



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ ROSENILDO BEZERRA DA SILVA

**DETECTOR DE FUGA DE CORRENTE EM ISOLADORES DE REDES DE
TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

MOSSORÓ

2019

JOSÉ ROSENILDO BEZERRA DA SILVA

**DETECTOR DE FUGA DE CORRENTE EM ISOLADORES DE REDES DE
TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza
Queiroz Júnior

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS586 Silva, José Rosenildo Bezerra da.

d Detector de fuga de corrente em isoladores de
redes de transmissão e distribuição de energia
elétrica / José Rosenildo Bezerra da Silva. -
2019.

46 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Junior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2019.

1. Linhas de transmissão. 2. Isoladores. 3.
Fuga de corrente. 4. Detecção. I. Junior, Idalmir
de Souza Queiroz, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas

da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

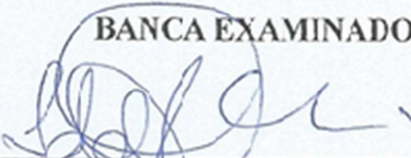
JOSÉ ROSENILDO BEZERRA DA SILVA

**DETECTOR DE FUGA DE CORRENTE EM ISOLADORES DE REDES DE
TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

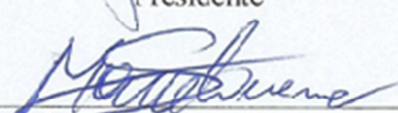
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Defendida em: 11 / 12 / 2019.

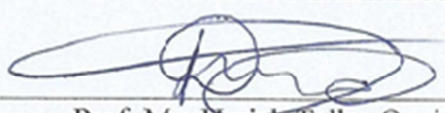
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Presidente



Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale
Membro Examinador



Prof. M.e Herick Talles Queiroz Lemos
Membro Examinador

Dedico esse trabalho aos meus pais, João Bezerra de Vasconcelos (In Memoriam) e Francisca Lucas da Silva Bezerra. A coragem, a garra, a honestidade e a dedicação que me mostraram ao enfrentar as adversidades da vida, sempre serão uma fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir chegar até aqui com saúde e força para superar todas as dificuldades e alcançar essa grande vitória.

Agradeço a essa universidade, pelo ambiente de aprendizagem contínuo e multidisciplinar que fez surgir um novo leque de oportunidades, transformando a minha realidade enquanto ator social.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, pela sua disponibilidade de tempo, ideias e saberes, como também pelas suas críticas e incentivos, que foram fundamentais para iniciar e prosseguir com esse estudo.

Agradeço a Banca Examinadora por dividir comigo esse momento tão importante e esperado: Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale e Prof. M.e Herick Talles Queiroz Lemos.

Agradeço à minha família pelo incentivo e apoio incondicional, em especial à minha companheira, amiga e esposa Cleide.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação, muito obrigado por tudo.

Sonhar é preciso, pois os sonhos dão um significado à existência. Ter fé não faz as coisas serem fáceis, mas as tornam totalmente possíveis, creia.

(Romanos 5:8)

RESUMO

A energia produzida de forma centralizada nas grandes usinas precisa ser transportada até os pontos consumidores usando linhas de transmissão e distribuição. A supervisão constante dos dispositivos que constituem essas redes é fundamental para que se garantam as condições de operabilidade destes, e com isso mantenha-se a qualidade do serviço. O trabalho proposto busca construir um dispositivo que auxilie na identificação de fugas de corrente elétrica nas cadeias de isoladores destas linhas, simplificando as operações de manutenção e fornecendo dados que subsidiem análises posteriores. Efetuou-se então uma pesquisa experimental de natureza aplicada, onde foram desenvolvidos um esquema elétrico e um layout de circuito, necessários na construção de um protótipo de placa eletrônica com características específicas para esta aplicação. Como resultado, após a realização dos testes de laboratório, verificou-se que os dispositivos desenvolvidos além de identificar a presença da falha por corrente elétrica de fuga de forma local, também a indica de forma remota, evidenciando sua funcionalidade.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Isoladores, Fuga de Corrente, Detecção.

ABSTRACT

The energy produced centrally in large plants needs to be transported to consumer points using transmission and distribution lines. Constant supervision of the devices that use these networks is essential to ensure their operating conditions, and thus maintain the quality of service. The proposed work seeks to create a device that assists in the identification of leakage of electric current in the insulator chains of these lines, simplifying as maintenance and data supply operations that support further statistical analysis. An experimental research of an applied nature was then carried out, where an electrical scheme and a circuit layout were performed, allowing the construction of an electronic board model with specific characteristics for this application. As a result, after performing laboratory tests, it was found that the device developed in addition to identifying the presence of leakage electric current fault locally, also allows its remote indication, evidence its functionality.

