



University of
Texas Libraries



e-revist@s



Centro Unversitário Santo Agostinho



revistafsa

www4.fsnet.com.br/revista

Rev. FSA, Teresina, v. 20, n. 10, art. 8, p. 155-174, out. 2023

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

http://dx.doi.org/10.12819/2023.20.10.8

DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

WZB
Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung



Lições aprendidas com o “Self-Healing”

Lessons Learned from “Self-Healing”

Eduardo Ribeiro de Moraes

Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense

E-mail: dudamoraesbrj@gmail.com

Kevin Cunha Porto

Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Mestrando PPGEET pela Universidade Federal Fluminense

E-mail: kevin.enguerj@gmail.com

Marcio Zamboti Fortes

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo

Prof. Associado III da Universidade Federal Fluminense

E-mail: mzamboti@id.uff.br

Henrique de Oliveira Henriques

Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Titular da Universidade Federal Fluminense

E-mail: hohenriques@id.uff.br

Endereço: Eduardo Ribeiro de Moraes

Ampla Energia e Serviços, Gerência de Planejamento e Engenharia. Prça Leoni Ramos Num. 1, 5º andar, Bloco 2 São Domingos, 24210-205 - Niteroi, RJ – Brasil.

Endereço: Kevin Cunha Porto

Ampla Energia e Serviços, Gerência de Planejamento e Engenharia. Prça Leoni Ramos Num. 1, 5º andar, Bloco 2 São Domingos, 24210-205 - Niteroi, RJ – Brasil.

Endereço: Marcio Zamboti Fortes

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Elétrica. Rua Passos da Pátria, 156, Bloco E, Sala 431, São Domingos, 24210240, Niterói, RJ - Brasil

Endereço: Henrique de Oliveira Henriques

Universidade Federal Fluminense, Centro Tecnológico, Escola de Engenharia. Rua Passos da Pátria 156, Bloco D, Sala 513, São Domingos, 24210240 - Niterói, RJ – Brasil.

Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar Rodrigues

Artigo recebido em 30/06/2023. Última versão recebida em 14/07/2023. Aprovado em 15/07/2023.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review (avaliação cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar os principais pontos relacionados à filosofia técnica de autorrecuperação (*Self-Healing*) de redes de distribuição elétrica, dentro do contexto das *Smart Grids* e os principais equipamentos e elementos que fazem parte desse contexto. Através da identificação dos principais distúrbios de qualidade de energia elétrica (QEE) que causam danos aos equipamentos e componentes, serão feitas análises entre as características técnicas de proteção desses equipamentos (disjuntores, religadores, chaves automáticas, seccionadores e relés), seus respectivos ensaios de tipos previstos em normas e os pontos vulneráveis referentes aos seus circuitos de potência e controle, que afetam diretamente o desempenho da filosofia de *Self-Healing* e a melhoria dos índices de qualidade (Duração Equivalente de Interrupção e Frequência Equivalente de Interrupção), estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Palavras-chave: Autorrecuperação. Qualidade de Energia. Indicadores de Qualidade de Energia, Religadores. Chaves automáticas.

ABSTRACT

This paper aims to present the main points related to the technical philosophy of self-healing of electrical distribution networks, within the context of Smart Grids and the main equipment and elements that are part of this context. Through the identification of the main power quality (PQ) disturbances that cause damage to equipment and components, connections will be made between the technical characteristics of protection equipment (circuit breakers, reclosers, automatic switches, sectionalizers, and relays), their respective type tests provided by standards and the vulnerable points concerning their power and control circuits, which directly affect the performance of the self-healing philosophy and the improvement of quality indexes (Equivalent Duration of Interruption and Equivalent Frequency of Interruption), established by ANEEL (National Electric Energy Agency).

Keywords: Self-Healing. Power Quality. Power Quality Indexes. Reclosers. automatic switches.

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 de várias empresas privadas, que atuam como concessionárias, o que pode ser observado no mapa de distribuidoras disponível no site da ANEEL. (ANEEL, 2023). Essas empresas compõem os agentes titulares da concessão federal destinados a prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica, e que também são chamados de “distribuidoras”.

Esse cenário é composto por empresas públicas e privadas, porém está sendo alterado, pois, apesar da reestruturação do setor na década de 1990 ter reduzido as responsabilidades do governo federal, algumas distribuidoras, que até o momento ainda estavam sob o controle do governo, passarão a ser controladas por empresas privadas, através da privatização da Eletrobrás, aprovada pelo Senado Federal, e que está em vias de implantação.

