



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ISAMARA QUIRINO DE CASTRO CARLOS
JESSICA FELICIANO BRINGEL**

**ANÁLISE DA EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DE *SELF HEALING* EM
RELIGADORES URBANOS**

**Palmas – TO
2020**

**ISAMARA QUIRINO DE CASTRO CARLOS
JESSICA FELICIANO BRINGEL**

**ANÁLISE DA EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DE *SELF HEALING* EM
RELIGADORES URBANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Valci Ferreira Victor

**Palmas – TO
2020**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

C284a Carlos, Isamara Quirino de Castro
Análise da eficácia na utilização de self healing em religadores
urbanos / Isamara Quirino de Castro Carlos, Jessica Feliciano
Bringel. – Palmas, TO, 2020.
68 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2020.

Orientador: Dr. Valci Ferreira Victor

1. Auto recomposição. 2. Redes de distribuição. 3. Rede
inteligente. I. Bringel, Jessica Feliciano. II. Victor, Valci Ferreira III. , .
IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

**ISAMARA QUIRINO DE CASTRO CARLOS
JESSICA FELICIANO BRINGEL**

**ANÁLISE DA EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DE *SELF-HEALING* EM
RELIGADORES URBANOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como cumprimento às exigências legais do currículo do curso de Engenharia Elétrica pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus Palmas*.

Aprovado em 31 de Agosto de 2020.

Banca Avaliadora:

Prof. Dr. Valci Ferreira Victor
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Márcio Augusto Tamashiro
Membro da Banca Avaliadora

Eng. Eletricista Irley Castelo Branco
Membro da Banca Avaliadora

RESUMO

O termo *smart grid* surgiu da necessidade de operar as redes de energia elétrica de forma autônoma e inteligente, o que demandou anos de tentativas para obter resultados satisfatórios. Uma das técnicas aplicadas que envolvem essa área de estudo é denominada auto recomposição de energia ou simplesmente *self healing*. Voltada para distribuição de energia elétrica, a técnica citada utiliza a comunicação entre religadores, podendo ou não estarem integrados a um sistema de supervisão. Envolve um algoritmo de cálculo de sequências de manobras que respeitem os limites operacionais da rede e busquem restabelecer a maior carga possível através do menor número de manobras. Alinhado com esta proposta, este trabalho tem por finalidade apresentar a análise da eficácia de operação de um sistema *self healing* projetado para recomposição das redes de distribuição urbanas operadas pela empresa Energisa Tocantins Distribuidora de Energia S.A – Energisa no estado do Tocantins. A análise apresentará uma explanação detalha dos componentes do sistema e suas particularidades. Relatórios de operação e de simulações da operação gerados pelo próprio sistema serão avaliados, bem como características da rede elétrica e de comunicação, como topologia, operação, entre outros, com o objetivo de verificar a performance do sistema. Os resultados apresentados para o objeto de estudo neste trabalho mostram o comportamento do sistema de distribuição urbano que utiliza *self healing*, e todas as condições necessárias para um melhor desempenho diante da configuração utilizada. Os dados para o sistema avaliado mostraram que a implementação de redes de distribuição que contam com o sistema *self healing*, possibilita a operação de forma rápida e segura, contribuindo para diminuir os índices de frequência de falta e duração da falta, proporcionando entrega de energia com qualidade que satisfaça a expectativa do consumidor final. Conclui-se que às características do sistema e qualidade da operação são críticos para a obtenção de melhores resultados e no caso particular do sistema avaliado uma melhor performance pode ser atingida. Em conclusão, a partir dos resultados obtidos a proposta deste trabalho foi atingida.

Palavras-chave: Auto recomposição, eficácia, redes de distribuição, rede inteligente.

ABSTRACT

The term smart grid was created from the need for operate electric power networks to become autonomously and smarter, which took years of trying to get satisfactory results. One of the applied techniques that involve this study area is called self recomposition of energy, or simply, self-healing. Focused on distribution, making use of the communication between reclosers, which may or not be integrated into a supervisory system. Involving an algorithm for calculating sequences of handlings that respect the operational limits of the network, seeking to restore the highest possible load through the least number of handlings. This work aims to present the analysis of a self healing system designed to recompose the urban distribution networks operated by the company Energisa Tocantins Distribuidora de Energia S.A – Energisa in the state of Tocantins. The analysis will composing a detailed explanation of the system components and their particularities. Operation reports and operation simulations generated by the system itself will be evaluated, as well as characteristics of the electrical and communication network, such as topology, operation, among others, in order to verify the performance of the system. The results presented for the object of study in this work show the behavior of the urban distribution system that uses self healing, and all the conditions necessary for a better performance in view of the configuration used. The data for the evaluated system showed that the implementation of distribution networks that rely on the self healing system, makes it possible to operate fast and safely, contributing to reduce the frequency of failure and duration of the failure, enabling the delivery of energy with quality and which shall meet the expectations of the end user. It is concluded that the characteristics of the system and the quality of the operation are critical to obtain better results and in the particular case of the evaluated system a better performance can be achieved. In conclusion, from the results obtained the proposal of this work was reached.

Key words: Self healing, efficiency, distribution networks, smart grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Histórico de DEC e FEC da Energisa Tocantins.	17
Figura 2: Parque Instalado de Religadores da Energisa Tocantins.....	17
Figura 3: Tela de Supervisão de um Sistema de Distribuição Genérico.	19
Figura 4. Representação do SEP na Modelagem Elétrica.	27
Figura 5- Sinalização de Equipamento Indisponível.....	30
Figura 6 - Monitoramento da Disponibilidade da Comunicação.	32
Figura 7 – Total Geral do Diagnóstico de Eventos.....	36
Figura 8 – Diagnóstico dos Eventos de Simulações.	37
Figura 9: Tela da SE Paraíso I no supervisório SCADA.....	38
Figura 10: Diagnóstico dos Eventos da Simulação.	39
Figura 11: Tela de Análise de Estatística do Self Healing no supervisório SCADA. .	40
Figura 12: Tela de Simulação de Análise de Estatística do <i>Self Healing</i> no Supervisório SCADA.	41
Figura 13: Tela de Anéis Detectados da Análise de Estatística do <i>Self Healing</i> no supervisório SCADA.....	41
Figura 14: Tela de Estado das Chaves na Análise de Estatística do <i>Self Healing</i> no Supervisório SCADA.	41
Figura 15. Tela do Supervisório que representa a RDU de Palmas antes da ocorrência.	44
Figura 16. Representação dos Equipamentos envolvidos antes da ocorrência.	44
Figura 17: Tela de Controle do <i>Self Healing</i>	45
Figura 18: Estrutura do Religador 7905362122 após a ocorrência.	46
Figura 19: Tela do Supervisório que representa a parte afetada da RDU de Palmas após a ocorrência.....	47
Figura 20: Representação dos Equipamentos envolvidos após a ocorrência.	47
Figura 21: Danos na Estrutura do Religador 7905362122 após a ocorrência.....	48
Figura 22: Tela Exemplo de Indisponibilidade de Religadores no Supervisório SCADA.	49
Figura 23 - Tela da RDU Palmas (SE Palmas 2 e SE Palmas 4).....	63
Figura 24 - Tela da RDU Palmas (SE Palmas 3 interligação com SE Palmas 2 e SE Palmas 4).	64

Figura 25 - Tela da RDU Taquaralto (SE Taquaralto 2 interligação com SE Palmas 3).	65
Figura 26 - Tela da RDU Porto Nacional.....	66
Figura 27 - Tela da RDU Paraíso (SE Paraíso 1 interligação com SE Luzimangues).	67
Figura 28 - Tela RDU Miracema.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre Arquiteturas de Controle para Sistemas de Self Healing	21
Tabela 2: Características Físico-Elétricas dos Condutores de Alumínio com Alma de Aço	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADMS	<i>Advanced Distribution Management System</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BT	Baixa Tensão
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DGA	<i>Distribution Grid Area</i>
DGC	Desempenho Global de Continuidade
DMS	<i>Distribution Management Systems</i>
DRC	Duração Relativa Da Transgressão De Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa Da Transgressão De Tensão Precária
EMS	<i>Energy Management System</i>
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRID	Rede
IDU	<i>Unit Indoor</i>
IED	Dispositivos Eletrônico Inteligente
MT	Média Tensão
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
ODU	<i>Outdoor Unit</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PU	Por Unidade
RD	Rede de Distribuição
RDU	Rede de Distribuição Urbana
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SE	Subestação
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TIE	Transferência

UFT Universidade Federal do Tocantins
UHF *Ultra High Frequency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
2. SELF HEALING	15
2.1 QUALIDADE DE ENERGIA	15
2.2 SISTEMAS DE <i>SELF HEALING</i>	18
2.3 TIPOS DE CONTROLE	19
2.3.1 Premissas para funcionamento	22
2.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA NO BRASIL	23
2.4.1 Projetos de <i>Smart Grids</i> com enfoque em <i>Self Healing</i> Implantados no Brasil	23
2.4.2 Perspectiva de futuro.....	25
2.5 IMPLANTAÇÃO DO PROJETO <i>SELF HEALING</i> NO TOCANTINS	25
2.5.1 Área de Implantação do Projeto no Tocantins.....	25
2.5.2 Sistema de Controle Utilizado	26
2.5.2.1 Pré-requisitos do Sistema	27
2.5.2.2 Atuação por <i>lockout</i> em equipamento de proteção (<i>Restoration Trigger</i>)	28
2.5.2.3 Atuação por Sobrecarga	28
2.5.2.4 Atuação por Desenergização da Barra	29
2.5.2.5 Disponibilidade dos Equipamentos	29
2.5.3 Comunicação Utilizada.....	31
2.5.4 Adequações do Projeto	32
2.5.5 Comissionamento.....	32
3. ANÁLISE DA EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DE <i>SELF HEALING</i> EM RELIGADORES URBANOS	34

3.1	ANÁLISE DA AMOSTRA DO BANCO DE DADOS DE SIMULAÇÃO DO <i>SELF HEALING</i>	34
3.1.1	Particularidades da RDU Paraíso.....	37
3.1.2	Demais localidades	38
3.2	TELA DE ANÁLISE DE ESTATÍSTICAS DO <i>SELF HEALING</i>	40
3.3	CORRENTE DE CARGA NOS TRECHOS DE MANOBRA	42
3.4	ATUALIZAÇÃO DA TOPOLOGIA DA REDE NO MÓDULO	43
3.5	EXEMPLO DE OCORRÊNCIA COM ATUAÇÃO DO MÓDULO	43
3.6	INDISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS	48
3.7	POSSIBILIDADES DE MELHORIA DA FERRAMENTA	49
3.8	LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA.....	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	GLOSSÁRIO	57
	ANEXO	63

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia elétrica tem proporcionado melhor qualidade de vida à sociedade e ampliado o progresso e o desenvolvimento social. Este resultado está diretamente relacionado a um fornecimento de energia que seja constante e com poucas falhas. O desenvolvimento do setor elétrico contribui para o fornecimento de energia pautado em parâmetros de qualidade exigidos por consumidores, e fiscalizados por agente regulador que determina condições a serem cumpridas por empresas concessionárias para geração, transporte e distribuição da energia elétrica. Assim a matriz energética acompanha o crescimento ascendente das cidades e das indústrias para garantir o fornecimento com qualidade. (LEÃO, 2009).

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto pelo conjunto de equipamentos destinados para geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. O SEP no Brasil tem as linhas de transmissão interligadas, permitindo que a energia elétrica gerada por fontes distribuídas ao longo do território nacional possa ser disponibilizada para consumo por usuários localizados em qualquer parte do país. Isto é possível graças ao Sistema Interligado Nacional (SIN) que conecta o mercado de energia elétrica, da geração até distribuição.

O transporte é realizado pelas linhas de transmissão que formam a rede básica e tem como responsável o Operador Nacional do Sistema (ONS). O elemento primordial que divide a rede básica e o sistema de distribuição são as subestações de distribuição. Este é o ponto onde o sistema de distribuição se subdivide em função da tensão de operação, com rede de alimentação primária em Média Tensão (MT), seja urbana, rural ou industrial e rede de alimentação secundária em Baixa Tensão (BT) (ANEEL, 2015).

Todo o gerenciamento do fornecimento de energia aos centros urbanos, áreas rurais e indústrias é realizado pelo Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), que são administrados por concessionárias que detêm a concessão sobre uma determinada região geográfica. O SDEE basicamente é composto pelas Subestações (SE's), Redes de Distribuição (RD's), equipamentos de proteção, reguladores de tensão, transformadores e equipamentos de manobra. As concessionárias adotam a RD aérea como principal meio de distribuir energia até o

consumidor, ficando ela exposta a agentes externos que comprometem a qualidade do fornecimento por estarem sujeitas a acidentes automobilísticos, fenômenos naturais, vandalismo e queda de árvores, entre outros, que causam grandes interrupções e acarretam prejuízos aos clientes e à concessionária (ANEEL, 2015).

Nas RD's tradicionais se observa um nível de automação baixo e pouco eficaz em comparação com os sistemas de geração e transmissão, sendo limitado a religadores automáticos para recompor o sistema nas ocorrências de faltas transitórias. Com o aumento do controle dos índices sobre tempo de falta e a periodicidade da falta, tanto pelo órgão regulador como dos clientes e agregado ao custo operacional em relação à mão de obra, as concessionárias têm buscado novas tecnologias para suprir estes fatores. As tecnologias agregadas aos equipamentos vêm diminuindo o tempo de recomposição, além de melhorar na qualidade dos serviços, e redução no intervalo de falta em todo ou parte do circuito alimentador, e o número de consumidores afetados pela falta de energia elétrica (ANEEL, 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável pela regulamentação e fiscalização das atividades das concessionárias de energia elétrica. Ela controla e fiscaliza a qualidade dos serviços prestados por meio dos indicadores de continuidade e de conformidade de distribuição de energia elétrica das concessões e sanciona as concessionárias por meio de compensação financeira, o que impulsiona as empresas a investir na melhoria contínua das redes de distribuição (ANEEL, 2015).

Portanto, as concessionárias têm investido na automação das redes de distribuição, desenvolvendo sistemas integrados, mecanismos para melhoria dos indicadores de continuidade e conformidade, e assim possibilita a maximização da eficiência operacional das redes de distribuição. Neste contexto este trabalho propõe-se a realizar a análise da eficácia na utilização de *self healing* em religadores urbanos na automação de redes de distribuição de energia elétrica no Estado do Tocantins.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para um sistema de *self healing* estar em funcionamento completo necessita de investimento na infraestrutura da rede física, no caso a instalação de religadores em nós estratégicos da rede, substituição de chaves fusíveis por religadores, além da infraestrutura telecomunicação e aquisição de softwares necessários para execução da ferramenta.

Em conformidade com todo esse investimento, espera-se um retorno positivo tanto na melhoria dos indicadores de continuidade, como na garantia de desempenho do algoritmo vinculado. Para isso, faz-se necessário este estudo de análise da eficácia do *self healing* em religadores.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho será aberto aos estudos da tecnologia de *self healing* para redução de perdas do sistema elétrico com vistas para a infraestrutura local, no caso, o estado do Tocantins com a finalidade de analisar dados operativos desde o início da integração dessa funcionalidade a operação do sistema.

O objetivo deste trabalho é realizar análise funcional quanto à utilização do *self healing* e seus impactos tanto no sistema elétrico como no decréscimo dos indicadores de continuidade da distribuidora de energia elétrica Energisa Tocantins. Além disso, apresentar as limitações e possibilidades de melhoria de acordo com a aplicação local.

2. SELF HEALING

O estudo sobre *self healing* tem considerável relevância em diversas áreas de conhecimento, com eficácia no reestabelecimento do fornecimento de energia para maior parte das cargas afetadas, retorno ao modo de operação normal do sistema em um curto período de tempo e a redução de custos operacionais relacionados ao tempo de deslocamento e execução da recomposição com hora-homem (AMIN e SCHEWE, 2008), conseqüentemente a ação do reestabelecimento automático do fornecimento de energia produz melhoria em índices de qualidade de energia como os que serão abordados no final da seção 2.1.

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA

O conceito de qualidade de energia varia bastante conforme o referencial de quem o discute. Ao ponderar o sistema de distribuição de energia, uma definição ampla e completa seria considerar como qualquer perturbação que venha ocorrer nas variáveis elétricas, ou seja, na tensão, na corrente ou na variação de frequência que possam resultar em falhas ou se tornar prejudicial para operação dos equipamentos (DUGAN, 1996).

No Brasil a qualidade de energia é controlada pelas concessionárias e para isto são levados em consideração os índices que tratam sobre a qualidade no serviço e do produto. A qualidade do serviço está relacionada à continuidade no fornecimento de energia, já a qualidade do produto está associada à conformidade da tensão em regime permanente e a ausência de perturbações na forma de onda.

Os indicadores coletivos de continuidade apurados pelas concessionárias e fiscalizados pela ANEEL são: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). A partir do DEC e FEC as concessionárias buscam melhorias que impactem positivamente nos resultados desses indicadores.

Os indicadores de tensão em regime permanente são DRP (duração relativa da transgressão de tensão precária) e DRC (duração relativa da transgressão de tensão crítica), que expressam o percentual do tempo no qual a unidade consumidora permaneceu com tensão precária e com tensão crítica. Os limites estabelecidos pela

ANEEL para os indicadores de tensão em regime permanente são 3% para o DRP e 0,5% para o DRC (ANEEL, 2016).

A variação de tensão, que impacta o indicador de qualidade do produto, geralmente é causada pela distância da fonte até a carga devido ao aumento da impedância. Esse problema é comumente sanado pelos reguladores de tensão, até que o próprio sistema cresça a ponto de possuir mais fontes e reduzir o tamanho dos ramais.

Já os indicadores de continuidade são impactados pelas interrupções no sistema, podendo ser ocasionados por faltas transitórias ou permanentes. As faltas transitórias são aquelas em que a operação de um equipamento de proteção elimina o defeito e o circuito volta a operar normalmente depois de religado. As faltas permanentes são aquelas em que é necessária a intervenção do homem para que se corrija o defeito causador da interrupção antes de se religar o equipamento operado. Segundo a CPFL, cerca de 80% das faltas que ocorrem nas redes de distribuição são faltas transitórias. As causas mais comuns de defeitos transitórios são: descargas atmosféricas, contatos momentâneos entre condutores, vegetação na rede, e materiais sem isolamento adequada (CPFL, 2016).

