

## AUTO-RESTAURAÇÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### *SELF-HEALING IN THE ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK*

Jader Maciel Detomini<sup>1</sup>

Leandro Parejane<sup>2</sup>

Alexandre Vieira Oliveira<sup>3</sup>

#### RESUMO

As características do sistema elétrico brasileiro especificamente na distribuição de energia são susceptíveis a defeitos e interferências do ambiente externo. Neste trabalho é explorado o conceito de *Self-Healing* que é reconhecido por sua capacidade de detectar, isolar e se recompor de forma automática após uma falta. Isso é possível devido a seus componentes que compõem o sistema executarem ações pré-programadas de chaveamento como resposta imediata a falta ocorrida, atuando de forma que a falha seja isolada e o fluxo de energia seja mantido por caminhos alternativos. A recomposição automática do sistema possibilita que não haja nenhuma intervenção humana. As concessionárias devem garantir a continuidade e a qualidade dos serviços prestados. Fato importante para que fossem atendidos esses padrões de qualidade foi a criação da ANEEL que impôs regulamentações no setor elétrico através das implementações dos índices de controle de qualidade, assim surgindo a necessidade de as concessionárias investirem em soluções tecnológicas.

Palavras-Chave: *Self-Healing*. Sistema Elétrico. Recomposição. ANEEL.

---

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro – SP. E-mail: jmdetomini@bol.com.br

<sup>2</sup> Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro – SP. E-mail: leandro\_parejane@hotmail.com

<sup>3</sup> Docente do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro – SP. E-mail: avoliveira@cpfl.com.br

## ABSTRACT

*The characteristics of the Brazilian electrical system specifically in the distribution of energy are susceptible to defects and interferences of the external environment. In this work we explore the concept of Self-Healing which is termed as the ability to detect, and isolate and recompose automatically after a fault. This is capable because the components that make up the system perform pre-programmed switching actions as an immediate response to the fault occurring, acting so that the fault is isolated and the energy flow is maintained by alternate paths. The automatic recomposition of the system allows that there is no human intervention. The concessionaires must guarantee the continuity and quality of the services provided. An important fact to meet these quality standards was the creation of ANEEL that imposed regulations in the electricity sector through the implementation of quality control indices, thus arising the need for utilities to invest in technological solutions.*

*Keywords: Self-Healing. Electrical system. Recomposition. ANEEL.*

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica se tornou a principal fonte de força, luz e calor, por isso, devido as constantes interrupções ocorridas no fornecimento de eletricidade e a baixa qualidade nos serviços prestados, a partir de 1990, houve uma grande estruturação no setor elétrico brasileiro, cuja principal tratativa está diretamente relacionada à qualidade de energia. Fato importante para que fossem atendidos os novos padrões de qualidade, foi à criação da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão que regula as normas de energia elétrica no Brasil (KAGAN et al., 2009).

As empresas responsáveis pelo SEP – Sistema Elétrico de Potência devem garantir a continuidade e a qualidade dos serviços prestados e graças ao surgimento de novas e interessantes tecnologias como o *Smart Grid*, o qual possibilita a troca de informações e ações de controle e integração entre os diversos segmentos da rede elétrica remotamente e em tempo real, está sendo possível um fornecimento de

energia elétrica e serviços prestados de maior qualidade, podendo assim atender as normas impostas pela ANEEL (MACEDO; GALO, 2014).

Devido a importância da eletricidade para a sociedade, os consumidores se tornaram mais exigentes e menos tolerantes com relação a qualidade de energia. As interrupções têm diminuído drasticamente, obrigando os profissionais a desenvolver soluções eficientes para atenuar ou até mesmo sanar possíveis problemas que possam afetar o fornecimento e a qualidade de energia. Principalmente no setor de distribuição elétrica, a adesão à tecnologia de ponta e o desenvolvimento de sistemas de restauração é um dos maiores desafios e têm sido frequentemente propostas para melhorar a disponibilidade, confiabilidade, segurança e qualidade de fornecimento (PÉREZ-ARRIAGA; RUDNICK; ABBAD, 2011).

Um forte aliado para que essa qualidade seja mantida, é o SRA – Sistema de Restauração Automático, conhecido também como *Self-Healing*. O SRA reconhece o trecho desenergizado e ao mesmo tempo os trechos não atingidos por defeito algum, porém que se encontram em estado de falta em consequência do trecho defeituoso, podendo assim, restaurar o maior número de trechos sem defeito e consequentemente deixando apenas o local a ser reparado desligado, baseado em um algoritmo de segurança, gozando sempre de muita eficiência (CANUTO et al., 2012).

Alguns aspectos positivos do SRA consistem na identificação, isolamento dos componentes com faltas no sistema e a rápida restauração do serviço de fornecimento do consumidor. A restauração de redes de maior carga e a menor quantidade de manobras locais pode ser realizada com pequena ou nenhuma intervenção humana, através de equipes de campo que se deslocam até o local e tem como objetivo minimizar as interrupções e evitar a queda da confiabilidade do sistema (OUALMAKRAN; MELENDEZ; HERRAIZ, 2012).