As distribuidoras que ainda se encontram sob o controle do governo federal (Eletrobrás), se situam em regiões de pouca densidade demográfica e desenvolvimento socioeconômico, possuindo pouca atratividade técnica e econômica em relação a investimentos necessários, que garantam uma efetiva confiabilidade dos circuitos e instalações e, conseqüentemente, propicie a respectiva qualidade da energia necessária.

O órgão regulador, a ANEEL, estabelece critérios de qualidade de energia através do módulo 8 do PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema de Elétrico Nacional, e sua abrangência inclui também as distribuidoras.

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, abordaremos a evolução da melhoria desses índices, em função da ação do órgão regulador e dos investimentos realizados pelas concessionárias em redes que aplicam a filosofia *Self Healing*.

Essa filosofia utiliza equipamentos de proteção (religadores e chaves automáticas) que são dotados de controles e dispositivos eletrônicos capazes de medirem determinadas grandezas elétricas da rede de distribuição de média tensão e de 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 nesses 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 e 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, como a IEC62271-111:2019 e referentes aos dispositivos de proteção na média tensão, 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 artigo está dividido em nove partes, sendo esta inicial, introdutória ao tema, seguida de uma contextualização na segunda parte; uma explicação do conceito de *Self Healing* e dispositivos de proteção na terceira e na quarta; na quinta e sexta parte, um aprofundamento dos temas principais; a sétima e a oitava parte apresentam uma análise da aplicação dos conceitos; e, finalmente, a nona parte com a conclusão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Normativas Existentes

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 do PRODIST é o documento que estabelece os procedimentos relativos à qualidade no fornecimento da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a do serviço prestado e também a qualidade do tratamento de reclamações.

Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, esse módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento às ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades. Para a qualidade do

tratamento de reclamações, esse módulo estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial: Frequência Equivalente de Reclamação (FER).

Nesse documento 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;

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

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

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.

O indicador FER é calculado conforme Resolução Normativa ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010 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.

É possível identificar que um aumento nos investimentos (CAPEX - *Capital Expenditure*), direcionado à 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 (Δ FEC) e de redução da frequência de reclamações dos consumidores (Δ FER). Além disso, o índice ANEEL de satisfação do consumidor (IASC) tem relação negativa com Δ DEC, Δ DER e Δ FER. O que mostra 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.

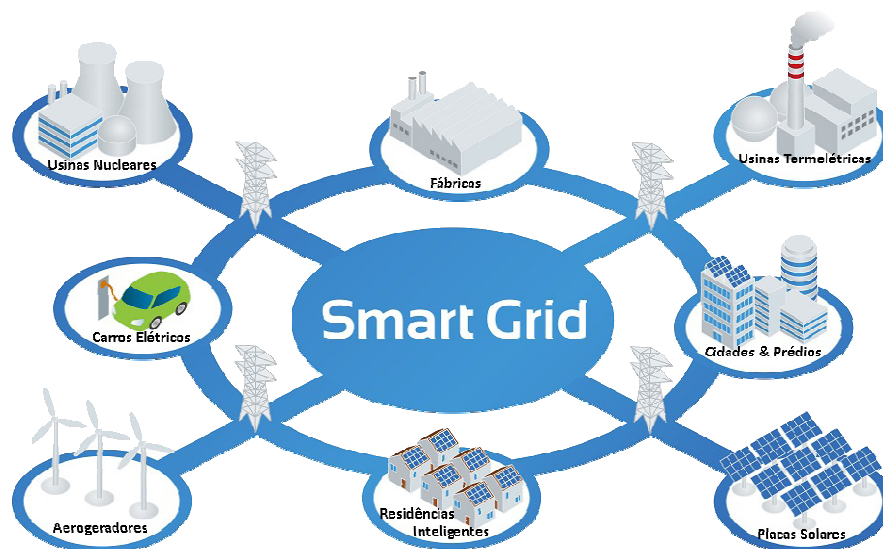
2.2 SELF HEALING

As redes inteligentes estão se tornando presentes nos 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, dentro desse escopo, encontram-se também os sistemas de comunicação, de forma a permitir que haja um maior e melhor controle sobre a rede.

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.

Nesse tipo de sistema, encontram-se 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 para minimizar impactos aos usuários. Um exemplo apresentado na literatura com um fluxograma de conexões entre produtores e consumidores energéticos de uma *Smart Grid* está apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de conexões entre produtores e consumidores energéticos em uma *Smart Grid* (Pelielo et al., 2016)



O sistema de supervisão e aquisição de dados *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) da concessionária coleta os dados e monitora 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. Uma abordagem para análise e projeto desse tipo de sistema é pelo uso de sistemas (SoS), que são 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 et al, 2019).