O Módulo 8 do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico, que são documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2017), estabelece que para cargas restabelecidas em tempo inferior a três minutos, não entram nos cálculos dos índices de continuidade.

Por esse motivo o uso de religadores na distribuição melhoram gradativamente os indicadores de qualidade de serviço. A Figura 1 mostra o histórico de DEC e FEC na gestão da Energisa Tocantins, em paralelo a Figura 2 mostra o parque instalado de religadores no mesmo período. Observa-se pela análise das duas figuras que o melhoramento dos dois índices ocorre ao mesmo tempo que o número de religadores cresce no sistema, leva-se também em consideração os investimentos em manutenção preventiva da rede.

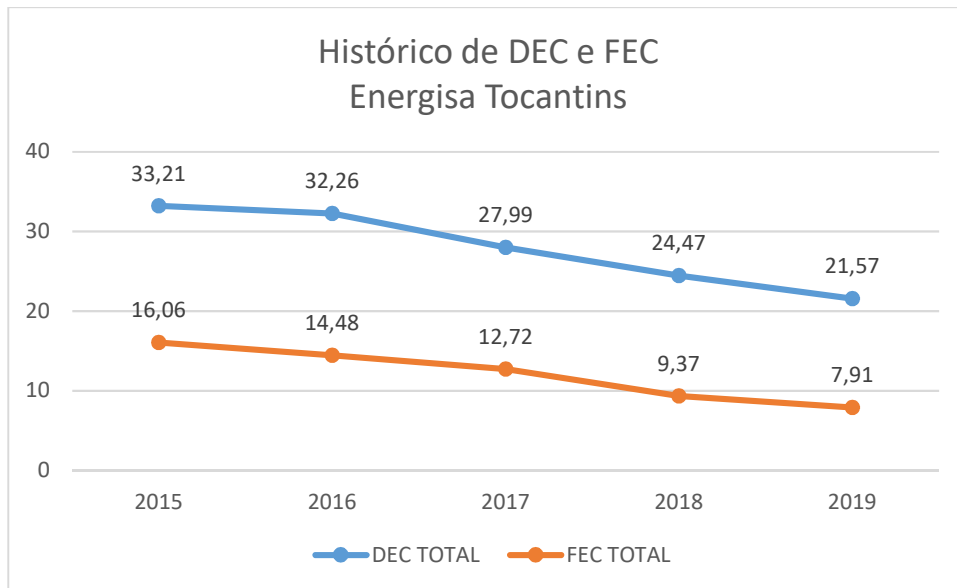


Figura 1: Histórico de DEC e FEC da Energisa Tocantins.
Fonte: Energisa Tocantins.

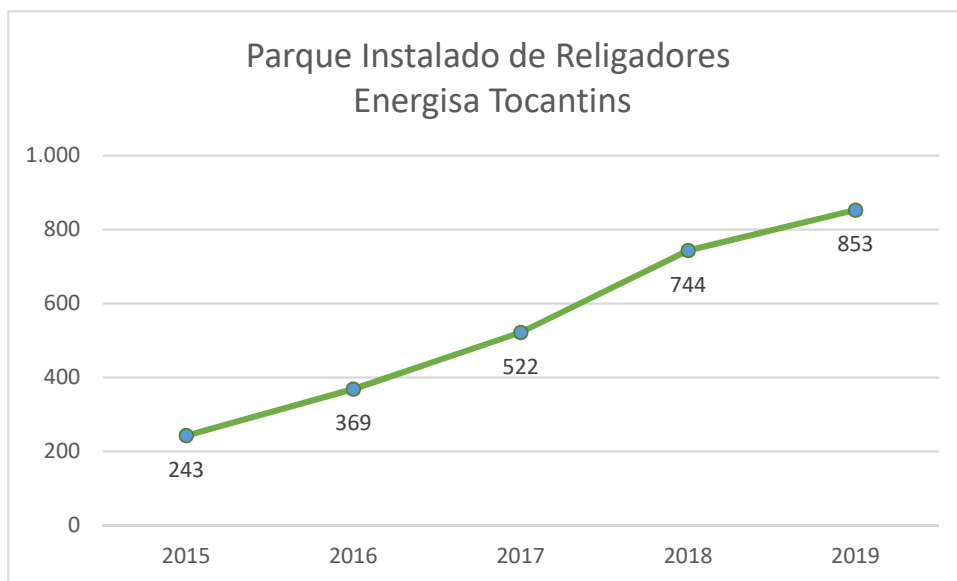


Figura 2: Parque Instalado de Religadores da Energisa Tocantins.
Fonte: Energisa Tocantins.

Portanto, para faltas transitórias o religador é efetivo na recomposição do sistema sem afetar os indicadores de continuidade. Para faltas permanentes, o uso do *self healing* pode diminuir o impacto no DEC e FEC reduzindo a quantidade de consumidores afetados ao isolar o menor trecho falho até a intervenção humana para correção do defeito. Este estudo se propõe a realizar a análise da eficácia de utilização da técnica de reconfiguração automática de redes de distribuição utilizando religadores automáticos.

2.2 SISTEMAS DE SELF HEALING

A melhoria da eficiência operacional e dos indicadores de continuidade, viabilizada pelos investimentos em automação de equipamentos de manobra na rede de média tensão, fez com que o número desses dispositivos crescesse significativamente nas distribuidoras de energia elétrica nos últimos anos. Tal aumento tem possibilitado realizar um grande conjunto de ações de controle em segundos, logo, dispensa deslocamento das equipes de campo, uma vez que tudo pode ser efetuado via o próprio centro de operação em tempo real (ELIPSE, 2020).

O módulo de *self healing* utiliza algoritmos como os de Fluxo de Potência e Processamento Topológico para identificar o melhor conjunto de manobras a ser realizado remotamente, e tem por prioridade restabelecer a maior carga possível de forma segura e estável. A sequência de atuação do seu sistema é iniciada mediante a detecção de qualquer evento de restabelecimento ou sobrecarga nos equipamentos de campo. Uma vez detectado o evento, o módulo pesquisa sequências de manobras que respeitem os limites operacionais da rede, e busca restabelecer a maior carga possível através do menor número de manobras, tais ações resultam na simplificação da operação e evita a degradação dos ativos.

Tão logo é identificada a manobra a ser executada, o módulo realiza a adequação do grupo de ajuste de proteção de cada equipamento para então realizar os comandos de abertura e fechamento nos equipamentos selecionados. O módulo faz diversas verificações para assegurar a qualidade das informações consideradas. No caso de haver inconsistências no estado atual ou pré-falta da rede de distribuição, o tratamento é abortado.

Nos sistemas de *self healing* os pontos de manobra podem ser subdivididos em dois tipos de elementos: *Grid* (rede) e *Tie* (transferência). Os elementos *Grid* se encontram no caminho do alimentador ou nas saídas das subestações e têm o estado normalmente fechado. Já os elementos *Tie* se encontram na conexão entre dois circuitos de uma mesma ou diferentes subestações e têm o estado normalmente aberto. Para a concepção dos sistemas de *self healing* é necessário, ao menos, a abertura de um elemento *Grid* e o fechamento de um elemento *Tie* envolvendo dois circuitos distintos não obrigatoriamente da mesma SE (VAZ, 2017).

A Figura 3 ilustra um sistema de distribuição genérico para demonstração de um exemplo onde se tem duas SE's como fonte de suprimento e diversos religadores nas quais os elementos *grid* são vermelhos, componentes normalmente fechados (NF), e os *Tie* estão em verde e são normalmente abertos (NA), utilizados caso necessitar transferência de carga, alimentação reversa, etc.

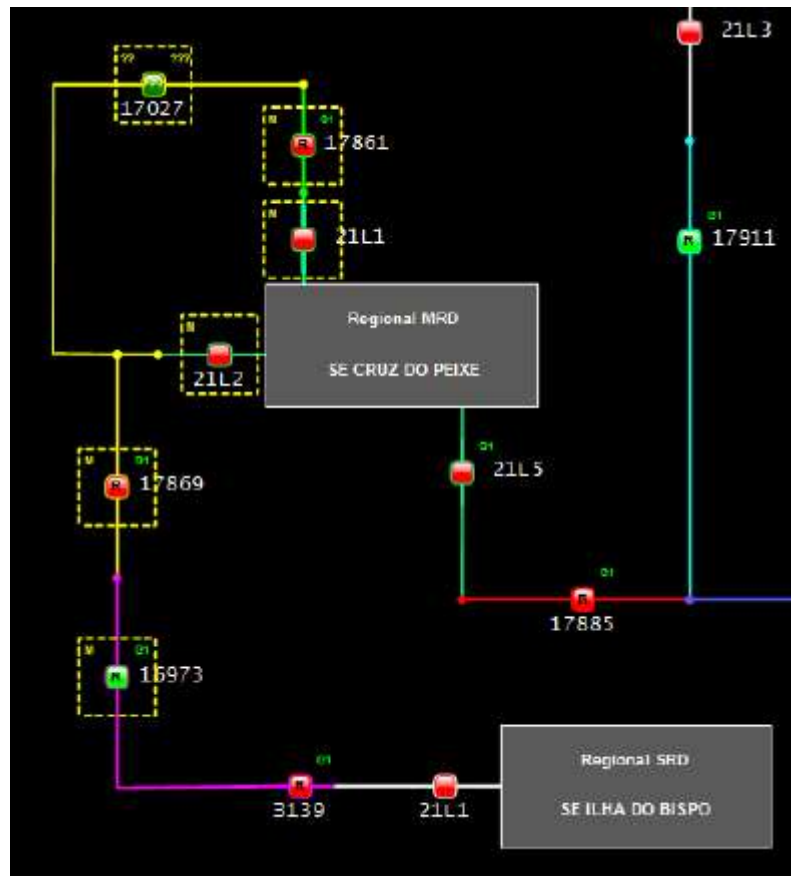


Figura 3: Tela de Supervisão de um Sistema de Distribuição Genérico.
Fonte: Elipse Software, 2019

2.3 TIPOS DE CONTROLE

A decisão sobre o controle dos sistemas de *self healing* pode ser feita de três maneiras (SOUZA et al., 2015):

- *Self healing* distribuído: nesse caso, a lógica de recomposição é alocada nos controladores dos religadores espalhados pela rede de distribuição;
- *Self healing* semi-centralizado: a lógica de recomposição do sistema elétrico fica alocada no servidor de *self healing*, que pode ser instalado na subestação de energia da região.

- *Self healing* centralizado: sistema que reside no Centro de Controle regional da empresa de distribuição de energia elétrica.

A seguir são listadas algumas características que diferem cada tipo de controle dos modelos de *self healing* (BERNARDO A., 2011); (MOREIRA, 2011).

➤ Distribuído

- Dissemina toda a inteligência pelos equipamentos telecomandados, espalhados pela rede;
- Elevada eficiência com baixo número de equipamentos comunicantes;
- Dada a sua reduzida área de atuação não considera a Geração Distribuída;
- Como desvantagem em relação à solução Centralizada, não consegue lidar com múltiplas falhas simultâneas.

➤ Semi centralizado

- Dissemina a inteligência pelas subestações, criando áreas de controle limitadas (DGA - *Distribution Grid Area*);
- Necessita de redes de comunicação locais, entre subestação e equipamentos dentro da sua DGA;
- Permite a redução das perdas na rede;
- Considera a integração de Geração Distribuída na rede;
- Controle pode ser implementado tanto na subestação como pelo centro de comando.

➤ Centralizado

- Inteligência concentrada no Centro de Comando, em sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*)/ DMS (*Distribution Management Systems*);
- Informação topológica de toda a rede;
- Permite o processo de minimização de perdas na rede de forma mais eficaz que os outros modelos;
- Consegue lidar com múltiplas falhas simultâneas;
- É dos três modelos aquele com maior dependência em redes de comunicação.

A Tabela 1 mostra um comparativo quanto aos tipos de implantação do sistema de controle do *self healing*.

Tabela 1: Comparação entre Arquiteturas de Controle para Sistemas de *Self Healing*

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

Pode operar como Gateway do sistema de automação da Subestação na região do <i>Self healing</i>	Não	Sim	Não
---	-----	-----	-----

Fonte: Reproduzida de (SOUZA et al., 2015).

2.3.1 Premissas para funcionamento

Para um funcionamento pleno do *self healing* há de se estabelecer as condições para alocação dos religadores nos alimentadores que tornem possível e segura a transferência de carga em caso de um defeito na rede de distribuição. Um dos pontos de observância para a definição do projeto é o total de carga a ser transferido em uma situação de contingência. Outro ponto de atenção do posicionamento dos religadores reside na coordenação da proteção.

O fluxo de potência resulta na informação da magnitude e ângulo da tensão em cada barra. A operação de um sistema é considerada adequada quando os níveis de tensão permanecem dentro de determinadas faixas. No Módulo 8 do PRODIST, a ANEEL estabelece que valores de tensão de atendimento adequados para sistemas de distribuição devem estar entre 0,95 pu e 1,05 pu (ANEEL, 2010).

Existe uma técnica em sistemas de controle que consiste em agrupar nós de forma que trabalhem em conjunto a fim de conceber um sistema robusto, essa técnica é chama de clusterização. Existem *clusters* para gerenciar e balancear grandes volumes de carga, eles necessitam ter alta disponibilidade para que estejam em disposição de uso em condições de contingência. São utilizados em técnicas de recomposição da distribuição (VAZ, 2017).

Uma vez definidos os *clusters* que farão parte do sistema de *self healing* é primordial que os religadores que os compõem estejam coordenados entre si. A coordenação deve ser respeitada tanto do regime normal de operação quanto de uma situação de manobra. No caso da ocorrência de uma anomalia o equipamento de proteção mais próximo do local de ocorrência deverá atuar para evitar que os demais circuitos que compõem o sistema elétrico de distribuição sejam desativados.

As funções de proteção *ANSI* mais utilizadas nos sistemas de distribuição das concessionárias são as listadas a seguir.

- 27 – Relé de Subtensão
- 50 – Relé de Sobrecorrente Instantâneo
- 50N – Relé de Sobrecorrente Instantâneo de Neutro
- 51 – Relé de Sobrecorrente Temporizado em CA
- 51N - Relé de Sobrecorrente Temporizado de Neutro em CA
- 59 – Relé de Sobretensão
- 79 – Relé de Religamento em CA
- *Cold Load* (Carga Fria)

2.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA NO BRASIL

Dentro do contexto dos sistemas de distribuição de energia elétrica diversas melhorias e inovações tecnológicas têm sido propostas nos últimos anos. O sistema de *self healing* trata de uma solução de *smart grid* que executa uma auto recuperação dinâmica das redes de distribuição, que integra dados da rede elétrica em tempo real para detectar possíveis distúrbios, e pode assim comandar a recuperação automática ao isolar os trechos de linha onde é verificado o distúrbio, e conseqüentemente o impacto nos consumidores (HOKAMA e HELEBRANDO, 2016).

No Brasil existem diversos projetos de *smart grid*, voltado para recomposição das redes de distribuição, implantados por diversas concessionárias. Alguns projetos são descritos no tópico a seguir.

2.4.1 Projetos de *Smart Grids* com enfoque em *Self Healing* Implantados no Brasil

Em 2016, a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) realizou um estudo de caso sobre a implantação de um sistema de reconfiguração automática de aplicação universal. Primeiramente a implantação se restringiu à cidade de Campinas, para então ser expandida para demais cidades do interior do estado de São Paulo. Para validar os resultados, a companhia avaliou aspectos do sistema de reconfiguração automática como: econômico, facilidade de operação e manutenção, integração com outros sistemas existentes, e principalmente, a melhoria dos índices DEC e FEC (HOKAMA e HELEBRANDO, 2016).

A distribuidora de energia ELEKTRO iniciou a implantação de técnicas de *self healing*, sistemas de recomposição automática de rede, em 2011. Este trabalho tem um enfoque maior no município de Guarujá que conta com um parque de 43 religadores, com relés controladores que usam GPRS para se comunicar com o COD e fibra óptica. Nesta área havia uma quantidade grande de manobras possíveis de serem realizadas e a necessidade da implantação de *self healing* para integrar todos os equipamentos (ROVER et al., 2016).

A tecnologia empregada pela Copel Distribuição S.A. vem associando relés e algoritmos que através dos eventos armazenados fazem uma análise e isolam o menor trecho possível onde se encontra o defeito e recompõe o sistema. Por meio de um sistema supervisorio que conduz as ações do *self healing* em conjunto de dispositivos de chaveamento e um sistema de proteção autônoma, acontece um remanejamento da carga, ou seja, ocorre a interligação com outro alimentador da mesma subestação ou até do próprio alimentador, mas em um traçado diferente ficando aberta somente a parte do defeito (BASSO e KLOOS, 2017).

A Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) realizou um projeto piloto de recomposição automática dos alimentadores sem a dependência de meios de comunicação. Esta solução foi nomeada de Religador Híbrido, ela possibilita habilitar o religador de forma independente para as funções de proteção que necessitam margem de tempo para coordenação, e habilita a função de chave seccionadora para as funções de proteção que não precisam coordenar com o religador à montante. A aplicação utiliza da base de religadores já instalada e em operação, portanto é bem mais econômica. (DA SILVA, MOREIRA, et al., 2016).

A CEMAR (Companhia Energética do Maranhão), desde 2014 vem utilizando o sistema centralizado de *self healing* da Elipse *Software* em parceria com a *PowerSysLab*. O módulo *self healing* foi implementado nos equipamentos localizados na cidade de São Luís (MA), em uma região urbana com 81 (oitenta e um) alimentadores e 100 (cem) religadores. Em fevereiro de 2015 a tecnologia permitiu recuperar, em apenas 10 segundos, 9.463 (nove mil, quatrocentos e sessenta e três) clientes de um total de 9.756 (nove mil, setecentos e cinquenta e seis) atingidos por uma queda de energia na rede de distribuição de São Luís (MA).

