

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA – IFBA  
CAMPUS VITÓRIA DA CONQUISTA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LAILAH SILVA ANJOS

**ESTUDO SOBRE *SELF-HEALING* EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
MÉDIA TENSÃO**

Vitória da Conquista – BA  
12 de dezembro de 2023

LAILAH SILVA ANJOS

**ESTUDO SOBRE *SELF-HEALING* EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
MÉDIA TENSÃO**

Projeto Final de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia *campus* Vitória da Conquista, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Esp. Pablo Martins de Oliveira

Vitória da Conquista – BA  
12 de dezembro de 2023

A599e Anjos, Lailah Silva  
Estudo sobre Self-Healing em redes de distribuição de média tensão: / Lailah Silva Anjos; orientador Pablo Martins de Oliveira -- Vitória da Conquista : IFBA, 2023.  
47 p.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.  
1. Redes de Distribuição de Energia. 2. Self-Healing. 3. Indicadores de continuidade. I. Martins de Oliveira, Pablo, orient. II. TÍTULO.  
CDD/CDU

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grata a Deus pela minha vida, por ter me sustentado e me dado forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, Marli e Humberto, sou grata por todo esforço e dedicação investidos a mim e na minha educação, mesmo com todas as dificuldades enfrentadas. Ao meu namorado, companheiro e amigo Caio, por todo amor, apoio, conselho e compreensão ao longo desses anos.

Agradeço também todos os amigos que fiz ao longo do curso no IFBA. Sem eles essa caminhada não seria possível. Ao DAEE, sou grata pelos anos de empenho em prol do curso e dos estudantes.

Aos professores do Instituto, sou grata a todo conhecimento transmitido que foram essenciais na minha formação. Em especial ao meu orientador Prof. Pablo Martins, pelo apoio, paciência e compreensão.

**RESUMO**

O fornecimento de energia elétrica de qualidade é uma questão de extrema importância atualmente. Diante disso, a ANEEL cobra que as distribuidoras de energia entreguem aos consumidores um serviço confiável e com disponibilidade total. Dessa forma, com intuito de reforçar a confiabilidade do seu serviço, as concessionárias buscam investir na automação de suas redes de distribuição. Baseado nessa questão, o presente trabalho tem como principal objetivo fazer um levantamento bibliográfico sobre o tema *Self-Healing*, que sugere a auto recuperação do sistema. A metodologia aplicada é baseada na pesquisa descritiva exploratória, desenvolvida a partir de materiais já estabelecidos acerca do tema. A partir dessa base, foi possível trazer um exemplo de aplicação do *self-healing* em um trecho de uma rede de distribuição, onde foi demonstrado a eficácia desse tipo de sistema. Após esse estudo, comprovou-se que o uso dessa lógica de recomposição automática das redes, proporciona as concessionárias de energia a redução do tempo de restabelecimento do fornecimento de energia, a diminuição de custos com manutenção e quantidade de deslocamento de equipe, além de melhorar seus indicadores de continuidade.

**Palavras-chave:** Redes de Distribuição de Energia, *Self-Healing*, Indicadores de continuidade

**ABSTRACT**

*The supply of quality electrical energy is an issue of extreme importance today. Therefore, ANEEL (Brazilian Electricity Regulatory Agency) demands that energy distributors provide consumers with a reliable service with full availability. Consequently, to reinforce the reliability of their service, concessionaires seek to invest in the automation of their distribution networks. Based on this question, the main objective of this work is to carry out a bibliographical survey on the topic of Self-Healing, which suggests the system's self-recovery. The methodology applied is based on exploratory descriptive research, developed from already established materials on the topic. From this base, it was possible to provide an example of the application of self-healing in a section of a distribution network, where the effectiveness of this type of system was demonstrated. The use of this automatic network recomposition logic allows energy concessionaires to reduce the time it takes to restore energy supply, reduce maintenance and team travel costs, in addition to improving their continuity indicators.*

**Key words:** *Energy Distribution Networks, Self-Healing, Continuity Indicators*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
BT – Baixa Tensão  
CA – Corrente Alternada  
COD – Centro de Comando a Distância  
COI – Centro de Operações Integradas  
DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora  
DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão  
FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora  
FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão  
IOT – Internet das Coisas  
kV – Quilo volts  
MT – Média Tensão  
ms – Milissegundo  
NA – Chave Normalmente Aberta  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional  
QUEE – Qualidade de Energia Elétrica  
RA – Religador Automático  
REI – Redes Elétricas Inteligentes  
SE - Subestação  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SH – *Self-Healing*  
SH AIR – Auto Recuperação de Redes Inteligentes Automáticas  
SHD – *Self-Healing* Distribuído  
V – Volts

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b> - Oferta interna de energia elétrica por fonte .....	15
<b>Figura 2.2</b> - Rede de distribuição aérea convencional .....	17
<b>Figura 2.3</b> - Rede Aérea Compacta .....	18
<b>Figura 2.4</b> - Galeria subterrânea .....	19
<b>Figura 2.5</b> - Configuração Radial Simples .....	20
<b>Figura 2.6</b> - Sistema Radial com Recurso .....	21
<b>Figura 2.7</b> - Sistema em Anel Aberto .....	22
<b>Figura 2.8</b> - Sistema em Anel fechado .....	23
<b>Figura 2.9</b> - Chave fusível .....	24
<b>Figura 2.10</b> - Religador automático na rede .....	25
<b>Figura 2.11</b> - DEC anual entre 2008 e 2022 .....	29
<b>Figura 2.12</b> - FEC anual entre 2008 e 2022 .....	29
<b>Figura 2.13</b> - Rede multiplexada .....	32
<b>Figura 2.14</b> - Tópicos motivadores para a implantação de REIs .....	33
<b>Figura 2.15</b> - Esquema de funcionamento do Self-Healing .....	34
<b>Figura 4.1</b> - Diagrama unifilar do trecho sem SH .....	37
<b>Figura 4.2</b> - Diagrama da rede após a falta .....	38
<b>Figura 4.3</b> - Rede com implementação de equipamentos e lógica SH .....	39
<b>Figura 4.4</b> - Atuação do SH para reconfigurar a rede .....	40



<b>Tabela 2.1</b> - Componentes de uma rede automatizada .....	30
<b>Tabela 4.1</b> - Índices de Continuidade Coelba (2017 a 2022).....	41

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVO GERAL .....	13
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO .....	14
<b>2.1.1 Sistema de geração</b> .....	14
<b>2.1.2 Sistema de transmissão</b> .....	15
<b>2.1.3 Sistema de Distribuição</b> .....	15
2.2 TIPOS DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO .....	16
<b>2.2.1 Rede de Distribuição Aérea Convencional</b> .....	17
<b>2.2.2 Rede de Distribuição Aérea Compacta</b> .....	17
<b>2.2.3 Rede de Distribuição Subterrânea</b> .....	18
2.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AÉREO .....	19
<b>2.3.1 Sistema Radial Simples</b> .....	20
<b>2.3.2 Sistema Radial com Recurso</b> .....	21
<b>2.3.3 Sistema em Anel</b> .....	22
2.4 EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO .....	23
<b>2.4.1 Disjuntor</b> .....	23
<b>2.4.2 Relé de sobrecorrente</b> .....	23
<b>2.4.3 Chave fusível</b> .....	24
<b>2.4.4 Religadores Automáticos</b> .....	25
2.5 REGULAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO .....	26
2.6 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....	26
<b>2.6.1 Indicadores de Qualidade</b> .....	27
2.7 AUTOMAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS .....	30
2.8 SMART GRID .....	31
2.9 SELF-HEALING .....	33
<b>2.9.1 Modelos de Implementação do <i>Self-Healing</i></b> .....	34
2.9.1.1 <i>Modelo centralizado</i> .....	34
2.9.1.2 <i>Modelo semi-centralizado</i> .....	35
2.9.1.3 <i>Modelo distribuído</i> .....	35
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA</b> .....	36

3.1 TIPO DE PESQUISA.....	36
3.2 ABORDAGEM DA PESQUISA.....	36
<b>CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO <i>SELF-HEALING</i> NOS CENTROS URBANOS ....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o fornecimento de energia elétrica tornou-se de extrema necessidade na sociedade, pois sem ela não há possibilidade do homem exercer inúmeras atividades, seja em residências, hospitais ou indústrias. Diante disso, o sistema elétrico visa entregar aos consumidores, energia elétrica de qualidade, buscando minimizar ocorrências de falhas, defeitos e faltas.

Devido às características das redes de distribuição aéreas existentes no país, os cabos de condutores nus estão expostos e vulneráveis a ocorrências de faltas, sejam elas de natureza permanente ou transitórias.

Atualmente, uma das soluções encontradas pelos profissionais das concessionárias de energia, a fim de diminuir o tempo da ocorrência das faltas, visando manter a segurança, disponibilidade e qualidade do fornecimento e com objetivo de atingir níveis satisfatórios dos indicadores de continuidade, é o uso de sistemas de recomposição automática de energia, *Self-Healing*. (MOURA, 2011).

O conceito de *Self-Healing* está inserido na *Smart Grid*, cuja ideia é tornar a rede de distribuição inteligente com base na sua automatização. E ele funciona com o objetivo de isolar o defeito da rede, de forma eficiente, a fim de reduzir o número de clientes afetados, o tempo de interrupção e, também, os custos acarretados pela falta. (MOREIRA, 2011).

#### 1.1 JUSTIFICATIVA

É possível observar pelas redes de distribuição de grandes centros urbanos, o aumento da instalação de religadores automáticos ao longo dos circuitos. Diante disso, o conhecimento acerca desse tema é de extrema importância para os profissionais da área de engenharia elétrica, pois as concessionárias de energia, cada

vez mais, vêm adotando a instalação desses sistemas de *Self-Healing* em suas redes. Portanto, este trabalho tem como justificativa a importância de um estudo a partir da literatura disponível, já existente, sobre o *Self-Healing* na rede de distribuição de energia, bem como sua atuação, garantias, entre outros aspectos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento bibliográfico sobre *Self-Healing*.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Introduzir e contextualizar os conceitos do *Self-Healing*;
- Destacar os benefícios de sua instalação nas redes de distribuição de média tensão;
- Estudar a expansão do uso do *Self-Healing*.

