



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

EDUARDO RIBEIRO DE MORAES

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA FILOSOFIA
“SELF-HEALING” EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO EM
UMA EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO NO RIO DE
JANEIRO

NITERÓI, RJ
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

EDUARDO RIBEIRO DE MORAES

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA FILOSOFIA
“SELF-HEALING” EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO EM
UMA EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO NO RIO DE
JANEIRO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica. Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Henrique de Oliveira Henriques, D.Sc.

NITERÓI, RJ
2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

Ficha de identificação da obra [Elemento obrigatório.]

[Insira neste espaço a ficha de identificação da obra.]

[A ficha é elaborada pelo(a) autor(a) no seguinte link:

Eduardo Ribeiro de Moraes

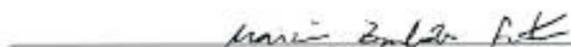
**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA FILOSOFIA “SELF-HEALING” EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO
EM UMA EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO NO RIO DE JANEIRO**

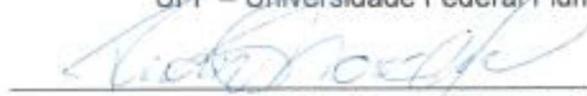
Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica. Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovado em 23 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Henrique de Oliveira Henriques - Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense


Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes
UFF – Universidade Federal Fluminense


Prof. Dr. Renan Silva Maciel
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Niterói, RJ
2023

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa à minha mãe e ao meu pai, exemplos de determinação e importantes referências de vida, pelo amor incondicional, apoio, incentivo e ensinamentos que serviram de base para toda a minha existência. À minha esposa Luciana quem trouxe para o mundo minha vida chamada João, principal motivador para nunca parar de evoluir e deixar um legado a sua altura.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que foram muito importantes para a realização desta pesquisa, as quais neste momento, declaro a minha eterna gratidão:

Ao Prof. Henrique de Oliveira Henriques, Dr. Eng, exemplo de profissional, que me acompanha e orienta desde a graduação, e aceitou o desafio da orientação nesta pesquisa, contribuindo sempre com sua visão crítica, rigor técnico e metodológico, demonstrando sempre muita generosidade, paciência e seriedade.

À Light pelo incentivo, oportunidade e apoio técnico dos estudos que foram muito importantes para a minha vida profissional e pessoal.

Aos amigos e companheiros de vida profissional, que integram a LIGHT, pelo apoio, pela troca de experiências envolvendo sempre reflexões muito valiosas.

À minha esposa Luciana, pelo habitual incentivo, apoio e compreensão.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais pontos relacionados à filosofia técnica de *Self-Healing* de redes de distribuição elétrica, no contexto das *Smart Grids* e dos principais equipamentos e elementos que fazem parte desse contexto. O objetivo da pesquisa é analisar através da identificação dos principais distúrbios de qualidade de energia que causam danos aos equipamentos e componentes, estabelecer as relações entre as características técnicas dos equipamentos de proteção (disjuntores, religadores, chaves automáticas, seccionadoras e relés), seus respectivos ensaios de tipo fornecidos pelas normas de referência e os pontos vulneráveis relativos aos seus circuitos de potência e controle, que afetam diretamente o desempenho da filosofia de autorregeneração e a melhoria dos índices de qualidade do serviço (Duração Equivalente de Interrupção e Frequência Equivalente de Interrupção), estabelecidos pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Em termos metodológicos, foi realizado um estudo de caso que indica os principais pontos de atenção em relação a homologação e manutenção de determinados componentes e equipamentos, que demonstra a efetiva influência da aplicação da filosofia de *Self-Healing*, na redução dos indicadores de qualidade, o que representa uma contribuição acadêmica e gerencial orientadas ao atendimento dos requisitos impostos pela ANEEL.

Palavras-Chave — *Self-Healing*, Qualidade de Energia, Índices de Qualidade de Energia, Religadores, Chaves Automáticas.

ABSTRACT

This work aims to present the main points related to the technical philosophy of Self-Healing of electrical distribution networks, in the context of Smart Grids and the main equipment and elements that are part of this context. The objective of the research is to analyze, through the identification of the main power quality disturbances that cause damage to equipment and components, to establish relationships between the technical characteristics of protection equipment (circuit breakers, reclosers, automatic switches, disconnectors and relays), their respective type tests provided by the reference standards and the vulnerable points related to its power and control circuits, which directly affect the performance of the self-regeneration philosophy and the improvement of the quality of service indices (Equivalent Interruption Duration and Equivalent Interruption Frequency), established by ANEEL - National Electric Energy Agency. In methodological terms, a case study was carried out that indicates the main points of attention in relation to the approval and maintenance of certain components and equipment, which demonstrates the effective influence of the application of the Self-Healing philosophy, in the reduction of quality indicators, which represents an academic and managerial contribution aimed at meeting the requirements imposed by ANEEL.

Keywords - Self-Healing, Power Quality, Power Quality Indices, Reclosers, Automatic Switches.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático do escopo da pesquisa	16
Figura 2 - Esquema ilustrativo dos principais componentes de uma Smart Grid	18
Figura 3 - <i>Self-Healing</i> Descentralizado	20
Figura 4 - <i>Self-Healing</i> Semi-Centralizado	20
Figura 5 - <i>Self-Healing</i> Centralizado	21
Figura 6 - Esquema de montagem do ensaio de capacidade de resistência a surtos de elementos eletrônicos de controle	27
Figura 7 - Evolução do DEC no Brasil	31
Figura 8 - Evolução do FEC no Brasil	31
Figura 9 - Evolução do DGC das concessionárias de pequeno porte	33
Figura 10 - Evolução do DGC das concessionárias de grande porte	33
Figura 11 - Evolução das compensações financeiras no Brasil	34
Figura 12 - Evolução do DEC – Concessionária 1	35
Figura 13 - Evolução do FEC – Concessionária 1	35
Figura 14 - Efetividade quanto a diminuição do CHI	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de <i>Self-Healing</i>	21
Tabela 2 - Normas de referência	26
Tabela 3 - Resumo da evolução de indicadores de qualidade no Brasil	31
Tabela 4 - Informações sobre a Concessionária 1 (C1)	34
Tabela 5 - Evolução do DEC e FEC até 2022 (C1)	35
Tabela 6 - Evolução do DEC e FEC LDA BELAVI e LDA VIOLETA	37
Tabela 7 - Percentual de falha por componente	38
Tabela 8 - Evolução do IASC	38
Tabela 9 - Valor mínimo de Uc exigível do DPS, em função do esquema de aterramento	40
Tabela 10 - Suportabilidade a impulso exigível dos componentes da instalação	41
Tabela 11- Diretrizes de controle	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI – American National Standards Institute
AT – Alta Tensão
BT – Baixa Tensão
C1 - Concessionária 1
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CHI - Consumidor Hora Interrompido
DEC – Duração Equivalente de Interrupção
DGC - Desempenho Global de Continuidade
DIC - Duração de Interrupção Individual
DNP3 - *Distributed Network Protocol 3*
DOD - *Depth of Discharge*
DPS - Dispositivo de Proteção Contra Surtos
FEC - Frequência Equivalente de Interrupção
FER – Frequência Equivalente de Reclamação
FIC - Frequência de Interrupção Individual
GB - *Guo Biao*
IASC – Índice Aneel de Satisfação do Cliente
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IEDs - *Intelligent Electronic Devices*
IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT – *Internet of Things*
MT – Média Tensão
NCs – Não Conformidades
NQA – Nível de Qualidade Aceitável
NTP – *Network Time Protocol*
PLS - *Partial Least Squares*
PoW - *Point-On-Wave*
PRODIST – Procedimentos de Distribuição
QEE – Qualidade de Energia Elétrica
SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*
SH – *Self-Healing*
RJ – Rio de Janeiro
SoS – *Systems of Systems*
SWC - *Surge Withstand Capability*
TELECOM - Telecomunicações
TPs – Transformadores de Potencial
VLRA - *Valve Regulated Lead Acid*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E DO CENÁRIO BRASILEIRO	12
2.1. PRINCIPAIS INDICADORES DE QUALIDADE	12
2.2. PONTOS DE FRAGILIDADE NOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE E PROTEÇÃO	16
3. SELF-HEALING	17
4. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONTROLES AUTOMÁTICOS.....	21
5. ENSAIOS DE TIPO, ROTINA E RECEBIMENTO	25
6. ESTUDO DE CASO	30
6.1. EVOLUÇÃO DOS INDICADORES DE QUALIDADE.....	30
6.2. DESEMPENHO POR DISTRIBUIDORA E RANKING DA CONTINUIDADE	31
6.3. COMPENSAÇÕES DE CONTINUIDADE AOS CONSUMIDORES	34
6.4. ESTUDO DE CASO – CONCESSIONÁRIA 1 (C1)	34
7. PRINCIPAIS PROBLEMAS	37
8. SOLUÇÃO PROPOSTAS	39
8.1. SUPRESSORES DE SURTOS DE TENSÃO	39
8.2. ATERRAMENTO	43
8.3. FONTES DE ALIMENTAÇÃO	43
8.4. AQUISIÇÃO DE COMPOENENTES SOBRESSALENTES E ANÁLISE DE DESEMPENHO	44
9. CONCLUSÕES	46
9.1. TRABALHOS FUTUROS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A atividade de distribuição elétrica no Brasil é regulada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que foi instituída em 1996, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia.

No âmbito da distribuição de energia elétrica, hoje o cenário é composto por diversas empresas distintas que atuam como concessionárias, o que pode ser observado no mapa de distribuidoras da ANEEL. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Mapas das Distribuidoras).

Estas empresas compõem os agentes titulares da concessão federal destinados a prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica, que também são chamados de “distribuidoras”.

Este cenário é composto hoje por poucas empresas públicas, cuja respectiva reestruturação foi iniciada na década de 1990, sendo iniciada a redução das responsabilidades do governo federal enquanto empresa de distribuição de energia elétrica. Várias distribuidoras que se encontravam sob o controle do governo, passaram a ser controladas por empresas privadas, através da privatização da Eletrobrás, aprovada pelo Senado Federal recentemente e finalizada através da Medida Provisória 1.031/21. A Eletrobrás foi desestatizada e entrou para a bolsa de valores, e desta forma o governo deixou de ser o acionista majoritário ao promover a capitalização da empresa, concluída no dia 14 de junho de 2022.

O órgão regulador, a ANEEL, estabelece critérios de qualidade de energia através da seção 8.0 do Anexo VIII da RN 956 – PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST MÓDULO 8. Com relação à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), este módulo estabelece e define quais são os indicadores a serem utilizados e os respectivos limites a serem adotados pelas distribuidoras.

Dentre os indicadores de qualidade estabelecidos, será abordada a evolução da melhoria destes índices, em função da ação do órgão regulador e dos investimentos realizados pelas concessionárias, em redes que aplicam a filosofia *Self-Healing*, e direcionados à qualidade do serviço

Esta filosofia utiliza equipamentos de proteção (religadores e chaves automáticas) que são dotados de controles e dispositivos eletrônicos capazes de medir determinadas grandezas elétricas da rede de distribuição de média tensão e serem sensibilizados para operarem de forma autônoma ou semiautônoma, conforme uma lógica pré-definida, atuando através dos seccionamentos dos trechos com falhas ou defeitos, propiciando que uma menor quantidade de clientes ou unidades consumidoras fiquem desabastecidos e os respectivos índices de qualidade sejam respeitados e melhorados.

A tecnologia utilizada nestes equipamentos permite um controle de operação

adequado ao objetivo almejado, requer a utilização de um conjunto de elementos que utilizam dispositivos eletrônicos e fontes CA/CC, que devem ser especificados e projetados para garantirem a confiabilidade e robustez do sistema como um todo.

Mesmo com a obtenção de resultados satisfatórios em relação aos ensaios de tipo e rotina, estabelecidos nas normas técnicas de referência, IEC62271-111:2019, referentes aos dispositivos de proteção na média tensão, as mesmas não garantem a total confiabilidade e robustez necessárias aos circuitos e sistemas de controle e comunicação utilizados nesta topologia de rede, os quais são alimentados pelas redes de distribuição de baixa tensão existentes no local, devendo-se ter grande atenção a pontos de vulnerabilidade do sistema de alimentação e aterramento, de forma a minimizar ou mitigar eventos prejudiciais à adequada operação do sistema, como por exemplo, evitando operações indevidas ou queima prematura de componentes.

Este trabalho está dividido em 9 partes, sendo esta inicial introdutória ao tema, seguido de uma contextualização em 2, uma explicação do conceito de *Self-Healing* em 3, um aprofundamento nos temas principais em 4 e 5, um exemplo e uma análise da aplicação dos conceitos em 6, uma abordagem dos principais problemas existentes em 7, a indicação de sugestões a serem empregadas em 8 e a conclusão em 9.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E DO CENÁRIO BRASILEIRO

2.1. PRINCIPAIS INDICADORES DE QUALIDADE

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O módulo 8 deste documento estabelece os procedimentos relativos à qualidade no fornecimento da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e do tratamento de reclamações dos consumidores de energia elétrica.

Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades, para a qualidade do tratamento de reclamações. Este módulo também estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial Frequência Equivalente de Reclamação (*FER*).

Nesta seção da resolução normativa da ANEEL são definidos os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, quanto à duração e frequência de interrupção, tanto para unidades consumidoras (*DIC* e *FIC*) quanto para conjuntos de unidades consumidoras (*DEC* e *FEC*).

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

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

Onde,

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em número de interrupções;

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc} \quad (3)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (4)$$

Onde,

DEC = duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC = frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções.

A qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias compreende a avaliação das interrupções no fornecimento de energia elétrica. Para tal finalidade, destacam-se os indicadores de continuidade coletivos e os indicadores de continuidade individuais, todos definidos no PRODIST.

