

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JAIR AUGUSTO DE CASTRO VIEIRA

***SELF-HEALING* CENTRALIZADO NAS REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE SEUS IMPACTOS,
VIABILIDADE E CONFIABILIDADE**

Betim
2023

JAIR AUGUSTO DE CASTRO VIEIRA

***SELF-HEALING* CENTRALIZADO NAS REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE SEUS IMPACTOS,
VIABILIDADE E CONFIABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira

Betim
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

V658s Vieira, Jair Augusto de Castro

Self-healing centralizado nas redes elétricas de distribuição:
um estudo de caso sobre seus impactos, viabilidade e
confiabilidade / Jair Augusto de Castro Vieira. – 2023.

47 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus
Betim, 2023.

Orientação: prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira

1. Redes elétricas inteligentes. 2. Automação. 3. Self-healing.
4. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). I. Jair Augusto
de Castro Vieira. II. Título.

CDU: 681.3

JAIR AUGUSTO DE CASTRO VIEIRA

***SELF-HEALING* CENTRALIZADO NAS REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE SEUS IMPACTOS,
VIABILIDADE E CONFIABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 31 / 10 / 2023 pela banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
REGINALDO VAGNER FERREIRA
Data: 16/11/2023 14:20:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Reginaldo Wagner Ferreira (Orientador) - IFMG



Documento assinado digitalmente
VICTOR ALVES SILVA E MELO
Data: 16/11/2023 15:21:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo - IFMG



Documento assinado digitalmente
GUILHERME VIANA GUIMARAES LEITE
Data: 16/11/2023 13:58:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Guilherme Viana Guimarães Leite - CEMIG Distribuição S.A.

RESUMO

O *self-healing*, assim como outros recursos que nasceram do conceito das *smart grids*, é uma tecnologia que surgiu como resposta ao cenário de crescente demanda por um sistema elétrico confiável e robusto. Este trabalho de conclusão de curso se propõe a investigar os impactos da implementação do *self-healing* centralizado nas redes de distribuição da CEMIG S.A. sob a perspectiva dos indicadores de continuidade de energia elétrica estabelecidos pela ANEEL, bem como avaliar a confiabilidade de atuação do algoritmo e a viabilidade financeira da sua implementação. Os resultados encontrados sinalizam reduções significativas nos tempos médios de interrupções, garantindo maior continuidade de energia para os consumidores e redução nos valores pagos em compensações financeiras. Esta economia se mostrou suficiente para garantir o retorno do investimento em aproximadamente 6 anos, apontando para a viabilidade financeira do projeto.

Palavras-chave: self-healing; smart grid; DEC; FEC; ANEEL; religadores; indicadores de continuidade.

ABSTRACT

Self-healing, as well as others resources that were born from the concept of smart grids, is a technology that emerged in response to the scenario of increasing demand for a reliable and robust electrical system. This work aims to investigate the impacts of implementing centralized self-healing in CEMIG S.A.'s distribution grids from the perspective of the electricity continuity indicators established by ANEEL, as well as to assess the reliability of the algorithm's performance and the financial feasibility of its implementation. The results indicate significant reductions in average interruption times, ensuring greater energy continuity for consumers and a decrease in compensation payments. This savings proved sufficient to achieve the investment payback, pointing to the financial viability of the project.

Keywords: self-healing; smart grid; reclosers; power quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa da macrorregião oeste de Minas Gerais.	9
Figura 2 – Valor pago em Compensação financeira pela CEMIG S.A. em 2021.	11
Figura 3 – Topologia de rede radial e em anel.	12
Figura 4 – Corpo de um religador Tavrida.	13
Figura 5 – Circuito de controle (caixa de comando) para religador FORM6.	14
Figura 6 – Exemplo de tela em sistema SCADA.	15
Figura 7 – Sequência de Eventos: Atuação de um <i>Self-healing</i>	16
Figura 8 – <i>Script</i> de execução de um <i>self-healing</i> centralizado.	19
Figura 9 – Comparação entre arquiteturas de controle para sistemas de <i>Self-healing</i> . . .	23
Figura 10 – Característica dos Alimentadores Afetados.	26
Figura 11 – Clientes Salvos em 2021.	27
Figura 12 – Confiabilidade de atuação do <i>self-healing</i> centralizado.	29
Figura 13 – Impactos de ocorrências em alimentadores Com e Sem <i>self-healing</i> centralizado. 32	
Figura 14 – Primeiras 37 linhas do Banco de dados de ocorrências analisadas.	40
Figura 15 – Últimas 35 linhas do Banco de dados de ocorrências analisadas.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Estimativa de valores economizados durante o ano 2021	34
Tabela 2	– Custo de implementação do SHC	35
Tabela 3	– Limites para unidade consumidora ou central geradora com tensão contratada ≥ 69 kV	41
Tabela 4	– Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área urbana com tensão contratada $\geq 2,3$ kV e < 69 kV	41
Tabela 5	– Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área não urbana com tensão contratada $\geq 2,3$ kV e < 69 kV	41
Tabela 6	– Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área urbana com tensão contratada $\leq 2,3$ kV	42
Tabela 7	– Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área não urbana com tensão contratada $\leq 2,3$ kV	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEMIG S.A.	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
CHI	Cliente Hora interrompido
COD	Centro de Operações da Distribuição
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i> ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
MT	Média Tensão
NF	Normal Fechado
NA	Normal Aberto
PO	Plano Operacional
SE	Subestação Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> ou Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
UPS	<i>Uninterruptible Power Suppl</i> ou fonte de alimentação ininterrupta, é sinônimo de <i>nobreak</i> no Brasil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivos	8
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	8
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	8
1.2	Área de abrangência	8
1.3	Justificativa	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Indicadores de continuidade e compensação financeira	11
2.2	Topologia das redes de distribuição elétrica	11
2.3	Religadores Automáticos	12
2.4	Sistemas <i>Self-healing</i>	15
<i>2.4.1</i>	<i>Arquiteturas de controle dos sistemas <i>Self-healing</i></i>	17
<i>2.4.2</i>	<i>Comparação entre arquiteturas de controle dos Sistemas <i>Self-healing</i></i> . . .	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Materiais	24
3.2	Métodos	24
4	RESULTADOS	26
4.1	Característica dos alimentadores afetados por ocorrências	26
4.2	Clientes salvos durante o ano	26
4.3	Confiabilidade de atuação	28
4.4	Impactos de ocorrências em alimentadores com e sem <i>self-healing</i> centralizado	31
4.5	Viabilidade financeira da implementação do <i>self-healing</i> centralizado . .	33
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	36
5.1	Trabalhos Futuros	36
	REFERÊNCIAS	37
	GLOSSÁRIO	38
	APÊNDICE A – BASE DE DADOS PARA O ESTUDO DE CASO	40

ANEXO A – CONTEÚDO REFERENTE AO ANEXO 8.B DA RESOLUÇÃO NOR-	
MATIVA Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021	41

1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui uma série de indicadores que são utilizados para medir a continuidade de energia elétrica oferecida aos consumidores. Estes índices são regulados pela agência, a qual estabelece valores limites que devem ser respeitados, sob pena de compensação financeira a ser paga pela concessionária de energia aos consumidores, ou nos piores casos, até mesmo a perda da concessão para gestão da distribuição de energia elétrica. Os índices da ANEEL são divididos entre individuais: DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora) e DICRI (Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora) e coletivos: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Do ponto de vista regulatório, a ANEEL estabelece anualmente para cada concessionária seu limite tolerável de DEC e FEC para o ano, naturalmente, a cada ano que passa os limites estabelecidos são cada vez mais estreitos de modo a incentivar as concessionárias a investir em melhorias contínuas do seu atendimento. Os indicadores individuais possuem seus limites fixos e são utilizados para cálculo da compensação financeira devida a cada consumidor caso os limites sejam ultrapassados (ANEEL, 2022).

Tendo em vista o aumento da demanda de energia elétrica pela sociedade atual e o desafio enfrentado pelas concessionárias de distribuição de energia para garantir a continuidade do SEP e cumprir indicadores cada vez mais severos, tornam-se necessários investimentos em avançados equipamentos de proteção, medição e manobra, os quais estão cada vez mais sofisticados (FALCÃO, 2009). Não existe ainda o conceito exato para definir *Smart Grid*, porém uma boa definição é adotada pelo *United States Department of Energy* que atribui ao significado de *Smart Grid* todos os sistemas implementados na rede elétrica capazes de fornecer detecção digital, gerenciamento de informações, comunicações, computação, tecnologias de controle e dispositivos de campo que funcionem para coordenar diversos processos da rede elétrica (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2018). Visto que dentro do conceito de *Smart Grid* já elenca-se a necessidade de dispositivos de campo inteligentes instalados na infraestrutura da rede, criou-se uma crescente demanda pelos religadores automáticos, os quais são equipamentos de proteção inteligentes, capazes de detectar correntes de curto-circuito ou sobrecarga, realizar religamentos automáticos a fim de sanar defeitos transitórios, ou isolar de forma segura defeitos permanentes, além de oferecer comunicação com sistema SCADA, permitindo que o operador possa enviar diversos comandos da sala de controle (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

O *Self-healing* (ou auto regenerável) pode ser classificado como um dos recursos inclusos nas redes inteligentes, sendo sua definição dada pela capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede elétrica de distribuição (FALCAO *et al.*, 2010).

As duas principais premissas básicas para utilização de um sistema *Self-healing* são: a rede elétrica de distribuição seja construída em anel, ou seja, uma rede não radial, e que os equi-

pamentos de proteção e manobra sejam inteligentes (FONSECA, 2017). São estas necessidades e características do sistema que serão tratadas na revisão bibliográfica deste trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Neste trabalho é proposto um estudo de caso para analisar os impactos causados pela implementação de sistemas *Self-healings* centralizados nas redes de distribuição da CEMIG S.A. no âmbito dos indicadores de continuidade de energia coletivos e individuais fiscalizados pela ANEEL, bem como verificar a confiabilidade e a efetividade real dos sistemas.

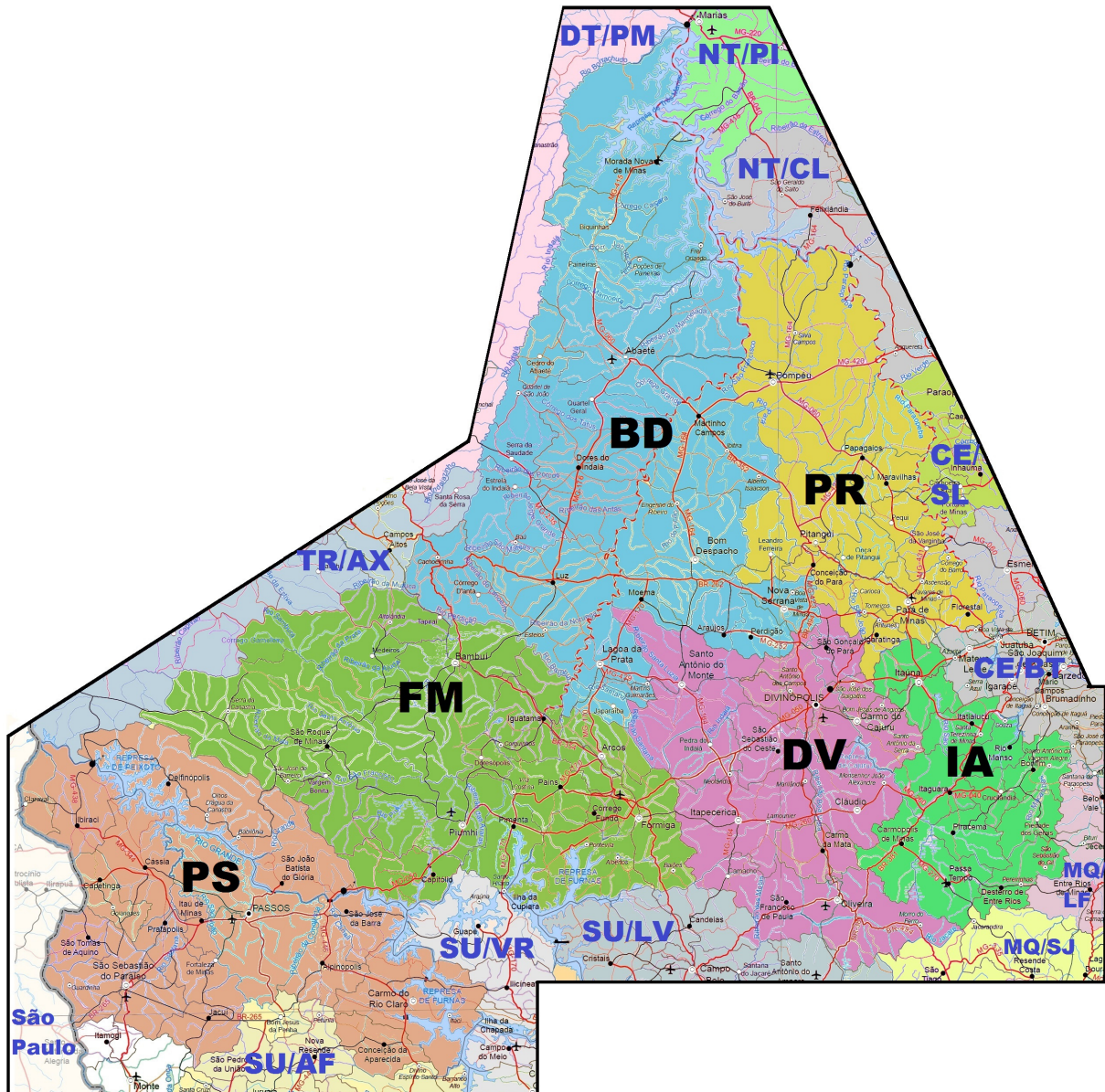
1.1.2 *Objetivos específicos*

- Realizar revisão bibliográfica sobre as formas e características dos alimentadores de distribuição de energia elétrica, bem como sobre as técnicas de *Self-healing*, apresentando a diferença entre *self-healing* centralizado e descentralizado.
- Verificar todo o histórico de ocorrências na rede de distribuição elétrica da malha oeste de Minas Gerais em 2021, através de dados coletados no sistema supervisorio e no banco de dados da CEMIG S.A.
- Estudar em cada ocorrência se o alimentador afetado possui sistema *Self-healing* centralizado, se o sistema atuou como deveria ou não, e quais os impactos refletidos nos indicadores de continuidade da ANEEL.
- Analisar os índices de falhas apresentados pelos sistemas *Self-healing* instalados, sugerir pontos de melhorias e validar sua confiabilidade.
- Verificar a viabilidade econômica da instalação de sistemas *Self-healing*, por meio da comparação do custo dos equipamentos e dos dados de ocorrência coletados.

