

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação



Laura Corbalan Maraschin

Dispositivos e Aspectos de Qualidade na Gestão Inteligente de
Energia Elétrica:
uma revisão da literatura

Blumenau

2022

Laura Corbalan Maraschin

**Dispositivos e Aspectos de Qualidade na Gestão
Inteligente de Energia Elétrica:
uma revisão da literatura**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação

Blumenau
2022

Laura Corbalan Maraschin

Dispositivos e Aspectos de Qualidade na Gestão Inteligente de Energia Elétrica: uma revisão da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Prof. Dr. Adão Boava
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dra. Janaína Gonçalves Guimarães
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 1 de agosto de 2022

Dedico este trabalho à todos e principalmente à todAs que um dia pensaram não serem capazes e conseguiram conquistar tudo aquilo que almejavam.

Agradecimentos

Com plena certeza de que precisaria agradecer muitas pessoas por ter chego até aqui, gostaria de iniciar agradecendo primeiramente à Deus que move minha fé e me faz acreditar que tudo é possível se Nele confiarmos.

À minha família, meu pai Alexandre, minha mãe Silvia e meu irmão Guilherme, que com muita dedicação e trabalho duro me mantiveram e me incentivaram, mesmo muito distantes, durante toda minha jornada na faculdade. Aos diversos colegas e principalmente aos grandes amigos que fiz nessa aventura da graduação. Em especial à minha grande amiga Ana Júlia, que não só me acompanhou e acompanha em cada etapa como é uma de minhas grandes inspirações. Aos meus amigos Lucas, José e Allan, vocês sempre tornaram os dias ruins em motivação para continuarmos no caminho, por mais que não soubéssemos qual caminho era.

Dedico esse trabalho também aos novos amigos que recentemente fiz na Schneider, que mesmo nos dias mais cansativos me incentivaram a continuar.

À Universidade Federal de Santa Catarina, instituição que eu escolhi e que me proporcionou a melhor formação, os melhores professores e me deu todo o apoio que precisei ao longo de todos os anos. Me deu a oportunidade de estar à frente de uma Empresa Júnior, coordenar o Centro-Acadêmico e participar de diversos eventos que contribuíram ainda mais para aprimorar a minha formação. Em especial dedico esse trabalho ao meu orientador, Tiago, que eu muito admiro e me inspiro e que apesar de todos os derradeiros contratemplos e adversidades da vida cotidiana, não desistiu de me incentivar e apoiar no que fosse necessário.

Por fim, agradeço a mim mesma, por ter aproveitado todos os recursos que a UFSC estava apta a me oferecer e por acreditar que cada fim é uma porta para um novo começo.

"But still try, for who knows what is possible?"

Michael Faraday

Resumo

A era da revolução tecnológica, ou 4^a Revolução Industrial é marcada não só pela evolução em diversos segmentos de negócios em tecnologia, mas também possui foco em solucionar a problemática de como seguiremos com todo esse avanço nas indústrias e cidades sem prejudicar ainda mais o meio ambiente, esgotar os recursos de geração de energia e continuar garantindo um fornecimento de energia elétrica cada vez com mais qualidade para a população. Integrando todos os pontos desse avanço, as redes inteligentes tem como proposta implementar uma integração do sistema a fim de usar essas novas tecnologias digitais para melhorar a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema elétrico.

Nesse contexto, avaliando o aspecto de consumo, a continuidade do fornecimento de energia é um dos principal parâmetro para mensurar a qualidade da energia, com isso, esse trabalho tem o objetivo de analisar e contextualizar quais são os avanços já alcançados em relação aos dispositivos e aspectos de qualidade do sistema elétrico brasileiro e quais são as perspectivas que as redes de distribuição de energia possuem para se integrar às redes inteligentes, utilizando os religadores automáticos como um dos principais recursos.

Palavras-Chave: 1. Sistema Elétrico. 2. Smart Grids. 3. Religadores Automáticos. 4. Qualidade Energia

Abstract

The technology's revolution era, or 4th Industrial Revolution is marked not only by the evolution in several business treatments in technology, but also has a focus in solving the problematic of how we will continue with all this advance in the industries and cities avoiding further harming the environment, depleting generation resources of energy and keep to guarantee a supply of electricity that is increasingly more quality for the population. Integrating all the points of this advance, Smart Grids come as an implementation proposal of make an integration of the system using these new digital technologies to improve electrical system reliability, safety and efficiency.

In this context, evaluating the aspect of consumption, the continuity of energy supply is one of the main parameters to measure the quality of energy, knowing this, this paperwork seeks to analyze and contextualize what are the advances that have already been achieved related to devices and quality aspects of the Brazilian Electrical system and what are the prospects that energy distribution networks have to integrate with smart grids, using automatic reclosers as one of the main resources.

Keywords: 1. Energy System. 2. *Smart Grids*. 3. Automatic Reclosers. 4. Energy Quality

Lista de figuras

Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência - SEP	14
Figura 2 – Fluxograma Metodologia aplicada	20
Figura 3 – Principais acontecimentos do Sistema Elétrico Brasileiro 1880 - 1930	22
Figura 4 – Instituições do Sistema Elétrico Brasileiro.	23
Figura 5 – Matriz de Energia Elétrica Brasileira - ONS 2021	25
Figura 6 – Geração de energia elétrica no Brasil e no mundo - 2019	26
Figura 7 – Diagrama de blocos do Sistema Elétrico de Potência	29
Figura 8 – Diagrama unifilar sistema radial simples com seccionamento	30
Figura 9 – Diagrama unifilar do sistema radial com recurso	31
Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema em Anel na mesma barra aberto	32
Figura 11 – Circuito simples em série	33
Figura 12 – DEC Anual - Concessionárias Brasil	36
Figura 13 – FEC Anual - Concessionárias Brasil	36
Figura 14 – Total anual NIE e NUMOCORR	38
Figura 15 – Média de tempos de atendimento de ocorrências em minutos	39
Figura 16 – Comparativo por ano da média de tempos de atendimento de ocorrências	39
Figura 17 – Variação OIE 2020/2021 - Perdas	41
Figura 18 – Estados de operação de um sistema de distribuição	44
Figura 19 – Exemplo configuração disjuntor	45
Figura 20 – Exemplo para raio	46
Figura 21 – Exemplo Chave seccionadora	47
Figura 22 – Religador 3F Automático + ADV C Schneider Electric	48
Figura 23 – Topologia de um religador	49
Figura 24 – Funções de Automação Inteligente de uma <i>Smart Grid</i>	52
Figura 25 – Sistema de Geração Distribuída / Microrede	54
Figura 26 – As diferentes formas de geração distribuída	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Indicadores de qualidade - Anual BR (dados ANEEL).	36
Tabela 2 – Dados de qualidade no atendimento de ocorrências 2018-2021.	38

Lista de Siglas e Abreviaturas

UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
ABRADEE	<i>Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
GW	<i>Giga Watts</i>
IPEA	<i>Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
SG	<i>Smart Grids</i>
TW _H	<i>Terawatt-hora</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CNPE	<i>Conselho Nacional de Política Energética</i>
MME	<i>Ministério de Minas e Energia</i>
CCEE	<i>Câmara de Comercialização de Energia Elétrica</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
CMSE	<i>Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico</i>
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis</i>
IEE	<i>Instituto de Energia e Ambiente</i>
USP	<i>Universidade de São Paulo</i>
PETROBRAS	<i>Petróleo Brasileiro S.A.</i>
FAO	<i>Organização para a Alimentação e Agricultura</i>
MMGD	<i>Minigeração e Microgeração Distribuída</i>
MW	<i>Mega Watts</i>
ABSOLAR	<i>Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica</i>
MTEP	<i>Milhões de toneladas de petróleo equivalente</i>
Hz	<i>Hertz</i>
kV	<i>kilo Volt</i>
SE	<i>Subestação</i>
MT	<i>Média Tensão</i>
BT	<i>Baixa Tensão</i>
NF	<i>Normalmente Fechado</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
DGC	<i>Desempenho Global de Continuidade</i>
DEC	<i>Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>

FEC	<i>Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>
DIC	<i>Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora</i>
FIC	<i>Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
TMP	<i>Tempo Médio de Preparação</i>
TMD	<i>Tempo Médio de Deslocamento</i>
TME	<i>Tempo Médio de Execução</i>
NIE	<i>Número de Interrupção de Energia Elétrica</i>
NUMOCORR	<i>Número de Ocorrências</i>
BEN	<i>Balanco Energético Nacional</i>
OIE	<i>Oferta Interna de Energia</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
CEMIG	<i>Companhia Energética de Minas Gerais</i>
RA	<i>Religadores Automáticos</i>
SA	<i>Seccionadoras Automáticas</i>
RES	<i>Renewable Energy Sources</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
SENDI	<i>Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica</i>
FAI	<i>Faltas de Alta Impedância</i>
MERGE	<i>Microgrids for Efficient, Reliable and Greener Energy</i>
UNICAMP	<i>Universidade Estadual de Campinas</i>
NA	<i>Normalmente Aberto</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Organização do texto	15
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivo Específico	16
1.1.3	Relevância do Estudo	16
2	METODOLOGIA	18
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Sistema Elétrico Brasileiro	21
3.1.1	Geração	25
3.1.2	Transmissão	27
3.1.3	Distribuição	29
3.2	Qualidade da Energia	32
3.2.1	Impactos na Qualidade	39
3.2.2	Investimentos	41
3.3	Dispositivos, Proteção e Controle de Sistemas Elétricos	42
3.3.0.1	Equipamentos de Proteção e Manobra	44
3.3.1	Religadores Automáticos	46
3.4	<i>Smart Grids</i>	50
3.4.1	Aplicabilidade de Religadores	53
4	SÍNTESE E TENDÊNCIAS	56
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 Introdução

É notório que estamos em constante busca pela evolução da humanidade. Nesse contexto é possível afirmar que hoje a energia elétrica é um dos elementos primordiais tanto para a existência da vida humana quanto para os avanços deste incansável objetivo. Nem sempre a população teve acesso a esse recurso e, até hoje, existem lugares que não o têm. Analisando historicamente, todo o experimento da eletricidade começou há muito tempo e somente tomou forma com Michael Faraday em 1831 [1], ao descobrir os princípios da geração de energia através do dínamo (aparelho gerador de eletricidade através da conversão de energia mecânica em elétrica por meio de indução eletromagnética) e a partir desse momento começaram de fato as aplicações dos estudos de geração de energia que hoje são conhecidas.

O Brasil é referência mundial quando o assunto é sistema elétrico. O atual sistema herda o modelo criado pela até então estatal Eletrobras desde a década de 1960 e visa aproveitar as particularidades de sua geografia tornando o sistema elétrico brasileiro o mais confiável, barato, flexível e limpo entre as grandes nações do planeta [2].

Entre a produção da energia elétrica até o sua disponibilização para consumo do usuário final existe um longo caminho percorrido pela energia elétrica. O sistema de energia elétrica brasileiro é bem completo e conta com 3 fases: "Produção"; "Transmissão"; "Distribuição". Para alguns casos, como o de fornecimento e consumo de energia elétrica para as residências, existe também a fase de comercialização que é uma atividade realizada juntamente com a de distribuição [3]. Todo esse processo de gerar e disponibilizar a energia elétrica que hoje conhecemos faz parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP) o qual é composto pelas redes de transmissão e de distribuição e que contempla toda a cadeia de instalações de geração, subestações de transformação, interligações e as transmissões.

A Figura 1 apresenta um diagrama simplificado do Sistema Elétrico de Potência.

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica do Brasil (ABRA-DEE) o sistema de distribuição de energia é aquele que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte aos consumidores finais da energia elétrica [5]. Para que as distribuidoras recebam essa energia e consigam atender grande parte da população é fundamental que o sistema de transmissão contemple e garanta que essa energia chegue com qualidade das usinas de geração até as subestações de distribuição.

Como o Brasil é um país dimensionalmente grande e com topografias variadas, possui um completo sistema de linhas de transmissão, intitulado Sistema Interligado Nacional (SIN). Atualmente, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o SIN tem

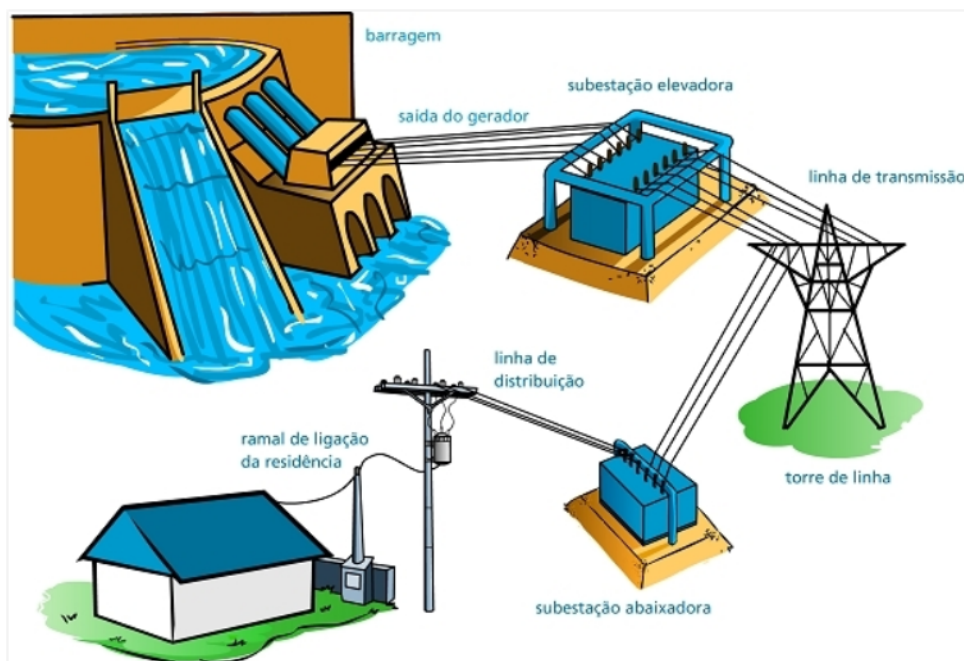


Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência - SEP [4].

uma capacidade instalada de mais de 170GW e uma extensão de rede básica de transmissão de mais de 145 mil quilômetros. De toda essa capacidade, a maior parcela, 62,6% (aproximadamente 108GW), corresponde à geração através de usinas hidrelétricas. Na sequência temos as usinas térmicas, com 21,8% e as eólicas com 11,92%. Apesar de ainda não ser tão expressiva, a capacidade instalada de usinas solares, no Brasil pulou de uma representatividade de 1,4% em 2018 para 2,4% em 2022 em relação a matriz energética nacional, de acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) [6].

O SEP funciona de maneira equilibrada, onde a produção de energia gira em torno do consumo por região. Para que funcione de maneira eficiente sem muitas perdas e sem causar prejuízos, os níveis de qualidade do sistema são medidos para acompanhar, classificar e possibilitar ações de mitigação e correção de falhas no sistema [7]. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2020, o setor elétrico já representa aproximadamente 2,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e segundo o Observatório do setor elétrico (comandado pelo Instituto Acende Brasil) os prejuízos causados por uma falha ou interrupção no fornecimento de energia podem superar o próprio custo da energia. Por essa razão, medir e acompanhar a qualidade do sistema é primordial.

Existem diversas formas de garantir a qualidade, estando algumas delas tratadas nos próximos capítulos, sendo que hoje alguns investimentos são feitos não só para entrar nos padrões da qualidade, mas também para estar alinhados com as evoluções da tecnologia aplicadas em grandes centros e cidades.

A era da 4ª Revolução Industrial trouxe novas diretrizes ao uso da tecnologia para garantir o bem estar e a constância da energia elétrica nos próximos anos. As cidades

inteligentes, ou do inglês *Smart Cities*, é o segmento dentro da indústria 4.0 voltado para a evolução das cidades. A ideia é que essas cidades do futuro sejam mais eficientes, conectadas e sustentáveis. Por meio de inovações tecnológicas, os projetos dessas cidades buscam proporcionar um ambiente urbano que promova o desenvolvimento humano, use os recursos naturais de forma sustentável e impulse a economia local.

Paralelo à esse contexto, as *Smart Grids* (SG) vêm para englobar o universo de evolução para que seja aplicado ao sistema de *Smart Cities*. Um dos principais objetivos das SGs é garantir a confiabilidade do sistema elétrico e sua continuidade de fornecimento, utilizando de equipamentos e sistemas automáticos os quais conectados permitem fazer conexão e análise de dados em tempo real. Uma das diversas aplicações dentro das SGs é o uso de religadores automáticos, equipamentos de proteção que possibilitam a interrupção de corrente elétrica em caso de sobrecargas na rede a fim de impedir danos ao sistema e garantir que o fornecimento de energia possa ser reestabelecido sem a presença de um operador. Além dessa principal funcionalidade, os religadores automáticos com controle eletrônico, possui funcionalidade de automação como o *Loop automation* e *Auto Change Over*, além de possuir funções para medição e supervisão de parâmetros do sistema, permitindo que as concessionárias tenham dados suficiente para realizar otimizações e novos arranjos no sistema para aumentar ainda mais a confiabilidade e continuidade no fornecimento de energia.

Dado o contexto, os centros consumidores (bairros, cidades ou uma indústria de grande porte) recebem energia através de diversas linhas para garantir fornecimento ininterrupto. O fluxo de potência nessas linhas geralmente é determinado pela concessionária ou pelo operador do sistema objetivando uma operação com baixas perdas. No entanto, no caso do rompimento de uma das linhas, o sistema de distribuição pode ser reconfigurado de modo a manter o fornecimento em toda a rede. Além disso, as redes elétricas estão sujeitas a outras adversidades como influências climáticas, acidentes, animais e locais de difícil acesso.

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é trazer o cenário do sistema de energia elétrica brasileira, contextualizar o uso de religadores em redes de distribuição e apresentar as tendências para os próximos anos no quesito *Smart Grids*.