## **CAPÍTULO 2**

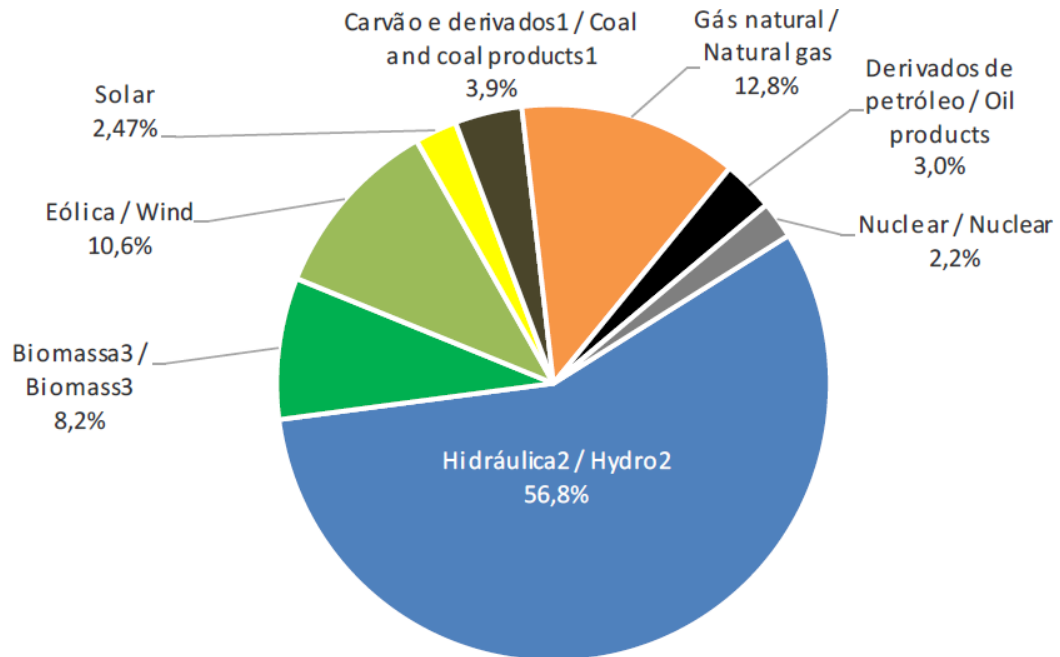
### **REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

##### **2.1.1 Sistema de geração**

O Brasil é composto por um sistema elétrico de grande porte, constituído por usinas geradoras, linhas de alta tensão de transmissão de energia e sistema de distribuição. A matriz elétrica brasileira é predominantemente hidráulica, ou seja, a maior parte da energia elétrica do país é gerada em usinas hidrelétricas (EPE, 2023) porém cada vez mais há o aumento de outras fontes de geração de energia, como solar e eólica.

A Figura 2.1 apresenta o gráfico de oferta interna de energia elétrica por fonte de 2021. A fonte hídrica atingiu quase 57% e somando-se com as outras fontes como biomassa, eólica e solar, 78,1% da oferta de energia foi de origem renovável.

**Figura 2.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte**

Fonte: EPE, 2022

### 2.1.2 Sistema de transmissão

Devido a maior fonte de geração de energia elétrica do Brasil ser a hidrúlica, as usinas são localizadas em regiões mais afastadas dos centros de consumo e a energia elétrica gerada tem sua tensão elevada através de transformadores e é transportada através do sistema de transmissão. Esses sistemas são formados por torres, isoladores e subestações. As subestações de transmissão são responsáveis por “controlar o fluxo de potência no sistema, condicionar os níveis de tensão e realizar a entrega de energia elétrica para consumidores industriais”. (VASCONCELOS, 2017)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) proporciona a transferência de energia através de subsistemas (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte), realizando também a integração das distintas fontes de geração de energia, garantindo o suprimento dos consumidores (ONS, 2022). É importante destacar que apesar do SIN ser interligado, utiliza-se a energia gerada mais próxima ao local de consumo.

### 2.1.3 Sistema de Distribuição

Ao chegar nos centros consumidores, a tensão então é rebaixada. (ZANETTA JR., 2005). O sistema de distribuição brasileiro é parte do sistema elétrico de potência

e engloba a parte de subestação abaixadora até os consumidores finais. O sistema é dividido em Rede de Distribuição Primária (Média Tensão), que corresponde às redes de 13,8 kV, compreendendo as subestações de distribuição, e Rede de Distribuição Secundária (Baixa Tensão), correspondendo às redes de tensão de 220/127 V, 380/220 V, entre outras. Além disso, engloba os transformadores de distribuição, alimentadores secundários e ramais de ligação (conjunto de condutores e acessórios instalados entre o ponto de derivação da rede da Distribuidora e o ponto de entrega). (VASCONCELOS, 2017)

O sistema de distribuição é responsável por atender os consumidores finais e é a atividade mais regularizada e fiscalizada do setor elétrico. Existem uma série de normas, regras e procedimentos a serem seguidos para garantir a disponibilidade e confiabilidade do serviço.

Fatores como a intensidade de carga, tipo de consumidor, nível de tensão e o número de fases são importantes a serem dimensionados em um projeto, pois a escolha do tipo de sistema de distribuição a ser implantado em um local vai definir a qualidade da energia a qual um cliente será atendido (VASCONCELOS, 2017)

## 2.2 TIPOS DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição são classificadas como aéreas e subterrâneas. As redes aéreas são as mais utilizadas no Brasil e possuem vantagens de facilidade de instalação, manutenção e questões relacionadas ao custo, porém apresentam desvantagens por estarem expostas e vulneráveis a agentes externos como vegetação e descargas atmosféricas, abalroamentos e poluição salina e/ou industrial que podem acarretar interrupções do fornecimento de energia e diminuição da vida útil dos equipamentos. (RIGONI, 2016)

Por esse motivo, surgiram os condutores primários protegidos e hoje é norma de instalação em redes urbanas, condutores revestidos com XLPE para uma melhor garantia de continuidade no fornecimento e segurança.

As redes subterrâneas têm a vantagem de maior confiabilidade, entretanto, fatores como custo elevado e dificuldade de implantação as tornam menos vantajosas.

Diante das opções de redes existentes, tendo em vista as vantagens e desvantagens de cada uma, é de extrema importância a escolha do tipo de rede mais ideal para uma determinada região. (RIGONI, 2016)



### 2.2.1 Rede de Distribuição Aérea Convencional

A Rede de Distribuição aérea convencional, ilustrada na Figura 2.2 é o tipo mais comum no Brasil, pois foi por muitos anos o tipo mais utilizado pelas concessionárias de energia.

**Figura 2.2** - Rede de distribuição aérea convencional.



**Fonte:** G1, 2016

Esse tipo utiliza de condutores nus de alumínio ou cobre, para áreas litorâneas. Rigoni (2016) afirma que estas redes são suscetíveis a sofrer com descargas atmosféricas e tensões induzidas, sendo necessário a utilização de para raios ao longo da rede para minimizar os efeitos dos surtos de tensão. Ainda de acordo o autor, a maior desvantagem desse tipo de rede é a vulnerabilidade dos condutores nus a desligamentos em decorrência da vegetação, como por exemplo, árvores que tocam nos cabos e por animais.

### 2.2.2 Rede de Distribuição Aérea Compacta

A Rede de Distribuição Compacta (RDC) exemplificada na Figura 2.3 é o tipo de rede aérea que vem sendo utilizada nas áreas urbanas do Brasil atualmente e tem como principal diferença o uso de cabos condutores cobertos por polímeros (responsável pelo isolamento dos cabos) separados através de espaçadores, acessório de formato losangular utilizados em distâncias regulares ao longo da rede,

que são sustentados por cabos mensageiros. (NEOENERGIA, 2021)

**Figura 2.3 - Rede Aérea Compacta**



**Fonte:** CPFL

Este tipo de rede apresenta as seguintes vantagens: maior confiabilidade devido a camada isolante dos condutores, que protege a rede das vegetações; diminuição de custos para manutenções, pois com a redução da área de poda ao redor dos cabos não é necessário haver constante poda das árvores; utilização de circuitos múltiplos, tendo assim um melhor aproveitamento dos espaços dos postes. (CELESC, 2020)

Além disso, é mais “elegante” para as zonas urbanas. Não causam impacto visual tamanho, por ocupar menos espaço. Atualmente algumas cidades têm constantemente passado por manutenções para melhorar o “aspecto” da rede para o padrão da cidade. Dessa forma, será cada vez menos comum encontrar redes convencionais em áreas urbanas.

### **2.2.3 Rede de Distribuição Subterrânea**

A rede de distribuição subterrânea é aquela que consiste em cabos condutores isolados instalados em níveis abaixo do solo. De acordo a distribuidora Celesc (2020), pode haver redes subterrâneas semienterradas, quando os cabos estão enterrados, mas os equipamentos estão instalados a nível do solo, e as redes totalmente

enterradas, as quais os cabos e equipamentos estão instalados sob o solo.

