



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

José Edson Carneiro Agra Júnior

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DO *SELF HEALING* NOS INDICADORES DE
QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Março de 2022

José Edson Carneiro Agra Júnior

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DO *SELF HEALING* NOS INDICADORES DE
QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador: Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Março de 2022

José Edson Carneiro Agra Júnior

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DO *SELF HEALING* NOS INDICADORES DE
QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Aprovado em 17 / 03 / 2022

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.

Orientador

Professor Ronimack

Avaliador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pela força da minha perseverança, que me permitiu concluir este trabalho. Em segundo, também agradeço a minha família por me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta minha caminhada.

Enfim, agradeço a todos os colegas de curso e professores, principalmente o professor Célio Anésio, que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje, e também não posso esquecer de agradecer e desejar muitas felicidades a dois profissionais da coordenação que praticamente facilitaram a minha caminhada nesta etapa da minha vida, obrigado por todos os conselhos Adail e Tchai.

*“O verdadeiro sentido da vida,
Certamente não está impresso em nenhum livro,
Mas aqueles que tiverem a coragem de vencer os seus medos
E se arriscarem na aventura da busca pessoal
Provavelmente encontrarão a verdade.”*

Napoleon Hill.

RESUMO

A *Smart Grid* é o futuro do setor elétrico brasileiro, garantindo um desenvolvimento confiável e eficiente deste setor. E neste contexto, este trabalho abordará a potencialidade da ideia do *Self Healing* para as redes de distribuição de energia elétrica no Brasil. Essa ideia consiste em aplicar tecnologias relacionadas ao controle, seccionamento e comunicação nos sistemas de distribuição. E assim, promove a atuação automática e rápida do sistema elétrico por meio de alterações necessárias na topologia da rede elétrica para permitir caminhos alternativos para o fluxo de energia, visando atingir a otimização da rede elétrica e conseqüentemente reduzir o número de consumidores afetados por um distúrbio. O desenvolvimento deste trabalho tem o objetivo de demonstrar as vantagens de se aplicar as tecnologias relacionadas ao *Self Healing* nas redes de distribuição de energia elétrica. E para consolidar os benefícios do objeto de estudo deste trabalho, foi realizado uma análise comparativa em torno de um modelo simplificado de detecção de falhas em redes de distribuição, na qual a primeira situação é sem a utilização da ideia do *Self Healing* e as demais situações são com a implementação do *Self Healing*. Portanto, como resultado da análise é destacado os pontos positivos da implementação do *Self Healing*, como o melhoramento dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica, a redução dos custos operacionais das concessionárias de distribuição e o aumento da credibilidade e confiança por parte dos consumidores em relação aos serviços prestados pelas concessionárias.

Palavras – Chave: *Self Healing*; *Smart Grid*; Indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica; Redes de distribuição de energia.

ABSTRACT

The Smart Grid is the future of the Brazilian electricity sector, ensuring a reliable and efficient development of this sector. And in this context, this work will address the potentiality of the idea of Self Healing for electricity distribution networks in Brazil. This idea consists of applying technologies related to control, sectioning and communication in distribution systems. And thus, it promotes the automatic and fast actuation of the electrical system through necessary changes in the topology of the electrical network to allow alternative paths for the flow of energy, aiming to achieve the optimization of the electrical network and consequently reduce the number of consumers affected by a disturbance. The development of this work aims to demonstrate the advantages of applying technologies related to Self Healing in electricity distribution networks. And to consolidate the benefits of the object of study of this work, a comparative analysis was carried out around a simplified model of fault detection in distribution networks, in which the first situation is without the use of the idea of Self Healing and the other situations are with the implementation of Self Healing. Therefore, as a result of the analysis, the positive points of the implementation of Self Healing are highlighted, such as the improvement of the quality indicators of the electric energy supply, the reduction of the operational costs of the distribution concessionaires and the increase of credibility and trust on the part of the consumers in relation to the services provided by the concessionaires.

Keywords: Self Healing; SmartGrid; Electricity supply quality indicators; Energy distribution networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração de um sistema elétrico com as redes inteligentes.	14
Figura 2 - Sensor óptico GridAdvisor Insight, modelo RG235.	19
Figura 3 - Indicador de falta AR360.	20
Figura 4 - Religador sendo aplicado em uma rede elétrica.	21
Figura 5 - Chave seccionadora S&C Scada-Mate.	22
Figura 6 - Configuração do sistema elétrico com self healing.	23
Figura 7 - Esquema da zona da rede elétrica que sofreu a atuação do sistema da self healing.	24
Figura 8 - Diagrama unifilar de uma rede elétrica com a configuração radial	27
Figura 9 - Fluxograma simplificado do self healing.	32
Figura 10 - Trecho da rede de distribuição analisado.	32
Figura 11 - Diagrama unifilar do modelo de rede sem a aplicação do self healing. ..	33
Figura 12 - Ocorrência hipotética da falta monofásica no ramo 2.	34
Figura 13 - Diagrama unifilar do modelo de rede com a aplicação do self healing. ..	35
Figura 14 - Atuação do self healing, durante uma falta no modelo de rede.	35
Figura 15 - Atuação do self healing, durante faltas simultâneas da segunda situação.	36
Figura 16 - Atuação do self healing, durante faltas simultâneas da terceira situação.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de continuidade individual.....	29
Tabela 2 - Indicadores de continuidade coletiva.	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre redes convencionais e inteligentes.....	18
---	----

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMAR	Companhia Energética do Maranhão
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrido em dia crítico por unidade consumidora
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
IAQ	Itaqui
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	<i>Self Healing</i>	16
2.1.1	Conceito	16
2.1.2	Principais Equipamentos Utilizados nos Sistemas com <i>Self Healing</i>	18
2.1.2.1	Sensores e Indicadores de Corrente de Falta	18
2.1.2.2	Religadores Automáticos das Redes de Distribuição de Energia	20
2.1.2.3	Chaves Seccionadoras	21
2.1.3	Caso de Atuação do <i>Self Healing</i> em um Sistema de Distribuição no Brasil	22
2.2	Motivos para Implementar o <i>Self Healing</i> no Sistema de Distribuição	25
2.3	Sistema de Distribuição	26
2.3.1	Definição e Regulamentação	26
2.3.2	Indicadores de Continuidade	28
2.3.2.1	Indicadores Individuais	28
2.3.2.2	Indicadores Coletivos	30
3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO CONVENCIONAL E UMA REDE COM A IDEIA DO <i>SELF HEALING</i>	31
3.1	Rede de Distribuição Analisada	32
3.2	Modelo Simplificado da Rede Elétrica sem a Aplicação do <i>Self Healing</i>	33
3.3	Modelo Simplificado da Rede Elétrica com a Aplicação do <i>Self Healing</i>	34
3.4	Análise dos Resultados das Situações Impostas ao Modelo	37

4	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico deve acompanhar a crescente demanda de carga, porém a energia elétrica fornecida aos consumidores tem que ser de qualidade e sem interrupção do serviço prestado pelas distribuidoras de energia.

Nesse sentido, as concessionárias de energia elétrica não podem violar os seus indicadores de qualidade e continuidade do fornecimento de energia, os quais são estabelecidos pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Entre esses indicadores os mais relevantes para as distribuidoras são: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Quando um ou mais desses índices são violados, as concessionárias de energia elétrica são responsabilizadas economicamente, tendo o dever de ressarcir os consumidores atingidos e, em alguns casos, são multadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Embora essas empresas se esforcem para manter a continuidade do serviço, em alguns casos, a interrupção de energia é inevitável devido à expansão do sistema, manutenção, medidas preventivas e até mesmo falhas. Para BERNARDON *et al.* (2015), quando ocorre uma interrupção devido a uma emergência, é vital restaurar a energia o mais rápido possível para evitar maiores transtornos aos consumidores.

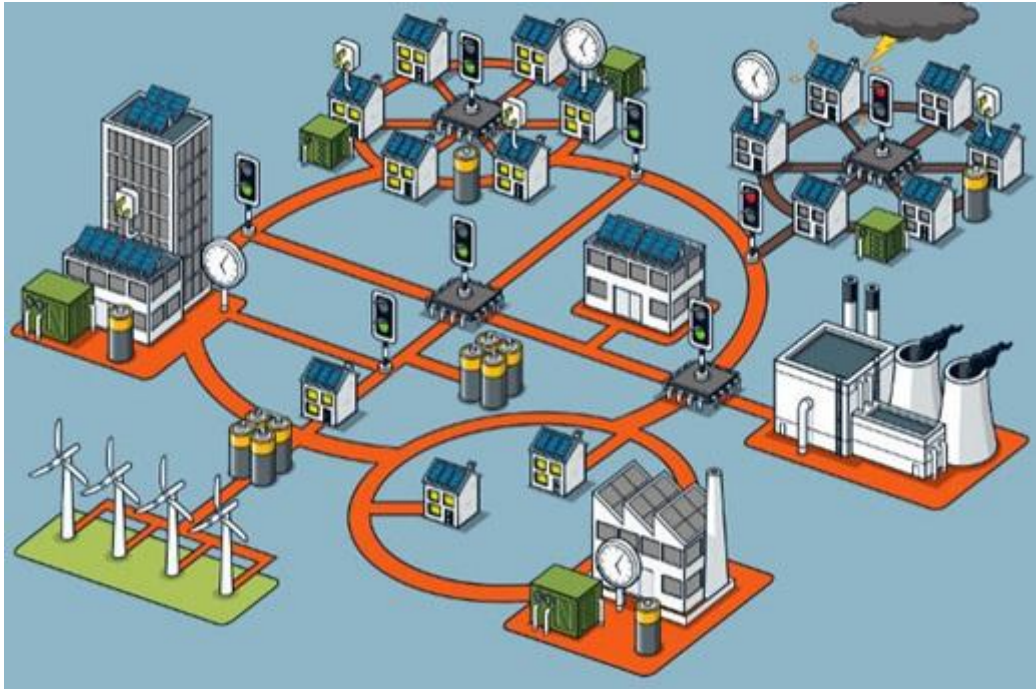
Assim, é imprescindível a implementação das ideias das *Smarts Grids* nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil, pois uma interrupção do serviço prestado pelas distribuidoras de energia elétrica traz um grande transtorno para todos os envolvidos, e com o uso das tecnologias proporcionadas pelas *Smarts Grids*, a continuidade do serviço é melhorada. E neste contexto, a ideia de auto recuperação (*Self Healing*) é de fundamental importância para garantir maior confiabilidade nos serviços prestados pelas distribuidoras de energia elétrica (NIU; ZHOU; QI, 2017).