Keywords: Transmission Lines, Insulators, Current Leakage, Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Distinção das linhas de transmissão em níveis.....	16
Figura 2	– Cadeia de isoladores de disco de vidro.....	20
Figura 3	– Triângulo de composição da porcelana.....	21
Figura 4	– Ensaio de impulso atmosférico em isolador de vidro.....	22
Figura 5	– Lei de Ampère aplicada a uma linha filamental infinita.....	25
Figura 6	– Comportamento das linhas de fluxo no interior do toroide.....	26
Figura 7	– Modelo de transformador de corrente toroidal.....	27
Figura 8	– Modelo de sistema de comunicação.....	28
Figura 9	– Modelo simplificado do detector de corrente de fuga.....	31
Figura 10	– Dispositivo construído para simular as correntes de fuga.....	34
Figura 11	– Foto do sensor de corrente ZMCT103C.....	35
Figura 12	– Foto dos módulos de comunicação em rádio frequência.....	36
Figura 13	– Foto dos circuitos integrados responsáveis pela codificação do sinal.....	37
Figura 14	– Foto dos circuitos montados em matriz de contatos.....	38
Figura 15	– Layout da placa de circuito impresso.....	39
Figura 16	– Foto das placas de circuito impresso do protótipo.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Níveis de tensão dos sistemas de transmissão e distribuição de energia....	17
Tabela 2	–	Alguns materiais e seus parâmetros dielétricos.....	19
Tabela 3	–	Características dos principais recuperadores de energia eletromagnética..	26
Tabela 4	–	Características construtivas do sensor de corrente.....	34
Tabela 5	–	Características do sensor de corrente ZMCT103C.....	35
Tabela 6	–	Especificações dos módulos de rádio frequência.....	36
Tabela 7	–	Respostas do sistema aos diferentes níveis de corrente de fuga.....	40
Tabela 8	–	Efetividade do link a diferentes distâncias.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
PM	<i>Phase Modulation</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
CI	Circuito integrado
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
FEM	Força Eletromotriz
GIT	Gerador de Impulso de Tensão
LED	Light Emitting Diode
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RF	Radiofrequência
TJB	Transistor de Junção Bipolar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
1.2. Contribuições	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia	16
2.2. Isoladores	19
2.3. Medição de Corrente Elétrica.....	24
2.4. Transmissão e Recepção de Dados	28
3. METODOLOGIA	31
4. DESENVOLVIMENTO	32
4.1. Especificações da Placa de Aquisição.....	32
4.2. Especificações do Sensor de Corrente.....	33
4.3. Especificações do Sistema de Transmissão de Dados.....	36
4.4. Desenvolvimento do Circuito Eletrônico	37
4.5. Montagem do Protótipo do Hardware	39
5. RESULTADOS	40
5.1. Desempenho da Detecção de Falhas	40
5.2. Desempenho do Sistema de Comunicação.....	41
6. CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A – ESQUEMA DO CIRCUITO ELETRÔNICO	46

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo está relacionado a fatores como o aumento populacional, o desenvolvimento de novas tecnologias, a expansão do mercado, dentre outros. Em geral, essa energia demandada é gerada de forma centralizada utilizando grandes fontes como hidrelétricas ou termelétricas, transportada para os polos de consumo usando redes de transmissão e entregue às unidades consumidoras através de ramificações de redes de distribuição. Segundo Moura et al (2019), atualmente essas linhas são interligadas de forma que a energia possa percorrer grandes distâncias, podendo inclusive atravessar todo um continente.

Esses sistemas de transmissão e distribuição são de suma importância para o desenvolvimento das atividades diárias da população, de forma que uma falha que interrompa o fornecimento irá causar além do desconforto e insatisfação dos clientes, elevados prejuízos econômicos para a região afetada. Dessa forma, os dispositivos empregados precisam ser robustos e o processo construtivo dessas redes deve ser criterioso para oferecer alta confiabilidade. Outro fator importante que assegura a qualidade do sistema é a manutenção centrada na confiabilidade, que segundo Britto (2006), tem seu foco na função do equipamento para garantir a melhor condição de operação do sistema. Esse modelo de manutenção não visa a preservação do equipamento em si, e sim o correto desempenho de sua função no processo.

Dentre os diversos equipamentos que constituem uma rede de transmissão ou distribuição de energia elétrica, os isoladores merecem uma atenção especial, pois além de suportarem os altos níveis de tensão, ainda estão submetidos a esforços mecânicos constantes. Essas condições de operação deterioram os materiais e favorecem o surgimento de correntes elétricas de fuga que podem levar os dispositivos ao colapso, acarretando em falhas graves. De acordo com Capelini (2015), falhas em cadeias de isoladores geram situações extremas, colocando a população em risco, além de acarretar sérios problemas para as concessionárias, que podem ser duramente penalizadas pelos órgãos governamentais.

O acompanhamento constante das condições de operação desses dispositivos passa a ser fundamental, porém como a manutenção preventiva tradicional realizada baseia-se comumente na inspeção visual, é preciso que equipes e ferramentas necessárias sejam diligenciadas, e o local da inspeção devidamente preparado. Esses procedimentos elevam os

custos operacionais das concessionárias, que acabam por priorizar apenas os trechos do sistema elétrico que possuem um grande volume de cargas e assim são tidos como críticos.

É importante destacar que inspeções visuais dificilmente detectam as correntes de fuga internas aos dispositivos. A identificação desse tipo de falha requer equipamentos sofisticados, que ainda segundo Capelini (2015), são geralmente restritos a linhas de alta tensão, pelo seu grau de importância para o sistema elétrico. Dessa forma, um dispositivo de baixo custo que auxiliasse na identificação desse tipo de falha, seja para facilitar a inspeção visual ou mesmo proporcionar uma coleta remota de dados, poderia além de reduzir os custos e o tempo gasto pelas concessionárias, eliminar a restrição das linhas analisadas. Nesse contexto, o trabalho busca desenvolver um equipamento que seja capaz de identificar correntes elétricas de fuga em cadeias de isoladores e fornecer tanto a identificação visual do local da falha, quanto um sinal para a sua detecção remota.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo eletrônico capaz de detectar correntes de fuga em isoladores de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

1.1.2. Objetivos Específicos

Projetar um circuito eletrônico que possibilite a detecção de fugas de corrente elétrica em isoladores.

Verificar a viabilidade da identificação local e remota do ponto da falha.

Analisar a eficácia do dispositivo para a identificação da falha a uma distância máxima de até quinze metros.