A Figura 2.4 traz o registro de um transformador sendo instalado em uma galeria subterrânea. Este tipo de rede de distribuição possui um custo de instalação mais elevado, principalmente devido a necessidade de obras civis, chegando a custar 10 vezes mais que uma rede aérea convencional. Entretanto, apresenta maior confiabilidade, segurança e menores custos com manutenção e operação. Elas são mais utilizadas em locais onde há condomínios, aeroportos próximos, grande densidade vegetativa e em locais onde necessitam de maior nível de confiabilidade. (CELESC, 2020)

**Figura 2.4 - Galeria subterrânea**



Fonte: CEEE GRUPO EQUATORIAL, 2023

### 2.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AÉREO

Como dito anteriormente, os sistemas de distribuição são compostos pelo sistema de subtransmissão que interliga o sistema de transmissão às subestações de distribuição, subestação, alimentadores de distribuição primários, transformadores de distribuição e alimentadores de distribuição secundários. Os alimentadores são formados a partir de um tronco de alimentador (circuito principal) e por ramificações, denominados de ramais. (MOURA 2011)

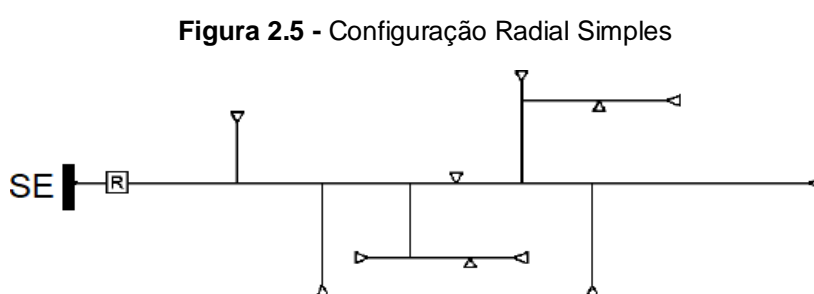
A escolha da configuração do sistema de distribuição a ser utilizado depende do tipo de cliente, da natureza das cargas, do tipo de instalação e das condições do local. Portanto, para realizar a escolha de um sistema adequado, Isoni (2021) recomenda que seja avaliado os 5 fatores seguintes: flexibilidade (capacidade de adaptação do sistema diante de mudanças na instalação ou interrupções), continuidade do serviço, regulação de tensão, custos operacionais e custos com manutenção. Com a devida análise de projeto, o sistema que apresentar a melhor união dos fatores citados será o mais adequado. Na grande maioria dos casos, os sistemas implantados são selecionados com base no menor custo de instalação. Porém o autor salienta que a melhor configuração do sistema de distribuição nem sempre terá um custo baixo.

A seguir serão apresentados os tipos de configuração de redes aéreas mais utilizados no sistema primário.

### 2.3.1 Sistema Radial Simples

O sistema radial simples é a configuração mais utilizada devido ao seu baixo custo de instalação. A principal característica desse tipo de sistema é o fluxo de corrente percorrer apenas em um único sentido. Cada parcela de carga é atendida por um único transformador e a depender das características operacionais de instalação, o uso de um transformador com potência nominal inferior à carga total instalada torna-se viável e vantajoso em relação aos fatores de demanda e diversidade. (ISONI, 2021)

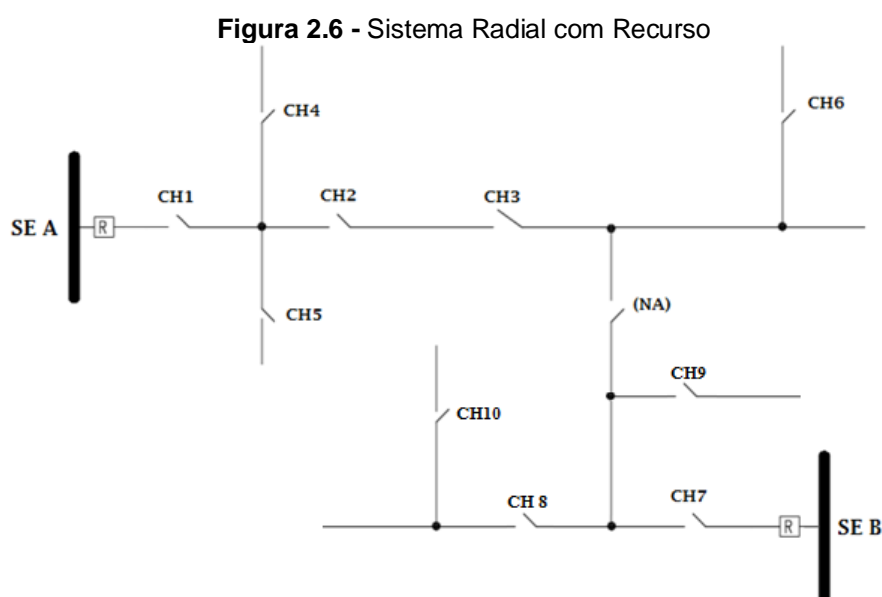
Este tipo de configuração deve ser utilizado em áreas de baixa densidade de carga, pois conforme ilustrado na Figura 2.5, a alimentação do sistema parte de uma única subestação, não havendo a possibilidade de os consumidores finais serem atendidos por outro alimentador em casos de emergência. O que é uma desvantagem em questão de nível de confiabilidade. (MOURA, 2011)



Fonte: Elektro (Adaptado)

### 2.3.2 Sistema Radial com Recurso

Indica-se o uso desse tipo de configuração em regiões cuja demanda seja alta ou requeira-se um nível de confiabilidade maior, como é o caso de hospitais, centros de computação, indústrias, aeroportos, entre outros. Portanto, objetivando o aumento da confiabilidade, utiliza-se a interligação entre alimentadores adjacentes, “que podem pertencer ao mesmo transformador de uma subestação ou transformadores diferentes de uma subestação ou de subestações diferentes” (MOURA, 2011). Essa interligação é feita através de chaves normalmente abertas (NA) que são projetadas de maneira em que cada circuito seja capaz de absorver cargas excedentes em casos de interrupções em algum alimentador, limitando o número de clientes desligados bem como o tempo da interrupção. A Figura 2.6 ilustra de maneira simplificada um sistema radial com recurso.



Fonte: Moura, 2011

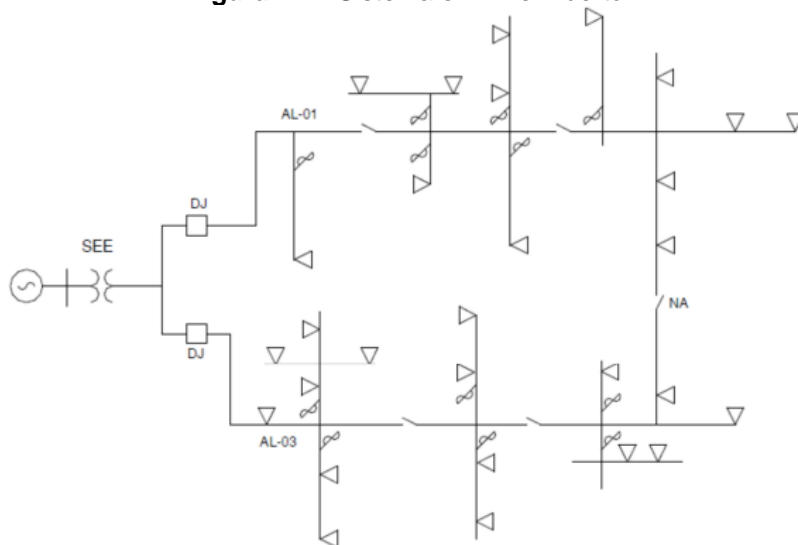
Observa-se que a chave seccionadora NA permite o fornecimento de energia para as cargas tanto da SE A quanto da SE B. Em ocorrências de interrupções programadas ou não programadas, a manobra da chave permite que o local da falta seja isolado e que os clientes dos trechos distintos não tenham sua energia elétrica interrompida. Esse procedimento de manobra a fim de se estabelecer uma nova configuração para o sistema é conhecido como reconfiguração topológica ou reconfiguração de alimentadores. Os chaveamentos podem ser realizados remotamente, utilizando chaves telecomandadas, ou localmente, no caso das chaves manuais. (SOUZA, 2018)

### 2.3.3 Sistema em Anel

A configuração em anel – ou loop – é utilizado com a finalidade de aumentar a confiabilidade do sistema, pois esta topologia possui alta continuidade de serviço em comparação ao sistema radial. Neste esquema, o fluxo de carga possui comportamento bidirecional, ou seja, o consumidor pode ser alimentado através de duas fontes provenientes de uma SE ou de SE distintas. O custo do sistema em anel é mais alto que o radial, pois os condutores precisam suportar a transferência de alimentação.

O sistema em anel pode ser projetado em duas configurações: aberto ou fechado. A configuração anel aberto (Figura 2.7) possui chaves NA que permite o seccionamento de apenas o trecho do circuito que foi afetado, não havendo a necessidade do desligamento de todos os consumidores. Além disso, favorece o uso de equipamentos de seccionamento com características de operação restritivas. (DALCIN, 2013)

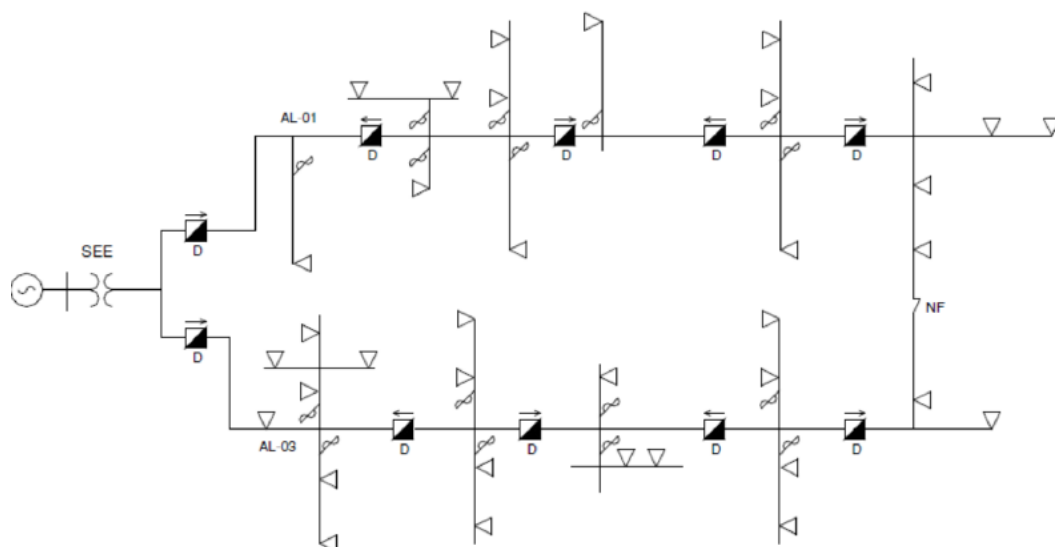
**Figura 2.7 - Sistema em Anel Aberto.**



Fonte: DALCIN,2013

Em casos especiais, utilizam-se de chaves NA que ficam constantemente fechadas, tornando a configuração do anel fechada, como ilustra a Figura 2.8. Nesses casos, o sistema de proteção precisa ser projetado e configurado para que em casos de faltas, os efeitos da interrupção sejam minimizados. (AZEVEDO, 2010)

Atualmente, os reguladores automáticos têm sido utilizados nos lugares das chaves para como “NA”, principalmente por não ter necessidade de realizar fechamento e abertura manual, podendo ser telecomandado.