1.1 Organização do texto

Este Trabalho foi estruturado de tal forma que é possível acompanhar brevemente o contexto do SEP, descrito na sessão 3.1, entendendo suas características e dificuldades. Dentro desse cenário, na sessão 3.2, são descritos os quesitos de qualidade de fornecimento de energia elétrica e seus principais indicadores, além de trazer alguns dados que exemplifiquem o contexto atual de qualidade do sistema. Sabendo destes indicadores, ainda na sessão 3.2 é falado, de maneira geral, algumas soluções hoje aplicadas para a

garantia dos requisitos necessários para o padrão do SEP. Seguindo o viés de qualidade no fornecimento de energia e um controle mais inteligente na gestão da energia elétrica, o capítulo 3.3 aborda os equipamentos de proteção e manobra que auxiliam na garantia da qualidade, o foco em religadores automáticos começa a ser apresentado na sessão 3.3.1. Toda a automatização aplicada nesses equipamentos tem o propósito de integrar às *Smart Grids*, que será apresentado na sessão 3.4. Por fim, algumas tendências e perspectivas para os próximos anos serão apresentadas na sessão 4.

1.1.1 Objetivo Geral

Contextualizar o uso de dispositivos e analisar aspectos de qualidade na gestão inteligente de redes de energia elétrica.

1.1.2 Objetivo Específico

- Situar a importância dos religadores nas redes de distribuição;
- Analisar quesitos de qualidade no fornecimento de energia elétrica;
- Contextualizar o Sistema Elétrico Brasileiro;
- Analisar os recursos e dispositivos hoje utilizados para garantia de qualidade;
- Avaliar o contexto atual do nosso sistema dentro do universo das *Smart Grids*;
- Analisar e Indicar tendências para os próximos passos dos religadores dentro das Redes Inteligentes.

1.1.3 Relevância do Estudo

Dado o avanço acelerado da tecnologia nos últimos anos e as tendências de existirem cada vez mais cidades inteligentes, sustentáveis e em constante crescimento, é fundamental entender e analisar como elas funcionam hoje, o que já é aplicado e quais as perspectivas para o próximo ano com a finalidade de abrir portas para novas ideias de otimização deste complexo sistema. Dentro do quesito sustentabilidade e conectividade das cidades inteligentes, além da indispensabilidade da energia elétrica para humanidade, as redes de energia inteligentes e a geração de energia através de fontes renováveis é de extrema relevância para evoluir neste âmbito. Existem infinitas áreas a serem exploradas para a continuidade e celeridade de avanços tecnológicos e atualmente dentro das *Smart Grids*, os principais desafios são permanecer atendendo os requisitos de qualidade no fornecimento, como fator de potência, harmônicos, desequilíbrio das tensões garantindo a continuidade do serviço, possibilitar o acesso à leitura de dados do sistema para otimização da linha e implementação de controles inteligentes em equipamentos essenciais para as linhas. Os

religadores automáticos com controladores digitais suprem a necessidade de comunicação, controle e proteção nos dias atuais, mas devido à mudanças constantes, é preciso avaliar quais as tendências para que essas tecnologias se adéquem aos padrões de cidades inteligentes em um futuro onde *Smart Grids* devem ser aplicadas em todo o território nacional.

2 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotado alguns *milestones* necessários para avaliação do tema, separação de coletânea e fundamentação teórica.

- Atualidade do tema;
- Relevância para sociedade;
- Relação com a vivência atual da autora;
- Multidisciplinaridade de conteúdo;
- Oportunidades futuras;

No fluxograma da figura 2 temos como etapa de *start* a escolha do tema. Todos os tópicos acima foram avaliados para a escolha ideal da temática. A atualidade do tema é importante pois a Engenharia de Controle e Automação, com a premissa de buscar a otimização e automatização de processos, sistemas, equipamentos, etc, se faz presente em todos os âmbitos passíveis de melhoria.

A automação tem como premissa melhorar a qualidade de trabalho e vida das pessoas. A energia elétrica, assim como diversos outros produtos e bens de consumo é parte vital da vida cotidiana, e cada vez mais as etapas de gerenciamento da energia (geração, transmissão e distribuição) precisam estar alinhadas com os avanços tecnológicos e com as possibilidades de explorar novas alternativas.

A escolha do tema também foi diretamente relacionado com a vivência profissional da autora, além de estar diretamente ligado com a multidisciplinaridade que o curso de Engenharia de Controle e Automação possui. Tendo em vista a atualidade do tema, as oportunidades futuras possuem grande relevância para buscar tópicos que possam ser explorados futuramente.

Seguindo o fluxograma, a segunda etapa teve o objetivo de definir as palavras chaves dos assuntos globais que viriam a ser explorados no trabalho. As *Key Words* definidas foram *Sistema Elétrico*, base para este trabalho; *Smart Grids*; *Religadores Automáticos*, peça importante para relacionar o atual cenário do sistema elétrico com os novos conceitos de redes inteligentes e *qualidade energia*, motivação importante para otimização do sistema. Feita a escolha das palavras, as buscas por coletâneas e materiais de consulta se iniciaram utilizando, principalmente, as plataformas *Google Academic*, *IEEE* e *ScienceDirect*. As coletâneas foram separadas de acordo com a relevância para o tema.

Após seleção das referências, um filtro nas coletâneas foi realizado a fim de manter, de maneira geral, um foco nos assuntos diretamente relacionados com o tema, como os

principais, levou-se em consideração a atualidade dos artigos e origem de publicação. Por fim, durante a escrita, os capítulos foram estruturados de acordo com um fluxo definido pra que a estruturação da revisão bibliográfica fizesse sentido até chegarmos à síntese e conclusão. A proposta é levar o leitor a se iterar do sistema elétrico brasileiro, se aprofundar e entender os impactos que a falta de qualidade no fornecimento geram tanto no cotidiano da população, quando há a falta de energia por exemplo, quanto para as concessionárias de energia e ai então compreender sobre os equipamentos hoje utilizados, em destaque para os religadores integrados no contexto de *Smart Grids*, para as possíveis soluções da problemática e por fim é apresentado as tendências deste tema e próximos passos.

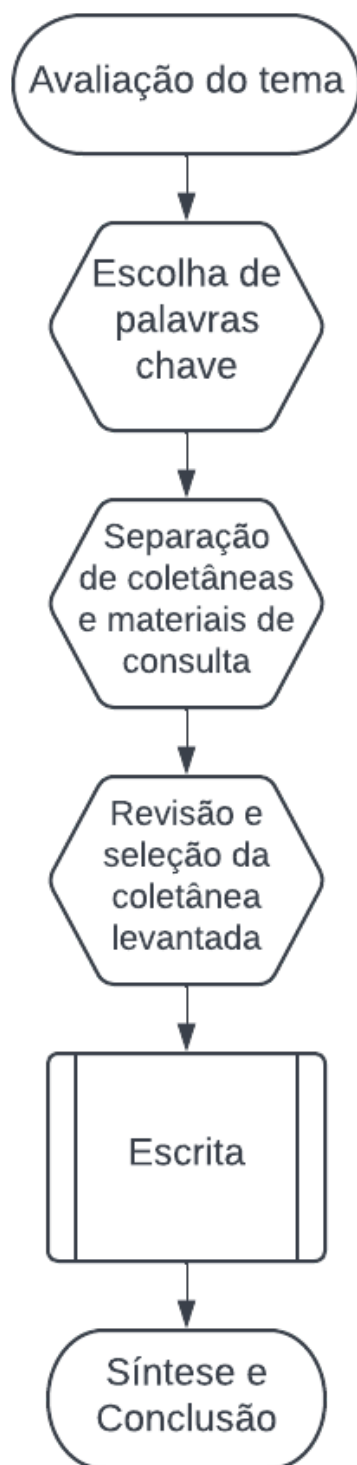


Figura 2 – Fluxograma Metodologia aplicada

3 Revisão da Literatura

A fundamentação teórica tem como objetivo fazer o levantamento de conceitos, estudos e técnicas que vem previamente sendo aplicados em redes de distribuição e as tendências para os sistemas de energia inteligente. Sendo o capítulo dividido em quatro grandes grupos:

1. Sistema Elétrico Brasileiro;
2. Qualidade da Energia;
3. Dispositivos, Proteção e Controle de Sistemas Elétricos;
4. *Smart Grids*.

3.1 Sistema Elétrico Brasileiro

É notória a dependência da eletricidade que a humanidade tem atualmente, praticamente todas as funções realizadas durante o dia a dia dependem de energia elétrica para acontecerem. Segundo apresentado por Gomes, a história da energia no Brasil começou em 1880, mas só ficou disponível para parte da população em 1883 em uma cidade no interior do estado do Rio de Janeiro. No período de 1880 a 1890 existiam somente algumas empresas de energia elétrica que faziam a prestação de serviços públicos locais e empresas de energia para determinados fins fabris, que eram locais e independentes, o que demonstra a inexistência de qualquer campo organizacional [8].

O artigo publicado na Revista de Administração descreve que a partir de 1889, com a queda da Monarquia e a implantação da República, a Constituição Federal de 1891 tornou o Brasil uma federação composta por estados com ampla autonomia administrativa. Com isso, um dos princípios básicos do setor elétrico foi o direito de estados e municípios terem poderes suficientes para negociar com as concessionárias correspondentes. Desde então, o Sistema Elétrico Brasileiro já passou por diversas mudanças de regulamentações e métodos de geração e transmissão.

A Figura 3 mostra os marcos da evolução dos primeiros anos do Sistema Elétrico Brasileiro. Nos anos subsequentes, o sistema foi marcado pelo início da participação do estado na geração e distribuição, entre 1930 e 1962, começo dos investimentos na expansão do sistema e a criação da Eletrobras, empresa estatal criadas para coordenar as empresas do setor elétrico (engloba geração, transmissão e distribuição). Entre os anos de 1963 e 1992 o estado ganhou mais força, novos investimentos e um novo modelo institucional fizeram parte desse período. Somente entre 1993 e 2002 a ideia de privatização das

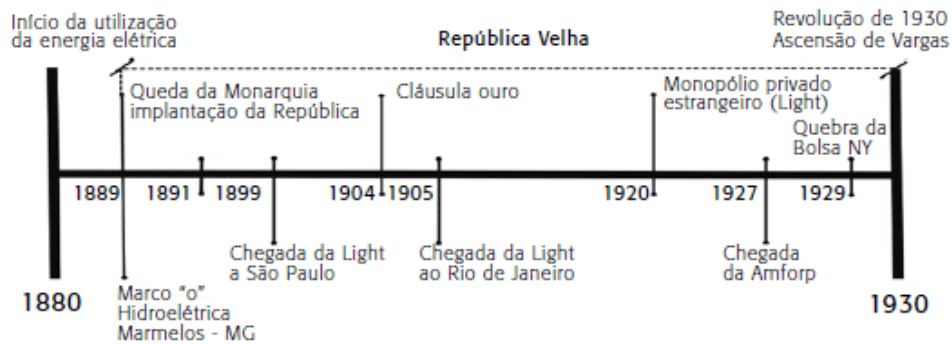


Figura 3 – Principais acontecimentos do Sistema Elétrico Brasileiro 1880 - 1930 [8].

concessionárias começou a ter mais força e o modelo híbrido de gerenciamento do sistema começou a ganhar mais força. Até os dias de hoje temos cada vez mais a privatização de concessionárias e até mesmo geradoras de energia. A própria Eletrobras teve seu processo de privatização concluído em 2022 e hoje é uma empresa sem controlador definido, com vários acionistas.

O SIN, segundo o ONS, é composto por uma matriz elétrica com mais de 175GW de capacidade instalada, sendo que 85% são de fontes renováveis. Em termos de geração de energia elétrica, em 2020 foi gerado um total de 621TWh. Citando as quatro fontes com maior participação, temos 388TWh (64,68%) provenientes de hidrelétricas, seguidas de térmicas a gás natural, com 54TWh (9,08%), térmicas a biomassa, com 52TWh (8,69%), e 48TWh (8,06%) de usinas eólicas [9].

A porcentagem de geração por fontes renováveis no Brasil é muito significativa quando comparada com o restante do mundo, em 2020 a China possuía uma capacidade instalada de geração de energia renovável que totalizava 930 milhões de quilo watts, e isso representava somente 42,4% do total da matriz energética do país. Os Estados Unidos também ficam atrás do Brasil no quesito utilização de fontes de energia renováveis e hoje ainda tem quase 60% proveniente de combustíveis fósseis [10].

Pode-se hoje destacar que a principal característica do sistema é não poder armazenar a energia gerada de maneira econômica, viável e em escala. Isso quer dizer que praticamente toda a energia produzida deve ser consumida quase que simultaneamente. Isso faz com que o sistema seja economicamente mais barato, pois não possui processo e infraestrutura de armazenagem [7].

Para que toda essa energia produzida que deve ser consumida imediatamente chegue até os centros de distribuição e, conseqüentemente, até seus usuários finais é necessário que o sistema possua redes de energia elétrica. Após gerada, a eletricidade é transportada através de cabos aéreos, suportados por postes e torres, constituídos por camadas isolantes até as subestações de distribuição, também de cabeamento aéreo até chegar nas residências, comércios e indústrias.

Como já mencionado, o setor elétrico do país é dividido em três grandes grupos: ge-

ração, transmissão e distribuição. Para regulamentar cada etapa o sistema, de maneira geral, conta com o órgão governamental responsável, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A transmissão e distribuição apesar de algumas mudanças ao longo dos anos, ainda são considerados monopólios naturais, pois a competição entre empresas do setor não traz muitos benefícios para a população, visto que sua estrutura física torna economicamente inviável a competição entre dois agentes em uma mesma área de concessão.

Tal prática faria com que o consumidor possivelmente pagasse preços mais caros e vai contra o fato das distribuidoras de energia oferecem um serviço público considerado universal e essencial para o desenvolvimento humano, não sendo possível existir a competitividade com taxação de preços por parte dessas empresas [11]. Nestes dois segmentos, predominou o modelo de regulação de preços ou regulação por incentivos [12]. Já o terceiro grupo, a geração, existem diversas empresas de diferentes portes que ainda coexistem e fomentam o mercado.

O Sistema Elétrico Brasileiro já passou por diversas transformações e regulamentações. Atualmente, com base na apresentação do *Esfera Blog* a abertura dos diversos agentes e instituições que fazem parte ativamente do sistema são [13]:

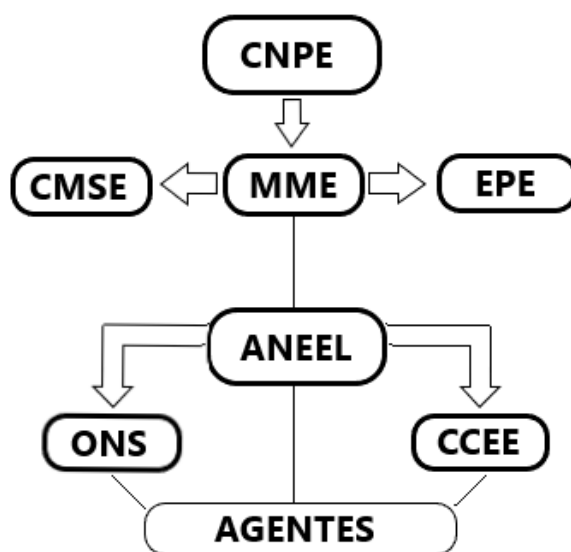


Figura 4 – Instituições do Sistema Elétrico Brasileiro.

- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE):
Órgão interministerial de assessoramento à Presidência da República que tem como principais atribuições a formulação de políticas e diretrizes de energia que assegurem o suprimento de insumos energéticos em todas as áreas do país;
- Ministério de Minas e Energias (MME):

- Órgão do governo responsável pela condução das políticas energéticas do país;
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL):
Regulamenta e fiscaliza a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
 - Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS):
Responsável por operar, supervisionar e controlar a geração de energia;
 - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE):
Conjunto de empresas e instituições que compram e vendem energia em todo o país;
 - Empresa de Pesquisa Energética (EPE):
Instituição vinculada ao MME com finalidade de realizar estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético;
 - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE):
Órgão sob coordenação direta do MME, criado para acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional. O CME é composto pela MME, ANEEL, ONS, EPE, CCEE e Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Segundo a ABRADÉE, existem dois aspectos dentro da organização apresentada na Figura 4, o aspecto técnico que representa os agentes de governo responsáveis pela política energética do setor, sua regulação, operação centralizada e comércio de energia, são os agentes diretamente ligados à produção e transporte de energia elétrica são os de geração, transmissão e distribuição. O outro aspecto, político, em que as atividades de governo são exercidas pelo CNPE, MME e CMSE.

As atividades regulatórias e de fiscalização são exercidas pela ANEEL. As atividades de planejamento, operação e contabilização são exercidas por empresas públicas ou de direito privado sem fins lucrativos como a EPE, ONS e CCEE. As atividades permitidas e reguladas são exercidas pelos demais agentes do setor: geradores, transmissores, distribuidores e comercializadores.

O SIN é responsável pela entrega da energia elétrica ao nosso sistema de distribuição de eletricidade, o qual faz interface com a maioria das unidades consumidoras em nosso país. Ainda na primeira seção do texto, a Subseção 3.1.1 faz uma contextualização da matriz energética brasileira que compõe a rede básica de geração; a Subseção 3.1.2 discorre sobre o sistema de transmissão de eletricidade e a Subseção 3.1.3 aborda a característica da distribuição e uso final de eletricidade [6].

3.1.1 Geração

A geração é o segmento da indústria de eletricidade responsável por produzir energia elétrica e injetar ela nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição) para que chegue aos consumidores. Especificamente no Brasil, o segmento de geração é bastante pulverizado, atualmente contando, segundo dados da ANEEL, com 7.250 empreendimentos geradores [12]. Grande parte desses empreendimentos, 3.004, são usinas termelétricas de médio porte, mas 63% da energia gerada são de origem hidrelétrica e limpa.

O Brasil é o segundo maior produtor de energia hidrelétrica do mundo e perde apenas para a China. “A última prioridade do uso da água é a produção de energia elétrica”, alega o professor Ildo Sauer, do Instituto de Energia e Ambiente (IEE), ao Jornal da Universidade de São Paulo (USP) no Ar. Ele, que foi diretor da área de Energia da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), entre os anos de 2003 e 2007, salienta que quem dispõe do controle das usinas brasileiras tem influência sobre os cursos d’água.

O país apresenta a maior reserva de água doce do mundo. Detém cerca de 12% do total disponível do planeta, segundo a Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO), representada por 12 bacias hidrográficas, onde quedas d’água são recorrentes. A diferença de altura entre um ponto e outro dos rios transforma energia potencial em velocidade, ocasionando aceleração. As usinas hidrelétricas se aproveitam do fenômeno para movimentar suas turbinas. Assim, a gravidade produz 63,75% da energia brasileira, segundo a ANEEL [14].

