LUIZ EDUARDO DE ANTONIO

Desenvolvimento de sistema de detecção de faltas para redes de
distribuição de energia elétrica e integrado a redes de IoT

Versão Corrigida

São Paulo

2022

LUIZ EDUARDO DE ANTONIO

Desenvolvimento de sistema de detecção de faltas para redes de
distribuição de energia elétrica e integrado a redes de IoT

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:

Sistemas de Potência

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Milana Lima dos Santos

São Paulo

2022

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de Fevereiro de 2022

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

de Antonio, Luiz Eduardo

Desenvolvimento de sistema de detecção de faltas para redes de distribuição de energia elétrica e integrado a redes de IoT / L. E. de Antonio -- São Paulo, 2021.

113 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistemas elétricos de potência 2.Distribuição de energia elétrica 3.Localização de faltas 4.Internet das coisas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao longo de minha carreira, tive a felicidade de contar com o apoio de excelentes mestres, professores e profissionais da área de engenharia e mesmo correndo o grande risco de ser injusto neste momento, gostaria de agradecer nominalmente alguns.

Ao Prof. José Carlos Valbão, que com maestria fazia brilhar os olhos dos meninos de 14 anos na escola SENAI em Guarulhos, sempre incentivando e cobrando resultados. Sua didática excelente, seu vasto conhecimento e o amor pela profissão, sem dúvidas, serviram de exemplo para centenas de alunos que tiveram o prazer de assistirem suas aulas.

Aos meus amigos da Faculdade de Engenharia São Paulo – FESP, que mesmo após 20 anos de formado, sempre estiveram ao meu lado, uma amizade eterna!

Ao meu amigo, Dr.º Alexandre de Jesus Aragão, que sempre me serviu de exemplo de superação na vida, me incentivou e me auxiliou a iniciar o mestrado. Há anos também se dedica às aulas no ensino superior.

Ao meu grande amigo e parceiro de bancada Luiz Roberto de Oliveira! Iniciamos a carreira juntos, nos ajudando sempre em muitos momentos da vida.

À minha amada esposa Sheila Midori, por todo apoio, incentivo e compreensão em toda minha carreira profissional, e não menos durante todo o Mestrado.

Às minhas filhas Camila e Milena, pela compreensão com as horas ausentes do papai!

À minha querida Mãe, que não mediu esforços para me ajudar durante a graduação, no Lato Sensu, nas minhas viagens a trabalho...Descanse em paz com Deus.

Às empresas Ecil e HartBR, por terem sempre me apoiado nessa longa jornada de estudo e trabalho.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Milana Lima, por acreditar no meu potencial e me incentivar na continuidade deste trabalho.

Ao Grupo Energisa, pela confiança, parceria e investimento no desenvolvimento do projeto, objeto dessa dissertação. Sem vosso apoio, através do programa de P&D ANEEL, não teríamos o identificador de faltas FLOCO, desenvolvido 100% no Brasil.

RESUMO

Por meio do programa de P&D ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, foi desenvolvido um identificador de faltas para redes distribuição de energia em média tensão. Como todo projeto financiado pelo programa, o quesito inovação é essencial. A equipe da HartBR, em parceria com o Grupo Energisa, idealizou o equipamento e, ao longo de 24 meses, seu desenvolvimento integral foi realizado no Brasil. Novos conceitos e tecnologias foram empregados, como a adoção de um sistema de autoalimentação, sem uso de baterias e com o uso transformadores de corrente com núcleo nanocristalino, comunicação integrada através de rádio 900Mhz, utilizando tecnologia IoT, e um sistema simples de instalação, que utiliza as chaves fusíveis convencionais, já instaladas nas redes de energia. Houve também um trabalho de pesquisa e desenvolvimento de um polímero de engenharia, para injeção das peças plásticas. Foi também desenvolvido um sistema informatizado, capaz de integrar os dispositivos com os sistemas supervisórios da concessionária de energia, realizando a conversão de protocolos, de forma transparente aos operadores. Ao final, obteve-se um equipamento inovador, atendendo a todas as classes de média tensão, objetivando uma certificação mundial através de ensaios de tipo e com baixo custo de produção. Este trabalho descreve as etapas do projeto, as análises técnicas dentre as tecnologias disponíveis e suas escolhas, bem como os resultados dos testes laboratoriais e de campo. O bom uso da verba de P&D ANEEL desenvolveu tecnologia nacional, gerou empregos, melhorias nos índices de qualidade de energia distribuída e, por consequência, melhoria da qualidade de vida da população.

Palavras chaves: Identificador de Faltas, Sinalizador de Faltas, FCI, LoRa, IoT, FLOCO, FLIR, P&D.

ABSTRACT

Through the R&D program ANEEL - National Electric Energy Agency, a fault circuit indicator (FCI) was developed for medium voltage power distribution networks. As for any project financed by this program, innovation is essential. HartBR team, in partnership with the Energisa Group, designed the equipment and, after 24 months, its whole development was carried out in Brazil. New concepts and technologies were deployed, such as the adoption of a self-power system, without using batteries and based on current transformers with a nanocrystalline core, integrated communication through 900Mhz radio, using IoT technology, and a simple installation system, which uses the conventional cutouts, already installed in the power networks. There was also a research and development work on an engineering polymer for injection of plastic parts. A computerized system was also developed, making possible the integration of the devices with the power utility's supervisory systems, performing the conversion of protocols, transparently to operators. The project reached an innovative equipment, which can be applied in all medium voltage classes, aiming a worldwide certification through type tests and with low production costs. This work describes the stages of the project, the technical analysis of the available technologies and their choices, as well as the results of laboratory and field tests. The R&D program of ANEEL was essential for developing national technology, jobs generation, improvements in the quality metrics for utilities and, consequently, improvement in the population's life quality.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

API - Application Programming Interface - Interface de Programação de Aplicativos

ETSI - European Telecommunications Standards Institute – Instituto Europeu de Padrões para Telecomunicações

FCC – Federal Communications Commision – Comissão federal de Comunicações

FCI – Fault Circuit Indicator – Identificador de Falhas

FLIR – Fault Location, Isolation and Restoration – Localização de Falhas, Isolação e Reestabelecimento

GPS – Global Position System – Sistema Global de Posicionamento

HTTP - Hypertext Transfer Protocol – Protocolo de Transferência de Hipertexto

IED – Intelligent Electronic Device – Dispositivo Eletrônico Inteligente.

IoT – Internet of Things – Internet das Coisas

ISM - Industrial, Scientific and Medical – Industrial, Ciência e Médica.

LATAM – Latin America – América Latina

LED – Light Emission Diode – Diodo Emissor de Luz

MIT – Massachusetts Institute of Technology – Instituto de Tecnologia de Massachusetts

NOC – Network Operation Center – Centro de Operação da Rede

RMS – Root Mean Square – Valor Médio Quadrático

SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition – Supervisório de Controle e Aquisição de Dados

TC – Transformador de Corrente

TCP/IP - Transmission Control Protocol - Protocolo de Controle de Transmissão. IP - Internet Protocol - Protocolo de Internet

USA – United States of America – Estados Unidos da América

UV – Ultravioleta

VPN – Virtual Private Network – Rede Privada Virtual

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	16
3. MOTIVADORES	16
3.1 Pesquisa de Anterioridade.....	20
4. OBJETIVO DESTE TRABALHO	23
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E TECNOLÓGICA	24
5.1 Sistemas de Self Healing	24
5.1.1 Self Healing descentralizado	25
5.1.2 Self healing semi-centralizado.....	27
5.1.3 Self Healing Centralizado.....	28
5.1.4 Comparativo entre as soluções de Self Healing	28
5.2 Redes de IoT	30
5.2.1 Rede SigFox	31
5.2.2 Rede LoRa	35
5.2.3 Segurança para a informação em redes de IoT	39
5.2.4 Conclusões sobre as redes IoT.....	41
5.3 TC com Núcleo Nanocristalino	43
5.3.1 Histórico	43
6. DETALHAMENTO DA SOLUÇÃO	46
6.1 Desenvolvimento do Sistema Arpeggio	47
6.2 Instalação por Vara de Manobra	52
6.3 Detecção da Presença de Tensão	54
6.4 Medição de Corrente Instantânea.....	55
6.5 Sistema de autoalimentação	56
6.6 Supercapacitores	57
6.7 GPS integrado	58

6.8	Acelerômetro.....	58
6.9	Seletor de Fase	59
6.10	Sistema de instalação e configuração “Zero Touch Deployment”	60
6.11	Especificação Geral	62
7.	ETAPAS DO PROJETO	63
7.1	Concepção.....	63
7.2	Definição de polímeros	63
7.3	Prototipagem.....	67
7.3.1	Prototipagem Mecânica	67
7.3.1	Desenvolvimento e Prototipagem Eletrônica	70
8.	ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DE PROTÓTIPO	74
8.1	Ensaio de Ciclo de Temperatura	75
8.2	Teste do GPS.....	78
8.3	Parametrização via Terminal Android	81
8.4	Alarme de Detecção de Média de Tensão.....	83
8.5	Alarme de Falta Transitória e Permanente.....	84
8.6	Ensaio de Corrente.....	88
8.7	Ensaio de carregamento dos supercapacitores	92
8.8	Ensaio de Autonomia sem Corrente	94
8.9	Ensaio de Integração ao Sistema SCADA	95
8.10	Efeito da corrente elétrica nos condutores adjacentes	99
8.11	Teste de corrente de trip.....	101
8.12	Teste de reset.....	101
8.13	Tempo de Resposta	102
8.14	Ensaio de Campo	104
9.	CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS	108
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

1. INTRODUÇÃO

É notória a busca constante pela melhoria dos serviços prestados pelas companhias de distribuição de energia elétrica aos seus clientes. A melhoria constante nos indicadores de qualidade é traduzida na forma de intervalos e frequências das interrupções do fornecimento de energia aos consumidores, cujos níveis considerados adequados, são definidos pela comunidade técnica internacional e pelos órgãos reguladores do setor de energia.

As redes de distribuição de energia elétrica são, por natureza, susceptíveis a falhas. Essas falhas podem ocorrer por diversos motivos, sendo que as mais frequentes são as decorrentes de intervenções humanas ou mesmo de animais silvestres, os fenômenos climáticos e o próprio desgaste dos materiais isolantes, causado pela ação do tempo e do clima.

Neste contexto, destaca-se o emprego de dispositivos indicadores de falta em sistemas de distribuição de energia elétrica. O emprego desses dispositivos permite melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica prestado aos consumidores por meio da redução do tempo de religamento da rede e dos custos operacionais decorrentes da maior eficiência na localização de pontos de faltas de natureza permanente. Apesar de tais dispositivos serem aplicados tanto em redes aéreas como em redes subterrâneas, este trabalho de pesquisa visa detalhar sua aplicação apenas em redes aéreas. Exemplos de faltas na rede elétrica de distribuição são curtos-circuitos, rompimentos de cabos ou mesmo eventos de sobretensão.

No Brasil, os indicadores de falta ganharam importância devido à grande extensão de alimentadores de distribuição, construídos para atendimento de unidades consumidoras situadas em zonas rurais, o que dificulta a inspeção da rede para localização do ponto defeituoso pelas equipes de manutenção (USIDA, 2011).

A rede conta com equipamentos de proteção, que isolam o trecho defeituoso e extinguem, no menor tempo possível, a corrente de curto-circuito, protegendo assim a rede elétrica. Entretanto, os consumidores conectados ainda serão afetados.

No caso de uma falta permanente, para a qual as tentativas de reestabelecimento, sejam elas manuais ou automáticas — realizadas por religadores —, não surtam efeito, é

necessária a intervenção técnica de equipe da concessionária para localizar e reparar o circuito danificado.

A utilização de indicadores de falta promove a redução do tempo de localização do defeito e consequentemente no reparo do circuito, o que auxilia a melhora dos índices de qualidade de serviço da concessionária.

A localização de defeitos, em dispositivos tradicionais, pode ser obtida pelo piscar de LEDs nos indicadores, conforme representado na Figura 1. Dessa forma, a equipe de campo percorre o circuito do alimentador, buscando os dispositivos que foram disparados pelo evento de sobrecorrente. Nota-se que, a cada seção da rede, é colocado um indicador para orientar a equipe sobre o caminho a ser percorrido, de forma a localizar a falta no menor tempo possível. Em um mesmo trecho do circuito pode ser adicionado mais de um indicador; os dispositivos após o ponto de falta não serão disparados, o que define de forma mais precisa o ponto de defeito.

Figura 1 - Representação do Sistema de Localização de Falhas.

Os países nórdicos foram os primeiros do mundo a regulamentar os mercados de energia e desenvolver mecanismos de incentivo à redução das interrupções de fornecimento e da quantidade de consumidores afetados. Sistemas integrados de *software* e *hardware* para localização de falta provaram-se uma solução economicamente viável, que reduzem efetivamente a aplicação de penalidades pelo órgão regulamentador. A tendência é que a maioria dos países adotem essas estruturas, a partir da maior exigência dos requisitos de

qualidade por parte dos clientes, bem como da maior oferta de sistemas disponíveis para essa finalidade (BJERKAN, 2009).

Na década de 90, o setor de energia no Brasil começou a passar por profundas mudanças, a partir do início do processo de privatização das empresas de distribuição de energia. Em 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada, com o papel de regular, fiscalizar, estabelecer tarifas e promover as atividades de outorgas de concessão. Dentre outras ações, a ANEEL estabeleceu regulamentações referentes à qualidade do fornecimento da energia elétrica (KAGAN, 2009), com as Resoluções Normativas nº 024/2000 e nº 505/2001 e, posteriormente, os Procedimentos de Distribuição (PRODIST, 2021), com sua primeira versão aprovada em 2008, tendo sua última revisão datada de 26/12/2018. O PRODIST estabelece diversos indicadores que mensuram o desempenho dos serviços prestados por essas companhias, de forma a medir a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras privadas e estatais no Brasil.

A qualidade no fornecimento de energia está relacionada à qualidade do produto, também à qualidade do serviço e à qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2018). A primeira pode ser entendida como a qualidade da forma de onda disponibilizada aos consumidores; a segunda, como a continuidade do fornecimento da energia elétrica.

A continuidade do serviço é afetada por interrupções no fornecimento de energia, provocadas por falhas no sistema elétrico, desligamentos programados, faltas e perturbações nos circuitos

O PRODIST é formado por oito módulos, a saber:

- MÓDULO 1 – Introdução
- MÓDULO 2 - Planejamento da expansão do sistema de distribuição
- MÓDULO 3 - Acesso ao sistema de distribuição
- MÓDULO 4 - Procedimentos operativos do sistema de distribuição
- MÓDULO 5 - Sistemas de medição
- MÓDULO 6 - Informações requeridas e obrigações
- MÓDULO 7 - Cálculo de perdas na distribuição
- MÓDULO 8 - Qualidade da energia elétrica
- MÓDULO 9 - Ressarcimento de danos elétricos
- MÓDULO 10 - Sistema de informação geográfica regulatório
- MÓDULO 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

O módulo 8 estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações. Este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Com o setor regulado, as concessionárias possuem metas de qualidade, que, caso não sejam cumpridas, podem ter, como consequência, a não renovação da concessão, além de aplicação de multas pelo órgão gestor. Conforme Decreto 8.461/2015, “*as renovações devem atender aos critérios de eficiência com relação à qualidade do serviço prestado; eficiência com relação à gestão econômico-financeira; racionalidade operacional e econômica; e modicidade tarifária*”.

Com relação à qualidade de serviço, o PRODIST estabelece os parâmetros a seguir:

- Tempo Médio de Preparação (TMP):

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

- Tempo Médio de Deslocamento (TMD):

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD(i)}{n} \quad (2)$$

- Tempo Médio de Execução (TME):

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE(i)}{n} \quad (3)$$

- Tempo Médio de Atendimento a Emergências (TMAE):

$$TMAE = TMP + TMD + TME \quad (4)$$

- Percentual do número de ocorrências emergenciais com interrupção de energia (PNIE):

$$PNIE = \frac{NIE}{n} \times 100 \quad (5)$$

- TMP = tempo médio de preparação da equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos;
- TP = tempo de preparação da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos;
- n = número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado;
- TMD = tempo médio de deslocamento da equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos;
- TD = tempo de deslocamento da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos;
- TME = tempo médio de execução do serviço até seu restabelecimento pela equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos;
- TE = tempo de execução do serviço até seu restabelecimento pela equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos;
- TMAE = tempo médio de atendimento a ocorrências emergenciais, representando o tempo médio para atendimento de emergência, expresso em minutos;
- PNIE = percentual do número de ocorrências emergenciais com interrupção de energia elétrica, expresso em %;
- NIE = número de ocorrências emergenciais com interrupção de energia elétrica.

Dessa forma, investimentos constantes são feitos no setor, para que as concessionárias de energia possam, ao menos, garantir o cumprimento das metas estabelecidas em contrato de concessão, visando, não somente o ganho em qualidade nos serviços, mas também a eficiência na operação.

Em termos de eficiência, é importante ressaltar que a base de remuneração das concessionárias de distribuição consiste no montante de investimentos realizados pelas distribuidoras na prestação dos serviços, que será coberto pelas tarifas cobradas aos consumidores (ANEEL, 2018); portanto, a Base de Remuneração é estabelecida por meio da avaliação dos ativos da concessionária e não pelo montante de energia fornecida (distribuída). Dessa forma, a eficiência no processo, buscando a redução dos tempos médios de atendimento, a redução das penalidades e o cumprimento das metas é o que representa ganho financeiro real à concessionária.