**Figura 2.8 - Sistema em Anel fechado**

Fonte: DALCIN, 2013

## 2.4 EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Todo sistema elétrico de potência é suscetível de falhas em seus componentes, como curto-circuito, sobrecarga, subtensões e sobretensões causadas por manobras ou descargas atmosféricas. O sistema de proteção, então, tem por obrigação garantir que o trecho do sistema elétrico acometido pela falha seja desconectado, a fim de evitar maiores danos. Além disso, o sistema de proteção deve fornecer dados que facilitem ao operador o reconhecimento e tratamento do defeito.

### 2.4.1 Disjuntor

Disjuntor é o equipamento de manobra responsável pela interrupção da corrente em um circuito na presença de uma falha (sobrecorrente) em um pequeno intervalo de tempo, e por reestabelecer a circulação da corrente elétrica após correção do defeito.

### 2.4.2 Relé de sobrecorrente

O relé de proteção de sobrecorrente é um dispositivo sensor que atua com a presença de corrente acima do seu valor de ajuste, comandando a abertura do disjuntor. Eles são utilizados como proteção mínima a ser garantida no sistema, possuindo várias opções no mercado, com valor econômico.

### 2.4.3 Chave fusível

É um dispositivo de proteção e manobra amplamente utilizado em redes de distribuição urbanas e rurais e sua função é proteger os circuitos de sobrecorrente. Comumente encontramos chaves fusíveis como a da Figura 2.9 instaladas para a proteção de transformadores, bancos de capacitores, cabines primárias, linhas e ramais.

**Figura 2.9** - Chave fusível



**Fonte:** Catálogo Maurizio

Disponível em: <http://www.maurizio.com.br/arqsist/loja/BT-028-03pt.pdf>

O elemento de proteção de uma chave fusível é o elo fusível, localizado no interior do cartucho. O dispositivo atua quando a corrente elétrica ultrapassa as características de tempo x corrente, sendo classificados em três tipos:

- Tipo H – utilizados em transformadores de distribuição, possui tempo de atuação lento, para que sua atuação não ocorra durante a energização do Trafo.
- Tipo K - empregado em ramais de alimentadores de distribuição, possui tempo de atuação rápido.



- Tipo T – seu uso é atribuído para a proteção de alimentadores, possuindo um tempo de atuação lento.

#### 2.4.4 Religadores Automáticos

Os religadores automáticos (RA), como mostra a Figura 2.10 são amplamente utilizados em redes de distribuição aéreas e sua principal função é a interrupção da corrente elétrica. Eles possuem a capacidade de repetição de abertura e fechamento dos circuitos, eliminando os defeitos sem a necessidade de intervenção humana. Os religadores podem ser controlados por ação eletromagnética e por sistemas eletrônicos. (MAMEDE FILHO e MAMEDE, 2011)

**Figura 2.10** - Religador automático na rede



Fonte: COPREL, 2021

Mamede Filho e Mamede (2011) descrevem o funcionamento dos religadores da seguinte forma: ao detectar uma anormalidade em relação a corrente, um sinal é enviado ao sistema de manobra e os contatos são abertos. Ao se passar o tempo de religamento, outro sinal é enviado para que os contatos sejam fechados e o fornecimento de energia seja reestabelecido. Caso a corrente de defeito persista, o religador pode ser programado para iniciar um ciclo de religamento, ou seja, ele realiza uma quantidade pré-estabelecida, de até quatro ciclos, de abertura e fechamento para

verificar se ainda há falha no circuito.

Um fato sobre os religadores é que nem sempre eles são automáticos, muitas vezes são telecomandados. Como exemplo, tem-se a seguinte situação: uma equipe que precisa realizar um trabalho em regime de linha viva em um alimentador. É necessário que ele seja bloqueado e religado por um Centro de Comando a Distância (COD), através de uma permissão de serviço na qual o colaborador está trabalhando (PMS) e por uma solicitação de intervenção. Então muitas vezes o bloqueio e o religamento é feito pelo centro de comando quando surge a necessidade. Várias manobras são realizadas para balancear as cargas e não sobrecarregar os alimentadores.

## 2.5 REGULAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O setor elétrico brasileiro é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma autarquia que também é responsável pela fiscalização da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia no SIN, gerenciando as redes de transmissão a fim de garantir a segurança e o menor custo do suprimento de energia no país. Além dos órgãos citados acima, existem outros órgãos responsáveis pela regulação do setor, tais como o Comitê do Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e o Ministério de Minas e Energia (MME).

O sistema de distribuição é normatizado e padronizado através de resoluções e procedimentos de distribuição, documentado através do manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que se constitui de 8 módulos que abrangem diversos aspectos do ramo de distribuição de energia como nível de tensão, perdas, danos, medição, qualidade, fatura e expansão do sistema. (MOURA, 2010)

## 2.6 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Considera-se um sistema elétrico CA trifásico ideal aquele em que as condições de operação em regime permanente abaixo são satisfeitas (DECKMANN e POMILIO, 2020):

1. Tensões e correntes alternadas, com formas senoidais;
2. Amplitudes constantes, nos valores nominais;
3. Frequência constante, no valor síncrono;
4. Tensões trifásicas equilibradas;
5. Fator de potência unitário nas cargas;
6. Perdas nulas na transmissão e distribuição

Diante dessas condições, a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é responsável por abordar os aspectos de níveis de tensão desde a geração, transmissão e distribuição da energia até os clientes finais. Vincula-se a QEE termos como confiabilidade do sistema supridor, qualidade do produto e qualidade do serviço. (PESSOA, 2017)

O Módulo 8 do PRODIST está relacionado à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Nesse módulo, a ANEEL reúne um conjunto de definições, instruções e procedimentos voltados aos consumidores, centrais geradoras, distribuidoras e agentes importadores e exportadores de energia com o intuito de melhorar a qualidade da energia elétrica que é fornecida no país.

A QEE, tratada como produto pela ANEEL, pode ser afetada com a presença dos seguintes fenômenos na rede: variações de tensões de curta duração ou longa duração, desequilíbrio de tensão, harmônicos, variação da frequência e flutuação de tensão. Diante das diversas anomalias que podem vir a ocorrer, as concessionárias de energia vêm adotando o uso de aparelhos eletroeletrônicos no sistema elétrico para o monitoramento das grandezas elétricas com intuito de avaliar a confiabilidade do sistema e a QEE, aumentando assim a eficiência do uso da energia elétrica e a produtividade dos clientes. (ANEEL, 2022)

### **2.6.1 Indicadores de Qualidade**

Seguindo uma série de procedimentos que estão descritos no Módulo 8, a ANEEL avalia a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica prestado pelas concessionárias através de uma série de indicadores. Dentre eles, destacam-se os de continuidade, que são divididos em individuais e coletivos. Eles são estabelecidos quanto à duração e frequência das interrupções (variações de tensão de curta duração) e devem ser apurados quando uma interrupção ultrapassa um limite de tempo estabelecido.

## 1 – Indicadores individuais

- a) DIC – Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão: expressa em horas a interrupção de energia durante um período mensal e é calculada através da Equação 1.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (1)$$

- b) FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão: indica o número de interrupções durante um período requerido.

$$FIC = n \quad (2)$$

- c) DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

$$DMIC = t(i) \max \quad (3)$$

A Equação 3 expressa em horas e centésimos de horas o tempo da máxima duração da interrupção contínua (i) no período da apuração.

- d) DICRI – Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

$$DICRI = t_{crítico} \quad (4)$$

O  $t_{crítico}$  indica a duração da interrupção ocorrida em um dia crítico.

## 2 – Indicadores coletivos

1. DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} DIC(i)}{NUC} \quad (5)$$

2. FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{NUC} FIC(i)}{NUC} \quad (6)$$

Onde (Equações 5 e 6): i = índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT e NUC = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT;

Os indicadores individuais e coletivos são válidos para situações em que a interrupção ocorre devido a fatores não previstos e não programados com duração

acima de 3 minutos. Situações como corte programado, falha na rede de uma única residência não podem ser contabilizados nos cálculos de DIC, FIC DEC e FEC.

Os valores dos limites anuais desses indicadores são estabelecidos pela ANEEL e caso haja violação dos limites dos indicadores individuais por parte das distribuidoras, elas são obrigadas a compensar financeiramente os consumidores afetados pelas interrupções. Através dessas resoluções, a ANEEL busca melhorar o fornecimento de energia elétrica no país, provocando as concessionárias a buscarem meios de melhorar seu sistema a fim de evitar falhas e interrupções continuamente.