2.4.2 Perspectiva de futuro

As técnicas de *smart grid*, quando desenvolvidas precisamente, fornecem melhorias significativas para a concessionária, desde redução homem-hora para manobras e restabelecimento de continuidade da energia. Ou seja, ao proporcionar maior confiabilidade, segurança, disponibilidade e manobras mais efetivas, os ganhos refletem na comunidade e para a empresa.

Como as distribuidoras são auditadas pelos índices estabelecidos pela ANEEL, e recebem pela tarifa aplicada de forma trienal aos consumidores com base nos investimentos feitos no período, as empresas têm pretensão de desenvolver e expandir aplicações que gerem melhoria dos seus indicadores. As técnicas e dispositivos de recomposição serão aperfeiçoados com o tempo a partir da expansão e lições aprendidas com os projetos piloto.

2.5 IMPLANTAÇÃO DO PROJETO *SELF HEALING* NO TOCANTINS

A consolidação de sistemas para a recomposição automática, bem como a melhoria da qualidade e confiabilidade dos meios de comunicação têm estimulado as concessionárias a buscarem novas soluções, para assim tornarem-se mais eficientes e competitivas. Nesta conjuntura, em dezembro de 2018 foi concluída a fase final do projeto de implementação da ferramenta de *self healing* na concessionária de energia elétrica no estado do Tocantins, Energisa Tocantins Distribuidora de Energia S/A.

2.5.1 Área de Implantação do Projeto no Tocantins

No ranking de continuidade do fornecimento de energia elétrica da ANEEL de 2019, foi divulgado que os indicadores alcançaram os melhores níveis históricos, contando com disponibilidade média do serviço em 99,85%. O Desempenho Global de Continuidade (DGC) leva em conta a duração e a frequência das interrupções em relação ao limite estabelecido pela ANEEL.

A Energisa Tocantins é uma concessionária de grande porte, responsável pela distribuição de energia no estado do Tocantins desde julho de 2018. Atualmente a concessionária conta com aproximadamente 600 mil clientes ativos e ficou em 5º lugar no ranking de DGC entre as concessionárias de grande porte do Brasil em 2019 (ANEEL, 2020).

Até o primeiro semestre de 2020, o sistema de distribuição da Energisa Tocantins dispõe de 137 (cento e trinta e sete) equipamentos trabalhando com *self healing* distribuídos nos centros urbanos do estado. A expectativa da concessionária é que até o final de 2020 tenha 200 (duzentos) equipamentos com suporte da ferramenta de auto recomposição operando no sistema. As cidades que possuem religadores com *self healing* são Palmas, Miracema, Paraíso e Porto Nacional. Araguaína está em fase de testes para implantação com a entrada de 60 (sessenta) elementos com função de auto recomposição.

A Concessionária de Energia de Minas Gerais – CEMIG utilizou o projeto da Energisa Tocantins como modelo para implantação de um sistema de *self healing* centralizado Elipse *Power* que conta com 1000 (mil) religadores novos abrangendo Belo Horizonte e região, conhecida como grande BH.

2.5.2 Sistema de Controle Utilizado

Após estudo das ferramentas disponibilizadas no mercado, custos de implantação e versatilidade, a solução apresentada pela empresa Elipse *Software* foi escolhida por mais se aproximar às necessidades da concessionária naquele momento. A Elipse *Software* é uma empresa consolidada no desenvolvimento de ferramentas computacionais voltadas à criação de sistemas industriais e de gerenciamento de energia desde a sua fundação em 1986. (ELIPSE SOFTWARE, 2015).

O módulo *self healing* utilizado é o sistema centralizado desenvolvido pela Elipse *Software*. O Elipse *Power* é um *software* que oferece um ambiente integrado de comunicação, modelagem e análise, constituindo um moderno sistema EMS (*Energy Management System*) / ADMS (*Advanced Distribution Management System*), com aplicação em centros de operação para geração, transmissão, distribuição e grandes plantas industriais.

Com sua arquitetura integrada, o Elipse *Power* permite fácil acesso a todas as informações necessárias para o processo de operação de redes de energia, proporcionando a melhor solução para o aumento da eficiência e redução de custos operacionais. O *software* é responsável por monitorar em tempo real as condições de operação de uma grande rede de distribuição que, ao detectar uma falha, é capaz de

isolar e restabelecer trechos saudáveis de forma rápida, segura, estável e automática (ELIPSE SOFTWARE, 2015).

2.5.2.1 Pré-requisitos do Sistema

Para o funcionamento da ferramenta é necessário o levantamento da modelagem elétrica. A modelagem é criada através do CAD elétrico do Elipse *Power* e através das Medidas e Comandos dos equipamentos tele controlados o modelo elétrico contendo:

- ✓ Cadastro de todos os equipamentos significativos;
- ✓ Criação do modelo de conectividade entre os equipamentos, servindo como base para o processamento topológico;
- ✓ Definição dos equipamentos que participam do *self healing*;
- ✓ Criação da estrutura de dados baseada na norma IEC 61970 para receber as medidas de tempo real;
- ✓ E a definição dos estados normais das chaves, religadores e disjuntores.

Um exemplo de modelagem elétrica pode ser apresentado na Figura 4 a seguir:

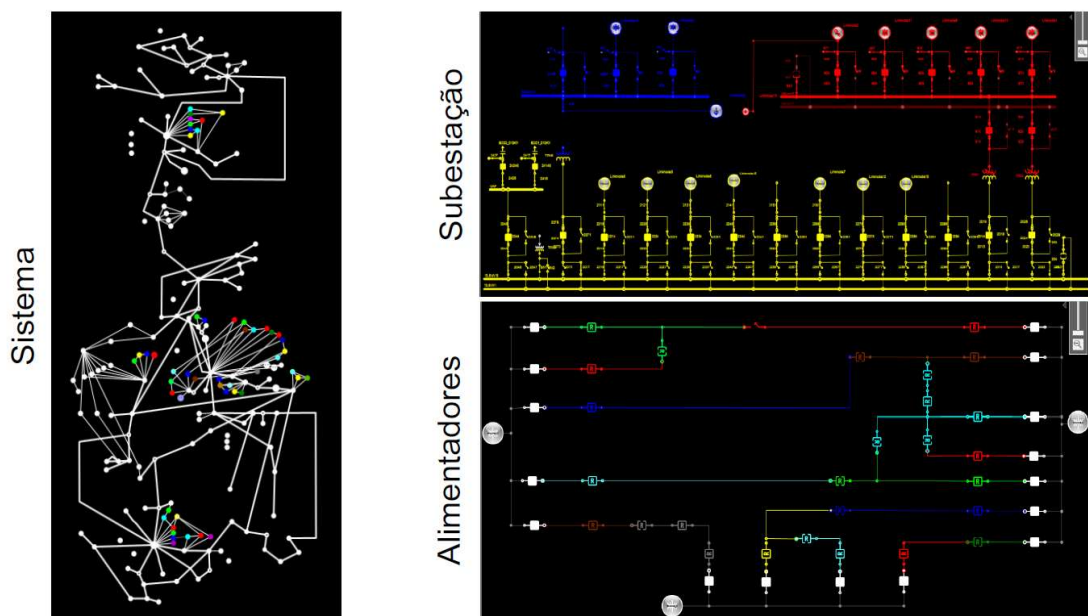


Figura 4. Representação do SEP na Modelagem Elétrica.

Fonte: Energisa, 2020

Baseado no modelo elétrico é criada uma estrutura de dados capaz de receber as medidas provenientes do sistema de comunicação. Isso garante o contexto e a

organização das informações na aplicação. Essas medidas de entrada para o *self healing* baseiam-se em:

- Estado (aberto / fechado) de chaves, religadores e disjuntores;
- Corrente elétrica, limite de corrente em cada equipamento;
- Condições que definem a disponibilidade do equipamento;
- Sinalizações de segurança (bloqueio de religamento, *cold load* (carga fria), linha viva, bloqueio manual);
- Sinalizações de atuação de proteção, grupos de ajuste de proteção;
- E modo de operação (chave / religador / seccionalizadora).

O sistema de *self healing* pode ser iniciado mediante três tipos de anormalidades na rede: *lockout* de equipamento de proteção, sobrecarga, ou desenergização da barra da subestação. As condições específicas para cada tipo de inicialização são apresentadas a seguir:

2.5.2.2 Atuação por *lockout* em equipamento de proteção (*Restoration Trigger*)

Para que seja iniciada a recomposição por *lockout* de equipamento de proteção, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- ✓ Equipamento aberto;
- ✓ Indicação de *lockout*;
- ✓ Equipamento disponível para o *self healing*;
- ✓ Qualidade da comunicação boa;
- ✓ E atuação de proteções.

Quando ocorrer uma atuação por *lockout*, o *self healing* vai buscar uma solução que isole o bloco sob defeito (bloco à jusante do equipamento atuado) e transfira o bloco saudável para algum circuito adjacente, atualizando os grupos de ajuste dos equipamentos impactados pela manobra. Após a manobra, os equipamentos serão indisponibilizados até que o operador reconheça a ação do *self healing*.

2.5.2.3 Atuação por Sobrecarga

Para que seja iniciada a atuação do *self healing* por sobrecarga, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- ✓ Corrente de fase maior que o limite de corrente cadastrado para o equipamento;
- ✓ Comando de liberação do operador para iniciar sequência de transferência de carga;
- ✓ Equipamento disponível para o *self healing*;
- ✓ E comunicação com qualidade boa.

Quando ocorrer uma sobrecarga em algum equipamento, será apresentado um alarme ao operador. Então o operador deverá liberar o tratamento por sobrecarga. A atuação por sobrecarga pode acarretar as seguintes ações do *self healing*:

- ✓ Transferir a carga a jusante do equipamento para alimentador(es) adjacente(s);
- ✓ Desligar carga(s) a jusante, quando não há possibilidade de transferência;
- ✓ E não realizar nenhuma ação, pois não existe carga que possa ser transferida ou desligada. Nesta situação, o *self healing* deixa que a própria proteção temporizada do equipamento execute o desligamento.

2.5.2.4 Atuação por Desenergização da Barra

Para que seja iniciado o tratamento do *self healing* para a desenergização da barra, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- ✓ Tensão no disjuntor < 1kV;
- ✓ Corrente no disjuntor = 0A;
- ✓ Corrente nos religadores conectados a barra = 0A;
- ✓ Qualidade da comunicação boa nos equipamentos;
- ✓ Equipamentos disponíveis para o *self healing*;
- ✓ E a liberação do operador para prosseguir o tratamento da desenergização em até um minuto após a desenergização.

A atuação por desenergização realiza a tentativa de transferir as cargas dos alimentadores desenergizados para alimentadores adjacentes conectados a barras que permanecem energizadas.

2.5.2.5 Disponibilidade dos Equipamentos

Temos assim, o módulo de *self healing* do Elipse Power que utiliza uma sinalização de disponibilidade para identificar quais equipamentos poderão ser operados mediante uma contingência. Equipamentos indisponíveis não são considerados como uma possibilidade de manobra para compor a solução do *self healing*. No caso da Energisa Tocantins foram definidas, em conjunto com a equipe do projeto, as condições que devem levar um equipamento a ser considerado como indisponível para o *self healing*. Um equipamento é considerado como indisponível quando alguma das parcelas seguintes for verdadeira:

- ✓ Falha na comunicação;
- ✓ Alguma condição significativa em campo está em estado anormal;
- ✓ Equipamento foi impactado por uma manobra do *self healing* e ficará indisponível até que o operador reconheça a indisponibilidade;
- ✓ Equipamento recebeu um comando de abertura ou fechamento executado pelo operador e ficará indisponível até que o operador execute o reconhecimento da indisponibilidade;
- ✓ Equipamento foi aberto ou fechado pela equipe de campo e ficará indisponível até que o operador reconheça a indisponibilidade;
- ✓ Algum equipamento a montante está indisponível;
- ✓ Operador bloqueou o equipamento para o *self healing*.

A representação gráfica da indisponibilidade no diagrama de operação está apresentada na Figura 5 a seguir.

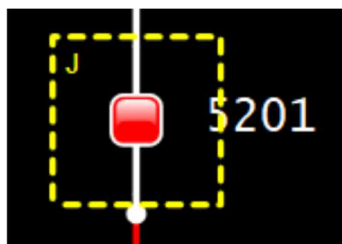


Figura 5- Sinalização de Equipamento Indisponível.
Fonte: Energisa, 2020

A indisponibilidade é representada por um retângulo amarelo tracejado ao redor do equipamento. A letra “J”, no canto superior esquerdo, indica que o equipamento também está indisponibilizando todos os equipamentos a jusante, até os equipamentos abertos que delimitam a fronteira com outros alimentadores. Caso o

equipamento esteja sendo indisponibilizado devido a algum equipamento à montante, a letra “M” será apresentada no canto superior esquerdo.

2.5.3 Comunicação Utilizada

A comunicação dos equipamentos que compõe o sistema de auto recomposição está ligada diretamente a disponibilidade, ou seja, para que o religador esteja disponível para o *self healing* ele precisa estar comunicando com qualidade.

O meio físico de comunicação da grande maioria dos religadores de saída das subestações é via fibra ótica. Já os religadores de poste distribuídos no sistema utilizam comunicação via rádio UHF (fabricante GE ou 4RF) ou via satélite (banda de 15MB fornecida pela Embratel).

A infraestrutura de comunicação da Energisa Tocantins conta com um *backbone* próprio de comunicação via enlace de micro-ondas com banda de 200MB (fabricante IDU e ODU: Aviat) que contêm equipamentos conectados com o Centro de Operação há 400km de distância, e que mesmo assim troca de pacote de dados com velocidade de 2 a 6ms no máximo entre qualquer ponto. Isso significa que a Energisa Tocantins terá o primeiro sistema de *self healing* centralizado do Brasil que poderá comandar equipamentos há 400km de distância do supervisor.

Rede de comunicação em fibra ótica, constituída por cabos que, em conjunção com equipamentos terminais adequados, permitem a disponibilização de canais de comunicação para serviços de transmissão de dados, voz e imagem em alta velocidade. A Energisa Tocantins possui um anel de fibra ótica compartilhado com a UFT (Universidade Federal do Tocantins) que interliga as subestações de Palmas com o Centro de Operação.

Para supervisão da disponibilidade da comunicação é utilizado um sistema da *Solar Winds* conectado na rede em tempo real reportando os pontos que estão online/off-line para manutenção e reconfiguração caso necessário, das redes de fibra ótica, satélite e micro-ondas. O sistema monitora a qualidade do sinal, tempo de resposta e disponibilidade dos principais meios de comunicação da organização. A Figura 6 mostra a tela do sistema de monitoramento.

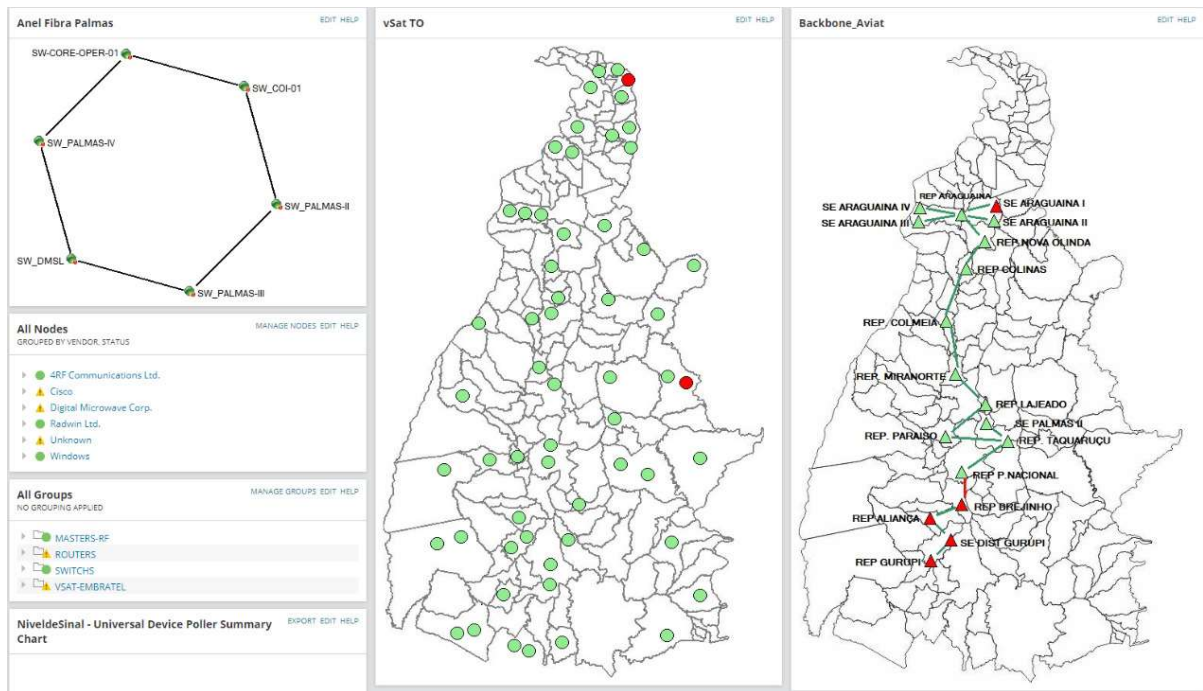


Figura 6 - Monitoramento da Disponibilidade da Comunicação.
Fonte: Energisa, 2020

2.5.4 Adequações do Projeto

Uma das vantagens do módulo de *self healing* Elipse Power é a integração com vários fabricantes. Ou seja, é possível operá-lo com vários protocolos de comunicação, como Modbus, DPN3, IEC 60870-5, e IEC 61850 (MMS, GOOSE, SV).

Os religadores de distribuição da Energisa Tocantins são compostos pelos fabricantes NOJA, FORM6, SCHNEIDER, ARTECHE, e AREVA em subestação. Para cada fornecedor a empresa padroniza uma lista de pontos no modelo de comunicação do fabricante para remeter dados para o supervisor.