Ressalta-se que, similarmente a outros indicadores no mundo, os indicadores são apurados para as interrupções maiores que 3 minutos, sendo admitidos alguns expurgos na sua apuração.

Visando manter a qualidade na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, a ANEEL exige que as distribuidoras mantenham um padrão de continuidade e, para tal, edita limites para os indicadores coletivos de continuidade.

A continuidade do fornecimento é avaliada pela ANEEL através de subdivisões das distribuidoras, denominadas Conjuntos Elétricos. Existem limites para indicadores associados a cada conjunto. Ressalta-se que o conjunto elétrico pode ter abrangência variada. Conjuntos grandes podem abranger mais de um município, ao mesmo tempo em que alguns municípios podem possuir mais de um conjunto.

Os indicadores são apurados pelas distribuidoras e enviados periodicamente para a ANEEL para verificação da continuidade do serviço prestado, representando, respectivamente, o tempo e o número de vezes que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica para o período considerado (mês, trimestre ou ano), o que permite que a Agência avalie a continuidade da energia oferecida à população.

Anualmente é publicado o Indicador de Desempenho Global de Continuidade (*DGC*), que visa comparar o desempenho de uma distribuidora em relação às demais empresas do país. O indicador permite avaliar o nível da continuidade da distribuidora (valores apurados de duração e frequência de interrupções) em relação aos limites estabelecidos para a sua área de concessão.

Da mesma forma, também são acompanhados os indicadores individuais de continuidade, abaixo detalhados e que apuram a qualidade do serviço em cada unidade consumidora:

- Duração de interrupção individual por unidade consumidora (*DIC*): Intervalo de tempo que, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica;
- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (*FIC*): Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão;
- Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (*DMIC*): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão; e
- Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (*DICRI*): Corresponde à duração de cada interrupção ocorrida em dia crítico, para cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

Os limites dos indicadores são definidos para períodos mensais, trimestrais e anuais. O limite do indicador *DMIC* é definido para períodos mensais. O limite do indicador *DICRI* é definido para cada interrupção em dia crítico.

Quando os indicadores individuais de continuidade são transgredidos, a distribuidora deve compensar financeiramente o consumidor. A compensação é automática, e deve ser paga em até 2 meses após o mês de apuração do indicador (mês em que houve a interrupção).

Desta forma, o investimento em manutenção, operação e novos equipamentos devem objetivar evitar ao máximo o *CHI* (Cliente Hora Interrompido), que consiste no somatório dos valores de Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão – *DIC* dos consumidores atingidos por interrupção no fornecimento de energia, expresso em horas e centésimos de horas.

Os valores são informados pelas distribuidoras em até 3 meses após a apuração do indicador, e são passíveis de fiscalização pela ANEEL.

Ressalta-se que a quantidade de pagamentos efetuados não é necessariamente igual ao número de consumidores compensados, uma vez que um mesmo consumidor pode ser compensado mais de uma vez no ano.

O indicador *FER* - Frequência Equivalente de Reclamação a cada mil Unidades Consumidoras é calculado conforme RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021 e no estabelecimento dos

seus limites, utiliza-se uma análise comparativa de desempenho entre as distribuidoras, tendo como referência suas características e os dados históricos de reclamação encaminhados à ANEEL.

Neste trabalho iremos demonstrar que é possível identificar que um aumento nos investimentos (*CAPEX - Capital Expenditure*), direcionado a aquisição de equipamentos de proteção, dotados de tecnologia para aplicação da filosofia Self-Healing, proporciona a melhoria da qualidade do fornecimento de energia em termos de redução da frequência das interrupções do fornecimento de energia (ΔFEC) e de redução da frequência de reclamações dos consumidores (ΔFER).

Além disso, o índice ANEEL de satisfação do consumidor (*IASC*) tem relação negativa com ΔFER . Isto demonstra que a percepção geral da satisfação do cliente – em termos de qualidade do serviço, valor, satisfação geral e confiança no sistema – proporciona a melhoria da qualidade do fornecimento de energia. Essa relação pode ser devido ao interesse das concessionárias de energia em conquistarem o prêmio índice ANEEL de Satisfação do Cliente (*IASC*) que é um estímulo às ações de melhoria contínua nos serviços prestados.

O *IASC* é um indicador que permite avaliar a satisfação do consumidor residencial com os serviços prestados pelas distribuidoras de energia elétrica, sendo obtido anualmente a partir de pesquisa amostral realizada com consumidores de todas as distribuidoras, concessionárias e permissionárias, que atuam no território nacional. São realizadas cerca de 27.000 entrevistas.

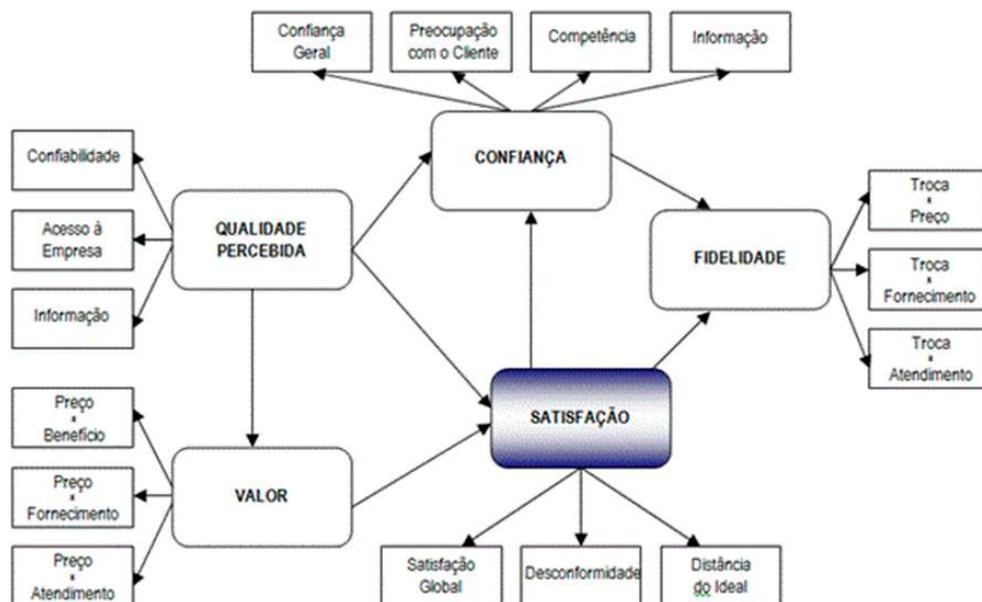
Os resultados do *IASC* são utilizados para subsidiar o aprimoramento dos instrumentos regulatórios e priorizar as ações de fiscalização.

A pesquisa realizada leva em consideração o seguinte escopo de variáveis:

- Qualidade percebida;
- Valor percebido (relação custo-benefício);
- Satisfação global;
- Confiança no fornecedor;
- Fidelidade.

A metodologia adotada na pesquisa utiliza um modelo para cálculo gerado a partir de uma consulta qualitativa composta pelas cinco variáveis avaliadas no questionário aplicado por meio de escalas de mensuração.

Utiliza-se o método PLS (Partial Least Squares – Mínimos Quadrados Parciais).



Figura

1. Diagrama esquemático do escopo da pesquisa

Fonte: ANEEL - <https://www.gov.br/aneel/pt-br/consumidores/iasc>

2.2. PONTOS DE FRAGILIDADE NOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE E PROTEÇÃO

Durante a pesquisa realizada para elaboração deste trabalho foi observada a relevância das principais causas de falhas nos sistemas de monitoramento e controle dos dispositivos de proteção utilizados nas redes que utilizam a filosofia *Self-Healing*.

Em um primeiro plano, podemos destacar a qualidade de energia dos circuitos de BT que alimentam os dispositivos de controle, que em grande parte das vezes possui um baixo nível de manutenções preventivas, no que tange podas, reconduramentos, desequilíbrio de carregamento de fases e aterramentos.

Com relação ao aterramento em si, temos dois pontos de atenção a serem considerados. O primeiro deles se refere a ausência do aterramento em função de ações de vandalismo da população, onde os cabos de cobre são furtados para vendas em ferros-velhos e similares. O segundo deles provém das más condições de aterramento existentes, fruto da alta resistividade do solo ou de falta de manutenção. Ambos os casos podem afetar drasticamente o desempenho dos controles eletrônicos dos dispositivos de proteção.

Um aterramento de má qualidade afeta o desempenho do para-raios de MT e do DPS – *Dispositivo de Proteção contra Surtos* e conseqüentemente o fluxo de energia em incidências de impulsos atmosféricos ou proveniente de chaveamentos. Algumas regiões do Brasil possuem alto índice cerâmico, isto é, a quantidade de raios que atingem o solo por quilômetro quadrado, por ano, o que também deve ser avaliado de forma criteriosa.

Ainda na ótica de análise dos problemas causados pelos impulsos

atmosféricos e surtos de tensão, especial atenção deve ser dada aos supressores de surtos ou *DPS*, localizados na entrada de alimentação dos cubículos de controle. Tais dispositivos devem ser dimensionados adequadamente em relação às cargas e circuitos por eles protegidos.

Além da classificação básica relacionada ao tipo de *DPS* (Tipo I, II, III ou I+II), outros parâmetros devem ser analisados para a definição do modelo adequado para cada situação.

Diversos componentes para transmissão e recepção de dados são incluídos posteriormente aos ensaios de tipo e rotina, nos cubículos de controle, gerando possíveis fragilidades nos sistemas por não serem adequados às configurações ou especificações do sistema, em relação a sua capacidade de supressão contra surtos.

Durante o processo de operação ou manutenção dos dispositivos de seccionamento, ou em função de falhas ou interrupções dos circuitos de MT ou BT, por vezes os sistemas de controle ficam alimentados por baterias, de forma a continuarem aptos para operação e garantindo o armazenamento de dados, configurações pré-estabelecidas e manutenção dos dispositivos de telemetria e comunicação operantes. Neste aspecto, também abordaremos e indicaremos os principais requisitos construtivos e nominais, bem como os pontos de cuidado e controle a serem observados.

Por fim, e não menos importante, devemos citar a ausência de informações sobre queima de componentes e acessórios, ou falhas dos dispositivos de controle, acima de um NQA - *Nível de Qualidade Aceitável*, de forma a se construir uma massa de dados e análises estatísticas, onde seja possível a avaliação de desempenho dos equipamentos de forma ágil e preventiva, em termos de manutenção, acionamento de garantias, homologação de produtos, especificações técnicas e de padrões de instalação.

3. *SELF-HEALING*

As redes inteligentes cada dia mais se materializam em relação aos sistemas de distribuição de energia elétrica, através da automação, controle e monitoramento de subestações, redes de distribuição e medição de energia.

Em conjunto com sensores e medidores cada vez mais espalhados pelo sistema de distribuição como um todo, se encontram também os sistemas de comunicação, de forma a permitir que haja um maior e melhor controle sobre a rede.

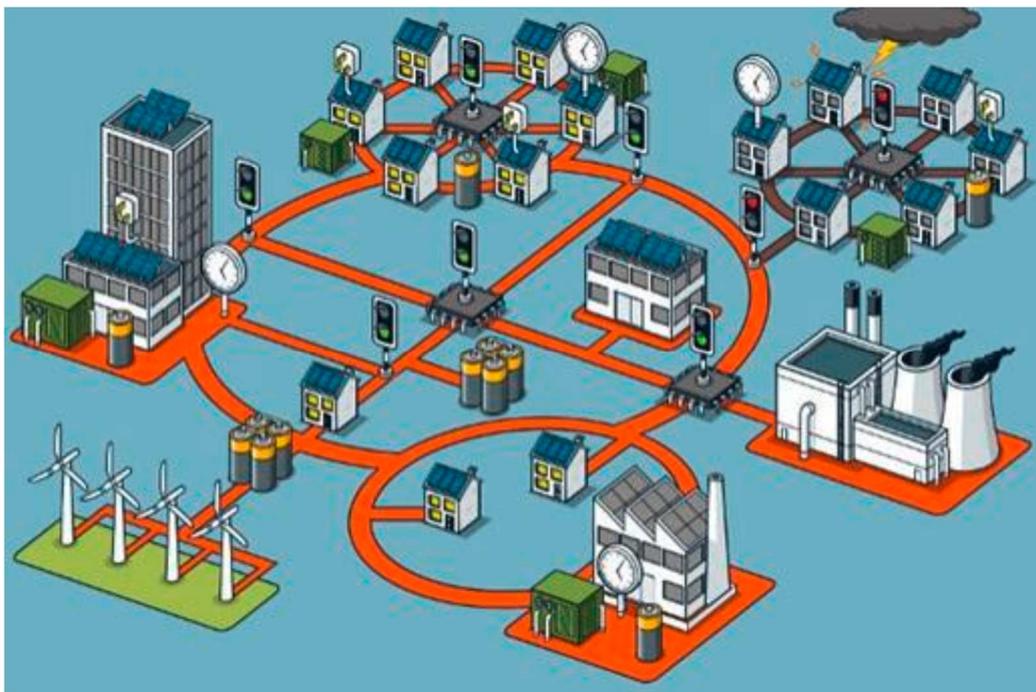


Figura 2. Esquema ilustrativo dos principais componentes de uma *Smart Grid*.
 Fonte: <https://www.sabereletrica.com.br/smart-grids/>, (2021).

Um sistema que utiliza a filosofia *Self-Healing*, é aquele que tem a capacidade de detectar e isolar uma falha de forma automática, por meio de sistemas de proteção inteligentes e de dispositivos de chaveamento ou seccionamento.