De acordo com as novas tecnologias implementadas ao SEP – Sistema Elétrico de Potência, o objetivo deste artigo é apresentar o conceito de *Self-Healing*, entender sua funcionalidade, observando suas vantagens impactando diretamente na qualidade de energia e sua confiabilidade.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 *Self-Healing*

O *Self-Healing*, como uma das principais funcionalidades do *Smart Grid*, possui o objetivo de aumentar a confiabilidade da rede e obter uma rápida solução quando ocorre uma interrupção na RD – Rede de Distribuição, além de reduzir custos operacionais (IEA, 2011).

Conforme Toledo, Gouvêia e Hernandes Junior (2012), o *Self-Healing* é constituído de um algoritmo inteligente que toma decisões de reconfiguração da RD baseado em parâmetros previamente definidos. Foi desenvolvido para identificar trechos desenergizado, discernir falta momentânea de falta definitiva, tendo como principais objetivos, rápida restauração do sistema, restaurar o máximo possível de cargas e assim, diminuir os impactos causados por interrupções do sistema elétrico.

Cinvelar et al. (1998) elaboraram uma ferramenta inteligente computacional, desenvolvida a partir do problema de reconfiguração de linhas elétricas propondo a redução da perda dos alimentadores, seja ela para uso no planejamento quanto para atividades reais.

Morelato e Monticelli (1989) propuseram a ideia de *direct scan* (busca direta), usando regras básicas (baseado no passo padrão do operador) para solucionar problemas relacionados a restauração da RD. Para isso, aderiram ao método de busca heurística em ramos de decisão binária, que segue um padrão de examinar as possibilidades dentro de um contexto operacional. Para diminuir essa ramificação de tomada de decisão, é necessário a utilização de conhecimento de atividades padrões das características de problemas prováveis e da topologia de rede, evitando assim possíveis explosões combinatórias, mantendo o eventual problema em um âmbito gerenciável.

Foi proposta por Huang (2003) a utilização das bases heurísticas resultantes da interação com os operadores de SD - Sistemas de Distribuição, no processo de restauração do sistema, transfazendo-as em um modo de rede tipo FCE – *Fuzzy Cause Effect*. O método proposto mescla as metas *fuzzy* de restauração do sistema, usando um PAH - Processo Analítico Hierárquico, como estratégia de relevância de

pesos. O sistema FCE é baseado em modelos de diagramas (grafos) entre uma origem e o efeito consequente, então, a cada hipótese *fuzzy*, há uma combinação de valores através da ponderação de relevância, resultando na melhor opção restaurativa como uma exclusiva função objetivo.

### **2.1.1 Características de Funcionamento do *Self-Healing***

O *Self-Healing* tem a capacidade e a função de detectar, analisar, atuar e restaurar defeitos e falhas na RD de maneira automática, sendo condicionado a responder de maneira instantânea. Esse sistema é munido de dados em tempo real gerado através de sensores instalados na RD, de modo que sua resposta e atuação ocorram de forma reativa ou proativa, mitigando ou evitando automaticamente quedas de energia, descontinuidade de serviços e problemas com a qualidade de energia. Desse modo, os sistemas *Self-Healing* elevam o nível de confiabilidade da RD (VIEIRA; ARAÚJO, 2011).

A premissa do *Self-Healing* é o controle descentralizado para o SEP e busca tratar cada equipamento individual como componentes inteligentes independentes, atuando de maneira fiel buscando alcançar um sincronismo otimizado em toda a RD (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

### **2.1.2 Métodos de implementação do *Self-Healing***

Conforme concluiu Amin e Wollenberg (2005), para a aplicação do *Self-Healing*, é extremamente necessário implementar inteligência na RD, incluindo processadores e um sistema operacional robusto de forma que cada componente venha a operar de maneira independente e devem estar habilitados a comunicar-se entre si em cada subestação e subsistemas formando uma grande e distribuída grade de comunicação.

Segundo Gellings (2011), graças ao *Smart Grid*, a RD terá uma grande implantação de seccionadoras automáticas localizadas em pontos estratégicos, cada uma com uma configuração pré-determinada (NA/NF – Normalmente Aberta/Normalmente Fechada), com o objetivo de se reconfigurarem

automaticamente de acordo com a necessidade apresentada, seja ela de inversão de fontes, redução de setor desenergizado, restauração integral do sistema, balanceamento de carga, entre outras.

### **2.1.3 SEP - Sistema Elétrico de Potência**

No Brasil, graças ao grande potencial hídrico, é predominante a geração de EE através de usinas hidroelétricas, passando pela transformação de hidráulica para elétrica. De modo geral, essas usinas são afastadas dos grandes centros de consumo, fazendo-se necessário a existência de um elemento de interligação entre ambos. Esse elemento é denominado LT - Linhas de Transmissão, que transmite essa energia gerada até as SE - Subestações de distribuição. Essas, que por sua vez, são responsáveis por tensão de transmissão para a tensão de distribuição primária, assim suprindo regiões de baixa densidade de carga através das redes elétricas de distribuição, composta na maioria das vezes por condutores nus ou protegidos guiados através de postes com padrões pré-estabelecidos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Ainda conforme Kagan, Oliveira e Robba (2010), o SEP tem a função de levar EE - Energia Elétrica até os consumidores, independentemente de seu tamanho, com a qualidade adequada prevista na ANEEL. O sistema tem a função de produzir e distribuir a EE no instante em que é solicitada. São subdivididas em três etapas; geração, transmissão e distribuição.