Para operação adequada do módulo de *self healing* é necessário que os religadores integrados a ele estejam com a mesma referência no sincronismo de tempo, ou seja, o GPS dos equipamentos deve ter a mesma estampa de tempo para que não haja *delay* nos comandos de abertura e fechamento.

2.5.5 Comissionamento

Após configurar o módulo de *self healing* com todos os parâmetros necessários para funcionamento é feita uma série de testes de atuação e não atuação da auto recomposição antes da entrega para operação.

Antes de iniciar os testes é realizado o levantamento das correntes de *pick-up* dos religadores envolvidos, e as manobras que o sistema deve fazer caso parta o *self healing*. Os testes são feitos por amostragem geralmente no caminho mais simples possível de manobra, devido necessitar de liberação da operação para realização dos testes.

Caso a manobra tenha vários caminhos para reestabelecimento, ou seja, possibilidade de fechar mais de um religador NF (normalmente fechado), o sistema vai avaliar a corrente de carga que cada um suporta, para fazer a manobra de forma a não sobrecarregar nenhum circuito do sistema. O sistema pode abortar a manobra caso a corrente final seja maior que a corrente que o circuito suporta.

O limite da corrente do circuito está vinculado à bitola do cabo no trecho a ser manobrado. O ajuste de proteção da corrente de *pick-up* é feito considerando a corrente suportada pelo cabo e a corrente de carga máxima do circuito, para que a manobra seja segura.

Nos testes é feita injeção de corrente na entrada do relé de forma que atue a proteção de sobrecorrente, ou seja, simulando uma corrente de curto circuito, para o religador iniciar o ciclo de religamento. Após duas tentativas de religamento sem sucesso o religador fica com *status* aberto e entra em *lockout*. Dando condições para partir o *self healing*. É calculada a manobra a ser executada que geralmente abre o religador NF e fecha o religador NA (normalmente aberto).

Também são feitos os testes de não atuação (bloqueio) do *self healing*, no caso é retirada uma das condições de partida do *self healing*, então se observa se o sistema não vai partir para evitar atuações indevidas. Algumas das condições testadas são:

- Quando religador da manobra estiver com a função de *lockout* habilitada;
- Quando religador da manobra estiver indisponível, sem supervisão;
- Quando alimentação CC (bateria) do religador da manobra estiver comprometida.

Obs: Geralmente na lista de pontos do religador tem um ponto de supervisão da qualidade das baterias, para entrar alimentação CC quando faltar o CA (circuito aberto).

3. ANÁLISE DA EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DE *SELF HEALING* EM RELIGADORES URBANOS

Antes de iniciar a apresentação dos dados obtidos com a análise, foi criado um Anexo ao final deste trabalho para melhor ambientação da representação topológica elétrica adotada pela empresa alvo do estudo desde trabalho, contendo todas as telas do supervisor, sistema SCADA da Energisa Tocantins, com os religadores que compõem as Redes de Distribuição Urbanas (RDU's) que possuem módulo de *self healing*.

Será realizada uma análise do sistema *self healing* nas RDU's da Energisa Tocantins. Atualmente a empresa conta com 853 (oitocentos e cinquenta e três) religadores em operação, deste parque instalado apenas 16%, ou seja, 173 (cento e setenta e sete) religadores são dotados do módulo *self healing*. Levando em consideração que o *self healing* é voltado para Rede Urbana devido a maior concentração de carga e ao favorecimento da topologia para manobras tem-se que cerca de 59% dos religadores em operação encontram-se na Rede Rural e 41% na Rede Urbana, então dos 354 (trezentos e cinquenta e quatro) religadores lotados na Rede Urbana 48% possui integração com *self healing*, com perspectiva de expansão (Energisa, 2019).

A análise será realizada com uma base de dados composta por seis semanas de diferentes períodos de 2020, entre os meses de janeiro a agosto. Considerando que o sistema de SH está operando desde janeiro de 2019, têm-se o intervalo de 85 semanas até a data de estudo deste trabalho. Portanto, este estudo se dá com amostra de 7% do período total em operação.

3.1 ANÁLISE DA AMOSTRA DO BANCO DE DADOS DE SIMULAÇÃO DO *SELF HEALING*

Existe uma funcionalidade dentro do módulo de *self healing* que é justamente para simular a operação de cada elemento existente, avaliando que se fosse necessário operar esses equipamentos, as condições que dariam início a uma atuação seriam possíveis ou não.

Neste ponto é importante entender que a ferramenta de simulação do módulo *self healing* é dotada de um programa computacional que faz cálculos previamente programados para responder rapidamente como recompor o sistema em caso de necessidade. A operação em si necessita de variáveis que independem do funcionamento deste módulo, como qualidade da comunicação, caminhos de manobra utilizáveis, entre outros.

Essa ferramenta de simulação está programada para processar diariamente, e gera em torno de 16.000 (dezesesseis mil) eventos analisados por dia. Foram utilizadas seis amostras de bases de dados referente a uma semana em períodos diferentes dos meses de 2020, contando com um total de 1.048.575 eventos analisados.

Nessas simulações o modulo *self healing* está programado para dar um diagnóstico em caso de falha, e em caso de sucesso mostrar a sequência de manobras para recomposição. As causas para as falhas que o sistema informa no diagnóstico de simulação são apresentadas a seguir. Onde a chave de gatilho representa o religador em que é simulada a falha.

- A chave do gatilho apresenta um estado ou qualidade não suportado.
- A chave do gatilho está conectada a um anel.
- A chave do gatilho ou sua vizinhança não tem informação de corrente do momento anterior a falha.
- Ambos terminais da chave do gatilho estão energizados.
- Chave atuada está desenergizada.
- Detectado anel envolvendo equipamentos de diferentes níveis de tensão.
- Equipamento isolado, by-pass ou operando em modo chave.
- Estado de topologia do sistema inconsistente: há pelo menos uma chave impedindo a autorrecuperação de obter uma foto confiável do sistema.
- Existem mudanças recentes na topologia do sistema.
- Há pelo menos uma chave disponível sem um limite de corrente válido, ou com limite de corrente não definido.
- Não há chaves disponíveis para solucionar o problema.
- Ocorreu um erro inesperado.

- Problema detectando a sequência de religamento - o último estado detectado não é fechado ou há dois estados consecutivos com o mesmo valor.
- Nenhuma solução foi encontrada, ou não há solução.

Fazendo um macro do quantitativo de mais de um milhão de eventos, foi obtida a Figura 7 que expressa um total geral do diagnóstico das análises, classificado em três partes, sugestão de manobra, sem solução e motivo impeditivo.

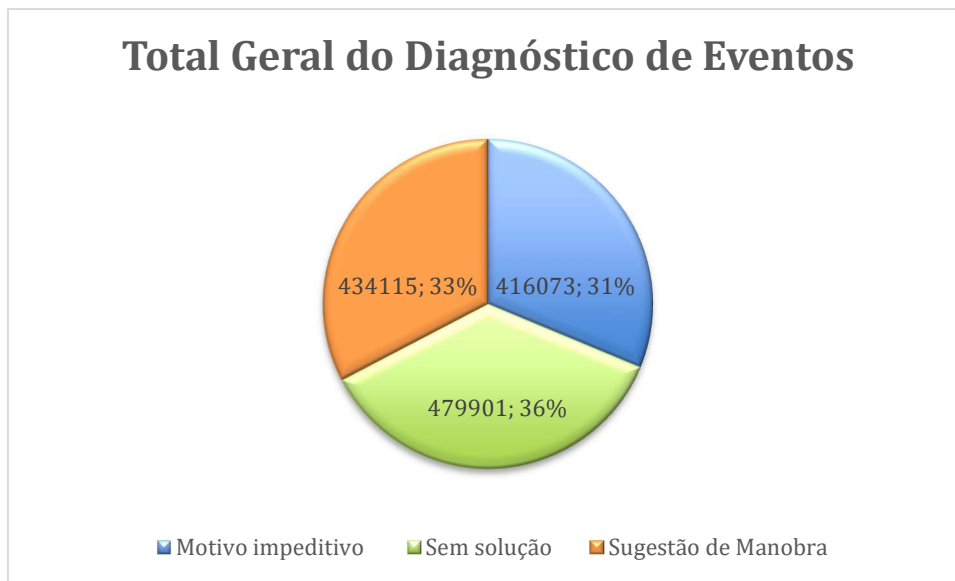


Figura 7 – Total Geral do Diagnóstico de Eventos
Fonte: Autor, 2020

Na análise a parte que contempla sugestão de manobra é considerada como sucesso, as outras duas partes como falha. Sendo que “sem solução” seriam os casos em que não há manobra que possa ser feita para recomposição caso o equipamento alvo da análise necessite. Corresponde ao último motivo na relação das justificativas de falha apresentados acima. Já a porcentagem correspondente ao “Motivo impeditivo”, se refere ao restante dos motivos supracitados.

Dentro dos casos onde o diagnóstico sugere manobra têm-se que, 96% dos eventos envolvem manobras simples, com apenas dois religadores, contando com a abertura e um e fechamento do outro. Somente 4% das sugestões de manobra envolvem mais equipamentos da rede.

Separando os dados da Figura 7 por RDU, obtêm-se a Figura 8 retratada a seguir. Nela é possível verificar uma tendência quase padrão das variações entre as

localidades, com exceção Paraíso em que todos os dados se concentram nos motivos impeditivos, portanto não tendo sugestão de manobra, nem caso sem solução, denotando suspeita de problema nessa localidade.

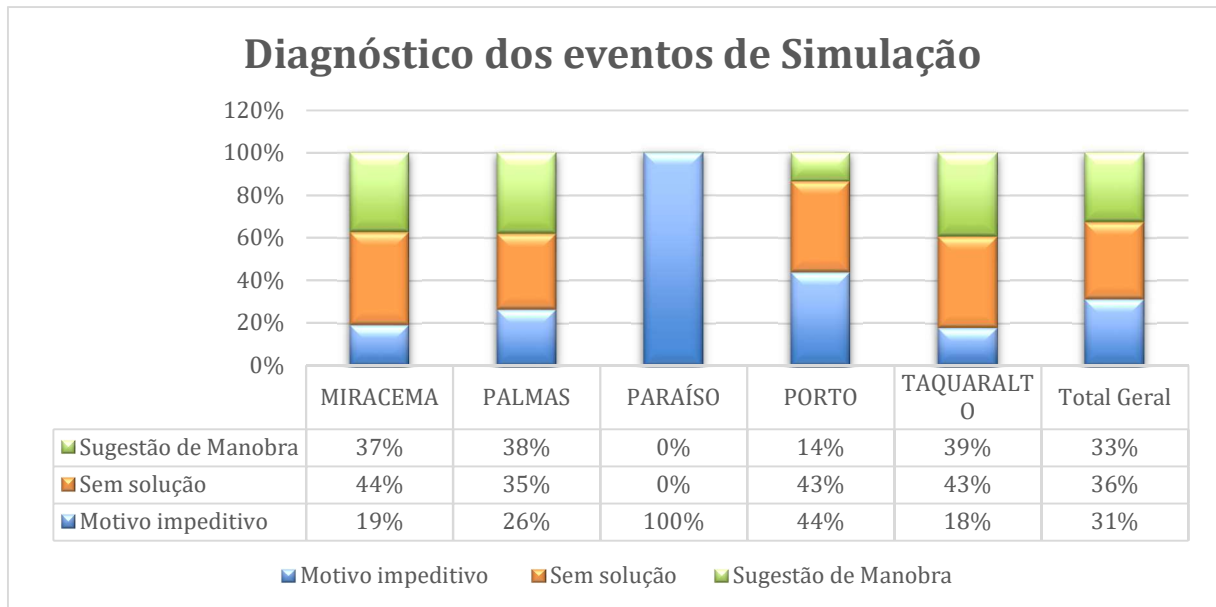


Figura 8 – Diagnóstico dos Eventos de Simulações.

Fonte: Autor, 2020

3.1.1 Particularidades da RDU Paraíso

Foi filtrada a relação de eventos de Paraíso, e identificado que 70% se refere à resposta do diagnóstico: “Estado de topologia do sistema inconsistente: há pelo menos uma chave impedindo a auto recuperação de obter uma foto confiável do sistema”. Os equipamentos envolvidos neste quantitativo de respostas foram os alimentadores 214R, 224R e 244R da SE Paraíso I.

A Figura 9 é a representação topológica da SE Paraíso I, para exibir como está configurada no período analisado evidenciando os religadores envolvidos. A concessionária foi questionada sobre a majoritária relação de eventos envolvendo esses religadores, que estão inviabilizando a sugestão de manobras no sistema. E em resposta identificou-se que os religadores supracitados poderiam estar com um dos seguintes problemas:

- 1) Horário errado;
- 2) Corrente estática, ou seja, sem variação;

3) Falha de sincronismo do GPS.

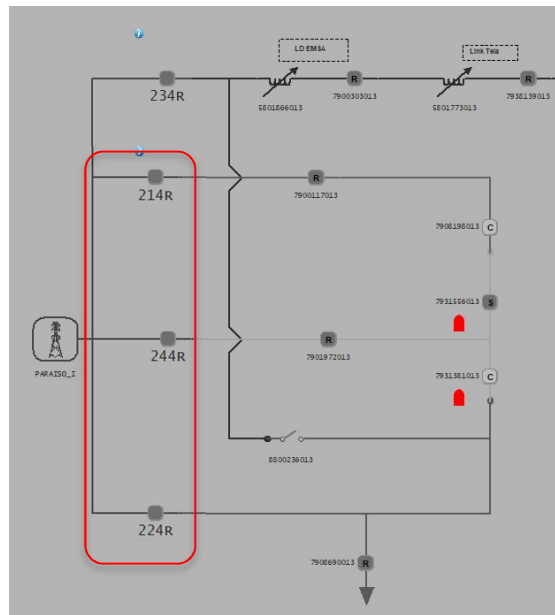


Figura 9: Tela da SE Paraíso I no supervisório SCADA.
Fonte: Energisa, 2020

Diante do exposto foi solicitada abertura de uma nota para verificação dos religadores na subestação.

3.1.2 Demais localidades

Expurgando os dados de Paraíso que já foram analisados têm-se a Figura 10. Onde se verifica que a proporção de caso sem solução, ou seja, onde não há alternativa de manobra para recomposição, é bem parecida. Já a proporção de “Motivo impeditivo” é mais acentuada na RDU de Porto Nacional.

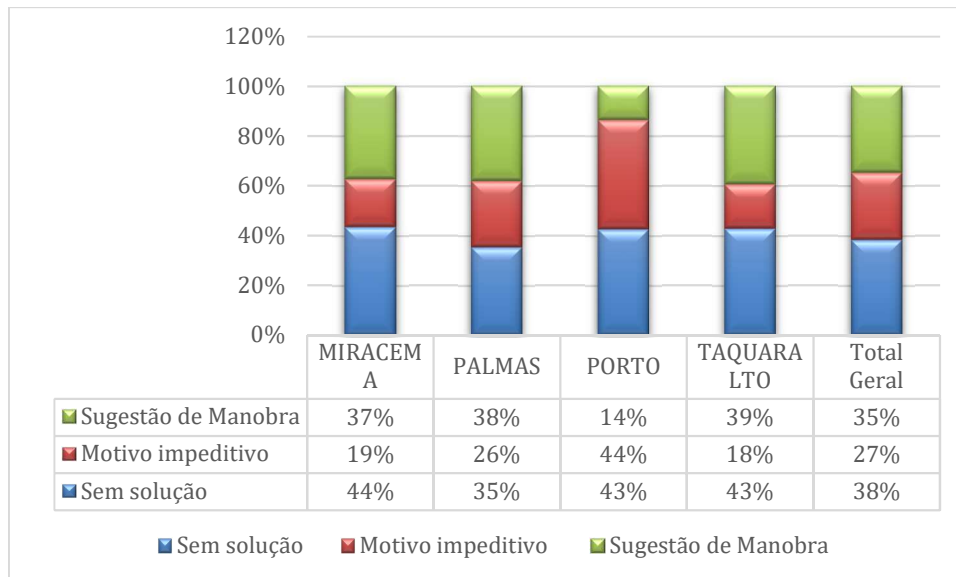


Figura 10: Diagnóstico dos Eventos da Simulação.
Fonte: Autor, 2020

Cinquenta por cento dos motivos impeditivos de Porto se resumem a dois, onde 30% se refere “A chave do gatilho está conectada a um anel” que aborta a sugestão de manobra, em 20% “Não há chaves disponíveis para solucionar o problema”.

Os demais 50% representam o motivo: “A chave do gatilho ou sua vizinhança não tem informação de corrente do momento anterior a falha”, esse total de eventos envolve apenas dois religadores, são eles: 7904411001, 214R. O que denota um problema na informação dos dados analógicos dos equipamentos, devendo ser investigados para manutenção.

As RDUs Miracema, Palmas e Taquaralto tem sugestão de manobra entre 37% e 39%, mostrando que caso os equipamentos não tivessem esses problemas operacionais denotados nas RDUs de Paraíso e Porto, no máximo 40% dos eventos de simulação resultariam em uma possibilidade de manobra.

Nos tópicos a seguir serão levantados temas relativos à utilização da ferramenta no dia a dia pelos operadores e usuários do sistema. Este conteúdo será voltado para levantamento dos pontos de relevância a fim de embasar a análise de desempenho do módulo de *self healing*, levantando os pontos fortes e os pontos de fraqueza da ferramenta utilizada pela Energisa Tocantins.

3.2 TELA DE ANÁLISE DE ESTATÍSTICAS DO SELF HEALING

A tela de análise de estatística exprime basicamente uma visão analítica das simulações de operação trabalhadas antes deste tópico, como mostra a Figura 11 que fica no sistema supervisorio da Energisa Tocantins.