Neste tipo de sistema, se encontram presentes sensores, controles, relés, sistemas e equipamentos de comunicação e softwares dedicados, que utilizam dados em tempo real para isolar e detectar defeitos e falhas na rede de distribuição, reconfigurando a mesma para minimizar impactos aos usuários.

O sistema de supervisão e aquisição de dados *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) da concessionária é aquele responsável pela coleta dos dados, e monitoramento das variáveis, operações e dispositivos de controle.

Na literatura, os serviços oferecidos por uma *Smart Grid* estão associados com a capacidade que esta possui em responder e coordenar ações diante de eventos diversos, objetivando corrigir perturbações, minimizar impactos e melhorar a estabilidade do sistema durante distúrbios (Martins; Almeida, 2020).

Na atualidade, com o grande desenvolvimento tecnológico que vem ocorrendo, os sistemas modernos têm ficado cada vez mais complexos. A abordagem para análise e projeto desse tipo de sistema é feita pelo uso de sistemas SoS, isto é, sistemas que coordenam e conectam sistemas autônomos, formando um sistema maior que consegue completar tarefas, que os sistemas individuais ou uma aglomeração não coordenada deles, não conseguiria (Ribeiro; Bessani; Fogliatto; Maciel, 2019).

Tais elementos fazem parte de uma classe de sistemas conhecida pela junção de várias funções constituintes, que atuam de forma independente no modo

operacional e gerencial. Ao serem reunidos, esses sistemas desempenham novas funções.

Por causa das suas características de funcionamento, os Sistemas de Sistemas são muito usados em contextos variados, como, por exemplo, gestão de desastres, sistemas de cuidados com a saúde, sistemas bancários, sistemas de e-mail profissional, sistemas militares e cidades inteligentes.

Isso mostra que o SoS é um dos alicerces para consolidar de vez aquilo que muitos já conhecem como *IoT – Internet of Things*. A IoT consiste na conexão de vários aparelhos, tanto em uma residência, um prédio, uma empresa ou até mesmo uma cidade.

De uma forma geral, um processo arquitetural de SoS tem o objetivo de definir os stakeholders, quem são os sistemas constituintes e como eles interagem entre si.

Todos esses elementos são definidos a partir de uma compreensão da arquitetura do sistema, permitindo avaliar como funciona de forma mais precisa a interação entre eles

Cada vez mais as distribuidoras de energia, através de sua agência reguladora – ANEEL, são submetidas a metas de qualidade de energia mais severas, através da exigência de índices de qualidade mais arrojados, cujas violações geram penalidades para as concessionárias.

O sistema *Self-Healing* pode ser incluído na categoria de SoS e visa otimizar parâmetros das redes de distribuição, inclusive quanto ao número de equipamentos manobrados ou atuados, otimizando as operações e evitando degradação de ativos como disjuntores, religadores, chaves e transformadores.

A topologia de *Self-Healing* em redes aéreas de distribuição de energia, basicamente compreende a interligação de circuitos de Média Tensão diferentes (fontes ou alimentadores distintos), com respectivos disjuntores em suas Subestações e religadores ou chaves automáticas ao longo de seus alimentadores (religadores feeders) e religadores ou chaves automáticas, na posição normalmente aberta, denominado “tie” ou nó, interligando os alimentadores de fontes distintas.

A filosofia ou lógica de operação do sistema para isolamento dos trechos com falhas ou em manutenção é baseada na verificação de ausência e presença de tensão, de forma a promover a abertura dos dispositivos feeders, e fechamento do dispositivo “tie”, simulando a perda de um dos alimentadores.

Como o fluxo de potência pode ser invertido ao passar pelos equipamentos (religadores e chaves), deve ser garantida a injeção de tensão secundária, proveniente de transformadores de potencial ou das próprias redes de baixa tensão locais (fontes CA), que serão usadas como fonte de alimentação para o funcionamento de todos os componentes do cubículo de controle dos dispositivos de seccionamento, possibilitando assim as ações de abertura, fechamento, continuidade do monitoramento e medições.

Caso haja eventos que propiciem a falha ou saída destas fontes CA, ou que

os níveis de alimentação estejam abaixo dos valores mínimos necessários para a operação do controle ou componentes, o sistema de monitoramento existente deve alterar a alimentação para a fonte CC (bateria), que faz parte do sistema de controle, e que se encontra dentro do cubículo.

Quando a falta de tensão for a montante do religador feeder, que faz parte do sistema, deverá haver a transferência de carga por meio de aberturas e de fechamentos dos equipamentos.

Em relação aos sistemas de sensoriamento e controle, nas aplicações em redes de distribuição em média tensão, podemos classificar os sistemas *Self-Healing* em 3 tipos: Centralizada, Semi-centralizada e Distribuída ou Descentralizada.

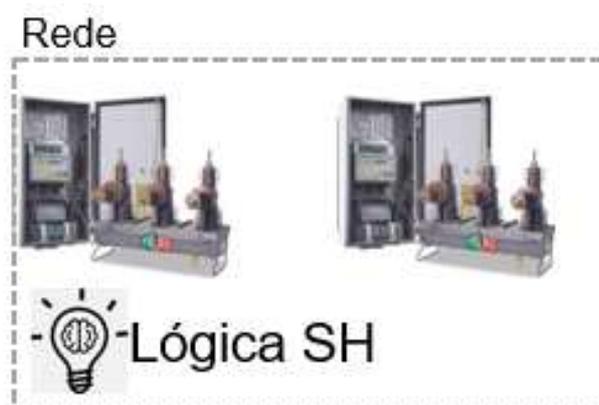


Figura 3. *Self-Healing* Descentralizado
Fonte: Autor (2023)



Figura 4. *Self-Healing* Semi-Centralizado
Fonte: Autor (2023)

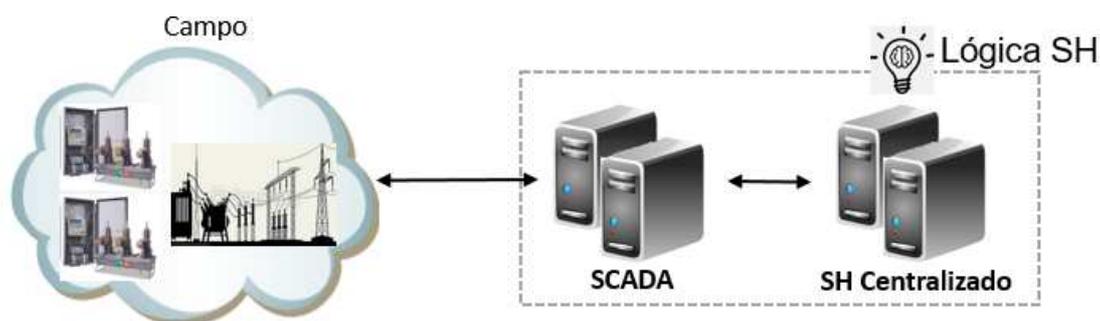


Figura 5. *Self-Healing* Centralizado

Fonte: Autor (2023)

Tipo	Implementação da Lógica	Atuação	Vantagens	Desvantagens
Descentralizado	Em cada religador ou chave	Falta de tensão no religador meio, situado ao longo do circuito (NF)	Independente da comunicação com o SCADA	Não verifica sobrecarga e só permite a inclusão de até 2 alimentadores por esquema
Semi centralizado	Em um servidor entre o SCADA e o Campo	Falta de tensão no religador meio, situado ao longo do circuito (NF)	Verifica sobrecarga e permite a modelagem de qualquer topologia	Maior complexidade de implementação/manutenção e depende de boa comunicação com os equipamentos
Centralizado	Em um servidor que recebe os dados diretamente do SCADA	Atuação de proteção com indicação de Lockout, desenergização e sobrecarga;	Faz gestão de carga, permite a modelagem de qualquer topologia e possui fácil implementação e Manutenção	Depende de boa comunicação com os equipamentos

Tabela 1. Tipos de *Self-Healing*

Fonte: Autor (2023)

4. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E CONTROLES AUTOMÁTICOS

As proteções elétricas dos circuitos de distribuição em média tensão utilizam basicamente 4 famílias de equipamentos em seus sistemas (Disjuntores, Religadores, Seccionadores Automáticos, Seccionalizadores). A atuação destes equipamentos é realizada de forma direta ou indireta por relés ou IEDs - *Intelligent Electronic Devices*.

Os Relés ou IEDs são os dispositivos responsáveis por detectar perturbações que possam comprometer o funcionamento normal e adequado do sistema, e atuar acionando disjuntores, religadores e chaves, de acordo com sua programação.

Todas as quatro famílias de equipamentos acima indicadas se destinam ao

seccionamento automático e manual de circuitos de média tensão, com a finalidade principal de cumprir com os requisitos de proteção, principalmente contra condições indesejadas de corrente, tensão, fator de potência e frequência.

Os disjuntores de média tensão geralmente se localizam em painéis abrigados em subestações, e os equipamentos mais modernos possuem isolamento a ar ou SF₆, e interrupção à vácuo ou SF₆. Em alguns casos, estes dispositivos podem ser instalados em locais desabrigados.

A evolução das tecnologias microeletrônicas e de telecomunicações afetaram os setores de distribuição elétrica. Os religadores de linha deixaram de ser dispositivos puramente eletromecânicos e passaram a contar com complexos conjuntos de proteção, medição e telecomunicação. Adicionando-se o fato de que cada saída (bay) de alimentador também conta com um religador ou relé de proteção, o universo de equipamentos com ajustes chega a números superiores a 10³ em uma única distribuidora (Freitas; Donadel; Silva, 2019).

As chaves tripolares e os religadores automáticos trifásicos são fabricados para o uso ao tempo e destinados a circuitos de média tensão entre 15 e 36kV.

Os modelos mais atuais possuem isolação sólida (buchas em resina ciclo alifática) e realizam a interrupção no vácuo. Com esta construção, não há existência de gases inertes ou óleos como isolantes dielétricos, pois as buchas são em resina e além disto abrigam as ampolas à vácuo no interior de seus tanques para extinção dos arcos elétricos, produzidos na abertura dos circuitos. Alguns modelos ainda utilizam o SF₆ como meio de interrupção, mas tem se tornado menos usual, por questões de manutenção. Em um passado não muito remoto, de cerca de duas décadas atrás, a grande maioria destes equipamentos eram isolados à óleo.

Alguns religadores, possuem controles ou IEDs versáteis, que através de configurações específicas, podem trabalhar como chaves automáticas ou mesmo seccionalizadores.

O custo de um religador com as características construtivas para utilização em sistemas *Self-Healing*, gira em torno de \$9.000,00 (dólares americanos), levando-se em consideração, modelos dotados de tecnologia e lógica para aplicações com transferência automática de carga e bom nível de customização de funcionalidades de monitoramento, sinalização e controle.

É importante salientar que para a utilização em uma topologia que utiliza a filosofia *Self-Healing*, os sensores devem estar presentes ou conectados tanto nas buchas no lado fonte quanto no lado carga, terem altos graus de confiabilidade, robustez e rapidez de resposta.

De forma a otimizar a utilização dos recursos para investimento neste tipo de topologia de rede, as concessionárias vêm buscando o desenvolvimento, homologação e aquisição de equipamentos com a menor taxa de custo-benefício possível. Dentro desta ótica e demanda, alguns fabricantes

atualmente já possuem em seu portfólio, produtos que possuem embarcados, sensores do tipo Rugovisk mais rápidos e precisos, permitindo a confirmação da inexistência de faltas na linha, antes de iniciar o fechamento de ponto na onda (PoW - *point-on-wave*).

Qualquer tipo de manobra de dispositivos de proteção, alimentados por transformadores, bancos de capacitores e reatores requerem uma atenção especial, e o fechamento ou abertura no momento errado ou inadequado pode gerar transitórios que afetam o desempenho do sistema elétrico e de proteção.

A abertura e o fechamento controlado de dispositivos de seccionamento tripolares, limita os transitórios de energização associados a transformadores, bancos de capacitores e indutores. Pode-se optar por fazer a manobra durante o cruzamento por zero na tensão, pela passagem da tensão pelo seu pico ou no caso do fechamento, buscar-se fechar em sincronismos através da supervisão da função ANSI 25.

Com a finalidade de minimizar sobretensões, subtensões ou sobrecorrentes, deve-se comandar o fechamento no pico máximo de tensão no caso de aplicações com transformadores de potência, e durante a passagem pelo zero para bancos de capacitores em derivação. O objetivo é evitar que isso afete o desempenho do sistema elétrico ou cause funcionamento indevido dos sistemas de proteção e controle.

O impacto de uma manobra controlada na rede pode fazer com que a corrente de chaveamento se reduza em cerca de 6%, durante a energização de um transformador, passando para a ordem de dezenas de ampères, caso não seja adotada.

IEDs que possuem a função POW – *Point on Wave*, permitem aos usuários definirem o momento do fechamento do dispositivo de proteção, de acordo com a tensão, com uma precisão de 200 microssegundos. Além disto, tais sistemas permitem que todos os controles sejam acionados apenas pela linha, sem a necessidade de transformadores de potencial, o que se torna uma vantagem muito importante.

A manutenção das condições operativas ótimas desses dispositivos está associada ao constante planejamento das cargas e topologias da rede que terá como resultado um estudo de proteção que deverá estabelecer a coordenação das proteções temporizadas de sobrecorrente (Freitas; Donadel; Silva, 2019).

O uso dos IEDs permite uma redução no custo de implantação, bem como de manutenção e no número de cabos e equipamentos necessários à sua utilização, possibilitando a troca de informações mais rápidas, simplificação do projeto, maior confiabilidade, além de permitir a sincronização temporal dos dispositivos (Freitas; Donadel; Silva, 2019).