A Figura 5 apresenta as parcelas de representatividade de cada fonte geradora de energia no Brasil.

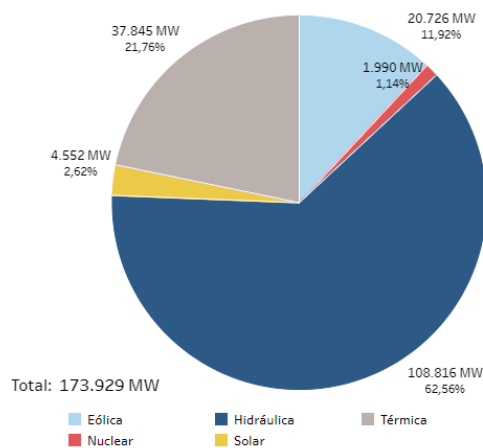


Figura 5 – Matriz de Energia Elétrica - ONS 2021[9].

A contextualização da Matriz Elétrica Brasileira é importante para entender a situação atual dos recursos energéticos utilizados no país; apresentam-se dados por fontes caracterizando-as em relação a sua disponibilidade, seus custos e sua vida útil das usinas elétricas [6].

No caso da energia elétrica se verificou um crescimento na oferta interna de 25,7TWh (+3,9%) em relação a 2020. O principal destaque foi o avanço da geração à base de gás natural (+46,2%). A geração hidráulica reduziu 8,5%, acompanhando a queda na importação (-6,5%), cuja principal origem é a Usina Hidrelétrica de Itaipu. Em contrapartida, a geração eólica atingiu 72 TWh e crescimento de 26,7%. A potência eólica alcançou 20.771 MW, com expansão de 21,2%.

Já a geração solar atingiu 16,8 TWh através da geração centralizada e Minigeração e Microgeração Distribuída (MMGD), o que representou um avanço de 55,9% em relação ao ano anterior. Com isso, a participação de renováveis na matriz elétrica ficou em 78,1% em 2021 [15].

A Figura 6 apresenta um comparativo entre a utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo no ano de 2019. A matriz elétrica brasileira em sua maior parcela é baseada em fontes renováveis de energia, ao contrário da matriz elétrica mundial. Isso traz grande vantagens para o Brasil, pois além de possuírem menores custos de operação, as usinas que geram energia a partir de fontes renováveis em geral emitem menos gases de efeito de estufa.

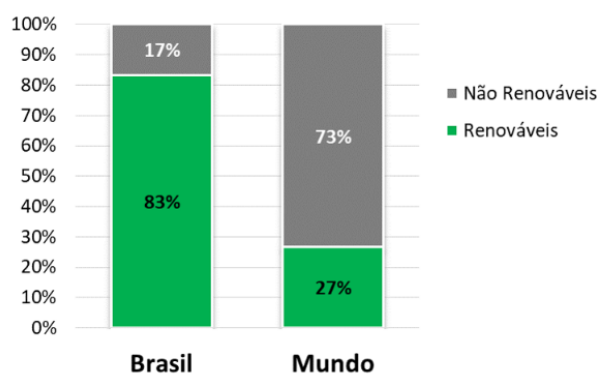


Figura 6 – Geração de energia elétrica no Brasil e no mundo - 2019 [16].

Como parte da matriz elétrica brasileira, vale destacar além das hidrelétricas as fontes principais:

- Termoelétricas:

A geração termoelétrica pode ser promovida por meio de diferentes combustíveis: gás natural, biomassa, carvão mineral, nuclear, óleo combustível, entre outros. A definição do combustível para geração, especialmente para usinas de grande porte, está relacionada ao atendimento de critérios técnicos, econômicos, logísticos, ambientais e, em alguns casos, de políticas energéticas. A presença de usinas termoelétricas no portfólio de geração do SIN é um fator estratégico para o setor elétrico brasileiro. Dada a relevância da participação de fontes hídricas na geração de energia elétrica no Brasil, as termoelétricas têm atuado significativamente em períodos de

escassez hidrológica. Além disso, com a penetração das fontes eólica e solar no sistema nacional, emerge a possibilidade das termoelétricas atuarem para estabilizar a variabilidade na geração de curto prazo dessas fontes [17];

- Eólicas:

A energia eólica é gerada por meio dos ventos que movimentam grandes turbinas e transformam a energia mecânica em energia elétrica. Os parques eólicos produzem 100% de energia limpa, pois não polui o meio ambiente no processo de geração. Com um histórico de crescimento constante, em 2022 o Brasil chegou a uma posição inédita no Ranking Global de Energia Eólica. Em 2021, o Brasil passou a ocupar o 6º lugar Ranking de Capacidade Total Instalada de Energia Eólica Onshore. No que diz respeito a capacidade energética, a China leva, de longe, o primeiro lugar com 310,6GW instalados, mais da metade da capacidade dos EUA que é de 134,3GW. Já o Brasil tem 21,5GW de capacidade [18];

- Solares:

As usinas solares ou parque solares, utilizam placas fotovoltaicas para gerarem energia elétrica através da captação de energia proveniente das radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol que produz uma grande quantidade de energia em forma de luz e calor. De acordo com levantamentos do ONS, atualmente o nosso país conta com 5.312MW de potência instalada das usinas de energia solar em operação. Como previsões futuras, a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) estima que em 20 anos o Brasil terá 126GW de energia gerados pela luz solar, podendo ultrapassar até mesmo a fonte hídrica [5].

Segundo dados do reporte "BEN2022" publicado pela ANEEL, no ano de 2021, a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) atingiu 301,5Mtep (aproximadamente 36TWh), registrando um avanço de 4,5% em relação ao ano anterior. A participação de renováveis na matriz energética foi marcada pela queda da oferta de energia hidráulica, associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas no decorrer do ano. No entanto, o crescimento das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica, além do biodiesel contribuíram para que a matriz energética brasileira se mantivesse em um patamar renovável de 44,7%, muito superior ao observado no resto do mundo [15].

3.1.2 Transmissão

O segmento de transmissão é aquele que se encarrega de transportar grandes quantidades de energia provenientes das usinas geradoras. A interrupção de uma linha de transmissão pode afetar cidades inteiras ou até mesmo estados. No Brasil, esse segmento

conta com 156 concessionárias licitadas, responsáveis pela administração e operação de aproximadamente 145 mil quilômetros de linhas de transmissão espalhadas pelo país, conectando os geradores aos grandes consumidores ou, como é o caso mais comum, às empresas distribuidoras. No Brasil, o segmento de transmissão é aquele que se caracteriza por operar linhas em tensão elétrica superior a 230 mil Volts [17].

No Brasil, o mercado surgiu em 1879 quando Dom Pedro II contratou Thomas Alvas Edison para introduzir a tecnologia de lâmpadas incandescentes na iluminação pública. Anos mais tarde, em 1883, a primeira usina hidroelétrica do país entrou em funcionamento, localizada onde hoje é a cidade de Diamantina, no estado de Minas Gerais, sendo os rios da região as principais fontes de energia.

Ao longo dos séculos XX e XXI, outros tipos de produção de energia foram sendo adotados pelo governo brasileiro como termoeletricas, usinas nucleares, energia solar e eólica. No passar dos séculos tivemos investimentos em hidrelétricas, com destaque para Itaipu, a segunda maior usina hidrelétrica do mundo até então. O aumento do consumo e a consolidação da energia elétrica trouxe a necessidade da criação do mercado de energia no Brasil [19].

Destinados a transportar a energia elétrica desde a fase de geração até a fase de distribuição, abrangendo processos de elevação e rebaixamento de tensão elétrica, realizados em subestações próximas aos centros de consumo. Essa energia é transmitida em corrente alternada (60Hz) em elevadas tensões (138 a 500kV). Os elevados potenciais de transmissão se justificam para evitar as perdas por aquecimento e redução no custo de condutores e métodos de transmissão da energia, com o emprego de cabos com menor bitola ao longo das imensas extensões a serem transpostas, que ligam os geradores aos centros consumidores [4].

A transmissão é peça chave para a expansão do setor elétrico no Brasil. É através das linhas e subestações que a energia sai das usinas de geração e chega às redes de distribuição e aos consumidores. Para que isso ocorra com qualidade, é necessário oferecer uma infraestrutura robusta e adequada à demanda, pois é essencial para a segurança na ampliação do mercado.

“Com um sistema de transmissão bem planejado, a geração de uma região que produz mais energia pode ser exportada para outra e diferentes fontes são integradas, possibilitando não só obtenção de ganhos sinérgicos e economia de recursos, mas também uma maior segurança para o sistema. Desta forma, através de uma malha nacional de transmissão robusta, é possível obter um melhor aproveitamento dos recursos energéticos do país, possibilitando, por exemplo, que a energia gerada em regiões mais isoladas, em grande parte renovável, possa ser levada aos centros de consumo, com o benefício adicional de aproveitamento da sazonalidade característica de cada fonte (hídrica, eólica, solar)”, explica o diretor de Transmissão da Neoenergia, Fabiano Uchoas [20].

3.1.3 Distribuição

O sistema elétrico brasileiro adota um modelo que busca construir um sistema conectado, possibilitando o consumo e aproveitamento da energia produzida pelas geradoras em qualquer parte do SIN. A distribuição, ou sistema de distribuição é a parte final da trajetória da energia elétrica ao longo do sistema. É parte crucial, pois está em maior proximidade com as unidades consumidoras [21].

Na Figura 7 é apresentada a sequência que a energia elétrica faz até as distribuidoras a receberem e distribuírem entre as unidades.

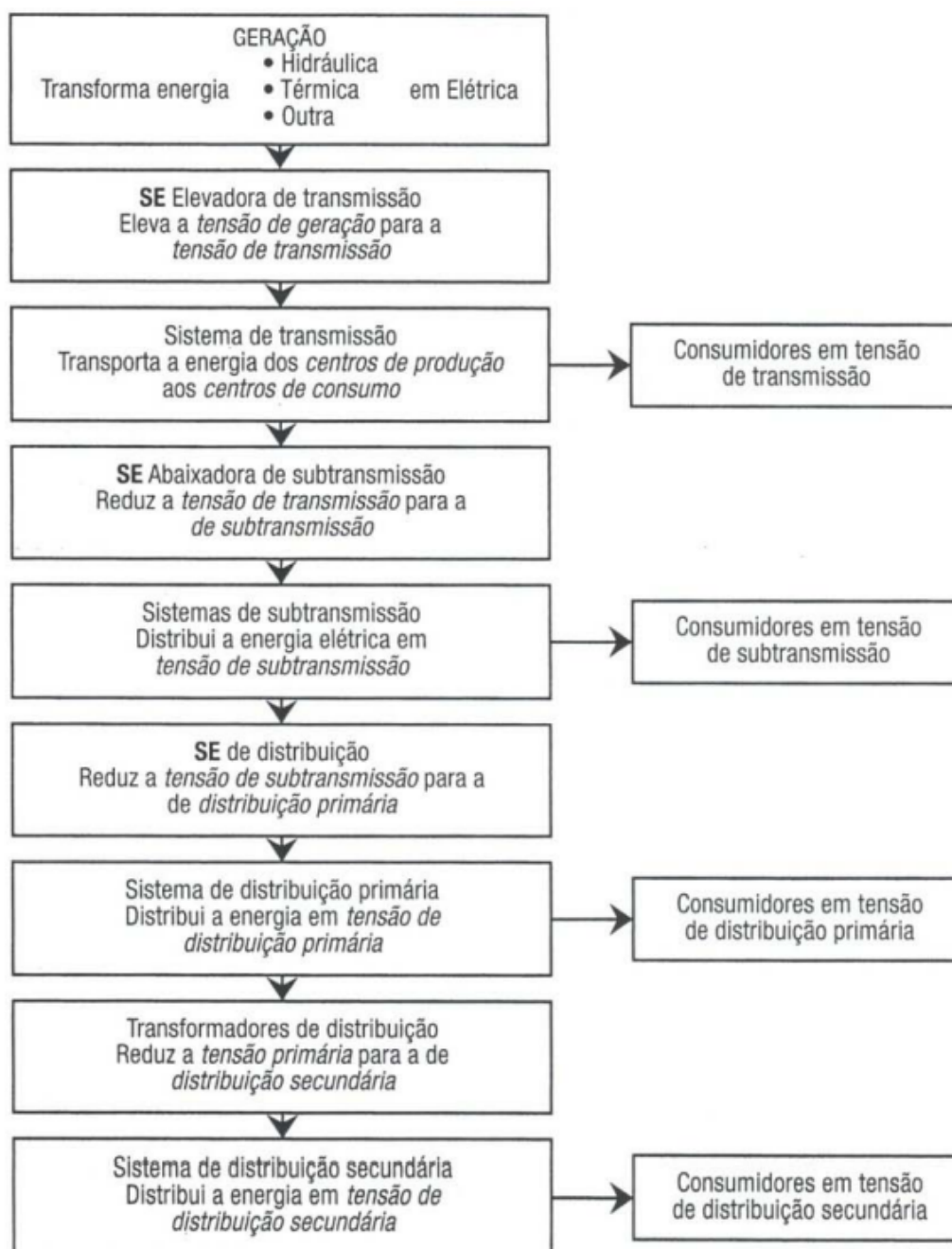


Figura 7 – Diagrama de blocos do Sistema Elétrico de Potência[22].

Segundo Moura, um sistema de distribuição é composto por [23]:

- Sistema de sub transmissão: interliga a transmissão às subestações de distribuição, normalmente a tensão utilizada é 69kV ou 138kV;
- Subestação (SE): ponto de convergência, usualmente usada para seccionar linhas e ou elevar/baixar níveis de tensão. Possuem entradas e saídas de linhas de transmissão ou distribuição além de equipamento de proteção, compensação e medição;
- Alimentadores de Distribuição Primários: leva energia até os consumidores atendidos em Média Tensão (MT) e aos transformadores de distribuição;
- Transformadores de distribuição: baixa a tensão dos alimentadores de distribuição primários de MT para Baixa Tensão (BT);
- Alimentadores de distribuição secundários: leva energia até consumidores atendidos em BT pelos transformadores de distribuição.

A distribuição primária possui tensão entre 34,5 e 13,8kV enquanto as redes secundárias podem variar de 380 a 220V e entre 220 e 127V.

As configurações ou arranjos das redes aéreas podem ser simplificada em 3 tipos:

1. Sistema radial simples:

O radial simples é estruturado de forma que a corrente siga o fluxo em um único sentido. Desta forma, a alimentação é feita saindo da subestação através do tronco alimentador chegando até os consumidores finais [24]. A Figura 8 apresenta o diagrama unifilar dessa configuração, considerando pontos de seccionalização da rede (utilizando religadores e equipamentos de manobra). O sistema radial também pode ser arranjado sem pontos seccionadores. Esse tipo de configuração geralmente

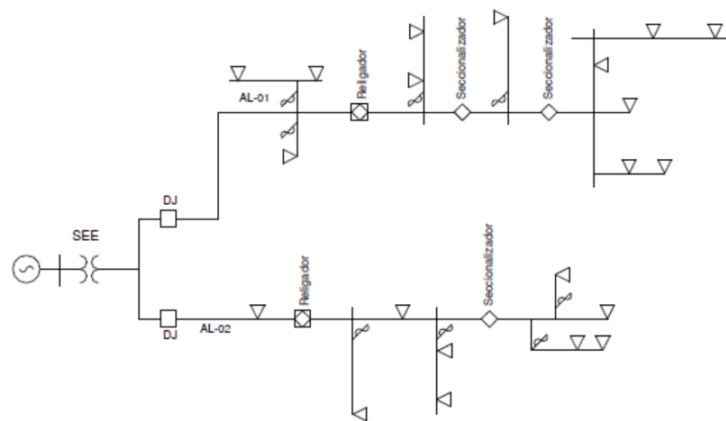


Figura 8 – Diagrama unifilar sistema radial simples com seccionamento [25].

é utilizado em áreas rurais ou com pouca demanda de carga, onde os requisitos de continuidade não justificam um arranjo muito complexo.

2. Sistema radial com recurso:

Esse arranjo permite que os consumidores tenham duas alimentações, uma padrão e outra conectada adjacente. Caso ocorra alguma adversidade com o sistema principal, há uma transferência ou redirecionamento dos sistemas adjacentes. Esse acionamento (manual ou automaticamente) auxilia a suprir a demanda da continuidade do fornecimento [26].

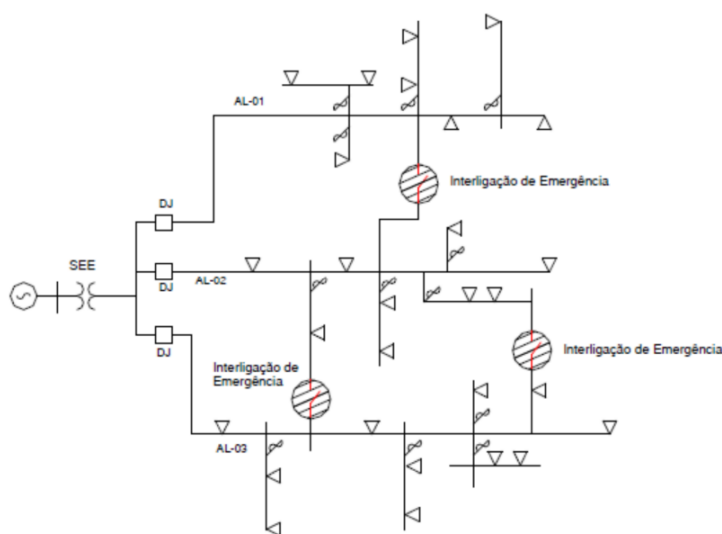


Figura 9 – Diagrama unifilar do sistema radial com recurso[25].

O sistema radial com recurso é uma implementação do sistema radial convencional, que tem o objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema. O sistema adjacente pode ser não somente uma interligação, conforme apresentado na 9, mas também uma subestação responsável reserva dependendo da área em que o sistema está implementado.

3. Sistema em anel aberto:

Um sistema de anel aberto assim como a configuração radial com recurso, é composta por dois alimentadores de saída que podem estar conectados pertencendo à mesma subestação MT [27]. A Figura 10 apresenta o diagrama unifilar dessa configuração.