1.2 Área de abrangência

O presente estudo de caso tem como objetivo analisar apenas redes de distribuição de MT (13,8KV) e seus equipamentos. A região estudada refere-se às redes de distribuição de energia elétrica da CEMIG S.A. instaladas na macrorregião oeste de Minas Gerais, composta por 6 cidades polos: Bom Despacho (BD), Pará de Minas (PR), Itaúna (IA), Divinópolis (DV), Formiga (FM) e Passos (PS). A região conta com 46 subestações de média tensão, 35 sistemas de *self-healing* centralizado implementados e uma rede de distribuição bastante mista, sendo composta por grandes trechos rurais e também diversos polos urbanos. Na Figura 1 observa-se um detalhamento da área de abrangência do estudo.

Figura 1 – Mapa da macrorregião oeste de Minas Gerais.



Fonte: Acervo CEMIG S.A., 2023.

1.3 Justificativa

Conforme introduzido, a ANEEL possui diversos indicadores de continuidade de energia que são imputados a todas as concessionárias de distribuição de energia elétrica, cujo descumprimento acarreta consequências como pagamento de compensação financeira e até perda da concessão em casos mais graves.

Além disso, tem-se o fato de que as redes de distribuição elétrica no Brasil são majoritariamente aéreas, pois possuem custo de implementação e prazo de construção bem menores que as redes subterrâneas por exemplo, no entanto, são redes muito suscetíveis a diversos tipos de falhas e defeitos, desde causas humanas como os abalroamentos de postes e objetos sobre a

rede (vergalhões, pipas e etc) até causas naturais como tempestade, ventania, árvores sobre a rede, pássaros e afins (VELASCO; LIMA; COUTO, 2006). Muitas dessas causas citadas são transitórias, mas as que são permanentes possuem tempo de reparo considerado elevado.

Os alimentadores de distribuição de energia elétrica, em sua maioria, possuem grande número de chaves seccionadoras primárias, as quais são dispositivos mecânicos de manobra utilizados para seccionamento do circuito, sua função é garantir a interrupção da passagem da corrente elétrica quando abertos e, quando fechados, garantem a continuidade do circuito (MAMEDE FILHO, 2013). No entanto, esses equipamentos, apesar de robustos, possuem manobrabilidade apenas manual, dependendo de as equipes de manutenção deslocarem-se até o local, inspecionarem a rede até identificar o trecho com defeito, para então operarem manualmente as chaves que isolam o trecho defeituoso. Todo este processo pode demorar horas, ainda mais considerando que o deslocamento das equipes está diretamente ligado a malha rodoviária da região local, que muitas vezes é extremamente precária.

Por isso, o papel do religador é tão importante, pois é um equipamento capaz de sanar faltas de energia causadas por defeitos transitórios de forma autônoma e, através da implementação da lógica do sistema *self-healing*, também possibilita manobras automáticas de transferência de cargas, visando isolamento do trecho com defeitos permanentes e realimentação das demais cargas (RUPPENTHAL, 2019).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica acerca da cobrança de compensação financeira das concessionárias de energia elétrica, das topologias de rede de distribuição, dos religadores inteligentes e das técnicas de *self-healing*.

2.1 Indicadores de continuidade e compensação financeira

As compensações financeiras são calculadas a partir dos limites estabelecidos para cada um dos indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC, DMIC, DICRI), de modo que, caso algum dos limites seja transgredido, a concessionária deve pagar um valor como compensação para o cliente afetado, normalmente como forma de desconto na conta de energia do mês subsequente.

Os valores de cada limite e a fórmula para cálculo da compensação dependem diretamente do nível de tensão com o qual o consumidor é atendido (BT, MT ou AT) e da localização deste (perímetro urbano ou rural). Todos os dados estão presentes no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2022) e também no anexo A deste trabalho. A figura 2 mostra os valores pagos pela CEMIG S.A. em compensação financeira durante o ano de 2021.

Figura 2 – Valor pago em Compensação financeira pela CEMIG S.A. em 2021.

Índices de Compensação de Continuidade					
Região SUDESTE					
CEMIG-D - 2021					
Compensações	DIC, FIC e DMIC			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	5.825.001	881.647	796.505	84.339	7.587.492
Valor das compensações (R\$)	47.762.513,67	4.007.523,91	6.570.145,58	1.283.499,06	59.623.682,22

Fonte: (ANEEL, 2022).

2.2 Topologia das redes de distribuição elétrica

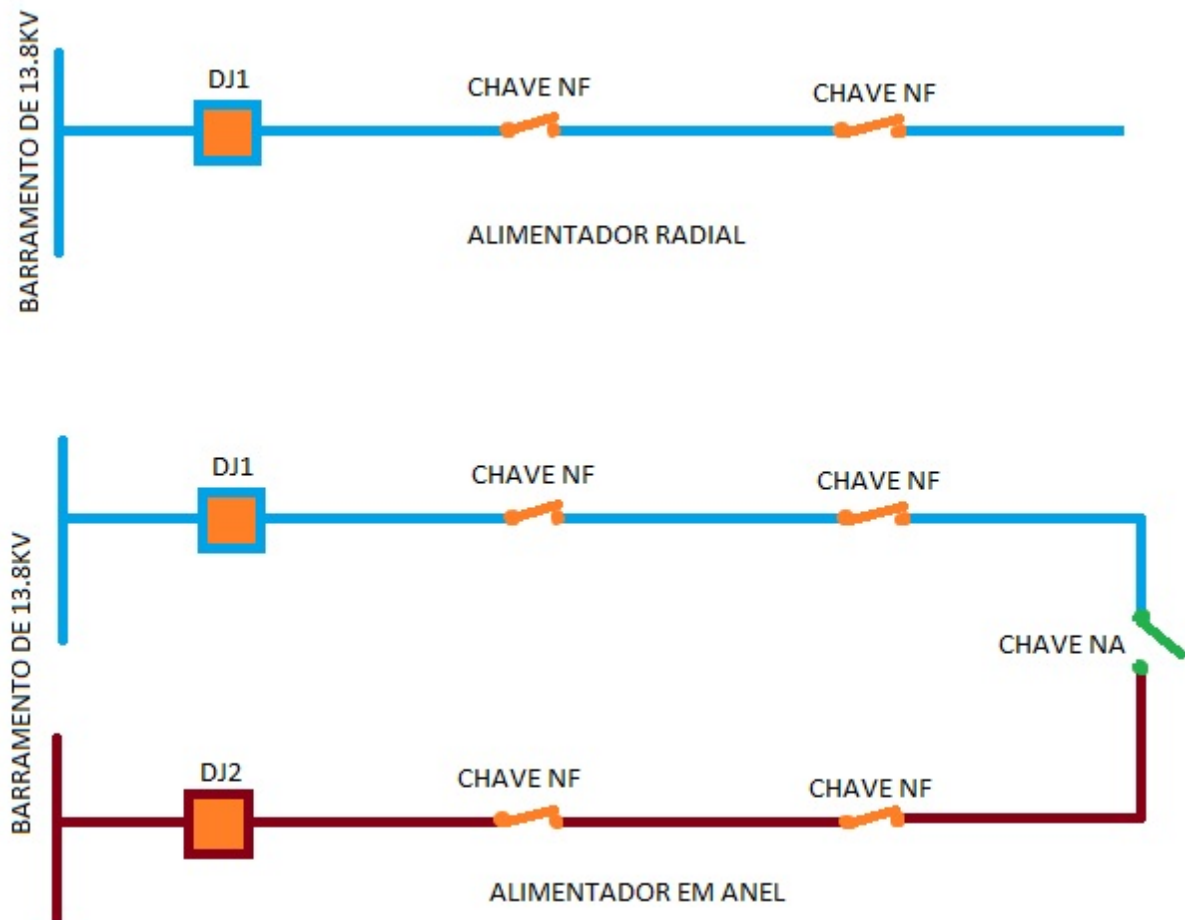
As redes de distribuição elétrica no Brasil podem ser de 2 tipos de topologia: radial, quando não existe nenhuma possibilidade de interligação, ou seja, existe somente um caminho entre o consumidor e o alimentador que sai da subestação, ou em anel, quando o alimentador possui uma ou mais possibilidades de interligação, ou seja, apresentando mais de um caminho possível entre a subestação e os consumidores, elevando a robustez e confiabilidade do sistema.

Os alimentadores de distribuição que possuem topologia em anel não ficam normalmente fechados em paralelo, essa prática é inviável pois isso traria diversas dificuldades para a coordenação dos equipamentos de proteção. Ao invés disso, nas topologias em anel encontram-se chaves de interface entre os alimentadores na posição aberta, comumente chamadas de “chaves NA” ou normalmente abertas. Essas chaves estão posicionadas no ponto de interligação entre os

alimentadores e têm como objetivo possibilitar a alimentação elétrica das cargas por um caminho alternativo em casos de defeitos no alimentador principal.

A figura 3 exemplifica a diferença entre a topologia radial e topologia em anel. Vale ainda ressaltar que o *self-healing*, objeto deste estudo, somente pode ser implementado em redes com topologia em anel.

Figura 3 – Topologia de rede radial e em anel.



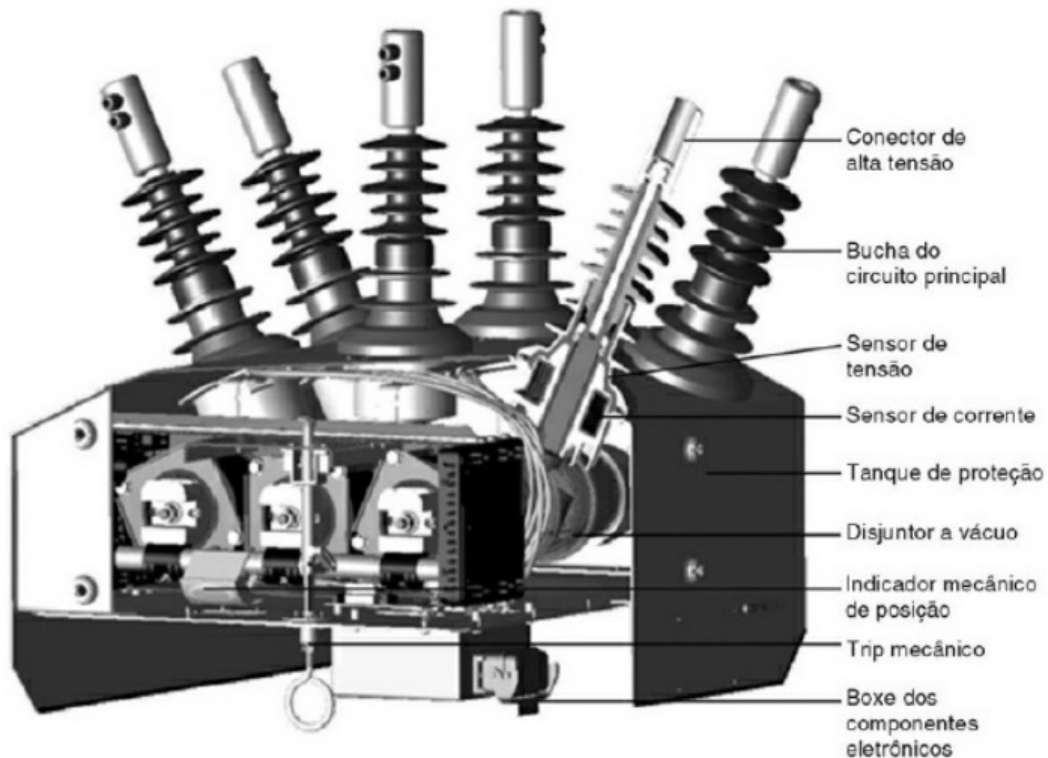
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.3 Religadores Automáticos

Os religadores automáticos são equipamentos de proteção e manobra instalados na rede elétrica. Sua estrutura física e funcionamento se assemelham com os disjuntores de média tensão, presentes nas subestações de distribuição de energia elétrica e também nas subestações de entrada de consumidores primários (consumidores que recebem energia da concessionária em MT). O corpo de um religador, conforme explicitado na figura 4, é composto fundamentalmente pelos seus terminais de entrada e saída, os contatos internos, sensores de tensão e corrente e uma câmara capaz de extinguir o arco elétrico durante a abertura (pode ser a óleo, porém os mais

utilizados são a vácuo).

Figura 4 – Corpo de um religador Tavrída.