O *Self Healing* é uma tecnologia relacionada ao controle e distribuição de energia, isolamento de falhas através de equipamentos de controle remoto, é responsável pela segmentação, processamento de componentes individuais de automação e, de forma automática e rápida, fazer as alterações necessárias na topologia da rede elétrica para permitir caminhos alternativos para o fluxo de energia, visando atingir a otimização da rede inteira para reduzir o número de consumidores afetados.

Devido às características mencionadas anteriormente, essa tecnologia pode ser aplicada nas concessionárias de distribuição de energia com o intuito de reduzir os danos causados por interrupções desnecessárias na rede, melhorando os indicadores de continuidade e qualidade da energia elétrica (CAVALCANTE P. LAND LOPEZ *et al.*, 2016). Na Figura 1, mostra-se a atuação de uma rede elétrica com o conceito do self healing, onde

o trecho defeituoso é isolado e rapidamente ocorre a reconfiguração da rede com o intuito de manter o fornecimento de energia elétrica para a maior parte das cargas do sistema.

Figura 1 - Configuração de um sistema elétrico com as redes inteligentes.



Fonte: <https://www.sabereletrica.com.br/smart-grids/>, (2021).

Uma aplicação eficiente de sistemas elétricos baseados na tecnologia da auto recuperação é o exemplo da Xiamen, no sul da China. O sistema implementado pode identificar e restaurar falhas em uma área de cerca de 1.600 quilômetros quadrados em uma rede de distribuição de 10 kV em poucos minutos, reduzindo as perdas para os consumidores, e dessa forma melhorar a qualidade dos serviços prestados (LIN MINGJIE SUN, 2017).

E levando em consideração as ideias da *Smart Grid* e do *Self Healing*, este trabalho cita algumas tecnologias que realizam a detecção de problemas na rede elétrica e analisa a resposta da rede de distribuição, que promove a atuação dos equipamentos de proteção e manobra, de modo que poucos consumidores sejam afetados.

Em seguida será feito uma comparação em um modelo de rede de distribuição em duas situações distintas: a primeira situação é a ocorrência de uma falta numa rede elétrica sem a implementação do *Self Healing* e a outra situação é a rede sofrendo o mesmo problema com a presença das tecnologias provenientes do *Self Healing*. Com os resultados obtidos dessa comparação é possível constatar os impactos positivos oriundos do sistema de auto recuperação e entre esses impactos, a redução dos custos operacionais por parte das distribuidoras e o melhoramento dos indicadores de qualidade de energia elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Demonstrar as vantagens de se aplicar as tecnologias relacionadas ao *Self Healing* nas redes de distribuição de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

A eficiência do sistema com o *Self Healing* em realizar a detecção e isolamento de problemas nas redes de distribuição de energia, a redução dos custos operacionais em relação a concessionária de energia e o melhoramento dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia.

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi subdividido em 4 capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentado a introdução, objetivos e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento deste trabalho.

No capítulo 3 será comparado e analisado o comportamento de uma rede elétrica tradicional e a resposta da mesma rede quando a ideia do *Self Healing* é implementada. Para atingir este objetivo, serão utilizados exemplos reais de redes de distribuição de energia com cargas hipotéticas. E ao final deste capítulo será exposto as consequências positivas da implementação do *Self Healing* no modelo estudado.

No capítulo 4 é apresentado as considerações finais e propostas de continuação da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Self Healing*

2.1.1 Conceito

Com o desenvolvimento das tecnologias da informação e suas implementações no sistema elétrico, criou-se um ambiente favorável para a automação do setor elétrico, principalmente nas redes de distribuição de energia elétrica e assim surgiu os conceitos relacionados as *smart grids* ou redes inteligentes. E a partir das principais definições estabelecidas pelas literaturas acadêmicas pode-se entender que o termo *smart grid* é toda aplicação de novas tecnologias de automação, computação e comunicação, que permitam monitorar e operar os elementos das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica existente em tempo real, ampliando o nível de controle e operação dos agentes responsáveis, implementando estratégias viáveis de controle na rede elétrica.

Para cenários onde os consumidores têm mais autonomia e mais interação com a rede de energia, é necessário o uso de um sistema automatizado baseado nas ideias da *smart grid*, que proporciona uma nova configuração da rede, descentralização de recursos e impulsiona a implementação da geração distribuída. O fluxo de energia se torna bidirecional e os consumidores não dependem mais de uma única fonte de geração de energia, proporcionando mais segurança.

Entre as ideias estabelecidas pela *smart grid*, o *self healing* que é o objeto de estudo deste trabalho, consiste no controle e distribuição das ações tomadas em um sistema elétrico, por meio do controle remoto de equipamentos inteligentes e independentes responsáveis pela segmentação de trechos da rede, isolamento de falhas, processamento de vários componentes de automação e mudanças automáticas e rápidas na topologia da rede necessárias para fornecer caminhos alternativos para o fluxo de energia, visando alcançar a otimização geral da rede e reduzir o número de consumidores afetados e também diminuir o tempo de reposição do serviço oferecido pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica.

De acordo com Bernardo (2011), as redes com *self healing* podem ser diferenciadas em relação aos modelos de implementação, que são: o modelo centralizado, o modelo distribuído nos equipamentos e o modelo distribuído nas subestações.

A implementação centralizada é um sistema com a inteligência concentrada no centro de comando baseado na ideia *Supervisory Control and Data Aquisition* (SCADA), que apresenta informações de toda a topologia da rede, níveis de tensão e corrente por meio do sensoriamento, carregamento dos alimentadores e outras características importantes da rede

elétrica. Além disso, esse modelo é muito dependente das redes de comunicação e consegue processar múltiplas falhas simultâneas.

Já o modelo distribuído nos equipamentos possui a sua inteligência descentralizada nos próprios equipamentos telecomandados da rede. Esse modelo apresenta uma elevada eficiência com poucos equipamentos instalados na rede elétrica e, contudo, não consegue processar múltiplas falhas no sistema.

E por último, temos o modelo distribuído nas subestações, que tem a sua inteligência distribuída nas subestações onde são definidas as suas zonas de atuação e por isso é necessária uma rede de comunicação entre as subestações e os equipamentos. Esse modelo sempre busca as configurações com as menores perdas e também permite que o controle do sistema seja feito por meio de uma subestação ou de um centro de comando.

A implementação do *self healing* requer desafios na infraestrutura do setor elétrico e tecnologias específicas como equipamentos de comunicação, controle e seccionamento, podendo atuar como agentes independentes, comunicando e operando de forma cooperativa com os demais. Visando a crescente necessidade de reconfiguração, a rede deverá incluir chaves seccionadoras e religadores inteligentes com capacidade de processamento, responsáveis pelos nós da rede, com o posicionamento estratégico na rede de distribuição.

Cada equipamento possui uma métrica que informa sua disponibilidade para participar de uma solução ou gerar um evento de recuperação. Além disso, os eventos de reset e sobrecarga são configuráveis para garantir que ocorram apenas no momento mais apropriado, por exemplo, ao final do ciclo de reset de um dispositivo de proteção ou após a detecção de uma sobrecarga. Além disso, é importante que haja comunicação bidirecional entre os dispositivos que realizarão o fatiamento do circuito. Por isso, esses dispositivos devem ser controlados remotamente e monitorados continuamente para avaliar sua confiabilidade. E também no plano básico de um sistema com *self healing*, a modelagem computacional deve ser incluída a fim de gerenciar totalmente as informações coletadas pela parte sensorial.

Como o sistema é muito dinâmico, esse monitoramento deve ser realizado com o auxílio de algoritmos de inteligência artificial, pois pode se adaptar e conseguir resolver as diferentes situações que possam surgir (AMIN, 2005). E de acordo com SPATTI (2011), os principais algoritmos utilizados são baseados nas redes neurais artificiais, ou na lógica *Fuzzy*, ou nas redes de *Petri* ou nas redes de causa e efeito.