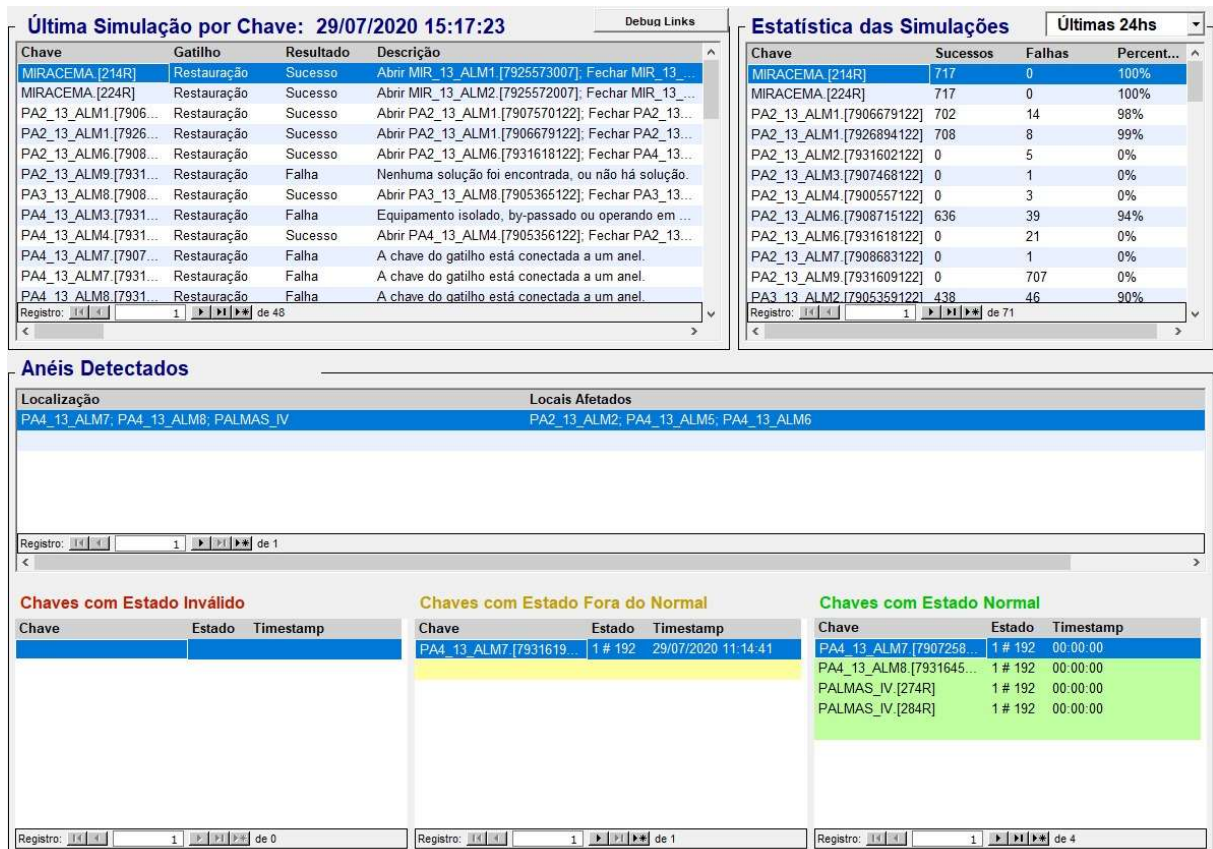


Figura 11: Tela de Análise de Estatística do Self Healing no supervisorio SCADA.
Fonte: Energisa, 2020

As simulações são realizadas com base na estampa de tempo mais atual, em outras palavras com os dados no sistema na hora do processamento da simulação. Isso possibilita acompanhar a qualidade da resposta do *self healing* em percentual de sucessos e falhas, bem como avaliar condições que impediriam sua atuação, como por exemplo, indisponibilidade e má qualidade na comunicação. Como apresentado na Figura 12.

Última Simulação por Chave: 29/07/2020 15:17:23				Estatística das Simulações			
Chave	Gatilho	Resultado	Descrição	Chave	Sucessos	Falhas	Percent...
MIRACEMA [214R]	Restauração	Sucesso	Abriu MIR_13_ALM1 [7925573007]; Fechar MIR_13...	MIRACEMA [214R]	717	0	100%
MIRACEMA [224R]	Restauração	Sucesso	Abriu MIR_13_ALM2 [7925572007]; Fechar MIR_13...	MIRACEMA [224R]	717	0	100%
PA2_13_ALM1 [7906...	Restauração	Sucesso	Abriu PA2_13_ALM1 [7907570122]; Fechar PA2_13...	PA2_13_ALM1 [7906679122]	702	14	98%
PA2_13_ALM1 [7926...	Restauração	Sucesso	Abriu PA2_13_ALM1 [7906679122]; Fechar PA2_13...	PA2_13_ALM1 [7926894122]	708	8	99%
PA2_13_ALM6 [7908...	Restauração	Sucesso	Abriu PA2_13_ALM6 [7931618122]; Fechar PA4_13...	PA2_13_ALM2 [7931602122]	0	5	0%
PA2_13_ALM9 [7931...	Restauração	Falha	Nenhuma solução foi encontrada, ou não há solução.	PA2_13_ALM3 [7907468122]	0	1	0%
PA3_13_ALM8 [7908...	Restauração	Sucesso	Abriu PA3_13_ALM8 [7905365122]; Fechar PA3_13...	PA2_13_ALM4 [7900557122]	0	3	0%
PA4_13_ALM3 [7931...	Restauração	Falha	Equipamento isolado, by-passado ou operando em ...	PA2_13_ALM6 [7908715122]	636	39	94%
PA4_13_ALM4 [7931...	Restauração	Sucesso	Abriu PA4_13_ALM4 [7905356122]; Fechar PA2_13...	PA2_13_ALM6 [7931618122]	0	21	0%
PA4_13_ALM7 [7907...	Restauração	Falha	A chave do gatilho está conectada a um anel.	PA2_13_ALM7 [7908683122]	0	1	0%
PA4_13_ALM7 [7931...	Restauração	Falha	A chave do gatilho está conectada a um anel.	PA2_13_ALM9 [7931609122]	0	707	0%
PA4_13_ALM8 [7931...	Restauração	Falha	A chave do gatilho está conectada a um anel.	PA3_13_ALM2 [7905359122]	438	46	90%

Figura 12: Tela de Simulação de Análise de Estatística do *Self Healing* no Supervisório SCADA.

Fonte: Energisa, 2020

Além da simulação o sistema exibe todos os circuitos que estão em anel no momento da consulta da tela mostrado na Figura 13. Essa informação está junto a estatística de simulação pois a existência de um circuito em anel é um dos motivos que impede a partida do módulo de *self healing* em uma eventual necessidade. Pois se existe um circuito em anel, significa que existem religadores com estado fora do normal, ou seja, NF abertos ou NA fechados.

Anéis Detectados	
Localização	Locais Afetados
PA4_13_ALM7; PA4_13_ALM8; PALMAS_IV	PA2_13_ALM2; PA4_13_ALM5; PA4_13_ALM6

Figura 13: Tela de Anéis Detectados da Análise de Estatística do *Self Healing* no supervisório SCADA.

Fonte: Energisa, 2020

Ao selecionar o registro de anel detectado, logo abaixo também é apresentado o estado dos religadores que compõe este anel como mostra a Figura 14 a seguir.

Chaves com Estado Inválido			Chaves com Estado Fora do Normal			Chaves com Estado Normal		
Chave	Estado	Timestamp	Chave	Estado	Timestamp	Chave	Estado	Timestamp
			PA4_13_ALM7 [7931619]	1 # 192	29/07/2020 11:14:41	PA4_13_ALM7 [7907258]	1 # 192	00:00:00
						PA4_13_ALM8 [7931645]	1 # 192	00:00:00
						PALMAS_IV [274R]	1 # 192	00:00:00
						PALMAS_IV [284R]	1 # 192	00:00:00

Figura 14: Tela de Estado das Chaves na Análise de Estatística do *Self Healing* no Supervisório SCADA.

Fonte: Energisa, 2020

3.3 CORRENTE DE CARGA NOS TRECHOS DE MANOBRA

Conforme foi explicado na seção 2.4.2.1 deste trabalho, o sistema precisa satisfazer algumas condições para planejar e executar manobras. Essas condições são dadas basicamente por status e medidas informadas pelos religadores ao supervisor. Independente disso, é necessário que uma equipe de estudo avalie a corrente máxima suportada pelos circuitos que são caminhos de manobra, e implemente essa informação como parâmetro de condição antes de iniciar as manobras.

A concessionária teve problemas envolvendo essa temática na RDU do município de Paraíso do Tocantins, onde a rede de distribuição que compõem o trecho de manobra era composta por cabo de alumínio nu 4 AWG. Este cabo é o de menor bitola utilizado na distribuição. Isso não seria um problema se a soma das cargas dos circuitos transferidos fossem baixas, mas não era o caso.

Na Tabela 2 a seguir pode-se ver a ampacidade e seção nominal dos condutores mais utilizados nas redes de distribuição.

Tabela 2: Características Físico-Elétricas dos Condutores de Alumínio com Alma de Aço

Condutor	Bitola Condutor	Seção Nominal	Diâmetro Total do Cabo	Peso Nominal do Cabo	Tração de Ruptura	Resistência Elétrica 70°C	Ampacidade T=30°C Amb+ 40°C Elev
	AWG/MCM	mm ²	mm	kg/km	Da N	Ω/km	A
Swan	4 AWG	24,68	6,36	85,40	809	1,7121	127
Sparrow	2 AWG	39,24	8,01	135,90	1229	1,1259	171
Raven	1/0 AWG	62,43	10,11	216,30	1882	0,7461	230
Quail	2/0 AWG	78,68	11,35	272,30	2338	0,5962	267
Pigeon	3/0 AWG	99,20	12,75	343,60	2914	0,4816	309
Penguin	4/0 AWG	125,10	14,31	433,20	3677	0,3944	358
Linnet	336,4 MCM	198,30	18,31	688,70	6200	0,2039	488

Fonte: (NDU - 007 Energisa, 2018)

Em algumas das manobras feitas na RDU por falha de um alimentador ou transferência de carga, havia um sobreaquecimento dos cabos nesses trechos em que o condutor era 4AWG, chegando por vezes a partir o cabo, indisponibilizando assim mais um trecho, quando a real necessidade era reestabelecimento.

Este problema não está relacionado diretamente ao funcionamento do módulo de *self healing*, que basicamente vai executar o que for previamente parametrizado. Mas traduz a necessidade de que os trechos de manobra tenham condutores que suportem a carga sem alteração das suas propriedades físicas. Depois desses problemas, a concessionária realizou a substituição dos condutores de alguns trechos de manobra com cabo de alumínio nu 336,4MCM para evitar esse tipo de complicação.

3.4 ATUALIZAÇÃO DA TOPOLOGIA DA REDE NO MÓDULO

Em contribuição com a área de Proteção da Energisa, a maior dificuldade da área para manutenção do funcionamento da ferramenta de *self healing* é quando existe alteração dos ajustes de proteção, isto é, um religador que só operava em modo chave e passa a ser um equipamento de proteção. O contrário também é verdadeiro.

Para estes casos os estudos precisam ser cautelosos e após consolidação da atualização das ordens de ajuste dos equipamentos envolvidos, depende da implantação em campo e atualização na central do supervísório SCADA. Portanto, alterar o módulo depois que já está em operação exige considerável quantidade de hora-homem.

3.5 EXEMPLO DE OCORRÊNCIA COM ATUAÇÃO DO MÓDULO

Para apresentar um exemplo prático da atuação do *self healing* foram coletados dados da ocorrência emergencial na RDU de Palmas, com número de intervenção 05-20204059258318. Antes do exposto o sistema operava em modo normal, com todos os equipamentos como foram projetados. A Figura 15 é uma tela do sistema supervísório antes da ocorrência.

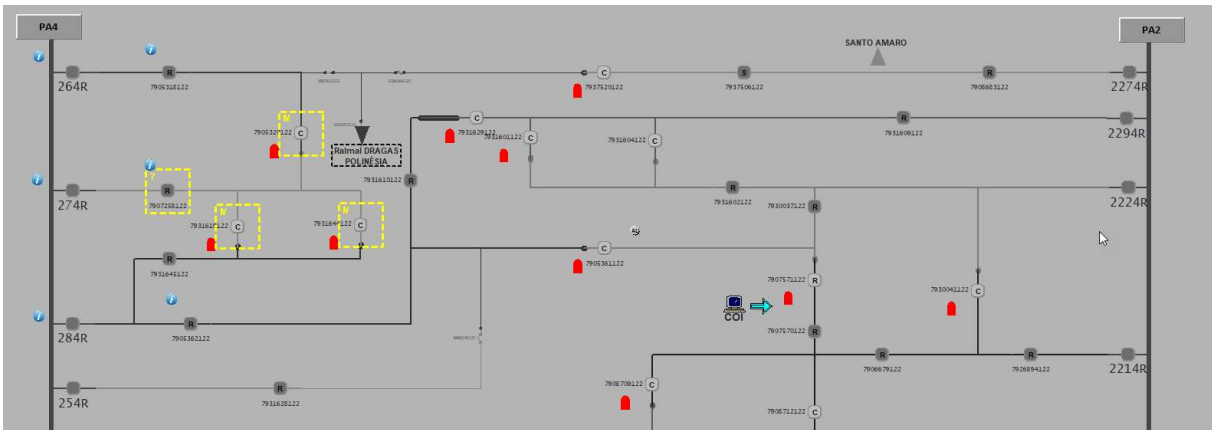


Figura 15. Tela do Supervisório que representa a RDU de Palmas antes da ocorrência.
 Fonte: Energisa, 2020

Para facilitar o entendimento do caso têm-se a Figura 16, representando a Figura 15 em um novo esquema composto apenas pelos religadores envolvidos na ocorrência e com a legenda do status de cada um. Mostrando que todos os equipamentos estavam no seu estado normal de operação.

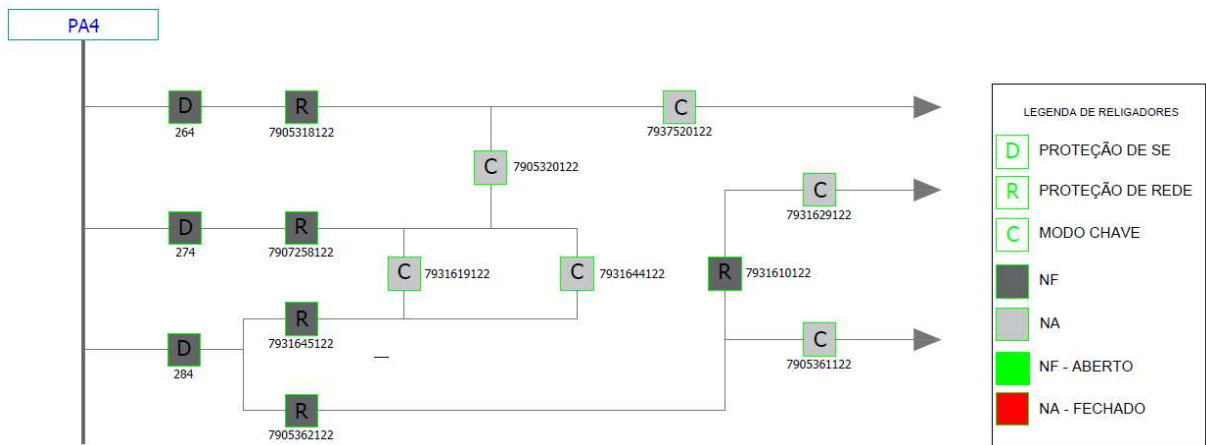


Figura 16. Representação dos Equipamentos envolvidos antes da ocorrência.
 Fonte: Energisa, 2020

No dia 24 de julho de 2020, o disjuntor do alimentador 8 da SE Palmas IV (2284R) desarmou às 15h30min, impactando o total de 9406 (nove mil, quatrocentos e seis) consumidores. O módulo de *self healing*, naquele momento estava habilitado para operar automaticamente conforme ilustrado na Figura 17 a seguir:

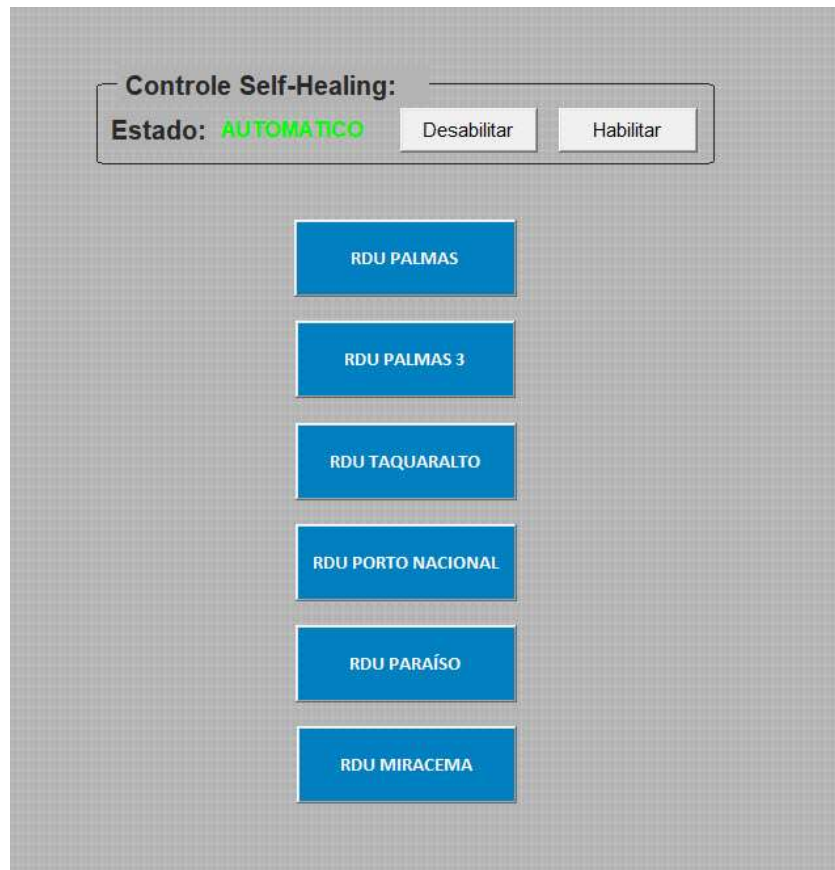


Figura 17: Tela de Controle do *Self Healing*.
Fonte: Energisa, 2020

Devido a ventos fortes, matos secos foram arremessados contra a rede na estrutura do religador 7905362122 lado fonte, vide Figura 18, provocando primeiramente um trip oriundo de um curto circuito bifásico fases AB, iniciando o ciclo de religamento do disjuntor da subestação, que em seguida atuando trip bifásico entre as fases AB novamente, provocando a segunda tentativa de religamento, seguindo com atuação de trip trifásico desta vez, desarmando o disjuntor e o levando o equipamento à *lockout*.