#### **2.1.3.1 Indicadores de Qualidade**

A ANEEL, através do PRODIST – módulo 8, determina que as empresas de energia elétrica forneçam compensações aos consumidores em caso de violação de limite de continuidade individual dos indicadores DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora dada pela equação 1, FIC – Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora, dada pela equação 2 e DMIC – Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora, dada pela equação 3 (ANEEL, 2009).

$$Valor = \left( \frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) DIC_p \times \frac{EUSD_{\text{m\u00e9dio}}}{730} \times kei \quad (1)$$

$$Valor = \left( \frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) DMIC_p \times \frac{EUSD_{\text{m\u00e9dio}}}{730} \times kei \quad (2)$$

$$Valor = \left( \frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) DIC_p \times \frac{EUSD_{\text{m\u00e9dio}}}{730} \times kei \quad (3)$$

J\u00e1 a qualidade de energia distribu\u00edda pela empresa \u00e9 resultante da m\u00e9dia dos indicadores individuais. Esses indicadores s\u00e3o denominados DEC – Dura\u00e7\u00e3o Equivalente por Unidade Consumidora e FEC – Frequ\u00eancia Equivalente por Unidade Consumidora e segundo o PRODIST (2009), \u00e9 equacionado atrav\u00e9s das equa\u00e7\u00f5es 4 e 5.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (4)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (5)$$

A ANEEL ainda determina que no fim de cada m\u00eas seja enviado um relat\u00f3rio onde contenha a resposta de emerg\u00eancias registradas. Esse relat\u00f3rio compreende quatro indicadores de tempo m\u00e9dio; TMP – Tempo M\u00e9dio de Preparação de equipe de atendimento de emergencia, TMD - Tempo M\u00e9dio de Deslocamento de equipe de atendimento de emergencia, TME - Tempo M\u00e9dio de Execu\u00e7\u00e3o do servi\u00e7o at\u00e9 o restabelecimento de atendimento de emergencia e TMAE - Tempo M\u00e9dio de Atendimento de Emergencia, todas descritas nas equa\u00e7\u00f5es 6, 7, 8 e 9.

$$TMP = \frac{\sum_{i=1}^n TP(i)}{n} \quad (6)$$

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD(i)}{n} \quad (7)$$

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE(i)}{n} \quad (8)$$

$$TMAE = TMP + TMD + TME \quad (9)$$

#### 2.1.4 Chave Seccionadora

De acordo com a NBR 6935 (1985), chave seccionadora é um dispositivo de abertura e de fechamento cuja sua finalidade é interromper ou manobrar circuitos elétricos, o que permite a reconfiguração e desligamento da RD, permitindo assim uma manutenção de forma segura aos colaboradores do sistema. Basicamente é uma extensão dos condutores que, quando acionado é deslocado, realizando a abertura ou fechamento através de seus contatos terminais.

#### 2.2 Smart Grid

Segundo Lima (2010), o *Smart Grid* é um complexo sistema formado por inúmeros subsistemas de energia interconectadas e correlacionadas entre si através de protocolos contendo camadas de tecnologias (automação, comunicação, controle e TI). Uma definição mais resumida, o *Smart Grid* é a planta de energia elétrica automatizada vinculada com as TIC's - Tecnologia de Informação e Comunicação. Redes elétricas inteligentes são capazes de integrar o comportamento e as ações de todos os agentes, geração e consumidores de forma eficiente, econômica e segura.



Um dos objetivos das redes elétricas inteligentes é o fato de que além de fornecer energia elétrica ela também é capaz de trazer e manter as informações atualizadas aos clientes e as concessionárias de fornecimento, é uma via de mão dupla.

O conceito de *Smart Grid* diverge opiniões de acordo com quem o define. Alguns especialistas se concentram mais na área de automação das redes, outros no fornecimento de energia, outros na melhoria dos canais e serviços para o consumidor. Tal razão é definida de acordo com as necessidades de cada autor (TOLEDO; GOUVEIA; RIELLA, 2012). Com base no entendimento do U.S. Department of Energy (2009) o *Smart Grid* não é uma “coisa” e sim uma visão a ser estudada e completada, e que deve ser construída de acordo com as necessidades onde será implementado levando em consideração, tecnologias, impacto ambiental, socioeconômica e político-regulatória.

### 2.2.1 Automação

O termo automação é empregado a qualquer sistema que integra processos automáticos e que faz uso de técnicas computadorizadas ou mecânicas otimizando toda sua cadeia produtiva, controlando e comandando mecanismos para seu funcionamento substituindo o trabalho humano, aumentando a velocidade e a qualidade dos processos, segurança dos empregados, além de obter maior controle, flexibilidade e planejamento (GOEKING, 2010).