O sistema de anel pode ser também configurado como Normalmente Fechado (NF) a depender dos recursos área de atuação. Esse tipo de configuração pode apresentar melhorias na diminuição das perdas na manutenção dos níveis de tensão, mas tendo em vista que é um sistema em malha fechada com dois alimentadores, em caso de falha em um deles, irá existir problemas de continuidade pois os circuitos presentes no anel serão afetados/desligados.

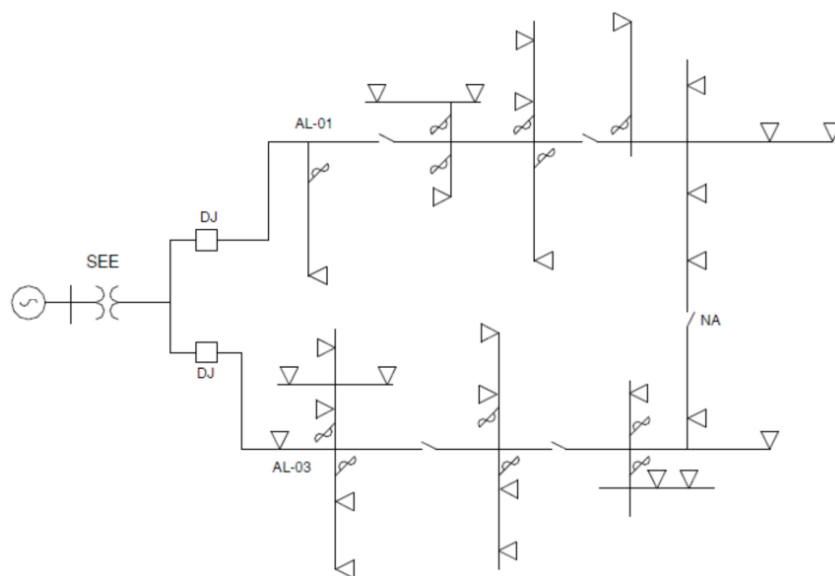


Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema em Anel na mesma barra aberto[25].

As configurações das redes de distribuição, os recursos nelas utilizados, entre outros parâmetros necessários para o bom funcionamento e a garantia do fornecimento é de responsabilidade das empresas distribuidoras, concessionárias, que possuem a concessão para atuar na área e as permissionárias que possuem permissão para executarem prestação de serviço às concessionárias dentro das respectivas áreas.

Uma das principais atividades, relacionadas a uma empresa distribuidora é o planejamento da expansão do sistema elétrico, pois representa um dos principais investimentos realizados pelas distribuidoras de energia elétrica. Definir a forma eficiente a alocação de recursos muitas vezes escassos é imprescindível para alcançar os objetivos estratégicos das companhias [28].

3.2 Qualidade da Energia

Todos os bens de consumo disponíveis e acessíveis para a população, comércio e indústrias no geral possuem medidores de qualidade que garantem o bom funcionamento dos processos, produtos e serviços e ajudam a identificar possíveis pontos de melhoria. Segundo o dicionário de Oxford, o conceito de qualidade está associada ao grau de positividade ou negatividade em relação ao bem usufruído. Já segundo a (*International Standardization Organization* (ISO) 9000, qualidade é a adequação e conformidade dos requisitos que a própria norma e os clientes estabelecem.

A qualidade de produtos e serviços de uma organização é determinada pela capacidade de satisfazer os clientes e tanto pelo impacto pretendido, quanto o não pretendido nas partes interessadas pertinentes [29]. Fica evidente então que a qualidade é um dos primordiais requisitos do que está sendo entregue ao consumidor direto, seja ele em forma

de produto, serviço ou processo.

A energia elétrica também é medida pela qualidade e com isso a prestação do serviço de fornecimento de energia é um dos serviços mais desafiantes da sociedade moderna. Para que o consumidor disponha de energia no momento que aciona um interruptor ou conecta um aparelho elétrico na tomada é preciso que um vasto aparato - composto por centenas de centrais geradoras, linhas de transmissão, subestações, linhas e transformadores de distribuição - esteja apto a operar de forma coordenada [7].

O controle da qualidade precisa estar presente em todas as etapas do SEP, como mencionado no item 1, o SIN não possui reservas de energia, e para que toda a necessidade de consumo seja atendida pela geração com a qualidade necessária é preciso que cada estágio do processo esteja adequado para garantir o fornecimento.

O Consultor de Engenharia Elétrica Julian Padilha descreve em seu artigo de revisão da Energia Elétrica de maneira simplificada o que se espera de um fornecimento de energia com qualidade [30].

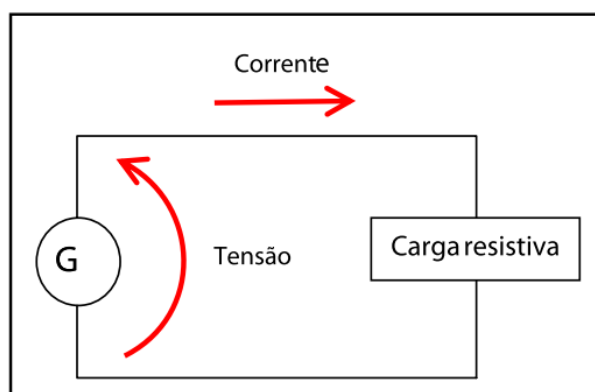


Figura 11 – Circuito simples em série[30].

A Figura 11 representa um circuito onde a fonte G fornece uma tensão e ao ser conectada a uma carga gera-se uma corrente. Se considerarmos o sistema elétrico alternado com frequência de 60Hz a forma de onda da tensão deveria ser uma senoide perfeita de 60Hz e supondo uma carga resistiva, a corrente também seria a mesma senoide.

Se a fonte G alimentar ininterruptamente, com amplitude e frequência constantes, a carga elétrica realizará a sua função de forma contínua e assim é possível exemplificar de forma simples um sistema elétrico com qualidade de energia. Se a fonte deixar de fornecer a tensão dentro de seus valores nominais ou se a carga sem qualquer defeito deixar de funcionar adequadamente, esse cenário então seria o de uma violação da qualidade de energia.

Portanto, o conceito de boa qualidade de energia está intimamente ligado ao funcionamento adequado e sem falhas das cargas elétricas existentes em um sistema elétrico e pressupõe tensões e frequência dentro de valores nominais e sem oscilações ou pertur-

bações, ou seja, as tensões e as correntes resultantes devem apresentar formas de onda o mais próximo possível da senoide com frequência de 60Hz [30].

A Edição XIV do *White Paper* do instituto Acende Brasil descreve como os principais impactos e prejuízos causados pela má qualidade ou a falta¹ momentânea da energia elétrica para a sociedade. Segundo o Instituto, os prejuízos provocados pela falta de energia elétrica em suma superam o próprio custo da energia elétrica. Uma interrupção inesperada no fornecimento de energia elétrica pode ocasionar graves danos [31]:

- Acidentes devido à perda da sinalização de trânsito e prejuízo da iluminação no geral;
- Prejuízo à saúde devido à equipamento essenciais para mantimento da vida;
- Incêndios ou explosões devido à perda de sensores e controles eletrônicos em aplicações;
- Danos a equipamentos industriais e interrupção em sua produção;
- Danos ao comércio;
- Falta de segurança, vandalismo, roubos e saques;
- Prejuízo ao bem estar da população.

Mesmo falhas ² momentâneas, de alguns poucos minutos, podem provocar elevados prejuízos, sendo muito mais severas quando ocorrem de forma inesperada do que quando são previamente programadas e comunicadas [7].

Segundo dados da ANEEL em 2021 a qualidade do serviço alcançou o segundo melhor resultado da série histórica desde 2017. Ainda assim, as médias de interrupções ao longo do ano totalizaram 11,84 horas e os consumidores receberam um total de R\$ 718,5 milhões em compensações pelos danos causados. Esses dados são anualmente contabilizados pela agência e com eles é feito um *ranking* de concessionárias que mais se destacaram no quesito qualidade de fornecimento.

A classificação das empresas distribuidoras é elaborada com base no Desempenho Global de Continuidade (DGC), formado a partir da comparação dos valores apurados de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (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 [32].

¹ Falta: termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico

² Falha: termo utilizado quando algum dispositivo deixa de cumprir sua finalidade.

As redes elétricas estão em constante crescimento e são interligadas para permitir a transferência de energia em todo território nacional entre geradores. Conforme mencionado acima, esses indicadores coletivos de continuidade são necessários para estipularem as médias pelas quais as distribuidoras atuantes no território nacional devem seguir em relação à continuidade do fornecimento de eletricidade e às variações de tensão admissíveis no suprimento de energia. Entrando um pouco mais no conceito de cada indicador:

- DEC:

Indica a média de horas que os consumidores de um determinado conjunto ficaram sem fornecimento de energia no período de apuração (soma do número de horas que cada unidade consumidora passou sem energia no período de apuração, dividida pelo número de unidades consumidoras):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k C_a(i) \cdot t(i)}{C_c}$$

Onde,

$C_a(i)$ = nº de unidades consumidoras, atendidas em BT ou MT, interrompidas em um evento (i) no período.

$t(i)$ = duração de cada evento (i) no período.

i = índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

k = número máximo de eventos no período considerado;

C_c = número total de unidades consumidoras faturadas, do conjunto e período considerado, atendidas em BT ou MT.

- FEC:

Indica o número de interrupções médio de um determinado conjunto de consumidores no período de apuração (soma do número de interrupções sofridas em cada unidade consumidora no período de apuração, dividida pelo número de unidades consumidoras):

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^k C_a(i)}{C_c}$$

- Duração de interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC):

Indica o total de horas em que o consumidor ficou sem fornecimento no período de apuração (mês).

- Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC):

Indica o número de interrupções no fornecimento do consumidor no período de apuração (mês).

Os parâmetros acima definem a continuidade do suprimento (duração da falta de tensão e sua frequência de ocorrência) e não abrangem aspectos relacionados às perturbações na forma de onda de tensão [30].

Na tabela 1 é possível observar a variação dos indicadores desde 2015 e a evolução da melhoria, em inglês, *Key Performance Indicator* (KPI) e o crescimento do número de unidades consumidoras.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
DEC Medido(h)	18,73	15,91	14,48	13,31	12,92	11,54	11,84
DEC Limite(h)	13,95	13,33	12,79	12,75	12,53	12,29	11,96
FEC Medido	9,93	8,93	8,27	7,17	6,70	6,06	5,98
FEC Limite	11,05	10,34	9,73	9,54	9,27	8,99	8,57
Nº de Consumidores	76.682.080	78.346.829	80.095.446	81.595.678	82.943.588	84.546.110	86.391.973

Tabela 1 – Indicadores de qualidade - Anual BR (dados ANEEL).

A quantidade de horas que os consumidores ficaram sem energia elétrica caiu 34,7% entre 2015 e 2021, bem como o número médio de interrupções, que caiu 41%. Podemos ver esses resultados através dos gráficos nas Figuras 12 e 13.

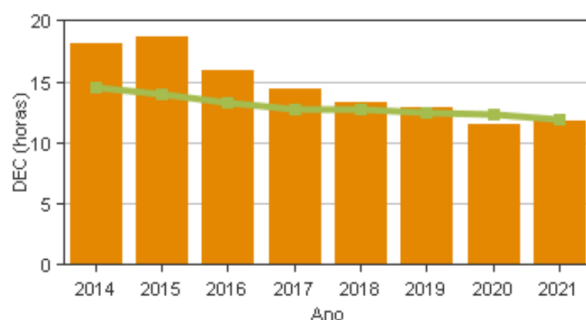


Figura 12 – DEC Anual - Concessionárias Brasil[32].

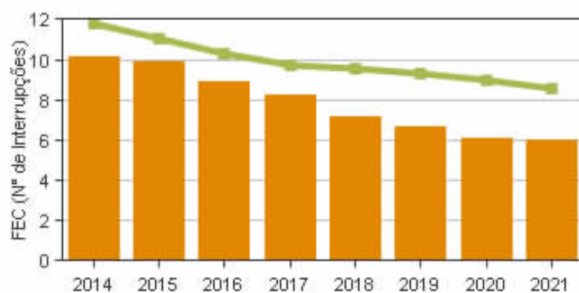


Figura 13 – FEC Anual - Concessionárias Brasil[32].

Esses números mostram, além dos resultados anuais, que quando consolidamos o sistema e obtemos resultados satisfatórios de qualidade, as concessionárias e empresas transmissoras a longo prazo poupam recursos financeiros de reparos ao consumidor e conseguem ampliar e otimizar suas linhas e serviços. Aliados ao constante aumento populacional e expansão de pequenos centros, o número de unidades consumidoras aumentam, gerando

mais receita, mais consumo e requerendo conseqüentemente a melhoria na continuidade da qualidade no fornecimento.

O termo “qualidade da energia” inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. De forma geral, a conceituação da perda da qualidade da energia é adotada pelos especialistas da área, como sendo: “qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos” [33].

Apesar da qualidade da energia elétrica depender de diversos fatores ao longo de toda a sua jornada entre geração e distribuição (veremos melhor sobre as perdas e impactos na sessão 3.2.1), como foi apresentado nesse capítulo, a qualidade do serviço é medida segundo a continuidade do fornecimento da energia elétrica, onde as responsáveis diretas são as concessionárias de energia. De modo geral, em um cenário idealmente perfeito, o serviço de fornecimento de energia elétrico deveria entregar energia contínua e ilimitada para seus usuários finais.

A fim de obter um melhor diagnóstico sobre a gestão da qualidade por parte das distribuidoras, a ANEEL exige também que as concessionárias reportem os tempos médios de atendimento de ocorrências de forma segmentada, em três categorias:

1. Preparação;
2. Deslocamento;
3. Execução.

Para cada etapa do atendimento é medido o tempo de atendimento e a média desse tempo é calculada de acordo com o número de ocorrências. O tempo de preparação é o tempo compreendido entre o instante em que se tomou conhecimento da existência de uma ocorrência e o instante em que a equipe de emergência é despachada. Trata-se do tempo requerido para reunir a equipe, os materiais, ferramentas e equipamentos requeridos para realizar o atendimento [7]. O indicador que as concessionárias reportam ao órgão regulamentador é o *Tempo Médio de Preparação* (TMP). Após a equipe que atenderá a ocorrência ter sido colocada à campo, o tempo que compreende o momento de saída até o de chegada no local é medido pelo *Tempo Médio de Deslocamento* (TMD). Para a execução o *Tempo Médio de Execução* (TME) mede o tempo entre a chegada da equipe ao local de atendimento até o momento do restabelecimento da energia ou a correção do problema relatado. O tempo é medido independentemente da natureza da ocorrência.

O tempo de execução é o tempo compreendido entre o instante em que a equipe chega ao local da ocorrência até o restabelecimento do fornecimento. O tempo de execução depende da natureza da ocorrência, da qualidade das informações recebidas previamente

sobre o defeito que gerou a ocorrência, e dos procedimentos utilizados para solucionar o problema.

Na tabela 2 podemos observar os tempos, em minutos, por ano no atendimento das ocorrências. Os valores anuais dos indicadores *Número de Interrupção de Energia Elétrica* (NIE) e *Número de Ocorrências* (NUMOCORR) são obtidos pela soma dos valores informados para cada conjunto em um dado ano, enquanto que os valores anuais dos indicadores TMD, TME e TMP são obtidos das médias ponderadas desses indicadores pelo NUMOCORR.

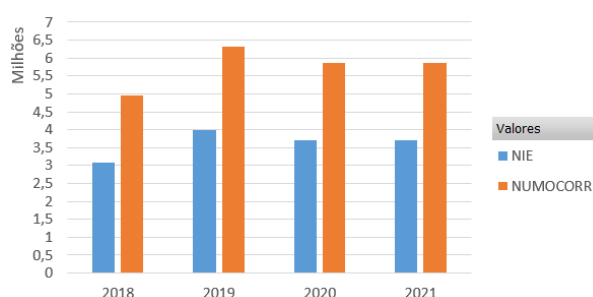


Figura 14 – Total anual NIE e NUMOCORR [a autora].

Em 2013 os dados já mostravam que a etapa de preparação é a responsável pela maior parcela no atendimento às ocorrências pelas concessionárias. Os dados apresentados pela ANEEL entre 2011 e 2013 indicam que 73% do tempo médio era representado pela preparação, seguido de 15% da execução e 12% pelo deslocamento.

Os dados da Tabela 2 foram retirados dos reportes mensais da ANEEL e contém apurações de três concessionárias de cada região do país, sendo escolhidos de forma aleatória apenas para análise deste trabalho, não tendo qualquer finalidade de comparativo entre empresas distribuidoras.

	Total NUMOCORR	Total de NIE	TMD	TMP	TME
2018	4947183	3082508	36,39	322,44	57,23
2019	6307033	3995528	41,20	348,88	62,75
2020	5866953	3691137	44,62	322,92	64,76
2021	5856618	3705179	47,17	326,42	67,63

Tabela 2 – Dados de qualidade no atendimento de ocorrências 2018-2021.

Na Figura 15 é possível confirmar que nos últimos anos a grande parte do tempo de atendimento às ocorrências é composta pelo TMP. A média dos últimos 4 anos ficou em 75,8% da média total de tempo de atendimento à ocorrência correspondida pela preparação, 14,48% pela execução e 9,7% pelo deslocamento.

A expectativa, tendo em vista os investimentos em equipamentos e pessoas nos últimos anos, era de que nos dados recentes tanto o número de ocorrências quanto o de tempos diminuíssem. Apesar do gráfico 16 mostrar um aumento em alguns dos indicadores, é necessário levar em consideração que os dados apresentados pelo MME e pela ANEEL

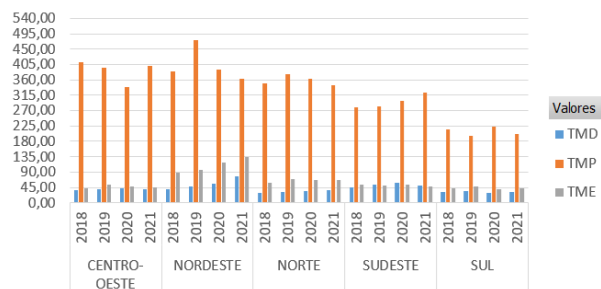


Figura 15 – Média de tempos de atendimento de ocorrências em minutos [a autora].

mostram que o DEC diminuiu nos últimos anos e o tempo médio está associado ao número de relatos feitos por consumidores.