1.2. Contribuições

A principal contribuição dessa monografia é a criação de uma ferramenta que auxiliará nos processos de manutenção das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Com esse dispositivo será possível inspecionar local ou remotamente isoladores em qualquer trecho do sistema elétrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

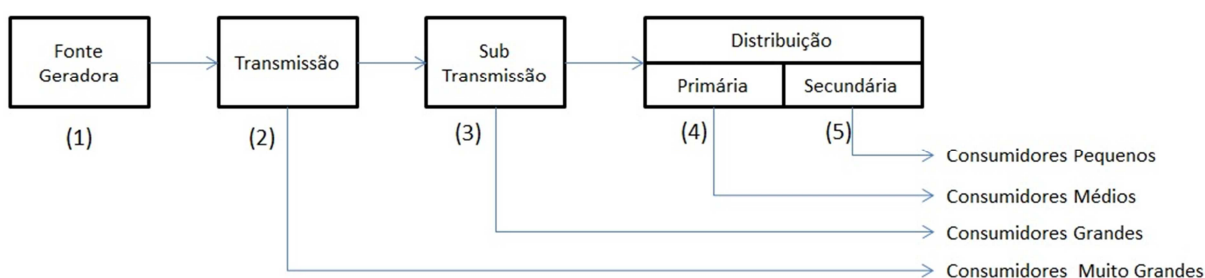
Para se compreender os aspectos construtivos, as funcionalidades e as aplicações do dispositivo a ser desenvolvido, primeiramente é preciso abordar alguns conceitos fundamentais a respeito das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a função básica e as características dos isoladores. Apresentar o dispositivo convencional usado para mensurar a corrente elétrica, juntamente com os métodos de inspeção atualmente empregados na manutenção dos sistemas elétricos, embasará as especificações do circuito eletrônico e auxiliará na definição dos parâmetros de conformidade do produto final.

2.1. Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia

Antes de expor os conceitos de transmissão e distribuição de energia, é preciso destacar a importância da eletricidade para o cotidiano atual dos indivíduos. O conforto, a praticidade e a produtividade estão diretamente relacionados com o consumo de energia elétrica. Ao supor uma interrupção no fornecimento por um longo período de tempo para uma dada região, imagina-se o colapso desencadeado, assim pode-se afirmar a dependência contemporânea dessa forma de energia. Fuchs (2015) afirma que o grau de desenvolvimento de um país pode ser relacionado ao consumo per capita de energia elétrica, já que o aumento da produção industrial e do poder aquisitivo da população implicam diretamente na demanda.

Entende-se por linha de transmissão o elemento do circuito capaz de transportar uma onda eletromagnética de uma fonte transmissora até uma carga receptora. Porém para esse trabalho, o conceito será restringido ao transporte de energia elétrica de alta potência em frequência padronizada de 60Hz. Ainda segundo Fuchs (2015), na organização vertical dos sistemas elétricos modernos existem cinco níveis de distinção das linhas de transmissão. A Figura 1 trás a organização em blocos dessas subdivisões.

Figura 1 – Distinção das Linhas de Transmissão em Níveis



Fonte: Adaptado de Fuchs (2015).

No nível mais alto (1), tem-se a geração ou produção da energia elétrica, oriunda da conversão de fontes primárias como a hidráulica, a térmica convencional, a geotérmica, a geonuclear, a eólica, a solar, etc. Essa geração se dá em níveis de tensão que vão desde algumas centenas de volts como no caso dos aerogeradores, até alguns quilovolts como no casos dos geradores acoplados às turbinas nas usinas hidrelétricas. Como essa energia precisa ser deslocada por grandes distâncias, com o intuito de reduzir as perdas por efeito joule, esses níveis de tensão são elevados a algumas centenas de quilovolts por meio de subestações.

No nível de transmissão (2), os grandes blocos de energia são deslocados entre a subestação elevadora do sistema de geração e as subestações abaixadoras do sistema de sub transmissão ou ainda para subestações de consumidores muito grandes. A transmissão é geralmente realizada em corrente alternada, mas a casos particulares onde ela também pode ser feita em corrente contínua. Os casos particulares compreendem redes submarinas ou redes aéreas com distâncias superiores a 1000 km.

No nível de subtransmissão (3), os grandes blocos de energia são deslocados a distâncias menores entre as subestações abaixadoras deste sistema e as subestações abaixadoras das concessionárias regionais, ou ainda para subestações de grandes consumidores. No Brasil, os três níveis já citados são tidos como críticos dada a sua importância e controlados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

Os níveis (4) e (5) compreendem as redes ramificadas de distribuição administradas pelas concessionárias. Os consumidores alimentados pelo nível (4) são de médio porte, com carga instalada superior a 75kW ou ainda com carga instalada superior a 50kW, mas que possuam equipamentos que exijam grandes correntes de partida. Os consumidores que estão no nível (5) são de pequeno porte, alimentados em tensão inferior a 2,3kV. Os níveis de tensão comumente utilizados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de Tensão dos Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia

COMPONENTE		TENSÃO (kV)
Distribuição	Geração	0,6 a 22,0
	Transmissão	138 a 1000
	Subtransmissão	22 a 138
	Distribuição Primária	3,8 a 22
	Distribuição Secundária	0,11 a 0,44

Fonte: Adaptado de Moura et al (2019).

Muitos são os estudos de materiais para emprego nas linhas de transmissão e distribuição que visam o aprimoramento dos dispositivos para garantir a qualidade da energia e a confiabilidade do sistema. De acordo com Fuchs (2015), o desempenho de uma linha aérea está diretamente relacionado com a geometria da mesma, portanto, suas características físicas e os elementos que a compõem devem ser analisados criteriosamente. Torres, condutores, isoladores e dispositivos de proteção são os principais elementos utilizados. Como o trabalho está focado nos isoladores, tais dispositivos serão abordados detalhadamente, ao passo que aspectos relacionados à geometria das estruturas e demais equipamentos empregados serão omitidos.