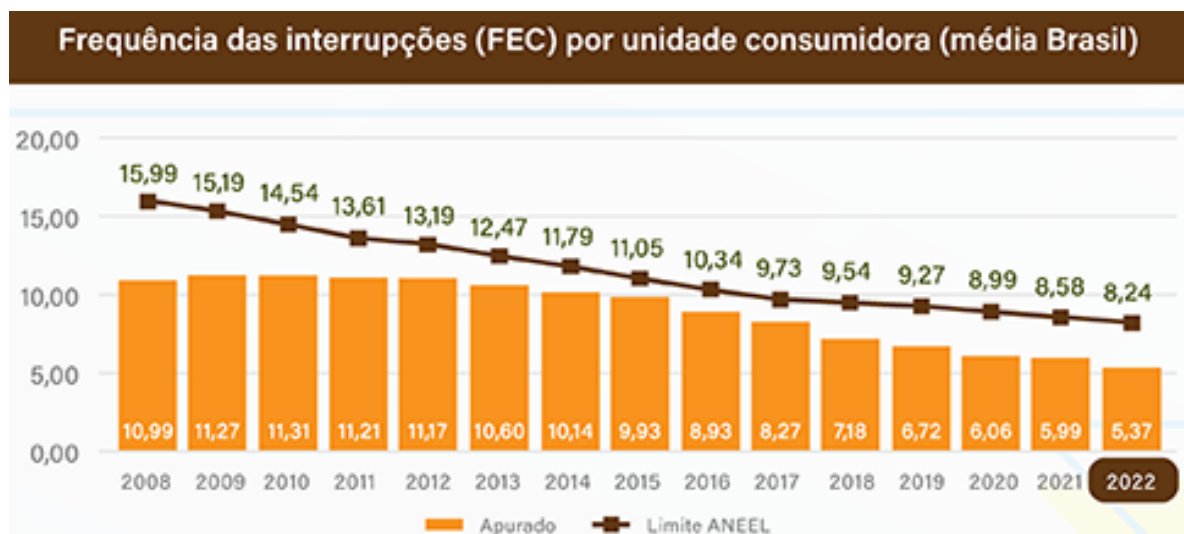
A Figura 2.11 mostra os dados do indicador DEC e a Figura 2.12 os dados da FEC, entre os anos de 2008 e 2022, divulgados pela ANEEL.

**Figura 2.11 - DEC anual entre 2008 e 2022**



Fonte: ANEEL, 2023

**Figura 2.12 - FEC anual entre 2008 e 2022**



Fonte: ANEEL, 2023

A partir dos valores apurados, é possível observar que as médias anuais estão em constante decréscimo. Nos últimos três anos o DEC se manteve abaixo dos limites estabelecidos. No ano de 2022 foram obtidos os menores valores de DEC e FEC, ou seja, em média foram 10h:56min de interrupção e a frequência foi de 5,37 vezes. Isso demonstra que as iniciativas e regras impostas pela ANEEL na busca da melhoria da qualidade do fornecimento de energia vem surtindo resultados positivos.

## 2.7 AUTOMAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS

Com o crescimento das redes elétricas e com o avanço das tecnologias disponíveis a serem empregadas, as concessionárias foram capazes de aperfeiçoar suas operações através da integração entre dispositivos de controle, medição e sensoriamento por intermédio de sistemas de computação e comunicação (PRAMIO, 2014).

Dentro desse contexto, os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*) são os responsáveis pela supervisão e controle de sistemas elétricos.

Os sistemas SCADA (Superisory Control and Data Aquisition) podem ser definidos como uma arquitetura formada desde os equipamentos ligados diretamente à rede elétrica (como relés de transformadores, barras e alimentadores e medidores de carga), passando por equipamentos de comunicação como switches de comunicação e UTR's (Unidades Terminais Remotas), até chegar às IHM (Interface Homem-Máquina), softwares que condensam e tratam todo o montante de dados recebidos e oferecem ao controlador informações sobre o estado atual do sistema elétrico e a capacidade de executar comandos remotamente. (RAMOS, 2016, p.28)

A Tabela 2.1 traz uma breve descrição dos principais componentes que compõem uma rede automatizada: estação mestre, Unidades Terminais Remotas (UTR), Interface Homem-Máquina (IHM) e sistema de comunicação.

**Tabela 2.1** - Componentes de uma rede automatizada

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
IHM	Interface que fornece dados de medição, estados das chaves e disjuntores e possibilita o operador realizar comandos para o sistema.
UTR	Responsável pela aquisição de dados e pelo repasse de informações para a estação mestre.
ESTAÇÃO MESTRE	Responsável pela construção do banco de dados do sistema.
SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	Canal de comunicação entre a estação mestre e UTR.

Fonte: PRAMIO, 2014.

O sistema de distribuição pode ser automatizado tanto nas subestações de distribuição, quanto nas redes de distribuição MT. Para a automatização da

subestação é necessário a instalação dos equipamentos de controle e proteção dentro do local, podendo ser controlado pelo SCADA através do centro de controle ou no próprio lugar. (PRAMIO,2014)

Já para as redes de MT, os equipamentos são instalados estrategicamente em troncos e derivações. Eles devem ser dispostos de forma que além de desempenhar suas funções de proteção e manobra, sejam capazes de “atender os requisitos de comunicação propiciando agilidade e segurança na operação e controle do sistema em casos de perturbação e do restabelecimento do fornecimento de energia”. (VAZ, 2017, p.41)

A automação dos sistemas elétricos vem sendo cada vez mais propagada nas redes e subestações pelas concessionárias de energia, pois através dela, as empresas são capazes de aumentar o nível de confiabilidade do sistema, bem como de manter seus indicadores nos níveis estabelecidos pela ANEEL.

## 2.8 SMART GRID

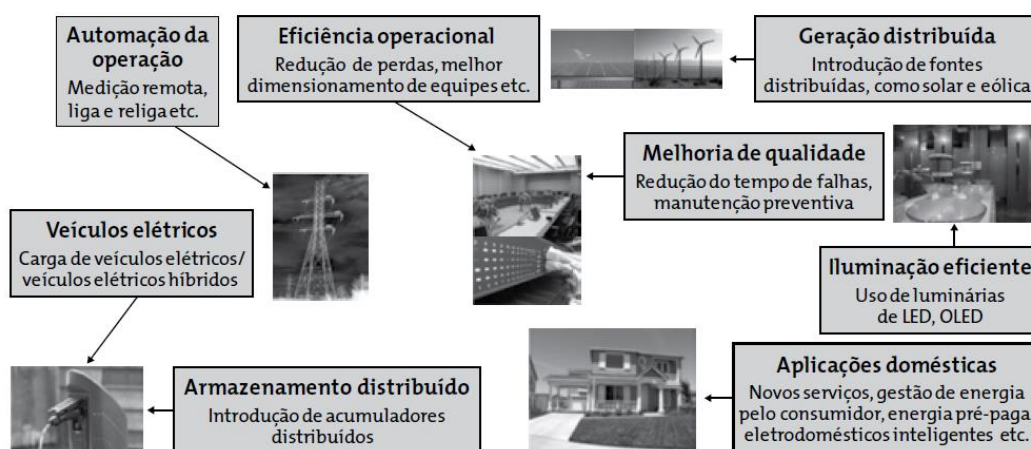
Com base na inserção da automação, computação e protocolos de comunicação para o monitoramento e controle das redes elétricas de geração, transmissão e distribuição de energia, surge o conceito de *Smart Grid* ou Redes Elétricas Inteligentes (REI). (FALCÃO,2010)

Com o atual avanço tecnológico da eletrônica e a inserção do conceito de Internet das Coisas (IoT), as *Smart Grids* se tornaram mais viáveis de serem implantadas. As redes elétricas se tornaram fontes geradoras de dados, que são processados e tratados por sistemas inteligentes que geram informações que são base para ações remotas de forma instantânea e precisa.

Para Rivera, Espósito e Teixeira (2013), as REIs podem ser apresentadas em três pontos de vistas diferentes, mas que se complementam. Primeiramente, as *Smarts Grids* têm por objetivo tornar o sistema elétrico inteligente, no que tange robustez, segurança e agilidade. Outro ponto é a substituição dos medidores eletromecânicos por medidores eletrônicos inteligentes, a fim de facilitar a obtenção de dados e indicadores, bem como o corte e religamento de forma remota. Por fim, o último ponto aborda o uso da *smart grid* na geração distribuída, permitindo a conexão dos consumidores na rede elétrica através da energia solar, eólica, veículos elétricos. A Figura 2.13 traz uma síntese dos elementos e funcionalidades das redes elétricas

inteligentes.

**Figura 2.13** -Rede multiplexada



Fonte: BNDES, 2013

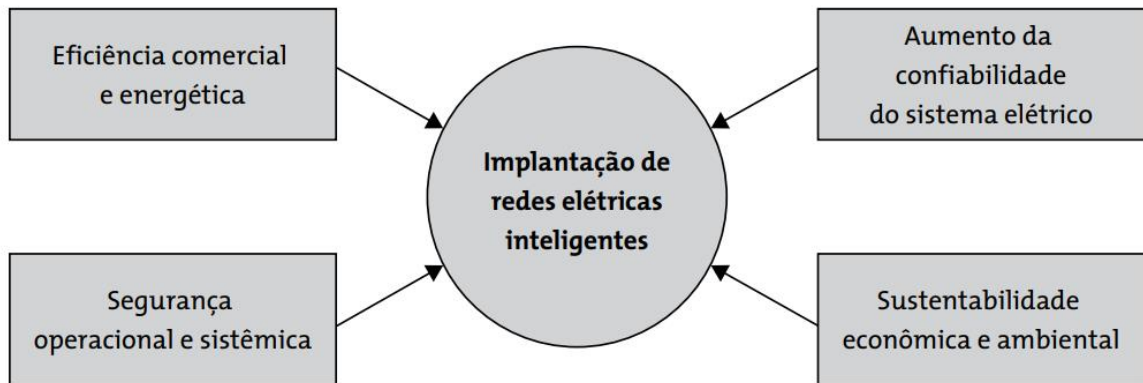
Em resumo, as principais características atribuídas às *Smarts Grids* são (FALCÃO, 2010)

- Auto recuperação: capacidade do sistema de detectar, analisar e restaurar falhas que ocorrem na rede, de forma automática;
- Qualidade de energia: entrega aos consumidores finais energia com padrão de qualidade exigida atualmente;
- Redução do impacto ambiental: uso de fontes de baixo impacto ambiental, reduzindo também as perdas;
- Capacidade de acomodação de diferentes fontes de energia;
- Segurança virtual: sistema capaz de mitigar e combater ataques físicos e cibernéticos.