Em função dos valores enviados pelos sensores do sistema aos IEDs, utilizando-se um banco de dados que contém diversas curvas e parametrizações, eles disparam comandos para a realização das ações de

abertura e fechamentos dos dispositivos de chaveamento.

As curvas, os dispositivos e suas funções são padronizados pela norma ANSI/IEEE C37.2: 2008, onde são definidos códigos numéricos para os dispositivos, suas respectivas funções, acrônimos e designações de contato do sistema de energia elétrica. Os números de dispositivo são usados para identificar as funções dos dispositivos mostrados em um diagrama esquemático. As descrições de cada função são fornecidas e descritas neste padrão.

Na abordagem *Self-Healing*, podemos destacar como mais relevantes as seguintes funções dos IEDs utilizados nos controles dos equipamentos de proteção:

- Distância (21);
- Sobre-excitação Volts/Hertz (24);
- Sincronismo (25);
- Sub e Sobretensão (27 e 59);
- Direcional de Potência (32);
- Subcorrente (37);
- Sequência Negativa (46);
- Sobrecarga (49);
- Sobrecorrente (50/51);
- Falha do Disjuntor (50BF);
- Direcional de Sobrecorrente (67);
- Oscilação de Potência – PSB e Out of Step (68/78);
- Religamento (79);
- Sobre e Subfrequência (81);
- Derivada de Frequência (81R);
- Diferencial de Linha (87L);
- Diferencial de Transformador (87T) e;
- Restrição Harmônica.

As curvas de trip (tempo x corrente) dos elementos de seccionamento são padronizadas pela IEC 60255-27: 2013 (inversa, muito inversa ou extremamente inversa), IEEE C37.112: 2018 (tempo inverso), curvas moderadamente inversas (muito inversa e extremamente inversa) e curvas de tempo inverso fora dos padrões, que podem ser criadas em função das necessidades dos usuários e configurações de circuitos.

Os IEDs utilizados nos controles automáticos trabalham em conjunto com fontes de alimentação CA/CC, filtros, retificadores e dispositivos de comunicação e telemetria. As principais características que os controladores automáticos devem ao menos possuir são:

- a) Auto diagnose para assegurar sua integridade;
- b) Recurso de detecção de perda de sequência da *CPU* e sua recuperação (watch-dog);
- c) Memória para armazenamento mínimo de 30.000 eventos (dia/mês/ano/hora/min/seg);
- d) Reinicialização, através de comando local e remoto;
- e) Consulta e ajuste do relógio de tempo real localmente e remotamente;
- f) Softwares que permitam supervisão / comandos em tempo real, obtenção dos dados da memória em ordem cronológica;
- g) Supervisões / comandos localmente, independentemente do notebook;
- h) Sistema de segurança através de senhas;
- i) Proteção contra intempéries e interferências eletromagnéticas, transitórios e surtos em todos os circuitos de CA e/ou CC e o respectivo desempenho não pode ser afetado pelas variações de tensão e/ou frequência;
- j) Possuir no mínimo interfaces seriais RS-232 e *Ethernet* configuráveis para integração com o *SCADA* da concessionária e para comunicação entre os equipamentos;
- k) Preferencialmente possuir outras interfaces de comunicação e telemetria (*DNP3*, *Secure DNP3 (SAv5)*, *Modbus*, IEC 60870-5-101/104 e NTP).

5. ENSAIOS DE TIPO, ROTINA E RECEBIMENTO

Os ensaios de tipo compreendem testes e verificações realizados em um equipamento “representante” de um determinado modelo ou série de fabricação, com o objetivo de demonstrar que todos os equipamentos daquele tipo e características específicas, obedecem às especificações que não podem ser controladas pelos ensaios de rotina ou recebimento.

Os ensaios de rotina são aqueles realizados em um lote de equipamento produzido, e geralmente são realizados em 100% do lote, e se destinam ao controle de qualidade da produção.

Os ensaios de recebimento são aqueles realizados conforme uma amostragem pré-definida visando o controle de qualidade de lotes produzidos, levando-se em consideração um nível de qualidade aceitável (NQA) para cada tipo de ensaio, ou verificação. A amostragem, o NQA e o nível de inspeção devem ser obtidos através das normas de referência dos produtos, porém, no caso de inexistir tais parâmetros ou serem inadequada a cada situação, novos valores devem ser obtidos e determinados através da NBR 5426 ou norma técnica similar.

Neste trabalho, utilizaremos as normas da International Electrotechnical Commission (IEC) como as principais referências de normas técnicas sobre os equipamentos abordados, porém, conforme região geográfica e país onde os

equipamentos são projetados e produzidos, outras referências normativas podem ser utilizadas como referência e podem direcionar a condições mais severas e adequadas a cada situação.

No Brasil, as normas brasileiras que tratam sobre os materiais em questão (fabricação e testes), quando existem, são traduções das respectivas normas IEC, como pode ser observado na Tabela 2.

Para os controles dos dispositivos citados neste trabalho, temos em cada uma das normas de referência a definição dos respectivos requisitos técnicos, ensaios de tipo e ensaios de rotina. De uma forma geral, utilizaremos a IEC 62271-111: 2019 como principal base de referência na abordagem técnica para os controles automáticos.

Equipamento	Referência IEC	Referência ABNT	Observação
Disjuntor	IEC62271-100: 2018	NBRIEC62271-100: 2006	Versão ABNT Cancelada sem substituição
Religador	IEC62271-111: 2019	Não há	-
Seccionador e Seccionalizador	IEC62271-200: 2021 IEC62271-102: 2018	NBRIEC62271-200: 2007 NBRIEC 62271-102: 2022 NBR10860: 1989	-
IEDs	IEC60255-26/27: 2013 IEC61850-1: 2013	Não há	-

Tabela 2. Normas de referência

Fonte: Autor (2023)

O primeiro ensaio relacionado à análise de QEE a ser considerado em relação aos controles automáticos, é o ensaio de capacidade de resistência a surtos de elementos eletrônicos de controle ou *Surge Withstand Capability* (SWC).

Para atender a este ensaio de tipo, os elementos de controle fornecidos no conjunto dos equipamentos (religadores e chaves automáticas) devem suportar, sem danos, a tensão de surtos originados na fonte de energia de baixa tensão, em uma ou ambas as correntes e tensões de transformadores conectados aos elementos de controle, ou nos cabos de controle que conectam os equipamentos a seus elementos de controle. Diante destes requisitos, a IEC prevê dois ensaios distintos que devem ser usados para demonstrar tal capacidade, são eles:

- Teste de sobretensão transitória rápida e oscilatória: A norma prevê dois ensaios de tipo para relés e sistemas de relés que se relacionam à imunidade desse tipo de equipamento a transientes elétricos repetitivos. A IEEE C37.90.1 cobre as características do gerador de sinais, formas de onda, seleção de terminais do equipamento nos quais os testes devem ser realizados, procedimentos, critérios para aceitação e a documentação dos resultados do

teste. Os testes devem ser aplicados a qualquer parte do sistema do relé que possa ser exposta a transientes conduzidos ou acoplados sob condições normais de operação instalada.

Este padrão estabelece uma base comum e reproduzível para avaliar o desempenho de relés e sistemas de relés quando sujeitos a transientes repetitivos em linhas ou conexões de alimentação, sinal, controle e comunicação. Este padrão estabelece que uma avaliação seja realizada durante as condições normais (sem disparo) e anormais (desativado) de operação do relé.

- Teste de simulação de operação do para-raios: Este teste simula um pico rápido induzido por um raio e as mudanças de tensão resultantes, que aparecem no religador e elementos de controle, devido à taxa de mudança de corrente e a impedância de conexão ao solo.

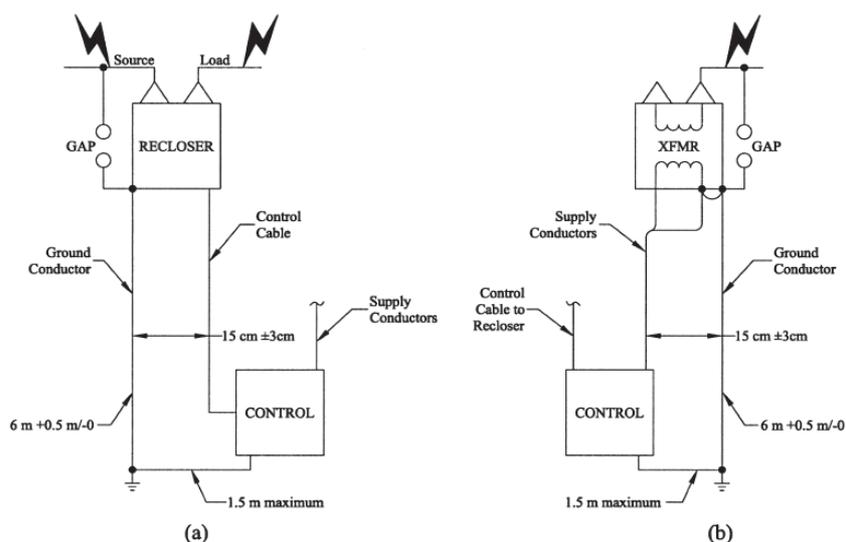


Figura 6. Esquema de montagem do ensaio de capacidade de resistência a surtos de elementos eletrônicos de controle.

Fonte: NBR IEC 62271-111 (2019)

As amplitudes, formas de onda e quantidade dos impulsos de tensão e de corrente, bem como detalhes em relação a posição e conexão dos cabos de controle, de alimentação e aterramento são descritos na NBR IEC 62271-111: 2019.

Como resultado dos ensaios, espera-se que o controle deva ser energizado e esteja operacional durante o teste com as configurações a seguir:

- O valor do ponto de disparo (configuração de *pickup*) não deve exceder a corrente de carga nominal do dispositivo;
- Religadores ajustados para o número máximo de operações para bloqueio;

c) Outras configurações para operação normal consistentes com a) e b) acima.

Durante a aplicação de surtos, o controle não deve fechar o religador de uma posição aberta, nem abrir (desarmar) o religador de uma posição fechada. Nenhuma mudança de estado deve ocorrer ou ser relatada. Após os testes, o religador e o controle devem ser capazes de realizar todas as funções sem prejuízo algum identificado.

Em complemento aos dois ensaios indicados, o Anexo B da IEC 62271-111:2019 indica uma série de ensaios complementares em relação a interferências e imunidades a fenômenos eletromagnéticos, dentre os quais devem ser destacados:

- Ensaio de isolamento (IEC 60255-27: 2013): A IEC 60255-27: 2013 descreve os requisitos de segurança do produto para relés de medição e equipamentos de proteção para classes de tensão até 1 000 Vac, com uma frequência nominal de até 65 Hz ou uma corrente contínua com tensão nominal de até 1.500 V. Acima desses limites, a IEC 60664-1: 2020 é aplicável para a determinação da distância de escoamento e tensão suportável à frequência industrial. Esta norma detalha os requisitos essenciais de segurança para minimizar o risco de incêndio e perigos causados por choque elétrico ou ferimentos ao usuário. O equipamento deve obter resultados satisfatórios para as seguintes condições:

- a) suportabilidade à tensão de impulso, com tensão de ensaio de 5 kV de pico, com três impulsos de polaridade positiva e três de polaridade negativa;
- b) tensão suportável nominal em frequência industrial nos circuitos auxiliares e de comando. O valor mínimo de tensão a ser aplicado deve ser de 2 kV.

- Ensaio de susceptibilidade (IEC 60255-26: 2013): A IEC 60255-26: 2013 é aplicável a relés de medição e equipamentos de proteção, levando em consideração combinações de dispositivos para formar esquemas de proteção de sistemas de potência, incluindo o controle, monitoramento, comunicação e equipamentos de interface de processo usados com esses sistemas. Esta norma especifica os requisitos de compatibilidade eletromagnética para relés de medição e equipamentos de proteção. Os requisitos especificados nesta norma são aplicáveis a relés de medição e equipamentos de proteção em uma nova condição, e todos os testes especificados são apenas testes de tipo. O equipamento deve obter resultados satisfatórios para as seguintes condições:

- a) distúrbio de alta frequência, conforme a IEC 60255-26: 2013, com as modificações ANSI/IEEE C37.60;
- b) transitórios rápidos - trem de pulsos, conforme a IEC 60255-26: 2013, com as modificações da ANSI/IEEE C37.60. Os pontos de aplicação de descarga

deverão atender às recomendações da norma;

c) distúrbio de campo eletromagnético radiado, conforme a IEC 60255-26: 2013, adotando-se o nível de severidade indicado nela;

d) descarga eletrostática, de acordo com a IEC 60255-26: 2013, adotando-se nível de severidade adequado às condições da instalação. Os pontos de aplicação de descarga deverão considerar as recomendações da norma.

Com relação às baterias chumbo-ácidas do tipo reguladas por válvula (VRLA) de pequeno porte, utilizadas nos cubículos de controle, os seus respectivos requisitos gerais, características funcionais e métodos de ensaios devem ser baseados na NBR 16659 de 12/2017. Esta norma se aplica a baterias utilizadas em geral, tanto em aplicação cíclica (carga e descarga), como em regime de flutuação (constante ou intermitente).

O ensaio de desempenho frente aos ciclos de carga e descarga representa a habilidade da bateria de realizar repetidos ciclos de carga/descarga. Este desempenho deve ser confirmado realizando-se uma série de ciclos, sob condições específicas de DOD (*Depth of Discharge*) levando-se em consideração a fração ou percentagem de carga retirada da bateria numa determinada descarga, com descargas com DOD de 50 % para os regimes com corrente de $I = 3,4 \times I_{20}$ ou com $I = 5 \times I_{20}$, segundo indicação do fabricante ou fornecedor.