No Quadro 1, mostra-se as principais diferenças entre as redes convencionais e inteligentes:

Quadro 1 - Comparação entre redes convencionais e inteligentes.

Crítérios	Rede convencional	Rede inteligente
Comunicação	Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração	Geração centralizada	Geração distribuída
Proteção	Atuação menos eficiente e com maior custo operacional	Atuação mais eficiente e com menor custo operacional
Instrumentação	Poucos sensores	Sensores ao longo da rede
Reconfiguração	Restabelecimento manual	Restabelecimento automático
Operação e faltas	Falhas e blackouts	Adaptativa e isolante
Teste da rede	Testes e verificações manuais	Testes e verificações remotas
Controle	Controle limitado	Controle generalizado
Consumidor	Consumidor passivo sem opções	Consumidor ativo com muitas opções

Fonte: o próprio autor, (2022).

2.1.2 Principais Equipamentos Utilizados nos Sistemas com *Self Healing*

Os dispositivos que promovem a aplicação do *self healing* em uma rede de distribuição de energia elétrica, são dotados de microprocessadores, que são capazes de comunicar-se entre si e, dessa forma, tomar uma decisão rápida e precisa para a detecção e isolamento de um defeito na rede elétrica. E entre esses equipamentos, os que mais se destacam são os sensores e indicadores de corrente de falta, os religadores e as chaves seccionadoras.

2.1.2.1 Sensores e Indicadores de Corrente de Falta

O sensor usado em uma aplicação do *self healing*, tem a função de ler continuamente os níveis máximos e mínimos de tensão e corrente, detectando, assim, quaisquer alterações com o nível exigido. Quando uma mudança é percebida, o sensor se comunica diretamente com seu centro de coleta de dados, e o centro aciona os procedimentos necessários para corrigir o evento. Esta comunicação é feita através de uma frequência de rádio gratuita entre 918 e 919,2 MHz, que pode chegar a 100000 metros de distância. Assim que a falha for identificada, o dispositivo pode ser reiniciado de forma manual, ou pelo tempo de *delay* do equipamento, ou quando o sensor detecta o retorno de tensão na linha que está sendo monitorada.

Um exemplo de sensor é o sensor óptico *GridAdvisor Insight* do fabricante *Eaton*, cujo modelo RG235 usa uma plataforma de medição totalmente óptica para exatidão e precisão excelentes tanto de tensão quanto de corrente, podendo ser usado em redes de distribuição aéreas com classes de tensão de 4 kV a 35 kV. Na Figura 2 é apresentada uma imagem desse tipo de sensor.

Figura 2 - Sensor óptico *GridAdvisor Insight*, modelo RG235.



Fonte: <https://www.eaton.com/br/pt-br/catalog/utility-and-grid-solutions/gridadvisor-optical-sensor.technical.html> ,
(2021).

Já o indicador de falta é um equipamento que pode ser usado em todo um sistema de distribuição aéreo como uma forma econômica de reduzir o tempo de localização das faltas e melhorar os índices de confiabilidade e desempenho da rede. Um exemplo desse equipamento é o indicador de falta AR360 da marca *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Indicador de falta AR360.



Fonte: <https://selinc.com/pt/products/AR360/#tab-overview>, (2021).

2.1.2.2 Religadores Automáticos das Redes de Distribuição de Energia

Os religadores são interruptores elétricos automáticos de média tensão, que possuem a função de religar um trecho de um sistema elétrico, de forma contínua de acordo com um determinado número de vezes estabelecido na sua programação. Esses dispositivos são dotados de microprocessadores, que têm a função de auxiliar sua percepção e tomada de decisão.

O funcionamento de um religador automático ocorre da seguinte maneira: primeiro ele detecta uma situação de sobrecorrente, e a partir disso interrompe a circulação da corrente abrindo seus contatos. Os contatos permanecem abertos por um determinado período de tempo, denominado tempo de religamento, e se o problema for apenas temporário, então o religador restaura a energia elétrica do trecho que estava sendo afetado. Esses dispositivos podem ser monopolares ou tripolares, e oferecem o máximo possível de continuidade dos serviços elétricos aos clientes das concessionárias, com simplicidade e economia.

Na Figura 4 pode se ver um religador automático sendo usado em uma rede de distribuição de energia.

Figura 4 - Religador sendo aplicado em uma rede elétrica.

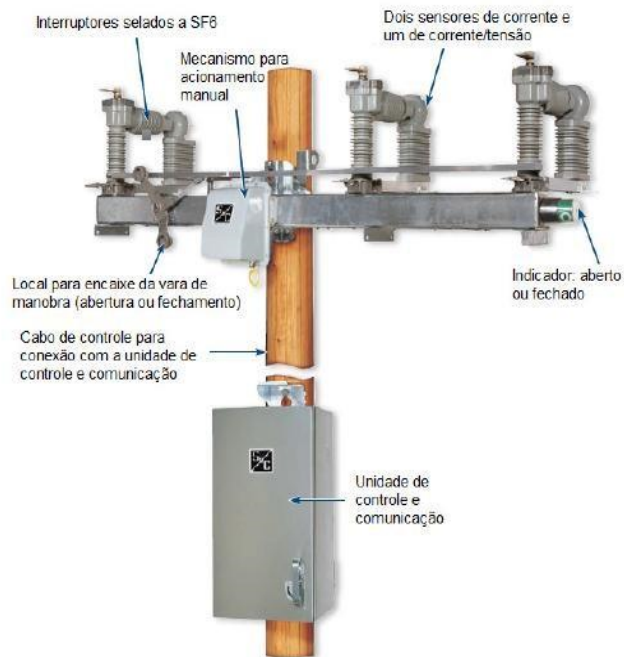


Fonte: <http://www.adolphoeletricista.com.br/religadora-automatica/>, (2021).

2.1.2.3 Chaves Seccionadoras

Os interruptores de isolamento são dispositivos presentes na configuração da rede de distribuição porque podem compensar interrupções no fornecimento de energia em caso de falha permanente. Na composição da rede inteligente são utilizadas chaves seccionadoras automáticas, que possuem mecanismos elétricos de abertura e fechamento. Dentre esses dispositivos, o mais destacado é a chave seccionadora *S&C Scada-Mate*, pois pode isolar falhas remotamente e realizar a recuperação do sistema, garantindo assim que a duração das falhas de energia seja reduzida e ocorra o melhoramento dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica. A Figura 5 apresenta um exemplo de chave seccionadora.

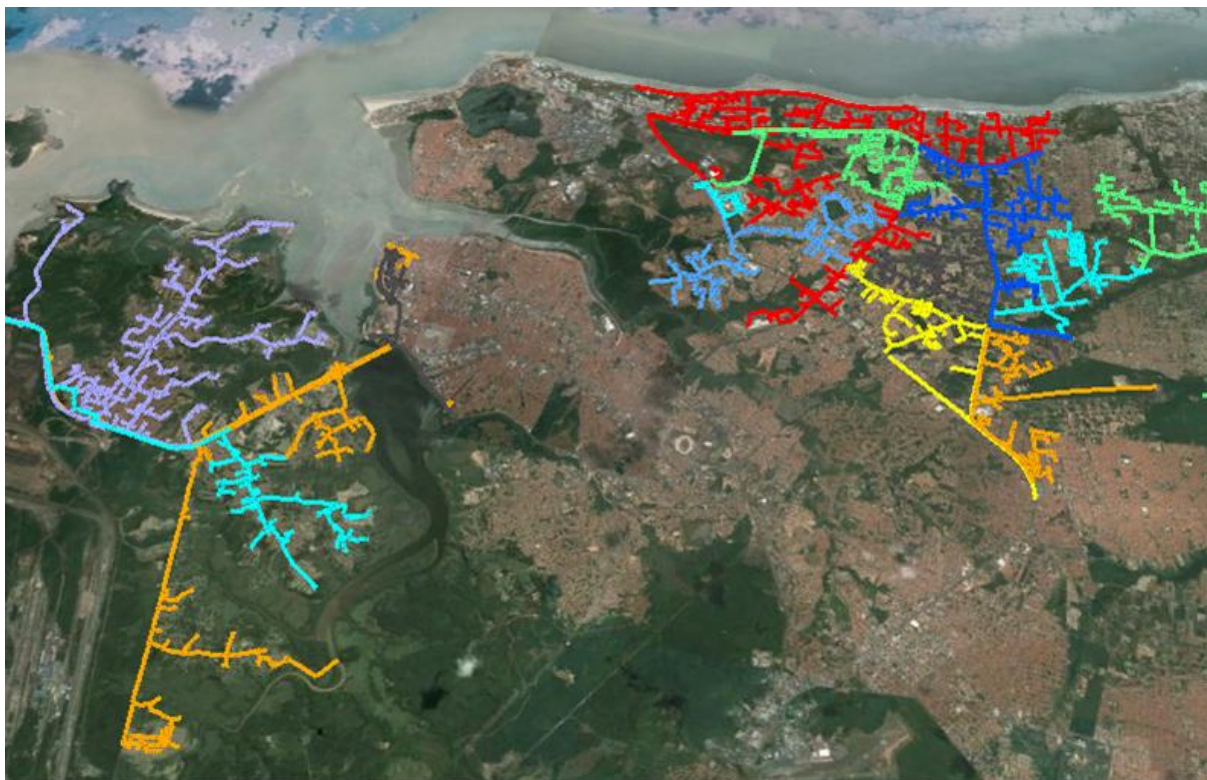
Figura 5 - Chave seccionadora S&C Scada-Mate.