2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Com base na introdução ao tema (capítulo 1), motivação (capítulo 3) e objetivos desta pesquisa (capítulo 4), o capítulo 5 irá abordar a revisão bibliográfica e tecnológica que embasou a proposta de solução. No capítulo 6 é detalhada a solução desenhada e seus subsistemas. No capítulo 7, é apresentada a arquitetura de rede para suportar os indicadores de falta e outros dispositivos de automação. Por fim, o último capítulo apresentará as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

3. MOTIVADORES

Muitos estudos têm sido feitos para investigar o custo de interrupção no fornecimento de energia elétrica em diferentes tipos de redes. A maioria desses estudos concluem que o investimento em redes de comunicação e identificadores de falta têm retorno de investimento muito rápido (BJERKAN, 2008).

As soluções existentes no mercado, apesar de atenderem tecnicamente os requisitos técnicos necessários para detecção e localização das faltas, possuem custo elevado para o mercado brasileiro e/ou dependem de investimentos consideráveis em redes de telecomunicações.

Equipamentos importados, de maior custo, possuem além da função básica de localização de faltas, funções mais complexas, como oscilografia de eventos. Contudo, utilizam redes de comunicação 3G/4G, que possuem custo elevado para essa operação, bem como uma baixa confiabilidade. Devido a características intrínsecas de processamento de dados, consumo de energia e tecnologia de comunicação, tais equipamentos possuem custo

elevado para o mercado brasileiro, inviabilizando sua utilização em larga escala (SENTIENT, 2020).

Indicadores de falta mais simples, como os de origem chinesa, comercializados em diversos países com marcas diferentes, apesar de terem baixo custo, não possuem qualquer tipo de comunicação, limitando-se a sinalizar uma falta localmente, através de LEDs piscantes.

Em suma, não se encontram no mercado, atualmente, indicadores de falta de baixo custo, que se integrem a redes de IoT “*Internet das Coisas*”, utilizando-se para tanto, redes e protocolos de comunicação específicos para esse fim, e que possam efetivamente contribuir à concessionária de distribuição, para a melhoria do serviço prestado à população.

Ademais, com a expansão de instalações baseadas em energia renovável no sistema, as distribuidoras de energia irão experimentar uma mudança drástica das redes, não apenas em termos de desempenho, mas também a respeito da filosofia de proteção (ANGELES, 2017). Assim, a caracterização das faltas é necessária para determinar as configurações dos dispositivos de proteção. Com isso, estudos de caracterização de faltas são usados para determinar o desempenho e os valores de falta de todos os barramentos do sistema de energia, considerando o impacto de geração distribuída.

Em 2019, o mercado de energia solar no Brasil cresceu mais de 212%, alcançando a marca de 2,4 GW instalados. Segundo a ANEEL, foram instalados mais de 110 mil sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração, correspondendo a R\$ 4,8 bilhões e 15 mil profissionais trabalhando na área (PORTALSOLAR, 2021). À medida que mais unidades são integradas à rede de distribuição, as diferentes fontes de energia e as características de falta representam grandes desafios ao princípio de proteção convencional e ao método de localização de seção defeituosa. Neste cenário, indicadores de falta que possam detectar a inversão do fluxo de potência na rede passam a ser essenciais para a correta tomada de decisão do operador da rede.

A geração distribuída de energia é outro fator motivador para adoção de mais equipamentos de monitoramento da rede de distribuição, como os indicadores de falta, pois possuem a capacidade de reportar as condições de operação da rede de distribuição, fornecendo uma base de dados valiosa para a concessionária, não só para a rápida tomada

de decisão em caso de falhas, conforme mencionado, mas também para o planejamento de sua expansão e definição de estratégias de proteção.

O acesso da geração distribuída na rede de distribuição transforma a estrutura radial tradicional em estrutura de múltiplas potências, com enorme mudança no tamanho e orientação do fluxo de energia, influenciando a distribuição de tensão da rede de distribuição (KAI, 2015).

Outro fator motivador para a aplicação de indicadores de falta, de forma massiva pelas concessionárias, é o mercado de carros elétricos. Estudos recentes publicados pela Bloomberg apontam que, em 2040, 35% dos carros vendidos no mundo serão elétricos, conforme Figura 2.

Figura 2 - Mercado de Veículos Elétricos - Fonte: Bloomberg, 2021.

A integração de veículos elétricos com a rede de energia é discutida há vários anos e, desde o início, diferentes aspectos estão em foco nos trabalhos de pesquisa publicados. O aumento da demanda de eletricidade de um número crescente de veículos elétricos foi identificado como um desafio ao sistema de distribuição já em 1998 e levou ao desenvolvimento inicial de uma estratégia de nivelamento de carga para baterias de veículos, a fim de evitar a criação de novos picos na curva de demanda de eletricidade (KOYANAGI, 1998).

A expansão de energias renováveis e a introdução de grandes cargas estocásticas, como veículos elétricos, introduzem geração e cargas intermitentes, o que dificulta o processo de controle. (KHAYYER, 2012).

Dessa forma, a adoção massiva de indicadores de falta, com capacidade de monitoração da corrente de carga dos circuitos, instalados de forma descentralizada, coletando informações de todos os circuitos da rede de distribuição, passa a ser essencial.

Adicionalmente, o controle da geração distribuída requer muitos dispositivos eletrônicos de potência, que produzem harmônicos ao interromper e religar a rede com frequência. Os circuitos paralelos na geração distribuída aumentarão as correntes de curto-circuito, que dependem de muitos fatores, como o tipo técnico da geração, modo de operação, capacidade, formas de interface com o sistema e o uso da tecnologia. Essa alteração afetará as configurações da proteção de sobrecorrente original. De acordo com a posição relativa do ponto de curto e o ponto de acesso à geração distribuída, a corrente de curto-circuito no equipamento de proteção mudará drasticamente. Portanto, o valor atual do equipamento de proteção requer redefinição. O acesso à informação de forma dinâmica, provida por dispositivos como os indicadores de falta, que possuem custo baixo e atendem perfeitamente a essa função, será mandatório para a rápida e efetiva reconfiguração da proteção.

Frente a esse cenário de mudanças profundas na filosofia de automação e proteção das redes de energia, em 2017, o grupo Energisa, a sexta maior empresa de energia em número de consumidores do Brasil, organizou um projeto com foco no desenvolvimento de uma solução para “Melhoria da confiabilidade, rapidez e precisão na localização de faltas, visando a diminuição das faltas e sua duração”. Segundo levantamentos da Energisa (TR-01 projeto P&D: Fault Location Optimization - F-LOCO, 2018), as principais razões diretas para falta de energia são:

- Fenômenos naturais (vento, chuva e descargas atmosféricas)
- Vegetação
- Rompimento de cabos
- Falhas de equipamentos (isoladores, disjuntores e religadores)
- Animais em contato com a rede
- Colisões com equipamentos de rede

As principais razões indiretas incluem:

- Falhas de telecomunicação durante recuperações do sistema
- Ausência de gestão efetiva de alarmes
- Falhas de baterias
- Falhas no sistema de proteção
- Ausência de alternativas na rede para isolar seções de falta
- Ausência de gestão proativa de eventos externos
- Equipamentos obsoletos

Os desafios para a solução dos problemas relatados pela Energisa englobavam:

- O processo de identificação das faltas depende tipicamente de chamadas telefônicas dos consumidores para o “*call center*” ou avisos de equipes de campo;
- Há baixo grau de monitoramento da rede elétrica, devido à indisponibilidade de estrutura de telecomunicações e de equipamentos com função de localização de falta;
- Inexistência de instrumentos para confirmar informações dos consumidores;
- Falta de precisão na localização da falta;
- Problemas com integração de sistemas;
- Falta de recursos para altos investimentos em redes de telecomunicações.

O Grupo Energisa, com apoio da consultoria Mirow & Co, organizou um evento em setembro de 2017, onde a comunidade de P&D do Brasil se reuniu para discutir o tema. O grande desafio, de fato, era desenvolver um dispositivo e um sistema eficiente de localização de falta, com baixo custo, para garantir a adoção em massa pelo Grupo Energisa.

Várias empresas e institutos de pesquisa apresentaram soluções e a proposta vencedora representa o resultado deste trabalho, financiado pela ANEEL, com verba de P&D. O projeto em questão está registrado sob o número P&D 00405-1804/2018.

3.1 Pesquisa de Anterioridade

As primeiras referências encontradas sobre dispositivos de identificação de faltas datam da década de 40. A reconstrução da Europa, após a Segunda Guerra Mundial, fez surgir oportunidades de se aplicar novas ideias a problemas antigos, como a localização de curtos-circuitos em cabos de energia subterrâneos (ANGERER, 2001).

Nessa época, dispositivos eletromecânicos eram instalados ao longo das linhas de distribuição e, quando ocorria um curto-circuito, uma bandeirola era ativada. A equipe de manutenção então percorria o circuito, rearmando os dispositivos. A falta era então encontrada entre o último dispositivo com a bandeirola acionada e o primeiro que não havia sido acionado.

Os primeiros dispositivos indicadores de falta saíam de fábrica ajustados para atuar com correntes pré-definidas e precisavam ser rearmados manualmente pela equipe de campo. Esse tipo de procedimento, de rearme manual, ainda é necessário para grande número de dispositivos comercializados atualmente (ANGERER, 2001).

Dessa forma, quando da ocorrência de uma falta no sistema de distribuição de energia elétrica, todos os indicadores de faltas a montante do ponto de incidência indicavam falta, o que exigia muitas operações de rearme. Além desse inconveniente, esses dispositivos possuíam uma taxa de erros relativamente elevada, principalmente no que se refere à não identificação de faltas. Esse aspecto frustrou inicialmente as distribuidoras quanto ao seu emprego em larga escala (BACALINI, 2011).

Pesquisas informais na internet apontam que o primeiro fabricante de indicadores de falta seria a empresa Horstmann, fundada pelo engenheiro Heinrich Horstmann. A empresa continua em plena operação, fabricando dispositivos para detecção de falta, entre outros produtos. (HORSTMANNGBH, 2019)

Nos anos 70, diversos tipos de indicadores de falta foram introduzidos no mercado, com rearmes por tensão, corrente e tempo. No momento da falta, o dispositivo detectava o aumento de corrente, seguido de ausência de tensão, o que caracteriza uma falta permanente, disparando a indicação de falta (na época feita por uma bandeirola mecânica). Com o reestabelecimento do circuito, as condições de corrente e/ou tensão voltavam ao normal, e um circuito analógico detectava essa condição, rearmando o dispositivo automaticamente. O rearme automático por tempo ocorria após um certo período de sinalização de falta, independentemente das condições da rede (BACALINI, 2011).

Ainda nessa época, os primeiros dispositivos indicadores de falta alimentados por baterias foram introduzidos no mercado. Para atender uma demanda do mercado norte-americano, a empresa Horstmann desenvolveu os primeiros indicadores de falta com sinalização por LED e alimentados por bateria (ANGERER, 2001).

O avanço no desenvolvimento dos dispositivos com rearme automático representaram redução no custo de operação, pois não havia mais necessidade de se deslocar equipes de campo para rearmar os indicadores. Entretanto, apesar das vantagens do uso de baterias nos indicadores, o custo com a manutenção nos dispositivos passou a ser considerada, principalmente com relação à troca de baterias, uma vez que equipes de campo precisavam ser deslocadas para realizarem esse serviço, seja de forma preventiva ou corretiva.

No mercado atual, existem indicadores de falta com comunicação, possibilitando a integração com o centro de operação da concessionária, permitindo o recebimento do status operativo dos dispositivos. Apenas em 1987 iniciou-se o desenvolvimento de dispositivos para linhas aéreas com comunicação via rádio frequência para a troca de informações com o centro de controle por meio do sistema supervisório, também conhecido como SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) (USIDA, 2011).

Indicadores de falta não direcionais, ou seja, que não podem detectar a inversão do fluxo de potência, tem sido usados mundialmente para rastrear faltas em redes de distribuição, reduzindo o tempo de reestabelecimento das redes (BJERKAN, 2009). Entretanto, os circuitos de distribuição estão migrando de uma arquitetura radial para anel.

Diversas metodologias e outros sistemas de localização de falta em redes de distribuição têm sido desenvolvidos. A literatura apresenta diversas abordagens para a localização de faltas em redes de distribuição. Como exemplo, um método de localização de faltas utilizando análise direta do circuito (CHOI, 2004) que pode ser aplicado em qualquer sistema elétrico, independentemente da condição de equilíbrio de fase. TRINDADE (2014) apresenta um método que utiliza os valores de tensão obtidos nos medidores instalados na rede de média tensão para estimar a corrente de falta, utilizando a matriz de impedância de barras do sistema. O método apresenta problemas de múltipla estimação, caracterizando mais de uma barra como possível local da falta, mas que podem ser sanados utilizando uma infraestrutura de medição avançada.

No trabalho de JAVADIAN (2009), é utilizada uma abordagem com redes neurais do tipo MLP (Perceptron de Multicamadas) para determinar o tipo de falta e a sua localização exata em sistemas de distribuição, incluindo a presença de geração distribuída. Depois de determinar o tipo de falta, normalizando a corrente, a rede neural treinada identifica a localização exata de ocorrência do defeito.

Porém, uma das fragilidades desses métodos inteligentes, que se baseiam em dados obtidos de outros dispositivos, ou que realizam cálculos de impedância de trechos da rede de distribuição, é justamente a necessidade de um “treinamento” prévio do sistema, que muitas vezes têm elevado custo computacional. Tais soluções também dependem de um nível de tecnologia já implantado nas redes de distribuição, como dispositivos com comunicação remota, medidores inteligentes, oscilógrafos e religadores com função de localização de faltas, que seguramente as concessionárias no Brasil ainda não possuem de forma abrangente.

PEREIRA (2009) propõe um algoritmo baseado no cálculo de fluxo de carga, baseando-se em medições de afundamentos de tensão ao longo do alimentador. Este método se mostrou eficiente, porém, novamente, sensível à quantidade e à localização dos pontos de medição. O estudo realizado por NOVSEL (1998), apresentou um modelo de mapeamento de tensão, o qual foi dado o nome de Zona de Tensão Reduzida (ZTR), onde é determinado o trajeto da falta, fazendo uma busca pelos menores valores de desvio de tensão ao longo do circuito do alimentador, no momento de um curto-circuito. É estabelecido um limiar de tensão, abaixo do qual elas são consideradas dentro da ZTR. Esse método também não analisa o impacto da geração distribuída.

O trabalho de SANTOSO (2014) analisa o impacto da conexão de um gerador distribuído em métodos de localização de faltas, baseados em impedância, e avalia qual o comportamento da falta no sistema de distribuição e quais são as principais fontes de erros, propondo otimizar a aplicação desses métodos para um melhor desempenho dos algoritmos.

4. OBJETIVO DESTE TRABALHO

A pesquisa aplicada tem como objetivo desenvolver um novo equipamento, atendendo às demandas identificadas pelo Grupo Energisa, visando a melhoria da qualidade de energia ao consumidor, mensurada pelos indicadores do PRODIST.

Este trabalho descreve toda a pesquisa realizada para o desenvolvimento de um sistema para auxílio na localização de faltas, para concessionárias de distribuição de energia, visando a monitoração da corrente de carga da rede, detecção de curtos-circuitos e auxiliando na localização física das faltas, buscando reduzir o tempo de deslocamento de equipes e fornecendo uma base de dados confiável ao centro de operação para rápida

tomada de decisão, principalmente em arquiteturas para redes de distribuição com topologia em anel, considerando ou não filosofias de *self-healing*. *Self-healing* é a capacidade que a rede tem de isolar o problema, minimizar o número de clientes afetados e restabelecer o estado normal, o mais rápido possível e com a menor intervenção humana possível, com decisões automáticas do sistema, reduzindo o deslocamento de equipes (OHARA, 2009).

A solução proposta possui baixo custo de fabricação e instalação. O princípio se baseia no desenvolvimento de um indicador de faltas, a ser instalado em base fusível convencional das redes de média tensão, até 38kV. O dispositivo é autoalimentado, dispensando a utilização de baterias, incluindo supercapacitores e um pequeno painel solar flexível, do tipo OPV (*Organic Photo Voltaic*). O dispositivo também possui rádio para redes IoT, no padrão LoRa, possibilitando sua integração com sistemas SCADA, informando localização e grandeza da falta detectada, além de outros dados a serem detalhados mais adiante.

Os conceitos de hardware e softwares aqui descritos visam contribuir à comunidade acadêmica, focada no desenvolvimento de novas tecnologias, mais precisamente em circuitos de baixo consumo de energia, soluções alternativas ao uso de baterias, sistemas alimentados por indução e a aplicação de redes de IoT, nos sistemas de automação para redes de distribuição de energia.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E TECNOLÓGICA

5.1 Sistemas de Self Healing

Com a automação da rede de distribuição, há maior facilidade para modificar a configuração da rede, sendo possível operar os equipamentos de manobra e seccionamento remotamente, otimizando a operação do sistema, contribuindo tanto para situações de contingência quanto para melhoria nos níveis de tensão e carregamento (KAGAN, OLIVEIRA, ROBBA, 2005).

Define-se um sistema *self-healing* (auto regenerável ou auto recuperável) como aquele capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de energia elétrica de forma automática (e em alguns casos de forma instantânea) (FALCÃO, 2010).

O sistema de distribuição de energia elétrica é passível de falhas transitórias ou permanentes. Independentemente da causa, o sistema precisa ser restabelecido com rapidez e confiabilidade, isolando o trecho defeituoso e restabelecendo o fornecimento de energia para o maior número de consumidores possível. O descumprimento dos índices de qualidade e continuidade de fornecimento de energia elétrico produzem prejuízos financeiros e de imagem para as concessionárias. Com o intuito de minimizar os efeitos decorrentes das contingências, surge a possibilidade da utilização da automação da rede de distribuição. Nesse contexto, existe a possibilidade de realizar processos de restabelecimento do fornecimento de energia de forma automática.