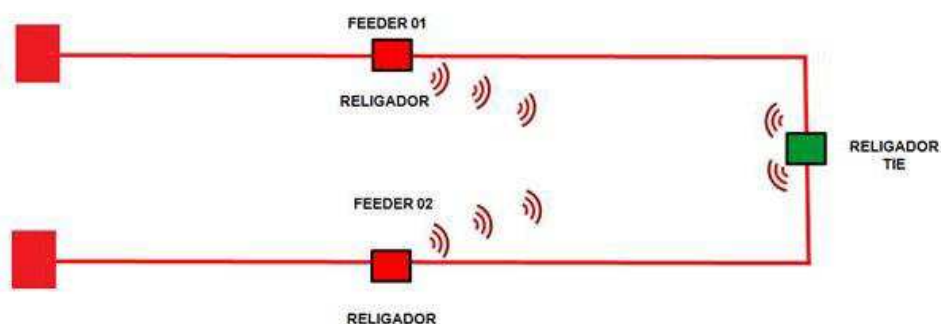
Cada vez mais as distribuidoras de energia, através de sua agência reguladora – ANEEL, são submetidas a metas de qualidade de energia mais severas, através da exigência de índices de qualidade mais arrojados, cujas violações geram penalidades para as concessionárias.

O sistema *Self-Healing* também visa otimizar parâmetros como número de equipamentos manobrados ou atuados, evitando degradação de ativos como disjuntores, religadores, chaves e transformadores.

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

A topologia mais comum adotada para o *Self Healing* em redes aéreas de distribuição de energia é a do tipo distribuído, que compreende a interligação de circuitos de Média Tensão diferentes (fontes ou alimentadores distintos), com respectivos disjuntores em suas Subestações, 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 com fontes distintas. A figura 2 ilustra essa configuração típica.

Figura 2 – Configuração típica de um sistema *Self Healing* – Rede de Média Tensão



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 abertura de fechamentos dos equipamentos.

2.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

As proteções elétricas dos circuitos de distribuição em média tensão utilizam basicamente quatro famílias de equipamentos em seus sistemas (Disjuntores, Religadores, Seccionadores automáticos, seccionalizadores e relés ou IEDs)

Os Relés ou IEDs são os dispositivos responsáveis por detectar perturbações que possam comprometer o funcionamento normal 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.

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 et al., 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, e os modelos mais atuais possuem isolamento sólida (buchas em resina ciclo alifática) e realizam a interrupção no vácuo.

Com essa construção, não há existência de gases inertes ou óleos como isolantes dielétricos, pois as buchas são em resina e, além disso, abrigam as ampolas a 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.

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

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.

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 et al., 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 troca de informações mais rápidas, simplificação do projeto, maior confiabilidade, além de permitir a sincronização temporal dos dispositivos (Freitas et al., 2019).

Em função dos valores enviados pelos sensores do sistema aos IEDs, utilizando 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 nesse padrão.

No *Self Healing*, podemos destacar as seguintes funções ANSI 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.

2.4 Controles Automáticos

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

- a) autodiagnose 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 nos níveis estabelecidos em “Ensaio de Tipo de Interferência Eletromagnética”. O 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, a fim de atender aos requisitos obrigatórios de Self-Healing;

k) preferencialmente, possuir outras interfaces de comunicação e telemetria (DNP3, Secure DNP3 (SAv5), Modbus, IEC 60870-5-101/104 e NTP).

2.5 Ensaio de Tipo e de Rotina

Os ensaios de tipo compreendem testes e verificações realizados em um equipamento “representante” de um determinado modelo, série de fabricação ou modelo, 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, geralmente realizados em 100% do lote, e destinam-se ao controle de qualidade da produção.

Neste trabalho utilizamos os conceitos das normas *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 foram utilizadas, quando compatíveis, ou mais severas ou adequadas do que as estabelecidas pela IEC.

No Brasil, as normas brasileiras que tratam sobre os materiais em questão, quando existem, são traduções das respectivas normas IEC. Como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Referências Normativas

Equipamento	Referência IEC	Versão ABNT	Observação
Disjuntor	IEC 62271-100:2018	NBR IEC 62271-100:2006	Versão ABNT Cancelada sem substituição
Religador	IEC 62271-111:2019	NBR IEC 62271-200:2007	-
Seccionador e Seccionalizador	IEC 62271-200:2021 IEC 62271-102:2018	NBR IEC 62271-102:2018 NBR 10860:1989	-
IED's	IEC 62255-26/27:2013 IEC 61850-1:2013	Não há	-

Para os controles dos dispositivos acima citados, 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, utilizamos a IEC 62271-111: 2019 como principal base de referência na abordagem técnica referente aos controles automáticos.