Fonte: ZIMMER, (2014)

2.1.3 Caso de Atuação do *Self Healing* em um Sistema de Distribuição no Brasil

Desde dezembro de 2014, a Companhia Energética do Maranhão (CEMAR) vem utilizando o sistema centralizado de *self healing* desenvolvido pela Elipse Software em parceria com a *PowerSysLab*. Esse sistema foi implementado com os equipamentos localizados na cidade de São Luís - MA, em uma região urbana, abrangendo 81 alimentadores e 100 religadores, sendo necessário, em certas situações, reposicioná-los. A instalação destes equipamentos foi realizada de acordo com suas específicas áreas de pré-operação em três circuitos, levando em consideração critérios de manobra e divisão de cargas (elipse, 2016), conforme Figura 6.

Figura 6 - Configuração do sistema elétrico com *self healing*.

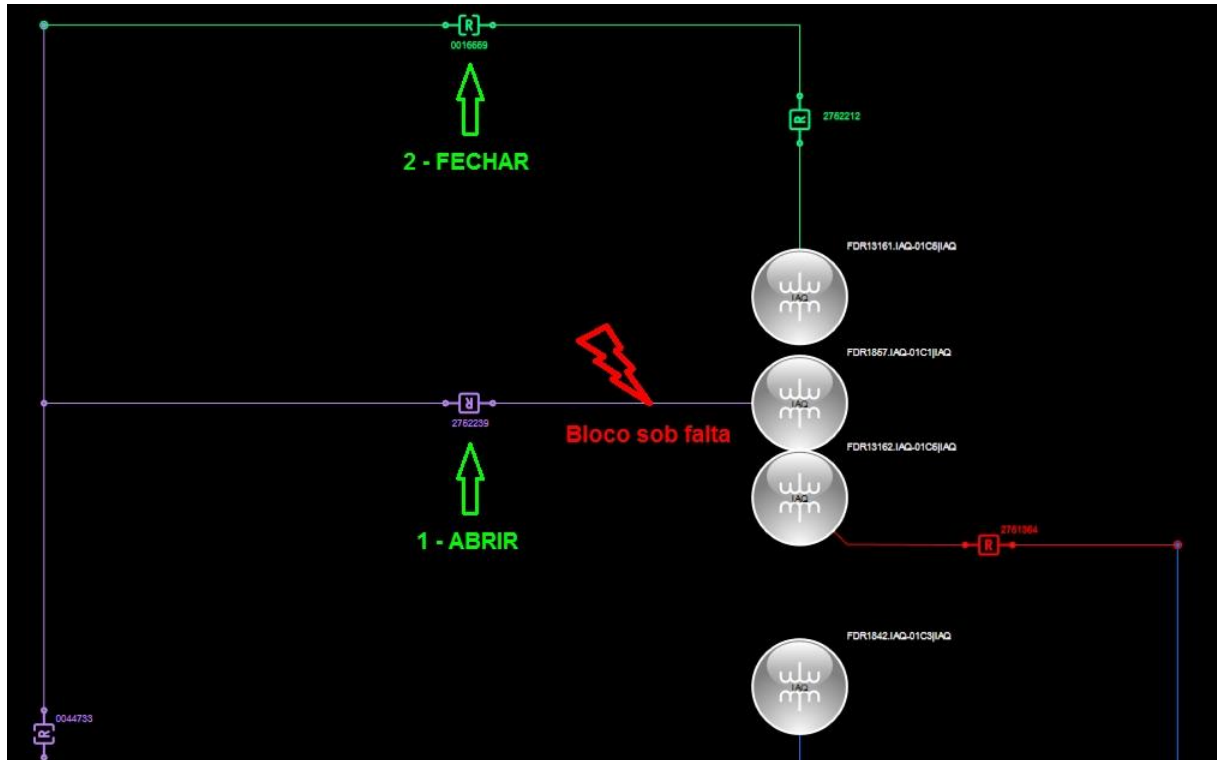
Fonte: https://www.elipse.com.br/wp-content/uploads/2015/08/CEMAR_georef_HD.jpg, (2015).

Em 3 de fevereiro de 2015, o sistema de auto recuperação concluiu com sucesso sua primeira operação. Após a proteção do disjuntor 11C1 (alimentação 1) da subestação Itaqui (IAQ) ter sido permanentemente ativada, o dispositivo encerrou o ciclo de religamento e entrou no estado de bloqueio devido à queda de uma árvore. Isso levou à função desta tecnologia de isolar a parte entre o disjuntor da subestação 11C1 e o religador do poste (2752239), e restaurar a área de interrupção através do alimentador 11C5 (alimentador 5) que também pertence à subestação IAQ, conforme o esquema da Figura 7 (elipse, 2016).

Neste incidente, 9.463 do total de 9.756 clientes do Alimentador 1 foram recuperados, e toda a operação foi concluída em 10 segundos. É importante ressaltar que o *self healing* levou apenas 132 ms para calcular a sequência de operações a serem executadas, o comando de abertura do religador (2752239) levou 5 segundos para receber sua confirmação e o comando de fechamento do religador (0016659) mais 5 segundos. Portanto, o sistema pode isolar a falha e redefinir o circuito de desligamento em um total de apenas 10 segundos. Além de obter grandes benefícios em termos de tempo de recuperação de carga parcial, esta ferramenta também faz pleno uso dos recursos de operação e manutenção, pois o despachante em tempo real enviou uma equipe de plantão para cobrir apenas o trecho entre a subestação IAQ e o religador de poste (2752239) com defeito, como é mostrado na Figura 7.

Assim, a CEMAR conseguiu economizar parte de seus custos de operação e os consumidores da zona atingida pelo defeito na rede, não sofreram muita perda financeira.

Figura 7 - Esquema da zona da rede elétrica que sofreu a atuação do sistema da *self healing*.



Fonte: https://www.elipse.com.br/wp-content/uploads/2015/08/CEMAR_georef_HD.jpg, (2016).

Abaixo são expostos, os principais benefícios proporcionados por esta tecnologia da Elipse à CEMAR (elipse, 2016):

- Recomposição segura e estável da maior carga possível em um intervalo inferior a 3 minutos, resultando em melhorias nos indicadores de duração e frequência (DEC e FEC);
- Ao considerar eventos de sobrecarga, a solução permite que desligamentos sejam evitados, pois os agentes inteligentes presentes na rede elétrica conseguem identificar os eventos auto extintos e de forma automática restabelece o fornecimento de energia elétrica. E com isso, também proporciona melhorias nos indicadores de duração e frequência (DEC e FEC);
- Pelo fato de não utilizar lógicas de *scripts* para calcular as manobras, a solução foi de rápida implantação, apresentando baixo custo de manutenção.

2.2 Motivos para Implementar o *Self Healing* no Sistema de Distribuição

Um grande problema enfrentado pelo sistema de distribuição de energia está relacionado à necessidade das concessionárias de localizar e isolar as falhas. Essa dificuldade acaba criando um longo tempo de espera, pois leva em média de 50 a 80 minutos antes que a equipe de emergência da concessionária possa localizar a falha e consertá-la, e isso provoca um aumento de perdas financeiras tanto para a distribuidora de energia em caso de descumprimento dos critérios estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST, a concessionária sofrerá as penalidades previstas na Resolução nº. 63/2004 podendo ser multada, de acordo com a avaliação da equipe de fiscalização, como também para os consumidores, principalmente aqueles do setor comercial e industrial (STASZESKY, 2005).

Para esse problema, a solução mais correta é aplicar o conceito de auto recuperação no sistema de distribuição de energia. Como o nome sugere, essa tecnologia visa recuperar a rede com o mínimo de intervenção humana por parte das empresas responsáveis pela distribuição de energia com o intuito de reduzir os danos causados por interrupções desnecessárias, e conseqüentemente melhora os indicadores de continuidade e a qualidade da energia elétrica fornecida (CAVALCANTE P. LAND LOPEZ *et al.*, 2016).

Conforme o órgão *National Institute of Standards and Technology* (NIST), os agentes integrantes dos sistemas elétricos com a implementação do *self healing* são idênticos aos das redes elétricas convencionais. E entre esses agentes, os de geração, transmissão e distribuição, já possuem certo grau de automação.

E nesse contexto da possibilidade de adoção do *self healing*, podem surgir novos serviços e modelos de mercado no setor elétrico, e diante disto, os agentes que sofreriam mais mudanças seriam os seguintes:

- **Mercado** – os agentes de mercados serão os mais afetados, pois possuem mais contato com os outros agentes, e neste contexto, o mercado se tornaria descentralizado e interativo, permitindo que os consumidores, por meio de agentes de serviços, entrem em contato com os agentes de geração de energia, possibilitando a comercialização direta de energia;
- **Operações** – corresponde a toda operação do sistema, seja de equipamentos e equipes de operação e manutenção, como pessoal especializado de escritório para gerir o grande volume de dados vindo dos equipamentos conectados à rede. A segurança, confiabilidade e qualidade das comunicações entre todas as camadas do sistema dependem destes agentes. E com a auto reconfiguração da rede, a intervenção humana antes necessária para restaurar manualmente a rede agora pode ser realizada remotamente, resultando em apenas uma intervenção parcial e,

em alguns casos, nenhuma intervenção humana para reconfiguração da rede elétrica;

- **Serviços** – são os agentes responsáveis pelas operações de faturamento, gerenciamento de contas de consumidores e manutenção de sistemas. Para estes agentes, as principais mudanças estão relacionadas à segurança cibernética e física do sistema;
- **Distribuição** – são os agentes responsáveis pela interligação entre a transmissão e consumo de energia. Estes agentes passarão a se comunicar em tempo real com os agentes das operações, permitindo uma gestão otimizada dos fluxos de potência e um controle mais preciso sobre os recursos da distribuição;
- **Consumo** – são todos os consumidores, sejam industriais, comerciais ou residenciais. E por meio de medidores eletrônicos e comunicação com agentes de serviço, os consumidores terão um papel ativo no sistema por meio de tecnologias de geração distribuída ou por meio da gestão otimizada de seus perfis de consumo.