Quando posto em operação, qualquer sistema elétrico de potência estará sujeito a falhas. Nas linhas de transmissão esses incidentes ocorrem com relativa frequência, o que as transforma na principal fonte de defeitos. Segundo Mamede (2013), cerca de 78% das falhas tem sua origem nas linhas de transmissão e distribuição de energia. A falha mais comum é o curto-circuito, caracterizado pela redução repentina da impedância em um determinado ponto que dá origem a elevadas correntes, sensibilizando os dispositivos de proteção ou em casos mais severos, causando danos tanto às linhas de transmissão quanto às instalações de consumidores. Outros incidentes comuns são as subtensões e as sobretensões temporárias, que tem as mais diversas origens, incluindo o próprio curto-circuito.

Quando se tratam de falhas causadas por fenômenos naturais, o tempo de persistência é relativamente baixo, e o sistema de proteção geralmente consegue reestabelecer o serviço sem maiores transtornos, porém quando são falhas em equipamentos como cadeias de isoladores, o serviço é interrompido e toda uma operação precisa ser montada para identificar, sanar o defeito e reestabelecer o serviço. O processo de identificação do dispositivo defeituoso é deveras complexo, já que costumeiramente as inspeções se restringem a análise visual e o isolamento do trecho por eliminação via manobra de seccionadores¹. Para as linhas que não possuem a estimativa do trecho afetado dada pelos relés de distância, uma equipe precisa percorrer toda a sua extensão, e quando o dispositivo danificado não é de fácil visualização, a busca torna-se demorada e onerosa.

¹ Seccionadores são dispositivos mecânicos de manobra, de operação manual ou remota, usados para abrir e fechar um circuito elétrico.

2.2. Isoladores

De maneira geral, ao analisar o comportamento elétrico de um determinado material, classificam-se como isolantes aqueles que apresentam baixa condutividade elétrica. Isso se dá pela quantidade reduzida ou ausência total de elétrons livres. Esses materiais quando submetidos a uma diferença de potencial, apresentam um valor limite antes de permitir que a corrente elétrica flua, denominado rigidez dielétrica. Segundo Callister (2008), quando esse campo elétrico aplicado tem valor superior ao limite do material, um grande número de elétrons pode receber energia suficiente para entrarem na banda de condução e assim surge uma corrente elétrica que produz a degradação e pode comprometer de forma irreversível o isolante. Além da característica de alta resistência dielétrica, alguns isolantes também possuem alta estabilidade dimensional e resistência mecânica, como é o caso de materiais cerâmicos como porcelana e vidro. A Tabela 2 apresenta alguns materiais com seus respectivos valores de rigidez dielétrica.

Tabela 2 – Alguns Materiais e seus Parâmetros Dielétricos

Material	Constante Dielétrica		Rigidez Dielétrica ²
	60 Hz	1MHz	(kV por polegada)
Cerâmicas			
Cerâmica à base de titanato	-	15 – 10.000	0,05 – 0,30
Mica	-	5,4 – 8,7	1,00 – 2,00
Esteadita (MgO-SiO ₂)	-	5,5 – 7,5	0,20 – 0,35
Vidro de cal de soda	6,9	6,9	0,25
Porcelana	6,0	6,0	0,04 – 0,40
Sílica fundida	4,0	3,8	0,25
Polímeros			
Fenol-formaldeído	5,3	4,8	0,30 – 0,40
Náilon 6.6	4,0	3,6	0,40
Poliestireno	2,6	2,6	0,50 – 0,70
Polietileno	2,3	2,3	0,45 – 0,50
Politetrafluoretileno	2,1	2,1	0,40 – 0,50

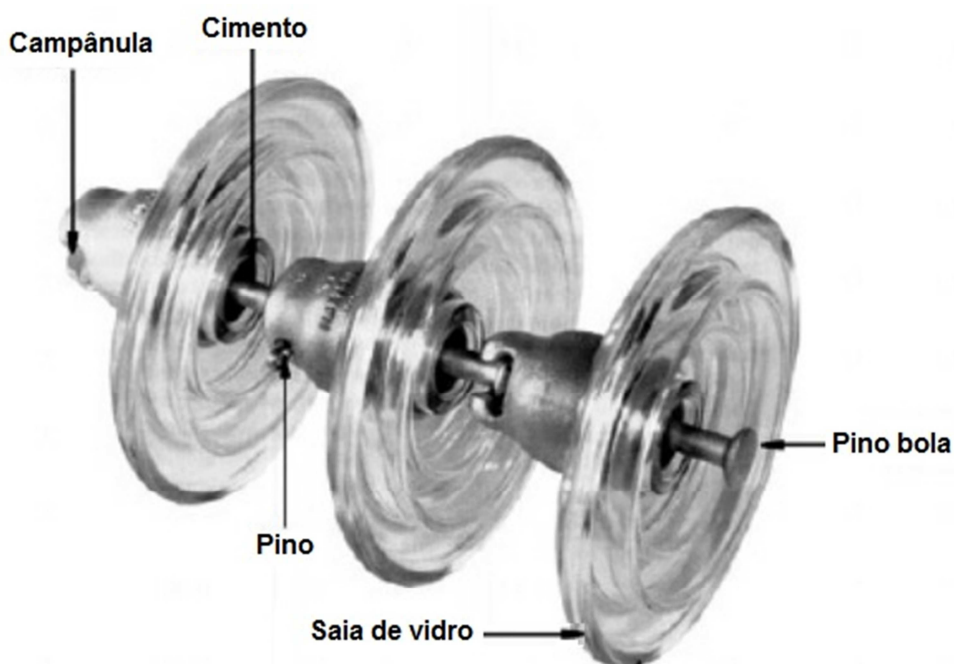
Fonte: Adaptado de Callister (2008).