Fonte: (MAMEDE FILHO, 2013)

A lógica de detecção de sobrecorrente, curto-circuito, desequilíbrio e tantas outras funções fica por conta do relé microprocessado instalado na caixa de comando do religador. Um exemplo de caixa de comando é visto na figura 5. O relé de proteção, além de enviar os comandos de abertura e fechamento para o religador, também possui comunicação remota com o sistema supervisório SCADA do centro de operações. A rede de comunicação entre o SCADA e os religadores é de protocolo aberto e pode utilizar modems GPRS (General Packet Radio Service, trata-se da tecnologia de dados móveis utilizada nos celulares) ou Satélite dependendo das condições do local de instalação. A descrição sumária do funcionamento dos religadores inteligentes é tal que:

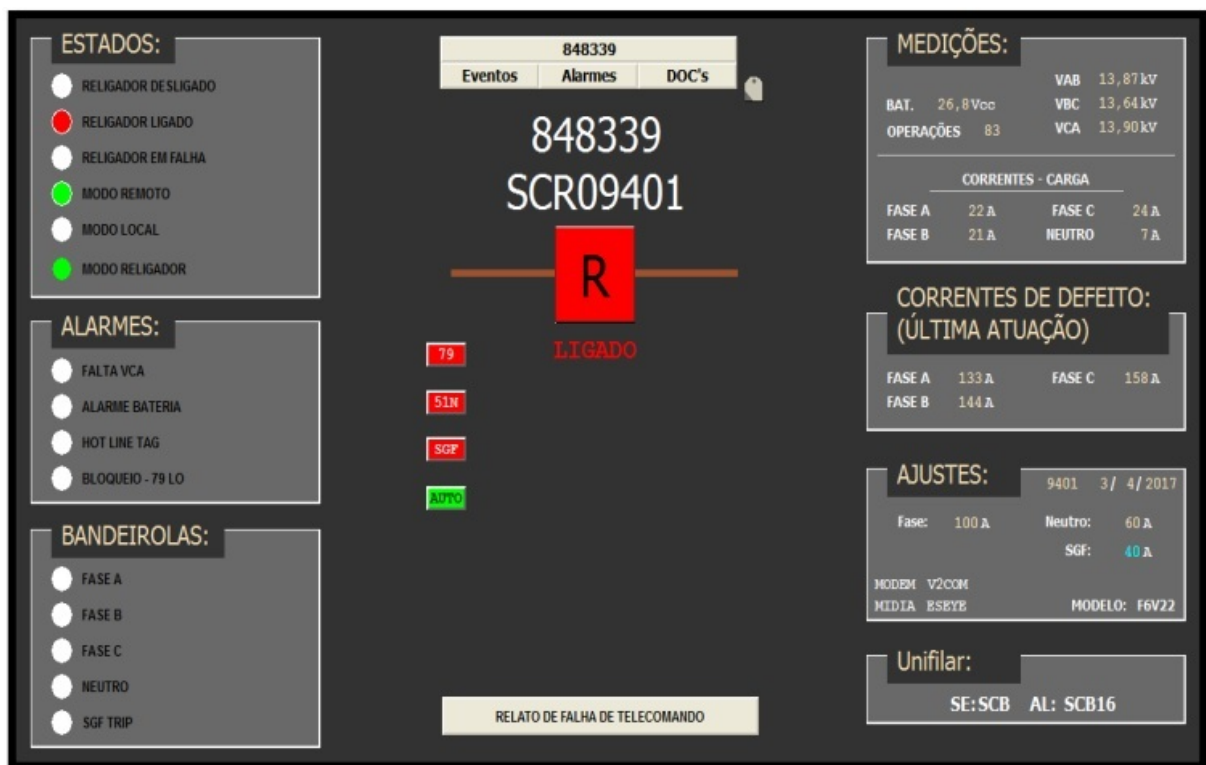
“O sensor do religador ao sentir uma condição de corrente anormal no circuito envia um sinal ao sistema de manobra que efetua a abertura dos contatos principais. Após um determinado período, denominado de tempo de religamento, automaticamente, o sensor envia outro sinal, ordenando ao sistema de manobra efetuar o fechamento dos referidos contatos, reenergizando o alimentador. Se a corrente de defeito persistir, o religador inicia o chamado ciclo de religamento, em que é efetuado um determinado número de aberturas e fechamentos, de acordo com as condições programadas no controle e em função da condição de serviço que se quer obter.” (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 5 – Circuito de controle (caixa de comando) para religador FORM6.



A figura 6 evidencia a captura da tela de um sistema SCADA utilizado pelos centros de operação. Nesta tela é possível identificar o religador bem no centro, com o número que o identifica e o estado (ligado ou desligado). Nas laterais temos outros indicativos, como os estados (ligado ou desligado, modo remoto ou local, se o religador está em falha e o modo de trabalho), os alarmes (falta de VCA, alarme de bateria baixa, operação em *hot line* e etc), as bandeirolas operativas, as medições em tempo real (tensões de linha, correntes de linha, tensão na bateria da UPS e contador de operações), os ajustes de proteção (corrente nominal parametrizada para fase e neutro) e também as correntes de defeito (correntes de curto-circuito) da última atuação.

Figura 6 – Exemplo de tela em sistema SCADA.



Fonte: (RUPPENTHAL, 2019)

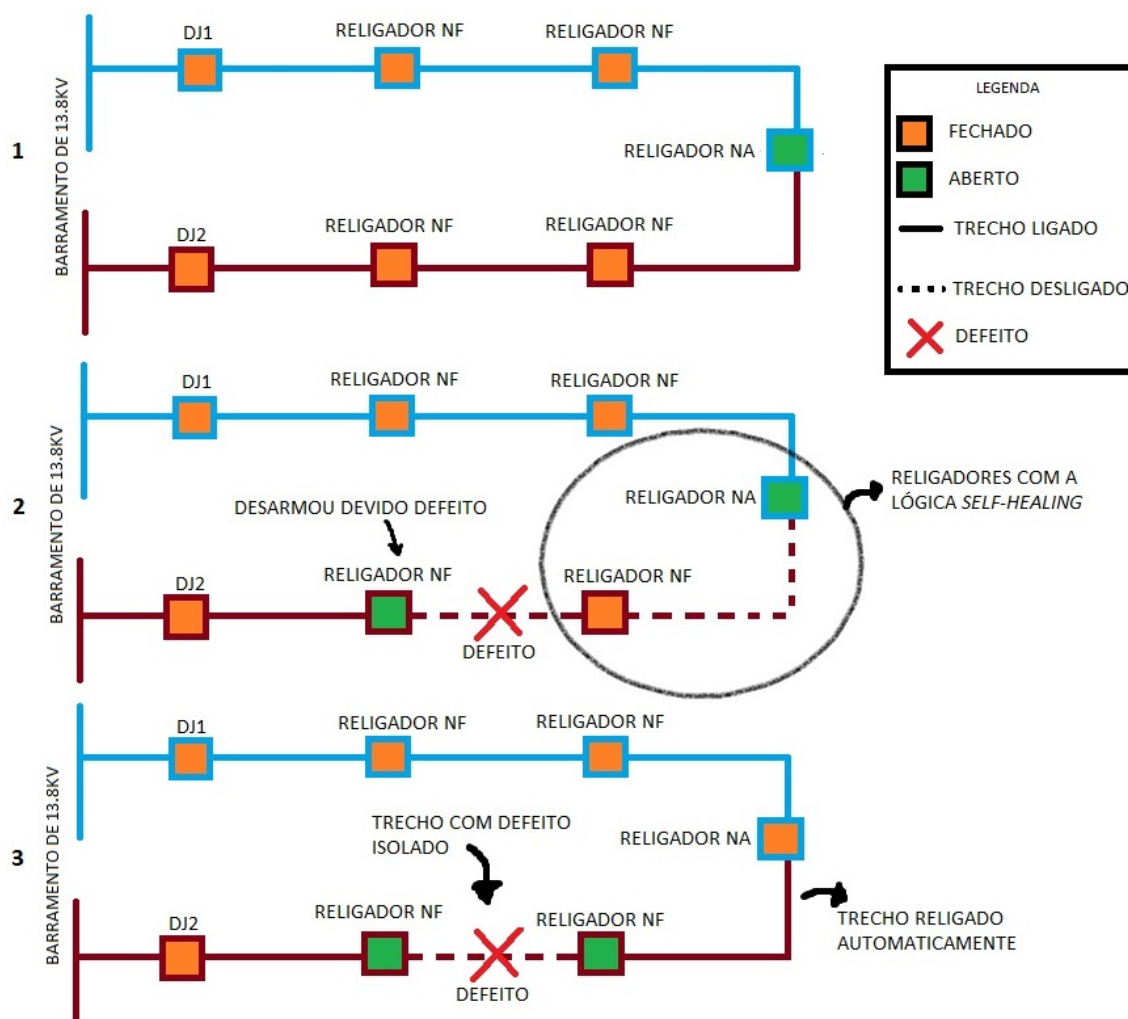
2.4 Sistemas *Self-healing*

O termo *self-healing* refere-se a uma rede de distribuição “auto regenerável” capaz de se recuperar, dentro dos limites possíveis, após a ocorrência de um defeito permanente no alimentador de distribuição, minimizando o número de clientes impactados pela falta de energia e, conseqüentemente, garantindo ganhos nos indicadores de continuidade de energia (FALCAO *et al.*, 2010). Uma rede de distribuição de energia é capaz de receber um sistema de *self-healing* desde que possua topologia em anel e que possua em seu tronco ao menos um religador NF e um religador NA, ambos munidos de um circuito de controle (relé microprocessado).

De modo geral, a descrição da sequência de eventos durante a atuação de um sistema de

self-healing, conforme mostrado na figura 7, é tal que: o religador NF existente no tronco do alimentador é capaz de identificar a falta de tensão consolidada nos seus terminais de entrada, a partir daí entende-se que houve o bloqueio (desarme) do equipamento de proteção a montante deste religador devido a ocorrência de um defeito permanente. Como o religador NF em questão não veio a desarmar por curto-circuito nem por sobrecorrente, e a falta de tensão foi identificada a sua montante, conclui-se então que não há defeito após o religador NF e que todas as cargas posicionadas a jusante deste equipamento podem ser transferidas e realimentadas. Após toda essa parte lógica de análise da localização do ponto do defeito, o religador NF irá abrir, e um religador NA localizado a jusante do NF irá fechar, religando as unidades consumidoras através de um outro alimentador. Essa manobra com as cargas de um alimentador chama-se transferência de cargas, e a grande premissa do *self-healing* é realizar essa manobra de forma autônoma.

Figura 7 – Sequência de Eventos: Atuação de um *Self-healing*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.4.1 Arquiteturas de controle dos sistemas *Self-healing*

Os sistemas *self-healing* podem diferenciar-se dependendo de onde está alocada a lógica de acionamentos ou de qual é a sequência de comandos implementada. Segundo Vaz, os sistemas de auto recuperação se dividem em 3 tipos de arquitetura:

“*Self-healing* Distribuído: nesse caso, a lógica de recomposição é alocada nos controladores dos religadores espalhados pela rede de distribuição;
Self-healing Semi-centralizado: a lógica de recomposição do sistema elétrico fica alocada no servidor de *self-healing*, que pode ser instalado na subestação de energia da região;
Self-healing Centralizado: sistema que reside no Centro de Controle regional da empresa de distribuição de energia elétrica. .” (VAZ, 2017)

Na prática, através da análise de implementações de *self-healing* pela empresa CEMIG S.A. na malha oeste de Minas Gerais, é correto afirmar que a metodologia semi-centralizada não é implementada, deste modo, os *self-healings* encontrados nesse campo são o centralizado e o distribuído (ou descentralizado);

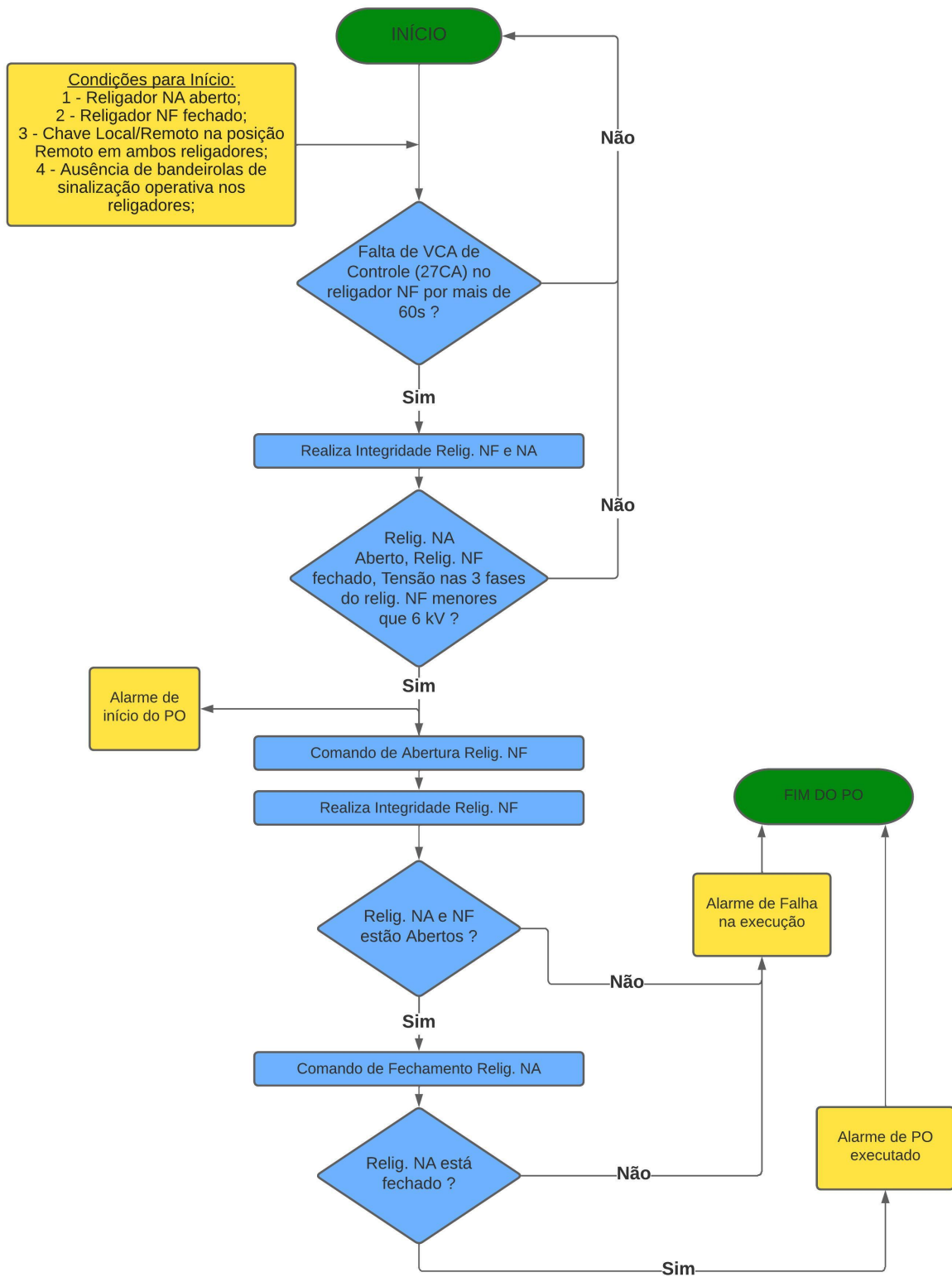
No *self-healing* distribuído, como a lógica de recomposição está alocada na memória do controlador dos próprios religadores, é necessário que tanto o equipamento NA quanto o NF saibam quais ações executar e quando executar. Para que isso seja possível, é necessário implementar um algoritmo de lógica *feeder* no religador NF, cuja função é permitir que o equipamento abra seus contatos após detectar ausência de tensão consolidada a montante e aguardar um tempo parametrizado. Também é necessário implementar um algoritmo de lógica *tie* no religador NA, cuja função é permitir que o equipamento feche seus contatos após a detecção da ausência de tensão consolidada a montante do NF e aguardar um tempo parametrizado (ANDRADE, 2016). O tempo parametrizado na lógica *tie* é sempre maior que o tempo parametrizado na lógica *feeder*, pois não é desejável que o religador NA feche antes do NF abrir, uma vez que isso poderia realimentar o ponto de defeito. Apesar deste funcionamento coordenado entre as lógicas *feeder* e *tie*, cada uma está implementada em um equipamento diferente, por isso também é necessário que os controladores de ambos os religadores sejam capazes de comunicar entre si através de uma rede de campo.