Além disso, no Brasil, outros motivadores para a implantação do *self healing* são: a eficiência comercial e energética, uma maior confiabilidade do sistema elétrico por meio da garantia de segurança operacional, eliminação de perdas não técnicas e melhoria na qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

2.3 Sistema de Distribuição

2.3.1 Definição e Regulamentação

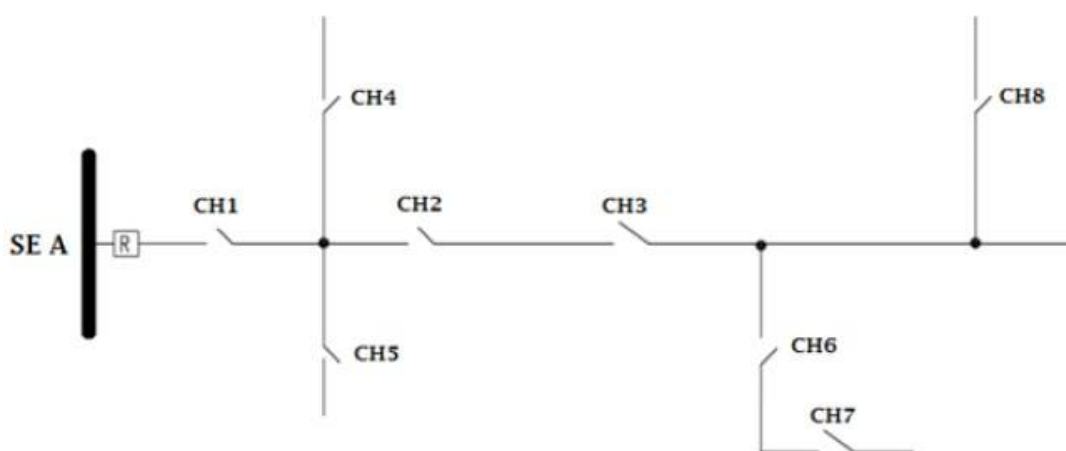
O sistema de distribuição é a parte do setor elétrico interligado, responsável pela entrega da energia gerada ao consumidor, e segundo Moura (2010) possui os seguintes segmentos:

- **Sistema de distribuição** - responsável pela interligação de subestações de transmissão 230, 500, 750 kV e subestações de distribuição, geralmente com tensão de 69 kV ou 138 kV;
- **Subestação (SE)** - um ponto de interconexão usado para modificar níveis de tensão, controlar tensões e níveis de carga, segmentar linhas de transmissão e usar equipamentos de proteção e controle para distribuir energia através de circuitos alimentadores;

- **Alimentador de distribuição primária de MT (média tensão)** - conduz energia para consumidores de média tensão e transformadores de distribuição, sendo que a tensão primária é superior a 1 kV e inferior a 25 kV. Transformador de distribuição - O transformador é responsável por reduzir o nível de tensão a um nível de consumo de baixa tensão;
- **Linha de alimentação de distribuição secundária de BT (baixa tensão)** - através do transformador de distribuição para fornecer energia aos consumidores em baixa tensão, a tensão secundária é inferior a 1000 V.

Outra informação importante sobre as redes de distribuição de energia elétrica é em relação a configuração atual do sistema, que a mais consolidada é a radial, cujo seu fluxo de corrente ocorre em uma única direção. Desta forma, a fonte de alimentação sai da subestação pelo tronco alimentador para chegar ao consumidor final, como pode ser visto na Figura 8 (CARVALHO, 2006).

Figura 8 - Diagrama unifilar de uma rede elétrica com a configuração radial



Fonte: Moura, (2011).

A partir de tudo que foi mencionado, é possível notar a necessidade que se tenha todo um controle em tempo real dos sistemas de distribuição, pois este influencia diretamente na qualidade da energia. Por isso foi criado todo um processo de regulamentação, o qual é seguido pelas concessionárias.

E a partir disso, existiu dois pontos-chave no estabelecimento de regulamentos para as distribuidoras de energia elétrica. O primeiro foi a formulação do decreto do Ministério da Hidreletricidade e Energia -DNAEE-nº 46/1978, que visa implementar a meta de controle da continuidade do fornecimento de energia. Essas metas se aplicam aos indicadores de

qualidade, DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora). O segundo momento, muito importante para o estabelecimento desse processo, foi a Resolução nº 24/2000 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a quem cabe reeditar as normas de continuidade. Essa reformulação exige que os franqueados enviem relatórios de indicadores atualizados e punam quem não cumprir os parâmetros adequados do fornecimento de energia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

Em 2008, foram criados os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), com o intuito de normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. A criação destes documentos foi feita através da junção da ANEEL com os demais agentes relacionados à distribuição de energia no Brasil (ANEEL, 2021). E entre esses documentos, o módulo 8 fornece os critérios dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica.

A ANEEL estabelece limites para métricas de continuidade. Os distribuidores devem compensar financeiramente as unidades consumidoras quando essas restrições forem violadas. A compensação é automática e deve ser paga em até dois meses após o mês em que o indicador foi calculado (o mês em que ocorreu a interrupção) (ANEEL, 2021).

2.3.2 Indicadores de Continuidade

De acordo com o módulo 8 do PRODIST, os indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica são parâmetros que permitem analisar a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias. Essa análise é realizada através do cálculo desses indicadores, que são classificados como individuais e coletivos. Esses indicadores são apurados em períodos mensais, trimestrais e anuais, com exceção do indicador DICRI, que deverá ser apurado por interrupção ocorrida em Dia Crítico.

2.3.2.1 Indicadores Individuais

Na Tabela 1 apresenta-se os principais detalhes sobre os Indicadores de continuidade individuais apurados para todas as unidades consumidoras ou por ponto de conexão que estão conectados ao sistema de distribuição de uma concessionária.

Tabela 1 - Indicadores de continuidade individual.

Indicadores individuais	Definição	Fórmula
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora.	$DIC = \sum_{i=1}^n t(i)$
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora.	$FIC = n$
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão, o indicador DIMC é definido para períodos mensais.	$DMIC = t(i)_{máx}$
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrido em dia crítico por unidade consumidora, o indicador DICRI é definido para períodos diário.	$DICRI = t_{crítico}$

Fonte: o próprio autor, (2022).

Sendo:

- i = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n ;
- n = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;
- $t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração;
- $t(i)_{máx}$ = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada, expresso em horas e centésimos de horas;
- $t_{crítico}$ = duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

2.3.2.2 Indicadores Coletivos

Agora, na Tabela 2 apresenta-se os principais detalhes sobre os Indicadores de continuidade coletivos apurados para todas as unidades consumidoras ou por ponto de conexão que se encaixam como conjuntos elétricos e estão conectados ao sistema de distribuição de uma concessionária.

Tabela 2 - Indicadores de continuidade coletiva.

Indicadores coletivos	Definição	Fórmula
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora.	$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc}$
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora.	$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc}$

Fonte: o próprio autor, (2022).

Sendo:

- *DIC* = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;
- *FIC* = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções;
- *i* = índice de unidades consumidoras atendidas em baixa ou média tensão faturadas do conjunto;
- *Cc* = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto.

Todos esses indicadores mencionados são fundamentais para a constante melhoria do sistema elétrico brasileiro, pois é a partir deles que a ANEEL fiscaliza a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras de energia elétrica, que no contexto nacional possui DEC limite igual a 13,31 horas e FEC limite de 10,33 interrupções.