Para a rápida tomada de decisão, por parte das concessionárias de distribuição, se faz necessário o uso de equipamentos de campo que possam informar os centros de operação do sistema, sobre as condições reais da rede de energia. Tais equipamentos se comunicam através de redes de dados, que podem ser dos tipos *wireless* (sem fio) ou cabeada. São utilizados também protocolos padronizados no setor, mais comumente o DNP3 e os preconizados na norma IEC61850.

Com base nas informações recebidas, o sistema de *self-healing* pode tomar a melhor decisão com relação às manobras no circuito, de acordo com configurações pré-definidas. O objetivo é sempre reestabelecer a rede de maneira segura e o mais rápido possível, segregando a menor parcela possível dos consumidores sem energia, até que os reparos necessários sejam executados pelas equipes de campo.

No momento da escrita dessa dissertação, pode-se afirmar com segurança que muito se evoluiu nessa área e diversas são as aplicações em operação nas concessionárias do Brasil. Os sistemas autônomos podem ser classificados como descentralizados, semi-centralizados e centralizados.

5.1.1 Self Healing descentralizado

Nessa arquitetura, a inteligência do sistema de reestabelecimento é concentrada apenas nos equipamentos de campo, como religadores e chaves de manobra. Nesta solução, os equipamentos continuam a serem supervisionados e comandados pelo centro de operação, porém passam a realizar, de forma autônoma, as operações de isolamento e restabelecimento automático, o que resulta em um tempo de restabelecimento inferior em comparação ao mesmo procedimento executado de forma manual por um operador humano (CHOLLOT, 2013).

Nesse tipo de arquitetura, os equipamentos operam quase sempre sem comunicação entre si, apenas sendo necessário informar, uns aos outros, a presença ou ausência de tensão em seus terminais, ou, ainda, detectando sobrecorrentes no circuito. Com base em lógicas embarcadas em seus controladores, os equipamentos realizam manobras de abertura e fechamento, com o intuito de um dos alimentadores suprir ao menos parte do circuito que estaria, em situação normal, sendo suprido pelo outro alimentador. Tomando a Figura como referência, seria o alimentador azul poder suprir ao menos parte da carga do alimentador vermelho, ou vice-versa.

Na representação da Figura 3, o Religador NA (normalmente aberto) irá fechar, caso detecte ausência de tensão em um de seus lados. A inversão do fluxo de potência deve ser detectada pelos outros religadores da rede o que pode, eventualmente, iniciar a mudança automática de sua parametrização, considerando a alteração das cargas em virtude da inversão do fluxo.

Figura 3 - Self Healing descentralizado

Após o reparo da rede, o retorno à condição original é feito via comando remoto, pelo centro de operação do sistema. Devido às limitações de comunicação e processamento dos equipamentos, bem como ao caráter dinâmico da rede, que, continuamente, se expande e recebe novos consumidores, a aplicação deste tipo de arquitetura é restrita, mas costuma ter a implementação mais barata.

5.1.2 Self healing semi-centralizado

Na arquitetura representada na

Figura 4, a lógica de recomposição do sistema elétrico fica alocada em um servidor de gerenciamento da solução, que pode ser instalado na subestação ou em outro local próximo aos equipamentos. Como as subestações de distribuição possuem um canal de comunicação confiável e estável com o centro de operações, e alimentação em corrente contínua segura, normalmente é a escolha preferencial para receber o servidor do sistema de *self-healing* semi-centralizado (SOUSA, 2015)

A comunicação entre os religadores, disjuntores e o módulo do servidor que detém a lógica de operação é realizada em protocolo padronizado, geralmente o DNP3, sendo que o módulo na subestação funciona como *gateway* entre o sistema supervisorio SCADA e os religadores.

Essa arquitetura garante maior flexibilidade na criação de lógicas e operação, pois o concentrador recebe informações de todos os alimentadores daquela subestação e de outras próximas, possibilitando a adaptação às condições da rede no horizonte de algumas horas. Como exemplo, um determinado alimentador pode suportar a carga de outro alimentador, porém apenas fora do horário de pico de consumo. O concentrador pode levar isso em consideração para a tomada de decisão, bem como enviar, para chaves automatizadas, comandos para desligar cargas menos prioritárias.

Figura 4 - Self Healing Semi-centralizado.

5.1.3 *Self Healing Centralizado*

Nessa topologia de *self-healing*, todos os equipamentos que compõem a solução são controlados por um sistema *Distribution Management System* – DMS. Essa solução apresenta uma integração com outros sistemas de supervisão e controle utilizados pelas distribuidoras de energia, apresentando uma visão sistêmica para o gerenciamento de todos os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) e subestações que integram o sistema (MOREIRA, 2011). O algoritmo de recomposição gerencia todas as subestações, os disjuntores dos alimentadores e seus religadores e indicadores de falta que estão instalados na rede.

5.1.4 *Comparativo entre as soluções de Self Healing*

Diante das características de cada arquitetura e dos ganhos proporcionados por cada topologia, há de se destacar a sinergia da solução de *self-healing* centralizado no contexto das redes inteligentes (*smart grids*), no futuro das concessionárias de distribuição de energia.

A filosofia centralizada possibilita a integração de todos os tipos de equipamentos da rede que possam ser telecomandados ou telemedidos como, por exemplo, religadores das classes de média e alta tensão, transformadores de distribuição com monitoramento dos ramais, indicadores de falta, reguladores de tensão, bancos de capacitores e medidores inteligentes.

A Figura 5 representa uma arquitetura típica de um sistema de automação, destacando a diferença entre a localização das lógicas de operação, de acordo com o tipo de sistema *self-healing* implementado.

Figura 5 - Sistemas Self Healing.

O desafio atual para a implementação desse tipo de solução, cada vez mais disponível, são os meios de comunicação, que necessariamente devem ser confiáveis e de baixíssimo custo.

O Quadro 1 apresenta um resumo das tecnologias de *self-healing*. Conforme exposto, a tecnologia centralizada é a que traz maiores benefícios, entretanto é a que possui maior custo de implantação. A migração evolutiva dos sistemas também é possível, permitindo que ao longo dos anos o sistema previamente implantado seja melhorado, evoluindo para o centralizado.

	Self-Healing distribuído	Self-Healing semi-centralizado	Self-Healing centralizado
Princípio de Funcionamento	Lógica de recomposição armazenada nos religadores	Lógica de recomposição é armazenada em servidor na subestação de distribuição	Sistema instalado no centro de operação da concessionária
Complexidade de Implantação	Menor tempo de implantação	Menor tempo de implantação	Maior tempo de implantação
Performance do Sistema de Telecomunicação	Maior velocidade de comunicação e pode operar inclusive sem comunicação entre os religadores	Infra de telecom relativamente simples entre os religadores e o servidor na subestação	Muitos dados trafegados na rede exigem infra mais robusta
Custo	\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$

Quadro 1 - Comparativo entre as filosofias de Self Healing.

5.2 Redes de IoT

A viabilidade da implantação dos conceitos de *smart grids* e cidades inteligentes (*smart cities*) está intimamente associada aos avanços tecnológicos da eletrônica, dos sistemas de controle, à viabilização dos dispositivos de sensoriamento, comunicação, processamento e armazenamento de dados, bem como ao aumento da geração de energia distribuída.

Esse fenômeno possibilitará, não somente a implantação de cidades inteligentes, mas também de ambientes onde todos os objetos podem ser unicamente identificados, reconhecidos, localizados e endereçados, o que vem sendo chamado de “Internet das Coisas”, do inglês, *Internet of Things* - IoT.

Redes elétricas e de esgoto, sinais de trânsito, veículos, roupas, pessoas, óculos, basicamente tudo passará a ser uma fonte geradora de dados, que, ao serem processados e tratados com inteligência, passam a gerar informações que auxiliam, por exemplo, no entendimento e na gestão do trânsito, na gestão remota da saúde de cardíacos, e na oferta de serviços e produtos baseados nos hábitos identificados dos consumidores (ABRADEE, 2011).

Além das tecnologias mais tradicionais, como modems 3G/4G e/ou rádios de 400 MHz, dispositivos instalados em campo devem estar prontos para se integrarem às redes de IoT, mesmo que seja de forma opcional.

5.2.1 Rede SigFox

De acordo com o site embarcados.com (SIGFOX, 2021), em artigo patrocinado pela WND, empresa responsável pela rede Sigfox no Brasil

A rede Sigfox usa a técnica de Ultra Narrow Band para a transmissão de mensagens. Esta técnica usa canais de 100Hz de largura de banda nas regiões ETSI e ARIB (Europa, Japão), e de 600Hz na região FCC (Américas, Oceania).

Nas regiões ETSI as mensagens são transferidas a 100bps e nas Regiões FCC a 600bps.

Figura 6 - Espectro de Frequências SigFox - Fonte: Adaptado de Sigfox, 2021.

A tecnologia *Ultra Narrow Band* se caracteriza pelo uso ideal da potência do sinal, permitindo a comunicação entre base e dispositivos por distâncias longas e com boa confiabilidade na entrega de pacotes. A faixa de frequência de operação é diferente para cada país ou região, sendo que na Europa a faixa utilizada está entre 868 e 868,2 MHz. No restante do mundo, a faixa de frequência é entre 902 e 928 MHz. Existem ainda inúmeras considerações que cada país determina, de acordo com seus órgãos reguladores, como a potência máxima do sinal transmitido, tamanho de pacotes, tempo de ocupação da rede, entre outros fatores.

Visão Geral da rede SigFox

A rede Sigfox possui uma arquitetura considerada simples, pois possui apenas duas camadas principais, a camada *Network Equipment* e a camada *Sigfox Support System*, conforme a Figura 7. Essa característica reduz os custos e a complexidade de implementação dessa rede.

Figura 7 - Arquitetura da rede SigFox - Fonte: Adaptado de Sigfox, 2021.

A camada *Network Equipment* é formada pelas estações rádio base, responsáveis pela troca de mensagens com os dispositivos de campo e também pelo encaminhamento das mesmas para a camada *Sigfox Support System*. Essa camada faz parte da rede principal, sendo responsável por processar as mensagens e enviá-las através de *callbacks* para o sistema do cliente. Esta camada é a porta de entrada para os diferentes componentes da infraestrutura (operadores Sigfox, canais Sigfox e clientes finais) para integração com outros sistemas, através de interfaces de atendimento na *web* ou *Application Program Interfaces – APIs – Interface de Programação de Aplicação*.

A camada *Sigfox Support System* ainda inclui módulos para garantir a implantação, operação e o gerenciamento da rede, como o sistema de suporte para pedidos e cobranças, além do suporte de rádio, para a estabilidade da rede.

A comunicação entre as camadas é feita através da internet, por uma conexão *Virtual Private Network – VPN – Rede Virtual Privada*.

Comunicação Aleatória

O acesso aleatório, característica que indica que a transmissão não necessita de sincronismo entre a rede e o dispositivo, é um recurso fundamental para atingir uma alta qualidade de serviço.

Conforme a Figura 8, o dispositivo envia uma mensagem em frequência aleatória e, na sequência, envia dois pacotes iguais, porém em frequências e períodos diferentes. Esta característica aumenta a imunidade do sistema contra interferências, pois uma mesma mensagem é enviada de formas diferentes, no intuito de vencer barreiras de interferência, aumentando a probabilidade de sucesso na recepção da mensagem.

Figura 8 - Salto de Frequências - Fonte: Sigfox, 2021.

Diversidade Espacial

A rede Sigfox, um dispositivo não está conectado necessariamente a uma estação rádio base, na verdade a arquitetura é pensada para que mais uma estação receba pacotes do dispositivo de campo, conforme representado na Figura 9. Essa característica de comunicação é conhecida como “diversidade espacial”.

A diversidade espacial, em conjunto com a comunicação aleatória, são os principais fatores que fazem com que a rede Sigfox tenha boa confiabilidade.

Figura 9 - Mensagens recebidas por várias estações SigFox - Fonte: Sigfox, 2021.

Consumo de Energia

Todo dispositivo para redes IoT possui restrições relacionadas ao consumo de energia, pois esses dispositivos são normalmente alimentados por baterias ou por outras fontes de energia com limitações de potência. Para atender a essas limitações de potência na alimentação, bem como o custo dos objetos conectados, o protocolo Sigfox é otimizado para mensagens pequenas, entre 1 e 12 bytes. Como exemplo, uma mensagem de 12 bytes é normalmente suficiente para enviar informações de sensores e coordenadas de GPS. A rede Sigfox não foi dimensionada para comunicação constante com cada dispositivo, mesmo com mensagens curtas.

O consumo de energia dos *chips* para implementação dessa rede está entre 10 a 50 mA, durante o período de transmissão.

Devido a simplicidade da rede Sigfox, não há mensagens de sincronismo entre o dispositivo e a estação rádio base. Esse fator também contribui para o baixo consumo de energia.

Arquitetura de rede

A arquitetura mais simples da rede Sigfox é o ponto principal para a obtenção de uma solução de baixo custo de investimento para sua implantação e operação. O *Software Defined Radio* (SDR) Sigfox, que em tradução literal significa “rádio definido por software”, ajuda a reduzir os custos das estações rádio base e aumentar sua flexibilidade, o que garante a padronização de *hardware*, em escala mundial. O SDR permite que os

parâmetros de rádio frequência sejam definidos e ajustados via software, mantendo o hardware idêntico, atendendo à diferentes legislações e aplicações.

Nesta arquitetura, a operadora Sigfox entrega aos seus clientes os dados dos dispositivos de campo, de forma transparente e padronizada, sem alterações de protocolos. Fica a cargo do desenvolvedor, a criação da aplicação e dos próprios dispositivos de campo. O cliente não precisa se preocupar com a aquisição de equipamentos ou qualquer outra infraestrutura, bem como sua instalação e manutenção. Também não é necessário realizar qualquer planejamento de RF, bastando apenas verificar com a operadora Sigfox de sua região, a cobertura de sinal na área de interesse.

5.2.2 Rede LoRa

De acordo com o site embarcados.com (LORA EMBARCADOS, 2022)

LoRa é uma tecnologia de rádio frequência que permite comunicação a longas distâncias, e que também apresenta baixo consumo de energia. Em testes realizados em campo, na região de Campo Grande e Cuiabá, durante a fase de validação da tecnologia de comunicação para este projeto, alcançou-se raios de cobertura de 5km em regiões urbanas e 12km em regiões rurais. Em determinado ponto, um dos dispositivos estabeleceu comunicação satisfatória estando a 42km de distância, em linha reta, da antena da estação rádio base.

Como é possível verificar na Figura 10, a rede LoRa é bem popular e tem tido bastante aderência ao redor do mundo.

Disponibilidade de Rede LoRaWAN® e Capacidade de Roaming

Figura 10 - Adoção da rede LoRa ao redor do mundo - Fonte: LoRa Alliance.

Suas principais aplicações, conforme Figura 11, são sensores e monitores remotos (pressão, iluminação, temperatura) sobretudo aqueles operados por bateria. Como toda rede IoT, foi projetada para trafegar mensagens curtas.

LoRaWAN é o nome dado ao protocolo que define a arquitetura do sistema, bem como os parâmetros de comunicação, usando a tecnologia LoRa.

O protocolo LoRaWAN implementa os detalhes de funcionamento, segurança, qualidade do serviço e ajustes de potência, visando maior autonomia dos dispositivos, que utilizam bateria. O LoRaWAN também especifica os tipos de aplicações, tanto do lado do dispositivo de campo, quanto das camadas superiores da rede.

O principal objetivo do protocolo LoRaWAN é a interoperabilidade entre elementos da arquitetura de rede. Dessa forma, uma infraestrutura LoRa pode conter inúmeros dispositivos, de diferentes provedores, desde que todos atendam ao mesmo padrão.

Figura 11 - Arquitetura da rede LoRa - Fonte: LORA Embarcados, 2022.

A arquitetura da rede LoRaWAN, é considerada bastante aberta: as empresas podem criar redes próprias para seus *end-devices* ou usar redes de terceiros. Na Figura 12 exemplifica-se como uma empresa criaria sua infraestrutura básica: cada nó do sistema teria um módulo LoRa que se comunicaria com um *gateway*.

Esse conceito simplifica e dá liberdade aos usuários, que podem criar uma infraestrutura própria e utilizar provedores de serviços, que oferecem contratos de conexão, geralmente anuais, e com determinada quantidade de mensagens por dia.

Figura 12 - Exemplo de estrutura da rede LoRa - Fonte: LoRa Alliance.

Gateways

São os elementos de conexão entre os dispositivos de campo e os servidores de rede.

Um *gateway* pode receber os dados de milhares de dispositivos e encaminhá-los para o servidor de rede. Dependendo das condições de topologia do local, um único *gateway* pode cobrir um raio desde 2 km até 15 km (LORA EMBARCADOS, 2022).

Servidores de rede e de aplicações

Os servidores de rede são os responsáveis pelo gerenciamento das informações enviadas pelos gateways.

Os servidores de aplicações recebem os pacotes dos servidores de rede e, de acordo com a informação, executam uma ou mais ações específicas.

Classes de dispositivos

O padrão LoRaWAN define três classes de dispositivos, a saber:

Classe A - Sensores

Suporta comunicação bi-direcional, sendo que o dispositivo habilita uma ação de recepção após uma ação de transmissão. Os módulos em campo só podem receber dados

em janelas de tempo pré-determinadas e imediatamente após realizarem uma transmissão. Em equipamentos que devem receber um comando de um sistema remoto, esse fator deve ser levado em conta, pois o dispositivo de campo pode demorar a receber tal comando, causando eventual atraso na operação.