Na metodologia distribuída, os religadores são fundamentalmente iguais aos religadores da metodologia centralizada, possuem caixa de comando com relé microprocessado e comunicação com sistema SCADA. Deste modo, caso o canal de comunicação esteja *online* é possível observar no sistema supervisão tanto a medição de falta de tensão no religador quanto o momento de abertura e fechamento de cada um. No entanto, como os algoritmos de recomposição estão implementados nos próprios controladores, não existe dependência de comunicação entre os equipamentos e o sistema SCADA, com isso é correto afirmar que as lógicas *feeder* e *tie* im-

plementadas serão executadas ainda que no momento da falta de energia os canais de telecontrole estejam *offline* e não exista nenhuma comunicação com SCADA.

No *self-healing* centralizado toda a lógica de recomposição está armazenada no próprio sistema supervisorio na forma de um *script* chamado de Plano Operacional (PO), que é o código que define a sequência exata de pré-requisitos que precisam ser checados e eventos que precisam ocorrer para que a recomposição do trecho desligado seja realizada através do *self-healing*. A figura 8 traz o fluxograma de um *script* para *self-healing* centralizado implementado pela CEMIG S.A. com a respectiva descrição de cada uma das etapas checadas e executadas pelo sistema supervisorio.

Figura 8 – Script de execução de um *self-healing* centralizado.



Fonte: Adaptado de (FELBER *et al.*, 2015)

Através do fluxograma é possível compreender passo a passo como é executado um PO de *self-healing* centralizado, e apesar de parecer um procedimento longo e demorado, todo o *script* é programado para que seja iniciado e concluído em menos de 3 minutos contados a partir do momento da interrupção da energia. É importante ressaltar alguns pontos sobre as condições para início do *script* de *self-healing* centralizado:

- O sistema *self-healing* centralizado é feito para não atuar caso o alimentador em questão já esteja sob manobra de intervenção de qualquer natureza. Por isso, conforme observado na figura 8, na área das condições para início do PO, percebe-se que o *script* não é executado caso o religador NA esteja fechado, ou o religador NF esteja aberto, ou ainda se ambos os religadores estiverem nas suas posições normais, mas estiverem em modo local ou com alguma bandeirola operativa no sistema supervisório. Todo este intertravamento presente nas condições iniciais impede que o sistema venha a atuar em um circuito onde existam eletricitistas trabalhando ou que já esteja sob transferência coordenada pelo COD (Centro de Operações da Distribuição), tornando o *self-healing* centralizado um sistema bastante seguro.
- Observa-se também que, na primeira decisão do fluxograma apresentado, a variável responsável por iniciar todos os processos é a falta de tensão de controle no religador NF. Como foi explicado, os religadores telecontrolados precisam de um circuito de controle, também chamado de caixa de comando, onde fica instalado o relé microprocessado. Este circuito de controle precisa ser alimentado com tensão CA (127V ou 220V) para que possa funcionar normalmente, e possui internamente uma UPS (fonte de energia ininterrupta) responsável por manter o painel funcionando por um tempo em casos de falta de energia na alimentação do controle. Existe uma *Tag booleana* no sistema supervisório atrelada a esta tensão de alimentação CA do circuito de controle, de modo que, todas as vezes em que há falta de tensão na caixa de comando, a UPS assume a alimentação do relé e a *Tag booleana* de falta de VCA muda o estado de 0 para 1. No momento que essa *Tag* assume valor igual a 1, é emitido um alarme de falta de VCA no sistema supervisório e inicia-se a contagem do tempo de 60 segundos.

Uma dúvida que pode aparecer é: se o *self-healing* existe para transferir um circuito de MT em casos de defeito na retaguarda, por que a informação que dá o início da execução do *script* é a falta de tensão de BT na caixa de comando?

A resposta para esta questão é a seguinte: como é possível observar na figura 6, todo religador possui leitura das tensões de linha na MT, porém essa informação é recebida pelo sistema supervisório como uma entrada analógica, afinal de contas o valor de tensão por cada fase pode variar completamente na faixa de 0 até aproximadamente 8kV, deixando óbvio que uma informação como esta não pode ser traduzida de forma *booleana*. Por outro lado, a informação de falta de VCA chega ao sistema supervisório como uma entrada digital, afinal de contas não

importa saber se o valor da tensão na caixa de comando está em 110V ou em 130V, só é importante saber se existe ou não tensão alimentando o comando, para que seja possível emitir um alarme em caso de falta. Dado o exposto, entende-se que por motivos de otimização do tráfego de dados, apenas as entradas de dados digitais possuem atualização instantânea no sistema supervisório, por isso, visando acelerar o tempo de atuação do *self-healing*, utiliza-se uma entrada digital como "gatilho" inicial. Ademais, as entradas analógicas, como leituras de tensões e correntes de linha, somente são atualizadas a cada 5 minutos, ou caso o comando de "realizar integridade" seja enviado ao religador, pois este comando força uma atualização em todos os seus valores de entrada, independente se são analógicos ou digitais.

2.4.2 Comparação entre arquiteturas de controle dos Sistemas *Self-healing*

Comparando o *self-healing* centralizado com o descentralizado em termos de vantagens e desvantagens é possível destacar que:

- O *self-healing* centralizado é mais versátil e mais barato de se implementar que o distribuído, pois qualquer religador automático que possua comunicação com o SCADA pode ter suas *tags* incluídas em um PO de *self-healing*. Como a parte lógica é toda executada no sistema supervisório, cabe ao religador apenas executar o comando que foi enviado (seja de abrir, fechar ou verificar integridade). Já para o sistema distribuído, apenas alguns modelos específicos de controladores possuem capacidade de implementação local de lógica *feeder* ou *tie*, sendo estes geralmente mais caros que a concorrência.
- O *self-healing* centralizado é mais seguro para terceiros e para o patrimônio da empresa, pois no script de execução a etapa seguinte somente pode ser excetuada se a etapa anterior for concluída com sucesso, caso haja falha na execução de alguma etapa intermediária o PO de *self-healing* é automaticamente abortado. Na prática, isso garante que necessariamente o religador NA só vai fechar de fato caso o religador NF tenha recebido e executado com sucesso o comando de abertura, o mesmo esquema também ocorre caso já exista qualquer manobra de intervenção sendo executada no circuito em questão, pois caso seja detectado que algum dos religadores não está em sua condição normal, o PO de *self-healing* também não será executado. No caso do *self-healing* descentralizado, apesar de a lógica *tie* possuir um tempo parametrizado maior que a *feeder* e da rede de comunicação de campo entre os controladores ser extremamente robusta, é possível que por algum motivo (problema mecânico ou eletrônico) o religador NF não consiga abrir seus contatos físicos, neste caso o religador NA irá executar a lógica *tie* no seu tempo programado e irá fechar, podendo acarretar em uma reenergização do ponto com defeito. Além disso, devido o *self-healing* descentralizado não verificar a condição de operação dos religadores no SCADA no momento da ocorrência, é correto afirmar que não existe intertravamento no que tange as bandeiras operativas e condições de operação especiais, em outras palavras, significa

que caso o religador esteja sob manobra de intervenção de outra natureza ou possua alguma equipe trabalhando com rede energizada no circuito (*Hot line*) por exemplo, ainda assim o *self-healing* descentralizado seria executado conforme as operações *feeder* e *tie*, podendo causar danos materiais ou até risco à vida de terceiros em alguns casos.

- Como vantagem para o sistema distribuído pode-se elencar que este é muito bem aproveitado em áreas rurais, locais ermos ou com grande instabilidade de sinal telefônico, pois sua execução independe de os canais de comunicação com o sistema SCADA estarem funcionando. É sabido que em grande parte das áreas rurais do estado a comunicação GPRS não funciona de forma satisfatória, nessas situações, caso seja implementado um sistema *self-healing* centralizado é provável que este venha a falhar durante a execução. A solução de comunicação via satélite no lugar do GPRS pode ser implementada, porém atualmente o tráfego de dados via satélite ainda possui custo muito elevado, além do custo do próprio equipamento (antena, modulador e afins), tornando esta uma solução bastante cara.

Vaz (2017) trouxe em seu trabalho alguns outros pontos de vantagens e desvantagens entre as diferentes arquiteturas de controle dos sistemas *Self-healing*, conforme figura 9 a seguir:

Figura 9 – Comparação entre arquiteturas de controle para sistemas de *Self-healing*.

	Self-Healing Distribuído	Self-Healing Semi Centralizado	Self-Healing Centralizado
Princípio de Funcionamento	A lógica de recomposição é alocada nos controladores dos religadores espalhados pela rede de distribuição	A lógica de recomposição do sistema elétrico fica alocada no servidor de <i>Self-Healing</i> , que pode ser instalado na subestação de energia da região	O sistema reside no Centro de Controle regional da empresa de distribuição elétrica
Tempo de reconfiguração da Rede Aérea de Distribuição	Inferior a 10 segundos (depende do meio de comunicação)	Inferior a 1 minuto	Inferior a 3 minutos (depende do meio de comunicação)
Pode ser implementado usando o controlador padrão do religador – Base instalada?	Normalmente não, é necessário um IED que tenha IEC-61850 com mensagens GOOSE	Sim, desde que controlador do religador se comunique via protocolo aberto (e.x. DNP 3.0)	Sim, desde que controlador do religador se comunique via protocolo aberto (e.x. DNP 3.0)
Característica do Sistema de Telecomunicações	Exige um sistema de comunicação que permita a troca de dados entre os controladores dos religadores	Requer uma infraestrutura de telecomunicação mais simples do que o SelfHealing distribuído, pois não há necessidade de troca de telegramas entre os controladores dos religadores	Requer uma infraestrutura de telecomunicação mais simples do que o SelfHealing distribuído, pois não há necessidade de troca de telegramas entre os controladores dos religadores
Sistemas de Telecomunicação aptos a trafegar os dados	WiMax, Fibra Óptica, RF MESH	GPRS, 3G, WiMax, Fibra Óptica, RF MESH	GPRS, 3G, WiMax, Fibra Óptica, RF MESH
Exige um sistema de telecomunicações robusto entre a Subestação e o Centro de Controle Central?	Não	Não	Sim
Pode operar como Gateway do sistema de automação da Subestação na região do <i>Self-Healing</i> ?	Não	Sim	Não
Custo de Implementação (comparativamente entre as opções)	\$\$	\$	\$\$

Fonte: (VAZ, 2017).

O *self-healing* centralizado será o objeto principal deste estudo de caso, tendo em vista as vantagens citadas e a grande presença desta arquitetura nas redes de distribuição da CEMIG S.A. na malha oeste de Minas Gerais. O capítulo a seguinte irá tratar de forma analítica diversos dados relevantes relacionados às ocorrências de interrupção de energia e ao funcionamento dos *self-healings* centralizados.

3 METODOLOGIA

Nesta etapa do trabalho serão apresentados os materiais e métodos utilizados para obtenção e tratamento dos dados, visando alcançar resultados coerentes e passíveis de discussão na seção de Resultados e Discussões.

3.1 Materiais

A lista a seguir elenca os principais recursos utilizados durante a realização do trabalho. Tendo em vista a natureza do estudo de caso, os recursos mais valiosos são os dados, por isso grande parte do conteúdo é avindo de planilhas e bancos de dados.