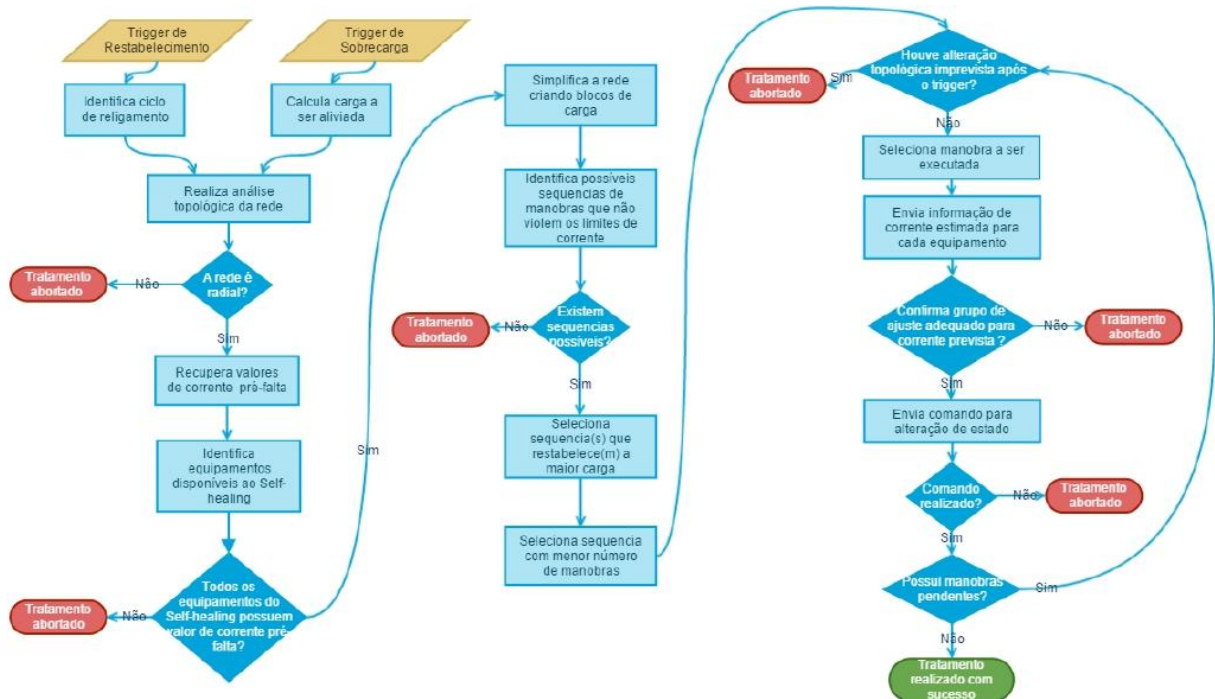
3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO CONVENCIONAL E UMA REDE COM A IDEIA DO *SELF HEALING*

Os sistemas de distribuição de energia elétrica ainda apresentam alguns problemas, causando muitos transtornos aos clientes e distribuidores. E entre esses problemas, a ausência de energia em caso de falhas em uma parte da rede, faz com que todo o sistema fique sem abastecimento devido ao efeito cascata, já que não se consegue formar rotas de fugas automáticas para que a energia seja entregue, e o outro problema é o tempo que leva para restabelecer parcial ou totalmente o fornecimento de energia aos consumidores são os dois pontos, que a tecnologia do *self healing* combate e promove a diminuição de suas ocorrências (LAMBIASE, 2012).

Os principais causadores de distúrbios na rede elétrica são fatores como a queda de árvores e descargas atmosféricas (CARVALHO, 2011). Com o intuito de melhorar o sistema de detecção de problemas na rede, diminuir o tempo de operação dos agentes da concessionária e também melhorar os indicadores de qualidade da energia fornecida aos consumidores, as distribuidoras de energia elétrica começaram a investir nas tecnologias relacionadas ao *self healing*.

Nesta seção, será comparado e analisado o comportamento de uma rede elétrica tradicional e a resposta da mesma rede quando o conceito de autocura é implementado. Para atingir este objetivo, serão utilizados exemplos reais de redes de distribuição de energia com cargas hipotéticas, e aplicações do *self healing* serão propostas com base no método utilizado neste trabalho.

O estudo em questão, é baseada na recomposição do sistema elétrico afetado e ocorre em duas etapas, primeiramente segue a premissa de isolar o trecho da falha, com a devida atuação dos aparelhos de proteção e corte da linha em relação ao posicionamento da falha, em seguida as cargas não afetadas são religadas por meio de manobras eficientes na rede elétrica. O fluxograma da Figura 9, evidencia o funcionamento do sistema *self healing*.

Figura 9 - Fluxograma simplificado do *self healing*.

Fonte: <https://www.elipse.com.br/wp-content/uploads/2016/09/shf2.jpg>, (2022).

3.1 Rede de Distribuição Analisada

A rede de distribuição escolhida é um trecho existente na cidade de São Luís – MA, como é mostrado na linha de cor ciano da Figura 10. A partir desta imagem foi criado um exemplo simplificado de aplicação do conceito de *self healing*.

Figura 10 - Trecho da rede de distribuição analisado.



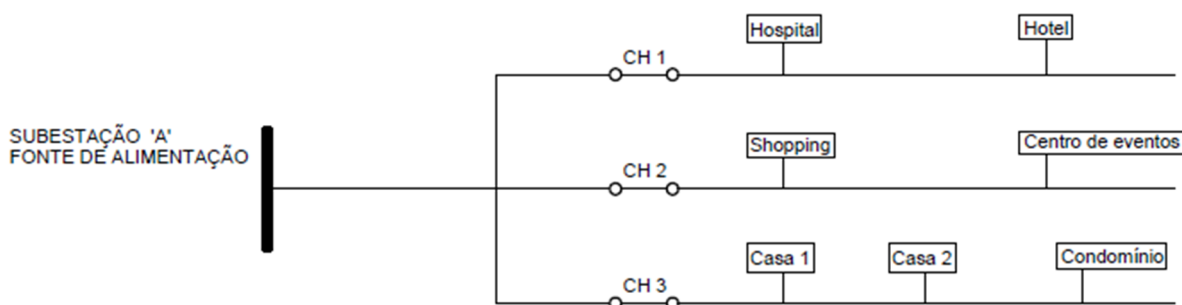
Fonte: editado pelo autor a partir de imagem da CEMAR, (2022).

Nesse trecho será considerado somente os consumidores residenciais e comerciais para fins didáticos, os quais são alimentados de forma radial por uma subestação. Na situação convencional, esses consumidores podem sofrer com os danos causados pela ausência de energia elétrica devido a ocorrência de uma falta nessa rede, pois não se tem um controle rápido de detecção de faltas, dessa forma fica difícil determinar de imediato onde ocorreu a falha. Assim, esses consumidores ficariam à espera da manutenção corretiva.

3.2 Modelo Simplificado da Rede Elétrica sem a Aplicação do *Self Healing*

O modelo simplificado é o exemplo mais simples para o entendimento desta seção e foi criado a partir do trecho da rede mencionado anteriormente, esse exemplo foi baseado na configuração radial das redes de distribuição que é a mais presente no setor elétrica brasileiro, além disso, as principais cargas do modelo estão distribuídas da seguinte forma: um Hospital e um Hotel no ramo 1 do circuito, um *Shopping* e um centro de eventos no ramo 2, e no ramo 3 do modelo temos algumas residências e um condomínio. Todas essas cargas são alimentadas pela subestação 'A', como é mostrado na Figura 11.

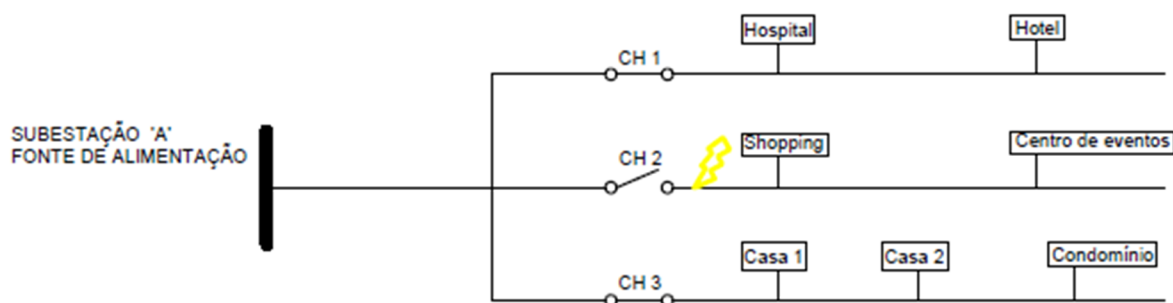
Figura 11 - Diagrama unifilar do modelo de rede sem a aplicação do *self healing*.



Fonte: o próprio autor, (2022).

No contexto convencional, o circuito do diagrama unifilar acima, apresenta as chaves manuais CH 1, CH 2 e CH 3 que protegem respectivamente os ramos 1, 2 e 3 deste circuito. Considerando que ocorra uma falta monofásica no trecho entre a chave CH 2 e o *Shopping*, devido a uma queda de árvore, todo o ramo 2 desse circuito ficará sem energia elétrica por causa da abertura da chave CH 2, conforme é visto na Figura 12.

Figura 12 - Ocorrência hipotética da falta monofásica no ramo 2.



Fonte: o próprio autor, (2022).

Após o acontecimento desse evento, provavelmente algum consumidor afetado entrará em contato com a concessionária local, e esta enviará uma equipe para solucionar o problema seguindo os procedimentos de primeiro detectar o ponto da falta, depois disso, começa o trabalho de correção do problema e por fim ocorrerá a reenergização dos consumidores do ramo 2.