No Brasil, conforme afirmam Rivera, Espósito e Teixeira (2013), a crescente implementação das REIs têm como pontos motivadores a eficiência comercial e energética, o aumento da confiabilidade do sistema elétricos, a segurança operacional e sistêmica, e a sustentabilidade econômica e ambiental, como ilustra a Figura 2.14.



**Figura 2.14** - Tópicos motivadores para a implantação de REIs



Fonte: RIVERA, ESPOSITO E TEIXEIRA, 2013

## 2.9 SELF-HEALING

Uma das principais características das REI é a correção de falha de forma automática, conceituado como *Self-Healing* (SH), cuja tradução livre é “auto recuperação”.

Quando ocorre uma falta no sistema de distribuição, o sistema prontamente entra em ação para detectá-la e isolá-la no menor tempo possível, reestabelecendo o fornecimento de energia para as cargas.

De maneira resumida, o *self-healing* (auto recuperação) de um sistema de entrega de energia é um conceito que possibilita detectar falhas, analisá-las e responder a elas, promovendo assim a restauração do serviço de fornecimento através de elementos que não tenham sido comprometidos. As falhas, por sua vez, são anormalidade no sistema como, por exemplo, curtos-circuitos e níveis de corrente / tensão fora dos limites de tolerância aceitáveis. (HORIE, 2020)

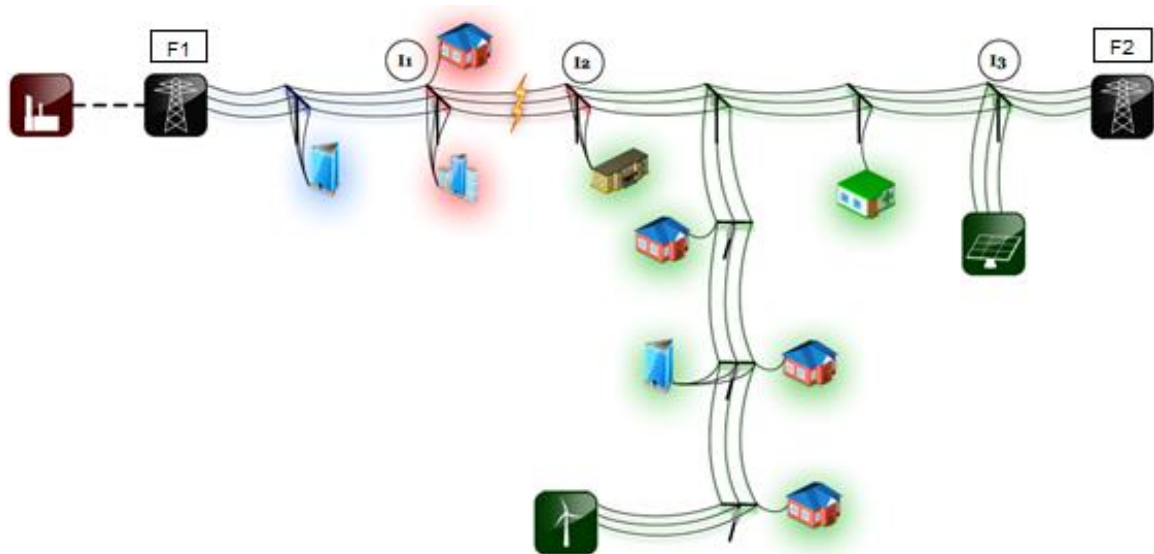
O incentivo para as pesquisas e desenvolvimento de ferramentas que possibilitassem a autocura da rede elétrica se deu através do desenvolvimento de controles de voos inteligentes. Foi o IFCS (*Intelligent Flight Control System*) o responsável por fornecer aos pesquisadores toda a base para a criação do *Complex Interactive Networks/Systems Initiative (CIN/SI)*. O objetivo do (CIN/SI) era desenvolver ferramentas de simulação e modelagem robustas e adaptáveis além de controles de reconfiguração da rede elétrica (AMIN e WOLLENBERG, 2005).

A Figura 2.15 ilustra de forma simplificada o princípio de funcionamento do *self healing*: inicialmente, a rede é alimentada pela fonte 1, enquanto a chave I3 permanece aberta. Por se tratar de uma rede inteligente, toda rede é dotada de

equipamentos automatizados e interligados que se comunicam através do seu sistema de operação.

Supondo a ocorrência de uma falta na região sombreada de vermelho, o sistema *self-healing* entraria em ação, abrindo as chaves telecomandadas I1 e I2, isolando a falta e chaveando I3, realimentando os consumidores que estão sombreados de verde. Dessa forma, apenas os consumidores entre o trecho da falta continuariam desligados. (MOREIRA, 2011).

**Figura 2.15** - Esquema de funcionamento do *Self-Healing*



Fonte: Moreira, 2011 (adaptado)

### 2.9.1 Modelos de Implementação do *Self-Healing*

Para implementar um sistema *self-healing*, as concessionárias podem optar entre três modelos: Centralizado, semi-centralizado ou distribuído.

#### 2.9.1.1 Modelo centralizado

Neste modelo, o sistema de SCADA é responsável pela inteligência do sistema e fica localizada no Centro de Operações Integradas (COI) da empresa de distribuição. Dessa forma o sistema possui informação topológica de toda rede, partindo desse local toda tomada de decisão que for necessária, sendo possível lidar com múltiplas falhas de maneira simultânea. Por isso, há uma grande dependência em redes de comunicação.

Esse tipo de sistema necessita de grande investimento em automação e equipamentos, que sejam de preferência do mesmo fabricante, pois é necessário que

todos os equipamentos se comuniquem entre si, exigindo conseqüentemente um sistema robusto (ROCATELI e MULLER, 2021).

#### 2.9.1.2 Modelo semi-centralizado

No modelo semi-centralizado, o sistema é instalado em regiões que sejam próximas aos locais em que se deseja que haja uma recomposição automática da rede. Geralmente as empresas optam por instalar o sistema nas subestações de energia, pois o espaço já apresenta infraestrutura básica de comunicação com o centro de operação e com os controladores dos religadores, além de alimentação segura em CC. (SOUZA, HOKAMA, et al. 2015)

Os mesmos autores destacam que é possível combinar a solução *self-healing* com o Sistema de Automação de energia da subestação. Reduzindo significativamente os custos de instalação, sendo necessário apenas a elaboração da lógica do controle de recomposição automática.

#### 2.9.1.3 Modelo distribuído

No modelo *Self-Healing* Distribuído (SHD), toda lógica de recomposição do sistema fica distribuído entre os controladores dos religadores automáticos, ao longo da rede.

Seu funcionamento é distinto dos anteriores, pois não é desejável uma central e nem um equipamento controlando os demais, entretanto ainda é necessário um meio de comunicação com os equipamentos para a devida intervenção do Centro de Operação a Distância (COD). O sistema distribuído consiste em cada equipamento, necessariamente sendo um Religador Automático, atuando e tomando as decisões de forma pré-estabelecida independentemente dos demais. Seu funcionamento básico é a partir de uma lógica, construída internamente, de ausência de tensão e de uma temporização. (ROCATELI e MULLER, 2021, p.46.).

Esse modelo tem como vantagem alta eficiência mesmo com menos equipamentos com comunicação de rede, o sistema distribuído não é capaz de lidar em casos de múltiplas falhas no sistema. (FONSECA, 2017)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

Durante uma pesquisa científica, Lakatos e Marconi (2005) salientam que é necessário impor algumas etapas metodológicas a fim de tornar o processo mais simples e objetivo. Dentre elas, destacam-se o descobrimento do problema, sua colocação, a procura de conhecimentos e instrumentos relevantes ao problema, a obtenção de uma solução e a investigação de suas consequências, a comprovação da solução e, por fim, correções dos erros que ocorreram durante a busca da solução. Para este projeto, foram percorridas as seguintes etapas:

- Estudo e escolha do tema;
- Especificação dos objetivos;
- Elaboração da metodologia;
- Pesquisa bibliográfica;
- Escrita do projeto;
- Considerações finais

#### 3.1 TIPO DE PESQUISA

A realização deste projeto se deu através da pesquisa descritiva exploratória. De acordo Gil (2002), as pesquisas exploratórias “têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais propício a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições.”

Ainda de acordo o autor, as pesquisas descritivas têm como finalidade a descrição das características de um determinado fenômeno e as correlações das variáveis que o influí. Além de ser capaz de proporcionar uma nova visão do tema, assim como as exploratórias.

#### 3.2 ABORDAGEM DA PESQUISA

A abordagem utilizada na pesquisa foi qualitativa, e de pesquisas bibliográficas. Esta metodologia é desenvolvida através de materiais já estabelecidos, constituídos de livros e artigos científicos. A pesquisa bibliográfica tem como principal vantagem a possibilidade de o autor abranger uma variedade de fenômenos acerca de um tema. (GIL, 2008)

## CAPÍTULO 4

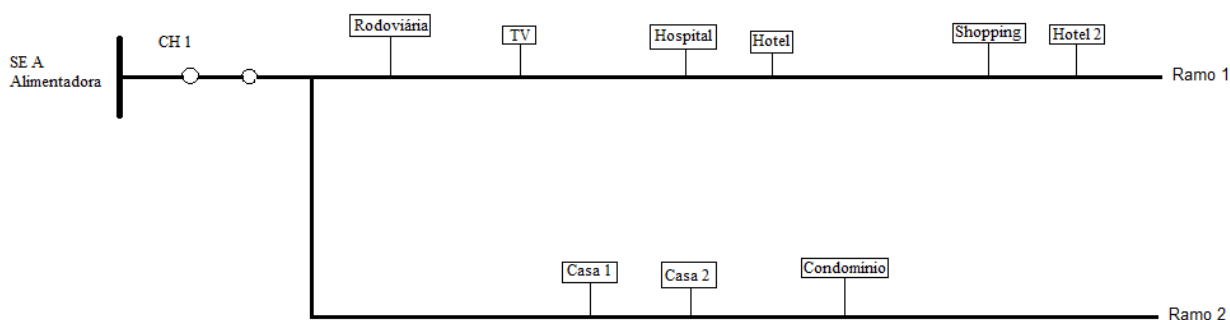
### APLICAÇÃO DO *SELF-HEALING* NOS CENTROS URBANOS

Os sistemas de distribuição de MT da maioria das cidades ainda são do tipo convencionais, compostas por cabos nus. Geralmente regiões com muita arborização e com susceptibilidade a descargas atmosféricas sofrem com os distúrbios na rede, o que causa muito transtorno a concessionária e aos clientes.