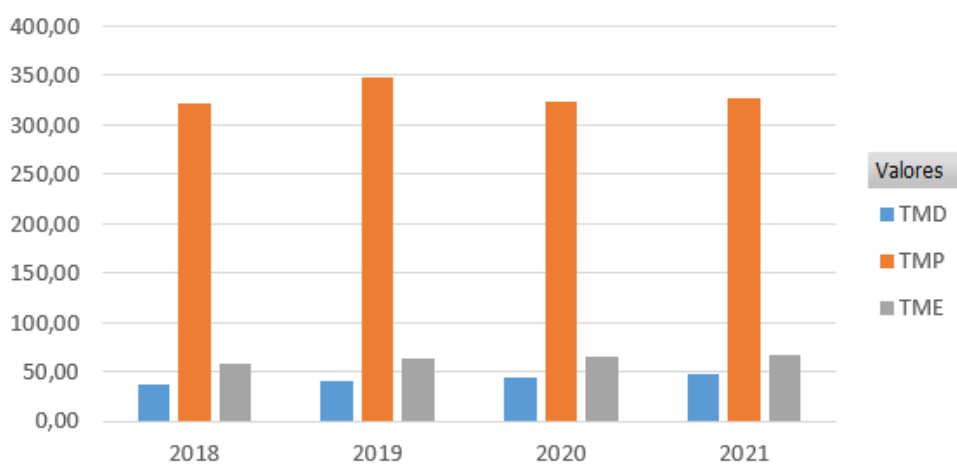


Figura 16 – Comparativo por ano da média de tempos de atendimento de ocorrências [a autora].

3.2.1 Impactos na Qualidade

Segundo Helder, pode-se dizer que um sistema elétrico com qualidade é aquele que possui a tensão com a sua amplitude e forma de onda o mais próximo possível de um parâmetro ideal e adequado, sem alterações em amplitude, frequência ou fase [34].

Da perspectiva de usuário final da energia elétrica, quando há um problema de falta ou interrupção da energia em suas residências e empresas as atenções dos consumidores é centralizada nas concessionária de distribuição de eletricidade local, mas a interrupção pode ter sido ocasionada por diversas falhas [7]:

- na rede da concessionária de distribuição; ou
- em alguma instalação da rede de transmissão que transporta a energia até a distribuidora; ou
- alguma central de geração que supre energia para a rede de transmissão.

Geralmente a causa dessas falhas pode estar relacionado à sobrecargas, falhas de equipamentos instalados na rede, mau planejamento da distribuição, redução de fontes para geração de energia, como por exemplo escassez hídrica, e até mesmo erros operacionais.

Algumas das principais causas externas são:

- Eventos naturais como raios, deslizamentos, fortes ventos e quedas de árvores;
- Secas ocasionando escassez hídrica e queimadas;
- Manuseio incorreto e não permitido das instalações de distribuidoras a fim de furtos de energia e equipamentos;
- Animais em contato com a rede (por exemplo: ninhos de pássaro);
- Acidentes de trânsito com batidas nos postes de energia.

A qualidade da energia em uma determinada área de atuação do sistema elétrico brasileiro é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios, em sua grande maioria transitórios.

Segundo Siqueira, colunista da empresa OMS, baseado em sua experiência com os prejuízos financeiros causados em seus clientes os distúrbios mais comuns são [35]:

- Desequilíbrio de Tensão: gera perda de energia, diminuição da capacidade de transmissão elétrica, prejudica motores a indução e causa aquecimento de equipamentos;
- Desequilíbrio de Frequência: afeta principalmente geradores, transformadores e equipamentos eletrônicos. Estes podem sobreaquecer ou até queimar;
- Ruídos: podem ser originados por equipamentos que emitem ondas em alta frequência. Por exemplo: os reatores de lâmpadas fluorescentes. Eles contaminam a tensão da rede e, ao alterarem a frequência das ondas elétricas, afetam o funcionamento de eletrônicos;
- Harmônicas: as distorções harmônicas de tensão e corrente “drenam” energia. E além do desperdício que eleva a conta de luz, prejudicam o funcionamento dos equipamentos;
- Interferências eletromagnéticas e por radiofrequência: podem queimar circuitos. Também afetam o funcionamento dos equipamentos e podem até inutilizá-los.

Os surtos de origem atmosférica são os principais causadores de perturbações nas redes de distribuição, influenciando significativamente os indicadores de qualidade da energia fornecida. Uma das formas de sobretensão na rede secundária diz respeito aos surtos transferidos do primário, via transformador [36].

Além de todos os distúrbios que acontecem na rede e dentre toda a energia gerada e transferida para as redes de transmissão, temos perdas de energia consideráveis ao longo do percurso. Segundo a ONS, ao longo de 10 anos, três segmentos são responsáveis por 90% das perdas que ocorrem no país: centrais elétricas, transmissão e distribuição de eletricidade e carvoarias.

De acordo com o relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022, o consumo final de energia elétrica no país em 2021 progrediu 4,2%. Os setores que mais contribuíram para este avanço em valores absolutos foram o Industrial que aumentou o seu consumo em 15,0TWh (+7,5%), seguido pelo Comercial que cresceu 4,8TWh (+5,7%), pelo Agropecuário, com incremento de 1,4 TWh (+4,2%) e pelo Residencial, que cresceu em 1,6TWh (+1,1%) [15].

Acompanhando o crescimento de consumo, a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil, em 2021 registrou as porcentagens de perda do sistema nos últimos 2 anos conforme mostra a Figura 17.

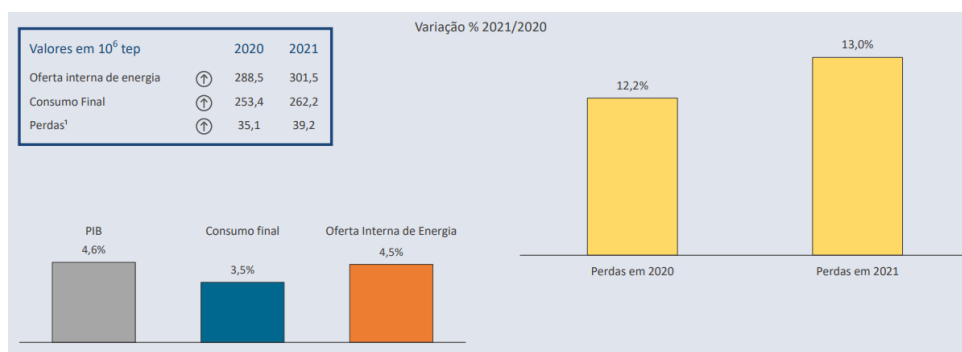


Figura 17 – Variação OIE 2020/2021 - Perdas[15].

3.2.2 Investimentos

O atual modelo regulatório de incentivo para o segmento de distribuição é baseado em dois fatores. O primeiro é um conjunto de métodos de remuneração baseados na classe de ativos, que contemplam a depreciação dos ativos bem como os riscos que são inerente à aquelas atividades. Os investimentos só são considerados legais se forem compatíveis com o crescimento e as exigências do mercado para melhoria da qualidade. O segundo fator são os mecanismos de incentivo à busca por ganhos de eficiência. A ANEEL analisa os diversos componentes dos custos gerenciáveis [37].

O Grupo de estudos do setor elétrico da UFRJ ainda explica que essa regulamentação dá-se a entender que possui uma gestão mais ativa da rede de distribuição, um dos resultados é o aumento expressivo da participação do OPEX, do inglês *Operational Expenditure*, refere aos investimentos que estão relacionados às despesas de manutenção e gastos recorrentes do negócio, portanto, são essenciais para seu funcionamento, em detrimento do CAPEX, do inglês *Capital Expenditure* são as despesas de capital ou investimento

em bens de capital. A automação de redes ou a digitalização dos serviços, por exemplo, tendem a envolver investimentos pequenos em ativos fixos (remunerados) e podem estar associadas a um aumento de gastos classificados como custos operacionais.

Segundo a empresa de investimentos *Economática*, em 2021 o setor de administração de empresas e empreendimentos tem a melhor relação Capex/depreciação com 217%, seguido pelo setor de energia elétrica com 40 empresas e 206,4% de Capex/depreciação. O setor de petróleo e gás (sem a Petrobras) com seis empresas tem o terceiro melhor ratio com 200,5%. A evolução do índice entre os anos de 2010 e 2017. O setor de Assistência médica e social é o que tem o melhor desempenho com 205,6%, o que significa que o setor está investindo mais de duas vezes a sua depreciação. O segundo setor é o de Energia Elétrica com 186,6%, valor inferior ao de 2016 quando o índice foi de 198,4% e mostra queda pelo segundo ano consecutivo [38].

3.3 Dispositivos, Proteção e Controle de Sistemas Elétricos

As distribuidoras de energia elétrica precisam apresentar resultados de continuidade do fornecimento de energia elétrica cada vez melhores, como mostrado na sessão 3.2.1. Considerando que os recursos financeiros são finitos, as decisões sobre onde investir devem ser tomadas de forma otimizada [39].

A maior parte das faltas em redes aéreas de distribuição são transitórias e podem ser eliminadas através da desenergização momentânea da rede, mas para que o sistema opere de forma otimizada e sintonizada é necessário considerar alguns importantes fatores que influenciarão na estratégia de proteção e controle a ser adotada. Tais fatores são peculiares a cada sistema, e deverão ser levados em consideração na elaboração do estudo. Os mais relevantes são: a carga instalada e a demanda do sistema a ser protegido, o meio onde se situa o sistema elétrico, coordenação com dispositivos instalados no sistema de transmissão, critérios econômicos e condições de segurança [40].

Segundo guias de planejamento e execução da CEMIG, o projeto de proteção contra falhas deve ser elaborado de maneira a proteger todo o sistema elétrico contra condições anormais de operação, causadas por curtos-circuitos, sobrecargas e desequilíbrios acima dos limites estabelecidos, de modo a assegurar índices de continuidade de serviço e segurança adequados [40].

Para que todo planejamento seja colocado em prática é necessário tanto investimento quanto a seleção de equipamentos que possibilitem a execução de projetos de melhoria e modernização da rede. O CAPEX, valor para investimentos disponibilizados anualmente, é que vai garantir a aplicação das estratégias e compras de equipamentos e serviços para o uso de novas soluções e serviços.

Dentro do âmbito de investimentos e melhorias na qualidade, a construção de novas subestações e a ampliação das instalações já existentes são projetos comuns em empresas do ramo de transmissão e distribuição de energia elétrica. No entanto, a necessidade de uma nova subestações no sistema elétrico se dá por diversos fatores:

- Crescimento da carga e capacidade do sistema;
- Estabilidade e confiabilidade do sistema;
- Qualidade da energia elétrica;
- Reclamação de clientes.

Todas as subestações, independentemente da configuração, precisam de sistemas de proteção contra defeitos ou outras situações de risco. Elevadas correntes elétricas originárias de curto circuito e surtos de tensão são exemplos comuns dessas faltas [41].

Os atuais sistemas de distribuição de energia elétrica em expansão são caracterizados por maiores densidades de demanda que resultam em mais carga por quilômetro de rede, mais interconexões e mais redes laterais e ramificações. Ao mesmo tempo, há uma crescente demanda por um grau ainda mais elevado de confiabilidade do sistema. Para simplificar os procedimentos de seccionamento, minimizar as interrupções de fornecimento de energia elétrica e facilitar o religamento com cargas frias após uma interrupção, são necessários cada vez mais pontos de seccionamento [42].

Nesse contexto, as empresas buscam métodos de otimização e priorização ou respaldo técnico, a fim de subsidiar a elaboração de um plano de obras e/ou expansão, que contemple tanto aspectos técnicos quanto econômicos. A Elaboração de um método de otimização deve considerar critérios de diversas ordens e variam de acordo com a característica dos sistemas envolvidos [43].

Algumas condições anormais de operação do sistema de distribuição, como curto circuitos, sobrecargas, adversidades climáticas, raios entre outras condições anormais de operação são os principais causadores do acionamento de equipamentos de proteção e manobra que podem vir a causar a interrupção no fornecimento de energia.

Sob condições de faltas permanentes, o sistema passa do estado normal de funcionamento para o estado restaurativo conforme ilustrado na figura 18. Esse é um esquema antigo, de 1999, mas é de fácil entendimento para exemplificar os possíveis estados operacionais do sistema. Ele pode estar no estado normal, quando as demandas de cargas e as restrições operativas do sistema estão sendo satisfeitas; ao entrar no estado de emergência, significa que as restrições operativas não estão sendo satisfeitas, e em estado Restaurativo, quando houver uma interrupção parcial ou total do fornecimento de energia. Os índices de confiabilidade do sistema estão relacionados com o tempo de operação da rede em cada um desses estados previamente definidos [44].

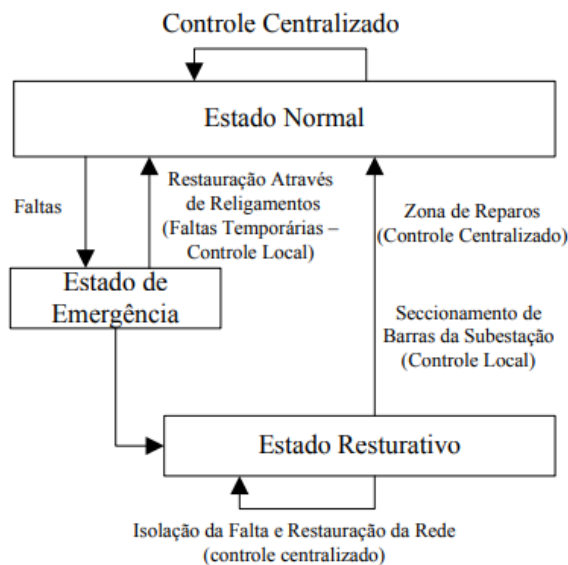


Figura 18 – Estados de operação de um sistema de distribuição [44]

No aspecto de investimentos em melhoria, automatização e qualidade no fornecimento, existem no sistema elétrico de potência alguns tipos de equipamentos, como exemplo os de proteção, que também pode ser utilizado para manobra de circuito, e os de manobra, exclusivamente para manobra. Entre os equipamentos de proteção, encontramos disjuntor, relé, seccionadora automática (SA), religador automática (RA), pára-raios e chave fusível. Todos esses equipamentos, com exceção do relé e pára-raios, além da função de proteção, também podem ser utilizados para manobrar circuitos [45].

3.3.0.1 Equipamentos de Proteção e Manobra

Tendo em vista todo o contexto apresentado na sessão 3.3, existem no sistema elétrico de potência dois tipos de equipamentos, sendo um de proteção, que também pode ser utilizado para manobra de circuito, e o de manobra, exclusivamente para manobra. Entre os equipamentos de proteção, encontramos disjuntor, relé, seccionadora automática (SA), religadora automática (RA), pára-raios e chave fusível, devido este ser um de seus fabricantes. Todos esses equipamentos, com exceção do relé e pára-raios, além da função de proteção, também podem ser utilizados para manobrar circuitos.

- Disjuntor

O disjuntor é um equipamento de manobra utilizado para a energização e interrupção de circuitos. Tem como objetivo bloquear a entrada de carga elétrica acima do limite suportado pelo equipamento. Ele sempre desliga quando houver sobrecorrente. Seu uso é muito simples, o circuito pode ser restaurado após o problema ter sido corrigido, basta abrir a chave [46]. A arquitetura do disjuntor pode ser vista na figura 19;

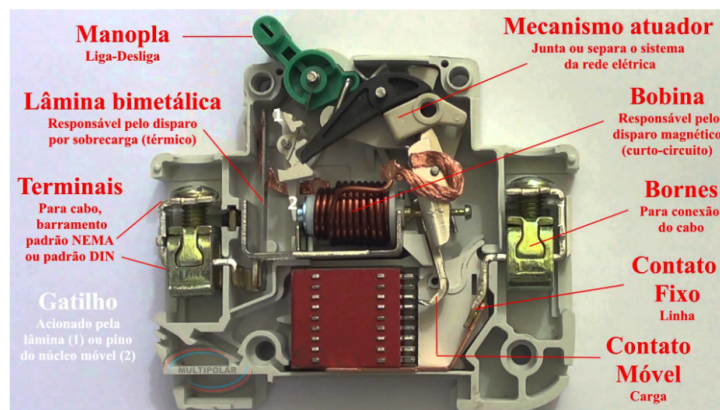


Figura 19 – Exemplo configuração disjuntor [47]

- Relé

O relé de sobrecorrente é um dispositivo sensor que atua para comandar a abertura do disjuntor, protegendo contra sobrecorrentes os equipamentos instalados na subestação e nos alimentadores, contra possíveis danos que poderiam ser ocasionados por defeitos (falhas) na rede de distribuição. Relé de proteção de sobrecorrente é aquele que responde pela corrente que flui no elemento do sistema que se quer proteger quando o valor dessa corrente supera o previamente ajustado. A proteção com relé de sobrecorrente é a mais econômica de todas usadas nos sistemas de potência e é também a que mais frequentemente necessita de reajuste quando são efetuadas alterações na configuração do sistema.

- Seccionalizadora Automática ou Chave Religadora

É um equipamento utilizado para proteção de sistemas elétricos de potência, associado a um religador. Ao ser sensibilizado (normalmente por uma sobrecorrente) o seccionalizador prepara-se para contar a quantidade de desligamentos do circuito elétrico. Quando esta contagem atingir o valor pré-programado o equipamento abre, interrompendo o circuito. A outra função é exercida quando ocorre um fio partido, curto circuito, na rede ou galho de árvore caído sobre a rede elétrica. A ação é a mesma, contagem da abertura e fechamento até atingir a quantidade programada e realizar a interrupção.