A grande vantagem nesse tipo de comunicação é o baixo consumo de energia.

Classe B - Atuadores

Comunicação bi-direcional, com janelas de recepção agendadas. Nesse caso, o dispositivo de campo tem horários específicos em que receberá um *downlink* do servidor de rede.

Classe C - Bidirecional, recepção de dados praticamente sem atraso

Nesta classe o módulo sempre está apto a receber dados do gateway/servidor de rede, mantendo, portanto o canal de comunicação sempre ativo. Sem dúvida é o modo que traz maior benefício com relação à comunicação, entretanto o consumo de energia do módulo, utilizando essa classe, é consideravelmente elevado. Há de se considerar esse fator nos projetos, principalmente nos dispositivos que são alimentados por bateria.

No projeto aqui descrito, optou-se por utilizar a Classe A, devido ao baixíssimo consumo de energia. O FLOCO, mesmo não possuindo baterias, necessitava ter baixo consumo, pois a fonte de energia é oriunda do circuito de autoalimentação por indução, através da própria corrente passante na rede. A energia é drenada pelo TC de alimentação, conforme explicado adiante. Um consumo maior do FLOCO exigiria uma corrente primária mínima maior, o que inviabilizaria a aplicação do dispositivo em redes com baixa carga, como redes rurais, justamente onde um indicador de faltas é mais utilizado.

5.2.3 Segurança para a informação em redes de IoT

A segurança da rede LoRaWAN foi projetada para se adequar aos critérios gerais de projeto LoRaWAN, como baixo consumo de energia, baixa complexidade de implementação, baixo custo e alta escalabilidade (LORAWAN, 2021).

O design de segurança da LoRaWAN adere aos princípios mais modernos, como uso de algoritmos padrão bem verificados e segurança ponta a ponta na rede. Os mecanismos de segurança se baseiam no padrão criptográfico padronizado AES 128. Esses algoritmos

foram analisados pela comunidade criptográfica por muitos anos e são aprovados pelo NIST – “*National Institute of Standards and Technology*”, sendo amplamente adotado como a melhor segurança prática para nós restritos e redes¹.

Todo o tráfego LoRaWAN é protegido usando duas chaves criptográficas. Cada *payload* é criptografado e carrega um contador de *frames* (para evitar a repetição do pacote) e um Código de Integridade da Mensagem (MIC), para evitar a violação do pacote.

Conforme a Figura 13, os dados a serem transmitidos (*payload*) são criptografados, usando o algoritmo AES de 128 bits, com uma chave conhecida por “*Application Session Key*”.

(*) MIC = Message Integrity Check

Figura 13 - Criptografia AES128 - Fonte: LoRa Alliance.

Segurança na transmissão dos dados

O número MIC é gerado usando a mesma técnica de criptografia AES de 128 bits, Figura 14, mas com uma outra chave, conhecida por “*Network Session Key*”. Esta chave serve para que o servidor de rede possa garantir que o pacote recebido não foi alterado por erros ou mesmo propositalmente.

¹ https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_security_whitepaper.pdf

Figura 14 - Criptografia na Transmissão de Dados - Fonte: LoRa Alliance.

Observa-se que o servidor de rede pode apenas checar a integridade do pacote, e nunca acessar a informação contida, pois ele não dispõe da *application session key*.

5.2.4 Conclusões sobre as redes IoT

SigFox

O ponto negativo da rede SigFox é sua limitação na quantidade de bytes e mensagens que podem ser trafegadas por dia. Entretanto, o custo de implantação da infraestrutura é muito reduzido, como também sua manutenção, pois faz parte do escopo da operadora contratada. Essa é uma característica intrínseca da rede, ou seja, a concessionária de energia continuaria tendo um “terceiro” sendo responsável pela comunicação dos seus equipamentos, o que seguramente é uma barreira para a adoção de SigFox em larga escala, devido ao estigma criado em relação aos pacotes de dados 3G/4G, oferecido pelas operadoras de telefonia celular, que não conseguem oferecer garantias de serviço aceitáveis para esse mercado.

Outro fator relevante a considerar é que os equipamentos de automação e proteção das redes de distribuição estão sujeitos a atualizações de *firmware*, durante o seu tempo de vida, seja para correção de falhas ou mesmo para melhorias de funcionalidades. Porém,

pela restrição do tamanho das mensagens da tecnologia SigFox, é inviável realizar qualquer tipo de atualização de *firmware* pela rede.

LoRaWAN

Para a LoRaWAN a comunicação possui uma capacidade média aceitável de transmissão de dados, com diferentes taxas de comunicação, que podem atingir distâncias consideráveis. O custo da comunicação envolveria a aquisição da infraestrutura de gateways e conexão aos servidores de comunicação e aplicações, bem como a manutenção desse sistema.

É possível a atualização remota de *firmware* porém, para nós mais distantes dos gateways, o processo será lento, uma vez que a modulação adaptativa irá reduzir os pacotes, para garantir a conexão. A LoRaWAN ainda não especifica atualização de *firmware* de fato, mas deixa claro alguns requisitos, como comunicação em broadcast e troca de classe de dispositivo. Como, obviamente, a atualização de *firmware* não é uma atividade rotineira, essa característica da rede tende a ser aceitável para as concessionárias, pois toda rede de IoT será em banda estreita.

Do ponto de vista do dispositivo, as eletrônicas embarcadas podem manter o rádio LoRa desligado, entre os momentos de transmissão, reduzindo o consumo médio de energia.

A restrição mais comum para a comunicação dos Rádios é a de “*Duty Cycle*” inferior a 1%, tendo relação direta com o canal que está sendo utilizado, quantidade de bytes transmitidos e a taxa de comunicação escolhida. Outra informação importante é que dispositivos usando o mesmo canal, mas com taxas de comunicação diferentes, não afetam a comunicação um do outro, pois os gateways podem receber mensagens em múltiplos canais, com diversas taxas de comunicação simultaneamente.

Para o projeto do identificador de faltas, optou-se por usar a rede LoRa, devido à necessidade de atualização remota de *firmware*, e ao desejo das concessionárias de terem suas redes próprias, sem dependerem de terceiros, que não poderiam garantir o *System Level Agreement* - SLA necessário para esse tipo de aplicação. Hoje em dia, as concessionárias ainda dependem de serviços 3G/4G de operadoras de telefonia, que não garantem um nível mínimo de confiabilidade ao sistema.

5.3 TC com Núcleo Nanocristalino

Um transformador de corrente (TC) é um dispositivo utilizado para viabilizar medições, controle e proteção de circuitos elétricos. Costuma possuir uma única espira no enrolamento primário e é conectado em série com o sistema que se deseja medir; o enrolamento secundário é conectado ao circuito de leitura. No TC ideal, a corrente do secundário é inversamente proporcional à relação de espiras.

O identificador de faltas FLOCO possui dois TCs, uma para drenar energia da rede elétrica, a qual é armazenada em supercapacitores, que por sua vez alimentam a eletrônica embarcada e um segundo TC, responsável por realizar a medição da corrente passante. A decisão pelo uso de TCs com núcleo nanocristalino se deveu principalmente às características resultantes dessa tecnologia, ou seja, maior sensibilidade à indução magnética, redução de peso e volume em até 60%, melhor eficiência térmica e elétrica, se comparado a núcleos convencionais de Fe-Si. (MAGMATTEC, 2021)

Uma estrutura cristalina é composta por materiais cristalinos que tem seus átomos organizados em uma estrutura ordenada periódica, implicando em baixa resistividade elétrica e, no caso de materiais magnéticos, anisotropias magneto-cristalina² e coercividade altas. A coercividade de um campo magnético é a intensidade, ou a energia, necessária para reduzir a magnetização de um objeto para zero. Essencialmente, ele mede a resistência de um material magnético à desmagnetização. (PROPRIEDADES MAGNÉTICAS, 2021)

5.3.1 Histórico

Em 1988, Yoshizawa, Oguma e Yamauchi, da empresa japonesa Hitachi Metals, introduziram uma nova classe de materiais magnéticos, nanocristalinos de alta permeabilidade, baseados em ferro, os quais exibiam um desempenho magnético superior ao que se conhecia até então. Este novo material provavelmente se originou da pesquisa sobre formas de como melhorar as propriedades magnéticas dos aços moles (soft magnetic materials) formados por ligas amorfas (SUZUKI, K. e HERZER, G, 2006).

² **Anisotropia Magnética** reflete a dependência das propriedades magnéticas de um material, com a direção em que são medidas.

A prática de se tratar termicamente o material magnético para alívio de tensões internas é antiga. Na década de 80, quando os materiais nanocristalinos foram desenvolvidos, era considerado um procedimento conhecido e padrão para melhorar o desempenho magnético dos aços, inclusive os formados pelas ligas amorfas. Era, até então, um consenso entre a comunidade científica, que um tratamento acima da temperatura de cristalização, deterioraria as propriedades magnéticas da liga amorfa (SUZUKI, K. e HERZER, G, 2006). Yoshizawa e sua equipe demonstraram que esta regra não era aplicável a todos os materiais. Eles mostraram que a adição de cobre (Cu) e nióbio (Nb) à liga amorfa formada por Fe-Si-B, poderia alterar a microestrutura do material na escala nanométrica, após a cristalização, e verificaram que as propriedades magnéticas eram visivelmente superiores.

A liga inicialmente proposta era formada com a composição química $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ (em %). Esta descoberta estimulou a pesquisa de novos mecanismos para melhorar ainda mais as propriedades do material magnético mole obtido. Já em 1989, Herzer, da empresa alemã Vacuumschmelze (VAC), apresentou seus estudos e conclusões sobre o magnetismo e a estrutura de grãos da liga nanocristalina, originalmente proposto por Alben em 1978 (SUZUKI, K. e HERZER, G, 2006).

Materiais magnéticos nanocristalinos são ligas ferrosas que apresentam um conjunto único de propriedades aplicáveis à eletroeletrônica: baixas perdas, alta permeabilidade inicial, magnetostricção³ próxima a zero e magnetização de saturação em torno de 1,2T. Tais propriedades derivam de uma nanoestrutura de grãos de Fe-Si cúbicos de corpo centrado, com cerca de 10 a 15nm. As dimensões desses grãos são o motivo para a sua classificação de material como nanocristalino.

Desde então, estes materiais têm despertado um imenso interesse da indústria para substituir os materiais magnéticos existentes em determinadas aplicações pelos materiais nanocristalinos com uma série de vantagens.

O material nanocristalino apresenta um desempenho excepcional para sua aplicação no identificador de faltas FLOCO, pois possui alta permeabilidade inicial, podendo chegar

³ **Magnetostricção** é uma propriedade do material ferromagnético que faz com que ele mude sua forma ou dimensões durante o processo de magnetização. A variação da magnetização dos materiais devido ao campo magnético aplicado altera a deformação magnetostritiva até atingir seu valor de saturação. Este efeito causa perda de energia devido ao aquecimento por atrito em núcleos ferromagnéticos suscetíveis.

até 200.000 H/m, a corrente de excitação é menor que em outros materiais e, por consequência, resulta em uma maior confiabilidade na medição e menor perda de energia. Por apresentar uma alta indução de saturação, em torno de 1,2T, possibilita uma relação menor de espiras por volt, reduzindo o volume do transformador e as perdas no condutor. Ainda em relação às perdas, o fato dos núcleos nanocristalinos serem formados pelo enrolamento de uma fita muito fina (espessura da ordem de 20 μm) faz com que as correntes induzidas no núcleo sejam menores, diminuindo as perdas (MAGMATTEC, 2021).

6. DETALHAMENTO DA SOLUÇÃO

Conforme exposto no início deste trabalho, o objetivo desta solução é obter um produto de baixo custo, para adoção em larga escala. Portanto, as características do indicador são aqui detalhadas; suas funções devem ser restritas à real necessidade da aplicação. Dessa forma, a função de oscilografia não é contemplada, pois o volume de dados gerados pelos arquivos ocuparia demasiadamente a rede de comunicação. Além disso, na prática, as concessionárias de distribuição não possuem equipes dedicadas à análise de oscilografias, diferentemente do que ocorre em concessionárias de transmissão. Portanto, as oscilografias disponíveis serão apenas as geradas por IEDs ou oscilógrafos, instalados em subestações.

Como todo indicador de falta, a instalação em campo deve ser fácil e de baixo custo. São dispositivos para serem instalados em centenas de milhares de unidades, portanto, não devem depender de procedimentos muito específicos ou mesmo de ferramental exclusivo. A solução adotada foi o desenvolvimento de um indicador a ser fixado nas bases fusíveis convencionais da rede de distribuição, conforme concepção apresentada na Figura 15.

Serão detalhadas, nas etapas posteriores deste trabalho, demais características desta solução, como:

- Fácil instalação por vara de manobra convencional, idêntico ao procedimento de instalação de cartuchos fusível;
- Detecção de presença de média tensão por variável digital;
- Leituras de corrente de falta e corrente instantânea, em valores RMS;
- Comunicação via rede LoRa, protocolo LoRaWAN;
- Sistema de autoalimentação, via indução eletromagnética;
- Sem utilização de baterias;
- Sistema de armazenamento de energia através de super capacitores;
- GPS Integrado
- Acelerômetro para identificação da queda ou travamento do cartucho fusível
- Sistema de instalação e configuração “Zero Touch Deployment”
- Norma aplicável: “IEEE-495-2007 “IEEE Guide for Testing Faulted Circuit Indicators”

Figura 15 - Conjunto Trifásico do Indicador de Falta (concepção).

6.1 Desenvolvimento do Sistema Arpeggio

Conforme previsto no projeto, o FLOCO foi concebido para ser integrado aos sistemas supervisórios. Esse foi um dos grandes desafios do projeto, pois a rede LoRa, por possuir banda estreita de comunicação, não tráfegaria com confiabilidade o protocolo DNP3.0, comum em equipamentos de proteção, para redes de distribuição.

O protocolo nativo para a rede LoRa que foi implementado no FLOCO é o MQTT⁵, que é um protocolo de mensagens com suporte para a comunicação assíncrona entre as partes. Um protocolo de sistema de mensagens assíncrono desacopla o emissor e o receptor da mensagem, tanto no espaço quanto no tempo e, portanto, é escalável em ambientes de rede que não são tão confiáveis em termos de estabilidade, como as utilizadas em frequências livres. Exatamente como é o caso do projeto FLOCO, onde os dispositivos usarão módulos de comunicação em 915Mhz (frequência livre).

⁵ **MQTT**, sigla de “*Message Queuing Telemetry Transport*”, é um protocolo de mensagens leve para sensores e pequenos dispositivos móveis otimizado para redes TCP/IP. O esquema de troca de mensagens é fundamentado no modelo “*Publicador-Subscritor*”, extremamente simples e leve. Os princípios da arquitetura são minimizar o uso de banda de rede e o uso de recursos dos equipamentos, garantindo confiabilidade e algum nível de garantia de entrega.

O MQTT é um protocolo de ligação, que está na camada 7 (mesma camada do HTTP), que especifica como os bytes de dados são organizados e transmitidos pela rede TCP/IP. Devido a disponibilidade de bibliotecas amigáveis, os desenvolvedores não precisam entender o protocolo de ligação. Basta saber que cada mensagem tem uma carga útil (*payload*) de comando e dados. O comando define o tipo de mensagem (por exemplo, uma mensagem *CONNECT* ou uma mensagem *SUBSCRIBE*). *CONNECT* é um comando de conexão ao servidor e *SUBSCRIBE* é o processo de inscrição para a leitura de pacotes em um *broker* MQTT, conforme Figura 16.

Figura 16 - Processo *Subscriber* MQTT.

Todas as bibliotecas e ferramentas do MQTT oferecem maneiras simples de manipular essas mensagens diretamente e podem preencher automaticamente alguns campos necessários, como os *Identities* - IDs da mensagem e do cliente.

O protocolo MQTT permite sua implementação em *hardware* com menor poder de processamento, como é o caso do FLOCO. A arquitetura proposta permite sua integração completa com os outros equipamentos de automação da distribuição, como Religadores, permitindo, portanto, a utilização em larga escala da rede LoRa a ser implantada.

A arquitetura prevê a utilização do servidor de comunicação ChirpStack (CHIRPSTACK, 2021), permitindo a conexão lógica da rede LoRa com o sistema SCADA legado.

O ChirpStack é um sistema *open source* e fornece os componentes de código para redes LoRaWAN, possibilitando a criação de uma solução pronta para uso, incluindo uma interface Web para gerenciamento de dispositivos e APIs para integração. A arquitetura modular possibilita a integração nas infraestruturas existentes. Todos os componentes são

licenciados sob a licença MIT⁶ e podem ser usados para fins comerciais. O sistema ArpeggIO utiliza justamente o serviço ChirpStack.

A camada de integração entre sistemas, recebeu o nome de ArpeggIO⁷ Suite, pois justamente tem a função de harmonizar as demais camadas de aplicação. O ArpeggIO foi criado para permitir a integração do FLOCO com, a princípio, todo e qualquer sistema legado da Energisa e demais concessionárias, conforme Figura 17, pois a integração entre sistemas é feita por protocolos padrão.

Figura 17 - Arquitetura de Integração.

O ArpeggIO funciona como um *broker*⁸ de protocolos IoT, no caso o MQTT, para os sistemas de níveis superiores, permitindo, portanto a leitura de dados dos dispositivos de campo, sem a necessidade de um outro sistema especialista. A concentração das informações em um único sistema, já em uso pelas concessionárias, como o SCADA,

⁶ Licença MIT é uma licença de programas de computadores (software), criada pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). É uma licença permissiva, utilizada tanto em software livre quanto em software proprietário.