Define-se automação como sendo um sistema apoiado por computadores que substitui o trabalho humano, visando soluções otimizadas de redes e serviços. O conceito moderno de automação relaciona-se à integração de sistemas, significando que os diversos sistemas autônomos devem ser geridos de forma integrada, compartilhando dados e trabalhando em conjunto de forma a gerar soluções que proporcionem aumento potencial de benefícios. (VIEIRA; ARAÚJO, 2011, p.6)

A automação é um caminho sem volta, uma vez que modernizado o processo e verificado sua melhoria, não haverá mais a necessidade, e nem a vontade de regressar a uma estrutura mais antiga, fazendo com que a tendência seja sempre a melhoria. O processo de automação se faz presente nas mais simples atividades da vida cotidiana, pois pode substituir tarefas, físicas e mentais, alta periculosidade,

bem como nas atividades mais complexas dentro de uma empresa, o que a torna de suma importância para o avanço tecnológico. Para as empresas, ela proporciona um aumento na quantidade e na qualidade de produção, o que gera um crescimento na eficiência e na competitividade entre as empresas, ocasionando preços mais acessíveis. É por isso que seu estudo e desenvolvimento se fazem tão necessários nos dias de hoje (COSTA; LISBOA; SANTOS, 2003).

## 2.3 Algoritmo Genético

O AG – Algoritmo Genético desenvolvido por Holland (1975), é baseado nos princípios da genética e seleção natural. A princípio, o algoritmo cria uma população que pode ser gerada de forma aleatória ou de forma heurística. Segue então a execução do AG que passa por duas etapas do processo: primeiro cria-se uma população intermediária, utilizando a função de fitness, em que cada indivíduo é avaliado e alocado um valor de performance de oportunidade de reprodução (seleção dos melhores indivíduos), depois é aplicado o cruzamento e mutação para criar a próxima geração possível para a solução (RUSSELL; NORVIG, 2004).

Algumas das aplicações de AG para restabelecimento da RD podem ser encontradas em: Bretas, Delbem e Carvalho (2001) onde utiliza o AG para restabelecer uma RD radial através de uma cadeia de grafos; Fukuyama e Chiang (1995) empregam o algoritmo paralelo para restaurar a rede considerando a minimização das cargas não atendidas e equilibrar as margens de capacidade de suprimento.

### 2.3.1 Métodos de Busca – Heurística e Metaheurística

Derivada da palavra grega *heuriskein*, heurística significa descobrir. Atualmente, o termo é usado para denominar um método de busca que baseado no histórico e julgamento, se mostra inicialmente, uma boa solução de determinado problema, porém não garante uma solução ótima (FOLDS, 1984).

De acordo com sua definição, metaheurísticas são métodos de solucionar situações adversas que coordenam processos de busca local utilizando o mais alto

nível de estratégia, de maneira a criar um caminho capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca completa e robusta no contexto de soluções de um determinado problema (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

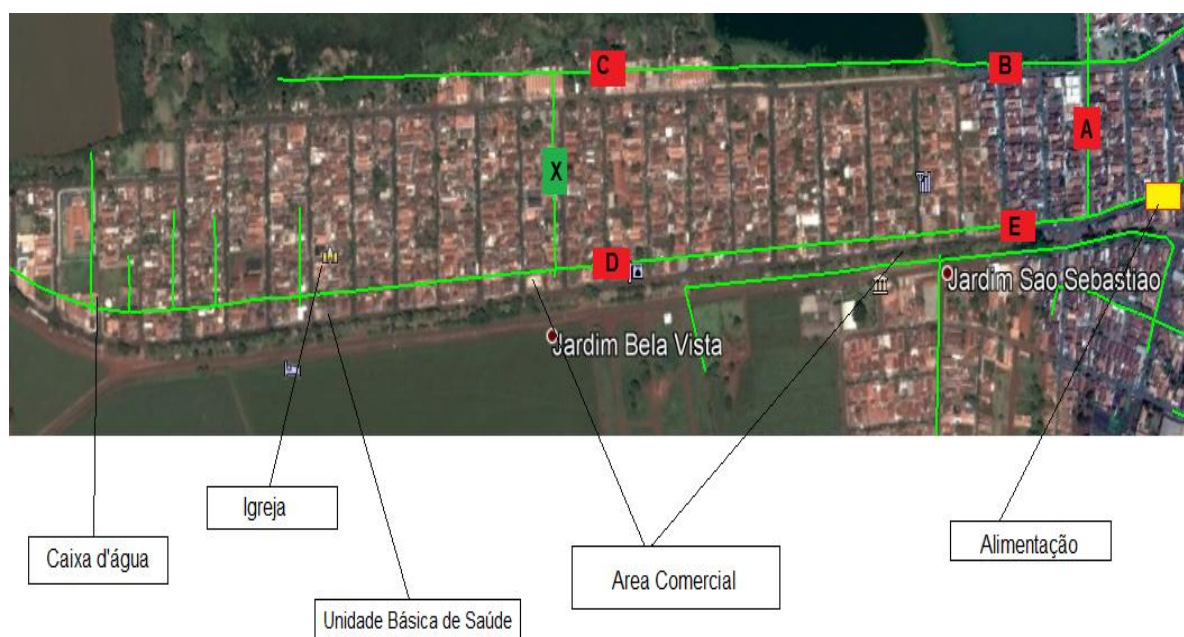
### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo foi realizado a partir de dados levantados juntamente a empresa CPFL Energia sendo de total conhecimento e aprovado pelo gestor de estação avançada da cidade de Bebedouro SP, responsável também pela estação avançada da cidade de Pitangueiras-SP, a qual os dados se referem.