² Segundo Callister (2008), os valores de rigidez apresentados dependem da espessura e geometria da amostra, bem como da taxa e duração da aplicação do campo elétrico.

Nos sistemas elétricos de potência, isoladores são elementos sólidos utilizados para promover o isolamento elétrico entre os condutores e a terra ou entre condutores carregados, além de promover a sustentação desses condutores, suportando todos os esforços mecânicos produzidos pelos mesmos. Esses dispositivos devem ser fabricados de forma que as linhas de campo elétrico internas e externas à sua superfície sejam distribuídas uniformemente, implicando no máximo valor possível de tensão suportável. Segundo Mamede Filho (2013), Os materiais empregados nos isoladores são autorregenerativos e, portanto, quando da ocorrência de uma sobretensão na rede que supere os seus limites nominais, geralmente suas características fundamentais são recuperadas.

Para que se garanta o isolamento elétrico entre a parte viva e a estrutura, tem-se que conhecer a distância de escoamento, que representa o menor caminho entre o ponto de amarração do condutor junto ao isolador e o ponto de fixação do isolador na estrutura. A depender do tipo de isolador, vários são unidos formando cadeias para que se consiga a distância mínima necessária. Esses isoladores em cadeia são largamente usados tanto em redes de distribuição quanto em linhas de transmissão. Vale salientar que esses isoladores são unidos por partes metálicas, o que significa que quanto maior o número de dispositivos, maior a possibilidade de ocorrer corrosão que leve à ruptura em algum ponto desta cadeia. A Figura 2 apresenta um exemplo de conjunto de isoladores montados em cadeia.

Figura 2 – Cadeia de isoladores de disco de vidro

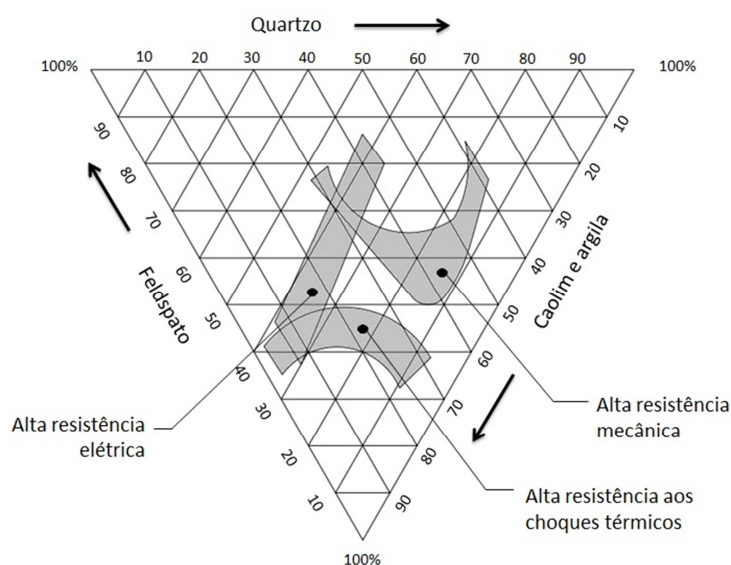


Fonte: Mamede Filho (2013).

Ao analisar as formas de fixação dos isoladores junto aos condutores e às estruturas de suporte, existem dois tipos, os isoladores de apoio e os isoladores de suspensão. Nos isoladores de apoio, os condutores são fixados de maneira rígida quando se tratam de estruturas que exigem a limitação de movimento, como é o caso dos barramentos de subestação de consumidor ou painéis metálicos, e são fixados de forma a permitir pequenos movimentos como é o caso das redes de distribuição que usam laços pré-formados. Já nos isoladores de suspensão, deve existir certa liberdade de movimento em relação à estrutura de fixação como é o caso das cadeias de isoladores de disco usadas tanto em redes de distribuição quanto em linhas de transmissão. Segundo o Mamede Filho (2013), esse grau de liberdade auxilia no alívio dos esforços mecânicos gerados por forças externas como a energia cinética dos ventos.

Quando se tratam dos tipos de materiais usados na fabricação, as características elétricas e mecânicas exigidas restringem os dielétricos a apenas alguns materiais cerâmicos e poliméricos. A porcelana e o vidro são os materiais cerâmicos mais comuns, enquanto que a resina epóxi e a fibra de vidro são os polímeros mais utilizados. No processo de fabricação, os materiais cerâmicos estão mais susceptíveis a agentes que influenciam diretamente na sua qualidade. Podem-se citar como agentes externos a umidade ou qualquer substância contaminante que influencie no grau de pureza das matérias primas, e como agentes internos ao processo, podem-se citar a temperatura de cozimento, a espessura das paredes das peças e a proporção de cada insumo. A Figura 3 trás um cenário das principais características de uma porcelana de acordo com a concentração das matérias primas.

Figura 3 – Triângulo de composição da porcelana



Fonte: Mamede Filho (2013).

Já os isoladores construídos à base de polímeros são sensíveis aos raios ultravioletas, sofrendo rápidas deteriorações como ressecamento e fissuras superficiais, perdendo as características mecânicas e elétricas. Por esses motivos, de acordo com Mamede Filho (2013), eles são geralmente empregados em instalações abrigadas.

Além do material dielétrico, os isoladores precisam de componentes adicionais no seu processo de fabricação. O dielétrico não pode ser fixado diretamente na estrutura, como também na montagem de cadeias de isoladores, necessitando de ferragens e contrapinos de latão, liga de alumínio ou aço inoxidável para essas finalidades. Quando os isoladores são fabricados usando conjuntos de dielétricos intercalados, o cimento é usado para unir as partes, devendo este componente possuir características mecânicas que suportem os ciclos térmicos do ambiente.