⁷ Arpeggio - Um arpejo ou harpejo (do italiano arpeggio) é a execução sucessiva das notas de um acorde. Enquanto em um acorde as notas são tocadas todas de uma vez, no arpejo essas mesmas notas são tocadas uma a uma.

⁸ O broker é o elemento responsável por gerir as publicações e as subscrições do protocolo MQTT. Ele é como uma espécie de mediador entre as máquinas, capaz de fazer com que a comunicação de fato ocorra entre elas. O broker permite um desacoplamento entre dois sistemas, viabilizando a comunicação entre eles.

minimiza treinamentos, procedimentos de TI, questões de segurança na rede e reduz custo de investimentos em diversas plataformas.

Figura 18 - Módulos internos do ArpeggioIO.

Conforme Figura 18, o **NMS – Network Management Server** é responsável por gerenciar as conexões com os dispositivos na rede, engloba os algoritmos de *cyber security* e o gerenciamento de atualização de *firmwares*, via *boot-loader*. Em uma eventual atualização de *firmware*, o arquivo de dados é carregado nos dispositivos instalados em campo e, somente quando o arquivo é completamente transferido, o dispositivo se reiniciará com o novo *firmware*, mantendo ainda a versão antiga em memória, para o caso de falha.

A Figura 19 detalha as funções das camadas do módulo NMS do sistema ArpeggIO.

Figura 19 - Camadas do Módulo NMS.

A camada MAS – *Management Application Server* foi implementada através do *toolkit* da Elipse Gateway (ELIPSE, 2021), contemplando a base de dados em SQL e o conversor de protocolos, o que garante a integração entre sistemas. Com a utilização do Elipse nessa camada de software, o ArpeggIO permite a integração de sistemas não só via DNP3.0, mas também via IEC61850, IEC 60870-5-104 e ainda via WebServices⁹. Engloba também a interface com o usuário, que permitirá inclusive a implementação de lógicas de proteção e um sistema SCADA simplificado, que poderá ser interessante para permissionárias e cooperativas de distribuição de energia, que não possuam um sistema SCADA completo ainda.

A Figura 20 detalha as funções da camada MAS do sistema ArpeggIO.

⁹ WebService - é uma solução utilizada na integração de sistemas e na comunicação entre aplicações diferentes. Com esta tecnologia é possível que novas aplicações possam interagir com aquelas que já existem e que sistemas desenvolvidos em plataformas diferentes sejam compatíveis.

Figura 20 - Arquitetura MAS.

6.2 Instalação por Vara de Manobra

Um dos pontos de inovação apresentados e desenvolvidos no projeto foi a forma de instalação dos dispositivos, em bases fusíveis convencionais. Os requisitos para essa definição foram os seguintes:

- a. Facilidade de instalação e o baixo custo do serviço, uma vez que todas as equipes de manutenção das concessionárias já possuem varas de manobra e a atividade de instalação ou mesmo troca de cartucho de fusível é atividade rotineira;
- b. Possibilidade de instalação do indicador de faltas sem necessidade de abertura do circuito – instalação em linha viva. Essa atividade também é comum e as equipes de campo utilizam uma espécie de mola para “jumper” o cartucho ora instalado, para a instalação de outro cartucho, no caso, o indicador de faltas. A Figura 21 apresenta o dispositivo de “by-pass” da chave fusível;

Figura 21 - Dispositivo "by-pass" para cartucho fusível. Fonte: www.sesolucao.com.br

- c. Possibilidade de utilização de TC de núcleo fechado. Praticamente todos os indicadores de falta do mercado atualmente utilizam TCs de núcleo bipartido ou ainda sensores de corrente. Para a utilização de TC bipartido, é necessário considerar as perdas técnicas com a utilização desse conceito, pois o núcleo é separado para a instalação do dispositivo na rede elétrica; exatamente o mesmo conceito de um alicate amperímetro. Para efetuar somente a medição de corrente, esse conceito é aplicável; entretanto, o objetivo era desenvolver um indicador de faltas sem utilização de baterias e, para isso, é necessário drenar a maior quantidade possível de energia da rede, por indução, para o carregamento dos supercapacitores. A utilização apenas de sensores de corrente é ainda mais ineficiente, pois obriga a utilização de baterias, gerando manutenções programadas e consequentemente custos excessivos para um ativo de baixo custo.
- d. Capilaridade. O objetivo do projeto era desenvolver um produto com custo que permitisse sua adoção em massa pela Energisa e demais concessionárias. O uso das bases fusíveis existentes facilita a instalação e já sugere os principais pontos de instalação, onde é necessário a monitoração da rede. O fato de um determinado ponto da rede já conter um conjunto fusível pressupõe que aquele ponto da rede tem importância na filosofia de proteção e seletividade e, portanto, é interessante também ser monitorado.

- e. Padronização de montagem. Os indicadores de falta de mercado são instalados diretamente nos cabos da rede de distribuição, entretanto esses cabos possuem bitolas diferentes, de acordo com a corrente daquele circuito e /ou o tipo de cabo, como por exemplo cabos protegidos e cabos nus. A solução mecânica para permitir a fixação de forma robusta de indicadores de faltas em cabos de diferentes bitolas se torna mais complexa e por vezes mais cara. Já os cartuchos fusíveis possuem dimensões padronizadas. O cartucho varia apenas no comprimento, mas não no diâmetro. Dessa forma, a solução adotada permite a utilização do FLOCO em circuitos de todas as classes de distribuição, 15kV, 27kV e 38kV. A Figura 22 apresenta as dimensões padronizadas de uma chave fusível convencional.

Figura 22 - Desenho Mecânico da Base Fusível tipo C - fonte: Catálogo Hubbell 10AA.

6.3 Detecção da Presença de Tensão

Foi adicionado um circuito de detecção de presença de tensão, através do campo elétrico, conforme Figura 23. É importante ressaltar que o dispositivo projetado não possui referência ao terra, sendo instalado ao potencial. Dessa forma, não é possível realizar uma medição de tensão de forma diferencial.

Figura 23 - Diagrama em Blocos do Circuito de Detecção de Presença de Tensão.

A detecção da presença de tensão é essencial para as filosofias de *self-healing*, adotadas em redes com arquitetura em anel. O despachante, no centro de controle, consegue ter a informação de cada sensor, se há ou não média tensão naquele determinado trecho do circuito, impedindo falhas nos comandos e estratégias de reestabelecimentos de circuitos, de forma remota. Quando uma chave é remotamente aberta, o despachante pode verificar se naquele trecho realmente há ausência de tensão, a fim de manobrar outra chave e interconectar circuitos, impedindo que dois alimentadores entrem em curto ou mesmo que uma fonte de microgeração seja retroalimentada, causando danos à rede. Com a expansão dos circuitos de microgeração, a chance de ocorrer uma falha desse tipo aumenta exponencialmente e dispositivos como o aqui detalhado podem evitar esse tipo de falha.

6.4 Medição de Corrente Instantânea

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, a necessidade de monitoração das condições dos circuitos de distribuição é cada vez maior, seja pela adoção de estratégias de recomposição da rede ou pela expansão da microgeração. O monitoramento das redes, de forma remota e economicamente viável, permite que a concessionária tenha informações para tomada de decisão em curto prazo, além de permitir a criação de uma base de dados para o planejamento da rede.

Utilizou-se um TC de núcleo nanocristalino para essa função, o que garantiu ótima linearidade e precisão dentro da faixa de operação do dispositivo, de 1A a 2kA. O núcleo de material nanocristalino também permitiu a obtenção de um TC de dimensões reduzidas.

6.5 Sistema de autoalimentação

O projeto tinha como uma das premissas, o funcionamento em circuitos de baixa corrente, pois sua principal aplicação é em circuitos laterais da rede primária, já protegidos normalmente por fusíveis convencionais. Nesses circuitos, a corrente nominal pode ficar em torno de 1A por horas. Frente a essa necessidade, a utilização do TC de autoalimentação, com núcleo nanocristalino se demonstrou acertada, pois devido à sua alta permeabilidade, foi possível drenar energia suficiente da rede, mesmo com baixa corrente, mantendo o dispositivo totalmente operacional com correntes primárias a partir de 700mA. Essa característica funcional permitirá a utilização do indicador de faltas em praticamente qualquer circuito de distribuição, independentemente da corrente de carga e de sua classe de tensão.

A Figura 24 é uma foto de um dos protótipos funcionais montados nessa fase do projeto. O TC menor é responsável medição e o TC maior é o de autoalimentação.

Figura 24 - TCs de Autoalimentação e medição. Fonte: Protótipo FLOCO.

6.6 Supercapacitores

O supercapacitor é um tipo de capacitor capaz de armazenar e fornecer uma elevada densidade de energia em um curto intervalo de tempo. Apresenta capacitância elevada, se comparada com outros tipos de capacitores e ocupa o intervalo de aplicações entre capacitores eletrolíticos e baterias. Eles tipicamente armazenam de 10 a 100 vezes mais energia por unidade de volume ou massa do que capacitores eletrolíticos, podem ser carregados muito mais rapidamente do que uma bateria e toleram mais ciclos de carga e descarga do que baterias recarregáveis.

O principal motivo para a adoção de supercapacitores no projeto FLOCO se deveu a premissa de não utilizar baterias no produto. Conforme exposto, o projeto prevê a adoção em massa do dispositivo pelas concessionárias. Sendo um dispositivo de baixo custo, a manutenção periódica para eventual troca de baterias, em milhares de dispositivos, inviabilizaria sua aplicação, gerando custos operacionais proibitivos.

A adoção de supercapacitores no projeto permite que o indicador de faltas não necessite de manutenção, durante todo seu tempo de vida. O supercapacitor possui melhor resistência à variação de temperatura, baixa resistência interna e capacidade de armazenamento de energia suficiente para a aplicação. O projeto conta com quatro supercapacitores de 25F cada, conforme Figura 25.

Figura 25 - Banco de Supercapacitores. Fonte: Protótipo FLOCO.

6.7 GPS integrado

Foi incluído um chip GPS integrado à eletrônica do FLOCO devido à necessidade de se informar, basicamente, o local da falta. A maioria das soluções disponíveis no mercado adotam uma forma menos eficiente de estabelecer o local de instalação de um indicador de faltas. Nesses dispositivos grava-se, via console, a latitude e longitude no momento da instalação e, no momento da falta, essa informação é passada ao centro de controle via protocolo, quando o dispositivo dispõe de algum sistema de comunicação. Entretanto, esse tipo de solução tem fragilidade na informação, uma vez que o indicador de faltas é um equipamento leve e de fácil remoção. Não é difícil imaginar algum erro operacional, onde uma equipe de campo remove um dispositivo defeituoso, leva-o para manutenção e em uma reinstalação, o mesmo é colocado em outro ponto da rede. Quando esse dispositivo detectar uma falta, a informação que será enviada ao centro de operação será a que está gravada e não a posição real.

No FLOCO, a informação sobre a posição do dispositivo é dinâmica e atualizada automaticamente uma vez ao dia. Outra vantagem do chip GPS é o sincronismo do relógio interno, garantindo que a informação da falta terá uma estampa de tempo confiável.

O chip GPS possui consumo elevado de energia, levando-se em consideração este projeto em específico. Dessa forma, foi criada uma lógica, via *firmware*, para a atualização do geoposicionamento e estampa de tempo, levando-se em conta a corrente passante e o status do dispositivo. O GPS é ativado somente quando a tensão no banco de supercapacitores está acima de 4V e se o dispositivo está instalado na base fusível. É possível detectar se o FLOCO está instalado na base fusível ou se está caído, através de um acelerômetro.

Outra vantagem do chip GPS integrado é que não é necessária nenhuma configuração prévia para sua instalação, permitindo que equipes simples de campo realizem sua instalação.

6.8 Acelerômetro

A função do acelerômetro no FLOCO é detectar o posicionamento do dispositivo em relação à base fusível. Não há contato elétrico do dispositivo com o elo fusível. A leitura da corrente passante é feita por indução, pelo TC de medição, mas de fato não há como

detectar se o elo fusível está rompido. Com o acelerômetro, conseguimos detectar a variação da posição do FLOCO na base e sua posição final. Dessa forma, o dispositivo consegue informar ao centro de operação, com precisão, que houve um curto-circuito e que o dispositivo se desacoplou da base fusível.

A Figura 26 mostra a CPU de um dos protótipos FLOCO, destacando os principais circuitos.

Figura 26 - Disposição da Eletrônica. Fonte: Placa CPU do protótipo FLOCO.

6.9 Seletor de Fase

Apesar do FLOCO possuir chip GPS embarcado, não há como conseguir precisão suficiente para diferenciar, em um arranjo trifásico, se ele está instalado na fase A, B ou C. Dessa forma, incluímos uma configuração mecânica da fase ao qual o dispositivo será instalado. Essa “configuração” é necessária para que o FLOCO informe corretamente ao centro de operação o carregamento da respectiva fase à qual está instalado, bem como em caso de falta.

O eletricista instalador apenas precisa girar o FLOCO no cartucho, e através de um pequeno ímã, sensores magnéticos do FLOCO detectarão em qual fase o dispositivo foi instalado e carregará essa informação no algoritmo interno do dispositivo.

Os ímãs maiores nas figuras abaixo servem para fixar o FLOCO em sua base e permitem que o corpo seja rotacionado manualmente, para a seleção da fase de instalação, conforme Figura 27.

Figura 27 - Seletor de Fases FLOCO.

6.10 Sistema de instalação e configuração “Zero Touch Deployment”

Outra premissa do projeto era trabalhar na possibilidade de não haver necessidade de configuração prévia do dispositivo para sua instalação. Essa premissa era importante pois o indicador de faltas é um equipamento de alta capilaridade e a dependência de sua configuração poderia encarecer o processo, ou mesmo inviabilizar sua adoção como estratégia de monitoração e proteção das concessionárias.

Dessa forma, foi realizado um trabalho de maneira que o algoritmo de proteção pudesse detectar o curto-circuito de forma adaptativa, representado na Figura 28. Quando da instalação do FLOCO na rede, o dispositivo entrará em operação pela autoalimentação, monitorando a corrente de carregamento do circuito, seja ela qual for. A caracterização básica do curto-circuito é baseada na variação abrupta de corrente em função do tempo

(di/dt). Essa condição é relativamente simples de ser detectada pelo dispositivo, pois se trata de uma condição muito adversa do comportamento normal da rede.

Figura 28 - Detecção de Falta por di/dt .

Em uma falta permanente, esse comportamento é seguido pela ausência de tensão, devido a atuação da proteção à montante e pela teórica ausência de corrente. Se a falta foi extinguida pelo próprio elo fusível, será detectada a queda do cartucho da base fusível através do acelerômetro. Essas situações são interpretadas pelo FLOCO, através do algoritmo embarcado, informando se a falta é permanente ou temporária.

Conforme informado, o FLOCO possui GPS embarcado, não necessitando de configurações de relógio ou de geoposicionamento.

A informação de qual fase o dispositivo está instalado também é feita manualmente, sem necessidade de conexão a aplicativos ou softwares de configuração, nem mesmo ferramentas.

Mesmo sem a necessidade de ser configurado, incluímos essa possibilidade, através de uma comunicação via Bluetooth e um aplicativo para sistema operacional Android. O aplicativo permite que o dispositivo seja monitorado localmente, entre outras funções, conforme detalhado no capítulo 8.3, mais adiante.

6.11 Especificação Geral

O FLOCO foi idealizado para atender não só a demanda da Energisa, mas de todo o mercado de distribuição de energia. Dessa forma, considerou-se como especificação mínima de produto as características apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Especificação Técnica – Identificador de Falhas FLOCO

Tensão de operação	6kV até 35kV
Corrente de operação	0A até (limitado ao elo fusível)
Capacidade de corrente	10kA/170ms (Norma IEEE 495-2007)
Tempo mínimo de reconhecimento de faltas de curto-circuito	20ms
Tempo de auto reset	7 horas
Armazenamento de Energia	Supercapacitores
Tolerância para leitura/detecção de falta de curto-circuito	$\leq \pm 5\%$
Tolerância para leitura/detecção de falta de curto-circuito à terra	$\leq \pm 5\%$
Frequência	50/60Hz
Temperatura operação	-25°C até +55°C
Umidade	5% até 100%
Grau de proteção	IP65
Distância de visualização do LED à noite	~ 500m
Resistência ao vento	$\leq 150\text{km/h}$

7. ETAPAS DO PROJETO

7.1 Concepção

Para o desenvolvimento do FLOCO foram empregadas ferramentas de software que possibilitaram simulações virtuais do produto, antes de sua concepção material, o que evitou protótipos iniciais muito distantes de equipamentos funcionais e agilizou seu desenvolvimento, reduzindo tempos de retrabalho e aumentando a assertividade de projeto. A prototipação foi auxiliada pela utilização do LabPro PD, um laboratório provido de equipamentos, como impressoras poliméricas 3D e equipamentos para ensaios elétricos e climáticos, dedicados a permitir a prototipação de soluções concebidas por pesquisadores, para o setor elétrico nacional e internacional. O LabPro PD está estabelecido nas dependências da HartBR, em Alphaville – Barueri – SP. O laboratório foi concebido em parceria com o INESC P&D Brasil, Grupo EDP e a empresa STPTEC. (HARTBR, 2021)

7.2 Definição de polímeros

Atualmente, os fabricantes de fusíveis de média tensão, utilizam fibra de vidro com proteção UV para fabricarem o cartucho do fusível. A fibra de vidro é um material de baixo custo e com boas características para a aplicação em fusíveis. Trata-se de um composto formado pela aglomeração de finíssimos filamentos de vidro que são altamente flexíveis. Quando adicionado à resina poliéster, transforma-se em um compósito popularmente conhecido como fibra de vidro, mas, na verdade, o nome correto é PRFV, ou seja, “Polímero Reforçado com Fibra de Vidro”.