Os dados levantados para esse estudo são referentes a um bairro de periferia localizado na cidade de Pitangueiras SP, onde estão situadas diferentes classes de clientes consumidores, entre eles estão os de classe residencial, escolas, comércio, caixa d'água para abastecimento da população local e uma unidade de saúde municipal, os dois últimos, considerados clientes consumidores críticos, por estarem diretamente relacionado ao bem-estar e saúde da população.

Para a realização deste estudo, foi simulada uma situação de interrupção de fornecimento de energia, onde serão comparados os seus impactos nos indicadores quando usado ou não a tecnologia *Self-Healing*, tendo como princípio a configuração original da rede conforme mostrado na figura 1.

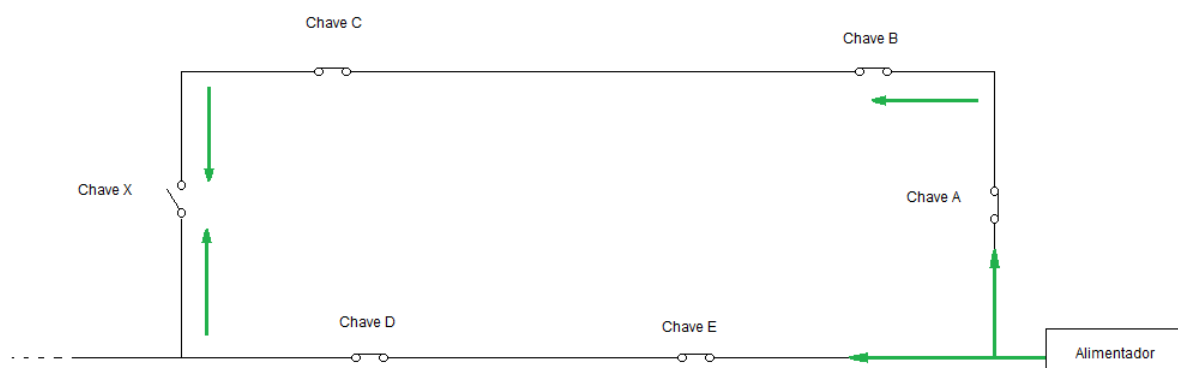
**Figura 1:** Configuração original da rede primária de alimentação de energia.



Fonte: Adaptado GoogleMaps (2018)

No exemplo da figura 1, são demonstrados os conceitos básicos assim como um conjunto mínimo de equipamentos necessários para a realização da implementação do *Self-Healing*, que podem ser melhor compreendidos em sua forma unifilar representado na figura 2.

**Figura 2:** Representação unifilar da configuração original da rede primária de alimentação de energia.



Fonte: Elaboração própria (2018)

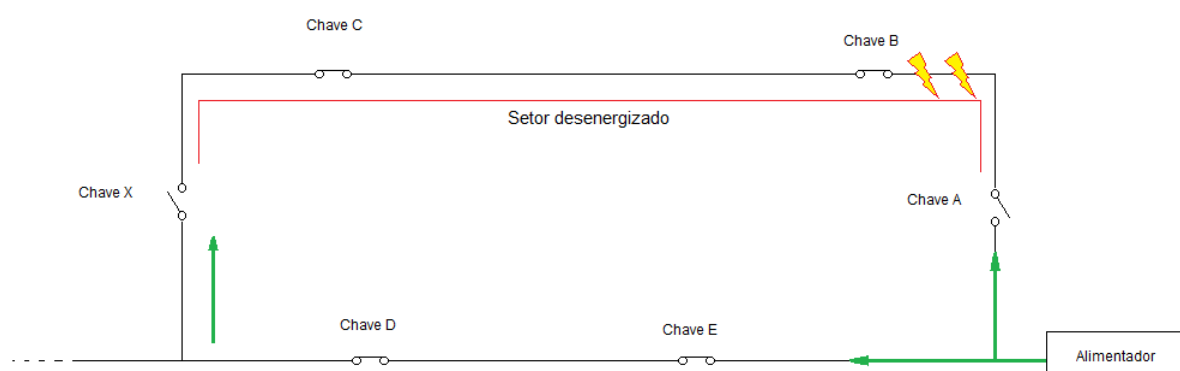
O setor escolhido para a análise de dados e comparação é composto por 1.651 consumidores subdivididos conforme a tabela 1, exposta abaixo:

**Tabela 1:** Abrangência setorizada por chaves.

Chave	Nº Consumidores	Consumidores Subjacentes
A	192	599
B	255	344
C	344	0
E	317	543
D	543	0
TOTAL	1.651	

Fonte: Elaboração própria (2018)

Na primeira situação, temos uma falta de energia permanente localizada entre as chaves A e B, conforme mostrado na figura 3, deixando a princípio 791 consumidores sem fornecimento de energia elétrica.