Neste capítulo, será realizada uma comparação e análise de desempenho entre uma rede elétrica convencional e sua resposta quando o princípio do *self-healing* é integrado. Com o objetivo de alcançar esse propósito, será utilizado um exemplo de rede de distribuição de energia, considerando cargas hipotéticas, e será proposta a aplicação de auto recuperação com base nos modelos de SH abordados neste estudo.

A Figura 4.1 ilustra o diagrama unifilar de um trecho de uma rede hipotética, composta por vários clientes com cargas importantes, sem o sistema *self-healing*. Esse exemplo baseia-se na análise do autor Araújo (2016) e possui uma configuração radial com dois ramos atendidos por um único alimentador na SE A.

**Figura 4.1** - Diagrama unifilar do trecho sem SH



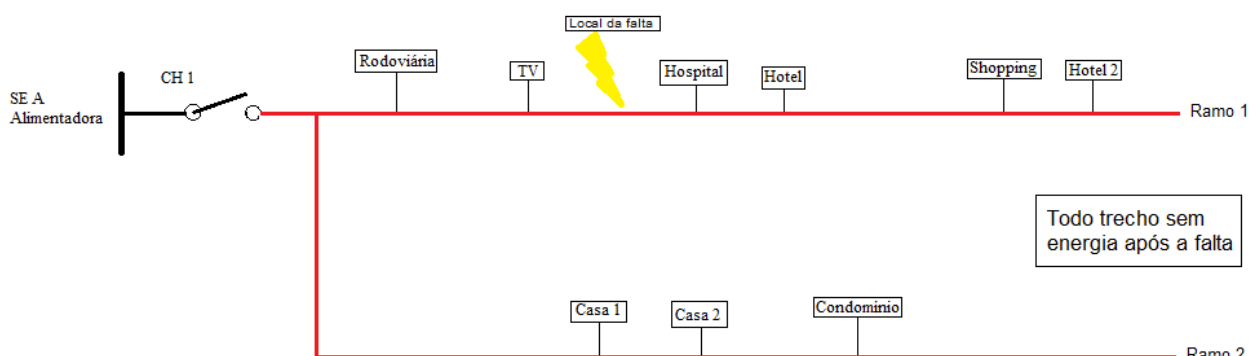
**Fonte:** ARAÚJO, 2016

Na ocorrência de uma interrupção não programada em qualquer trecho da rede de distribuição, é essencial que os dispositivos de proteção atuem para interromper a oferta de energia até que a questão seja interrompida e resolvida. Entretanto, todos os consumidores ficarão sem fornecimento de energia até que uma equipe técnica seja acionada para o localizar a falta e fazer os devidos reparos, a fim de reestabelecer a energia. (ARAÚJO, 2016)

Como mostra a Figura 4.2 abaixo, uma falta no trecho entre TV e Hospital ocasionaria a abertura da CH 1 e, conseqüentemente, há a perda do fornecimento de

energia para os ramos 1 e 2.

**Figura 4.2** - Diagrama da rede após a falta



**Fonte:** ARAÚJO, 2016 (adaptado)

A partir da automação da rede com a implementação do sistema *Self-Healing* (SH), esse processo de recomposição da rede se torna mais rápido, e menos clientes são afetados pela falta.

O recurso do SH é dotado de uma série de equipamentos de manobra, podendo ser incorporado também a proteção da rede em algumas circunstâncias. Suas configurações possibilitam a divisão dos alimentadores de distribuição de energia em blocos, que podem ser considerados ou dimensionados por quantidade de unidades ligadas ou importância de carga, como hospitais, indústrias, comércio, entre outros. Seu funcionamento se dá a partir da detecção de uma falha na rede, quando o sistema isola o trecho defeituoso. Depois de comprovado o ciclo da proteção de retaguarda para a tomada de decisão, o sistema manobra blocos de carga respeitando os limites. (OLIVEIRA, 2023)

O comportamento desse recurso depende do arranjo e do tipo de sistema implementado na rede. Estes podem ser isolados ou distribuídos, ou dotados de inteligência suficiente para realizar comparações pré-estabelecidas. Predominando principalmente a qualidade do serviço em relação aos níveis de tensão, e até mesmo a segurança da rede, em termos de carregamento dos cabos elétricos. São os chamados SH AIR, ou seja, Auto Recuperação de Redes Inteligentes Automáticas.

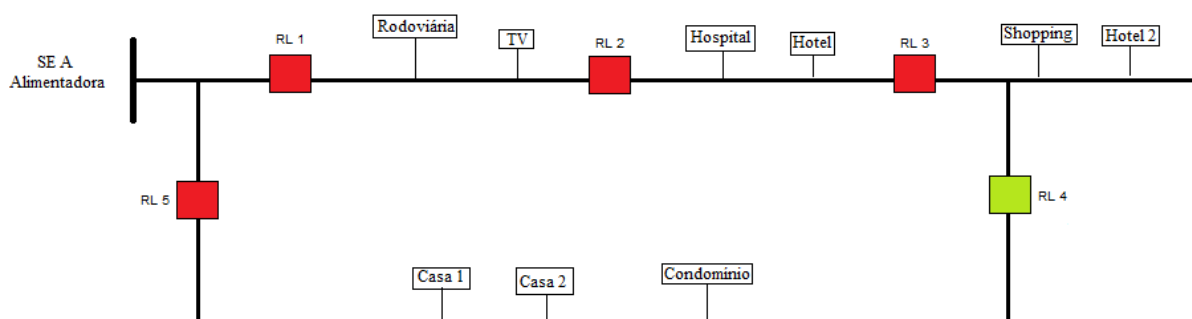
Na prática, para que haja garantia da operação em caso de falhas na automação da rede, as concessionárias optam por utilizar mais de um modelo de configuração de *Self-Healing* em alguns sistemas. Assim se estabelece duas camadas de SH: a AIR e a SHD.

Para o SHD, basta o equipamento de fronteira elétrica detectar a ausência de tensão por um tempo pré-definido para então tomar a decisão da manobra. Quando se estabelece um SH em redes urbanas de grandes centros, toda a rede da cidade fica dentro das malhas, sendo assim, é possível encontrar em uma única avenida, vários pontos de manobra. (ANDRADE, 2022)

O religador quando instalado em fronteira entre dois alimentadores de uma mesma subestação, ou de subestações distintas, tem por funcionalidade recompor um trecho que sofreu falta. Ele verifica e transfere a carga para o outro alimentador, de maneira que esse alimentador não fique sobrecarregado. Caso a possível recomposição for sobrecarregar o alimentador, e considerando que exista alternativas para a execução da recomposição, o sistema irá fechar a chave conectada a um alimentador alternativo. (PRAMIO, 2014)

Seguindo com a análise, a Figura 4.3 considera a mesma rede de configuração radial, agora com a implementação de um sistema *self-healing* distribuído.

**Figura 4.3 - Rede com implementação de equipamentos e lógica SH**



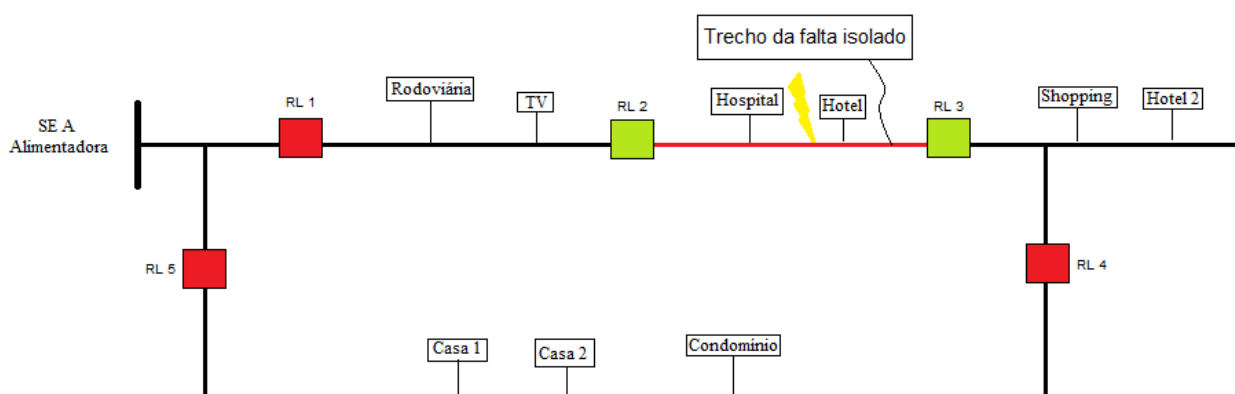
**Fonte:** ARAÚJO, 2016 (adaptado)

De acordo com Andrade (2022), o conjunto de equipamentos que formam o sistema SH é denominado de ilhas de *Self-Healing*. As lógicas de recomposição automática contidas nos equipamentos são denominadas de *feeder*, em equipamentos NF ou *tie*, em equipamentos NA. No exemplo da figura acima, os equipamentos em vermelho são disjuntor e religadores NF e o equipamento em verde é um religador NA.

Frente a uma falta no trecho entre o Hospital e o Hotel, a energia de todo trecho até o Hotel 2 é interrompido. Nesse momento, pela lógica *feeder*, ao detectar a

ausência de tensão, os religadores RL2 e RL3 executam a tentativa de religamento da rede e se abrem definitivamente ao detectar que a falta não é temporária. Segundos depois, o RL4 fecha seguindo a lógica *tie*. Dessa forma, a rede se reconfigura isolando a falta e energizando o trecho do Shopping e do Hotel 2, como mostra a Figura 4.4. Em seguida, problema é repassado ao Centro de Operações Integradas (COI), a equipe é acionada e se desloca para realizar as devidas manutenções no trecho isolado.