Visando garantir a eficácia do isolador diante das mais diversas condições que serão impostas pelo meio em que ele irá operar, ensaios rigorosos precisam ser realizados desde a prototipagem até o controle de qualidade final de um lote comercializado. De acordo com Mamede Filho (2013), todos esses testes são realizados pelos fabricantes seguindo as especificações do cliente e as diretrizes estabelecidas pela norma vigente. No Brasil, esses critérios de teste são designados pela NBR 5032 – Isoladores para Linhas Aéreas com Tensões Acima de 1000V – Isoladores de Porcelana ou Vidro para Sistemas de Corrente Alternada, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Um ensaio de impulso atmosférico de tensão é mostrado na Figura 4, onde em (a) tem-se o Gerador de Impulsos de Tensão (GIT), em (b) tem-se o equipamento de medição por divisão de tensão resistivo/capacitivo, e em (c) tem-se a amostra como um isolador de disco de vidro.

Figura 4 – Ensaio de Impulso Atmosférico em Isolador de Vidro



Fonte: Rodrigues et al (2011).

Quando em estágio de projeto, algumas especificações mínimas precisam ser listadas para orientar a escolha entre os modelos comerciais disponíveis, ou para servirem de parâmetros aos protótipos a serem desenvolvidos. Características como natureza do material, tipo do isolador, dimensões, cargas mecânicas e tensões suportáveis são indispensáveis.

Antes de citar as falhas mais comuns que ocorrem nos isoladores, é importante detalhar tanto os esforços elétricos quanto os mecânicos a que eles estão submetidos, pois parte das falhas tem origem no desgaste provocado por essas condições de operação. Os esforços elétricos são tensões nominais, sobretensões temporárias causadas por manobras ou outras falhas na rede e sobretensões de origem atmosférica. Já dentro dos esforços mecânicos têm-se as forças verticais que representam o peso dos condutores e eventuais cargas adicionais sobre estes, têm-se as forças horizontais axiais que atuam no sentido longitudinal provocada pelo tensionamento dos condutores e as forças horizontais transversais, provocadas pelo deslocamento natural das massas de ar atmosférico.

As forças horizontais expõem os dispositivos à flexão, ao passo que as forças verticais colocam sob tração constante os isoladores de suspensão, e sob compressão os isoladores de apoio. Caso estes dispositivos não tenham sido devidamente projetados, pode haver falhas como trincas, rompimento nos pontos de ancoragem ou até o cisalhamento do dielétrico. A oxidação das ferragens provoca a expansão nos pontos de junção do dielétrico, podendo surgir perfurações e trincas, reduzindo os níveis de tensão de ruptura. As sobretensões temporárias e de impulso atmosférico, a oxidação das ferragens e o acúmulo de sujidades podem ocasionar correntes elétricas na superfície externa (*flash over*) ou no interior dos isoladores (fuga). Capeline (2015) cita ainda outro agente que influencia na ocorrência de falhas em isoladores principalmente nas áreas urbanas periféricas e rurais. Trata-se do vandalismo, onde indivíduos arremessam objetos de encontro aos isoladores, e esses impactos podem danificá-los, inclusive causando a queda dos cabos em situações mais graves.

Existem diversos estudos sobre isoladores em linhas de transmissão e distribuição de energia, onde a maior parte concentra os esforços na análise do desempenho e na tecnologia dos materiais para desenvolver novas soluções que reduzam a incidência de falhas e melhorem a durabilidade dos dispositivos. Bonomo (2003) estuda protótipos de isoladores poliméricos para uso em ambientes externos. Já Lisboa et al (2011) estuda um caso de falha em isolador polimérico aplicado em linha de transmissão de 138kV com intuito de fornecer dados que comprovem a inconformidade no uso desse material para ambientes externos com níveis tão elevados de tensão. Rodrigues et al (2011) verifica o desempenho de isoladores de vidro quando revestidos por vernizes manométricos. Percebe-se que há um maior volume de

trabalhos concentrados na melhoria dos dispositivos com relação ao seu desempenho, porém são escassos os estudos focados na detecção de falhas para aprimoramento dos processos de manutenção. Capelline (2015) é uma exceção, já que busca desenvolver um método de inspeção remota buscando especificamente falhas em cadeias de isoladores. Esse trabalho segue a mesma vertente ao propor um dispositivo eletrônico com uma finalidade semelhante.

2.3. Medição de Corrente Elétrica

Entende-se como corrente elétrica o fluxo ordenado de elétrons em um meio condutor, deslocando-se entre os pontos de maior e menor potencial deste sob a ação de agentes como um campo elétrico, uma reação química, a incidência de luz, dentre outros. Em qualquer meio físico que possua elétrons livres, haverá um movimento constante e desordenado destes devido à agitação térmica, no entanto, se às extremidades desse meio condutor for aplicada uma diferença de potencial, surgirá um fluxo de cargas e com isso a corrente elétrica. Halliday (2009) esclarece que é preciso um fluxo líquido de cargas, pois nem todo movimento de partículas carregadas resulta necessariamente em uma corrente elétrica.