O PRFV possui alta resistência à tração, flexão e impacto, além de elevada rigidez dielétrica. Entretanto, o uso desse material no FLOCO não seria indicado, pois há deterioração das paredes internas do cartucho quando ocorre a queima do elo em um evento de falta, o que causaria baixa expectativa de vida ao dispositivo FLOCO, implicando a troca do cartucho, o que não seria tarefa simples o suficiente para ser feita em campo pelos eletricitistas. Em fábrica, os terminais do cartucho fusível são prensados no cartucho através de ferramentas hidráulicas ou pneumáticas.

Portanto, desde o início do projeto pensou-se em utilizar um material polimérico mais nobre, mas que, devido à aplicação, tivesse custo compatível. Após pesquisa com os

principais fabricantes, resolveu-se realizar testes com dois materiais, o polietileno tereftalato - PET, reforçado com 30% de fibra de vidro, comercialmente chamado de Arnite (ARNITE, 2021) e sulfeto de polifenileno) - PPS (PPS, 2021). Ambos os materiais são injetados sob pressão, o que garante baixo custo, repetibilidade de produção e baixo índice de perda por falha no processo de injeção.

O polietileno tereftalato - PET é um polímero termoplástico formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol. É utilizado principalmente na forma de fibras para tecelagem e de embalagens para bebidas, ou seja, um material de mais baixo custo, porém com resistência mecânica e rigidez dielétrica suficientes para a aplicação.

O objetivo de se utilizar polímeros mais modernos é obter um produto com menor custo de material e produção e maior tempo de vida. As peças terão menor peso, melhor acabamento e menor perda.

O Arnite é um plástico de engenharia de alto desempenho que combina alta resistência mecânica e rigidez dielétrica, com excelentes características de processamento. Como esse material não absorve quantidades significativas de umidade, essas propriedades não mudam, mesmo quando os níveis de umidade ambiente são altos.

Este polímero é adequado para uma ampla gama de aplicações automotivas, elétricas e bens de consumo, oferecendo uma ampla gama de propriedades, incluindo resistência química e térmica, retardo a chama, estabilidade dimensional e excelentes propriedades mecânicas, com boa qualidade superficial. Outra característica importante deste polímero, indispensável para sua aplicação nas peças do FLOCO, é sua resistência à radiação UV.

Devido a esses benefícios, o Arnite é amplamente utilizado para aplicações elétricas, como em corpos de fusíveis automotivos, conectores, engrenagens de baixa tensão, conectores de telecomunicações e isoladores.

Com relação às propriedades mecânicas, esse polímero é muito resistente, com excelente rigidez e ótimas propriedades de fluência, mesmo em altas temperaturas. Sendo também extremamente durável, com baixa perda de desgaste e coeficiente de atrito.

A outra opção de material seria o PPS, com nome comercial Fortron, da empresa CELANESE. O Fortron é um material mais nobre que o Arnite, considerando todas as características técnicas de avaliação de polímeros, possuindo maior rigidez dielétrica e resistência mecânica, de forma geral.

O PPS é um material termoplástico de alta temperatura ($T_m = 285^\circ \text{C}$) que oferece uma excelente combinação de resistência térmica, mecânica e química. É inerentemente resistente à chama e praticamente não é afetada por uma ampla gama de produtos químicos, mesmo durante períodos prolongados e a temperaturas elevadas. Está disponível comercialmente em duas variedades: ramificada (reticulada e curada) e linear. O PPS Linear é um produto de segunda geração que oferece fácil processamento, excelente consistência de lote a lote e alta resistência e tenacidade¹⁰. O PPS está disponível em uma variedade de pesos moleculares que permitem que seja usado em uma variedade de processos, desde a moldagem por injeção de seção delgada até a moldagem por sopro. Também possui baixa impureza iônica e pode ser aditivado para diferentes cores.

O PPS aceita combinações com fibra de vidro e minerais, de forma a atender diferentes necessidades mecânicas nas peças injetadas, garantindo maior rigidez ou elasticidade, de acordo com os objetivos do projeto, para atender a uma variedade de requisitos de uso final. Tais produtos são amplamente utilizados na substituição de materiais tradicionais de engenharia, como metais, termofixos e cerâmicas.

Após testes de exposição a UV, realizados em laboratório no SENAI-SP, identificou-se mudanças acentuadas de cor, conforme Figura 29. O fabricante também confirmou uma característica a respeito da resposta do polímero à exposição a luz solar. Com o tempo, o PPS altera sua cor natural, devido a exposição UV.

¹⁰ Capacidade de um material absorver energia e deformar sem fraturar. É o equilíbrio entre a ductilidade (capacidade de alguns materiais de sofrerem deformação sem se romperem) e a resiliência (capacidade de absorver energia mecânica sem deformação elástica)

Figura 29 - PPS - Ação do tempo à exposição de 400h sob luz do dia

Conforme pode ser observado na Figura 29, o polímero na cor cinza, por exemplo, após 400 horas de exposição à luz do dia, teve sua cor alterada para marrom. Não há formas de dopar este polímero para que essa característica se altere. A única solução seria pintar a peça injetada, com uma tinta resistente a UV, porém esse processo encareceria o produto, devido a etapa adicional na produção.

Apesar das características mecânicas e elétricas do material PPS não se alterarem nos teste realizados, a mudança de cor do material, em pouco espaço de tempo, fez com que a equipe descartasse esse material. A atenção então se voltou ao material que até aquele momento se mostrava adequado, com custo competitivo e aprovação em todos os ensaios, o PET, entretanto, o fato de o fabricante testado não possuir forte presença no Brasil, se tornou um problema, visto a dependência do projeto teria com essa empresa. Por esse motivo, foi buscada uma terceira opção, o tereftalato de polibutileno - PBT.

Conforme ENSINGER, 2022

O PBT é um termoplástico semicristalino dentro da família de polímeros de poliéster. Como outros poliésteres, o polímero PBT é adequado para aplicações na indústria alimentícia, devido à sua excelente resistência às soluções de químicas para limpeza. Este

material também é caracterizado por sua alta rigidez e resistência à deformação térmica, bem como uma estabilidade dimensional alta e baixa tendência à deformação. Além disso, os polímeros PBT, como todos os poliésteres, possuem propriedades de atrito e desgaste muito boas.

Comparado ao PET, o PBT possui uma melhor resistência ao impacto, especialmente em baixas temperaturas. Devido a essa característica, o PBT é significativamente mais fácil de ser modificado com fibras, do que o PET e, portanto, também está disponível geralmente como produto reforçado com esse material.

Os testes de exposição a UV, tração e ensaios de variação de temperatura foram realizados em amostras de PBT, com resultados excelentes. Portanto, ao final de todos os testes e ponderações, o PBT foi o material com melhores resultados gerais e o escolhido para a segunda fase do projeto, onde as ferramentas de injeção serão produzidas. A definição prévia do polímero é importante e necessária, pois os moldes de injeção são projetados levando isso em consideração. Sabia-se que seria uma etapa longa de testes e, portanto, era importante ser realizada no início do projeto, em paralelo com as demais atividades.

7.3 Prototipagem

Nessa etapa foi realizado o desenvolvimento do design do projeto mecânico dos invólucros utilizados nos sensores, assim como a prototipação em 3D, deixando o projeto já preparado para o desenvolvimento das ferramentas de injeção em polímero.

7.3.1 Prototipagem Mecânica

A concepção inicial do projeto previa o uso de uma película solar OPV – Organic Photo Voltaic, que ficaria ao redor do encapsulamento do dispositivo. O objetivo era aumentar a autonomia do dispositivo após o momento da falta, quando o identificador “cai” da base fusível e, consequentemente, não drena mais energia da rede por indução. Nesse momento de uma falta permanente, o dispositivo precisa sinalizar o centro de operação, via rede LoRa, a respeito da falha, enviando o perfil da falta e a localização. A sinalização local via LEDs deve ocorrer por até 10 horas, seguindo requisitos das concessionárias. Entretanto, após os testes com os primeiros protótipos, identificamos que não haveria

necessidade das células OPVs, pois foi alcançada a autonomia desejada apenas com os supercapacitores.

Figura 30 - Primeiro Protótipo Mecânico do FLOCO (não funcional).

Os protótipos dos dispositivos foram projetados em softwares para projetos mecânicos e posteriormente impressos em 3D, conforme Figura 30. Esses protótipos foram utilizados para verificação dos encaixes na base fusível, validações dimensionais, detalhes de montagem interna e testes iniciais de instalação, com vara de manobra.

A Figura 31 representa as principais partes internas do primeiro protótipo do FLOCO.

A Figura 32 é uma foto do primeiro protótipo mecânico do FLOCO, ainda sem nenhuma eletrônica. Essa etapa é importante para validação dimensional do produto.

Figura 31 - Perspectiva Interna - Concepção de Projeto.

Figura 32 - Vista Interna - Primeiro Protótipo Mecânico.

7.3.1 Desenvolvimento e Prototipagem Eletrônica

Utilizou-se a ferramenta Altium Designer (ALTIUM, 2021) em todo o desenvolvimento do projeto. O Altium é uma ferramenta completa para o desenvolvimento de *layout* de placas eletrônicas e possui integração com o fabricantes e distribuidores de componentes, auxiliando a escolha de determinado dispositivo, seja um conector ou um microprocessador, levando em consideração a sua disponibilidade no mercado, preço e expectativa de entrar em *phase-out* (quando fabricante anuncia sua descontinuidade). O Altium foi uma ferramenta essencial no desenvolvimento da eletrônica. Ao final, a ferramenta gera o arquivo *gerber* para a fabricação das PCIs.

Figura 33 - Diagrama em Blocos do FLOCO.

A Figura 33 apresenta o diagrama em blocos simplificado da eletrônica embarcada do FLOCO. O microcontrolador definido, *part number* ATSAMD51P20A, da ATMEL/Microchip possui as seguintes características básicas:

Núcleo ARM Cortex M5;

Velocidade máxima: 120 MHz;

Memória de programa: 1Mb

Memória RAM: 256Kb;

Temperatura de operação: -40 a 85°C

128 pinos

Consumo médio (modo ativo): 65uA/MHz;

A Figura 34 é o resultado do projeto realizado com o auxílio do Altium.

Figura 34 - Placa CPU “all-in-one”.

A placa CPU englobou o microcontrolador, módulo Bluetooth, GPS, acelerômetro e rádio LoRa. As primeiras placas foram produzidas em um *waffle* de seis placas, conforme Figura 35.

Figura 35 - Conjunto de 6 placas CPUs prontas para montagem.

Apesar do objetivo nessa fase do projeto era o de apresentar protótipos funcionais, devido a complexidade da placa CPU desenvolvida, o processo de montagem da mesma não poderia ser manual, dessa forma fez-se necessário o desenvolvimento e fabricação do estêncil, para o depósito de pasta de solda por processo de *silk screen*, conforme Figura 36.

Figura 36 - Estêncil da placa CPU.

O processo de montagem SMD - *Surface Mounted Device* – se inicia pelo depósito de estanho, nos pontos de conexão dos componentes eletrônicos. Diferentemente do processo convencional de soldagem em bancada, onde o estanho está em formato de fio e utiliza-se o ferro de solda, no processo SMD o estanho está em forma pastosa, por isso é utilizado um processo de *silk screen*. Após o depósito do estanho nas placas nuas, o processo de inserção dos componentes eletrônicos é feito por equipamentos específicos, que possuem precisão para posicionar os componentes sobre as placas. Após a inserção dos componentes, as placas são colocadas em fornos e o estanho é derretido, criando a conexão elétrica e fornecendo a fixação mecânica dos componentes às placas.

A montagem das placas foi realizada por terceiros.

8. ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DE PROTÓTIPO

A norma IEEE-495/2007 determina as características e ensaios para indicadores de falta para redes de energia de média tensão.

Apesar de, durante o desenvolvimento, considerarmos o uso dos pequenos painéis solares no topo do FLOCO, a fim de aumentar a autonomia do dispositivo quando da indicação da falta pelos LEDS, ao final da fase experimental isso se mostrou dispensável. A energia armazenada nos supercapacitores se mostrou suficiente para aplicação, suportando o circuito de sinalização por cerca de 10 horas, tempo considerado suficiente para auxiliar a equipe de campo na localização da falta, lembrando que o dispositivo ainda conta com GPS embarcado. Portanto, o centro de operação da concessionária recebe a localização exata do dispositivo, via protocolo.

A retirada dos painéis solares do FLOCO representou uma redução considerável no custo, na ordem de 5%, e resultou em maior espaço físico liberado no dispositivo. Com isso resolveu-se, ao final do projeto, aumentar o TC de autoalimentação, o que fez o FLOCO operar normalmente com correntes na faixa de 1A no primário, possibilitando sua aplicação praticamente em qualquer circuito de distribuição.

A Figura 37 apresenta a primeira versão do FLOCO, ainda em desenho 3D, e ao lado o protótipo final, um pouco maior devido ao TC de alimentação e sem os painéis solares na parte superior.

Figura 37 - FLOCO idealizado (esquerda). Protótipo funcional (direita).

8.1 Ensaio de Ciclo de Temperatura

Item 4.4.1 da norma IEEE 495-2007

O objetivo do teste de ciclo de temperatura é garantir que o dispositivo opere normalmente após o envelhecimento simulado. O FLOCO foi submetido a um ciclo térmico sequencial a temperaturas de -10°C , $+25^{\circ}\text{C}$ e $+85^{\circ}\text{C}$, conforme estabelecido pela norma. Os seguintes critérios especificados em norma foram atendidos:

- A tolerância de temperatura permitida em cada caso é de $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- A umidade na câmara deve estar entre 0% e 90%, sem condensação;
- A taxa de rampa de temperatura não deve ser superior a 10°C por hora;
- A sequência deve ser $+25^{\circ}\text{C}$, $+85^{\circ}\text{C}$, $+25^{\circ}\text{C}$, -10°C , $+25^{\circ}\text{C}$ e assim por diante;
- O tempo de permanência em cada temperatura deve ser de no mínimo 2 h;

Após o ciclo térmico, o dispositivo deve operar normalmente. Os testes realizados foram:

- Disparo por sobre corrente
- Verificação do sensor de posição (acelerômetro)
- Medição de temperatura e umidade
- Comunicação via Bluetooth
- Comunicação via LoRa com o ArpeggioIO.

Este ensaio foi realizado em câmara climática, modelo Horad. A Figura 38 apresenta o protótipo do FLOCO, já na câmara climática, antes do teste.

A Figura 39 e Figura 40 mostram a tela de configuração da câmara climática, no ciclo positivo e negativo de temperatura, respectivamente, conforme item 4.4.1 da norma IEEE 495-2007.

Observações / Resultados:

Teste realizado em paralelo com o equipamento:

FLOCO – S/N: FLO-1393152388

Figura 38 - Foto do dispositivo antes do teste de ciclo de temperatura.

Figura 39 - Ciclo de Temperatura Positiva e Umidade.

Figura 40 - Ciclo de Temperatura Negativa.

Figura 41 - Amostra após o Teste de Temperatura.

Após a realização do ciclo térmico, o FLOCO foi submetido aos testes funcionais, para verificar sua suportabilidade à condição climática. O dispositivo operou normalmente.

A Figura 41 apresenta o FLOCO na realização do ensaio funcional, após o ensaio de ciclo de temperatura.

A Figura 42 é um print da tela do terminal Android, onde é possível certificar a comunicação via Bluetooth, bem como a leitura dos sensores do FLOCO.

Também foi realizado teste pelo sistema ArpeggioIO nessa amostra, de forma a garantir o funcionamento do módulo LoRa.

Figura 42 - Tela de terminal de comunicação.

8.2 Teste do GPS

O dispositivo FLOCO deve sincronizar o horário e sua localização georreferenciada automaticamente. Usou-se o terminal Android para detectar o sincronismo do FLOCO pelo GPS.

No laboratório há uma antena que replica o sinal de GPS do lado externo do prédio, o que permite que o ensaio seja realizado indoor.

A Figura 432 apresenta o dispositivo FLOCO sob teste no laboratório, instalado em chave fusível convencional.

Figura 43 - Dispositivo sob ensaio de georreferenciamento.

Localização obtida:

Figura 44 - Terminal Android (Latitude e Longitude).

Conforme Figura 44, obtida pelo terminal Android, podemos ler as variáveis de latitude e longitude coletadas pelo FLOCO.

Verificação da localização obtida:

Latitude: -23.4996281 Longitude: -46.8507156

Conforme Figura 45, a localização obtida pelo chip GPS, embarcado no dispositivo, condiz com a localização exata do laboratório, onde os testes foram realizados.

Figura 45 - Tela Google Maps.

8.3 Parametrização via Terminal Android

Nesta etapa, demonstramos a parametrização via terminal Android.

Observações / Resultados:

Figura 46 - Terminal de Configuração do FLOCO.

A tela de configuração do dispositivo, Figura 46, apresenta as parametrizações de detecção de falta por elemento PIOC (sobrecorrente instantânea, código ANSI 50) e diferencial (di/dt), além de tempo de coordenação com religador (para identificação de falta permanente) e tempo de reset de sinalização automático.

Enable PIOC Element: Função PIOC ou Função 50 – Sobrecorrente Instantânea. Em “1” essa função está habilitada, em “0” está desabilitada.