A capacidade real não pode ser menor que 50 % da capacidade nominal, em ampères-hora, e a quantidade de ciclos não pode ser menor que 200. Ao final de seis meses com a bateria em flutuação à temperatura de 25 °C, a capacidade obtida não pode ser inferior a 100 % em relação à capacidade nominal. A retenção de carga é definida como sendo a capacidade real residual (para um regime de descarga de 20 h) dos elementos ou monoblocos, expressa em porcentagem, quando armazenados em circuito aberto, sob condições específicas de temperatura e tempo. Sob essas condições, a capacidade residual não pode ser menor que 75 % de Cr20 (capacidade real no regime de 20h).

Cr20 representa a capacidade, em ampères-hora, obtida ao final de uma descarga, com corrente constante e numericamente igual a C20 dividido por 20, à temperatura de referência (25°C), até a tensão final de 1,75 V por elemento.

C20 é a capacidade, em ampères-hora, definida para baterias chumbo-ácido do tipo reguladas por válvula de pequeno porte, sendo o regime de descarga de 20h, com corrente constante, à temperatura de referência (25°C), até a tensão final de 1,75 V por elemento (por exemplo, no caso de monobloco de 12 V, a tensão final é de 10,5 V).

A bateria deve ser capaz de suportar uma corrente de $I_m = 40 \times I_{20}$ por 300 s e de $I_h = 300 \times I_{20}$ por 5 s, sem que ocorra deformação ou outros danos. A aceitação de carga após descarga profunda tem como objetivo avaliar a aceitação de carga da bateria após sofrer uma descarga contínua por um longo período de tempo. A bateria deve ser recarregada com uma tensão constante por um período de 48 h. A capacidade obtida deve ser maior que ou igual a 75 % da Cr20.

7. ESTUDO DE CASO

7.1. EVOLUÇÃO DOS INDICADORES DE QUALIDADE

A qualidade dos serviços de distribuição de energia elétrica alcançou em 2021 o segundo melhor resultado da série histórica acompanhada desde 2000, conforme apontam os indicadores de DEC e FEC apurados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O DEC global do Brasil permaneceu abaixo do limite estabelecido pela ANEEL. Já o FEC global alcançou o seu melhor desempenho histórico em 2021, também ficando abaixo do limite definido pela ANEEL. Ao longo de 2021, o serviço de fornecimento de eletricidade permaneceu disponível por 99,87% do tempo, na média do Brasil.

Os consumidores ficaram 11,84 horas em média sem energia (DEC) no ano. A frequência (FEC) das interrupções se manteve em trajetória decrescente, reduzindo de 6,06 interrupções em 2020 para 5,98 interrupções em média por consumidor em 2021.

O avanço observado nos últimos anos é resultado de diversas ações da ANEEL, tais como as novas regras de qualidade do fornecimento nos contratos de concessão das distribuidoras, a adoção de planos de resultados para as distribuidoras que apresentavam mau desempenho, as compensações financeiras aos consumidores, as fiscalizações da Agência e a definição de limites de interrupção decrescentes para as concessionárias.



Figura 7. Evolução do DEC no Brasil

Fonte: ANEEL



Figura 8. Evolução do FEC no Brasil

Fonte: ANEEL

Item de evolução	Valor
Disponibilidade média do serviço	99,86%
Compensações financeiras	MR\$ 718,5
Duração média das interrupções	11.84 hs
Frequência média das interrupções	5,98 vezes

Tabela 3. Resumo da evolução de indicadores de qualidade no Brasil

Fonte: Autor (2021)

7.2 DESEMPENHO POR DISTRIBUIDORA E RANKING DA CONTINUIDADE

O último ranking de continuidade divulgado pela ANEEL, e que serve como instrumento de comparação quanto ao desempenho de uma distribuidora em relação às demais empresas do país, demonstra a evolução de qualidade em relação ao quesito de continuidade do fornecimento de energia elétrica.

A classificação é elaborada com base no Desempenho Global de Continuidade (DGC), formado a partir da comparação dos valores apurados de DEC e FEC das concessionárias em relação aos limites estabelecidos pela ANEEL para esses indicadores. A partir dessa comparação, há um incentivo para que as concessionárias busquem a melhoria contínua da qualidade do serviço.

A Agência avaliou todas as concessionárias do país no período de janeiro a dezembro de 2021, divididas em dois grupos: concessionárias de grande porte (com número de unidades consumidoras maior que 400 mil) e concessionárias de menor porte (com o número de unidades consumidoras menor ou igual a 400 mil).

Das empresas de grande porte, a primeira colocada foi a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN, RN), seguida por Energisa Tocantins (ETO, TO) em segundo e Energisa Paraíba (EPB, PB) em terceiro. A

distribuidora que mais evoluiu em 2021 foi a LIGHT, com um avanço de 10 posições, seguida por EPB e Energias de Portugal São Paulo (EDP, SP), que melhoraram 8 posições em comparação ao ano de 2020. As últimas colocadas foram: ENTIDADE NACIONAL DE ELETRICIDADE, Goiás (ENEL, GO, atualmente denominada EQUATORIAL GO) (27º), EQUATORIAL MA (28º) e COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE, RS) (29º). As concessionárias que mais regrediram no ranking foram a EQUATORIAL MA, que registrou queda de 20 posições, e a CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA (CELESC, SC) com recuo de 9 posições em comparação a 2020.

Das empresas com até 400 mil consumidores, as melhores foram: Energisa Borborema (EBO, PB) e Empresa Força e Luz João Cesa (EFLJC, SC), empatadas em primeiro, seguidas pela DME Distribuição (DMED, MG) em terceiro. As distribuidoras que mais evoluíram em 2021 foram o DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA DE IJUI (DEMEI, RS), com o avanço de 5 posições, e a SUL SERGIPANA DE ELETRICIDADE (SULGIPE, SE), que melhorou 4 posições em comparação com o ano de 2020. As últimas nesse grupo foram COOPERATIVA ALIANÇA (COOPERALIANÇA, SC) (15º), DISTRIBUIDORA CATARINENSE DE ENERGIA ELÉTRICA (DCELT, SC) (16º) e FORÇA ELETRICA (FORCEL, RS) (17º). As concessionárias que mais regrediram no ranking foram a DCELT, com recuo de 9 posições, e a MUXFELDT MARIN E CIA LTDA (MUXENERGIA, RS) que caiu 3 posições em comparação a 2020.

As distribuidoras AMAZONAS ENERGIA (AM), COMPANHIA DE LETRICIDADE DO AMAPÁ (CEA, AP), Equatorial Alagoas (AL), Equatorial Piauí (PI), ENERGISA COMERCIALIZADORA DE ENERGIA, Acre (Energisa, AC), ENERGISA COMERCIALIZADORA DE ENERGIA, Rondônia (Energisa, RO) e Roraima Energia, Roraima (RR) foram excluídas excepcionalmente do ranking porque estiveram recentemente sob o regime de designação, com limites de indicadores flexibilizados.



Figura 9. Evolução do DGC das concessionárias de pequeno porte

Fonte: ANEEL

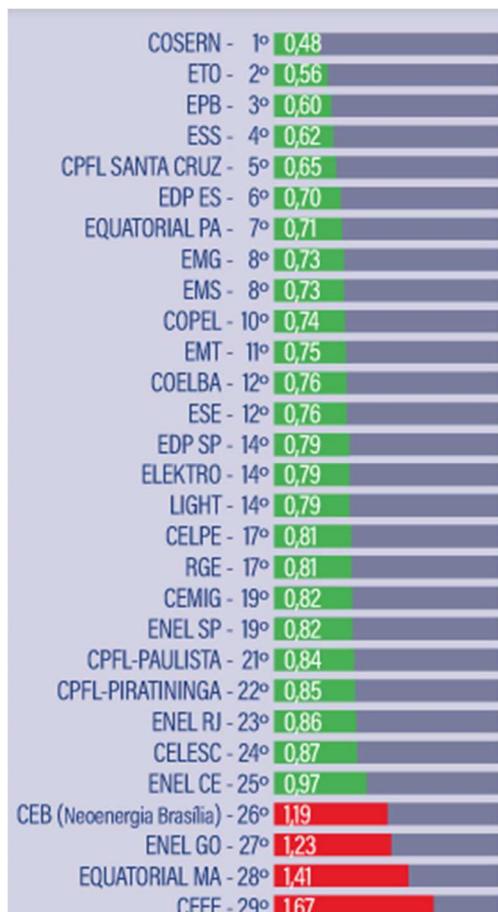


Figura 10. Evolução do DGC das concessionárias de grande porte

Fonte: ANEEL

7.3. COMPENSAÇÕES DE CONTINUIDADE AOS CONSUMIDORES

O valor das compensações de continuidade pagas diretamente aos consumidores registrou aumento, passando de R\$ 634 milhões, em 2020, para R\$ 718 milhões em 2021. A quantidade de compensações também apresentou leve incremento, de 79,49 para 79,97 milhões.



Figura 11. Evolução das compensações financeiras no Brasil

Fonte: ANEEL

7.4. ESTUDO DE CASO – CONCESSIONÁRIA 1 (C1)

Para este trabalho escolhemos uma concessionária do RJ, para realização de um estudo de caso e avaliação dos resultados obtidos com a adoção do *Self-Healing* em seus circuitos de média tensão. A empresa foi denominada como Concessionária 1, e os dados referentes a sua estrutura são descritos a seguir.

Nome	Concessionária 1 (C1)
Localização	Brasil, Rio de Janeiro (RJ)
Quantidade de Municípios (RJ)	92
Quantidade de Municípios (C1)	31
População do Estado do Rio de Janeiro	Aprox. 17,5 milhões de pessoas
Receita	4,3 bilhões USD (2021)
Renda Líquida	3,93 milhões USD (2021)
Contratos Ativos	4,3 milhões
Extensão de Circuitos	87.706 km

Tabela 4. Informações sobre a Concessionária 1 (C1)

Fonte: Autor (2023)

A Concessionária 1 foi a distribuidora que mais evoluiu em 2021 no Brasil, com um avanço de 10 posições em relação ao Desempenho Global de Continuidade (DGC), que leva em consideração o DEC e FEC.

A seguir são apresentados os avanços em relação a diminuição do DEC e FEC, e que demonstram a melhoria de qualidade do fornecimento da Concessionária 1 (C1).

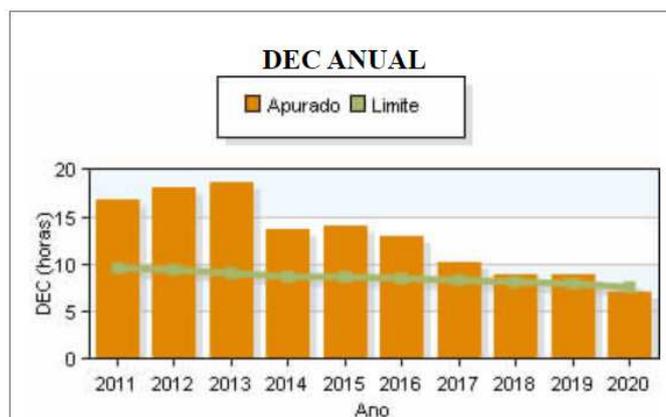


Figura 12. Evolução do DEC – Concessionária 1
Fonte: ANEEL - Indicadores coletivos de continuidade (ANEEL)

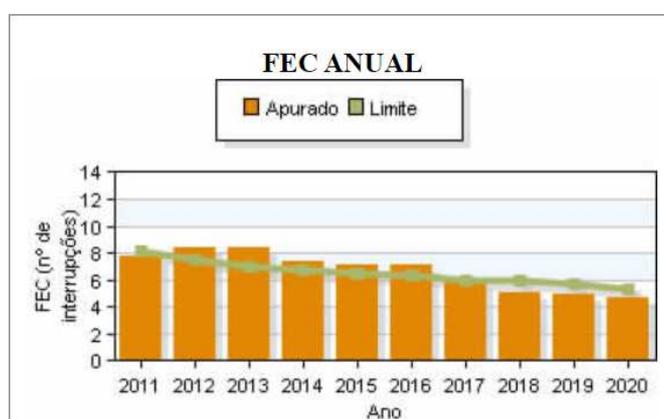


Figura 13. Evolução do FEC – Concessionária 1(C1)
Fonte: ANEEL - Indicadores coletivos de continuidade (ANEEL)

PK_IQ	ANO	QTD_CLI_C1	DEC_ANEEL_12MESES	FEC_ANEEL_12MESES
201412	2014	3693301	13,74	7,35
201512	2015	3767172	13,97	7,15
201612	2016	3804729	12,98	7,19
201712	2017	3845613	10,21	5,89
201812	2018	3794606	8,87	5,08
201912	2019	4070456	9,97	5,46
202012	2020	3891052	7,14	4,75
202112	2021	3927950	6,43	3,79
202209	2022	3986048	6,26	3,32

Tabela 5. Evolução do DEC e FEC até 2022 (C1)
Fonte: Concessionária 1 (C1)

Os resultados anteriormente indicados quanto a evolução dos indicadores de qualidade de C1, estão relacionados diretamente com o investimento em manutenção e recondutoramento das redes de MT e BT e de adoção da filosofia *Self-Healing* em alguns circuitos de MT.

C1 possui atualmente 389 alimentadores de MT (13,8 kV) operando com a filosofia *Self-Healing* (três com saídas subterrâneas e os demais em linhas de distribuição totalmente aéreas). Em 2022 estes circuitos proporcionaram um custo CHI (consumidor hora interrompido) evitado acumulado de R\$117 mil, e uma efetividade de 63,5%.