- Computador com internet;
- *Softwares* de gestão de dados (Excel e Python);
- Dados de ocorrências de falta de energia na macro região oeste de Minas Gerais, ano de referência 2021. Fonte: Banco de dados CEMIG S.A.
- Planilha identificando todos os *Self-healings* Centralizados instalados na região estudada. Fonte: Banco de dados CEMIG S.A.
- Registro Histórico de atuação e falhas dos *Self-healings* da região estuada durante o ano de 2021. Fonte: Supervisorio CEMIG S.A.
- Script de atuação dos *Self-healings* Centralizados. Fonte: (FELBER *et al.*, 2015)
- Planilha para elaboração de gráficos e cálculo de compensação financeira de clientes. Fonte: O autor, 2023.

3.2 Métodos

A primeira etapa de execução do trabalho foi o estudo de referencial teórico para elaboração da introdução e da revisão bibliográfica. Nesta etapa, além da leitura de livros, artigos e normas, também foram realizadas reuniões com os engenheiros responsáveis pela implementação do sistema SHC (*Self-Healing* Centralizado) na CEMIG S.A.

Os objetos do estudo foram os dados de ocorrências de falta de energia que impactaram a malha Oeste de Minas Gerais durante o ano de 2021. Todas as ocorrências após finalizadas possuem um relatório preenchido e armazenado do banco de dados interno da CEMIG S.A., sendo esta a fonte principal do trabalho. As ferramentas utilizadas para tratar o conjunto de ocorrências foram o *software* "Excel" e a linguagem de programação "*Python*", mais especificamente a biblioteca *Pandas Dataframe*. Com estes utilitários foi possível analisar e filtrar os dados, calcular indicadores e montar gráficos, os quais serão apresentados na seção posterior.

Através da aplicação do método espera-se obter indicadores passíveis de análises quantitativas e qualitativas a respeito das características predominantes nos alimentadores de distribuição da região estudada, dos impactos percebidos durante o ano devido as ocorrências em alimentados que possuem ou não a implementação de SHC, da confiabilidade do algoritmo de atuação do SHC e a viabilidade financeira deste investimento.

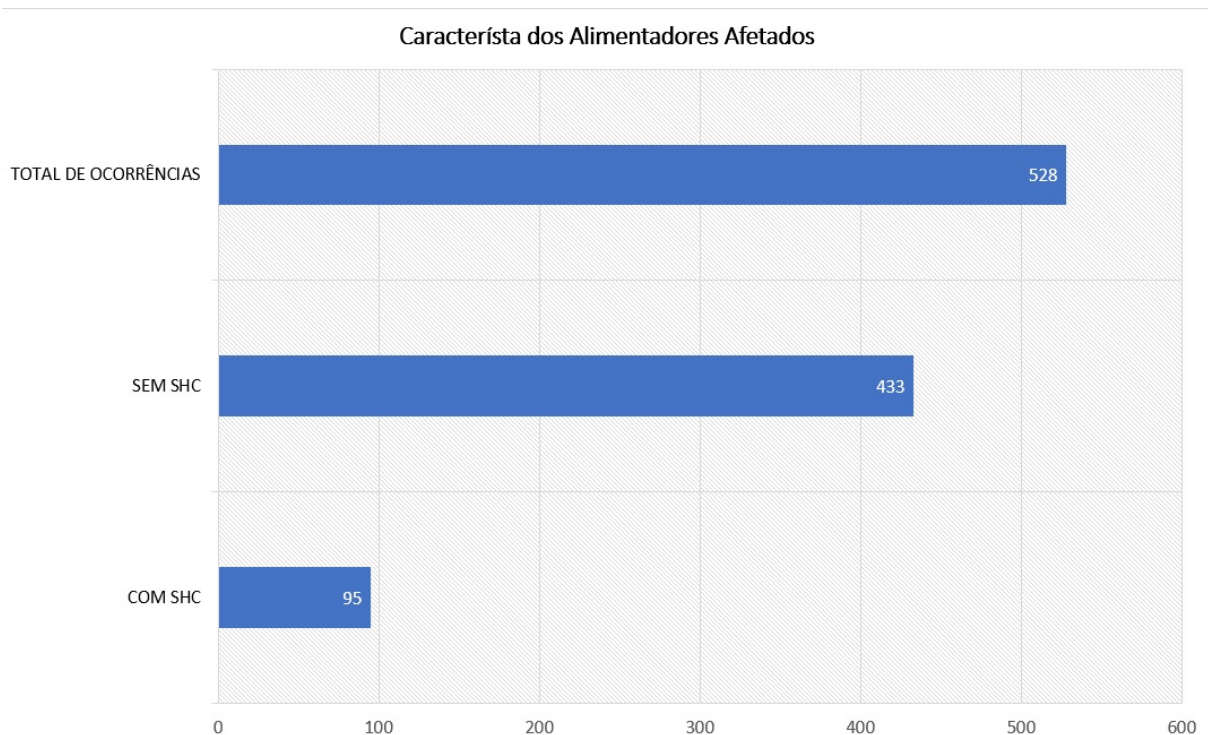
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados durante a execução do trabalho, bem como as discussões e comparações pertinentes em relação aos resultados esperados segundo a teoria, de modo a destacar a contribuição desta pesquisa para o meio acadêmico.

4.1 Característica dos alimentadores afetados por ocorrências

Os resultados apresentados a seguir compreendem como universo do estudo todas as 528 ocorrências de falta de energia que afetaram a malha oeste de Minas Gerais em 2021. A figura 10 apresenta em seus dados que, dentre todas as ocorrências estudadas, apenas 95 ocorrências foram em alimentadores que possuem sistema SHC (*Self-Healing Centralizado*). Este resultado evidencia que a tecnologia do SHC tem muito espaço para crescimento, pois apesar de conhecida mundialmente, ainda está em processo de implementação lento e gradativo nas redes de distribuição mineiras.

Figura 10 – Característica dos Alimentadores Afetados.



Fonte: O Autor.

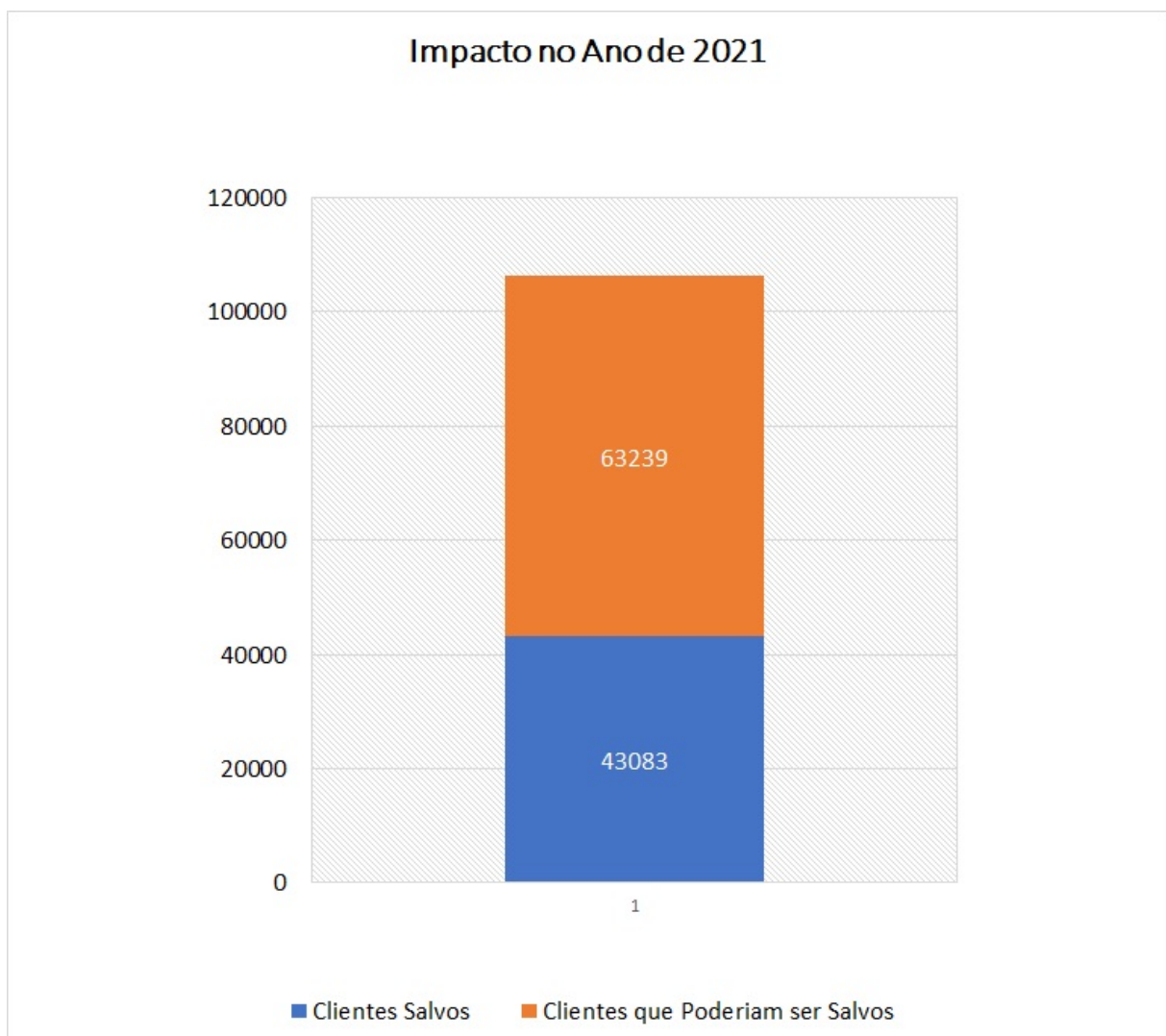
4.2 Clientes salvos durante o ano

Segundo o procedimento estabelecido pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2022), os indicadores de continuidade por ponto de conexão devem ser apurados considerando apenas as interrupções de longa duração, ou seja, aquelas em que as UCs (unidades consumidoras) ficaram

desligadas por 3 minutos ou mais. Deste modo, todo desligamento com tempo inferior a esse é uma interrupção de curta duração e, conseqüentemente, não contabiliza para os indicadores de continuidade de energia já citados (FIC, DIC e etc).

A figura 11 apresenta que, dentre todas as ocorrências de falta de energia que afetaram a malha oeste de Minas Gerais em 2021, foi possível evitar a interrupção de 43083 UCs, pois essas foram religadas em menos de 3 minutos após a ocorrência devido a atuação do SHC. Vale ressaltar que este dado não se refere a 43083 UCs únicas, pois alguns alimentadores sofreram diversas ocorrências durante o ano, fazendo com que o SHC destes alimentadores atuasse diversas vezes durante o período estudado e salvando um mesmo cliente em diversas situações.

Figura 11 – Clientes Salvos em 2021.



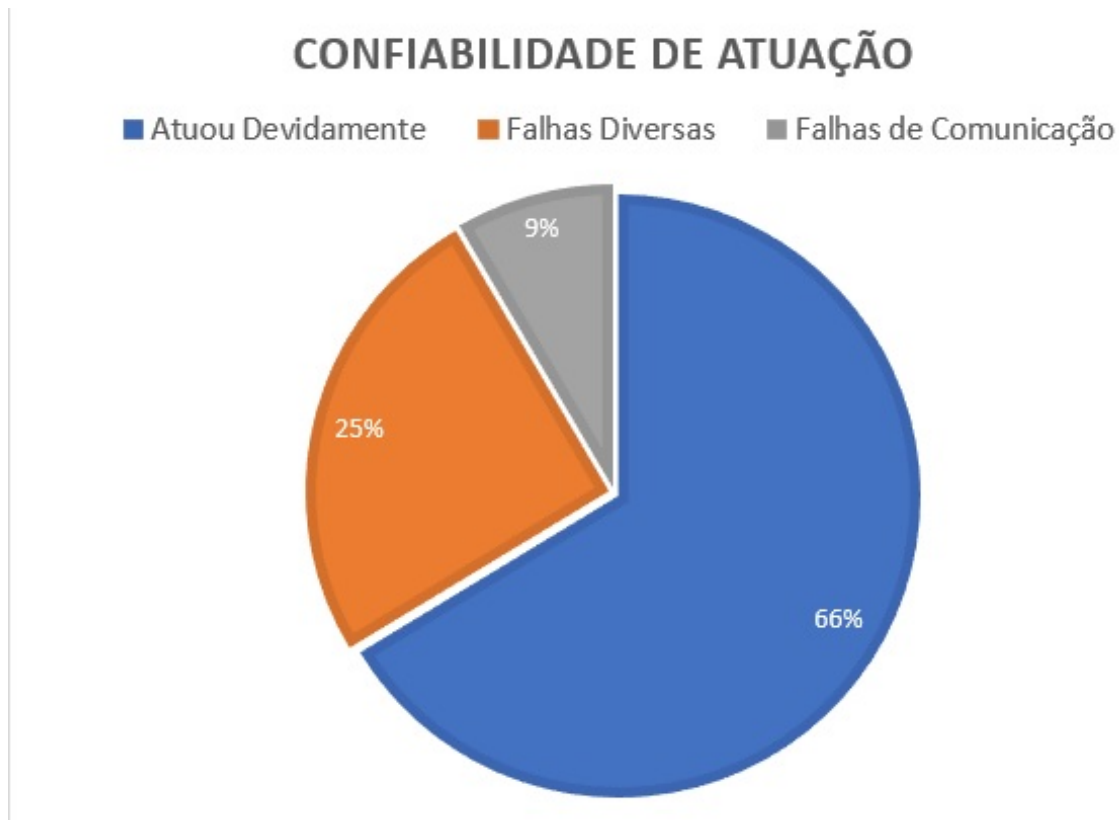
Fonte: O Autor.

Por outro lado, o mesmo gráfico mostra que mais de 63200 interrupções em UCs poderiam ser evitadas, porém o sistema SHC não atuou nestes casos e essas UCs não foram salvas. Ademais, a figura 11 já deixa indícios de que o SHC não possui assertividade de 100%, motivando o presente trabalho a buscar dados mais específicos referentes a confiabilidade geral desse sistema.