Segundo a lei circuital de Ampère, a integral de linha da componente tangencial da intensidade de campo magnético (H) em torno de um caminho fechado (L) é igual à corrente elétrica (I) envolvida por esse caminho, como mostra a Equação 1.

$$I_{env} = \oint H \cdot dl \quad (1)$$

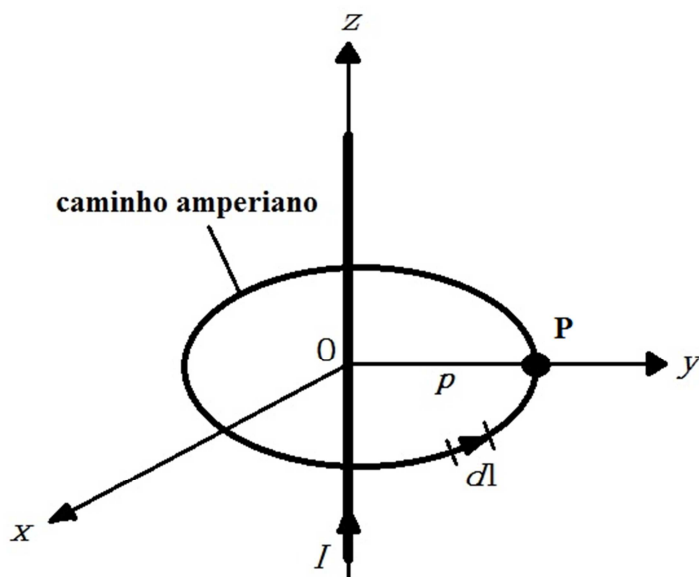
Para o caso das correntes de fuga interna nos isoladores, que é o alvo do dispositivo de detecção proposto, pode considerar um caminho retilíneo de comprimento igual à distância entre o ponto de fixação do condutor carregado e o limite da ferragem no interior do corpo do isolador. O Shadiku (2012) aplica a lei de Ampère a uma linha filamentar longa posta sobre o eixo (z), percorrida por uma corrente (I) como mostra a Figura 5, caso esse que pode por aproximação, mensurar a intensidade da corrente de fuga no isolador. Para um caminho amperiano de raio constante (ρ), a intensidade de campo magnético (H) também será constante, e dessa forma encontra-se a Equação 2 para a intensidade da corrente.

$$I = H_{\varphi} \oint \rho d\theta = 2\pi\rho H_{\theta}$$

Assim:

$$I = 2\pi\rho H_{\theta} \quad (2)$$

Figura 5 – Lei de Ampère Aplicada a uma Linha Filamentar Infinita



Fonte: Shadiku (2012).

Outra definição importante que será diretamente aplicada na detecção da corrente elétrica é a lei de indução de Faraday. De acordo com Hayt e Buck (2003), um campo magnético variante no tempo produz sobre um condutor uma força eletromotriz (fem) que pode estabelecer uma corrente, caso um circuito seja adequadamente fechado. Para um determinado intervalo de tempo (dt), o valor da tensão induzida é proporcional ao valor da variação do fluxo ($d\phi$) como mostra a Equação 3. O sinal negativo indica que a fem comporta-se de forma a se opor ao sentido do fluxo que a produz. Essa afirmação é chamada de lei de Lenz³.

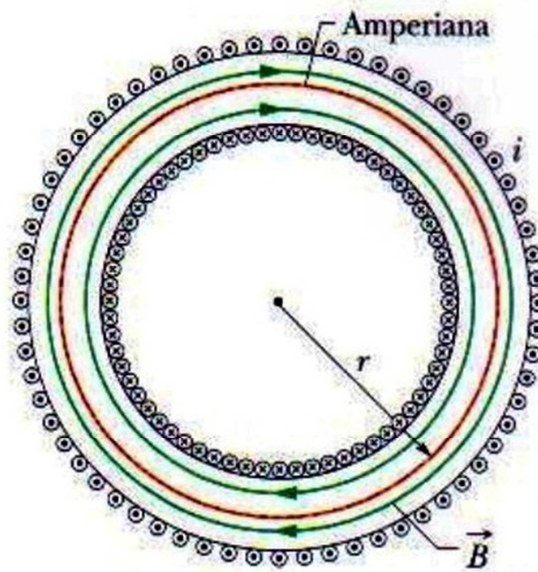
$$fem = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

A corrente de fuga que atravessa o isolador irá produzir um campo eletromagnético, portanto, uma variação de fluxo em decorrência desse campo implica na existência de uma energia eletromagnética associada, que pode então ser aproveitada. Segundo Silva (2016), essa energia pode ser recuperada por meio de acoplamento magnético em solenoides e transformadores, no entanto, os maiores desafios para esse problema em específico estão ligados ao baixo valor energético disponível, às perdas associadas ao processo de conversão e à interferência causada na estrutura física do isolador que compromete seu princípio básico de funcionamento. Nesse caso, um transformador de núcleo toroidal acoplado de maneira a envolver a região por onde circulará a corrente de fuga, se mostra como solução mais

³ Henri Frederic Emile Lenz, professor de física nascido na Alemanha, publicou sua lei em 1834.

apropriada. Ainda de acordo com Silva (2016), a geometria do toroide favorece a concentração das linhas de fluxo, visto que sua distribuição em torno do condutor primário também é circular. Halliday (2009) descreve o toroide como um solenoide cilíndrico que foi encurvado até que suas extremidades fossem unidas. A Figura 6 trás o comportamento das linhas de fluxo no interior do toroide, que por simetria formam circunferências concêntricas. Já a Tabela 3 apresenta uma comparação com relação à energia recuperada para os principais materiais utilizados atualmente.

Figura 6 – Comportamento das Linhas de Fluxo no Interior do Toroide



Fonte: Halliday (2009).