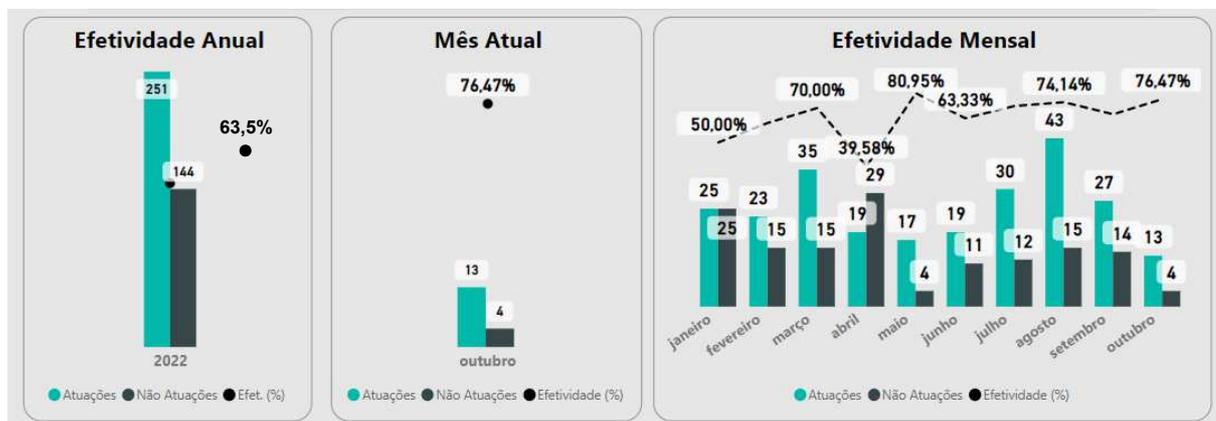


Figura 14. Efetividade quanto a diminuição do CHI

Fonte: Concessionária 1 (C1)

O estudo também avaliou dois circuitos de MT específicos, a partir do ano de 2016, com o objetivo de comprovar a aderência dos resultados globais obtidos por C1 e os efeitos causados pela adoção da filosofia *Self-Healing*.

Os circuitos escolhidos constituem-se de redes aéreas de MT, com e suas respectivas denominações são LDA BELAVI e LDA VIOLETA.

ANO	LINHA	QTD CLIENTES	CHI_MT	CI_MT	DEC_MT	FEC_MT
2014	LDA BELAVI	3311(*)	75299,93267	69682	22,74	21,05
2015	LDA BELAVI	3311(*)	170770,7702	89627	51,58	27,07
2016	LDA BELAVI	3311(*)	68110,52517	36980	20,57	11,17
2017	LDA BELAVI	3311(*)	22809,70033	13257	6,89	4,00
2018	LDA BELAVI	3311(*)	18656,82567	16313	5,63	4,93
2019	LDA BELAVI	3311	32196,0735	26638	9,72	8,05
2020	LDA BELAVI	3269	37348,84333	24916	11,43	7,62
2021	LDA BELAVI	3481	13570,2675	13874	3,90	3,99
2022	LDA BELAVI	3684	29072,239	17604	7,89	4,78
2014	LDA VIOLETA	4211(*)	39551,01233	19898	9,39	4,73
2015	LDA VIOLETA	4211(*)	26172,52033	17108	6,22	4,06
2016	LDA VIOLETA	4211(*)	19092,09233	14822	4,53	3,52
2017	LDA VIOLETA	4211(*)	14863,13433	13642	3,53	3,24
2018	LDA VIOLETA	4211(*)	12803,40583	14444	3,04	3,43
2019	LDA VIOLETA	4211	11163,807	13892	2,65	3,30

2020	LDA VIOLETA	4276	25799,91367	28795	6,03	6,73
2021	LDA VIOLETA	4375	4721,755333	5711	1,08	1,31
2022* (até set)	LDA VIOLETA	4385	1523,000167	674	0,35	0,15

Tabela 6. Evolução do DEC e FEC LDA BELAVI e LDA VIOLETA

Fonte: Concessionária 1 (C1)

Os valores marcados com (*) na Tabela 7 são estimativas em relação à quantidade de clientes. A partir de 2019, o sistema adotado por C1 passou a permitir o detalhamento do número de clientes por alimentador.

Os maiores inibidores para a atuação do *Self-Healing* se caracterizam pelas falhas de comunicação e defeito em campo, respectivamente.

Inibidores	Quantidade de Falhas (%)
Relés ou IEDs	20
Telemetria	20
Modem ou Rádio	26
Sensores de Tensão	14
Antena	3
Fonte CA/CC	7
DPS	5
Para-raios de MT	5

Tabela 7. Percentual de falha por componente

Fonte: Concessionária 1 (C1)

Ano	Índice IASC Brasil	Índice IASC C1	Posição no Ranking (Geral)	Posição no Ranking (Categoria)
2016	64,86	63,92	29/49	15/29
2017	63,16	55,05	42/51	24/30
2018	66,10	58,23	47/52	28/30
2019	67,38	56,43	47/53	28/31
2020	60,97	55,34	43/53	24/31
2021	53,83	47,84	43/53	25/32

Tabela 8. Evolução do IASC

Fonte: Concessionária 1 (C1)

8. PRINCIPAIS PROBLEMAS

As descargas provenientes dos para raios de média tensão, irradiam um forte impulso de campo eletromagnético, causando um rápido colapso de tensão, aumentando assim o efeito de acoplamento capacitivo entre os cabos de aterramento (carcaça do tanque e cubículo de controle). A queda de tensão no condutor de aterramento (principalmente indutivo), separa efetivamente o aterramento do religador, em relação à referência do controle eletrônico. Se não for controlada de forma adequada, a diferença de potencial pode atingir níveis

elevados e danificar os componentes elétricos e eletrônicos do cubículo de controle ou causar uma falha em sua operação.

Geralmente as estruturas ou pontos de aterramento de transformadores, chaves e religadores, são aterrados localmente, porém, em zonas urbanas, muitas vezes é difícil a escavação para instalação do número de hastes de aterramento necessárias, ou o solo possui alta resistividade, sendo um problema para o escoamento de surtos de tensão.

Ainda em relação aos para-raios de MT, podemos citar como um ponto de fragilidade a não observância do estado de seus desconectores automáticos ou de seus estados de conservação, que podem os tornar inoperantes.

A alimentação CA, proveniente de redes de BT existentes, também representam uma grande fonte de problemas relacionados a QEE, pois em diversas situações o aterramento dos transformadores que alimentam estas redes, são furtados ou se encontram em condições precárias, o mesmo vale para os pontos de aterramento locais dos religadores, pois apesar do neutro ser multiterrado, o desequilíbrio entre fases das redes de baixa tensão aliado a ausência de um aterramento eficaz, causa problemas em relação às cargas alimentadas por estes circuitos.

Outro aspecto relevante são as proteções contra surtos, que não são um item padrão na maioria dos modelos originais de controles. A ausência delas ou seu mal dimensionamento, como um dos elementos de proteção nos cubículos de controle, é um fator de risco.

Cada vez mais também são empregados dispositivos de comunicação, como antenas, telemetrias, modems e outros dispositivos de comunicação, que originalmente não são testados em conjunto e durante a bateria de ensaios de tipo, conforme IEC 60255-26/27: 2013, previstos para o cubículo de controle, e que podem se transformar em causas de falhas no sistema como um todo.

O ensaio de tensão aplicada à frequência industrial, realizado como ensaio de rotina em 100% das peças produzidas (2 kV – 1 min) é realizado curto circuitando-se todos os componentes, inclusive o cabo umbilical que une a caixa de controle ao tanque do equipamento, e interligando-se todo conjunto à carcaça metálica aterrada, porém desconectando-se os IED e demais dispositivos eletrônicos de comunicação ou isolando-se os respectivos circuitos, quando presentes.

Podemos também destacar a qualidade de modelos de baterias, utilizadas como fontes CC nos cubículos de controle. Estes componentes são muito importantes para a confiabilidade e respectiva autonomia do sistema e suas características construtivas de ensaios de tipo quanto aos modelos adotados são negligenciados, principalmente em relação às aquisições como itens sobressalente ou de reposição para manutenção.

Outro ponto importante a ser salientado, é que alguns projetos de implementação *Self-Healing* em redes de média tensão, se dá com a contratação da aquisição dos equipamentos de proteção em conjunto com um pacote de manutenção, e uma análise estatística de desempenho, baseada nos itens sobressalentes e trocados durante ações de manutenção, por vezes não é

facilmente observado pela Concessionária. Em muitos casos, ainda existe uma terceira parte que é responsável pelo fornecimento dos componentes dos elementos de telemetria e comunicação, o que dificulta ainda mais o controle e a análise de falhas.

A soma de todas as situações anteriormente citadas, faz com que haja um número excessivo de probabilidade de falhas nos cubículos de controle, relacionada a queima de componentes ou falha operativa do mesmo, incorrendo em alguns casos, até em risco para os operadores do equipamento

9. SOLUÇÕES PROPOSTAS

9.1 SUPRESSORES DE SURTOS DE TENSÃO

- Utilização de Dispositivos de Proteção Contra Surtos – DPS ou de varistores na entrada de alimentação CA do cubículo, de forma a proteger fontes, inversores, filtros e demais componentes, contra sobretensões.

- Os DPS devem obrigatoriamente ser certificados através de ensaios realizados com base na norma técnica ABNT NBRIEC 61643-11:2021, ou na série de normas técnicas da IEC 61643. Essas normas determinam as características mínimas que os dispositivos devem atender para que atuem com eficácia e segurança. Como ocorre em outros dispositivos elétricos, são as normas de produto que estabelecem os parâmetros básicos de um DPS e sua qualidade, quanto ao atendimento das normas de instalação.

- No caso do DPS, além da classificação básica relacionada ao tipo de DPS (Tipo I, II, III ou I+II), outros parâmetros devem ser utilizados na definição do modelo adequado para cada aplicação, são elas:

a) Máxima tensão de operação contínua (U_c): Representa o valor máximo que a tensão da rede pode atingir sem que o DPS atue.

DPS conectado entre				Esquema de aterramento				
Fase	Neutro	PE	PEN	TT	TN-C	TN-S	IT com neutro distribuído	IT sem neutro distribuído
X	X			$1,1 U_0$		$1,1 U_0$	$1,1 U_0$	
X		X		$1,1 U_0$		$1,1 U_0$	$\sqrt{3} U_0$	U
X			X		$1,1 U_0$			
	X	X		U_0		U_0	U_0	

NOTAS

- 1 Ausência de indicação significa que a conexão considerada não se aplica ao esquema de aterramento.
- 2 U_0 é a tensão fase-neutro.
- 3 U é a tensão entre fases.
- 4 Os valores adequados de U_c podem ser significativamente superiores aos valores mínimos da tabela.

Tabela 9. Valor mínimo de U_c exigível do DPS, em função do esquema de aterramento

Fonte: ABNT – NBR 5410 (2008 – versão corrigida)

Para uma correta interpretação dos esquemas de ligação, seguem as descrições dos tipos de condutores e sistemas, abordados na NBR 5410:

TN - Esquemas que possuem um ponto da alimentação diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a este ponto através de condutores de proteção. Nesse esquema, toda corrente de falta direta fase-massa é uma corrente de curto-circuito. São considerados três tipos de esquemas TN, de acordo com a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção, a saber: a) esquema TN-S, no qual o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos; b) esquema TN-C-S, no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor em uma parte da instalação; c) esquema TN-C, no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor ao longo de toda a instalação

TT - Esquema que possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodos de aterramento eletricamente distintos do eletrodo de aterramento da alimentação. Nesse esquema, as correntes de falta direta fase-massa devem ser inferiores a uma corrente de curto-circuito, sendo, porém, suficientes para provocar o surgimento de tensões de contato perigosas.

IT – Esquema que não possui qualquer ponto da alimentação diretamente aterrado, estando aterradas as massas da instalação. Nesse esquema, a corrente resultante de uma única falta fase-massa não deve ter intensidade suficiente para provocar o surgimento de tensões de contato perigosas

PE – Designação do condutor que: liga as massas e condutores que não fazem parte da instalação entre si e/ou a um terminal de aterramento principal. É denotado pelas letras PE (Proteção Elétrica).

PEN – Quando o condutor combina as funções de proteção e neutro, é designado pelas letras PEN.

Quanto maior o valor de U_c , maior será a elevação de tensão nos terminais do equipamento antes da atuação do DPS e, por isso, é recomendável que o seu valor seja o mais próximo possível do estabelecido. Caso contrário, as oscilações normais da rede podem provocar atuações indesejáveis do dispositivo, reduzindo drasticamente sua vida útil.

b) Nível de proteção do DPS (U_p)

Sempre que o DPS está atenuando um surto, uma pequena parcela de tensão irá surgir nos terminais dos equipamentos instalados a jusante, visto que nenhum condutor interno do DPS é capaz de oferecer resistência elétrica nula. Essa tensão resultante no equipamento recebe o nome de nível de proteção do DPS (U_p). Seu valor nunca deve ser maior que a suportabilidade do equipamento,

caso contrário ele será danificado ou degradado.

Tensão nominal da instalação V		Tensão de impulso suportável requerida kV			
		Categoria de produto			
Sistemas trifásicos	Sistemas monofásicos com neutro	Produto a ser utilizado na entrada da instalação	Produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais	Equipamentos de utilização	Produtos especialme nte protegidos
		Categoria de suportabilidade a impulsos			
		IV	III	II	I
120/208 127/220	115-230 120-240 127-254	4	2,5	1,5	0,8
220/380, 230/400, 277/480	-	6	4	2,5	1,5
400/690	-	8	6	4	2,5

NOTAS

1 O anexo E traz orientação sobre esta tabela.

2 Valores válidos especificamente para seccionadores e interruptores-seccionadores são dados na tabela 50.

3 Para componentes associados a linhas de sinal utilizados na entrada da instalação (categoria IV de suportabilidade), a tensão de impulso suportável mínima é de 1 500 V (ver IEC 61663-2).