PIOC Pickup Current: Quando a função PIOC está habilitada, esse campo deve ser configurado com o valor de corrente a partir do qual o FLOCO irá detectar evento de sobrecorrente, respeitando tempo ajustado em PIOC Time Delay, que associado a lógica de falta, irá determinar se o evento é uma falta temporária ou permanente.

PIOC Time Delay: quando a corrente passante ultrapassa o valor ajustado de pick-up, o FLOCO irá aguardar o tempo ajustado nesse parâmetro, para sinalizar o evento de sobrecorrente. Isso evita que variações de corrente de curta duração provoquem alarmes de sobrecorrente equivocados.

Di/dt Diferencial Current: O modo di/dt considera o diferencial de corrente em valores absolutos, dentro de um espaço de tempo pré-determinado, para indicar uma falta. Por exemplo, se esse campo estiver configurado para “10”, o FLOCO ficará comparando as próximas leituras de corrente com a anterior, se a variação de corrente ultrapassar 10A durante 3 ciclos, o evento de sobrecorrente será ativado.

O FLOCO executa 32 amostras por ciclo de 60Hz. A cada 8 amostras, o valor RMS de corrente é calculado. O FLOCO aguardará 3 ciclos para sinalizar evento de sobrecorrente na função di/dt.

Recloser Coordination Time: Durante um evento de falta, um religador a montante do FLOCO poderá detectar a falta. Esse parâmetro determina o tempo que o FLOCO irá aguardar para diferenciar entre uma falta temporária e permanente.

Fault Reset Time: Após um evento de sinalização de falta, quando o circuito voltar às condições normais de tensão e corrente, o FLOCO irá aguardar o tempo ajustado nesse parâmetro para ressetar o evento de falta.

8.4 Alarme de Detecção de Média de Tensão

O FLOCO foi instalado em base fusível e foi aplicada tensão de forma gradual, para verificar a leitura do campo elétrico pelo dispositivo, conforme Figura 47. Podemos programar o FLOCO para que acima de determinado valor de campo elétrico, o dispositivo informe presença de tensão e abaixo desse valor, ausência.

Observações / Resultados:

Figura 47 - FLOCO instalado em base fusível para ensaio de detecção de presença de tensão.

A Figura 48 se refere ao equipamento utilizado para a aplicação de tensão do dispositivo em teste. O primeiro display no canto superior esquerdo do equipamento indica valores primários.

O ensaio resultou em detecção de tensão a partir de 4,5kV, para as condições ensaiadas. Esse limiar pode ser ajustado via software, ou seja, o alarme de presença de tensão pode ir a “nível 1” a partir de outros valores analógicos de tensão. A Figura 49 apresenta o trecho do log de eventos do dispositivo, onde a variável em questão muda para *Line Voltage: Detected*.

Figura 48 - Tensão aplicada de 4,5kV.

Figura 49 - Tela do terminal apresentando a detecção de presença de tensão.

8.5 Alarme de Falta Transitória e Permanente

O objetivo deste teste é verificar se o FLOCO diferencia a falta transitória da falta permanente.

A Figura 50 se refere ao ambiente de teste, onde o FLOCO foi instalado em base fusível convencional. A corrente foi injetada no circuito através do equipamento da Figura 5155.

Figura 50 - Aplicação de corrente para simulação de falta temporária.

Figura 51 - Equipamento para Injeção de Corrente Primária.

A lógica para detecção de falta transitória verifica a variação abrupta de corrente e consequentemente o retorno às condições normais. A detecção de sobrecorrente seguirá a configuração do FLOCO, ou seja, di/dt ou ajuste de pick-up. O hardware também

verifica a presença de tensão. Um exemplo de falta temporária é um galho de árvore encostar na rede elétrica. Temporariamente a corrente nessa respectiva fase se eleva, sensibilizando o algoritmo de proteção do FLOCO. Entretanto, o galho pode se carbonizar, eliminando a falta. Esse tipo de sinalização é importante para ser reportada à concessionária, pois, nesse exemplo, indica que uma atividade de poda deve ser agendada, para evitar que essa falta seja permanente no futuro, ou mesmo para evitar acidentes. Outros exemplo de faltas temporárias ocorrem com animais que andam nas redes, aves ou isoladores com princípios de falha.

A Figura 52 apresenta o trecho do log de eventos do FLOCO onde uma falta temporária foi simulada, elevando-se a corrente do circuito acima do valor ajustado como pick-up e logo em seguida reduzindo a corrente.

```
14:13:55.652 2020-2-11 17:17:1
14:13:55.698 -----
14:13:55.699 ID.HW:0003-P0
14:13:55.699 ID.SW:vP0.1 - Feb 10 2020 16:11:30
14:13:55.700 PN:HRT-0003-P0-1
14:13:55.700 SN:298181838
14:13:55.747 -----
14:13:55.747 Latitude:-23.4996281
14:13:55.796 Longitude:-46.8507156
14:13:55.799 -----
14:13:55.799 Angle:44 deg
14:13:55.844 Temperature:37 oC
14:13:55.844 Humidity:48 RH
14:13:55.845 -----
14:13:55.846 Charge:4.1 V
14:13:55.894 Phase Current:27.6 A
14:13:55.944 -----
14:13:55.944 Pos. Sensor A: 1
14:13:55.944 Pos. Sensor B: 1
14:13:55.992 Pos. Sensor C: 0
14:13:55.992 -----
14:13:55.993 Fault Alarm: Asserted
14:13:56.043 Permanent Fault: Deasserted
14:13:56.043 Temporary Fault: Asserted
14:13:56.043 Fuse Position: Normal
14:13:56.089 Line Voltage: Not Detected
14:13:56.090 [flocos]
```

Figura 52 - Alarme de falta temporária.

A falta permanente implica a ausência de tensão e corrente por um tempo pré-determinado (ajuste “**Recloser Coordination Time**”) e/ou pela queda do cartucho, ou seja, o dispositivo deve sinalizar as faltas de forma diferente.

Na falta permanente, o FLOCO verifica o evento de sobrecorrente, conforme sua configuração e, na sequência, a ausência de corrente e tensão.

A queda do cartucho é considerado um evento à parte, pois nem sempre ocorre na falta permanente, seja porque uma proteção atuou a montante ou mesmo por problema mecânico na base fusível.

No teste, elevamos a corrente do circuito até a queima do elo fusível instalado no FLOCO, que conseqüentemente se desacoplou da base e caiu, conforme Figura 53. O log deste evento foi registrado corretamente pelo dispositivo como falta permanente, conforme Figura 54.

Figura 53 - FLOCO em falta permanente.

Figura 54 - Alarme de falta permanente.

8.6 Ensaio de Corrente

O objetivo deste ensaio foi levantar a curva de medição do TC de medição/proteção do FLOCO. Foi aplicada gradualmente corrente alternada com o dispositivo instalado na base fusível, em situação normal de trabalho. Através da interface em Android, via comunicação Bluetooth, confrontamos o valor de corrente passante, medido através de instrumento de medição, com o valor de corrente medido pelo FLOCO.

Esse ensaio também validou as correntes mínima e máxima que o FLOCO consegue ler. Para corrente máxima, o elo fusível foi substituído por barra de cobre.

O limite de 810A no ensaio foi devido ao condutor utilizado ter sobreaquecido com esta corrente. O limite do laboratório é de 1000A.

Os valores medidos e o erro calculado estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado do ensaio de corrente

Corrente Injetada	FASE A	Precisão %
2,8	2,73	-2,5%
5,4	5,2	-3,7%
15,7	14,6	-7,0%
18,2	17	-6,6%
25,6	24,1	-5,9%
32,7	33	0,9%
37,8	36,7	-2,9%
40,3	40,1	-0,5%
48	48,1	0,2%
54,7	55,2	0,9%
59,9	61,1	2,0%
69,4	69,1	-0,4%
80,4	82,7	2,9%
89,1	92,5	3,8%
101	105	4,0%
153	161	5,2%
203	212	4,4%
302	318	5,3%
412	382	-7,3%
503	466	-7,4%
810	780	-3,7%

Observações / Resultados:

Com a mala de testes CMC256, do fabricante Omicron, executou-se o teste até 50A e em seguida utilizou-se a mesa de corrente para correntes superiores, no entanto, o elo fusível se rompeu após aplicar-se 60A, conforme Figura 55. O teste então foi interrompido. A Figura 56 se refere a bancada de ensaios. A mala de ensaios CMC256 foi utilizada até a sua capacidade máxima de 50A, por ser bem mais precisa que o equipamento para correntes mais altas.

Figura 55 - Rompimento do elo fusível a 60A.

Figura 56 - Bancada de ensaios.

Após 50A, utilizou-se o ambiente de laboratório mais adequado e com o equipamento apresentado na Figura 57, foi injetado até 810A.

A Figura 58 apresenta o dispositivo em teste, instalado em base fusível. Ao invés de um elo fusível, foi adaptado um condutor rígido no cartucho do FLOCO, para que o teste pudesse ser realizado.

Figura 57 - Equipamento para injeção de corrente primária.

Figura 58 - Setup do ensaio de corrente.

A Figura 59 apresenta o log de eventos do FLOCO, com leitura de corrente em 780A.

Figura 59 - Último valor medido.

8.7 Ensaio de carregamento dos supercapacitores

Esse ensaio validou a corrente mínima que garante a manutenção de carga dos bancos de supercapacitores, em operação normal de funcionamento, ou seja, com rádio LoRa habilitado.

O FLOCO possui um banco de supercapacitores de 4V, responsável por alimentar toda a eletrônica embarcada. Esse banco de supercapacitores faz o papel de uma bateria, permitindo que o dispositivo se comunique com o centro de operação e sinalize uma falta, mesmo quando o cartucho está caído e, portanto, sem passagem de corrente elétrica. A vantagem do supercapacitor na solução, ao invés de bateria, se deve à ausência de necessidade de manutenção.

O teste se baseou na aplicação de corrente alternada com o FLOCO instalado em base fusível. Aplicamos a corrente conforme a

3 e medimos a tensão do banco de 4V. A partir de um determinado valor de corrente, a tensão nos supercapacitores começa a cair, indicando que a corrente passante não é suficiente para a manutenção da energia dos supercapacitores, que começa a descarregar.

Tabela 3 – Corrente mínima de operação

Valores Medidos	
Corrente Aplicada	Tensão no Banco de 4V
20A	4,1
17A	4,1
15A	4,1
13A	4,1
10A	4,1
8A	4,1
5A	4,1
4A	4,1
3A	4,1
2A	4,1
1A	4,0

Observações / Resultados:

Cada nível de corrente foi mantido por aproximadamente 5 minutos. A tensão de carga nos capacitores apresentou queda com uma corrente de 1A, conforme Figura 60.

Figura 60 - Queda da tensão para 4V, com corrente de 1A.

8.8 Ensaio de Autonomia sem Corrente

Com os bancos de supercapacitores totalmente carregados, iremos colocar o FLOCO em posição “caído” e monitorar a carga nos bancos de 4V, com o objetivo de verificar a autonomia do equipamento nesta condição.

Em situação normal de operação, após evento de falta, o FLOCO deve ser capaz de enviar via LoRa o status de falta, sua localização (latitude e longitude) e fase que está instalado, além da magnitude da corrente de falta.

Observações / Resultados:

Para verificação do tempo de autonomia foi implementada uma macro no terminal, desta vez em Windows, para imprimir a data e hora do dispositivo, recebidos via Bluetooth, a cada 1 minuto. Deste modo, a condição de teste se dá com a CPU em estado de Wake Up, ou seja, não em Sleep Mode, conforme Figura 61. A macro registrou data e hora do FLOCO, até que ele se desligou, Figura 62. O tempo de autonomia medido foi de 34 minutos, para as condições dadas.

```
COM11:115200baud - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help

[ljig]$ status
-----
2020-2-11 19:32:27
-----
ID_HW:0003-P0
ID_SW:vP0.1 - Feb 10 2020 16:11:30
PN:HRT-0003-P0-1
SN:298181838
-----
Latitude:2329.97782-S [ddmm.mmmmm]
Longitude:04651.04305-W [dddmm.mmmmm]
-----
Angle:89 deg
Temperature:35 oC
Humidity:49 RH
-----
Charge:4.1 V
Phase Current:21.9 A
Phase E-Field Sensor:83
-----
Pos. Sensor A: 1
Pos. Sensor B: 1
Pos. Sensor C: 0
[ljig]$ test -date
2020-2-11 19:32:47
[ljig]$
Enter "help" for more information.

[ljig]$ test -date
2020-2-11 19:33:49
[ljig]$
```

Figura 61 - Início do teste de autonomia em modo normal.

```
COM11:115200baud - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:0:25
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:1:26
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:2:27
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:3:28
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:4:29
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:5:31
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:6:32
[jig]$ test -date
2020-2-11 20:7:33
[jig]$
```

Figura 62 - Final do teste de autonomia em modo normal.

Em *Sleep Mode* a CPU entra em modo de baixíssimo consumo, executando apenas uma rotina simples para o piscar dos LEDs. Nessa condição, a autonomia foi de 10 horas, conforme premissa de projeto.

8.9 Ensaio de Integração ao Sistema SCADA

Utilizou-se o sistema Arpeggio para demonstrar a integração do FLOCO ao sistema SCADA Elipse. Na prática, o equipamento poderá se integrar, a princípio, a qualquer outro sistema SCADA, devido aos protocolos de comunicação adotados.

O objetivo era ler dados de corrente e status via sistema SCADA. Foram construídas telas básicas com dados discretos, informações analógicas/medidas e uma tela de parametrização, não utilizada nesse momento.

As Figuras 63 a 68 são *prints* das telas criadas, com suas respectivas legendas.

O tempo de comunicação via LoRa estava configurado a cada $8 \pm 5s$, dividido entre as diversas portas de agrupamento de dados, ou seja, cada grupo de variáveis, analógicas ou

digitais, é enviado dentro dessa janela de tempo. O tempo de $\pm 5s$ é aleatoriamente adicionado entre os grupos de variáveis, de forma a evitar colisões de dados.

Nos testes foi possível evidenciar as seguintes informações do FLOCO:

- Correta representação da fase selecionada fisicamente;
- Indicação da orientação: normal ou caído;
- Indicação das faltas detectadas: temporária, permanente, por sobrecorrente e por “queda”;
- Indicação da modulação do LoRaWAN utilizada;
- Indicação da presença de tensão;
- Indicação das correntes instantânea RMS e de falta;
- Indicação da localização via GPS;
- Indicação do número de série do equipamento;

Figura 63 - Tela Inicial indicando os dois FLOCOS testados.

Figura 64 - Exemplo da Tela de Dados Discretos.

Figura 65 - Informações do FLOCO selecionado já preenchidas.

Figura 66 - Exemplo da tela de Dados Analógicos.

Figura 67 - Informações de GPS, Corrente Elétrica e Número de Série do FLOCO.

Figura 68 - Indicação do Estado do FLOCO pareado com a Posição do Sensor. Sensor Caído é exibido com Verde, Sensor na Vertical é indicado por Vermelho.

8.10 Efeito da corrente elétrica nos condutores adjacentes

Item 4.4.8 IEEE 495-2007

O objetivo do teste é verificar se o FLOCO continua indicando NORMAL (sem *trip*) quando dois dispositivos são posicionados de acordo com a orientação e distância recomendadas pelo fabricante e apenas um deles está sob falta.

Ambos os dispositivos devem estar com a mesma configuração. O condutor adjacente deve receber uma corrente de falta, suficiente para o FLOCO detectar a falta, de acordo com suas configurações. O FLOCO que não está sob falta, deve permanecer em estado normal, sem qualquer indicação. A Figura 69 mostra os dois dispositivos, lado a lado.

Observações / Resultados

Figura 69 - Arranjo para ensaio de efeito nos condutores adjacentes.

Nenhuma influência foi detectada, quando uma falta foi aplicada no condutor adjacente ao do FLOCO, conforme Figura 70.

Figura 70 - Nenhum alarme detectado. Corrente 0A.

8.11 Teste de corrente de trip

Item 4.4.9 IEEE 495-2007

O objetivo do teste de corrente de disparo é verificar se o FLOCO muda de uma indicação de “NORMAL” para uma indicação de “FALTA”:

O dispositivo foi instalado em posição normal de operação, ou seja, instalado na base fusível. O teste foi realizado por sobrecorrente configurada no FLOCO e por di/dt.

Observações / Resultados

O equipamento sinalizou corretamente para as sobrecorrentes (valores absolutos) e di/dt (variação) configuradas. O teste foi realizado para cada caso habilitado de forma independente, e também com ambos os tipos habilitados simultaneamente.

8.12 Teste de reset

Item 4.4.10 IEEE 495-2007

O objetivo do teste foi verificar se o FLOCO mudaria de uma indicação de “FALTA” para um indicação de “NORMAL”, após as seguintes situações.

- Reset via comando Bluetooth;
- Reset via comando remoto (LoRa);
- Reset por tempo;
- Reset por ação manual (seccionamento seguido de religamento por vara de manobra);

O dispositivo deve ter disparo por corrente de falta e as condições de reset acima devem ser realizadas, de modo a verificar a correta operação.

Observações / Resultados

As condições acima foram testadas, apresentando funcionamento conforme especificado.

8.13 Tempo de Resposta

Item 4.4.11 IEEE 495-2007

O objetivo deste teste é levantar o tempo de resposta do FLOCO à um evento de sobrecorrente.

Para termos precisão satisfatória deste ensaio, usamos uma mala de ensaio de relé de proteção.

O dispositivo foi configurado para disparo a partir de 10A de variação.