Figura 18: Estrutura do Religador 7905362122 após a ocorrência.
Fonte: Energisa, 2020

Conforme explicado na seção 2.4.2.1 um dos tipos de anormalidade da rede para iniciar o sistema de *self healing* é o *lockout* de um equipamento de proteção. Com todas as condições para manobra satisfeitas, às 15h32min o *self healing* atuou operando os religadores em modo chave, isolando o trecho defeituoso, energizando 9236 (nove mil, duzentos e trinta e seis) consumidores, ficando apenas 170 (cento e setenta) consumidores dentro do trecho desenergizado.

Assim, é válido ressaltar que todo processamento do módulo desde a identificação dos pré-requisitos para iniciar o cálculo até a execução da manobra durou cerca de 2 minutos, a ocorrência em questão impactou um número muito menor de consumidores, e como já supracitado na seção 2.1, a manobra em questão reflete positivamente nos cálculos dos indicadores de continuidade, pois foi restabelecida a carga em tempo inferior a três minutos, ou seja, não incidiu DEC nem FEC.

A Figura 19 a seguir é uma tela do sistema supervisorio depois da ocorrência.

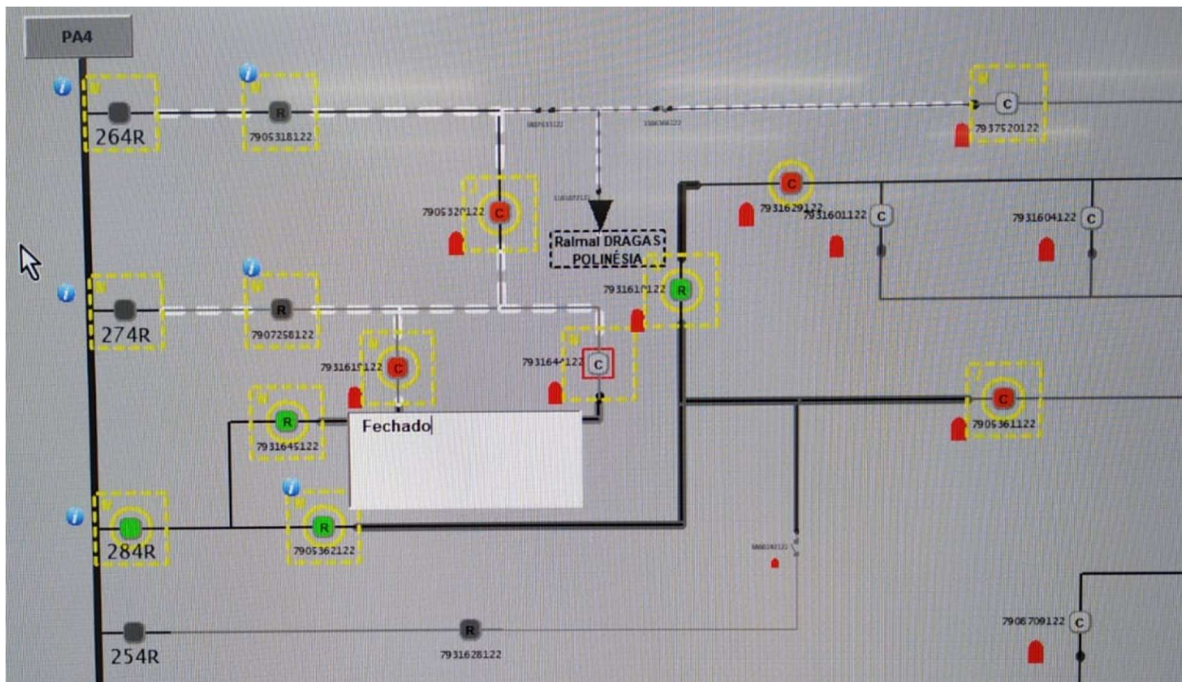


Figura 19: Tela do Supervisório que representa a parte afetada da RDU de Palmas após a ocorrência.

Fonte: Energisa, 2020

De maneira análoga a representação anterior da Figura 16, foi feito um novo esquema composto apenas pelos religadores envolvidos, porém após da ocorrência, na Figura 20 a seguir. Mostrando os equipamentos que foram impactados na falta, selecionados em azul e os outros equipamentos que fizeram parte da manobra de recomposição, que são os que possuem seu estado normal de operação alterado.

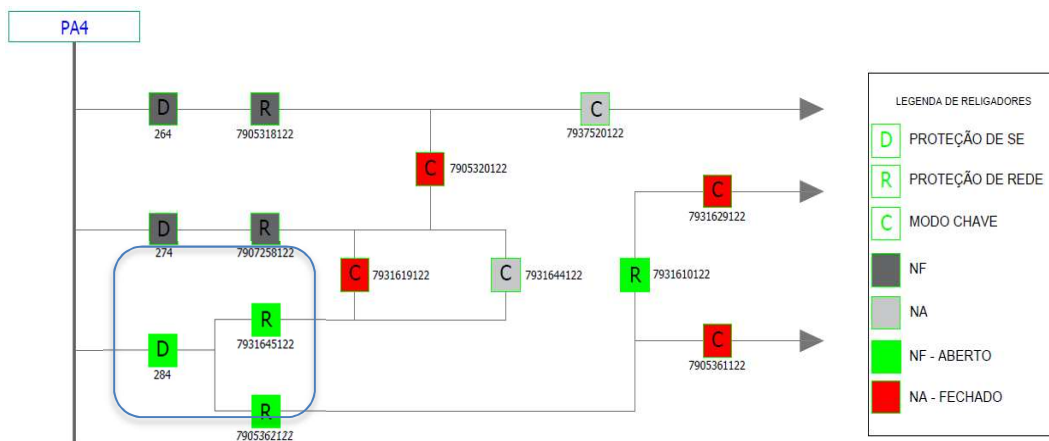


Figura 20: Representação dos Equipamentos envolvidos após a ocorrência.

Fonte: Energisa, 2020

Uma equipe operacional foi acionada pelos operadores do sistema para encontrar e reparar o defeito no trecho isolado. Devido o curto circuito ter sido na

estrutura do equipamento, o religador 7905362122 foi isolado por chaves seccionadoras na rede de forma preventiva. Pois no evento o equipamento foi danificado permanentemente, conforme mostra a Figura 21. Duas chaves seccionadoras da estrutura estouraram e foram substituídas. Foi solicitada a programação de uma equipe de manutenção para substituição do religador.



Figura 21: Danos na Estrutura do Religador 7905362122 após a ocorrência.
Fonte: Energisa, 2020

3.6 INDISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Para um religador ser considerado indisponível existem vários motivos que podem levá-lo a esse estado. E por mais que possamos associar indisponibilidade à

falta de comunicação, este é apenas um dos itens que podem levar um religador a este estado conforme foi explicado no item 2.4.2.5 deste trabalho.

Na Figura 22, pode-se observar uma tela de exemplo com indisponibilidade em alguns equipamentos. Lembrando que a indisponibilidade de um equipamento, pode levar os equipamentos à jusante ao mesmo problema de depender do motivo.

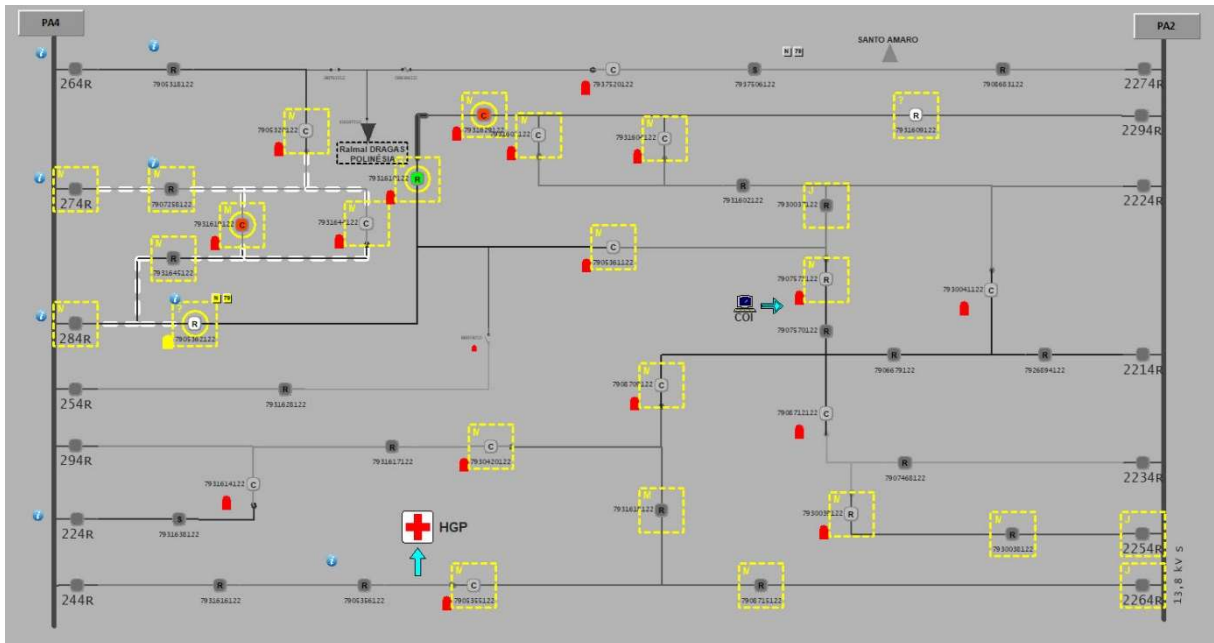


Figura 22: Tela Exemplo de Indisponibilidade de Religadores no Supervisório SCADA.
Fonte: Energisa, 2020

3.7 POSSIBILIDADES DE MELHORIA DA FERRAMENTA

O módulo de *self healing* da *Elipse Software* é uma ferramenta versátil com boa capacidade de adequação às necessidades da organização. Pode-se alterar o *layout* inteiro da topologia com símbolos e cores conforme desejar. Alguns profissionais próprios da Energisa foram treinados para alterar o *layout* do sistema de forma a inserir e excluir elementos para que a partir da integração com os sistemas esse trabalho fosse feito com mão de obra própria.

Todos os problemas de integração dos religadores foram corrigidos pela mão de obra própria da Elipse na fase de implantação da ferramenta. Portanto, o

funcionamento está fluido e em caso de ampliação é mais fácil a integração de novos equipamentos usando a base instalada como modelo.

3.8 LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA

O módulo de *self healing* tem três condições para disparo, atuação por *lockout* em equipamento de proteção, atuação por sobrecarga e atuação por desenergização da barra, como vimos na seção 2.4.2.1 deste trabalho. Porém, desde a implantação a Energisa só trabalha com a atuação por *lockout* da proteção.

Essa decisão foi tomada à título de aguardar um tempo para a própria ferramenta mostrar solidez e ganhar confiabilidade dos operadores. Haja vista que o sistema está completando dois anos em funcionamento desde a sua inauguração, e desde então só amplia a integração de novos religadores, seria oportuno levantar uma frente de trabalho para habilitar todas as funções de uso da ferramenta.

O ganho poderia garantir a robustez do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em vista de tudo que foi abordado no capítulo 3 percebe-se que o módulo de *self healing* sendo bem desenhado para o cenário em que for atuar é uma ferramenta efetiva. Seu funcionamento está atrelado a confiabilidade dos parâmetros a ele imputados, à boa qualidade da comunicação, e ao funcionamento normal da topologia.

Os principais pontos desenvolvidos com a utilização da ferramenta foram a redução na atuação manual, no deslocamento de equipes para prover o restabelecimento do fornecimento de energia e a constatação de melhoria significativa nos índices de coletividade DEC e FEC. Dentro disso, pode-se afirmar que a empresa atingiu seus objetivos e sanaram parte de suas necessidades ao aplicar técnicas de *smart grid*.

A ferramenta provê uma melhora significativa no tempo de recomposição, fazendo com que a falta não seja duradoura e uma quantidade menor de clientes sejam prejudicados. Melhora os índices da qualidade de serviço e os dispêndios com mão de obra voltados a inspeção de uma área mais restrita contribuindo para que o responsável pela manutenção seja direcionado ao ponto de falta em um menor tempo.

O uso da infraestrutura já existente, como os religadores, a comunicação, a própria base do sistema supervisão também é uma característica positiva forte da solução. Que consegue integrar diferentes fabricantes de religadores, diferentes tipos de comunicação via protocolo e meio físico, e usando a interface já existente da própria Energisa. Fazendo uso apenas de mão de obra própria para ampliação.

Vimos que 96% das manobras sugeridas pelo sistema de *self healing* são simples, envolvendo apenas dois religadores. O que não difere a ferramenta utilizada pela Energisa Tocantins de outras ferramentas existentes nesse mercado, seja dentro do *self healing* descentralizado ao semi centralizado.

Durante o desenvolvimento deste trabalho percebeu-se que os religadores que utilizam de comunicação do meio físico via rádio requerem mais manutenção, onde pode ocorrer falha no sinal, resultando em perda ou intermitência da comunicação. Já a utilização de meio físico em fibra óptica dedicada para o sistema, possui maior custo,

porém traz maior confiabilidade e segurança, além de praticamente não demandar manutenção.

Com ampliação de novas tecnologias como a geração distribuída ampliando a eficiência energética acredita-se que em um futuro muito próximo será possível a interligação de pequenas fontes para suprir algumas faltas onde todo este conjunto requer ser monitorado e oferecer muitas possibilidades de reconfigurações, para que o tempo de recomposição e o número de consumidores atingidos seja ainda menor (GOINSK, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia elétrica na contemporaneidade é fundamental para a sociedade como um todo, considerada como serviço essencial prestando atendimento em todas as esferas sociais. Inclusive o objetivo de desenvolvimento sustentável da ONU – Organização das Nações Unidas número 7 enuncia a universalização ao acesso à energia elétrica até 2030, incluindo dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética (ONU, 2018).

De tal modo as exigências com relação ao seu fornecimento, qualidade e continuidade deram mais visibilidade a este mercado tornando mais relevante, impulsionando assim as concessionárias de energia a investirem cada vez mais em soluções hábeis para que diminuam ocorrências de faltas no sistema de distribuição de energia.

A reconfiguração do sistema de distribuição de energia elétrica funciona com o seu princípio básico na capacidade de identificar, classificar, e intervir na rede elétrica após a ocorrência de um distúrbio. Assim o *self healing* veio para complementar a estrutura do sistema de distribuição de energia elétrica, tendo como uma das características principais reduzir o ônus envolvido em uma falha.

Por meio do trabalho aqui apresentado é possível declarar que as técnicas de *self healing*, quando desenvolvidas precisamente, fornecem melhorias significativas para a concessionária, desde mão de obra até os indicadores de coletividade, isto

significa que ao proporcionar maior confiabilidade, segurança, disponibilidade e manobras mais efetivas, os ganhos são visíveis para a comunidade e para a empresa.

Neste sentido, a utilização do *self healing* em religadores urbanos para a recomposição da rede elétrica é eficaz, pois com um sistema de reconfiguração robusto e eficiente traz ganhos operativos que se converte em ganhos econômicos. É certo afirmar que os dispositivos e técnicas deverão ser aperfeiçoados com o tempo, pois ficou evidente durante a elaboração deste trabalho que a concessionária pretende expandir a aplicação dessa tecnologia para toda sua área de atuação.

O desenvolvimento deste estudo voltado para área de redes de distribuição, especialmente a aplicação de *smart grid* como ferramenta de recomposição do sistema elétrico, proporcionou a aprendizagem de técnicas que não constam na grade curricular do curso de Engenharia Elétrica, portanto, é uma experiência particular que agregou conhecimentos específicos de grande valor para formação acadêmica e profissional.

Como o termo *smart grid* vem sendo usado oficialmente desde 2005, quando utilizado no artigo de Bruce F. Wollenberg e S. M. Armin, intitulado "*Toward a Smart Grid*", é considerado uma área relativamente nova e em expansão (RIVERA, R. et al., 2013). Por esse motivo abrem-se incontáveis vertentes para trabalhos futuros. Algumas sugestões seguem abaixo.

- Aprimoramento da técnica *self healing* em redes elétricas de distribuição;
- Estudo de implantação das funções de pick-up do *self healing* por sobrecarga, ou desenergização da barra da subestação;
- Técnica de integração da geração distribuída ao sistema de *self healing*;
- Estudo de atuação para o *self healing* em manobras macro, entre disjuntores de SE's.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, M.; SHEWE, P. F. **Preventing Blackouts: Building a Smarter Power Grid**. Scientific American, Estados Unidos, 2008. Disponível em: <http://sientificamerican.com/article/preventing-blackouts-power-grid/>. Acesso em: 3 abril 2019.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. Brasília: Aneel, 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 13 março 2020.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. Brasília: Aneel, 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 19 de abril 2020.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia**. Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1_Retificacao_1.pdf>. Acesso em: 19 abril 2020.

ANEEL. **Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC)**. Brasília: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 13 março 2020.

ANEEL. **Qualidade do Serviço**. Brasília: Aneel, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>>. Acesso em: 13 março 2020.

ANEEL. **Qualidade do Produto**. Brasília: Aneel, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/qualidade-do-produto>>. Acesso em: 2 abril 2020.

BASSO, D. A.; KLOOS, F. **Método de recomposição de redes de distribuição inteligentes baseados em sistemas de supervisão**. Faculdade de Pato Branco. Pato Branco. 2017. (Trabalho de Conclusão de Curso).

BERNARDO A., e. a. **Preventive assessment for combined control centre and substation-centric self-healing strategies**. CIRED, 2011.