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

Para atender a esse 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 conecta os equipamentos a seus elementos de controle. Diante desses requisitos, a IEC prevê dois ensaios distintos que devem ser usados para demonstrar tal capacidade, são eles:

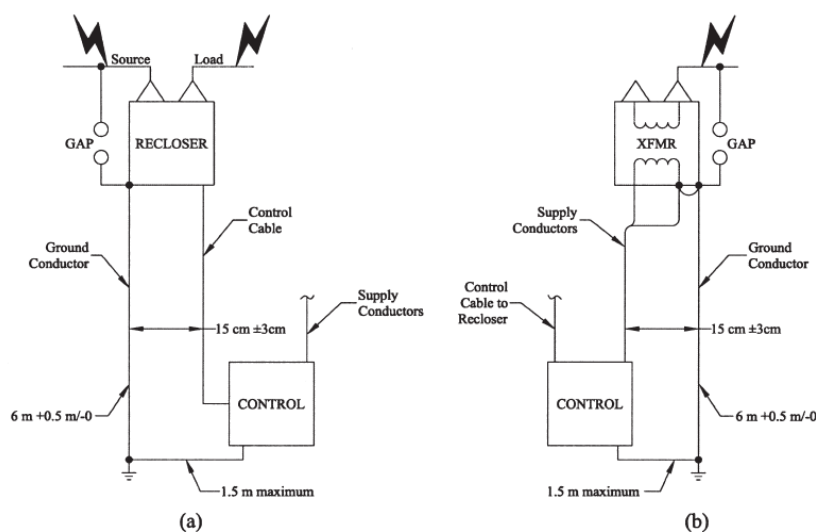
- Teste de sobretensão transitória rápida e oscilatória

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 finais 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.

Esse 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. Esse 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.

Esse 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. Uma representação desse ensaio está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de Montagem para ensaio de influências de para-raios (IEC, 2021)

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;
- 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 destacamos:

- 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. Essa 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.

- Ensaios 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. Essa norma especifica os requisitos de compatibilidade eletromagnética para relés de medição e equipamentos de proteção. Os requisitos especificados nessa 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Principais Problemas

As descargas provenientes dos para-raios de média tensão irradiam um forte impulso de campo eletromagnético e 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 necessário ou o solo possui alta resistividade, sendo um problema para o escoamento de surtos de tensão.

A alimentação CA, proveniente de redes de BT existentes, também representa uma grande fonte de problemas relacionados a QEE, pois, em diversas situações, o aterramento dos transformadores que alimentam essas 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 multiaterrado, o desequilíbrio entre fases das redes de baixa tensão e a ausência de um aterramento eficaz causam problemas em relação às cargas alimentadas por esses 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, 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, 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 aplicado à frequência industrial – efetuado 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 o IED.

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

Outro ponto a ser salientado é que alguns projetos de implementação *Self Healing* em redes de média tensão acontecem 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, mas que, 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.

3.2 Soluções Adotadas

Como possíveis ações mitigadoras para os pontos indicados, sugere-se:

- Utilização de Dispositivos de Proteção Contra Surtos – DPS na entrada de alimentação CA do cubículo, de forma a proteger fontes, inversores, filtros e demais componentes;
- 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;
 - Para as alimentações em CA, usar preferencialmente TPs dedicados;
 - Em determinadas situações específicas, avaliar a possibilidade de utilização de sistema solares como alimentação dos cubículos;
 - Controle e monitoramento de itens adquiridos e trocados em eventos de manutenção, de forma a ser possível uma avaliação de desempenho entre fornecedores distintos de componentes e das possíveis causas de falha, principalmente no caso de manutenções realizadas por terceiros;
 - Realização de estudo detalhado, através de simulações, da suportabilidade de equipamentos e materiais da rede (cabos, conexões, equipamentos, para-raios, etc.) quanto aos novos níveis de curto-circuito e capacidade de corrente, em função da reconfiguração da rede.

Na maioria das vezes, para a implementação do projeto, faz-se necessário um recondutoramento de trechos dos circuitos, por exemplo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As concessionárias buscam cada vez mais diminuir custos ou despesas com OPEX (*Operational Expenditure*), isto é, com as despesas operacionais, principalmente aquelas relacionadas à manutenção e à 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 com a tecnologia necessária e adequada para a diminuição de custos de operação e manutenção de suas redes.