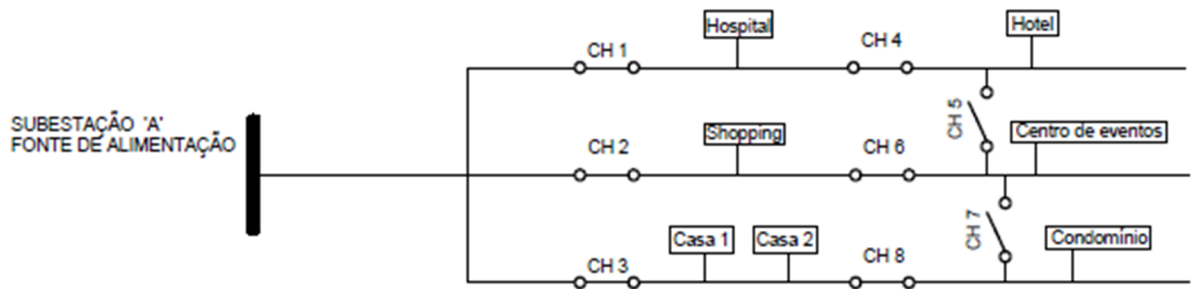
Todos esses procedimentos são realizados em um tempo entre 50 a 80 minutos, de acordo com Staszsky (2005), e esse tempo gasto irá provocar perdas financeiras tanto aos consumidores pela paralisação de suas atividades econômicas como para a própria concessionária que deixa de faturar o consumo de seus clientes afetados. Além disso, os indicadores de continuidade que avaliam a qualidade do serviço fornecido pela CEMAR podem piorar e assim diminuir a confiabilidade dessa concessionária perante aos seus clientes e principalmente na fiscalização feita pela ANEEL.

Agora, no momento em que as tecnologias do *self healing* são aplicadas nesse circuito em análise, todos os procedimentos mencionados na ocorrência de um defeito na rede elétrica ficam mais eficientes e rápidos. Para essa análise, é considerado que os *softwares* necessários para as etapas de identificação e localização dos distúrbios, já existem.

3.3 Modelo Simplificado da Rede Elétrica com a Aplicação do *Self Healing*

Agora, usando o mesmo modelo simplificado, porém com a aplicação centralizada das ideias do *Self Healing*. Nesta situação o circuito apresenta a implementação de 8 chaves seccionadoras *S&C Scada-Mate* automáticas, que operam de forma inteligente, isolando as falhas remotamente e realizando a recuperação do sistema. As chaves CH 1, CH 2, CH 3, CH 4, CH 6 e CH 8 são normalmente fechadas, enquanto as chaves CH 5 e CH 7 são normalmente abertas, isso tudo pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Diagrama unifilar do modelo de rede com a aplicação do *self healing*.



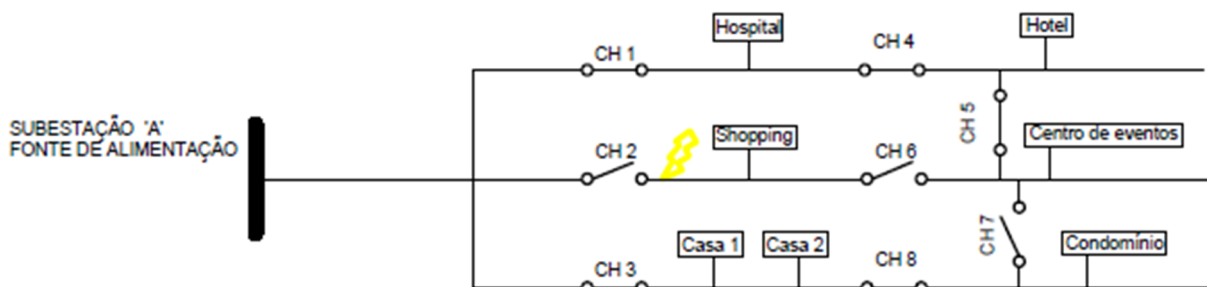
Fonte: o próprio autor, (2022).

Além disso, os sensores de leitura dos níveis máximos e mínimos de tensão e corrente, também são usados na rede para auxiliar no funcionamento dessas chaves seccionadoras e no controle de atuação dos demais equipamentos do sistema de proteção.

Se ocorrer a mesma falta monofásica nesta rede com o *self healing*, a resposta automática da proteção desse sistema acontece da seguinte forma, no momento da detecção da falta próxima ao *Shopping*, através das informações coletadas e retransmitidas de tensão, corrente e posição atual da chave, são iniciados os procedimentos de restauração do sistema com as decisões característica de fechamento ou abertura das respectivas chaves.

A chave CH 2 atua e interrompe a alimentação do ramo 2. Em seguida a seccionadora CH 6, em virtude das informações compartilhadas pela chave CH 2, verifica que o trecho entre elas foi afetado e isola o trecho onde ocorreu o defeito, e alguns segundos depois a chave CH 5 é fechada e assim o fornecimento de energia é mantido para o centro de eventos e todos os consumidores que se encontram após a chave CH 5, por um caminho alternativo do circuito. A figura 14 mostra o resultado da atuação do *self healing* durante um distúrbio na rede elétrica.

Figura 14 - Atuação do *self healing*, durante uma falta no modelo de rede.



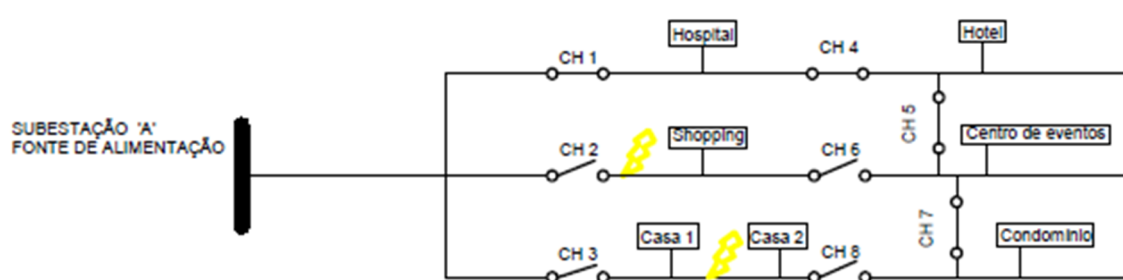
Fonte: o próprio autor, (2022).

Depois de toda a resposta do sistema baseado no *self healing*, que dura poucos minutos para ser consolidada, a concessionária local já recebe a informação do ponto da falta e enviará uma equipe de manutenção para corrigir o problema e restabelecer a alimentação

do trecho isolado. Assim, esse sistema promove uma redução nos custos econômicos de operação e manutenção da concessionária, e melhora o serviço prestado para os consumidores.

A fim de comprovar que o *self healing* pode regenerar a rede em várias situações, a análise irá prosseguir em conformidade com a metodologia aplicada no trabalho de Lambiase (2012). No caso de duas faltas monofásicas simultâneas ocorrendo no trecho próximo ao Shopping e no trecho entre as casas, como é mostrado na imagem abaixo.

Figura 15 - Atuação do *self healing*, durante faltas simultâneas da segunda situação.

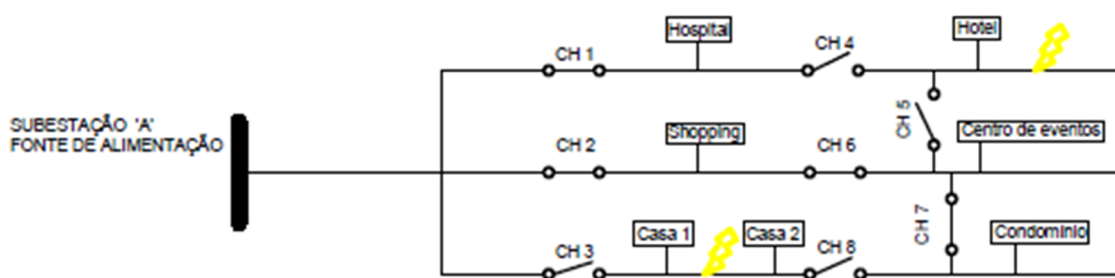


Fonte: o próprio autor, (2022).

O comportamento da rede neste caso é que no instante da detecção do defeito, as chaves CH 2 e CH 3 abrem e interrompem a alimentação dos seus respectivos ramos. Em seguida as seccionadoras CH 6 e CH 8 isolam os trechos onde ocorreram os defeitos e alguns segundos depois as chaves CH 5 e CH 7 são fechadas e restabelecem a energia elétrica para os demais consumidores dos ramos afetados do circuito. Após esses eventos, a concessionária já sabe os locais das faltas por meio da resposta de um *software* de localização, e enviará as equipes de manutenção para reparar os trechos desenergizados.

E a última situação analisada é o acontecimento de duas faltas monofásicas no modelo analisado, onde um dos pontos de distúrbio encontra – se próximo ao Hotel e o outro localiza – se entre as casas. Nesta situação, o sistema atua primeiramente na abertura das chaves CH 3 e CH 4, em seguida a seccionadora CH 8 isola o trecho defeituoso e depois de um tempo a chave CH 7 é fechada e restabelece a energia elétrica para o condomínio. A Figura 16 apresenta as alterações sofridas no sistema de distribuição analisado.

Figura 16 - Atuação do *self healing*, durante faltas simultâneas da terceira situação.



Fonte: o próprio autor, (2022).

Como visto acima, a concessionária deve realizar os mesmos procedimentos de operação mencionados anteriormente para corrigir o problema. Todas essas ações e eventos automatizados são característicos do processo do *self healing*, pois conduz de forma automática a reposição do maior número possível de cargas, de modo que todas essas operações duram no máximo alguns minutos, em comparação com as horas para o despacho de equipes de reparo na rede convencional.