- Para Raios

Para sistemas aéreos de distribuição de energia, sobretensões temporárias geralmente ocorrem devido a surtos atmosféricos, curtos-circuitos, energização ou desenergização dos capacitores. "A função do pára-raios é abrir e direcionar para o terra as sobretensões, evitando danos à rede de energia elétrica e aos equipamentos das concessionárias. Os pára-raios instalados nas redes de distribuição de energia elétrica das concessionárias não protegem os equipamentos e redes domiciliares, co-

merciais e industriais, apenas a rede e equipamentos da concessionária"[42]. A figura 20 ilustra um para-raio utilizado em redes de distribuição;



Figura 20 – Exemplo para raio [48]

- Chave fusível

É um dispositivo de proteção e manobra de circuitos elétricos. Utilizada para proteção de transformadores de potência, entradas primárias até 100A, banco de capacitores e ramais de redes elétricas.

- Chave Seccionadora

Equipamento de manobra. Utilizada exclusivamente para manobra. São instaladas nas posições horizontal ou vertical; podem ser Normalmente Aberta (NA) ou Normalmente Fechadas (NF). A chave instalada como NF, quando acionada se torna NA, interrompendo o circuito elétrico. Se instalada como NA, ao ser acionada passa a ser NF, dando continuidade ao circuito elétrico. São acionadas para fins de manutenção preventiva ou corretiva, programação de desligamento para manutenção preventiva, balanceamento de carga, manobra de circuitos para socorro, manobras para que o menor número possível de clientes fique sem energia em manutenções preventiva e corretiva, principalmente hospitais, indústrias de grande porte, shoppings, sobrevida, entre outros [49]. A figura 21 mostra o exemplo de uma chave seccionadora.

3.3.1 Religadores Automáticos

Dentre os estudos realizados na fase de planejamento da operação de redes de distribuição, há um foco em alocar adequadamente equipamentos que promovam a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. Alguns deles foram apresentados na seção 3.3, que são os equipamentos de proteção. Um desses equipamentos, que tem se sobressaído devido ao alto desempenho e possibilidades de comunicação e controle da rede são

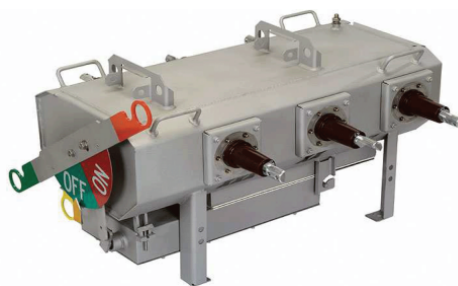


Figura 21 – Exemplo Chave seccionadora [50]

os religadores automáticos. Equipamentos capazes de isolar automaticamente faltas permanentes, são montados em postes e destinados a redes elétricas aéreas em média tensão usualmente de 15 a 27kV ou 38kV.

O religador automático é composto pelo conjunto da chave disjuntora, ou tanque do religador (a nomenclatura à depender do fabricante), que é instalado no poste e normalmente energizado com tensão proveniente do circuito primário (13,8kV, 24kV ou 36,4kV) e de um cubículo de controle contendo o relé que controla a chave. O relé é capaz de atuar por sobrecorrente, subcorrente, subtensão, sobretensão e suportar protocolos de comunicação [27].

Esse equipamento utiliza a última tecnologia disponível em isolamento sólida e interrupção a vácuo ou óleo. Para fins de otimização de rede e eficácia na melhoria dos indicadores de qualidade é importante que as concessionárias realizem um adequado planejamento da alocação destes dispositivos [51].

Segundo o fabricante *EATON*, um religador é um interruptor elétrico automático de alta tensão. Como um disjuntor em linhas elétricas domésticas, ele desliga a energia elétrica quando ocorre um problema, como um curto-circuito. Quando um disjuntor doméstico permanece desligado até que seja redefinido manualmente, um religador testa automaticamente a linha elétrica para determinar se o problema foi removido. Se o problema foi apenas temporário, então o religador é redefinido automaticamente e restaura a energia elétrica [52].

Seu princípio de funcionamento é baseado na abertura e fechamento dos contatos, com tempos definidos. Quando o religador detecta um problema na rede, sobretensão por exemplo, ele encerra/desliga automaticamente impedindo a passagem de corrente. Segundos depois (a duração depende do tempo setado na configuração), o religador volta a ligar a energia. Porém se o problema ainda estiver sendo detectado, ele desliga novamente, pela segunda vez. Se o problema ainda estiver presente após a terceira tentativa, o religador é programado para considerar o problema como permanente e permanece desligado. A equipe de uma empresa de energia então é acionada para ir à campo reparar o problema na linha e redefinir o religador para restaurar a energia.

Para otimizar os esquemas de proteção das linhas aéreas, o religador está entre os equipamentos mais completos. Segundo descrição do fabricante *Schneider Electric*, um

religador automático é um disjuntor qualificado que pode interromper rapidamente a corrente de falha e religar automaticamente para reenergizar o circuito pouco tempo depois. Ele pode ser programado para disparar até 4 vezes e religar três vezes para verificar se a falha é transitória e se a rede está livre de danos. Estudos de falhas em redes de alimentadores aéreos mostraram que 70-85% das falhas são temporárias [53].

Os religadores automáticos de maneira geral podem ser divididos entre monofásicos e trifásicos. O primeiro é utilizado para proteger linhas monofásicas, como ramificações ou derivações de alimentação trifásica. Também pode ser usado em circuitos trifásicos onde a carga é majoritariamente monofásica. Se ocorrer uma fuga de redução de fase, essa pode ser bloqueada enquanto o serviço é mantido nos $2/3$ restantes do sistema. Já os trifásicos são usados em circuitos trifásicos para melhorando a confiabilidade do sistema quando o bloqueio de todas as três fases é necessário no caso de qualquer falha permanente, a fim de evitar a fase única de cargas trifásicas, tais como motores trifásicos grandes [52].

Ainda dentro da classificação de religadores é importante mencionar sobre os meios de interrupção, que podem ser através de interruptores a óleo ou a vácuo. Devido às vantagens da interrupção à vácuo, pois estes proporcionam a interrupção do arco mais rapidamente do que à óleo e possuem maior vida útil e confiabilidade é geralmente a escolha dos fabricantes e das concessionárias, apesar de encarecerem o equipamento, os bons resultados e a segurança acabam sendo prioridade.

Os religadores atualmente possuem diversas aplicações de automação. Utilizam lógicas de recomposição automática e *Self-Healing*, supervisão, telecontrole, medições e diagnósticos de parâmetros da rede (correntes, tensões, fator de potência, energia, potências, formas de ondas e espectros harmônicos). Com todas essas aplicações o equipamento garante às redes de distribuição elétrica de média tensão maior eficiência, segurança, disponibilidade e confiabilidade além de integrar aplicações pra o uso em *Smart Grids* [54].

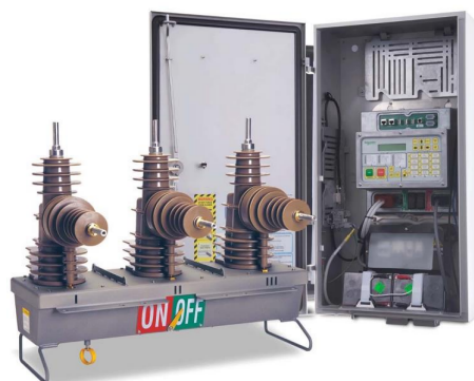


Figura 22 – Religador 3F Automático + ADVC Schneider Electric [54]

Para ter mais aplicabilidade e possibilitar um controle mais robusto da rede, os religadores geralmente são instalados com seus controladores, que permitem incluir funções

de proteção, monitoramento, medições, controle, interfaces de comunicação além de múltiplos protocolos de comunicação. A figura 22 mostra o conjunto dos dois equipamentos.

Dos equipamentos de proteção citados, temos as chaves religadoras ou chaves seccionadoras que também exercem um papel semelhante ao do religador automático. Dentre as diferenças entre eles, as chaves possuem um custo menor em relação aos religadores pois não possuem, por exemplo ampolas à vácuo. Conseqüentemente, as chaves não permitem abertura de curto circuito, funcionalidade essa presente nos religadores. O investimento em religadores, a pesar de um maior custo, acaba sendo vantajosa pois de acordo com a configuração aplicada na rede o *recloser* pode atuar tanto como seccionares quanto como religadores dependendo da necessidade da linha.

Para que possa ser aplicada a otimização da aplicação de recursos, é necessário identificar os melhores pontos para instalação de religadores. Como os sistemas de distribuição de energia elétrica são complexos, há uma infinidade de opções. Deve-se então utilizar um critério de comparação de benefícios para facilitar a escolha destes pontos [39].

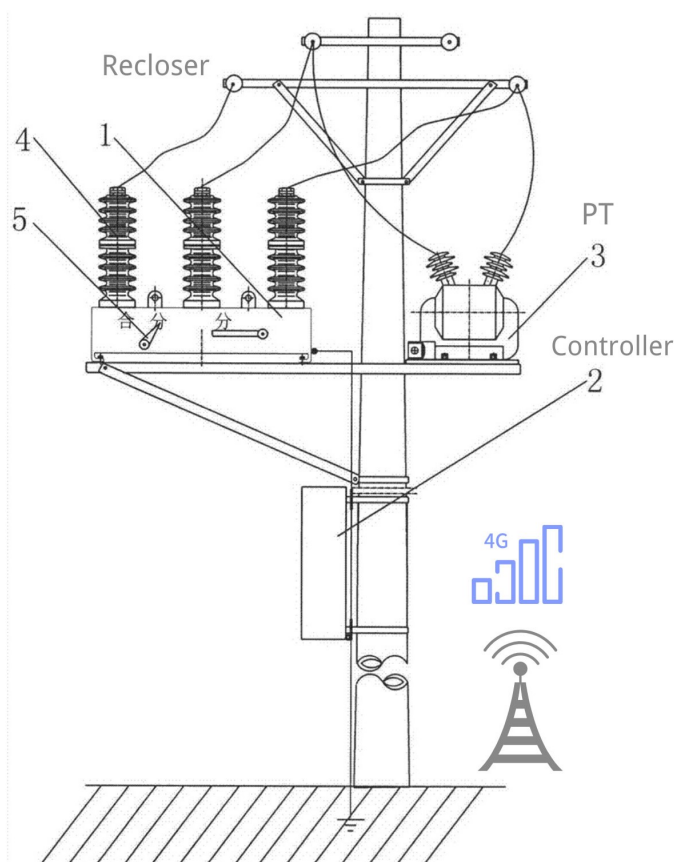


Figura 23 – Topologia de um religador [55]

A figura 23 foi desenhada pela empresa Chinesa de soluções em *Smart Grids*, a *Four-Faith* e demonstra bem como é feita a instalação dos religadores completos em postes de

energia [55].

Os principais pontos de destaque são:

- 1. Tanque do religador: Equipamento altamente automatizado, semelhante aos disjuntores no desempenho de interrupção acrescido de várias funções de religamento com ação automática;
- 2. Controlador: Em termos de características de proteção e controle, pode completar a detecção de falhas, julgar a natureza da corrente, realizar funções de comutação, ter funções automáticas e funções de controle de proteção, sem dispositivos operacionais adicionais, além de realizar leituras e transmissão de dados.
- 3. Transformador de Potência (TP): É especialmente adequado para linha de saída de alimentação de subestação e instalação na linha.
- 4. Pólos: Fonte de alimentação operacional auto-fornecida, não afetada por falha de energia da linha.
- 5. Acionamento manual: Alto grau de automação, baixa carga de trabalho de manutenção

3.4 *Smart Grids*

A definição de redes elétricas inteligentes, segundo Petenel, as *Smart Grids* (SG), ainda é tema de discussões. No entanto, a explicação mais simples e completa é a do Departamento de Energia dos EUA, que afirma que a rede inteligente usa tecnologia digital para melhorar a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema elétrico [56].

O modelo de *smart grid* representa a evolução do sistema elétrico atual. A ideia principal é agregar inteligência à rede elétrica, por meio de tecnologias de comunicação e computação, que permita a coleta de dados em tempo real, monitoramento automático e controle da rede elétrica. O principal objetivo é garantir a máxima confiabilidade, eficiência e qualidade do sistema de energia [57].

Como vimos na seção 3.1.1 fica claro que a produção de energia é cada vez mais incentivada utilizando recursos renováveis e métodos que minimizem os impactos ambientais e proporcionem qualidade no fornecimento de energia. Tudo isso também está diretamente ligado às SGs.

Em resumo, todo o conceito de redes de energia inteligentes convertem para uma rede elétrica que utiliza técnicas avançadas de gerenciamento de automação e comunicação com outros tipos de tecnologia da informação. Incorpora ferramentas e tecnologias de nova geração, transmissão e distribuição em aparelhos de consumo e equipamentos. Este conceito integra infraestrutura de energia, processos, dispositivos, informações e mercados

em um sistema colaborativo que permite a produção e uso de energia distribuídos e consumidos de maneira eficaz [58].

A tecnologia *Smart Grids* pode suportar a integração de fontes de energia renováveis, do inglês *RES - Renewable energy sources* em futuros sistemas de energia. Dentro dessa temática, uma SG não só deve integrar de forma inteligente todas as etapas desde a geração até o consumo, mas também fazer isso de uma forma eficiente, sustentável e acima de tudo, segura.

O principal objetivo do SG é fornecer a quantidade certa de informações e um controle para clientes, distribuidores e operadores de rede para reduzir os requisitos e custos do sistema enquanto aumenta a eficiência energética.

Já existem tecnologias comprovadas que desempenham um papel fundamental no avanço dos sistemas de distribuição. Isso inclui medidores digitais avançados, automação de distribuição, sistemas de comunicação de baixo custo e recursos de energia distribuídos. Muitos projetos de demonstração já se mostraram promissores para esta e outras tecnologias, como por exemplo o uso de conectividade de banda larga para aplicações de distribuição, sistemas de circuito fechado que usam proteção mais avançada utilizando armazenamento e geração distribuída [59].

Segundo o artigo publicado por Richard Brown pela IEEE, muitas das atividades atuais de pesquisa e desenvolvimento relacionadas a *Smart Grids* compartilham uma visão comum quanto as suas funcionalidades. A tecnologia não deve ser usada apenas por usá-la, mas sim para aumentar a capacidade do sistema de distribuição e atender às necessidades em constante mudança das concessionárias e de seus clientes. Algumas dessas funcionalidades, por ele citadas, incluem [59]:

- *Self-Healing*;
- Alta confiabilidade e qualidade de energia;
- Resistência a ataques cibernéticos;
- Permitir uma ampla variedade de opções de geração e distribuição;
- Otimizar a utilização de ativos;
- Reduzir o custo de operação e manutenção.

As integração avançada de telecomunicações, novos métodos de sensoriamento, controle e otimização são parte fundamental para ajudar a alcançar as funcionalidades descritas acima. A Figura 24 mostra um *overview* das principais funcionalidades necessárias para uma SG.

Diversas outras aplicabilidades vem sendo implementadas dentro do sistema de redes inteligentes. Uma delas que é possível citar, é a de detecção e localização automática de

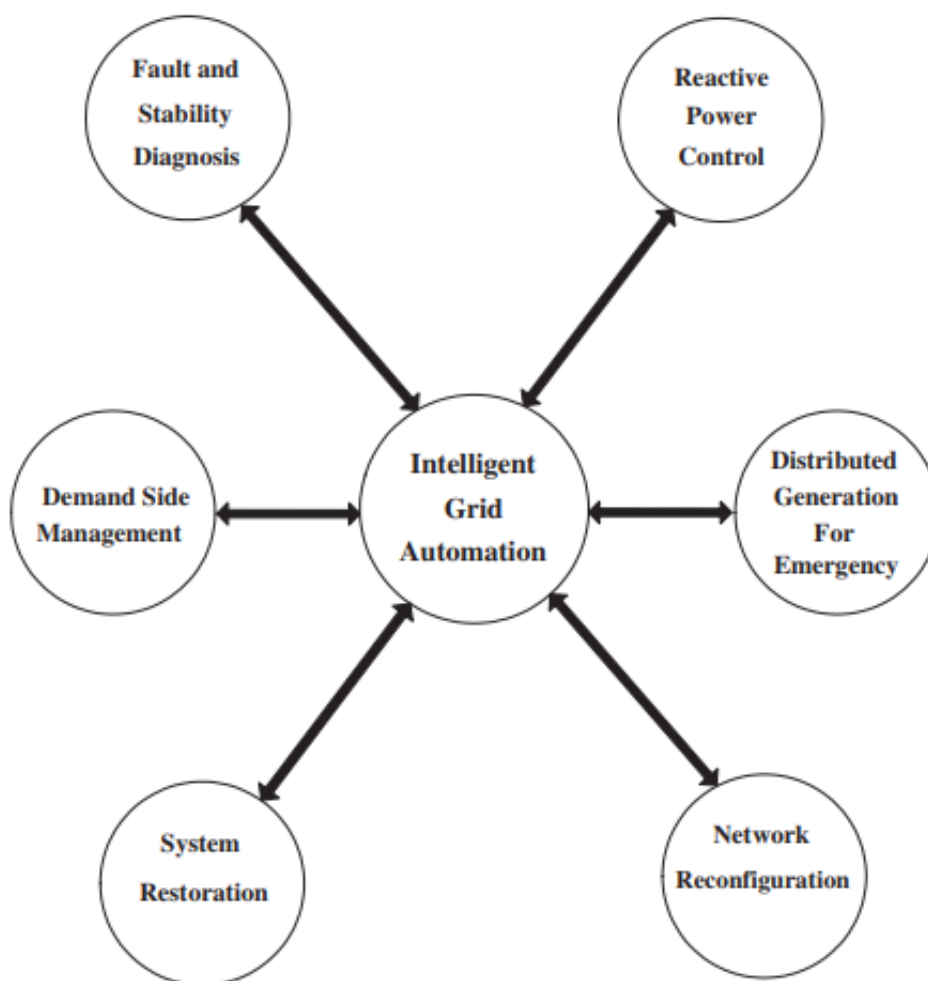


Figura 24 – Funções de Automação Inteligente de uma *Smart Grid* [58]

faltas e FAI (Faltas Alta Impedância), a qual permite a redistribuição do fluxo de potência nos SEP a partir da realização de diagnósticos em tempo real do distúrbio ocorrido [27].

O surgimento de algoritmos de detecção de FAI ocorreu em linha com o desenvolvimento da tecnologia do Sistema de Distribuição de energia elétrica. Nos últimos anos, a busca por formas de gerar eletricidade a partir de uma abordagem sustentável intensificou ainda mais a busca por fontes alternativas de energia. As potências provenientes dessas unidades geradoras variam bastante, pois dependem das condições climáticas do local onde se encontram instaladas e, portanto, tem crescido a necessidade de técnicas de proteção e controle mais sofisticadas capazes de realizar diagnósticos rápidos de eventos no sistema monitorado [60].