O *Self Healing* representa uma excelente opção e parcela nesse sentido, inclusive gerando melhorias consideráveis nos índices de QEE e de satisfação dos clientes (FER).

A partir de 2018, nota-se que as concessionárias de energia conseguem superar as metas de qualidade (DEC e FEC) determinadas pela ANEEL, mantendo sua rentabilidade e suas saúde econômica e obtendo os devidos retornos financeiros através das respectivas revisões tarifárias periódicas.

Tomando como exemplo uma Concessionária da região Sudeste, obteve-se a marca histórica de DECs com 1 dígito, o que, sem dúvida alguma, possui relação direta em CAPEX direcionado a projetos de *Self Healing* em um primeiro momento englobando aquisição, instalação e manutenção de equipamentos dotadas de tecnologia e recursos para essa finalidade, em um segundo momento apenas na aquisição de novos equipamentos via CAPEX, e utilizando-se OPEX para a manutenção dessas redes (mão de obra e sobressalentes).

Torna-se ainda mais importante dentro desse contexto um estudo futuro, utilizando-se um estudo de caso que realize uma avaliação estatística dos principais ganhos em relação à melhoria dos indicadores de QEE de circuitos que antes eram operados de forma individualizada e, após a implementação do *Self Healing*, passaram a ser operados dentro dessa filosofia.

Deve ser levado em consideração o grau de investimento e os retornos alcançados e, em uma segunda abordagem, não menos importante, deve ser realizado um estudo estatístico em relação aos componentes sobressalentes utilizados, principalmente na manutenção dos controladores automáticos e sistemas de monitoramento e comunicação.

As normas técnicas e especificações adotadas pelas principais concessionárias devem sofrer revisões, de modo a solicitarem como requisitos obrigatórios a utilização de DPS em suas especificações de entradas CA dos cubículos de controle, pois os modelos *standard* dos principais fabricantes não possuem esses dispositivos, sendo necessário algum grau de customização.

Sugerimos que não só os DPS, mas também todos os principais tipos de componentes de comunicação estejam instalados e conectados aos cubículos durante a execução dos ensaios de tipo dielétricos e de EMI relacionados aos cubículos de controle. Sugerimos, também, estudo para implementação de ensaios que utilizem os parâmetros *Computer and Business Equipment Manufactures Association (CBEMA)* e *Information Technology Industry Council (ITIC)* para eventuais testes complementares nesse sentido.

Outra sugestão importante é quanto à 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 à aplicação e ao problema dos furtos de cobre.

À medida que a adoção de painéis solares continua a crescer significativamente, fruto da respectiva atratividade econômica em relação ao custo, estudos utilizando-se dessa tecnologia como fonte alternativa para alimentação dos cubículos de controle também vêm surgindo e devem ser avaliados através de resultados já obtidos em projetos de P&D e testes de campo.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Área de Atuação, Acesso em 30/06/2022, <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDI4ODJiODctYTUyYS00OTgxLWE4MzktMDczYTlmMDU0ODYxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9&pageName=ReportSection>.

FREITAS, F; DONADEL, C; CÓ, M; SILVA, E. “Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Radial Electrical Distribution Networks”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, n.3., 2019, p. 520-527, 2019. doi: 10.1109/TLA.2019.8863323.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC, IEC 62271-200:2021 - High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV, 2021.

MARTINS, G. F. A; ALMEIDA, A. B. “Automatic Power Restoration in Distribution Systems Modeled Through Multiagent Systems”, IEEE Latin America Transactions, vol.18, n.10, p.1768-1776, 2020. doi: 10.1109/TLA.2020.9387668

PELIELO, G; ALMEIDA, ACCÁCIO, R; MOYSÉS, R. – Smart Grid – Redes Inteligentes, Acesso em 29/06/2023, https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1/smartgrid/

RIBEIRO, R.R.M; BESSANI, M; FOGLIATTO, M.S.S; MACIEL, C.D. “Resilience Assessment of Self-healing Systems with Redundancy”, IEEE Latin America Transactions, vol.17, n.9, pp. 1546-1551, 2019. doi: 10.1109/TLA.2019.8931189.

Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:

MORAES, E. R; PORTO, K. C; FORTES, M. Z; HENRIQUES, H. O. Lições aprendidas com o “Self-Healing”. *Rev. FSA*, Teresina, v. 20, n. 10, art. 8, p. 155-174, out. 2023.

Contribuição dos Autores	E. R. Moraes	K. C. Porto	M. Z. Fortes	H. O. Henriques
1) concepção e planejamento.	X	X	X	
2) análise e interpretação dos dados.	X	X	X	
3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo.			X	X
4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.			X	X