CPFL. **Norma Técnica 2912 - Proteção de redes aéreas de distribuição - Sobrecorrente.** Versão 2.1, 2016. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-2912.pdf>>. Acesso em: 9 maio 2020.

DA SILVA, F. E. et al. **Religadores híbridos em redes de distribuição.** XXII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Curitiba: [s.n.], 2016.

DUGAN, R. C. **Electrical Power Systems Quality.** 2ª. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

ENERGISA/C-GTCD-NRM/Nº150/2018. **Critérios Básicos Para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais.** Norma de Distribuição Unificada NDU – 007 Revisão 5.0, agosto de 2018.

ELIPSE SOFTWARE. **Elipse self-healing agiliza a recomposição do sistema de energia da CEMAR,** 2015. Disponível em: <www.elipse.com.br>. Acessado em: 28 de abril 2020.

ELIPSE SOFTWARE. **Tutorial do Elipse Power: Módulo de Self healing.** Versão 5.0.49 (01/02/2019).

GOINSK, J.; SOBIERAI, R.; PEREIRA, S. **Redes De Distribuição De Energia Elétrica: Análise de soluções em smart grid para reconfiguração automática.** Revista Técnico-Científica do CREA-PR - ISSN 2358-5420 – Edição: agosto de 2019.

HOKAMA, W. S.; HELEBRANDO, A. **A experiência da CPFL na implantação do Self-healing da cidade de Campinas SP.** XXII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Curitiba: [s.n.]. 2016.

LEÃO, R. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/383524729/Apostila-Ruth-Leao-GTDE>>.

MOREIRA, R. M. M. **Análise Técnico-Econômica de Estratégias de Self-Healing em Smart Grids.** Dissertação (Mestrado), 2011.

ONUBR – Organização das Nações Unidas no Brasil. **Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7**. Publicado em 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/>>. Acesso em 11 de agosto 2020.

RIVERA, R. et al. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. Revista BNDES 40, dezembro 2013.

ROVER, F.; NASCIMENTO, D.; SOMAIO, B. C.; MORAIS T. R. ELEKTRO. **Automação inteligente de redes - Guarujá**. XXII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Curitiba: [s.n.]. 2016.

SOUZA, P. A.; HOKAMA, W.; SANTOS, C. dos; BAZANI, G.; HAAS, P. **Self-healing semicentralizado e seus benefícios para clientes com base instalada**. SIMPASE XI SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2015.

VAZ, R. R. C. **Metodologia de posicionamento de religadores e dimensionamento de redes de fibra ótica para automação de sistemas de energia**. Goiás: Universidade Federal de Goiás, 2017. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica de Computação. Goiânia: p. 198, 2017.

WIKIPEDIA. **IEC 61970**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61970>. Acesso em 4 de agosto 2020.

GLOSSÁRIO

BACKBONE: É uma rede principal para tráfego de dados entre diferentes localidades com elevado desempenho. Essa grande espinha dorsal é dividida em partes menores com a finalidade de impedir que o tráfego e a transmissão de dados sejam lentos. No entanto, por continuar a ser a rede principal, o backbone faz a conexão de todas as redes menores, sendo possível, então, acessar qualquer rede por meio dele.

CAMADA FÍSICA: Meio físico onde são definidos os níveis elétricos e modulação. Ex: EIA-232, EIA-485, Ethernet, Bluetooth, fibra ótica.

Cluster: 'Grupo, aglomerado', consiste em computadores fracamente ou fortemente ligados que trabalham em conjunto, de modo que, em muitos aspectos, podem ser considerados como um único sistema. Diferentemente dos computadores em grade, computadores em cluster têm cada conjunto de nós, para executar a mesma tarefa, controlado e programado por software.

Existem vários tipos de cluster. Os mais conhecidos são:

- Cluster de alto desempenho: também conhecido como cluster de alta performance, ele funciona permitindo que ocorra uma grande carga de processamento com um volume baixo de gigaflops em computadores comuns e utilizando sistema operacional gratuito, o que diminui seu custo;
- Cluster de alta disponibilidade: são clusters cujos sistemas conseguem permanecer ativos por um longo período e em plena condição de uso; sendo assim, podemos dizer que eles nunca param seu funcionamento; além disso, conseguem detectar erros se protegendo de possíveis falhas;
- Cluster para balanceamento de carga: esse tipo de cluster tem como função controlar a distribuição equilibrada do processamento. Requer um monitoramento constante na sua comunicação e em seus mecanismos de redundância, pois, se ocorrer alguma falha, haverá uma interrupção no seu funcionamento.

DPN 3.0: É um protocolo Mestre / Escravo com suporte de mensagens não solicitadas. Foi concebido para comunicação serial. A sua versão para redes ethernet não

modifica a estrutura interna do protocolo, o pacote é meramente encapsulado em TCP/IP ou UDP/IP. As camadas deste protocolo foram baseadas no EPA (*Enhance Performance Architecture*), com camada física, de enlace, de aplicação e de transporte, tendo uma menor quantidade de camadas que o modelo OSI utilizado no padrão IEC 61 850.

GOOSE: Protocolo de tráfego de valores digitais no barramento de processo ou bay. Utilizado para mensagens de camada 2 (enlace) usadas para mensagens com requisitos rígidos de tempo como TRIPs, comandos e mensagens simples entre IEDs. Trafegam dentro da LAN, não possuem IP (apenas MAC) e não são roteáveis. Utiliza o modelo Publicador / Assinante, usa mensagens *multicast*, enviada para um grupo de destinatários orientada a um objeto genérico através do endereço MAC de destino. A transmissão das mensagens é feita via rajada, e não tem confirmação de recebimento por ser de camada 2 (enlace) e a camada de transporte é a 4.

IEC 60870-5-103: Conhecido como IEC 103 é um protocolo padrão para controle dos sistemas de comunicação associados. Ele define um padrão que permite a interoperabilidade entre dispositivos de proteção e equipamento de um sistema de comando de uma subestação.

IEC 61850: Padrão internacional que define um modelo para protocolos de comunicação utilizados em dispositivos eletrônicos inteligentes em subestações elétricas. Faz parte da arquitetura de referência do comitê técnico da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) 57 para sistemas de energia elétrica. Os modelos de dados abstratos definidos na IEC 61850 podem ser mapeados para vários protocolos. Os mapeamentos atuais no padrão são MMS (especificação de mensagem de fabricação), GOOSE (evento de subestação orientada a objeto genérico), SV (valores medidos amostrados), e em breve Serviços Web. Esses protocolos podem ser executados em redes TCP/IP ou LANs de subestações usando Ethernet comutada de alta velocidade para obter os tempos de resposta necessários abaixo de quatro milissegundos para a retransmissão de proteção.

IEC 61970: É uma série de normas que lida com as interfaces do programa de aplicativos para sistemas de gerenciamento de energia (EMS). A série fornece um conjunto de diretrizes e padrões para facilitar:

- A integração de aplicativos desenvolvidos por diferentes fornecedores no ambiente do centro de controle;
- A troca de informações para sistemas externos ao ambiente do centro de controle, incluindo sistemas de transmissão, distribuição e geração externos ao centro de controle que precisam trocar dados em tempo real com o centro de controle;
- Fornecimento de interfaces adequadas para troca de dados entre sistemas legados e novos.

MMS (*Manufacturing Message Specification*): Protocolo de comunicação entre os IEDs e concentradores ou sistemas SCADA. Usado em mensagens de camada 7 (aplicação), trocadas entre controlador e o supervisor. Sem requisitos críticos de tempo, como informações de estado (aberto ou fechado) e valores de medidas (100ms). Utiliza o modelo Mestre / Escravo, para enviar *Report* de informações para o servidor, a atualização dos dados é feita sob demanda. Utiliza envio de mensagem bufferizada (IED envia mensagem solicitada) e não bufferizada (IED envia mensagem espontânea).

MODBUS: É um protocolo Mestre / Escravo extremamente simples desenvolvido na década de 70. Exige pouca capacidade de processamento. Não suporta função de sincronismo de tempo, e não grava eventos. As camadas deste protocolo foram baseadas no EPA (*Enhance Performance Architecture*). É muito utilizado em aplicação proprietária e tem pouca padronização.

MODELO EPA: Desenvolvido para protocolos de menor complexidade como os utilizados para automação de processos industriais e energia elétrica. Concebido para comunicação serial. Tem apenas as camadas:

1. Física
2. Enlace
3. Aplicação

MODELO OSI: Criado com o princípio de orientar o desenvolvimento de protocolos de comunicação. Organiza as tarefas em 7 camadas, cada uma com sua função, lembrando que as camadas superiores independem das inferiores, o contrário não é verdadeiro. As camadas são:

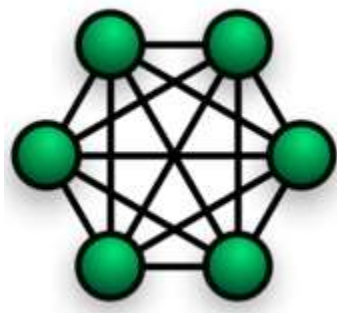
1. Física
2. Enlace
3. Rede
4. Transporte
5. Sessão
6. Apresentação
7. Aplicação

MODELO TCP/IP: Modelo de camadas criado para facilitar o entendimento das camadas OSI. Ele agrupa algumas camadas através de suas funcionalidades. Contêm 4 camadas:

1. Interface com a rede
2. Internet
3. Transporte
4. Aplicação

PU: Sistema por unidade, mais conhecido pela sua abreviatura pu, é uma forma de expressar as grandezas elétricas em um circuito de forma normalizada, com base em valores pré-determinados.

Redes Mesh: Topologia de rede tipo *mesh* ou malha. É uma tendência de mercado. Têm alta tolerância a falha. E pode ter alta confiabilidade dependendo da sua configuração, se aproximando a confiabilidade das redes com fio (99%).



Religador: Dispositivo utilizado em linhas aéreas de distribuição de energia com a função de proteger o sistema elétrico contra problemas transitórios, no intuito de reduzir o tempo de interrupção de fornecimento de energia. Ao detectar algum defeito (normalmente uma sobrecarga provocada por curto circuito) o religador realiza um ciclo pré-programado de aberturas e fechamentos até o desaparecimento do defeito ou até se considerar que o defeito é permanente. No caso de defeito permanente, o religador ficará aberto para proteger o sistema elétrico, até que seja rearmado manualmente ou via telecomando após a solução do problema que causou a atuação do religador. Os religadores podem ser classificados quanto ao meio de interrupção de arco em:

- Interrupção em óleo;
- Interrupção em gás SF₆;
- Interrupção em vácuo,

Restabelecimento de Falha

- **PRP (*Parallel Redundancy Protocol*):** Utiliza de duas redes LAN paralelas conectadas a um ou mais nós PRP para redundância.
- **HSR (*High-availability Seamless Redundancy*):** Envia informação em anel, portanto o IED faz papel de switch, podendo congestionar a rede, devido baixa capacidade de processamento dos IEDs. Pode reduzir a vida útil do IED.
- **RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*):** Loops físicos na rede fornecem caminhos redundantes, mas podem causar tráfego excessivo e saturação devido à replicação de pacotes na rede. Disponível somente em switches gerenciáveis.
- **SDN (*Software Defined Network*):** Não é um protocolo é um software de gerenciamento de redes definidas. Uma das utilidades pode ser restabelecimento de falha, podendo ser utilizada em outras infinitas funções. Computa mudanças na topologia, monta rotas, instala as regras de encaminhamento. Configuração manual exige tempo dependendo da sua complexidade. Plataforma mais utilizada para configuração é a *OpenFlow*.

SCADA: Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados Conhecido como supervisor, são sistemas que utilizam *software* para monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de redes via servidores locais ou *drivers* de comunicação.

SV (*Sampled Values*): Protocolo de tráfego de valores amostrados no barramento do processo. Utilizado para envio de mensagens camada 2 (enlace) com requisitos rígidos de tempo como valores amostrados (3ms), usada em sensores conectados à rede (TC's e TP's ópticos). Pouco utilizado, devido ao modelo tradicional ser fiado. Para integrar seu uso com os equipamentos tradicionais necessita incorporar o conceito de Merging Units que converte a informação fiada para o padrão da Norma IEC 61850.

TIME SYNC (Sincronismo de tempo)

- **SNTP:** Protocolo de sincronismo de tempo. Utilizada a camada 7 (aplicação). Aceito na norma IEC 61850, mas com precisão questionável pois depende da carga da rede. Não é possível garantir precisão de 1ms, como pede a norma.
- **PTP (IEEE 1588):** Protocolo de sincronismo de tempo com precisão de microssegundos. Utiliza camada 2 (enlace). Ainda não está totalmente disseminado, com poucos equipamentos disponíveis no mercado.
- **IRIG-B:** Não é um protocolo de rede e sim uma interface elétrica para sincronismo de tempo. Possui precisão de microssegundos.

WIRELESS: Todo tipo de comunicação sem fio, como por exemplo: bluetooth, ZigBee, Wi-fi, Wi-Max, GPRS, EDGE, 3G, UMTS. Baixa confiabilidade e disponibilidade, por isso não é apropriada para controle.

ANEXO

As imagens desse anexo fazem parte do acervo da Energisa Tocantins. São cópias das telas do supervisório local que pode ser acessado pela rede operativa da empresa.

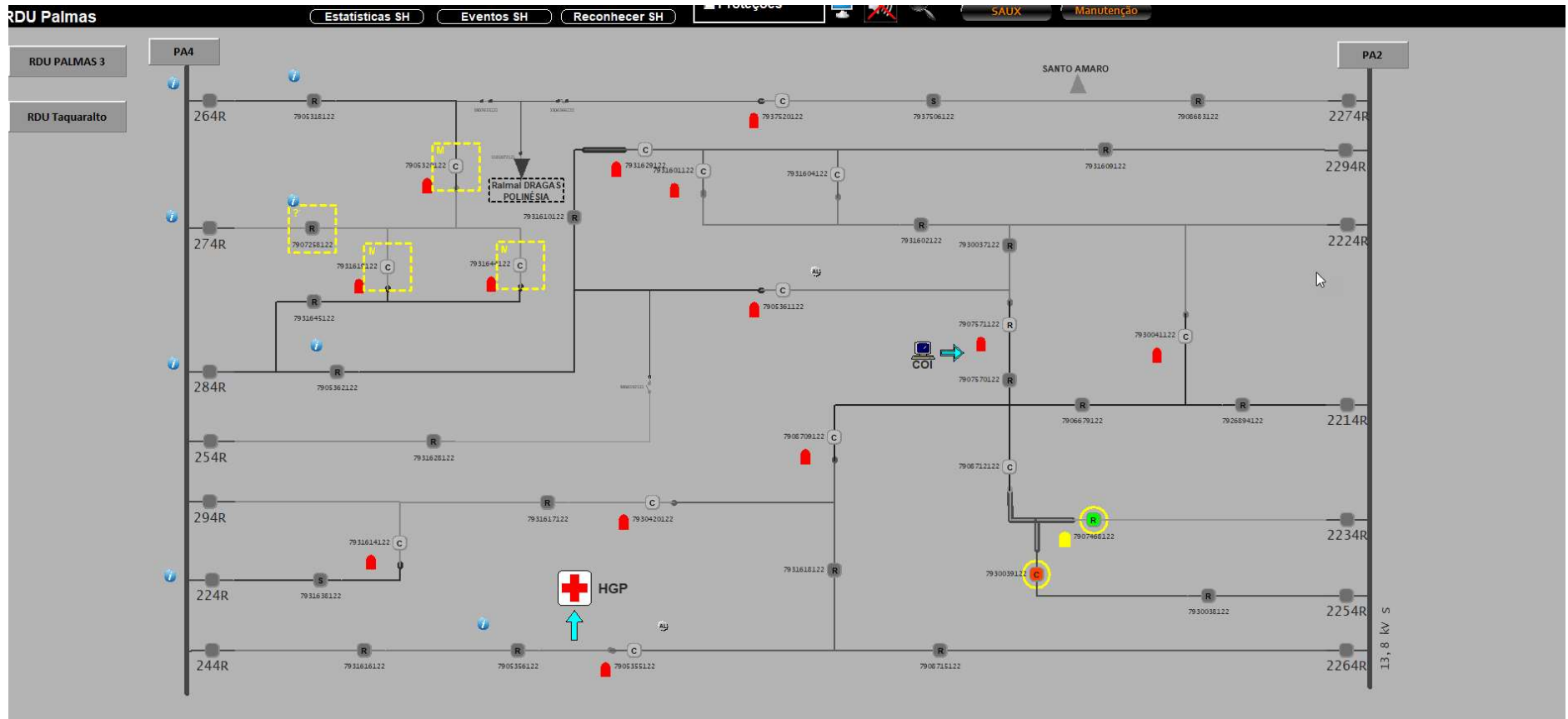


Figura 23 - Tela da RDU Palmas (SE Palmas 2 e SE Palmas 4).
Fonte: Energisa, 2020

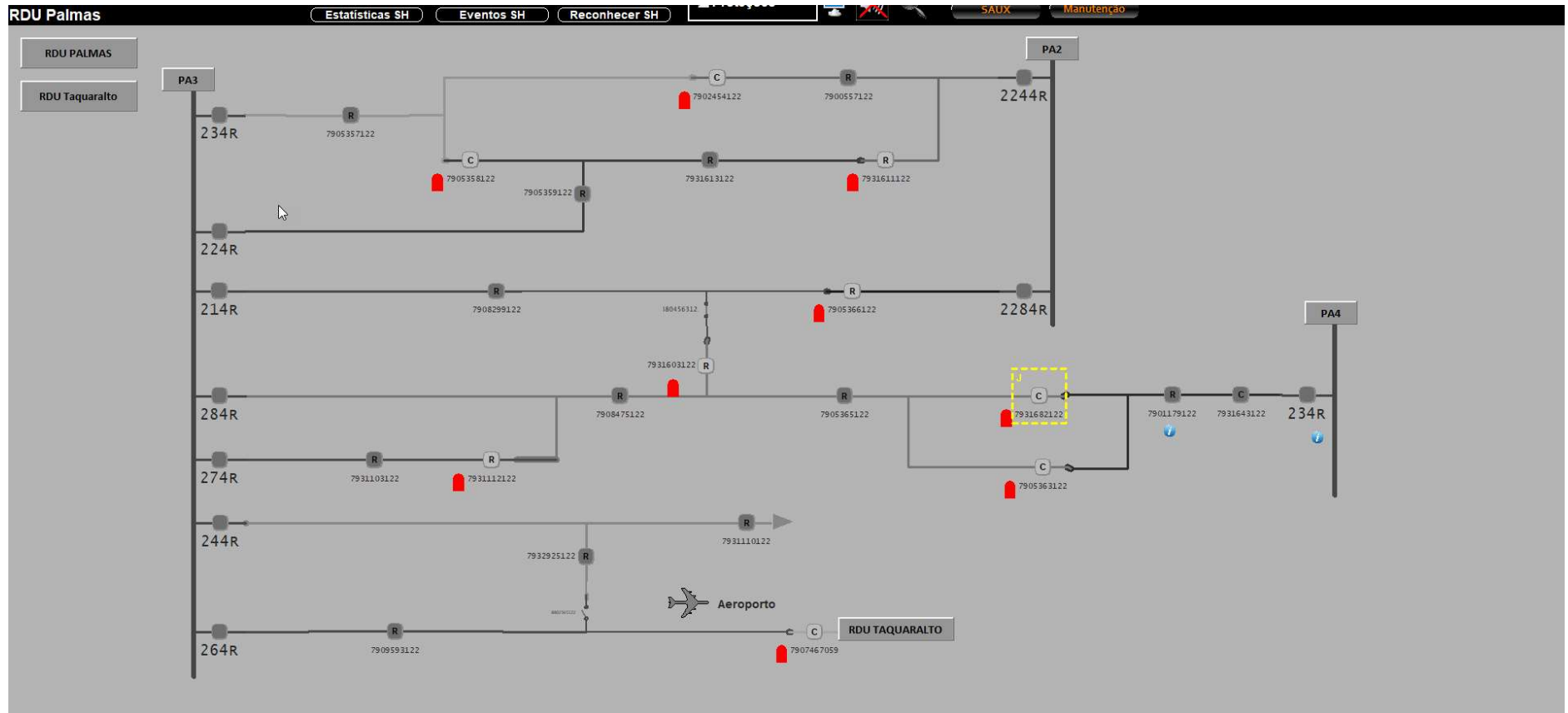


Figura 24 - Tela da RDU Palmas (SE Palmas 3 interligação com SE Palmas 2 e SE Palmas 4).