Diversos foram os ganhos obtidos pelas empresas do setor elétrico com a implantação da SG. Redução de perdas técnicas em função da geração distribuída, redução de perdas não técnicas, redução da inadimplência; redução custos operacionais (cortes, religação, medição, entrega de faturas e operações da rede) [61].

3.4.1 Aplicabilidade de Religadores

As discussões sobre o futuro e as perspectivas do sistema elétrico sempre existiram. Em 2008, em artigo publicado por Brown, ele já introduzia a ideia de que para um sistema de transmissão e distribuição de energia inteligentes funcionassem, essa rede inteligente deveria ser capaz de fornecer novas habilidades, como autocorreção, alta confiabilidade, gerenciamento de energia e preços em tempo real e dentro de uma perspectiva de *design*, uma *Smart Grid* teria que incorporar novas tecnologias, como medição avançada, automação, comunicação, geração distribuída e armazenamento de distribuído [59].

Atrelado à esse conceito e considerando que dentre os distúrbios que ocorrem nos sistemas elétricos de potência, os mais preocupantes são, sem dúvida, as faltas, visto que podem ocasionar desligamentos não-programados dos componentes do SEP por tempo indeterminado. Em geral, as faltas são causadas por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, devido às condições climáticas adversas às quais o SEP pode ser submetido [60].

Quando utilizamos o conceito de automação de redes de distribuição devemos olhar para as necessidades que essas redes possuem. Nos últimos anos, com o aumento populacional e a expansão de cidades e grandes centros houve uma demanda crescente por aumento da capacidade da linha, mais segurança e eficiência, além é claro da continuidade do fornecimento mantendo a qualidade esperada. Neste cenário a automação busca maximizar todos esses requisitos minimizando os custos operacionais e de manutenção. Para isso é necessário que as empresas concessionárias invistam em infraestrutura e em tecnologia nas redes de distribuição.

Uma das funções de automação inteligente das SG é o *Self-healing* (em português, recomposição automática). Essa funcionalidade é uma das principais dentro das redes de distribuição, pois permite uma redução significativa de DEC e FEC, executa manobras eficientes na linha, traz maior rentabilidade e segurança aos operadores da rede. Segundo apresentação da empresa *Schneider Electric* no evento SENDI de 2016, as premissas básicas do do *self-healing* são:

- A proteção tem prioridade;
- Intervenção do operador tem prioridade;
- Ações automáticas devem ser conhecidas;
- Deve ser possível habilitar ou desabilitar o sistema parcial ou completamente.

Outra aplicabilidade de religadores dentro das SGs é o *Loop Automation*. Conforme entrevista ao site *Planin*, o vice-presidente da unidade de negócios e *infrastructure* da *Schneider Electric* Brasil, Luis Felipe Kessler disse: "Essa solução permite que os religadores

realizem manobras automáticas nos sistemas de distribuição sem a necessidade de comunicação entre eles, possibilitando melhorias significativas em indicadores de continuidade de fornecimento de energia elétrica e, conseqüentemente, na satisfação do consumidor final” [62].

Os números dos últimos anos e as previsões feitas pela ANEEL e demais órgãos do SEP, apresentados em 3.1.1 mostram que cada vez mais a demanda por energia elétrica proveniente de fontes renováveis estará presente no sistema. Grande parte dessa geração se dará pela utilização de sistemas de geração distribuída: solar, eólica, pequenas e micro hidroelétricas. Já é possível observar a crescente utilização desses sistemas de geração distribuída conectados à rede centralizada de média tensão, bem como a chegada de microrredes com capacidade de funcionar de forma independente na rede de distribuição principal.

Para uma operação eficiente e segura desses sistemas de geração distribuída conectados à rede de média tensão da distribuição, faz-se necessária a implementação de um Sistema de Proteção de Interconexão (SPI), que possua os elementos de proteção e automatismos necessários para isolar e reconectar esse sistema de geração à rede principal de acordo com os possíveis defeitos e características operativas da rede [63].

A figura 25 mostra o exemplo de um religador atuante no ponto de interconexão da rede distribuída.

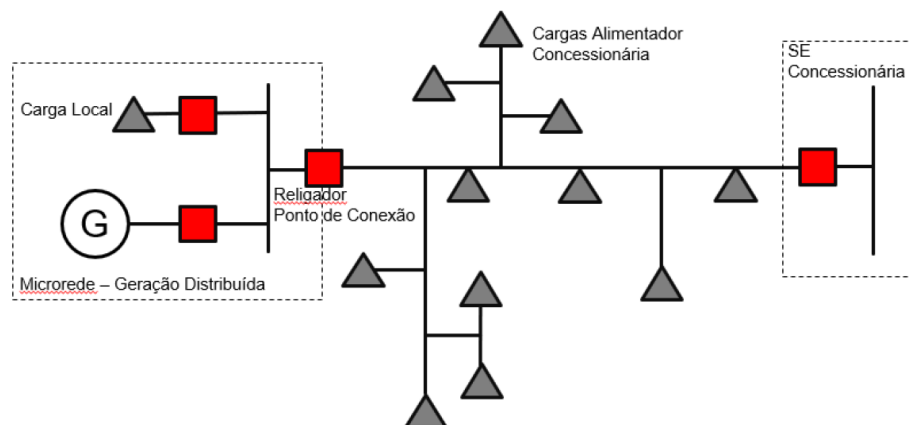


Figura 25 – Sistema de Geração Distribuída / Microrrede [63]

Segundo *Ulirch* em sua apresentação sobre a aplicabilidade de religadores em microrredes pontua como as principais características do SPI [63]:

- "Possuir proteção direcional de sobrecorrente com capacidade de configuração de *pickups* e curvas independentes para cada sentido de operação";
- "Ser capaz de desconectar rapidamente o sistema de geração distribuída da rede de distribuição para evitar ilhamento de cargas indevidas";

- "Ser capaz de reconectar automaticamente o sistema de geração distribuída à rede de distribuição quando esta for recomposta com teste de sincronismo".

Um religador conectado à um controlador é capaz de garantir todas essas características.

4 Síntese e Tendências

Segundo o relatório elaborado pela DNV (*Det Norse Veritas group*), o “*Energy Transition Outlook 2018*”, a maior parte da demanda de energia adicional necessária para atender o aumento populacional e por consequência o consumo de energia, após 2025 será coberto pela eletricidade, e que em 2050 será responsável pelo dobro de sua participação atual. A energia de Hidroelétricas, biomassa, solar e eólica serão responsáveis por produzir 94% das necessidades de energia da região da América Latina, e que essa produção irá atender 55% da demanda total de energia [64].

Em 2019 no Brasil, as renováveis já representavam 78,1% da produção, até 2050, se quiséssemos estar em linha com o crescimento total da América Latina teríamos um crescimento de aproximadamente 20% desse total. O crescimento é ambicioso mas se for analisado o quando a energia solar e eólica cresceu nos últimos anos é possível confirmar que os dados são factíveis. No Brasil, dados da ANEEL e demais associações dizem que a produção de energia por usinas solares vem crescendo cerca de 230% ao ano. Em 2021 representava 2,62% de toda a matriz energética e até 2025, segundo ONS, representará 5,52%. A energia proveniente de usinas eólicas também estão em constante crescimento, ainda segundo ONS, em 2021 representavam 11,9% do total geral e 2025 representariam 14,7%.

A pesar da maior porcentagem estar centrada na geração através das hidrelétricas, sempre que temos escassez hídrica as termoelétricas são acionadas para suprir o *gap* causado pela redução na geração. Com o advento das solares e eólica e com o aumento de micro-usinas hidrelétricas (que causam menos impacto ambiental e tem um custo menor de instalação a pesar de ter uma capacidade produtiva menor), até que o sistema passe por toda a transformação energética as usinas termoelétricas ainda serão acionadas para suprir a demanda.

Em entrevista para o site EA, Virginia Parente, professora do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP), disse "Quando a humanidade passou a gerar energia elétrica, fazia isso perto dos consumidores. Depois ficou claro que gerar energia no atacado era mais barato. Então a energia passou a ser gerada em unidades de grande porte: grandes hidrelétricas, termelétricas, parques ou fazendas solares etc. Com a GD, estamos vendo, de certa forma, uma volta às origens. Escolas, hospitais, restaurantes, hotéis, residências etc. estão gerando sua própria energia"[65].

Todo esse aumento da geração de energia renovável está diretamente ligada ao crescimento populacional e a alta na demanda, associado é claro aos objetivos impostos pela ONU na diminuição do uso de fontes finitas e diminuição da pegada de carbono mundial. O aumento, principalmente da geração solar se dará não somente por construção de novos

parques solares, mas sim pelas microrredes de geração distribuída ao longo da rede. Essas pequenas produções partirão da própria população, que utilizará as placas solares em casas, pequenos negócios, armazéns e indústrias. Dentro desse âmbito, as redes distribuídas estarão em acensão e com isso o conceito de microrredes começa a ganhar força dentro do sistema elétrico Brasileiro.

As microrredes são redes locais de geração e consumo de energia elétrica e podem estar ligadas ou não à rede de distribuição das empresas concessionárias. O projeto *MERGE* da *UNICAMP* em parceria com a ANEEL, destoa das pesquisas e implantações, aponta que para o bom funcionamento as microrredes devem ser compostas pela integração inteligente e controlada de diversos recursos de geração distribuída e armazenadores de energia e cargas. Sua principal importância está ligada à possibilidade de ter uma alternativa à rede principal para distribuição de energia elétrica e contribuir para o crescimento da geração distribuída de energia, desde a produção de energia limpa, como solar e eólica, até a integração de baterias [66].

A figura 26 mostra de forma ilustrativa a disposição de uma rede de geração distribuída.

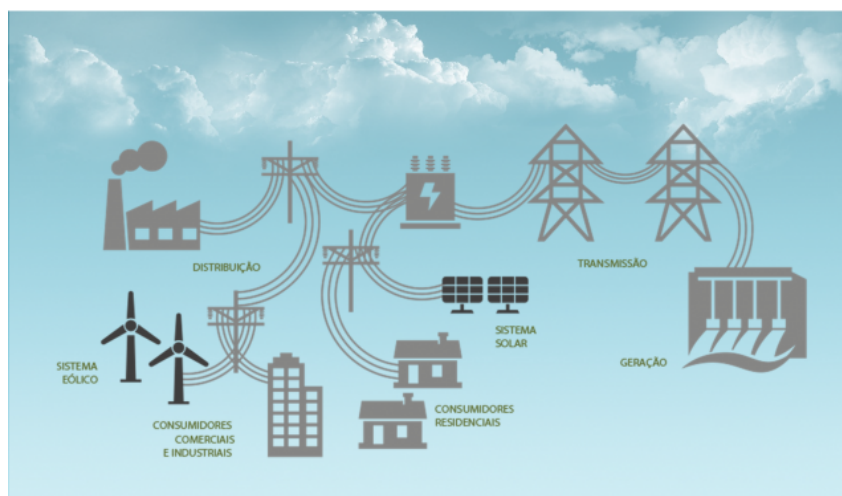


Figura 26 – As diferentes formas de geração distribuída [67]

Os renováveis eólico, solar até pouco tempo atrás apenas causavam perturbações e não estavam relacionados com a estabilidade da rede, com a expansão mencionada anteriormente, esses elementos se tornarão ativos no suporte da estabilidade destas redes elétricas. Isto, aliado à chegada e futura possibilidade de sistemas de armazenamento, que hoje não tem presença significativa do SEP, também impulsionará esse aumento da necessidade de criação de pequenas redes que funcionem conectadas ou desconectadas da rede principal de distribuição. Um dos desafios, será não somente manter como também aumentar a confiabilidade nas redes elétricas, para que tenhamos cada vez menos consumidores e por menos tempo afetados por falhas nestas redes.

Muitos serão os investimentos em recursos e equipamentos para manter a qualidade

do fornecimento e auxiliar na implementação de cada vez mais dessas redes. Um desses equipamentos, tratados em especial neste trabalho são os religadores. Conforme foi apresentado na sessão 3.4.1 uma das aplicabilidades dos religadores dentro da geração distribuída é atuar como equipamento de proteção na interconexão entre a microrrede e à rede principal da concessionária. O SPI, como tratado nas notas de aplicação da Schneider, deve ter algumas características como ter proteção de sobrecorrente direcional com possibilidade de ajustar *pickups* e curvas independentes para cada modo de operação; Ter também a possibilidade de desconectar rapidamente um sistema de geração distribuída da rede de distribuição para evitar cortes de carga desnecessários. Além disso também é importante que o *recloser* seja capaz de reconectar automaticamente o sistema distribuído à rede de distribuição esta for recomposta com cheque de sincronismo [54].

A execução de todas essas características está diretamente ligada com as premissas das redes inteligentes. Não só aplicada a geração distribuída mas também a todo o sistema, dentre as principais características das redes inteligentes, se destaca a detecção e localização automática de faltas e FAI, a qual permite a redistribuição do fluxo de potência nos SEP a partir da realização de diagnósticos em tempo real do distúrbio ocorrido [60].

Mesmo com todas as mudanças na matriz energética, nos sistemas de distribuição ou nos avanços de tecnologias para o sistema elétrico, ao final disso o resultado deverá sempre ter como um importante objetivo a qualidade da energia que chega até a população. Na sessão 3.2 os dados apresentados mostraram que nos últimos anos o tempo que os consumidores ficaram sem energia diminuiu 37%, bem como o número médio de interrupções que teve uma queda significativa entre 2015 e 2021.

Apesar dos indicadores de DEC e FEC estarem apresentando tendências de melhora, quando é analisado o número de ocorrências do sistema, bem como os tempos médios para atendimento dessas ocorrências não é visível uma melhora em comparação com os últimos anos (2018-2021). De certa forma os indicadores estão indiretamente ligados aos números de ocorrência e em um primeiro momento os dados parecem não estarem coerente com a evolução apresentada.

O DEC só é contabilizado em ocorrências de falta de energia, e o FEC é a frequência com que essa falta de energia acontece. O investimento em melhorias, tecnologia e instalação em massa de religadores ao longo das redes fez com o tempo médio e a frequência dessas interrupções diminuíssem, visto que o equipamento age na resolução de faltas temporárias (sabendo que 80% das faltas são transitórias).

A linhas de transmissão precisam acompanhar a ampliação da rede e a expansão de cidades e grandes centros. A extensão da rede básica de transmissão, entre média e alta tensão, hoje possui 169.914km e até 2026 tende a chegar em 201.942 km. Esse aumento também impacta diretamente das linhas de distribuição. Se toda essa expansão for levada em consideração é possível supor que, o aumento no tempo de atendimento está ligado ao fato de que o sistema está crescendo muito mais rápido do que capacidade

que as empresas conseguem acompanhar. O impacto do tempo que as empresas tem de planejamento deslocamento e execução aumentou pois a frequência de colocar alguém em campo diminuiu, e quando há necessidade de enviar o técnico as empresas acabam não estando 100% mais preparadas.

Desta forma é possível concluir que a modernização da linha já trouxe muitos benefícios, por mais que a falta no sistema seja permanente, hoje com as comunicações presentes nos religadores a central sabe exatamente em que ponto da linha ocorreu, facilitando a comunicação e o deslocamento da equipe para o local correto. Ainda há muitos investimentos a serem feitos. É de interesse das concessionárias de energia seccionar os circuitos o máximo possível, pois com isso é possível solucionar o problema de coordenação com mais eficiência, o que justifica mais uma vez o uso de religadores na linha.

Segundo o estudo de confiabilidade do fornecimento de redes aéreas de MT da *Schneider Electric*, o mercado global de distribuição de MT pode ser dividido simplesmente entre distribuição aérea e subterrânea. Em termos de comprimento total, a rede de distribuição de MT aérea global é maior do que a rede subterrânea. Em um comparativo geral o custo de investimento para implementar uma rede aérea é substancialmente menor do que para redes subterrâneas. Por outro lado os custos operacionais são maiores nas redes aéreas devido à exposição ao ambiente, maior incidência de falhas, conforme foi apresentado nesse trabalho, além de todas as obrigações de gerenciamento [53]. Ainda segundo o estudo, mesmo que operacionalmente falando os custos de redes aéreas sejam maiores, quando é colocado na balança todos os investimentos de capital, as redes aéreas são mais vantajosas.

Todo o conceito de redes e cidades inteligentes, além das perspectivas de conectividade, qualidade de fornecimento de energia, conforto para a população e sustentabilidade existe também a pressão por criar uma estética agradável. Não há como negar que entre inúmeros postes e infinitas fiações, a preferência por ambientes onde nada disso é aparente vai ser preferível para a grande maioria. É claro que implementar isso, em grande escala (analisando o território brasileiro) é extremamente complexo, não somente pelo custo de investimento, mas também por toda dificuldade em relação à topografia do país e a reestruturação das cidades para receber essa mudança, os sistemas subterrâneos geralmente possuem segmentos "lineares" ao contrário de redes aéreas que possuem muitas ramificações.

Em entrevista para o jornal GHZ, um dos engenheiros responsáveis pela distribuição subterrânea de São Paulo disse No Brasil, ficamos de 10 a 12 horas, até 16 horas, sem energia durante o ano. Na Alemanha, que tem 80% de sua rede subterrânea, esse tempo é de 23 minutos por ano. Os dados apresentados na reportagem dizem que somente 1% da distribuição de energia elétrica é feita por redes subterrâneas. Em São Paulo, desde 2005, as concessionárias, empresas estatais e operadoras de serviço do município são obrigadas a enterrar o cabeamento de rede elétrica, telefonia, TV. Dos 2109 postes que estavam

previstos até 2020 não haviam sido migrados nem a metade [68].

Isso mostra o quão complexo e demorado é realizar esse tipo de mudança, hoje no Brasil somente algumas cidades possuem bairros com fiação subterrânea. Isso deixa claro que, apesar da tendência de acompanhar os requisitos das redes inteligentes e eficientes as redes subterrâneas no país demorarão a ser realidade da população e que ainda nos dias de hoje e até um futuro de médio prazo é mais seguro e vantajoso investir em melhorias para as redes já existentes. Estes investimentos deverão ser focados em equipamentos de proteção e controle, que permitam automatizar a rede melhorando a confiabilidade no fornecimento e a qualidade dos dados adquiridos, além de infraestrutura de redes de comunicação, para que os controladores e softwares consigam se comunicar e transmitir informações mais rapidamente.

