÓ		
Mês/Ano: OUT/2022		
		CHAPECO
Área Cadastro (m2)	Total	624.759.163,407
Logradouros	Total	1.456
Postes	Concreto Circular	12.218
	Retangular	0
	Duplo T	29.611
	Madeira	800
	Outros	1.468
	Total	44.097
Transformadores Celesc	15 kVA	416
	30 kVA	239
	45 kVA	471
	75 kVA	826
	112 kVA	589
	150 kVA	193
	225 kVA	58
	Outras Potencias	1.155
	Total	3.947
Transformadores Particulares	Uso Coletivo	436
	Uso Individual	28
	Nao Definido	77
	Total	541
Rede Primaria	Monofasica (m)	526.195,518
	Bifasica (m)	645,061
	Trifasica (m)	770.010,570
	Total	1.296.851,149
Alimentadores	Total	26
Rede Secundaria	Uma Fase (m)	121.134,043
	Duas Fases (m)	271.184,069
	Tres Fases (m)	1.121.094,495
	Total	1.513.412,608
Chaves Seccionadoras	Total	400
Chaves Fusível	Total	1.308
Religadores	Total	81
Reguladores de Tensao	Total	3
	Total	3
Para-Raios	Media Tensao	5.058
	Baixa Tensao	223
	Total	5.281
Capacitores	Total	34
Subestação	Total	3
	Total	3