3.4 Análise dos Resultados das Situações Impostas ao Modelo

A comparação realizada entre um modelo de rede elétrica atual sem o *self healing* e o mesmo modelo com a aplicação deste conceito, tem o objetivo de demonstrar as vantagens de se aplicar as tecnologias relacionadas ao *self healing* nas redes de distribuição de energia elétrica, principalmente a eficiência em realizar a detecção e isolamento de problemas nas redes de distribuição de energia, e como consequência promove a redução dos custos de operação da concessionária de energia e melhora os indicadores da qualidade de energia fornecida pela mesma.

Na primeira situação, é possível notar a baixa eficiência do sistema em realizar a detecção do ponto exato onde ocorreu o problema na rede de distribuição de energia, devido à ausência de sensores de níveis de tensão e corrente que ajudariam nessa questão. E após o acontecimento do problema e a desenergização de parte da rede, provavelmente algum consumidor afetado entra em contato com a concessionária local que envia uma equipe de manutenção, e essa perde muito tempo na ação de encontrar o ponto do defeito para em seguida realizar os reparos necessários.

Durante todos os procedimentos mencionados anteriormente, os consumidores afetados ficam sem energia elétrica por um longo tempo, entre 50 a 80 minutos de acordo com Staszsky (2005). E isso traz consequências negativas tanto aos consumidores como para a concessionária de distribuição, os consumidores comerciais como é o caso do

shopping e do centro de eventos deixam de exercer suas atividades econômicas e dessa forma sofrem perdas financeiras, enquanto a concessionária também sofre perdas financeiras por deixar de faturar com o consumo dos seus clientes afetados, pelo o aumento de gastos financeiros com as operações das equipes de manutenção e pelas multas oriundas do descumprimento dos limites dos indicadores DEC e FEC de qualidade do fornecimento de energia elétrica, estabelecidos pela ANEEL . Além disso, a distribuidora local pode perder sua credibilidade perante aos consumidores e a ANEEL, por fornecer um serviço com várias interrupções de longa duração de tempo.

Já nas três situações com a aplicação do *self healing* no modelo estudado, ficou bastante evidente os benefícios que o sistema automatizado traz consigo, pois o primeiro ponto positivo é a maior confiabilidade na rede elétrica com todos os seus equipamentos inteligentes conectados a um sistema de comunicação eficiente que garante um monitoramento em tempo real da rede, outro benefício é a utilização dos programas de detecção de distúrbios na rede que trabalham em conjunto com os sensores de corrente e tensão, fornecendo o ponto quase exato do problema e assim reduz de forma significativa o tempo de atuação das equipes de manutenção em todas as situações estudadas, e também promove a diminuição dos custos operacionais.

Além disso, o *self healing* promove uma maior confiabilidade na atuação da proteção da rede elétrica e de forma eficiente, pois as chaves inteligentes operam em conjunto, realizando o desvio da energia por um caminho alternativo possibilitando a continuação da alimentação das demais cargas do sistema e a isolação do trecho defeituoso. Esse processo ocorre de maneira muito rápida e eficiente, demandando apenas alguns minutos para sua execução. Isso gera uma grande economia para a concessionária, pois em nenhum momento ela deixa de alimentar os seus consumidores, repondo o maior número possível de cargas.

Todos esses benefícios, estimulam o melhoramento dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica, principalmente o DEC e o FEC, e também aumenta a credibilidade da distribuidora de energia perante os seus clientes e a ANEEL.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi esclarecido o conceito do *self healing* a partir do estudo da literatura existente, e pode ser definido como a característica do sistema elétrico em se recompor automaticamente após um defeito na rede, mantendo a alimentação do maior número possível de cargas. E a partir de todos os benefícios trazidos pela ideia do *self healing*, que foram comprovados na análise comparativa feita neste trabalho, pode-se concluir que o investimento nesta ideia é viável, pois ela só tem a agregar muitos pontos positivos e uma maior confiabilidade aos sistemas de distribuição do Brasil.

Entre esses benefícios destacam-se a reposta mais rápida e eficiente do circuito, devido a operação em conjunto das chaves inteligentes, realizando a recomposição de energia por um caminho alternativo possibilitando a continuação da alimentação das demais cargas do sistema e a isolação do trecho defeituoso, e também a diminuição do tempo e da frequência das interrupções no fornecimento de energia para os consumidores que não foram afetados diretamente pelo distúrbio. Dessa forma, ocorre o melhoramento dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica, principalmente o DEC e o FEC, e aumenta a credibilidade da distribuidora de energia perante os seus clientes e a ANEEL.

Porém, o conceito do *self healing* só pode ser implementado em redes elétricas com infraestrutura e tecnologias específicas como equipamentos de comunicação, controle e seccionamento, podendo atuar como agentes independentes, comunicando e operando de forma cooperativa com os demais, como as chaves seccionadoras e religadores inteligentes com capacidade de processamento. E por isso deve ser feito investimentos no setor elétrico para fornecer uma base, onde o *self healing* possa ser implementado. Assim, o sistema de distribuição pode entregar toda sua capacidade com uma maior qualidade, segurança e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

Além disso, o desenvolvimento deste estudo voltado para área de redes de distribuição, especialmente na aplicação do *self healing*, proporcionou a aprendizagem de conceitos que não constam na grade curricular do curso de Engenharia Elétrica, portanto, é uma experiência particular que agregou conhecimentos específicos de muito valor para minha formação acadêmica e profissional.

Como sugestões de trabalhos futuros nessa linha de pesquisa, é possível citar:

- Análise da implementação da tecnologia 5G nos sistemas de comunicação das redes de distribuição;

- Estudo de algoritmos de inteligência artificial implementados no controle das redes elétricas inteligentes;
- Análise dos custos financeiros para a implementação do *Self Healing* no setor elétrico.

REFERÊNCIAS

- ADOLPHO ELETRECISTA, saiba o que é religadora automática e como funciona, 2021. Disponível: <http://www.adolphoeletricista.com.br/religadora-automatica/>. Acesso em: 22 dez. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2021. Disponível: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 06 dez. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. Setor de Distribuição: A Distribuição da energia, 2021. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>. Acesso em: 06 dez. 2021.
- 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.
- BASSO, D. A.; KLOOS, F. Método de recomposição de redes de distribuição inteligentes baseados em sistemas de supervisão. Faculdade de Pato Branco. Pato Branco. 2017. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- BERNARDON, Daniel Pinheiro. Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicritérios. 2007. 160 f. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~joao/CE/Trabalho/Trabalho2012/2007BernardonTee.pdf>. Acesso em 10 dez. 2021.
- CARVALHO, M. R. Estudo Comparativo Entre Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DECANINI, Jose Guilherme M. S. Detecção, classificação e localização de faltas de curto circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando sistemas inteligentes. 2012. 124f Trabalho final, São Paulo, 2012. Disponível em: www.feis.unesp.br/.../engenhariaeletrica/pos.../089-tese_joseguilherme.p. Acesso em: 18 dez. 2021.
- EATON, soluções de sistema de automação de redes elétricas, 2021. Disponível: <https://www.eaton.com/br/pt-br/catalog/utility-and-grid-solutions/gridadvisor-optical-sensor.technical.html>. Acesso em: 17 dez. 2021.

ELIPSE SOFTWARE, elipse Self Healing agiliza a recomposição dos sistemas de energia da CEMAR, 2016. Disponível: <https://www.elipse.com.br/case/solucao-self-healing-da-elipse-software-agiliza-a-recomposicao-do-sistema-de-energia-da-cemar/>. Acesso em: 20 dez. 2021.

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.

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 (Pós-Graduação Mestrado Profissional em Energia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande Do Norte, Natal, RN, 2017.

LAMBIASE, DE C; Aplicação de self healling em sistemas elétricos. 2012. 55f. Trabalho de Conclusão de curso (graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Fortaleza, 2012.

LIMA, C. Desafios da migração tecnológica Smart Grid. Entrevistador: Sérgio Granato. Smartgridnews. 2014. Disponível em: <http://smartgridnews.com.br/entrevista-desafios-damigração-tecnologica-smart-grid-claudio-lima/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

MOURA, Carlos Jeferson da S.; Estudo para implantação de um sistema de recomposição automática para a rede de distribuição do campus PICI. 2011. 92f. Trabalho de Conclusão de curso (graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*), indicador de Falta AutoRANGER Aéreo, 2021. Disponível: <https://selinc.com/pt/products/AR360/#tab-overview>. Acesso em: 22 dez. 2021.

SPATTI, Danilo H. Automatização de Processos de Detecção de Faltas em Linhas de Distribuição Utilizando Sistemas Especialistas Híbridos. 2011. 190 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde...101205/.../Danilo.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2022.

STASZESKY, Douglas M.; CRAIG, Dean.; BEFUS, Craig. Advanced feeder automation is here. IEEE Power and Energy Magazine, v. 3, n. 5, p. 56- 63, Sept. / Oct. 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1507027&isnumber=32291>. Acesso em: 21 dez. 2021.

ZHENG, Y.; CONG, W. Distributed Fault Self-healing System and Identification and Management Method for Topology of The Smart Distribution Network. 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), p. 148–153, 2017.

ZIMMER, Camila. FRANCO, Manoel. Automação da distribuição de energia: recomposição automática de redes de distribuição. 2014. 89 f. Monografia (Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica, ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.