**Figura 3:** Defeito permanente entre as chaves A e B, sem efeito de manobra.

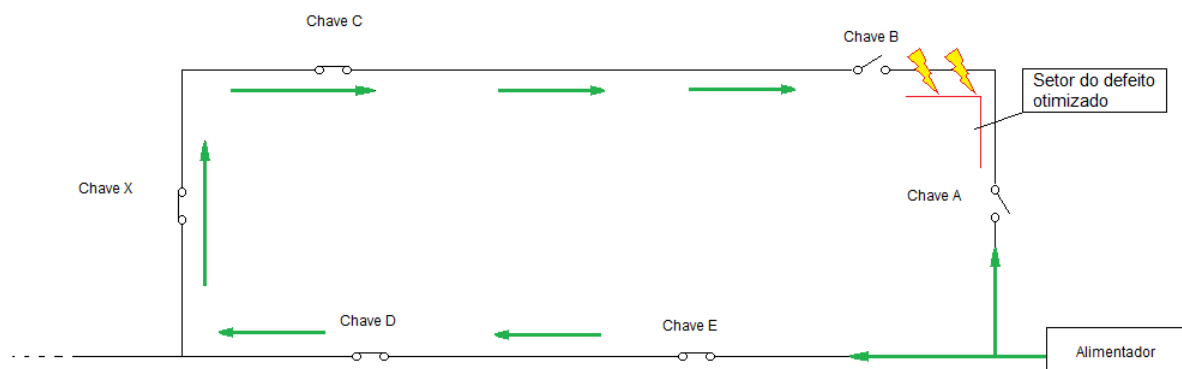
Fonte: Elaboração própria (2018)

Da forma tradicional, a falta de energia é detectada através de reclamações via telefone feita por consumidores alimentados pelo trecho interrompido, tendo suas informações municiadas por civis leigos, fazendo-se necessário um número alto de reclamações para que possa ser localizada com maior eficiência o defeito na rede.

Logo após a coleta de informações retiradas das reclamações, essa ocorrência se torna de conhecimento do CO – Centro de Operações, que por sua

vez é repassado ao eletricista de campo para que possa ser realizada as devidas medidas de segurança e enfim, ser realizado o plano de manobra para o determinado setor, deixando assim, nesse caso apenas 192 consumidores interrompidos, assim como demonstrado na figura 4.

**Figura 4:** Defeito permanente entre as chaves A e B, com efeito de manobra.



**Fonte:** Elaboração própria (2018)

Muitas vezes, o sistema elétrico sofre com o fato de sua inteligência da rede estar localizada no sistema de proteção ou dependendo de seu supervisor no centro de controle, e em muitos casos, esse sistema é lento e estão limitados apenas a proteção de equipamentos específicos. Dessa forma, é fácil diagnosticar que para a aplicação do conceito *Self-Healing* é preciso introduzir inteligência ao sistema elétrico, munido com processamentos independentes em cada componente e em cada subestação e subsistema.

Os dados simulados foram analisados por meio de cálculo de tempo médio através de equações definidas pela ANEEL. Os cálculos que foram realizados permitiram fazer a comparação dos indicadores individuais DIC, FIC, DMIC, DEC, FEC, TMP, TMD, TME e TMAE. Para a realização dos cálculos foi utilizado o programa de organização e estatística Microsoft Excel, versão 2013.

## 4 PROCEDIMENTOS

Conforme Staszsky, Craig et al (2005), é necessário entre 50 e 80 minutos para isolar, garantir a segurança e restabelecer o fornecimento de energia aos demais trechos desenergizado que não possuem o auxílio de automação.

Considerando esse princípio, é possível analisar o efeito que a automação em uma RD oferece aos indicadores individuais DIC e FIC e conseqüentemente aos indicadores globais DEC e FEC. Utilizando a instalação citada na figura 4, abaixo, apresenta-se uma análise de desempenho desse sistema com e sem a aplicação do *Self-Healing*.

### 4.1 Simulação Sem *Self-Healing*

Conforme o exemplo da figura 4, 192 unidades consumidoras que se encontram no setor AB ficarão sem energia até o reparo na RD ser concluído, desta forma, é possível afirmar que um maior impacto nos indicadores de continuidade será por causa destas residências mais afetadas. Considerando o não uso de *Self-Healing*, fica comprometido, de forma parcial, o fornecimento de energia elétrica para 791 consumidores posicionados entre as chaves A e X, conforme a figura 3, até que ocorra todo o plano de manobra emergencial efetuado pela equipe de campo, através da abertura das chaves A e B e o fechamento da chave X.

No site da ANEEL, é possível extrair dados referente aos índices de qualquer concessionária de energia elétrica do Brasil, e consultando os números e índices da cidade de Pitangueiras-SP, retirou-se os valores demonstrados na tabela 2, na escala de minutos, com relação ao ano de 2017:

**Tabela 2:** Tempo Médio de Atendimento CPFL – Pitangueiras, SP.

MÊS	TMD (em minutos)	TME (em minutos)	TMP (em minutos)	TMAE (em minutos)
Janeiro	45,14	41	143,21	229,35
Fevereiro	42,11	53,8	130,9	226,81
Março	41,66	80,34	118,28	240,28
Abril	33,17	50,72	54,3	138,19
Maio	32,47	33,67	156,46	222,6
Junho	42,44	36,57	59,43	138,44
Julho	37,05	31,85	61,95	130,85
Agosto	81,33	41,32	138,59	261,24
Setembro	50,31	38,11	97,9	186,32
Outubro	38,78	66,49	157,47	262,74
Novembro	69,29	58,01	181,46	308,76
Dezembro	49,5	56,51	133,2	239,21
Média	46,94	49,03	119,43	215,40

Fonte: ANEEL (2018)

Antes que o reparo seja iniciado no local, a equipe de campo precisará vencer os tempos de preparação e os tempos de deslocamento, TMP e TMD, respectivamente. Adotando os tempos médios expostos na tabela 2, chega-se ao tempo de 166,37 minutos, no mínimo, para que seja feita a isolação do trecho defeituoso, e conseqüentemente seja restabelecido todo o setor subjacente. Já para o trecho que continua em falta, deve-se acrescentar o tempo de médio de execução, TME, logo, o tempo de interrupção no trecho AB será ainda maior.