4.3 Confiabilidade de atuação

Em cada uma das 95 ocorrências que afetaram alimentadores de distribuição possuidores de *self-healing* centralizado, foi analisado especificamente qual o equipamento de proteção que desarmou na ocorrência e qual a posição geográfica deste equipamento, isto é, se o bloqueio foi em um religador posicionado à montante do religador NF do *self-healing* ou não. Esta análise é muito importante, pois na revisão teórica foi explicado que o *script* de *self-healing* é iniciado se, e somente se, for identificada a falta de tensão a montante do religador NF do *self-healing*.

Após as análises de cada um dos eventos, as informações de confiabilidade do sistema foram resumidas no gráfico da figura 12, onde é possível verificar que em dois terços dos casos o *script* de *self-healing* funcionou devidamente. Isso engloba os casos em que o bloqueio foi no equipamento à montante e a transferência automática foi feita corretamente e também os casos em que o bloqueio foi à jusante e a transferência não foi feita. Afinal, se o comportamento estiver dentro do esperado, então considera-se que a seu funcionamento foi correto. Além disso, foi observado que em 9% das vezes houve disparo no *script* de *self-healing*, porém não foi concluído com êxito. Isso significa que as condições iniciais corretas para atuação do *self-healing* foram reconhecidas, porém no momento do SCADA enviar os comandos para os religadores NF ou NA houve falha de comunicação.

Figura 12 – Confiabilidade de atuação do *self-healing* centralizado.

Fonte: O Autor.

Em 25% das vezes foi detectado que o *script* de *self-healing* poderia ter atuado, porém não atuou. Na prática percebeu-se que nesses casos o *script* de *self-healing* nem mesmo foi iniciado, o que indica que algum pré-requisito não foi atendido. Porém, analisando estrategicamente do ponto de vista da operação do sistema elétrico de potência, eram casos em que a transferência de cargas deveria sim ser feita. Para esta categoria de situações foi atribuído o nome de "Falhas Diversas".

Abaixo serão listados e explicados alguns dos principais motivos que causaram estas falhas.

- Falta de fase à montante: as ocorrências de falta de fase são muito comuns no dia a dia. Isso acontece quando alguma das fases do SEP (R, S ou T) acaba se partindo, normalmente o rompimento acontece nos pontos de emenda ou de conectores, como por exemplo nos postes em que existem chaves seccionadoras instaladas, já que para instalar a chave é necessário instalar os conectores na entrada e saída do equipamento. Deste modo, em dadas circunstâncias pode ocorrer de cabos partirem ou conectores se soltarem na rede, mas sem que haja curto-circuito no sistema. Se não houve curto-circuito, o equipamento de proteção à montante não vai bloquear, pelo contrário, continuará fechado e energizando as demais fases do circuito, e por consequência, no religador NF do *self-healing* serão verificadas 2 fases

com tensão normal (aproximadamente 7,8kV) e uma fase faltante. Segundo as diretrizes da ANEEL, caso exista falta de qualquer fase do sistema, a interrupção é contabilizada em todas as 3 fases, e por isso o procedimento correto é abrir o religador NF em que foi detectada a falta de fase, e transferir as cargas para outro alimentador que esteja normal. No entanto, o *self-healing* possui como condição de atuação que as 3 fases a montante do religador NF estejam menores que 6kV, ou seja, o *script* atualmente em uso é feito para atuar somente em faltas trifásicas, fazendo com que em situações de falta de uma ou duas fases o circuito tenha que ser manobrado manualmente pelo técnico do COD.

- **Bandeirola de sinalização indevida no SCADA:** conforme observado na figura 8, uma condição de início para o *script* de *self-healing* é a ausência de bandeirola de sinalização operativa nos religadores envolvidos. Esta condição é bastante importante, pois a função das bandeirolas é sinalizar quando algum religador já está sob intervenção de qualquer natureza, por exemplo, se um equipamento está com a proteção de sobrecorrente de neutro desativada ou com o religamento automático desativado momentaneamente, este equipamento deve ser sinalizado com a bandeirola por questões de segurança. No entanto, as bandeirolas são colocadas e removidas do equipamento de forma totalmente manual, ou seja, se um técnico do COD estiver manobrando um equipamento, ele deve inserir a devida sinalização, e quando ele normalizar o equipamento deve remover a sinalização manualmente. Tendo em vista o fator humano envolvido, é possível que, após um equipamento já ter sido normalizado, a bandeirola de sinalização seja "esquecida" no equipamento dentro do SCADA, e caso este religador em questão seja o NF ou o NA do conjunto de *self-healing*, haverá uma condição que impedirá o início da execução do *script*.
- **Religadores NA e NF pertencentes ao mesmo alimentador:** Esta última condição não é tão recorrente, mas existe e foi observada em 2 dos casos analisados. Como foi explicado no capítulo 2, a filosofia de funcionamento do *self-healing* é transferir de forma automática um determinado bloco de clientes para um alimentador de contingência caso a fonte principal de alimentação esteja bloqueada por causa de algum defeito. Foi explicado também que para que essa transferência seja possível, os alimentadores de distribuição devem possuir topologia em anel, ou seja, possibilidade de interligação através de equipamentos NA que ficam posicionados entre ambos os alimentadores. No entanto, existem casos em que o alimentador de distribuição é tão extenso que acaba possuindo dois troncos invés de um, significa que após sair da subestação este alimentador é bifurcado e em cada um dos troncos é instalado um religador NF para proteção, e também ao longo destes existe um religador NA que faz a interligação entre os dois troncos. Ao se implementar uma lógica de *self-healing* em um alimentador com esta topologia é sabido que, caso um dos troncos venha a bloquear, uma parte das cargas poderá ser transferida para o outro tronco. Porém, caso o bloqueio venha a ser do alimentador inteiro, o *self-healing* não poderá ajudar em nada, pois se o disjuntor do alimentador desarmar na subestação, ambos os troncos ficarão

desligados. Deste modo, quando o *script* de *self-healing* verificar se existe falta de tensão no religador NF e se existe tensão no religador NA, será constatado que o NA também não tem tensão e a transferência não será executada.

4.4 Impactos de ocorrências em alimentadores com e sem *self-healing* centralizado

Em toda ocorrência de falta de energia existem dois números que são de extrema importância para que seja possível analisar quantitativamente os impactos da ocorrência, são eles: número de clientes atingidos, e o cliente hora interrompido (CHI) da ocorrência.

O número de clientes atingidos é determinado basicamente pelo número de clientes ligados a jusante do equipamento que veio a bloquear na ocorrência. Por exemplo, em uma dada ocorrência foi registrado que o disjuntor do alimentador "A" veio a desarmar na subestação, e o alimentador "A" possui 4000 clientes ligados em toda sua extensão, deste modo, como todo o alimentador foi afetado, o número de clientes atingidos seria 4000. Porém, se ao longo da extensão do alimentador "A" existe instalado um religador NF "X", o qual possui 1800 clientes ligados a sua jusante, caso este equipamento venha a bloquear por curto-circuito, somente os clientes ligados a jusante do religador seriam interrompidos, logo neste caso o número de clientes atingidos seria 1800.

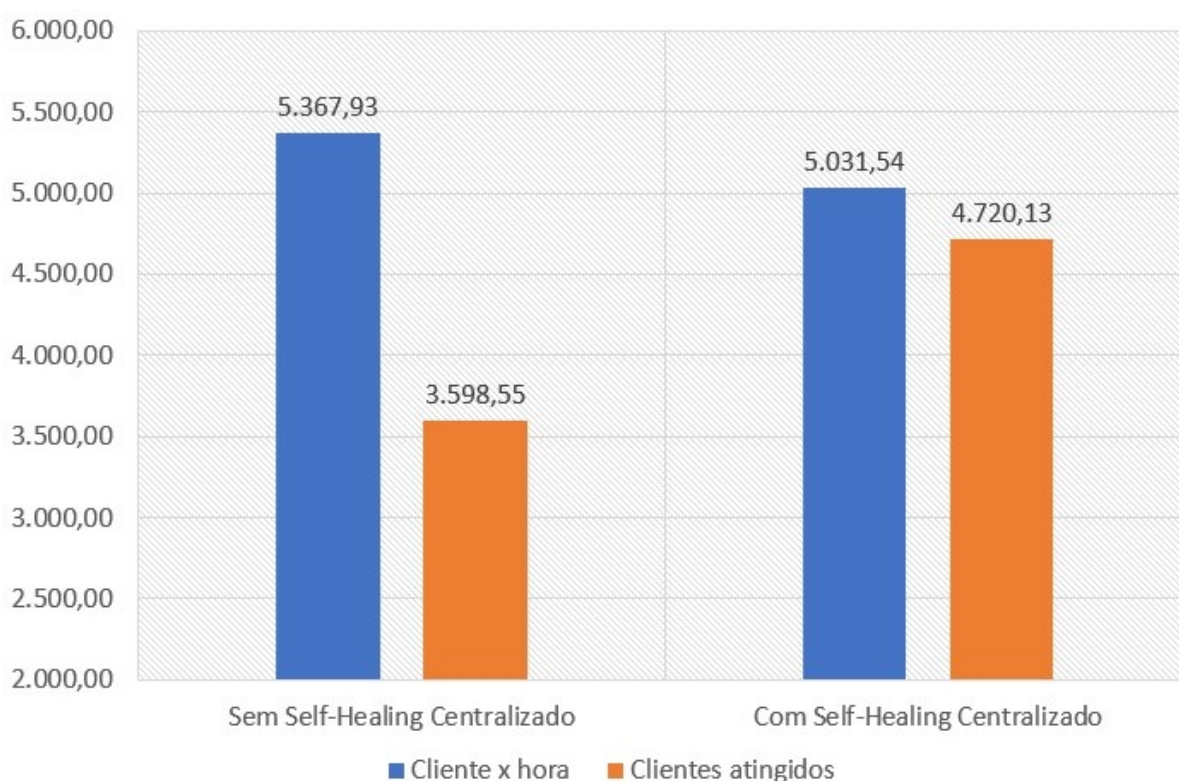
Por outro lado, o CHI é composto pelo produto do número de clientes interrompidos pela quantidade de horas que esta quantidade de clientes ficou sem energia. Por exemplo, se o religador "X" com 1800 clientes bloquear, porém a jusante deste existe um outro religador NF "Y" que protege 1000 clientes. Para o exemplo considera-se que este religador NF "Y" faz parte de um conjunto de *self-healing*, então sabe-se que no momento que "X" bloquear será iniciado o *script* de *self-healing* conforme estudado, e os 1000 clientes ligados após o religador "Y" serão transferidos de forma automática em aproximadamente 1 minuto. Os outros 800 clientes restantes somente conseguirão ser religados após exatos 120 minutos. Fazendo os cálculos, CHI da ocorrência deste exemplo seria de $1616,16 \text{ cliente} \times \text{hora}$ (resultado de $1000 \times 0,016 + 800 \times 2$).

Dito isso, é perceptível que um baixo CHI é melhor para a concessionária e para os clientes, uma vez que este impacta diretamente nos principais indicadores de continuidade de energia (DIC e DEC), os quais estão totalmente relacionados com a duração da interrupção dos clientes. Portanto, é correto afirmar que qualquer método ou tecnologia que permita diminuir o CHI médio das ocorrências de falta de energia impacta diretamente e positivamente nas metas dos indicadores de continuidade de energia.

O gráfico presente na figura 13 foi construído através da média aritmética da quantidade de clientes atingidos e CHI resultante de todas as ocorrências analisadas, agrupadas de forma a separar os alimentadores que possuem *self-healing* centralizado e os que não possuem. O resultado observado é que, ainda que os alimentadores com *self-healing* centralizado possuam

uma quantidade média de clientes atingidos por ocorrências muito maior do que os alimentadores que não tem tal tecnologia, o CHI médio das ocorrências nestes alimentadores com *self-healing* consegue ser menor se comparado com o CHI médio das ocorrências em alimentados sem *self-healing*.

Figura 13 – Impactos de ocorrências em alimentadores Com e Sem *self-healing* centralizado.



Fonte: O Autor.

A explicação para o resultado encontrado é que a CEMIG S.A. priorizou a implementação do sistema *self-healing* inicialmente nos alimentadores mais relevantes da região, isto é, naqueles que possuem maiores quantidades de clientes ligados, logo quando há uma ocorrência num alimentador de alta relevância é normal que o número de clientes atingidos seja elevado. Porém, conforme explicado neste capítulo, como o *self-healing* permite que um bloco considerável de clientes seja religado automaticamente em menos de 3 minutos após a ocorrência, o CHI que teoricamente tenderia a ser alto, é reduzido drasticamente pela atuação do *script*. Na prática, todos estes números significam que se um alimentador com 4720 clientes e que possui *self-healing* centralizado sofrer uma ocorrência, o impacto em termos de CHI será menor do que o de uma ocorrência em um alimentar com com 3598 clientes sem essa tecnologia.