A mala de ensaios gerou uma falta e a detecção da mesma foi observada pelo piscar dos LEDs do FLOCO. O tempo foi medido por cronômetro manual.

Observações / Resultados

A observação visual não permitiu avaliar o tempo de resposta do FLOCO com precisão. Para tal, fez-se necessário realizar uma adaptação para medição a partir de um contato de *trip*, obtido diretamente da placa CPU, conforme Figura 71, onde se observa dois condutores (azul e amarelo) ligados às garras jacaré. Este contato de *trip* é justamente o sinal digital que dispara o acionamento dos LEDs de sinalização de falta.

Figura 71 - Arranjo para detecção do alarme de falta.

A mala de injeção de corrente foi ajustada para 50A e a corrente foi injetada no FLOCO. Nesse momento a mala dispara um contador, que é bloqueado pelo contato de *trip*, retirado diretamente da CPU, ou seja, assim que o FLOCO detecta a falta, o contador é pausado.

A Figura 72 apresenta o ajuste de pick-up configurado no FLOCO. A Figura 73 apresenta o resultado do tempo de detecção de 65,4ms.

```
[flocol]$ cfg
[Port.Ref]:[Definition]                [value]
-----
8.0:Enable PIOC Element                0
8.1:PIOC Pickup Current                10
8.2:PIOC Time Delay                    0
8.3:Enable di/dt Element               1
8.4:di/dt Diferencial Current          10
8.5:Recloser Coordination Time         60
8.6:Fault Reset Time                  120
[flocol]$
```

Figura 72 - Ajuste de Pickup em 10A, por di/dt.

Figura 73 - di/dt : 65,4ms.

Na sequência, o FLOCO foi configurado para pick-up instantâneo de 10A, conforme Figura 74. Da mesma forma que o ensaio anterior, foi aplicado 50A com a mala de ensaios, que registrou o tempo de detecção da falta em 64,8ms, conforme Figura 75.

```

[ffloco]$ cfg
[Port.Ref]:[Definition]
[Value]
-----
8.0:Enable PIOC Element          1
8.1:PIOC Pickup Current          10
8.2:PIOC Time Delay              0
8.3:Enable di/dt Element         0
8.4:di/dt Diferencial Current    10
8.5:Recloser Coordination Time   60
8.6:Fault Reset Time             120
[ffloco]$

```

Figura 74 - Ajuste de Pickup up em 10A.

Figura 75 - PIOC (50): 64,8ms. Testes realizados entre os dias 11 e 12 de fevereiro de 2020, nas dependências da HART ENERGIA.

8.14 Ensaio de Campo

Os protótipos, criados na fase de projeto experimental, foram instalados em campo no dia 03 de abril de 2020, na concessão da Energisa em Mato Grosso do Sul, conforme Figura 76. Os dispositivos foram monitorados ao longo de 30 dias.

Figura 76 - Conjunto de Protótipos do FLOCO instalados.

A versão de *firmware* gravada nos protótipos resultou em um consumo de energia elevado. A corrente necessária para os dispositivos se manterem em funcionamento foi de 1,7A. O circuito onde os dispositivos foram instalados tem baixa corrente média e, por vezes, o dispositivo se descarrega. A nova versão de *firmware*, que foi lançada ainda durante o mês de abril, reduziu o consumo do FLOCO, permitindo que ele seja instalado em circuitos com corrente circulante de 1A, aumentando, portanto, sua aplicabilidade.

A comunicação do FLOCO com o sistema SCADA da Energisa foi plenamente estabelecida, um dos desafios dessa fase do projeto, devido à inovadora arquitetura de rede. Todas as variáveis definidas nessa fase de projeto foram lidas remotamente.

A Figura 77 apresenta a tela do supervisor Elipse com a leitura de variáveis analógicas instantâneas. Já a Figura 78 mostra as variáveis digitais do FLOCO. As variáveis foram lidas através da rede LoRa.

Figura 77 - Variáveis Analógicas Coletadas.

Figura 78 - Variáveis Digitais.

Durante a instalação dos protótipos, apenas dois pontos mereceram observações, a saber:

- a. Quando na posição desarmado (caído), o corpo principal do FLOCO se desacoplou de sua base. O corpo do FLOCO é fixado a sua base por ímãs de neodímio, o que permite usar um invólucro fechado, que facilitou o projeto mecânico, permitindo a seleção de fase de instalação, somente pelo giro do

FLOCO em sua base. Essa falha, na verdade, se deveu ao fato que na revisão final do protótipo, os painéis solares foram retirados e com isso pode-se aumentar consideravelmente o tamanho do TC de autoalimentação do dispositivo, para que o FLOCO pudesse operar com correntes primária menores, na faixa de 1A. O peso do corpo do FLOCO aumentou em cerca de 300g devido a essa alteração, porém os ímãs que mantêm o corpo do FLOCO,unido à sua base não foram substituídos. O maior peso do equipamento fez com o que, na posição caído, o FLOCO se soltasse da base. Na posição padrão ele operou normalmente, o que permitiu sua instalação e acompanhamento.

Obviamente, o maior peso do conjunto será considerado na fase seguinte do projeto (cabeça de série) e os ímãs serão dimensionados de acordo, não causando essa falha.

- b. O terceiro dispositivo, no momento da instalação, quebrou o cartucho em sua parte superior. Esses protótipos foram impressos em 3D, com filamentos de ABS. Por esse motivo, a resistência mecânica do material é menor, o que causou a quebra, conforme Figura 79Figura . Não se trata de um defeito de fato, pois na fase de cabeça de série será definido o material que será usado no FLOCO, conforme estudos já realizados, e o dispositivo terá corpo com alta rigidez dielétrica e mecânica. Os cartuchos convencionais de fusível são feitos em fibra de vidro e o polímero que será utilizado no FLOCO possui características físicas superiores à fibra de vidro, tanto elétricas, quanto mecânicas e térmicas.

Figura 79 - Parte superior do cartucho danificada

9. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS

A fase de desenvolvimento experimental foi concluída com êxito. A criação de um dispositivo de sinalização e monitoração de faltas para redes de distribuição de energia em média tensão era uma demanda de mercado. A adoção de um novo conceito de integração com sistemas SCADA, utilizando redes de IoT, se demonstrou promissor. Há uma necessidade de mudança de paradigma no mercado que, até o momento, especifica o uso de protocolo DNP3 nativo nos equipamentos, para que estes possam ser integrados aos sistemas supervisórios. O projeto FLOCO está servindo de base para o processo de persuasão nas concessionárias de energia, apresentado uma solução técnica e comercialmente viável, para a utilização de redes de IoT em equipamentos de automação e proteção, nas redes de distribuição de energia.

O uso de um sistema de autoalimentação, sem uso de baterias, representa uma expressiva redução de custos operacionais para a concessionária. O conceito seguramente é aplicável para outros dispositivos de automação e proteção. O avanço na tecnologia de microprocessadores exige cada vez menos energia para seu funcionamento e, portanto, sistemas autoalimentados se tornam tecnicamente viáveis. O fato de dispositivos como identificadores de falta, religadores e diversos tipos de sensores que são utilizados nas redes *smart grid* não dependerem de baterias de chumbo ácido, normalmente utilizadas nessas aplicações, representa uma redução significativa de custos de aquisição e manutenção, além de representar menor impacto ambiental, devido ao descarte incorreto desse componente.

Para o consumidor, a rápida detecção do local da falta resulta em melhor qualidade de energia e menos transtornos para empresas, escolas, pontos comerciais, etc. Para a concessionária tem-se como vantagens inegáveis a melhoria em seus índices de qualidade, redução de penalidades, aumento de receita e melhoria em sua imagem institucional, frente ao mercado e seus clientes.

O uso de materiais poliméricos modernos, ao invés de resina epóxi cicloalifática representa uma enorme redução de custos de produção e está em linha com a sustentabilidade, pois esses novos materiais são facilmente reciclados.

O projeto foi avaliado de forma extremamente positiva e a próxima fase do projeto ANEEL, chamada cabeça de série, foi aprovada no mesmo mês que se encerrou a fase

experimental. Nessa nova fase, o objetivo é transformar o protótipo em produto. Ferramentas de injeção por alta pressão estão sendo desenvolvidas, hardware e software sendo aprimorados. Uma indústria também foi licenciada para a fabricação em escala do produto e os ensaios de tipo estão agendados para junho de 2021. Após essa fase, o produto entrará em fase comercial.

Todos os objetivos do programa de P&D ANEEL foram alcançados, desde o desenvolvimento de tecnologia nacional, redução de custos operacionais, diminuição do impacto ambiental, melhoria da qualidade de vida da população e geração de empregos!

Com base em toda pesquisa aplicada realizada neste projeto, abrem-se novos caminhos para trabalhos futuros, como o estudo e desenvolvimento de outros dispositivos de automação e sensores para rede elétrica, que possam utilizar redes de IoT, que possam se integrar aos sistemas legados das concessionárias, sem a necessidade de outros sistemas proprietários, garantindo maior eficiência e acurácia na operação remota destes equipamentos.

O uso de polímeros modernos de engenharia, para equipamentos de automação instalados ao tempo, é outro campo que deve receber atenção para estudos futuros, pois mesmo com investimento alto na fabricação de ferramentas de injeção, o ganho financeiro com o menor custo de produção das peças, bem como baixíssimo índice de perda na fábrica, devido a ausência de bolhas de ar nas peças, seguramente traz resultados técnicos e econômicos a curto prazo.

Mesmo o uso de aplicativos para *Smartphones* para controle e configuração de dispositivos de automação ainda é um “tabu” no mercado de energia, mas existem muitas formas de garantir segurança no acesso aos dispositivos de campo, como a criação de *tokens* baseados em algoritmos que combinam data e hora com o número de série do dispositivo que está sendo acessado, além das inúmeras formas de criptografia disponíveis.

Por fim, este projeto demonstrou que a aplicação de conceitos modernos e inovadores é a forma de desenvolver equipamentos eficientes e economicamente viáveis para sua aplicação nas concessionárias de energia, um setor, por vezes, ainda muito conservador e pragmático com relação à adoção de novas tecnologias. O projeto de P&D ANEEL garantiu o tempo e o recurso necessário para o desenvolvimento do FLOCO, provando que esse caminho deve ser trilhado por outras empresas do setor.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRADEE. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Projeto Estratégico de P&D redes elétricas inteligentes: políticas públicas e regulação**. FGV, 2011.

ALTIVUM. Disponível em <https://www.altium.com/altium-designer/> . Acesso em 27/08/2021.

ANGELES, C. J., MERCADER, E. J., TAN, G. E., PACIS, M. C., BERSANO, J. R. **Fault Evaluation and Performance of an IEEE Bus 30 Power Distribution Network with Distributed Generation (DG)**. Philippines. School of Electrical, Electronics and Computer Engineering Mapua University, 2017.

ANGERER, F. **Fault indication via radio networks**. 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, vol. 2, 2001.

ARNITE – **Plásticos de Engenharia**. Disponível em <https://plasticsfinder.com/datasheet/Arnite%C2%AE%20AV2%20360%20S/A82P0>. Acesso em 20/03/2021

BACALINI, M. **Metodologia Experimental para Testes Padronizados de Confiabilidade em Dispositivos Indicadores de Falhas**. São Carlos. Dissertação (Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 2011.

BJERKAN, E. **Efficient fault management using remote fault indicators**. CIRED – The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, 2009.

BJERKAN, E., MYHRE, R. **Efficient Outage Management using Fault Passage Indicators**. Presented at *Int. Conf. On T&D Asset Management*, 24-27th Nov. 2008, Kuala Lumpur, Malaysia

BLOOMBERG. **Here's how electric cars will cause the next oil crisis**. Disponível em <https://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/> . Acesso em 30/07/2021

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução ANEEL N° 024, de 27 de janeiro de 2000.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução ANEEL N° 505, de 26 de novembro de 2001.**

BRASIL. Presidência da República – Casa Civil. **Decreto N° 8.461, de 2 de junho de 2015.**

CHIRPSTACK. **Open-source LoRaWAN Network Server.** Disponível em <https://www.chirpstack.io/> . Acesso em 20/03/2021.

CHOI, M. S., LEE, S. J., LEE, D. S., JIN, B. G. **A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jan, 2004.

CHOLLOT. **Decentralized self-healing solution tested in the framework of GreenLys smart grid project.** PowerTech, 2013 IEEE Grenoble IEEE, 2013.

DECRETO 8.461/2015. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/decreto/d8461.htm . Acesso em 30/07/2021

DAS, S., SANTOSO, S., MAITRA, A. **Effects of distributed generators on impedance-based fault location algorithms.** IEEE PES General Meeting, National Harbor, MD, 2014.

ELIPSE E3 GATEWAY. Disponível em <https://www.elipse.com.br/produto/elipse-gateway/> . Acesso em 30/07/2021.

ENSINGER. Disponível em <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semi-acabados/plasticos-de-engenharia/poliester-pbt> . Acesso em 04/02/2022.

FALCAO, D. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid.** Anais do III Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). Belém-PA, 18-21 de maio, 2010.

HARTBR. Disponível em: <http://hartbr.com/#lg=1&slide=0> . Acesso em 21/01/2022.

HORSTMANN GMBH. Disponível em:
<<https://www.horstmanngmbh.com/company/about-us>>. Acesso em 02/07/2019.

INDICADORES DE FALTA TOLLGRADE. Disponível em:
<https://enghousenetworks.com/tollgrade/>. Acesso em 02/07/2019.

JAVADIAN, S. A. M., NASRABADI, A. M., HAGHIFAM, M. R., REZVANTALAB, J. **Determining fault's type and accurate location in distribution systems with DG using MLP Neural networks.** *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on, Capri, 2009.*

KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B., ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** Sao Paulo: Blucher, 2005.

KAGAN, N., ROBBA, E. J., SCHMIDT, H. P. **Estimação de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica.** 1ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 2009

KAI, Z., KEXUE, L., NAIPENG, Y., YUHONG, J. L., LIHAN, Q. **The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid.** 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 2041-2045, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575.

KHAYYER, P., WOLLAEGER, J., ONORI, S., MARANO, V., OZGUNER, U., RIZZONI, G. **Analysis of impact factors for plug-in hybrid electric vehicles energy management.** 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.1061-1066, 16-19 Sept. 2012.

KOYANAGI, F., URIU, Y. **A strategy of load leveling by charging and discharging time control of electric vehicles.** Power Systems IEEE Transactions on vol.13 no.3 pp.1179,1184 Aug 1998.

LORAWAN. Disponível em https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_security_whitepaper.pdf . Acesso em 06/08/2021

LORA EMBARCADOS. Disponível em <https://www.embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/> . Acesso em 04/02/2022.

MAGMATTEC. Disponível em <http://www.magmattec.com.br/nucleo-magnetico-amorfo-e-nanocristalino#:~:text=N%C3%BAcleos%20Nanocristalinos,-Aplica%C3%A7%C3%A3o%3A%20transformadores%20de&text=Vantagens%3A%20maior%20sensibilidade%20%C3%A0%20indu%C3%A7%C3%A3o,energ%C3%A9tica%2C%20dimens%C3%B5es%20e%20formatos%20personaliz%C3%A1veis.> Acesso em 18/01/2022.

MOREIRA, R. M. M. **Análise Técnico-Económica de Estratégias de Self Healing em Smart Grids**. Porto. Dissertação (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

NOVSSEL, D., HART, D., HU, Y. **System for location faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads**. *U.S. Patent 5 89 093*, Nov. 17, 1998.

OHARA, A. T. **Sistema de Recomposição Automática de Redes de Distribuição – A aplicação do conceito de Self-Healing**. IN: Anais do VI CIERTEC 2009 - Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

PEREIRA, R. A. F., SILVA, L. G. W., KEZUNOVIC, M., MANTOVANI, J. R. S. **Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, April, 2009.

PORTALSOLAR. Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html> . Acesso em 17/09/2021

PPS – Forton PPS. Disponível em <https://www.celanese.com/engineered-materials/products/fortron-pps>. Acesso em 20/03/2021

PRODIST. Disponível em https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revis%C3%A3o10/f6c63d9a-62e9-af35-591e-5fb020b84c13%20 . Acesso em 30/07/2021.

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS. Disponível em <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2014/02/propriedades-magnéticas.pdf> Acesso em 18/01/2022.

SENTIENT. Disponível em <https://www.sentient-energy.com/>. Acesso em 02/07/2019.

SIGFOX. Disponível em <https://www.embarcados.com.br/uma-visao-tecnica-da-rede-sigfox/> . Acesso em 20/03/2021.

SOUSA, P. A. **Self-Healing Semi-Centralizado e seus benefícios para clientes com base instalada**. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, XI. 2015, Campinas, 2015.

SUZUKI, K., HERZER, G. **Advanced Magnetic Nanostructures, Chapter 13 - Soft Magnetic nanostructures and Applications.** Clayton, Australia: Springer US, 2006.

TERMO DE REFERÊNCIA 01- **Projeto P&D: Fault Location Optimization - F-LOCO**, Energisa. 2018.

TRINDADE, F. C. L., FREITAS, W., VIEIRA, J. C. M. **Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, Feb. 2014.

USIDA, W. F. **Sistema Inteligente para Alocação Eficiente de Dispositivos Indicadores de Falta em Alimentadores de Distribuição.** São Carlos. Tese (Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

YOSHIZAWA, Y., OGUMA, S., YAMAUCHI, K. **New Fe-based softmagnetic alloys composed of ultrafine grain structure.** *J. Appl. Phys*, v. 64, 1988.

ZAHRA, F., JEYASURYA, B., QUAICOE, J.E. **High-speed transmission line relaying using artificial neural networks.** *Electric Power Systems Research*, 2000.