Tabela 10. Suportabilidade a impulso exigível dos componentes da instalação
Fonte: ABNT – NBR 5410 (2008 – versão corrigida)

É preciso especial atenção ao se selecionar dispositivos que possuam nível de proteção próximo ou igual ao mínimo especificado, pois à medida que os equipamentos vão naturalmente envelhecendo (devido a oxidação dos seus componentes internos) sua suportabilidade será reduzida. Embora tenham o mesmo nome, o nível de proteção de um DPS é totalmente diferente do nível de proteção do SPDA (representado pela sigla NP) e não existe nenhuma correlação entre eles.

Ao se selecionar ou especificar dispositivos que possuam nível de proteção próximo ou igual ao mínimo especificado, deve ser observado com atenção esta característica, pois à medida que os equipamentos vão naturalmente envelhecendo (devido a oxidação dos seus componentes internos) sua suportabilidade será reduzida.

A utilização de varistores também requer um cuidado adicional, já que as quedas de tensão provocadas pelos condutores de ligação do dispositivo precisam obrigatoriamente ser somadas aos seus valores. Já no uso de centelhadores, prevalecerá o maior valor de U_p , seja do dispositivo ou da queda de tensão provocada pelos condutores.

c) Capacidade de interrupção das correntes de seguimento (Ifi)

Esta característica nominal é recomendada em situações de DPS Tipo I, e refere-se à capacidade de interrupção das correntes de seguimento, que podem surgir durante a condução do surto elétrico para o aterramento.

Nessas situações, a corrente do circuito tende a aproveitar o caminho de baixa

impedância (ionizado), já criado pela passagem do surto através do DPS. Por essa razão, seu valor sempre deverá ser superior ao valor da corrente de curto-circuito do transformador alimentador da linha e, o não cumprimento dessa exigência, pode ocasionar curto-circuito no próprio DPS, provocando sua queima e/ou incêndios.

d) Suportabilidade do dispositivo às sobretensões temporárias (TOV ou UT)

O termo TOV vem da abreviação do inglês "*Temporary Overvoltage*". Seu parâmetro demonstra o comportamento do DPS quando submetido a um ensaio de sobretensão temporária. São feitos ensaios com vários tempos pré-definidos: 200 milissegundos, 5 segundos e 120 minutos

Esta característica refere-se à suportabilidade do dispositivo às sobretensões temporárias. Quando a elevação da tensão no circuito de alimentação dura alguns segundos ou até mesmo minutos, a maioria dos dispositivos tendem a se danificar, principalmente, devido ao aquecimento de seus componentes internos. Quanto maior for sua capacidade e duração, melhor será o dispositivo.

e) Fusível de backup requerido

Por fim, mas não menos importante, esse termo refere-se ao máximo valor de fusível de backup que deve ser instalado a montante do DPS. O fusível terá a função de interromper a condução de corrente elétrica no caso de uma falha do dispositivo, ou ao fim de sua vida útil, quando este não for dotado de mecanismos internos de desconexão. Seu dimensionamento já é dado pelo próprio fabricante nas fichas técnicas. Vale ressaltar que alguns modelos de DPS já possuem fusíveis internos ou dispensam sua utilização, caso o fusível principal da instalação atenda aos parâmetros exigidos pelo fabricante do DPS.

9.2. ATERRAMENTO

A qualidade do aterramento é primordial para a correta atuação de dispositivos de supressão contra surtos na BT e da proteção contra impulsos atmosféricos e corrente provenientes de chaveamento na rede de MT (para-raios). Dentre as principais ações necessárias podemos citar:

- a) Realização de uma análise minuciosa dos pontos de aterramento estratégicos do sistema, principalmente aqueles com dispositivos de proteção instalados, de forma a garantir uma resistividade do solo, distanciamentos e conexões adequados;
- b) Ações de substituição dos condutores de aterramento em cobre eletrolítico, que apresentam condutividade de 100% IACS (*International Annealed Copper Standard*) e que corresponde a 58 MS / m, por condutores de

alumínio cuja condutividade é de 62% IACS, ou aço-cobreado com condutividade de 21%, 30%, 40%, 53% ou 63% IACS, como medidas de contenção ou mitigadoras contra o furto de aterramentos, podem gerar a diminuição da qualidade do aterramento em relação ao fluxo de escoamento de energia, de forma inadequada;

- c) Embora os condutores em aço cobreado, oferecidos no mercado, apresentem valores de até 40% e 53% IACS de condutividade, uma adequada análise deve ser realizada quanto a substituição de um cabo de cobre puro de mesma bitola, sem que haja comprometimento das características de capacidade de corrente de curta duração. Isso também vale para condutores de alumínio. Embora o núcleo de aço permita trabalhar-se em uma faixa de temperatura mais ampla que a do cobre, sem comprometer suas características físicas do material, a adequada avaliação do escoamento de corrente deve ser realizada em relação ao fenômeno do efeito pelicular, e não meramente em relação ao custo-benefício, oferecido pela maior dureza do material e menor valor de mercado, em relação ao furto;
- d) Recomenda-se supervisão para a identificação de problemas de conexão de aterramentos invólucros metálicos estruturas de fixação, para-raios, barramentos e hastes de aterramento, e em seguida a adoção o Método da Queda de Potencial, conforme indicado na NBR 15749;
- e) Eventualmente, em casos específicos sugere-se estudos de sistemas de proteção contra descarga atmosférica e aterramento em alta frequência.

9.3. FONTES DE ALIMENTAÇÃO

- a) Para as alimentações dos controladores em CA, recomenda-se o uso de TPs dedicados;
- b) Em determinadas situações específicas, avaliar a possibilidade de utilização de sistemas solares como alimentação dos cubículos de controle. Lembrando-se que para estas condições, será necessário agregar mais dispositivos eletrônicos no sistema, e nem todos os locais de instalações dos equipamentos é adequada a esta tecnologia;
- c) As fontes CA/CC, internas aos cubículos devem possuir características construtivas adequadas aos limites de temperatura em seus interiores, além de serem compatíveis com os monitoramentos necessários de seu funcionamento e monitoramento pelo SCADA;
- d) Com relação às baterias, indica-se a utilização apenas de modelos que possuam evidências de atendimento aos ensaios de tipo e recebimento, previstos na NBR 16659 ou norma similar;
- e) A maioria dos modelos de baterias utilizados no Brasil são de origem chinesa, e sua fabricação e testes são baseados nas normas chinesas GB/T19638 e GB/T19639, ambas baseadas na IEC 60896-22-2004.
- f) Além das informações técnicas do produto (catálogo), devem ser exigidos dos importadores dos produtos, os respectivos relatórios de ensaios de tipo dos

fabricantes.

9.4. AQUISIÇÃO DE COMPONENTES SOBRESSALENTES E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Os componentes utilizados internamente nos cubículos de controle, citados anteriormente como pontos de atenção, em um primeiro momento são fornecidos em conjunto com os dispositivos de seccionamento (religadores e chaves). As marcas e modelos destes componentes foram homologadas, dentro do escopo de aprovação do modelo dos dispositivos de seccionamento e seus respectivos cubículos de controle, com exceção de alguns dispositivos de Telecom, que em geral são homologados, adquiridos e instalados à parte, posteriormente e em função da característica específica de cobertura de sinais, de relevo, do tipo de sistema de aquisição e transmissão de dados utilizado no local e do grau de investimento exigido ou disponível.

Em um segundo momento, em função de falhas no campo, término de vida útil, obsolescência, má utilização ou vandalismo destes componentes eles são retirados da rede e substituídos.

Para que seja possível a realização das ações eficazes em relação a especificação, homologação, aplicação, controle de qualidade, manutenção e respectiva avaliação de desempenho destes componentes, as seguintes diretrizes devem ser seguidas.

Evento	Crítérios de Análise	Ações de Controle	Objetivo
Homologação	Ensaio de tipo e funcionais/teste de campo	Avaliação de ensaios e registro dos resultados	Aquisição de componentes aderentes à especificação técnica existente
Inspeção de Recebimento	Ensaio de rotina e recebimento	Avaliação dos ensaios e registro dos resultados	Aquisição de lotes produzidos em conformidade com o nível de qualidade aceitável (NQA) especificado e registro de não conformidades (NCs)
Reclamação de Usuário ou Manutenção	Ensaio de contraprova e avaliação das condições de instalação e utilização	Avaliação dos ensaios, registro dos resultados e acionamento de assistência técnica (garantia)/descarte	Obtenção de informação para tomada de decisão para registro de homologação, especificação ou instalação

Tabela 11. Diretrizes de controle

Fonte: Autor (2023)

É notório que as diretrizes de controle se limitam através dos marcos da especificação e da retirada do material da rede em função de falha ou manutenção. Todas as medidas de controle a serem aplicadas devem possuir registros claros e atualizados, de forma a permitir a rastreabilidade necessária e inerente ao processo, para as corretas tomadas de decisão.

Através das diretrizes de controle é possível obter informações que se tornam argumentos técnicos para eventuais alterações de especificação, reprovação de registros de homologações, alteração de procedimentos de instalação e análise de desempenho.

A avaliação de desempenho de modelos e respectivos fabricantes deve levar em consideração uma análise estatística criteriosa, utilizando-se os parâmetros de controle para cada fase do processo. Estas informações devem ser utilizadas para tomadas de decisão técnicas e comerciais.

Conforme exposto anteriormente, é de suma importância o controle, monitoramento e registro da aquisição de itens novos e dos eventos de troca em manutenção, de forma a possibilitar uma avaliação de desempenho entre fornecedores de componentes distintos, tomando como base as possíveis causas de falha e ações corretivas, principalmente no caso de manutenções realizadas por terceiros.

Como no *Self-Healing* a configuração da rede pode ser alterada drasticamente quanto a fontes de energia, circuitos e números de unidades consumidoras por trecho. Obrigatoriamente deve ser realizado um estudo detalhado, através de simulações, quanto a suportabilidade de equipamentos e materiais da rede (cabos, conexões, equipamentos e para-raios) quanto aos novos níveis de curto-circuito, chaveamento e carregamento, em função da reconfiguração da rede. Na maioria das vezes, para a implementação do projeto, se faz necessário um recondutoramento de trechos dos circuitos, por exemplo. Para a análise de desempenho, para cada evento analisado, deve ser considerado o cenário do momento da falha.

9. CONCLUSÕES

O cenário socioeconômico brasileiro, ao longo dos últimos 8 anos representa um grande problema quanto às questões de investimentos, orçamentárias e de fluxo de caixa das distribuidoras de energia elétrica reguladas pela ANEEL, e o fator pandemia, agravou ainda mais esta situação.

O período pós-pandemia aparentemente se mostra mais otimista em relação ao desenvolvimento econômico nacional, porém os índices de desemprego e as sequelas sociais que ainda persistem, representam duras tarefas a serem corrigidas e melhoradas.

Dentro deste cenário se situa o Estado do Rio de Janeiro, local da zona de concessão da distribuidora C1. O Estado do RJ, mais precisamente sua capital e região metropolitana, representam um ponto muito fora da curva em relação aos níveis de perdas não técnicas (PNT) no Brasil, chegando a níveis alarmantes.

Estas localidades possuem diversas áreas carentes, muitas das vezes controladas por grupos de milícias ou de traficantes de drogas, onde a presença do Estado é mínima, representando um território fértil em relação a inadimplência e ao furto de energia elétrica, cabendo a concessionária, muito

pouco a se fazer para reverter este quadro de forma efetiva. Outros grupos de unidades consumidoras também representam grande parcela de contribuição para os níveis de perdas, nos quais se encontram pequenos comércios, motéis, lojas de conveniência, fabricas de gelo e de cimento, por exemplo.

Os efeitos das PNTs não refletem apenas no caixa da empresa, e apesar de estarem cada vez mais prejudicando a arrecadação de C1, também geram efeitos nocivos aos circuitos de distribuição de energia, causando efeitos indesejados em função principalmente de sobrecargas e curtos-circuitos. As ligações clandestinas por diversas vezes são realizadas pelos próprios funcionários de empresas terceirizadas.

Outro efeito indesejado e que reflete na QEE, se refere ao vandalismo e ao furto de componentes, em algumas vezes pelo simples fato de a concessionária estar realizando ações contra as PNTs ou de recuperação de energia, e em outras ocasiões com o furto de cobre, principalmente de aterramentos, objetivando a venda em ferros velhos.

Os níveis de PNTs globais em C1 estão na ordem de 26,59%, enquanto na BT os níveis se encontram acima de 57%. Diante deste cenário, o investimento em *Self-Healing* e a manutenção dos índices de QEE desejados, se tornam ainda mais difíceis em função do necessário foco no combate às PNTs, através de blindagem de redes, utilização de dispositivos e sistemas antifurto e ações mais agressivas e efetivas quanto a cobrança e reversão da inadimplência.

Parte das ações de combate às PNTs pode retornar através das revisões tarifárias periódicas autorizadas pela ANEEL, porém por ser um ponto fora da curva, tais revisões têm se mostrado insuficientes, se tornando um grande problema em relação aos investimentos necessários em QEE ao danificar a saúde financeira da empresa.

O plano diretor (2023-2032) de C1 prevê o dimensionamento do sistema de distribuição para suprir toda a carga, sem restrições técnicas/operacionais, e para isso é necessário determinar as demandas máximas ocorridas no ano base e projetá-las para os demais anos contemplados no horizonte do estudo (10 anos).

Na construção deste cenário de demandas das subestações de AT é possível classificá-las ao longo do horizonte e determinar os pontos passíveis de reforços e ampliações para atendimento às demandas.