Somando o TME ao TMP e TMD, tem-se agora o total de 215,40 minutos até que fornecimento de energia elétrica seja restabelecido no trecho AB. Discriminando na tabela 3 por unidade consumidora, tem-se então:

**Tabela 3:** Tempos de DIC – Sem *Self-Healing*.

Setor	DIC por unidade consumidora no setor (em horas)
BX	2,77
AB	3,59

Fonte: Elaboração própria (2018)

Também, seguindo informações no site da ANEEL, demonstra-se na tabela 4 as metas mensais de DIC, FIC e DMIC:



**Tabela 4:** Metas DIC, FIC e DMIC.

DIC (em horas)	FIC (em horas)	DMIC (em horas)
4,71	3,23	2,60

Fonte: ANEEL (2018)

Ao comparar os valores de DIC do caso em estudo com os valores estipulados pela ANEEL, é possível notar que nas unidades consumidoras situadas entre as chaves A e B, são mais afetadas, porém não extrapolam o limite regulado. Já quanto ao DMIC, quando comparado, todas as unidades consumidoras do setor ultrapassam o limite mensal imposto, acarretando compensação financeira ao consumidor.

#### 4.2 Simulação Com *Self-Healing*

Ainda utilizando o exemplo da figura 4, com o emprego do *Self-Healing*, as chaves que atualmente são de operação manual, seriam substituídas por chaves inteligentes telecomandadas, sendo possível a comutação simultânea entre si, seja de forma centralizada e operada remotamente ou automática seguindo a estratégia de um determinado algoritmo.

Essas chaves são capazes de suportar a necessidade do serviço público de distribuição inteligente para uma rede e irão apoiar a grande necessidade de reconfiguração otimizada da rede. Um exemplo de equipamento com processamento inteligente é o RA – Religador Automático, demonstrado na figura 5. Ele funciona de forma que em faltas transitórias podem ter seus efeitos mitigados, pois pode religar o circuito após o desaparecimento da falha na distribuição e em caso de falha permanente, irá executar um número de tentativas de religas pré-determinadas, e logo após isso irá passar para a condição ABERTA, avisando os equipamentos vizinhos, que por sua vez, irão executar operações coordenadas a fim de isolar o trecho em falta, tendo o objetivo de fazer a energia elétrica chegar as unidades

consumidoras através de caminhos alternativos, reduzindo ao mínimo o setor afetado pelo defeito.

**Figura 5:** RA instalado na rede elétrica da CPFL.



**Fonte:** Elaboração própria (2018)

Com a implementação do *Self-Healing* na RD, é importante ressaltar que não são considerados os índices TMP e TMD, pois eles foram substituídos pelo tempo de atuação dos RA's e considerando também que toda queda de energia que não ultrapassar 3 minutos, não será contabilizada nos indicadores. Aplicando o mesmo método e valores para cálculo do DIC, são obtidos os valores apresentados na tabela 5:

**Tabela 3:** Tempos de DIC – Com *Self-Healing*.

Setor	DIC por unidade consumidora no setor (em horas)
BX	0
AB	0,81

**Fonte:** Elaboração própria (2018)

## 5 RESULTADOS

É possível perceber uma grande eficiência quanto ao trecho não afetado pelo defeito, pois os indicadores são derrubados a zero e por mais que ainda exista o defeito no setor AB, seu tempo de restabelecimento é muito menor, derrubando

consideravelmente o DIC e conseqüentemente não excedendo o DMIC estipulado pela ANEEL, não tendo assim, multa a pagar aos consumidores.

## 6 CONCLUSÃO

O conceito *Self-Healing* pode ser definido como sendo uma característica que permite ao sistema elétrico se recompor automaticamente devido a uma falta na rede de distribuição de energia. Essa recomposição do sistema é dependente de chaves automatizadas distribuídas estrategicamente na rede elétrica, comunicando-se entre si e monitorando a rede de forma que quando houver uma ocorrência de falta, seu seccionamento é acionado isolando o trecho.

Neste trabalho foi simulada uma situação de interrupção de fornecimento de energia em um bairro localizado na cidade de Pitangueiras-SP, onde foram comparados os principais impactos nos indicadores de qualidade quando usado ou não a tecnologia *Self-Healing*. De acordo com os resultados foi possível entender que em um sistema sem o *Self-Healing*, os consumidores que se encontram no trecho em falta ficarão sem o fornecimento de energia até que o reparo na RD seja efetuado pela equipe de campo. Com a tecnologia *Self-Healing* as chaves que são manuais seriam substituídas por chaves automatizadas, sendo possível obter a comunicação em tempo real sem que haja nenhuma intervenção humana, isolando apenas o trecho em falta e realimentando os demais consumidores que se encontram sem energia.