Para uma operação eficiente e segura desses sistemas de geração distribuída conectados à rede de média tensão da distribuição, faz-se necessária a implementação de um Sistema de Proteção de Interconexão (SPI), que possua os elementos de proteção e automatismos necessários para isolar e reconectar esse sistema de geração à rede principal de acordo com os possíveis defeitos e características operativas da rede [53].

Nesse contexto, os estudos de planejamento da expansão da geração são fundamentais para a antecipação de ações, permitindo que o sistema absorva e se adapte às novas tecnologias, mantendo um atendimento seguro, econômico e socio ambientalmente sustentável.

Ulrich, engenheiro de aplicação da Schneider Electric, em 2016 já previa que os principais objetivos dos estudos de planejamento e expansão da oferta de energia elétrica deveriam considerar a indicação de uma composição ótima dos parques geradores futuros que possa atender ao crescimento da demanda por energia elétrica, respeitando os aspectos socioambientais e os critérios de risco de suprimento, além de considerar o menor custo para implementação; Avaliar as condições de atendimento futuro, avaliando e indicando medidas a serem tomadas para avanços metodológicos, operacionais e regulatórios; E por fim apontar ações que permitam o restabelecimento das condições de equilíbrio estrutural [63].

Todos esses pontos perduram durante os dias atuais e possivelmente continuarão a ser objetivos para os próximos anos. Atrelado à toda implementação de novas tecnologias e arquiteturas dos dispositivos de proteção, com um investimento correto e aplicado, o Brasil conseguirá ser exemplo em aplicação de tecnologias para redes inteligentes e sustentáveis.

5 Conclusões

Este trabalho tinha como objetivo a realizar uma revisão da literatura sobre os dispositivos e aspectos de qualidade na gestão inteligente de energia elétrica.

O Sistema Elétrico Brasileiro apesar de ter um conceito muito simples e ser bem completo, acaba sendo complexo devido à sua grande extensão de transmissão e distribuição, o que acarreta em muito investimento para manutenção e gestão eficiente do fornecimento. Como foi apresentado neste trabalho, o sistema de transmissão tem uma previsão de expansão até 2026 bem ambicioso, e isso possibilita com que o sistema de distribuição também consiga se expandir.

Toda mudança gera distúrbios no sistema, e uma das premissas da ANEEL é que as empresas, geradoras, transmissoras e distribuidoras garantam a continuidade do fornecimento de energia dentro dos padrões de qualidade impostos. No âmbito das distribuidoras de energia, os principais indicadores que medem o desempenho das concessionárias é o DEC e FEC. Esses indicadores reportam o tempo que unidades consumidoras ficam sem energia elétrica, contando somente interrupções com mais de 3 minutos, e qual a frequência com que isso ocorre. Os dados coletados nesse trabalho mostram que nos últimos anos os indicadores, a nível nacional, tiveram uma melhora considerável. Isso transparece que de fato as empresas estão investindo em tecnologia e equipamentos que auxiliem no controle da rede evitando tanto os impactos ao consumidor quanto em gastos com multas, processos e claro, em gastos com o envio de pessoas à campo.

Em contrapartida quando é analisado o número total de ocorrências e o tempo no atendimento dessas ocorrências os números não estão em uma crescente de evolução. Isso pode estar atrelado a 2 fatores, o primeiro com o fato do sistema estar de fato em expansão e as concessionárias ainda não estarem conseguindo acompanhar esse crescimento, o que no momento dificulta a logística de preparação e envio de pessoas a campo. O outro fator é que na alocação de recursos e investimentos, hoje é preferível resolver o problema recorrente do sistema, investindo em uma correção pontual do que investir no sistema como um todo.

Os recursos utilizados para garantia do fornecimento vão desde recursos humanos até os equipamentos que são instalados ao longo das linhas de média e baixa tensão. Conforme foi a apresentado neste trabalho alguns dispositivos são comuns na rede, como disjuntores, relés, chaves seccionadoras, fusíveis e para-raios. Foi dado destaque à um equipamento em especial, os religadores automáticos, que por sua característica de funcionamento e grande gama de aplicabilidades é um dos principais diferenciais para a proteção e controle de redes inteligentes.

Dentro dos programas de expansão e modernização do sistema elétrico, existe um

grande objetivo de implementar cada vez mais tecnologias nas redes de distribuição para melhor controle e integração entre os dispositivos. A conectividade é uma das vertentes das *Smart Grids*. Desde 2013 vive-se era da Indústria 4.0, que vem englobando sistemas e tecnologias que avançando cada vez mais como a inteligência artificial, robótica, internet das coisas (IOT), computação em nuvem e sistemas de comunicação. As *Smart Grids*, não deixam de fazer parte dessa revolução.

O Brasil, apesar de todos os investimentos feitos, ainda está buscando a implementação dessas tecnologias. Os religadores automáticos já fazem parte da modernização da rede, pois já fornecem uma base de dados com leituras de variáveis, conseguem ser programados para executar manobras, ativar e desativar sistemas de proteção e enviar sinais de comunicação para centrais de forma automática.

Nos últimos anos, parte dos investimentos das concessionárias é direcionado para aquisição e instalação de religadores, para que as áreas de atendimento sejam projetadas utilizando uma configuração que otimize ao máximo a garantia do fornecimento. O principal *gap*, que já vem sendo aprimorado mas necessita de mais holofotes, é a comunicação entre os equipamentos. Atualmente ela já é feita utilizando alguns protocolos e dispositivos de comunicação e aquisição de dados, porém limitado à uma pequena região ou entre poucos equipamentos.

O implementação do *looping automation* com comunicação deverá começar a ser mais aplicado, bem como as configurações de *self healing*. Para a agilidade e implementação de novos *hardwares* e *softwares* de comunicação e sistemas, a rede 5G poderá ser vantajosa e tema de trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas

- 1 RESEARCH, I. for E. *History of Electricity*. 2013–2014. <<https://www.instituteforenergyresearch.org/history-electricity/>>. 13
- 2 SANTOS, G. A. G. d. et al. Por que as tarifas foram para os céus?: propostas para o setor elétrico brasileiro. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 13
- 3 USP, D. E. *O Sistema Elétrico*. 2013–2019. <<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>>. 13
- 4 MATTEDE, H. *Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência (SEP)*. 2022. <<https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>>. 14, 28
- 5 USP, D. E. *O Sistema Elétrico*. 2019. <<https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/#:~:text=O%20sistema%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20de,consumidores%20finais%20da%20energia%20el%C3%A9trica.>> 13, 27
- 6 SILVA, R. D. de Souza e. Contextualização do setor elétrico brasileiro e o planejamento da infraestrutura no longo prazo. *Repositório IPEA*, IPEA, n. 69, p. 6–20, 2020. 14, 24, 25
- 7 BRASIL, I. A. Qualidade no fornecimento de energia elétrica: Confiabilidade, conformidade e prestação. *White Paper 14*, n. 14, p. 36, 2014. 14, 22, 33, 34, 37, 39
- 8 PÚBLICA, R. de A. *O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002*. 2009. <<https://www.scielo.br/j/rap/a/NWxd9HmK8wJBGKMPq6GcLqz/?lang=pt>>. 21, 22
- 9 ONS. *O SISTEMA EM NÚMEROS*. 2022. <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. 22, 25
- 10 FRONTLINER. *Participação do carvão na matriz energética dos EUA cresceu 15% em 2021*. 2022. <<https://www.frontliner.com.br/participacao-do-carvao-na-matriz-energetica-dos-eua-cresceu-15-em-2021/>>. 22
- 11 GARRIDO, P. O. et al. Uma alternativa de gestão para a competitividade empresarial no setor elétrico brasileiro: estratégias para a promoção do desenvolvimento humano e tecnológico e geração de trabalho e renda. Florianópolis, SC, 1999. 23
- 12 ABRADÉE. *VISÃO GERAL DO SETOR =* <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor/#:~:text=Por%20sua%20vez%2C%20os%20setores,que%20iria%20contra%20o%20conceito>>. 2019. 23, 25
- 13 BLOG, E. *Conheça as instituições do setor elétrico que regulamentam o Mercado Livre de Energia*. 2022. <<https://esferaenergia.com.br/mercado-livre-energia/instituicoes-setor-eletrico/>>. 23

- 14 JORNAL, U. *Nenhum país que usa energia hidrelétrica privatiza sua produção*. 2019. <<https://jornal.usp.br/atualidades/nenhum-pais-que-usa-energia-hidreletrica-privatiza-sua-producao/>>. 25
- 15 EPE. Ben - relatório síntese 2022. EPE, 2022. 26, 27, 41
- 16 EPE. *Matriz Energética e Elétrica*. 2018. <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. 26
- 17 EPE. *FONTES* = <<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. 2019. 27, 28
- 18 MARTINS, F. *Ranking Global de produção de energia eólica* = <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/brasil-sobe-posicao-em-ranking-global-de-producao-de-energia-eolica/>>. 2022. 27
- 19 PIXFORCE. *Transmissão de Energia Elétrica: entenda como funciona o mercado brasileiro* = <[https://www.pixforce.com.br/post/transmiss%C3%A3o-de-energia-el%C3%A9trica-entenda-como-funciona-o-mercado-brasileiro#:~:text=Esses%20dois%20grupos%20\(transmiss%C3%A3o%20e,quaisquer%20benef%C3%ADcios%20para%20a%20sociedade.>](https://www.pixforce.com.br/post/transmiss%C3%A3o-de-energia-el%C3%A9trica-entenda-como-funciona-o-mercado-brasileiro#:~:text=Esses%20dois%20grupos%20(transmiss%C3%A3o%20e,quaisquer%20benef%C3%ADcios%20para%20a%20sociedade.>)> 2021. 28
- 20 NEOENERGIA. *COMO FUNCIONA O SISTEMA DE TRANSMISSÃO NO BRASIL* = <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/como-funciona-o-sistema-de-transmissao-no-brasil.aspx>>. 2021. 28
- 21 PRAMIO, J. T. *Estudo sobre self healing: conceitos, metodologias e aplicações em redes de distribuição de energia elétrica*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. 29
- 22 UNESP, t. . A. 29
- 23 MOURA, C. J. d. S. *Estudo para implantação de um sistema de recomposição automática para a rede de distribuição do campus do picí*. *Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Orientador: Sampaio, RF, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará*, 2010. 30
- 24 ARAÚJO, T. B. R. *Estudo sobre self healing: metodologia de aplicação em redes de distribuição de energia elétrica*. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2016. 30
- 25 DALCIN, J. A. *Adequação dos níveis de tensão em um sistema elétrico de distribuição em média tensão: estudo de caso*. 30, 31, 32
- 26 REVISTA Do Serviço Público, author=PUERTAS, H., NOGUEIRA, C. A. M., booktitle=AS DIMENSÕES DA OFERTA. - *Sistemas de distribuição de energia elétrica*, volume=114, number=43, year=2017. In: . [S.l.: s.n.]. 31
- 27 XAVIER BRUNO ; XAVIER, D. *SoluÇÃO para faltas de alta impedância utilizando a norma iec 61850 em sistemas de distribuição de energia*. PUC PR, 2020. 31, 47, 52
- 28 COSSI, A. M. *Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão*. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008. 32

- 29 STAIN, C. *Conceitos da qualidade: tudo o que você precisa saber*. 2020. <<https://escritoriodeprojetos.com.br/definicao-de-qualidade>>. 32
- 30 PADILLA, J. V. Qualidade de energia elétrica. *O SETOR ELÉTRICO*, 2008. 33, 34, 36
- 31 MEHL, E. L. Qualidade da energia elétrica. *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ-UFPR*, p. 21, 2012. 34
- 32 ANEEL. *ANEEL divulga desempenho e ranking das distribuidoras sobre fornecimento de energia em 2021*. 2022. <[https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021#:~:text=A%20frequ%C3%Aancia%20\(FEC\)%20das%20interrup%C3%A7%C3%B5es,m%C3%A9dia%20por%20consumidor%20em%202021.](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021#:~:text=A%20frequ%C3%Aancia%20(FEC)%20das%20interrup%C3%A7%C3%B5es,m%C3%A9dia%20por%20consumidor%20em%202021.)> 34, 36
- 33 PAULILO, G. Conceitos gerais sobre qualidade da energia. *O SETOR ELÉTRICO.COM*, 2013. 37
- 34 HELDER, L. F. A qualidade da energia elétrica na relação fornecedor e consumidor. UFMG, 2006. 39
- 35 SIQUEIRA, C. de. *QUALIDADE DE ENERGIA: OS PREJUÍZOS QUE DISTÚRBIOS ELÉTRICOS CAUSAM ÀS EMPRESAS*. 2022. <<https://omsengenharia.com.br/noticias/disturbios-qualidade-de-energia/#:~:text=Desequil%C3%ADbrio%20de%20Tens%C3%A3o%3A%20gera%20perda,podem%20sobreaquecer%20ou%20at%C3%A9%20queimar.>> 40
- 36 PIANTINI, A.; KANASHIRO, A. G.; CARNEIRO, J. C. Surtos transferidos à rede de baixa tensão via transformador: influência da carga conectada ao secundário. *SENDI 2002. Trabalhos Técnicos*, 2002. 40
- 37 CASTRO, N. et al. Políticas de inovação tecnológicas para segmento de distribuição de energia elétrica. GESEL - UFRJ, 2019. 41
- 38 ECONOMATICA. *Evolução da capacidade de investimentos das empresas de capital aberto brasileiras em 2021* = <<https://insight.economatica.com/evolucao-da-capacidade-de-investimentos-das-empresas-de-capital-aberto-brasileiras-em-2021/>>. 2021. 42
- 39 NASCIMENTO, J. A. O. d. Alocação de religadores normalmente abertos em redes de distribuição de energia elétrica. 2017. 42, 49
- 40 COMERCIALIZAÇÃO, D. de Distribuição e. Proteção de sobrecorrentes do sistema de distribuição de média tensão da cemig. *Normas de Distribuição - CEMIG*, 2017. 42
- 41 FILHO, M. A. B. C. et al. O pilar controle inicial da gestão produtiva total (tpm) aplicado a equipamentos e proteção de subestações. Universidade Federal do Maranhão, 2016. 43
- 42 DESCONHECIDO. *Equipamentos de Proteção e Manobra* = <<https://www.drb-m.org/protecaosep/18equipamentosdeProtecaoemanobra.pdf>>. desconhecido. 43, 46
- 43 FERRET, R. et al. Hierarquização de alimentadores para fins de manutenção utilizando análise multicriterial. Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 43

- 44 SILVA, L. G. W. d.; PEREIRA, R. A.; MANTOVANI, J. R. S. Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 21, p. 294–307, 2010. 43, 44
- 45 MELLO, G. D. d. et al. Metodologia de priorização de investimentos em modernização de equipamentos de proteção e manobra de subestações de distribuição. Universidade Federal de Santa Maria, 2017. 44
- 46 BLOG, E. *Equipamentos de Proteção e Manobra*. 2022. <<https://www.sabereletrica.com.br/equipamentos-de-protecao-e-manobra/>>. 44
- 47 BONFIM, M. *Disjuntor* = <https://pt.linkedin.com/pulse/como-funcionam-os-disjuntores-marcelo-bonfim>, year = 2016. 45
- 48 CIDE, P. *Para-raio* = <http://profcide.blogspot.com/2011/10/como-funcionam-os-para-raios-utilizados.html>, year = 2021. 46
- 49 GRISALES, L. F. et al. Optimal planning and operation of distribution systems considering distributed energy resources and automatic reclosers. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 126–134, 2018. 46
- 50 ELECTRIC, t. . C. S. 47
- 51 CENTENARO, L. K.; FERNANDES, T. S. P. Alocação ótima de religadores automáticos simplificados em alimentadores de média tensão utilizando algoritmos genéticos. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. 47
- 52 EATON, t. . R. 47, 48
- 53 ELECTRIC, S. Mv overhead circuits supply reliability. Schneider Electric, 2016. 48, 59, 60
- 54 ELECTRIC, t. . R. S. 48, 58
- 55 FOUR-FAITH, t. . A. 49, 50
- 56 PETENEL, F. H. J. *Análise de problemas ligados às comunicações em redes elétricas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. 50
- 57 GUIMARÃES PEDRO HENRIQUE; MURILLO, A. D. Comunicação em redes elétricas inteligentes: Eficiência, confiabilidade, segurança e escalabilidade. GTA/PEE-COPPE/DEL-Poli - Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2013. 50
- 58 CECATI, C. et al. An overview on the smart grid concept. In: IEEE. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2010. p. 3322–3327. 51, 52
- 59 BROWN, R. E. Impact of smart grid on distribution system design. In: IEEE. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.], 2008. p. 1–4. 51, 53

- 60 SANTOS, W. et al. Detecção de faltas de alta impedância: Revisão da literatura e tendências futuras em smart grid. 52, 53, 58
- 61 SCHETTINO, S. et al. Cenários do uso das redes elétricas inteligentes (smart grid): tendências de sua difusão no brasil. Universidade Federal da Paraíba, 2013. 52
- 62 PLAIN, t. . I. 54
- 63 ULRICH, L. AplicaÇÃo de religadores com controle advc3 para proteÇÃo de interconexÃo de geraÇÃo distribuÍda À rede de distribuÍÇÃo. Scneider Electric, 2016. 54, 60
- 64 SAFER SMARTER, G. 2018 energy transition outlook 2018a. *DNV GL*, DNV GL, v. 1, p. 222–330, 2018. 56
- 65 AUTOMAÇÃo, t. . D. E. 56
- 66 LÓPEZ, J. C. et al. Objetivos e desafios do projeto de p&d merge: Microgrids for efficient, reliable and greener energy. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020. 57
- 67 BRITO, t. . D. Osório de. 57
- 68 LOPES, R. *Os exemplos de rede elétrica subterrânea que vêm do Brasil e do Exterior*. 2020. <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2020/02/os-exemplos-de-rede-eletrica-subterranea-que-vem-do-brasil-e-do-exterior-ck6bgk5k70h2s01qd9wqov.html>>. 60