Fonte: Energisa, 2020

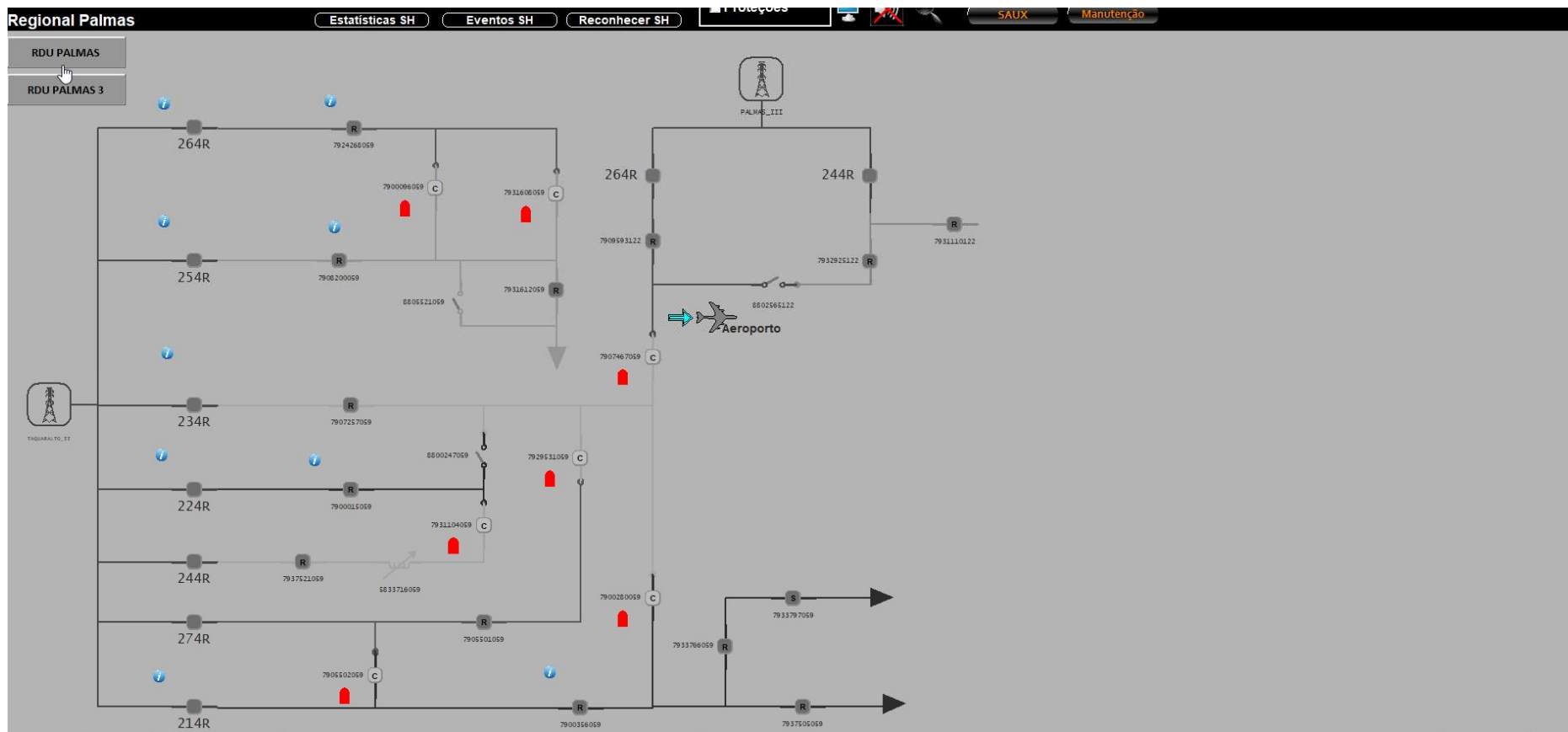


Figura 25 - Tela da RDU Taquaralto (SE Taquaralto 2 interligação com SE Palmas 3).

Fonte: Energisa, 2020

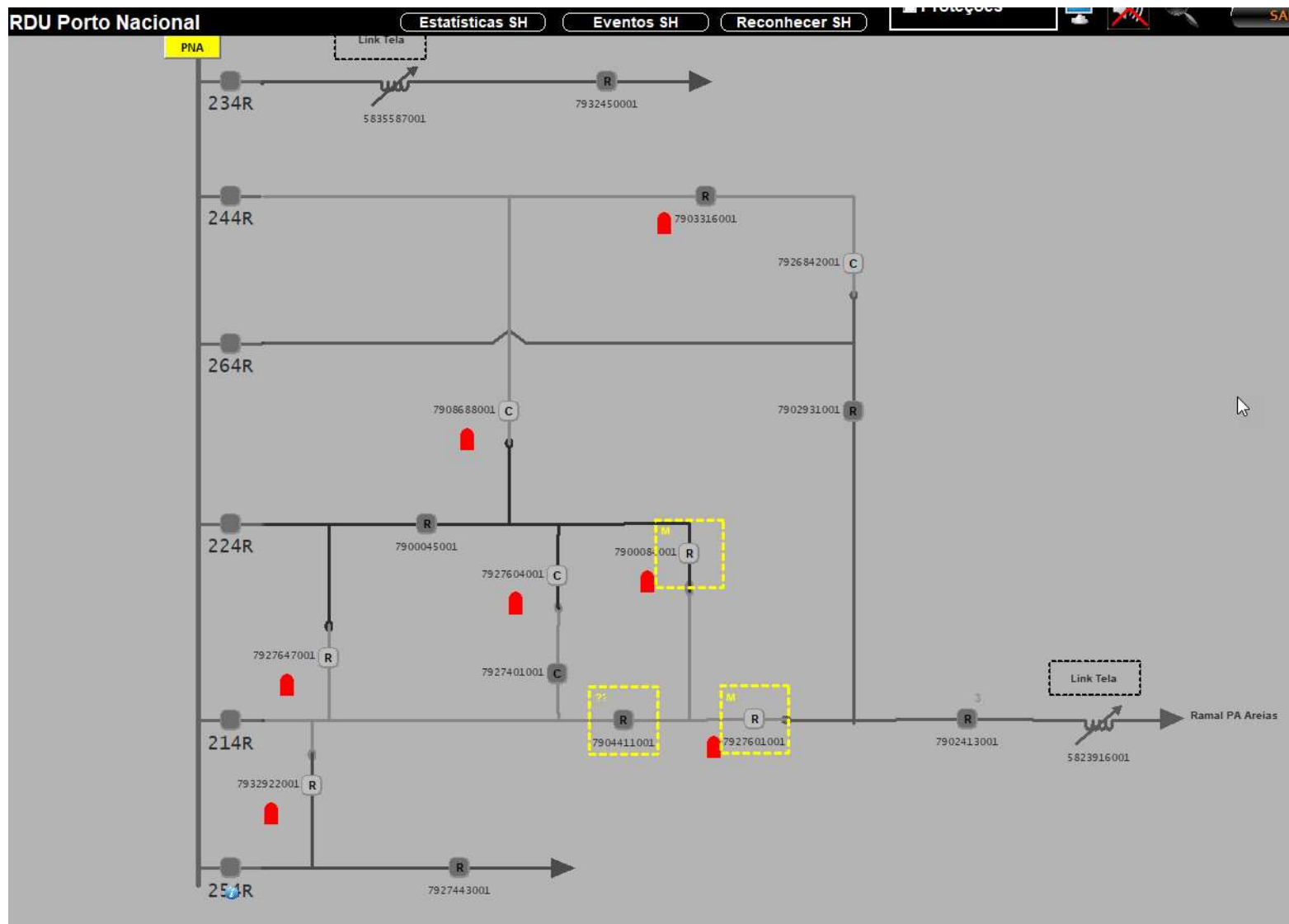


Figura 26 - Tela da RDU Porto Nacional
Fonte: Energisa, 2020

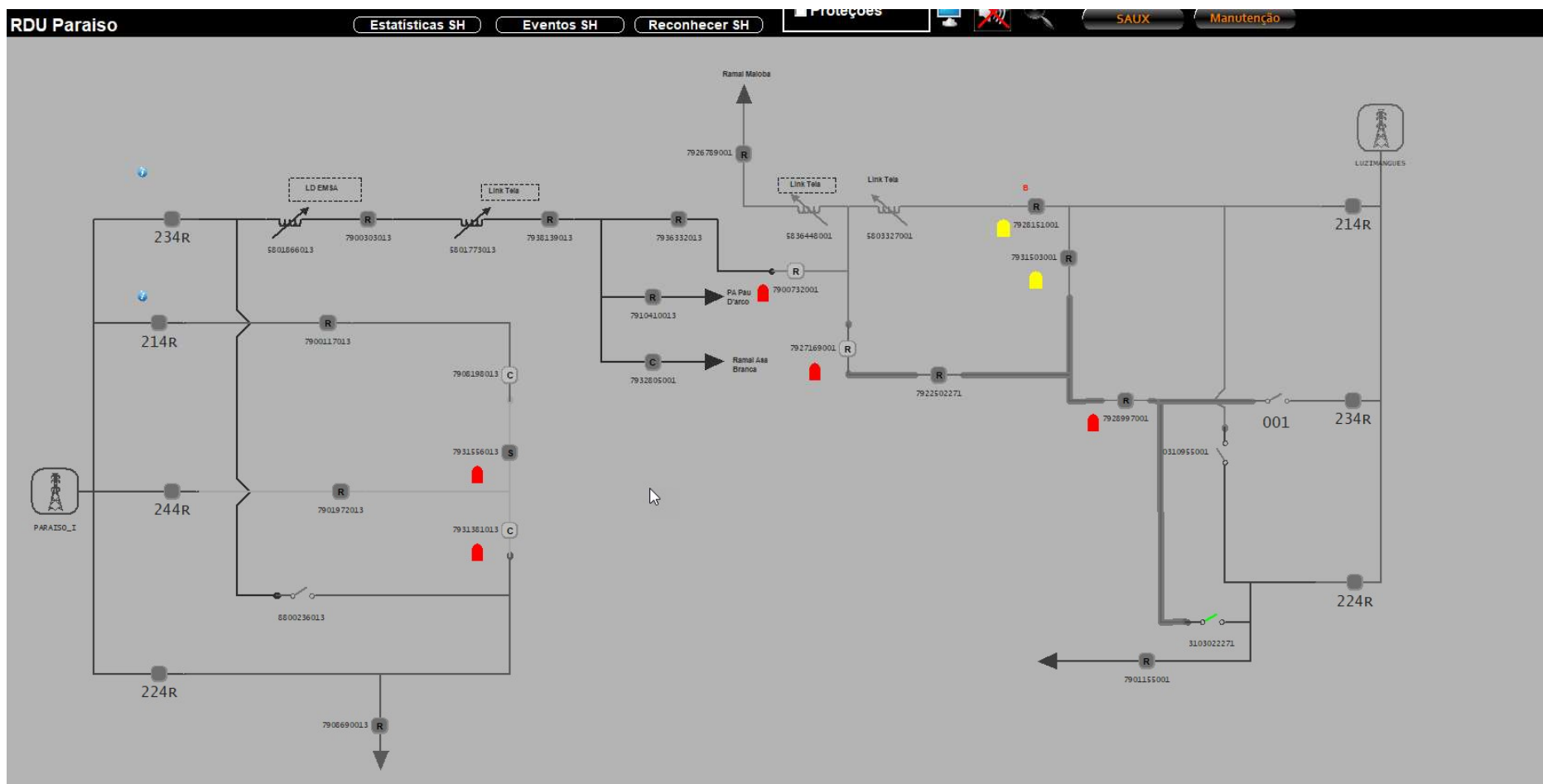


Figura 27 - Tela da RDU Paraiso (SE Paraiso 1 interligação com SE Luzimangues).
Fonte: Energisa, 2020

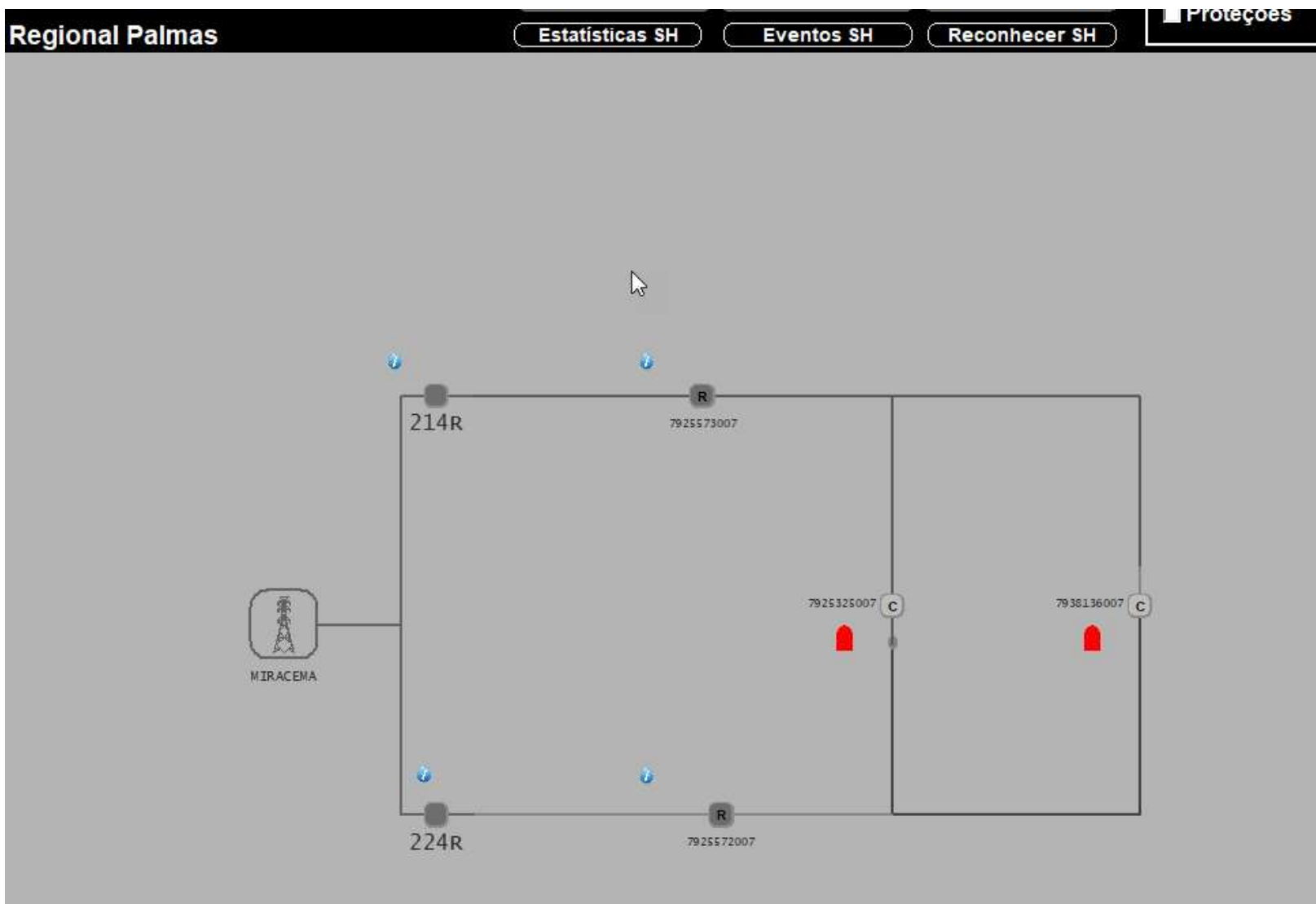


Figura 28 - Tela RDU Miracema
Fonte: Energisa, 2020