4.5 Viabilidade financeira da implementação do *self-healing* centralizado

Primeiramente, é necessário ressaltar que os dados apresentados abaixo não se tratam de uma simulação dos ganhos futuros que o sistema *self-healing* pode trazer, mas sim do cálculo estimado do valor economizado por meio dos *self-healings* durante o ano de 2021. Para isso, foram escolhidos por amostragem 3 alimentadores possuidores de sistema *self-healing* centralizado, e através dos dados de ocorrências nesses alimentadores foi calculado o valor estimado de compensações financeiras que foi economizado. É ainda essencial ressaltar que o valor apresentado é apenas uma estimativa devido ao fato que o valor exato de compensação financeira pago a cada cliente depende de 3 fatores que são muito peculiares, sendo eles: qual o tipo de consumidor (se é cliente de BT ou de MT), qual a localização do consumidor (urbano ou rural) e quanto tempo exatamente aquele consumidor individual ficou interrompido. Esses fatores citados são bem particulares para cada cliente, porém, com intuito de fazer com que os cálculos fiquem compatíveis com a realidade do trabalho, foram consideradas as seguintes simplificações para todos os casos selecionados:

- 1) Considerou-se que os cliente salvos são de localização urbana durante o cálculo da compensação financeira. A justificativa é que quando o sistema *self-healings* é implementado dentro de um alimentador, este tem o intuito de fazer a transferência automática de um bloco específico de cargas, escolhido estrategicamente considerando um conjunto relevante de clientes aglomerados, em outras palavras, a maioria esmagadora dos *self-healings* existe para executar a transferência de cargas de um vilarejo urbano, de uma sede municipal deslocada da região central, ou então de um bairro específico dentro da cidade.
- 2) Também considerou-se que todos os cliente salvos são de BT (baixa tensão) durante o cálculo da compensação financeira. A justificativa dessa escolha é para adequar a estimativa com o pior caso possível. Em outras palavras, a compensação financeira que deve ser paga a um cliente de MT é da ordem de 3 a 4 vezes mais cara que a compensação financeira paga para um cliente de BT, por esse motivo, comparando-se um bloco de cargas com 1000 clientes onde todos são de BT com outro bloco de cargas com 1000 clientes onde tem 10 clientes de MT, realmente a transferência desse segundo bloco traria uma economia muito maior para a concessionária. Entretanto, como nem todo bloco de cargas possui clientes primários, foi considerados que todos os clientes seriam consumidores secundários (de BT)
- 3) Por fim, considerou-se um tempo médio para cálculo da compensação de cada cliente. A justificativa é que, conforme já foi explicitado neste trabalho, os *self-healings* executam a transferência das cargas e, conseqüentemente, o religamento dos cliente sempre em menos de 3 minutos (e é por isso que ele traz economia nas compensações financeiras). Porém, com o intuito de calcular qual valor foi economizado pela concessionária, seria necessário saber exatamente quanto tempo cada cliente do bloco de cargas ficaria desligado numa

ocorrência caso não existisse o *self-healing*. Fica evidente que este é um dado impossível de se conseguir com exatidão, por isso foi utilizado um método de aproximação. É sabido que em uma ocorrência real os clientes são religados em blocos, então sempre tem clientes que são religados antes de outros, porém para trazer uma simplificação para os cálculos, considerou-se que todos os clientes interrompidos ficariam desligados pelo mesmo período, e seriam religados simultaneamente no fim. Este tempo de desligamento que foi aplicado para cada cliente de um dado alimentador foi determinado pelo cálculo do tempo médio de interrupção dos consumidores que estavam fora do *self-healing*. Em outras palavras, a realidade enfrentada pelos clientes fora do *self-healing* foi replicada para todos os clientes atingidos, com objetivo de simular uma situação em que a transferência automática não existiria.

Todos os valores foram calculados utilizando as equações disponibilizadas no PRODIST (ANEEL, 2022), as quais também estão presentes no anexo A deste trabalho. A tabela 1 abaixo mostra os três alimentadores possuidores de SHC que foram escolhidos para esta amostragem. Os dados apresentados referem-se às suas características gerais e também ao valor economizado durante o ano 2021 para cada um dos alimentadores. Ressalta-se que este valor representa uma estimativa de quanto seria pago em compensação financeira para estes clientes caso não houvesse o *self-healing* implantado:

Tabela 1 – Estimativa de valores economizados durante o ano 2021

SE	Alimentador	Bloco atendido pelo SHC	Nº de clientes do bloco	Nº de ocorrências em 2021	Valor da economia em 2021*
Formiga 1	FMA007	Região do condomínio Furnastur	1237	9	R\$ 20.056,48
Pitangui 2	PTID207	Município de Onça do Pitangui	601	12	R\$ 36.660,28
Usina do Gafanhoto	UHGF013	Divinópolis (bairro Icaraí)	1484	4	R\$ 22.667,88

*Valor estimado

Tendo em mãos algumas estimativas referentes às economias que o SHC pode trazer, basta então comparar com o custo necessário para a implementação do *self-healing* centralizado. Há estudos que comprovam que o método mais econômico para implantação do SHC é através da utilização de dois religadores telecontrolados (FELBER *et al.*, 2015), onde um seria o religador NF e o outro o religador NA, e a lógica do *self-healing* seria implementada através do *script* no sistema supervisor, assim como foi explanado no capítulo 2 deste trabalho.

Para elaboração da estimativa dos custos será considerado um bloco de cargas não radial, ou seja, que já possui topologia em anel e possui possibilidade de interligação com outro alimentador, mas que ainda não possui religador NF como proteção e que também não possui religador NA na contingência. Neste caso será considerado o custo de compra de 2 religadores

completos (incluindo o religador e a caixa de comando que possui o relé microprocessado) e a mão de obra para instalação dos religadores no campo. O valor dos religadores apresentado na tabela 2 foi obtido através de notas fiscais de compra destes equipamentos fornecidas pela CEMIG S.A.

Tabela 2 – Custo de implementação do SHC

Produto	Custo Unitário	Quantidade	Custo total
Religador trifásico,24kV,560A,12kA,60Hz	R\$ 59.430,00	2	R\$ 118.860,00
Mão de obra na instalação*	R\$ 5.943,00	2	R\$ 11.886,00
Valor final			R\$ 130.746,00

*Valor estimado

Fazendo a razão entre o custo de implementação do *self-healing* e o valor economizado calculado para os 3 alimentadores escolhidos, e considerando também que os valores calculados para o ano de 2021 sejam bem próximos dos obtidos nos anos seguintes, é possível obter uma estimativa do *payback* (tempo de retorno de um investimento). O *payback* calculado variou entre 3,5 anos, valor referente ao melhor caso analisado (onde houve maior economia) até 6,5 anos no pior caso analisado (onde houve menor economia durante o ano de 2021). É fato que este tempo de retorno é uma mera aproximação, e vai variar dependendo de diversas características dos alimentadores. Porém, tendo em vista que grandes fabricantes de religadores, como Schneider Electric e Tavrida Electric, informam em seus manuais que seus equipamentos possuem um longo tempo de vida, na ordem de 10 anos ou 10.000 ciclos, é sim possível afirmar que o *self-healing* centralizado, se aplicado em locais propícios e com o estudo adequado, oferece alta viabilidade financeira.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Através do presente estudo de caso, conclui-se que o *Self-healing* centralizado é um recurso tecnológico muito efetivo no objetivo de diminuir o CHI resultante das ocorrências, contribuindo de forma direta no alcance das metas relacionadas aos indicadores de continuidade. No entanto, percebe-se também que este ainda se encontra apenas na menor parte dos alimentadores de distribuição, exibindo um grande potencial de investimento e expansão por parte da CEMIG S.A.

Além disso, é perceptível que o *Self-healing* centralizado atuou com êxito na maioria das vezes em que foi acionado, ressaltando inclusive que não houve nenhum caso em que este tenha sido executado em momento inoportuno. No entanto, é preciso reconhecer que o *Self-healing* centralizado possui um índice de falhas que pode ser trabalhado, por exemplo, para mitigar as falhas por comunicação sugere-se investir em antenas de comunicação via satélite para os religadores mais remotos. A respeito das falhas diversas, uma sugestão de melhoria é que o *script* de *Self-healing* centralizado não seja condicionado apenas a faltas trifásicas na rede de MT, ou seja, o *script* poderia ser adaptado para ser iniciado no momento de detecção da falta de VCA na caixa de controle, e após o início, caso seja verificado que qualquer fase (R, S ou T) do religador NF está com tensão inferior a 1KV, as próximas etapas de execução já poderiam ser seguidas.

Por fim, conclui-se que o investimento em religadores de rede telecontrolados (necessários para aplicação do *Self-healing*) é financeiramente viável, pois estes equipamentos, além de oferecerem maior proteção para a rede elétrica, ainda garantem uma economia significativa no montante gasto em compensações financeiras causadas por interrupções. Esta economia se mostrou capaz de pagar o investimento feito nos equipamentos, ou seja, existe *payback* em tempo hábil.

5.1 Trabalhos Futuros

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se um aprofundamento nos métodos de transmissão de dados existentes, visando encontrar um meio mais eficaz que o GPRS para ser usado em áreas rurais, mas que seja menos oneroso que as antenas satelitais. Também indica-se um aprofundamento maior nas possíveis melhorias para o *script* do *Self-healing* em si.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2022.
- ANDRADE, R. M. de. **Esquemas de SELF-HEALING e seus ganhos para as redes de distribuição de energia elétrica**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Centro Universitário Internacional Uninter, 2016.
- ANEEL. **Compensação de Continuidade**. 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/Compensacao_de_Continuidade_Conformidade_v2/pesquisa.cfm?regiao=SE>.
- EATON. **Religadores**. 2023. Disponível em: <<https://www.eaton.com/br/pt-br/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/reclosers.html>>.
- FALCÃO, D. M. Smart grids e microredes: o futuro já é presente. **Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos**, v. 8, 2009.
- FALCAO, D. M. *et al.* Integração de tecnologias para viabilização da smart grid. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1–5, 2010.
- FELBER, L.; RIBEIRO, P.; BONATTO, B.; SOUZA, A. D.; NETO, J. Low cost self-healing applied to distribution grid supplying brazilian municipalities. In: IEEE. **2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)**. [S.l.], 2015. p. 292–297.
- FONSECA, J. R. L. **Aplicação da técnica de self healing na reconfiguração automática de redes elétricas utilizando o padrão IEC 61850**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. [S.l.]: LTC, 2013.
- MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2011.
- RUPPENTHAL, F. A. **Aplicação de sistema self-healing em redes de distribuição de energia elétrica**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Santa Cruz do Sul, 2019.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Smart Grid System Report**. 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/oe/articles/2018-smart-grid-system-report>>.
- VAZ, R. R. de C. **Metodologia de posicionamento de religadores e dimensionamento de rede de fibra óptica para automação de sistemas de energia**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2017.
- VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; COUTO, H. T. Z. d. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto da arborização urbana. **Revista Árvore**, Sociedade de Investigações Florestais, v. 30, n. 4, p. 679–686, 2006.

GLOSSÁRIO

abalroamento

O termo, que é comumente utilizado em acidentes de trânsito, pois significa que sofreu choque, batida ou colisão. Por exemplo: colisão entre um veículo e um poste, pode ser escrito como abalroamento de poste por veículo.. 9

alimentador

Os alimentadores são circuitos de média tensão que saem das subestações levando energia elétrica para os transformadores das redes de baixa tensão.. 8, 10

feeder

Em português traduz-se para alimentador. Dentro da topologia de *self-healing* descentralizado, o equipamento que possui lógica *feeder* é o equipamento normalmente fechado, responsável por alimentar o bloco de cargas na condição projetada do circuito.. 17

hot line

Linha quente em português, hot line é o termo utilizado para definir qualquer tipo de intervenção ou serviço executado por eletricitistas, os quais são devidamente treinados e capacitados, em proximidade com a rede de MT energizada. Para minimizar parte do risco de se trabalhar com a com a Linha quente, utiliza-se o procedimento de desativar o religamento automático do equipamento de proteção a montante do trecho durante a execução do trabalho, e junto a isso deixar o equipamento devidamente sinalizado no SCADA, para que caso haja algum desarme no religador não seja feito nenhum tipo de reenergização do trecho sem antes verificar com a equipe executora se houve algum incidente ou acidente no local.. 22

jusante

O termo jusante se refere a todo o trecho ou equipamento do circuito mais próximo da carga do circuito, o termo é usado para referenciar através de comparação. Exemplo: o trecho a jusante da chave A continua desligado. Neste exemplo, existe uma chave com nome A, e o trecho que está localizado após essa chave, no sentido das cargas, está desligado.. 16

montante

O termo montante se refere a todo o trecho ou equipamento do circuito mais próximo da fonte de energia, o termo é usado para referenciar através de comparação. Exemplo: o trecho a montante da chave A ainda está ligado. Neste exemplo, existe uma chave com nome A, e o trecho que está localizado antes dessa chave, no sentido da fonte (subestação), está ligado.. 16

script

Conjunto de instruções em código, ou seja, escritas em linguagem de computador, com intuito de executar uma função ou sequência de funções dentro de um programa.. 18

tag

Em português traduz-se para etiqueta. As dentro de um sistema supervisório, as *tags* são variáveis do programa que estão diretamente vinculadas a uma variável física, com objetivo de carregar a sua informação. Por exemplo, em um reservatório que possui um sensor de nível de água e um sistema supervisório para monitora-lo, certamente existe uma *tag* vinculada ao sensor e que carrega a informação do Nível do tanque, podendo indicar se o tanque está vazio ou cheio com base nas informações físicas que o sensor coletou.. 20

tie

Em português traduz-se para laço. Dentro da topologia de *self-healing* descentralizado, o equipamento que possui lógica *tie* é o equipamento normalmente aberto, responsável por garantir o anel do alimentador. O equipamento com lógica *tie* se fecha para realimentar o bloco de cargas caso o equipamento normalmente fechado venha a abrir por execução da lógica *feeder*.. 17

tronco

Circuito principal do alimentador, o qual se inicia no disjuntor da SE, e do qual saem todas as derivações. O tronco transporta a parcela principal da carga do circuito, por isso a corrente nominal e a corrente de curto-circuito são maiores neste segmento.. 15

APÊNDICE A – BASE DE DADOS PARA O ESTUDO DE CASO

Figura 14 – Primeiras 37 linhas do Banco de dados de ocorrências analisadas.