O *Self-Healing* foi mencionado como uma das principais funcionalidades do *Smart Grid* constituindo um conjunto chamado redes inteligentes. Essa propriedade facilita a identificação do trecho em falta diminuindo o tempo para o retorno do fornecimento de energia elétrica para os trechos que não se encontram em falta permanente. Dessa forma, a redução dos tempos de interrupção no fornecimento de energia dessas unidades consumidoras contribui para uma melhora dos indicadores da rede elétrica e na redução de penalidades regulatórias por violação de continuidade.

A ANEEL é a agência responsável por definir os indicadores que determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em

termos de qualidade da energia. Uma das principais preocupações é a qualidade do produto e com a qualidade do serviço, ou seja, com o número de interrupções de energia e sua duração.

O SEP brasileiro vem enfrentando desafios e necessidade de avanços tecnológicos funcionais para o gerenciamento de redes de distribuição. Isso vem sendo possível devido ao grande crescimento empregado de novas tecnologias para a monitoração, controle e registro das informações das redes de distribuição. As principais vantagens do SRA é a redução na duração da interrupção, aumento da eficiência do trabalho das equipes de manutenção e melhor desempenho do sistema.

Esse investimento em tecnologia fornece o mais alto nível de confiabilidade, realizando o isolamento do menor trecho possível do sistema quando ocorre uma falta e recompondo o fornecimento em outros lugares. Além disso, a tecnologia de localização das faltas orienta rapidamente as equipes de manutenção até o ponto da falta para que os reparos possam ser feitos e o fornecimento de energia elétrica seja restabelecido o mais rápido possível.

## REFERÊNCIAS

ABBAD, M.; ARRIAGA, I.; RUDNICK, H. Sistema de energia elétrica: Uma visão geral. In: EXPÓSITO, A.; CONEJO, A.; CAÑIZARES, C. (Org.) **Sistema de energia elétrica: Análise e Operação**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011. p. 12-13.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade da energia elétrica. ANEEL, 2009. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisao\\_1-Reticacao\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1-Reticacao_1.pdf)>. Acesso em: 21 abril 2018.

AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21<sup>st</sup> century. **IEEE Power and Energy Magazine**. Minnessota, v. 3, n. 5, p. 34-41, sept/oct. 2005.

BRETAS, N. G., DELBEM, A. C. B., Carvalho A. Representação por cadeias de grafo para AG aplicados ao restabelecimento ótimo em sistemas de distribuição radiais. **Revista SBA – Controle e Automação**. Curitiba, v.12, n.1, p. 42-5, jan/abr. 2001.

CONFERÊNCIA INTERNACIONAL REGSA, 4, 2014. Bahia. **Oportunidades e desafios do GLD no ambiente Smart Grid**. Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2014, v.1.

FONSECA, J. R. L. **Aplicação da Técnica de Self Healing na Reconfiguração Automática de Redes Elétricas Utilizando o Padrão IEC 61850**. Natal, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Curso de Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. GELLINGS, C.W. Power to the people. **IEEE Power and Energy Magazine**, Minnesota, v. 9, n. 5, p. 52-63, sept/oct. 2011.

GLOVER, F. e KOCHENBERGER, G. A. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

HUANG, C, M. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 18, n. 2, p. 867-875, may 2003.

INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE OF THE FOURTH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEM, 1, SECOND INTERNATIONAL FUZZY ENGINEERING SYMPOSIUM, 1, 1995, Yokohama. **A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems**. Yokohama: IEEE, 1995, v.1.

INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES, 3, 2012. Berlin. **Self-Healing for smart grids: Problem formulation and considerations**. Berlin: IEEE PES, 2012, v.3.

KAGAN, N. **Automação da Distribuição Avançada**. Palestra integrante do III Seminário Internacional de Smart Grid, 02 jun. 2011.

\_\_\_\_\_.; OLIVEIRA, C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2005, p. 5-27.

LAMBIASE, C. B. **Aplicação de Self Healing em Sistemas Elétricos**. Porto Alegre, 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Curso de Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MORELATO, A; MONTICELLI, A. Heuristic search approach to distribution system restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 4, p. 2235 – 2241, oct.1989.

PRAMIO, J. T. **Estudo sobre self healing: Conceitos, Metodologias e Aplicações em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Curitiba, 2014. Monografia (Especialização em Acadêmico de Eletrônica) - Curso de Especialização em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. p. 1308.

SAMPAIO, R. F. et al.. Metodologia para Desenvolvimento de um Sistema de Reposição Automática para um Projeto Piloto de Redes Inteligentes. In: XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. SENDI 2012. Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

STASZESKY, D. M.; CRAIG, D.; BEFUS, C. Advanced feeder automation is here. **IEEE Power and Energy Magazine**. San Francisco. v. 3, n. 5, p. 56-63, sept/oct. 2005.

VIEIRA, J. G.; ARAUJO, S. G. Conheça o primeiro trabalho sobre Smart Grid desenvolvido por pesquisadores no Brasil. Smart Grid News. Goiás. v. [ ], n.6, jul. 2011.