**Figura 4.4 - Atuação do SH para reconfigurar a rede**



**Fonte:** ARAÚJO, 2016 (adaptado)

Com o *self-healing*, o restabelecimento da energia ocorre em até 60 segundos, reduzindo o número de clientes afetados em até 70%. Isso proporciona às concessionárias de energia uma redução dos custos operacionais de manutenção, evita perda de faturamento e reduz o valor das compensações. Visto que serão menos clientes afetados pela interrupção, os indicadores de continuidade são diretamente impactados. (NEOENERGIA, 2022a)

A Neoenergia, de acordo com seu Relatório Integrado de 2022, afirma que a automação de seus sistemas possibilitou a redução do número de consumidores afetados por interrupção de energia causada por fatores externos, sendo 500 mil clientes beneficiados com a tecnologia de auto recomposição. Atualmente, 34% de seus 16,5 mil equipamentos religadores contam com lógicas *self-healing*. (NEOENERGIA, 2022b)

Na Bahia, a implantação de sistemas SH deu início em 2018. Os valores dos indicadores de continuidade presentes na Tabela 4.1 mostram resultados notórios da ação da automação do sistema. No último ano apurado houve uma redução de quase



42% em comparação a 2017. Além disso, mesmo com a diminuição da meta, a distribuidora conseguiu permanecer abaixo do limite.

**Tabela 4.1 - Índices de Continuidade Coelba (2017 a 2022)**

	DEC APURADO	DEC LIMITE	FEC APURADO	FEC LIMITE
2017	19,83	15,08	8,23	8,88
2018	14,45	14,54	6,43	8,43
2019	12,18	14,53	5,90	8,33
2020	12,44	14,17	5,54	7,88
2021	11,44	13,75	5,18	7,57
2022	11,41	13,59	4,99	7,41

**Fonte:** ANEEL, 2023

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do presente estudo foi possível observar que o sistema de distribuição do Brasil possui uma certa predominância de redes compostas por condutores nus. Por esse motivo, as redes são muito suscetíveis a faltas ocasionadas por descargas atmosféricas, quedas de árvores ou até mesmo ações de animais.

Paralelamente, a qualidade do serviço de energia elétrica é um aspecto essencial para as concessionárias de energia, uma vez que a ANEEL estabelece metas desafiadoras para os indicadores relacionados ao setor de distribuição e está em constante cobrança quanto ao cumprimento destas.

Devido a essa questão, conforme visto neste trabalho, a automação dos sistemas tem sido o foco de investimento das companhias elétricas como forma de adequar suas redes ao conceito de *Smart Grids*. E a partir deste momento, a tecnologia *self-healing* teve seu crescimento devido a sua lógica de recomposição permitir que, o sistema isole o trecho da falta e reestabeleça energia aos clientes que haviam sido impactados, mas estavam fora do trecho defeituoso.

A implantação do *self-healing* pelas concessionárias pode ser feita de forma centralizada ou de forma distribuída. Isso vai depender de qual será o melhor investimento para a configuração do sistema em questão. De qualquer forma, foi possível observar que tal investimento traz confiabilidade para o sistema e ganhos para a distribuidora. Visto que seus indicadores de continuidade refletem diretamente no lucro da operação.

Por fim, este estudo torna-se uma oportunidade de pesquisa para melhorias e entendimento acerca do sistema de distribuição de energia e da proteção. Sendo assim, seguem sugestões de possíveis trabalhos futuros:

- Estudo da parametrização dos religadores automáticos com lógica *self-healing* distribuído;
- Aplicação de uma metodologia *self-healing* em um sistema de distribuição real;
- Estudo do sistema *self-healing* em Vitória da Conquista;
- Estudo do custo-benefício em relação a implantação de um sistema *self-healing*.

## REFERÊNCIAS

AMIN, S. M. e WOLLENBERG B. F., "Rumo a uma rede inteligente: fornecimento de energia para o século 21," na **Revista IEEE Power and Energy**, vol. 3, não. 5, pp. 34-41, setembro-outubro. 2005, doi: 10.1109/MPAE.2005.1507024.

ANDRADE, R. M. **Esquemas de Self-Healing e seus ganhos para as redes de distribuição de energia elétrica**. 2022. 17f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário UNINTER, 2022.

ANEEL. **ANEEL divulga os resultados do desempenho das distribuidoras na continuidade do fornecimento de energia elétrica em 2022**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-divulga-os-resultados-do-desempenho-das-distribuidoras-na-continuidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica-em-2022>>. Acesso em: 10 set 2023.

ANEEL. **Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC)**, 2023. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores\\_de\\_qualidade/resultado.cfm](https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/resultado.cfm)>. Acesso em: 20 nov 2023.

ARAÚJO, T. B. R. **Estudo sobre Self-Healing: metodologia de aplicação em redes de distribuição de energia elétrica**. 2016. 44f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário do Sul de Minas. Varginha, 2016.

AZEVEDO, F. H. **Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Subterrânea Reticulada através de Algoritmos Genéticos**. 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CELESC. **Manual de procedimentos: Critérios para Utilização de Redes de Distribuição**. 2020. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/l3130021.pdf>>. Acesso em: 13 dez 2023.

DALCIN, J. A. **Adequação dos níveis de tensão em um sistema elétrico de distribuição em média tensão: estudo de caso**. 2013. 126f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, UNIJUI, Ijuí, 2014.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J.A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. 2010. 209f. Apostila – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **Balanco Energético Nacional 2022: Ano Base 2021** / Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 13 dez. 2023

FALCÃO, D. M. Integração de tecnologias para viabilização da Smart Grid. 120 f. In:

**SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE)**, 3., 2010, Belém. Anais ... Belém, 2010. V.1, P.1. Disponível em: [http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/odilon/te339/artigo\\_SMART\\_GRID.PDF](http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/odilon/te339/artigo_SMART_GRID.PDF). Acesso em: 21 fev. 2022.

FONSECA, Jonatha Revoredo Leite da. **Aplicação da técnica de self healing na reconfiguração automática de redes elétricas utilizando o padrão IEC 61850**. 2017. 245f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Atlas, 2008.

HORIE, H. **Aspectos técnicos do Religador Automático e influência na trajetória profissional**. Disponível em: < <https://pt.linkedin.com/pulse/aspectos-t%C3%A9cnicos-do-religador-autom%C3%A1tico-e-na-hugo-hiroki-horie>>. Acesso em: 21 fev. 2023.

ISONI, Marcos. **Relatório Técnico, Arranjos de Sistemas de Distribuição Elétrica para Instalações de Médio e Grande Porte**. 2021. 23 p. Disponível em: [https://www.engeparc.com.br/arquivos/arranjos\\_de\\_sistemas\\_de\\_distribuicao\\_eletrica\\_interna.pdf](https://www.engeparc.com.br/arquivos/arranjos_de_sistemas_de_distribuicao_eletrica_interna.pdf). Acesso em: 13 set. 2022.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2005.

MOREIRA, R. **Análise Técnico-Económica de Estratégias de Self-Healing em Smarts Grids**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61536/1/000149144.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2022.

MOURA, C. J. **Estudo para implantação de um sistema de recomposição automática para a rede de distribuição do campus PICI**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011. Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.2/CARLOS%20JEFFERSON%20DA%20SILVA%20MOURA.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2022.

NEOENERGIA. **Neoenergia Coelba reforça rede elétrica da Região Metropolitana com sistema de automação inteligente**. 2022. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/bahia/w/neoenergia-coelba-reforca-rede-eletrica-da-regiao-metropolitana-com-sistema-de-automacao-inteligente-2>>. Acesso em: 13 dez 2023.

NEOENERGIA, **Relatório Integrado 2022**. Disponível em: < [https://www.neoenergia.com/documents/d/guest/ri\\_neoenergia\\_2022](https://www.neoenergia.com/documents/d/guest/ri_neoenergia_2022)>. Acesso em: 20 nov. 2023.

OLIVEIRA, Antonio Augusto Ananias. **Análise de indicadores de continuidade em sistema de distribuição de energia elétrica com self-healing descentralizado usando OpenDSS**. 2023. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, **O que é ONS?** Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 01 fev. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, **O que é SIN?** Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 01 fev. 2022.

PRAMIO, J. T. **Estudo sobre Self Healing: conceitos, metodologias e aplicações em redes de distribuição de energia elétrica.** 2014. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RAMOS, J. **Análise, implantação e gerenciamento de uma rede de comunicação para o projeto Self-Healing da Cemar.** 2016. 80f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.

RIGONI, M. B. **Estudo comparativo de configurações de redes de distribuição de Energia Elétrica.** 2016. 69f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local.** Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n. 40, p. 43-83, dez. 2013. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%c3%a9tricas%20inteligentes\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%c3%a9tricas%20inteligentes_P.pdf). Acesso em: 30 ago. 2022.

ROATELI, Hiago R.; MULLER, Rodiney de L. **Funcionamento do sistema self healing, comparativos e aplicação do modelo distribuído.** 2021. 101 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

RUPPENTHAL, F. A. **Aplicação de Sistema Self-Healing em redes de Distribuição de energia Elétrica.** 2019. 109f. TCC(Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. UNISC, Santa Cruz do Sul, 2019

SOUZA, E. S. **Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais.** 2018. 174f. Tese (Doutorado). UNESP, Ilha Solteira, 2018.

SOUZA, P. A. et al. Self-Healing Semi-Centralizado e seus benefícios para clientes com base instalada. **XI SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS.** Campinas: [s.n.]. 2015. p. 9. Disponível em: <https://docplayer.com.br/7823571-Self-healing-semi-centralizado-e-seus-beneficios-para-clientes-com-base-instalada.html>

UNESP. Apostila, Sistema de distribuição: aspectos gerais de sistema de distribuição. **Aspectos gerais de sistema de distribuição.** 2021. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila\\_sdee\\_0](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_0). Acesso em: 13 out. 2022.

VASCONCELOS, F. M. **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 224p.