Nº	Região	Data	Início	SE	Alimentação	Equip. SE	Equip. Rt	Clientel	Cliente x hr	Tem Tra	Deve Atua	ATUOL	Clientes Sal
1	Oeste	01/01/2021	16:10	ARCOS 1	ACSU109		269705	1244,0	1451,0	N			
2	Oeste	01/01/2021	16:04	PIUMHI 2	PIUD216		376009	2976	5495	N			
3	Oeste	01/01/2021	16:09	ABAETÉ 2	AETD014		253489	3753	7133	N			
4	Oeste	01/01/2021	16:08	NOVA SERRANA 1	NVSU005	5F4R - Religador		7903	23258	N			
5	Oeste	01/01/2021	16:13	BOM DESPACHO 2	BDPD005		375060	4892	2285	N			
6	Oeste	01/01/2021	16:21	GAFANHOTO (USINA)	UHGF009		321268	4546	2300	N			
7	Oeste	01/01/2021	16:32	ITAPECERICA	IPC006		267317	1314	898	N			
8	Oeste	01/01/2021	16:56	GAFANHOTO (USINA)	UHGF010		198729	3976	7220	N			
9	Oeste	01/01/2021	17:06	GAFANHOTO (USINA)	UHGF006	6F4 - Disjuntor		9076	3430	N			
10	Oeste	01/01/2021	16:55	DIVINÓPOLIS 1	DVLU003		382257	6093	3593	S	N	N	
11	Oeste	01/01/2021	16:56	GAFANHOTO (USINA)	UHGF013	13F4 - Religador		3477	18168	S	S	S	1484
12	Oeste	02/01/2021	14:42	POMPEU 2	PPUD216		268299	3457	6050	N			
13	Oeste	02/01/2021	19:52	POMPEU 2	PPUD205	205F4R - Religador		267	4092	N			
14	Oeste	02/01/2021	19:35	POMPEU 2	PPUD216		268299	3457	3111	N			
15	Oeste	02/01/2021	15:48	NOVA SERRANA 1	NVSU007		309992	3090	206	N			
16	Oeste	03/01/2021	15:49	GAFANHOTO (USINA)	UHGF007		253730	3876	2653	N			
17	Oeste	03/01/2021	17:05	BOM DESPACHO 2	BDPD003		162512	2584	2860	N			
18	Oeste	03/01/2021	15:39	DORES DO INDAIA	DDI007		87050	395	2581	N			
19	Oeste	03/01/2021	17:14	BOM DESPACHO 2	BDPD005		375060	3949	2304	N			
20	Oeste	06/01/2021	12:17	IGUATAMA 2	IUMD004	4F4R - Religador		3430	661	N			
21	Oeste	06/01/2021	17:23	NOVA SERRANA 1	NVSU007		309992	13225	13202	N			
22	Oeste	07/01/2021	19:53	GAFANHOTO (USINA)	UHGF009	9F4 - Disjuntor		5864	4002	N			
23	Oeste	07/01/2021	14:49	Ibiraci	IIIU012	12F4R - Religador		4431	1350	S	S	F	3337
24	Oeste	07/01/2021	17:52	ITATIAIUCU	ITTO16		243348	4095	3340	N			
25	Oeste	08/01/2021	00:10	ITAÚNA 1	IANU021	21F4R - Religador		8490	4875	N			
26	Oeste	08/01/2021	01:23	FORMIGA	FMA003		343248	1183	10351	N			
27	Oeste	08/01/2021	15:30	PITANGUI 2	PTID207	207F4R - Religador		1839	2525	S	S	S	601
28	Oeste	09/01/2021	08:10	ITAPECERICA	IPC008		31475	1922	4678	N			
29	Oeste	09/01/2021	11:08	CARMÓPOLIS DE MINAS	CRM007		122928	3843	4761	S	N	N	
30	Oeste	09/01/2021	13:14	POMPEU 2	PPUD214		271034	1296	2948	N			
31	Oeste	09/01/2021	15:24	BAMBUI	BBI009		243244	2594	9666	N			
32	Oeste	11/01/2021	20:41	PAPAGAIOS	PPS009	9F4 - Religador		4863	8787	N			
33	Oeste	12/01/2021	17:37	PARÁ DE MINAS 1	PRSU012	12F4R - Religador		2503	4199	N			
34	Oeste	12/01/2021	22:47	POMPEU 2	PPUD205	205F4R - Religador		283	4205	N			
35	Oeste	13/01/2021	02:35	ABAETÉ 2	AETD016	16F4R - Religador		1970	4099	S	S	FC	1118
36	Oeste	13/01/2021	05:50	PITANGUI 2	PTID207	207F4R - Religador		1841	5001	S	S	FC	601
37	Oeste	13/01/2021	09:31	BOM DESPACHO 2	BDPD004		253476	6131	5169	N			

Fonte: CEMIG S.A.

Figura 15 – Últimas 35 linhas do Banco de dados de ocorrências analisadas.

494	Oeste	10/12/2021	15:08	PAPAGAIOS	PPS010	10F4 - Religador		10673	4277	N			
495	Oeste	11/12/2021	07:59	CARMO DO RIO CLARO	CRC003	3F4R - Religador		2841	1637	N			
496	Oeste	11/12/2021	13:43	PITANGUI 2	PTID208		116182	1158	1747	N			
497	Oeste	12/12/2021	10:45	IGUATAMA 2	IUMD005	5F4R - Religador		2663	2479	N			
498	Oeste	12/12/2021	19:55	PAPAGAIOS	PPS010	10F4 - Religador		4711	2645	N			
499	Oeste	12/12/2021	21:40	PIUMHI 2	PIUD210	210F4 - Religador		1380	1722	N			
500	Oeste	12/12/2021	21:11	ARCOS 1	ACSU115		269723	2738	616	N			
501	Oeste	13/12/2021	09:19	ARCOS 1	ACSU106	6F4R - Religador		1384	2781	N			
502	Oeste	14/12/2021	10:03	SÃO SEBASTIÃO DO PARAÍSO	SSP006	6F4R - Religador		7985	2102	N			
503	Oeste	14/12/2021	13:34	Ibiraci	IIIU011		310000	1785	3985	N			
504	Oeste	16/12/2021	14:07	ITAGUARA	IGRU009		222241	3954	5909	S	N	N	
505	Oeste	16/12/2021	17:28	ITAU DE MINAS	IAD008	8F4R - Religador		3557	3267	N			
506	Oeste	16/12/2021	13:49	IGUATAMA 2	IUMD005	5F4R - Religador		2524	4108	N			
507	Oeste	17/12/2021	05:06	DIVINÓPOLIS 1	DVLU012	12F4R - Religador		3981	7614	N			
508	Oeste	17/12/2021	02:43	NOVA SERRANA 1	NVSU032		297246	2941	8121	N			
509	Oeste	17/12/2021	07:25	PARÁ DE MINAS 1	PRSU011		105254	2155	3731	N			
510	Oeste	17/12/2021	11:58	PARÁ DE MINAS 2	PRSD205		210171	2409	5186	N			
511	Oeste	17/12/2021	08:51	PARÁ DE MINAS 2	PRSD206		278088	3499	2119	N			
512	Oeste	18/12/2021	06:30	PASSOS 1	PSOU005		273351	7019	3305	N			
513	Oeste	18/12/2021	15:19	BAMBUI	BBI007		75895	4449	4472	S	S	S	1594
514	Oeste	18/12/2021	06:40	PASSOS 1	PSOU005		52051	5583	43101	N			
515	Oeste	19/12/2021	16:29	POMPEU 2	PPUD209	209F4R - Religador		6118	7404	N			
516	Oeste	20/12/2021	04:23	PAINS 2	PAND218	218F4R - Religador		431	280	N			
517	Oeste	20/12/2021	19:44	SÃO SEBASTIÃO DO PARAÍSO	SSP016		273349	2636	439	N			
518	Oeste	22/12/2021	20:16	MASCARENHAS DE MORAIS (USINA)	YFUR002	2F4R - Religador		6405	3240	N			
519	Oeste	23/12/2021	16:24	ITAGUARA	IGRU009		285104	4883	2719	S	N	N	
520	Oeste	25/12/2021	02:15	PAINS 2	PAND218	218F4R - Religador		352	970	N			
521	Oeste	28/12/2021	18:03	DIVINÓPOLIS 2	DVLD212		289823	6101	4566	S	S	F	2783
522	Oeste	28/12/2021	19:27	ITAÚNA 1	IANU015	15F4R - Religador		2077	2581	N			
523	Oeste	28/12/2021	23:16	PAPAGAIOS	PPS010		234281	4619	2433	N			
524	Oeste	29/12/2021	00:53	GAFANHOTO (USINA)	UHGF007		210825	1433	3774	N			
525	Oeste	31/12/2021	01:53	ITAGUARA	IGRU009		285104	4956	2224	S	N	N	
526	Oeste	31/12/2021	17:43	PAPAGAIOS	PPS009	9F4 - Religador		4846	7113	N			
527	Oeste	31/12/2021	18:29	PARÁ DE MINAS 2	PRSD207		161328	2052	1432	N			
528	Oeste	31/12/2021	19:16	LAGOA DA PRATA 1	LPTU005		117130	4402	3815	N			

Fonte: CEMIG S.A.

ANEXO A – CONTEÚDO REFERENTE AO ANEXO 8.B DA RESOLUÇÃO N^o 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021

LIMITES DOS INDICADORES INDIVIDUAIS DE CONTINUIDADE PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST MÓDULO 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Tabela 3 – Limites para unidade consumidora ou central geradora com tensão contratada ≥ 69 kV

Localização	DIC Mensal (horas)	FIC Mensal (interrupções)	DMIC Mensal (horas)
≤ 5	3	3	3
> 5 e ≤ 10	5	4	5

Tabela 4 – Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área urbana com tensão contratada $\geq 2,3$ kV e < 69 kV

Faixa de Variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	DIC Mensal (horas)	FIC Mensal (interrupções)	DMIC Mensal (horas)	DICRI por evento (horas)
≤ 5	3	3	3	8
> 5 e ≤ 10	5	4	5	8
> 10 e ≤ 15	7	5	6	8
> 15 e ≤ 20	9	6	7	8
> 20 e ≤ 25	10	6	8	8
> 25	12	7	8	8

Tabela 5 – Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área não urbana com tensão contratada $\geq 2,3$ kV e < 69 kV

Faixa de Variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	DIC Mensal (horas)	FIC Mensal (interrupções)	DMIC Mensal (horas)	DICRI por evento (horas)
≤ 5	8	4	6	21
> 5 e ≤ 10	13	5	10	21
> 10 e ≤ 15	19	7	14	21
> 15 e ≤ 20	24	8	18	21
> 20 e ≤ 25	28	9	20	21
> 25 e ≤ 40	33	10	24	24
≥ 40	37	11	24	24

Tabela 6 – Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área urbana com tensão contratada $\leq 2,3$ kV

Faixa de Variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	DIC Mensal (horas)	FIC Mensal (interrupções)	DMIC Mensal (horas)	DICRI por evento (horas)
≤ 5	4	3	3	13
> 5 e ≤ 10	7	4	5	13
> 10 e ≤ 15	10	5	7	13
> 15 e ≤ 20	12	6	9	13
> 20 e ≤ 25	14	7	10	13
> 25 e ≤ 40	15	7	12	13
> 40 e ≤ 50	18	8	12	13
≥ 50	21	9	12	13

Tabela 7 – Limites para unidade consumidora ou central geradora situada em área não urbana com tensão contratada $\leq 2,3$ kV

Faixa de Variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	DIC Mensal (horas)	FIC Mensal (interrupções)	DMIC Mensal (horas)	DICRI por evento (horas)
≤ 5	8	4	6	21
> 5 e ≤ 10	13	5	10	21
> 10 e ≤ 15	19	7	14	21
> 15 e ≤ 20	24	8	18	21
> 20 e ≤ 25	28	9	20	21
> 25 e ≤ 40	33	10	24	24
≥ 40	37	11	24	24

No cálculo do valor da compensação financeira devem ser utilizadas as seguintes equações:

a) Utiliza-se A.1 para o DIC

$$\text{CompDIC} = \text{DIC}_v \times \frac{\text{VRC}}{730} \times \text{Kei1} \quad (\text{A.1})$$

b) Utiliza-se A.2 para o DMIC

$$\text{CompDMIC} = \text{DMIC}_v \times \frac{\text{VRC}}{730} \times \text{Kei1} \quad (\text{A.2})$$

c) Utiliza-se A.3 para o FIC

$$\text{CompFIC} = \frac{\text{FIC}_v}{\text{FIC}_p} \times \text{DIC}_p \times \frac{\text{VRC}}{730} \times \text{Kei1} \quad (\text{A.3})$$

d) Utiliza-se A.4 para o DICRI

$$\text{CompDICRI} = \text{DICRI}_v \times \frac{\text{VRC}}{730} \times \text{Kei2} \quad (\text{A.4})$$

em que:

DICv = duração de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em horas e centésimos de hora;

DICp = limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

DMICv = duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em horas e centésimos de hora;

FICv = frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em número de interrupções;

FICp = limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em número de interrupções e centésimo do número de interrupções;

DICRIv = duração da interrupção individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

VRC = valor monetário base para o cálculo da compensação referente ao mês de apuração do indicador, que corresponde ao Encargo de Conexão Parcela B – ECCD(PB), para unidades consumidoras pertencentes ao subgrupo A1; ou ao Encargo de Uso do Sistema de Distribuição correspondente à parcela TUSD Fio B – EUSDB, para as unidades consumidoras pertencentes aos demais subgrupos ou dos pontos de conexão; Em Minas Gerais, o TUSD Fio B praticado pela cemig nas UCs de BT é de R\$ 0,20

730 = número médio de horas no mês;

Kei1 = coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em: 34, para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em Baixa Tensão; 40, para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em Média Tensão; e 108, para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em Alta Tensão;

Kei2 = coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em: 14, para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em Baixa Tensão; e 20, para unidade consumidora ou ponto de conexão atendido em Média Tensão.