Já para as subestações do sistema de distribuição (25/13,8 kV e 25/6,0 kV), em condição normal de operação, o carregamento deverá atingir o limite de 75% da potência total instalada, levando-se em consideração as PNTs.

Mesmo com o cenário adverso em que C1 se encontra, seu plano diretor contempla e determina reforços em subestações de AT e MT e circuitos de distribuição, sendo a capacidade de seus transformadores planejadas obedecendo-se o critério de Capacidade Firme, Local ou Regional, definido como sendo a carga máxima que uma subestação pode atender quando perde uma de suas unidades transformadoras, passando as unidades remanescentes a operar com uma sobrecarga de no máximo, 30% de sua capacidade nominal.

Quando este critério é violado, a segunda providência em termos de prioridade, a ser adotada, é a transferência de carga através da distribuição, para subestações vizinhas, situadas na mesma região de planejamento. Este recurso só poderá ser adotado se houver disponibilidade de capacidade nas subestações adjacentes e considerando-se as limitações do sistema distribuidor primário.

Tais ações estão ligadas diretamente a utilização de circuitos com tecnologia *Self-Healing*, que em conjunto com o programa de reforço de circuitos de distribuição visam atender basicamente aos critérios de carregamento ao longo do período de evolução da carga do sistema e às previsões de ligação de novos consumidores de média tensão, constitui-se das seguintes ações básicas: transferência de carga entre circuitos, reconduzimento de troncos e/ou ramais e construção de novos circuitos.

Outros parâmetros são considerados para as ações anteriormente citadas e estão relacionados aos índices de QEE ANEEL (DEC e FEC) e parâmetros de queda de tensão.

Diante da saúde financeira de C1, os níveis de investimento em novos circuitos, unidades transformadoras e subestações, provavelmente não serão altos, e portanto mais do que nunca, a assertividade quanto aos investimentos deve ser buscada e outras alternativas deverão ser adotadas, provavelmente em relação a um plano de manutenção.

Contudo, as concessionárias buscam cada vez mais diminuir custos ou despesas com OPEX (operational expenditure), isto é, com as despesas operacionais, principalmente aqueles relacionados à manutenção e operação das redes de distribuição.

Com o aumento de utilização de receitas em CAPEX, isto é, com a aquisição de bens de capital, através da aquisição instalação de equipamentos novos, e dotados de tecnologia *Self-Healing*, é possível a implementação de infraestrutura necessária para obtenção de retornos em relação a revisão tarifária, dentre outros benefícios e melhorias consideráveis dos índices de QEE e de satisfação dos clientes (FER).

A partir de 2018, nota-se que C1 inicia uma recuperação para superar as metas de QEE determinadas pela ANEEL, diminuindo o índice de CHI e obtendo os devidos retornos financeiros através das respectivas revisões tarifárias periódicas, embora prejudicada drasticamente pelas PNTs. Este efeito está ilustrado nas Figuras 14 e 15 e Tabela 6.

Além disto, foi obtida a marca histórica de DEC com 1 dígito e uma subida de 10 posições no ranking de distribuidoras da ANEEL, o que sem dúvida alguma, possui relação direta em CAPEX direcionado a projetos de *Self-Healing*, conforme demonstrado através das Figuras 11 e 12.

Em um primeiro momento o sucesso foi obtido englobando-se a aquisição, instalação e manutenção de equipamentos dotados de tecnologia e recursos para esta finalidade de um mesmo fornecedor, e em um segundo momento apenas na aquisição de novos equipamentos via CAPEX, e utilizando-se OPEX

para a manutenção destas redes (mão de obra e sobressalentes).

Outro fator a ser considerado como positivo na utilização do *Self-Healing* nos circuitos de MT de C1 é o ganho com a diminuição do CHI, conforme demonstrado na Figura 16 e Tabela 7.

Por outro lado, apesar do sucesso em relação aos números de CHI, DEC e FEC, embora tenha havido uma melhora, não observamos de forma proporcional a percepção dos clientes em relação ao IASC, conforme indicado na Tabela 9, em função dos demais parâmetros que envolvem a contabilização deste índice.

Contudo, diversos pontos de atenção devem ser observados no que tange alguns componentes vitais ao adequado funcionamento do *Self-Healing*. Neste estudo pudemos destacar a importância em relação a homologação e controle de qualidade de equipamentos e acessórios, utilizando-se um estudo técnico de análise de desempenho e estatístico, principalmente em relação aos componentes sobressalentes utilizados, com foco nos controladores automáticos e sistemas de monitoramento e comunicação, que representam os principais inibidores para a obtenção de resultados satisfatórios na aplicação e efetividade do *Self-Healing*, conforme indicado através da Tabela 3.

No estudo de caso em questão, os dados para obtenção das taxas de falhas avaliadas, só foram possíveis a partir de 2020, onde C1 passou a assumir a manutenção destes sistemas, e os dados começaram ser obtidos através dos acionamentos em garantia e da aquisição e recebimento de componentes sobressalentes utilizados nestes sistemas de controle, monitoramento e comunicação.

Neste sentido, foi fundamental a criação de um canal de registros de reclamação de usuários através da ferramenta de ERP (*enterprise resource planning*) de C1, destinado principalmente às turmas de manutenção e automação, permitindo que a equipe de engenharia de controle de qualidade de materiais tivesse acesso aos dados, e atuasse junto aos fabricantes de todos os equipamentos e acessórios utilizados, bem como em relação às ações corretivas necessárias junto às equipes de automação e engenharia de redes aéreas, no que se refere a especificações, homologações, procedimentos de instalação e treinamentos.

Outro fato que pôde ser observado no estudo de caso, se refere a diversas homologações de modelos de componentes e acessórios, que se basearam apenas em testes funcionais, com duração inferior a 6 meses, realizados pelas equipes de automação e medição, sem o alinhamento e aderência necessários aos ensaios de tipo conforme indicado nos capítulos 6, 7 e 8. Neste aspecto, é fundamental que o cadastro de todos os itens sobressalentes utilizados nos sistemas *Self-Healing* seja incluído no ERP da concessionária e possuam visão de controle de qualidade, de forma a mitigar falhas de qualidade de materiais.

Conforme demonstrado nos capítulos 7 e 8, as normas técnicas e especificações adotadas pelas principais concessionárias, inclusive C1, devem sofrer revisões de forma a solicitar como requisitos obrigatórios a utilização de

DPS em suas especificações de entradas em CA dos cubículos de controle, pois os modelos standard dos principais fabricantes, ou não possuem estes dispositivos, sendo necessário algum grau de customização, ou em outros casos, eles são especificados indevidamente.

Esta pesquisa indica que não só o DPS, mas também todos os principais tipos de componentes de alimentação e comunicação estejam instalados e conectados aos cubículos, durante a execução dos ensaios dielétricos e de EMI (tipo) relacionados aos cubículos de controle.

De forma complementar às normas citadas neste trabalho, sugerimos também um estudo para implementação de ensaios que utilizem os parâmetros da *Computer and Business Equipment Manufactures Association* (CBEMA) e *Information Technology Industry Council* (ITIC), que possam garantir ainda mais, uma adequada especificação e controle de qualidade dos componentes e acessórios utilizados nos cubículos de controle.

Outra sugestão importante é quanto a revisão dos padrões de montagem de religadores e chaves com controles automáticos, que devem levar em consideração a adequada separação dos aterramentos dos para-raios dos tanques e dos TPs em relação ao aterramento dos cubículos, prevendo inclusive, a adoção de condutores adequados, principalmente em relação ao problema dos furtos de cobre para aterramento.

Com o aumento da utilização de painéis solares a um nível cada vez maior, fruto da respectiva atratividade econômica em relação ao custo, estudos utilizando-se esta tecnologia como fonte alternativa para alimentação dos cubículos de controle também vem surgindo, e podem ser observadas através de resultados já obtidos em projetos de P&D e testes de campo.

Todavia, também em relação aos painéis solares e outras fontes geração distribuída, e das grandes inversões de fluxo de potência que estas fontes causam, cada vez mais, estudos e modelagens mais adequados devem ser adotados para o correto funcionamento do *Self-Healing*, levando-se em consideração as possíveis alterações das configurações das redes, de transferências automáticas de carga e das inversões dos fluxos de potência.

A penetração de Geração Distribuída (GD) na rede elétrica brasileira vem aumentando vertiginosamente e a dinâmica da rede elétrica vem sofrendo rápidas mudanças, surgindo a demanda de novos estudos pelas concessionárias de energia, direcionados principalmente a regulação de tensão e QEE, em função da variação de irradiância solar.

9.1 Trabalhos futuros

Nesta seção são sugeridas algumas possibilidades de continuidade deste trabalho, sendo estas:

- Realizar estudo estatístico detalhado em relação às causas de falha dos principais componentes e acessórios dos controles eletrônicos, tomando como referência os respectivos ensaios de tipo e de recebimento dos materiais;
- Avaliar os efeitos elétricos da GD nos fluxos de potência e reflexo na efetividade da atuação dos sistemas de *Self-Healing*;
- Realizar análises técnicas, econômicas e de desempenho entre as utilizações de baterias de chumbo ácidas e de Lítio em controles eletrônicos;
- Avaliar tecnicamente o desempenho dos diferentes tipos de condutores (Alumínio, Aço cobreado e Cobre) no aterramento de controles eletrônicos e para-raios;
- Avaliar os efeitos da utilização do 5G nos sistemas de *Self-Healing*.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR5410: Instalações elétricas de baixa tensão. 2008 (versão corrigida). Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. NBR5419-4: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. NBR6023: Informação e documentação: Referências. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT. NBR15751: Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. NBR16659: Baterias chumbo-ácido de pequeno porte do tipo reguladas por válvula — Requisitos gerais, características funcionais e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR IEC 61643-11: Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão - Parte 11: Dispositivos de proteção contra surtos conectados aos sistemas de baixa tensão - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL divulga desempenho e ranking das distribuidoras sobre fornecimento de energia em 2021, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-divulga-desempenho-e-ranking-das-distribuidoras-sobre-fornecimento-de-energia-em-2021;>

Acesso em: 13/03/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Hub de Relatórios da Distribuição, 2023. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGE3OTZGYtZjhiZS00M2UyLWUwZTUtZjMwOTJiMzUyNjhmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 13/03/2023

ANEEL. Indicadores coletivos de continuidade.2019 Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade~>. Acesso em: 13/03/2023.

ANEEL. Índice ANEEL de satisfação do consumidor (Iasc)

. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/consumidores/iasc>.

Acesso em: 13/03/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Mapas das Distribuidoras. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNDI4ODJiODctYTUyYS00OTgxLWE4MzktMDczYTlmMDU0ODYxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9&pageName=ReportSection>

Acesso em: 27/06/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021.

Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>

Acesso em: 13/03/2023.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>

CASSOLE, L.C. Religador Self-Healing. Disponível em:

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/self-healing>

FREITAS, F.; DONADEL, C.; CÓ, M.; Silva Jr, E. Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Radial Electrical Distribution Networks, *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 17, NO. 3*, 2019.

GB/T19638.1: Lead-acid batteries for stationary valve-regulated. Part 1: Technical requirements. 2014.

GB/T19639.1: Technical conditions of small-sized valve-regulated lead-acid batteries. 2014.

HOKAMA, W. S.; HELEBRANDO, A. A experiência da CPFL na Implantação do Self-Healing da cidade de Campinas SP. Disponível em:

<http://abradee03.org/send2016/trabalhos/a-experiencia-da-cpfl-na-implantacao-do-self-healing-da-cidade-de-campinas-sp/>

IEC 60255-26: Measuring relays and protection equipment - Part 26: Electromagnetic compatibility requirements. 61643-11. 2013.

IEC 60255-27: Measuring relays and protection equipment - Part 27: Product safety requirements.2013.

IEC 60896-22: Stationary lead-acid batteries - Part 22: Valve regulated types – Requirements.2004.

IEC 61643-11: Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods. 2011.

IEC-TR 61850-1: Series communication networks and systems for power utility automation - ALL PARTS. 2013.

IEC 62271-100: High-voltage switchgear and control gear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. 2018.

IEC 62271-111: High-voltage switchgear and control gear - Part 111: Automatic circuit reclosers for alternating current systems up to and including 38 kV. 2019.

IEC 62271-200: High-voltage switchgear and control gear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and control gear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV. 2021.

IEC 62271-102: High-voltage switchgear and control gear - Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. 2018.

IEEE C37.2: IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, And Contact Designations. 2022.

IEEE C37.90.1: IEEE Standard for Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus. 2012.

IEEE C37.112: IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays. 2018.

GIFALLI, A. Microredes - Estudo dos Impactos da Inserção de Microrredes e Microgeração em Sistemas de Distribuição. Disponível em:
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/191236/gifalli_a_me_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y

MARTINS, G. F. A.; ALMEIDA, A. B. Automatic Power Restoration in Distribution Systems Modeled Through Multiagent Systems, *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 18, NO. 10, 2020. Disponível em:
<https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/3556/832>

PEREIRA, A. C. et al. Automação de Subestações e Usinas – Estado da arte e tendências utilizando a Norma IEC 61850, *Anais do VII SIMPASE - Sétimo Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos – Salvador-BA*. 2007.

PEREIRA, A. C. et al. Automação de Subestações e Usinas – Estado da arte e tendências utilizando a Norma IEC 61850, *Anais do VII SIMPASE - Sétimo Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos – Salvador-BA*. 2007.

RIBEIRO, R.; BESSANI, M.; FOGLIATTO, M.; MACIEL, C. Resilience Assessment of Self-healing Systems with Redundancy, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 17, No. 9, 2019. Disponível em:
<https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/1796/298>

RUIZ, T. Análise da qualidade do serviço prestado pela distribuidora light em sua área de concessão. Disponível em:
<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10027920.pdf>