Tabela 3 – Características dos Principais Recuperadores de Energia Eletromagnética

Material do núcleo	Potência recuperada por unidade de volume	Estrutura	Observações
Ferrita	$1800\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Solenoidal	Grande (0,5m de comprimento e 40000 espiras)
Ferrita Mn-Zn	$1,86\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Solenoidal	Grande (0,4m de comprimento e 40000 espiras)
Ferrita	$1978\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Toroidal	Pequeno (3,6cm de diâmetro e 0,5cm de altura)
Liga nanocristalina	$7828\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Toroidal	Pequeno (3,6cm de diâmetro e 0,5cm de altura)

Fonte: Adaptado de Silva (2016).

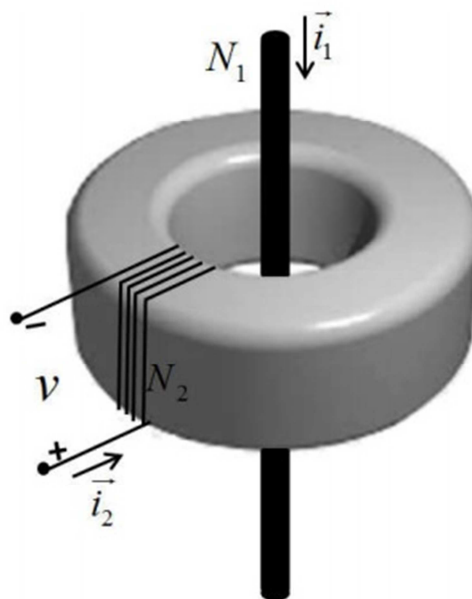
Aplicando a lei de Ampère ao toroide e considerando as características do material empregado em sua construção como uma permeabilidade magnética (μ), uma quantidade de espiras de fio condutor (N), a densidade do campo magnético (B) ao longo da seção reta varia com a distância (r) em relação ao centro do dispositivo e pode ser expresso pela Equação 4.

$$B = \frac{\mu_i N}{2\pi r} \quad (4)$$

Um transformador de núcleo toroidal para recuperação de energia magnética tem princípio de funcionamento semelhante a um Transformador de Corrente (TC). Os TC's são dispositivos que tem o seu enrolamento primário ligado em série com o circuito principal, e os enrolamentos do seu secundário são conectados a dispositivos de medição e proteção nos sistemas elétricos de potência. De acordo com Mamede (2013), os TC's fornecem nos seus terminais secundários uma imagem da corrente elétrica que circula no circuito primário, permitindo aos instrumentos de medição e proteção funcionarem corretamente sem que estejam expostos aos altos valores de corrente elétrica do circuito principal. A Figura 7 mostra um modelo de transformador de corrente onde (N_1) e (N_2) são os enrolamentos do primário e do secundário respectivamente. O campo magnético variante no tempo gerado pela corrente (i_1) induz uma tensão elétrica nos terminais do secundário. Aplicando a lei de indução de Faraday obtém-se o valor dessa tensão de acordo com a Equação 5.

$$v = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

Figura 7 – Modelo de Transformador de Corrente Toroidal



Fonte: Silva (2016).

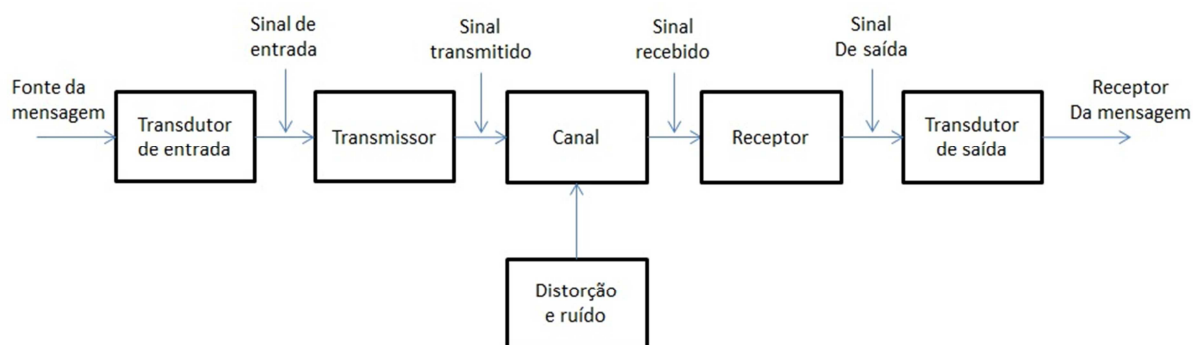
Visando o melhor aproveitamento dessa energia eletromagnética, o núcleo deve apresentar permeabilidade magnética e resistividade elétrica altas para que as baixas correntes de fuga sejam suficientes para oferecer uma resposta na saída, ao mesmo tempo em que as perdas por correntes parasitas sejam mínimas. Ainda segundo Silva (2016), essas características são comuns em materiais magneticamente moles, com baixa magnetização residual.

A todo sistema de conversão de energia existem perdas associadas que influenciam negativamente. Para o modelo toroidal apresentado, considerando que o primário será composto por apenas uma espira, o fluxo de dispersão pode representar parcela relevante da energia. Outro detalhe que precisa ser apontado é o fato do núcleo ser maciço, tornando-se mais susceptível às correntes parasitas. No entanto, como o estudo concentra-se em desenvolver um dispositivo para identificar a presença das correntes de fuga, a mitigação de eventuais perdas por hora não carece de esforços.

2.4. Transmissão e Recepção de Dados

Atualmente existe uma infinidade de sistemas de comunicação com propósito semelhante quanto à transmissão de uma informação entre uma fonte e um receptor. Porém as características particulares destes sistemas permite a distinção dos mais apropriados para cada aplicação. No sentido fundamental, Haykain (2004) descreve comunicação como a atividade que envolve implicitamente a informação transmitida de um ponto a outro por uma sucessão de processos. A Figura 8 trás um modelo típico de sistema de comunicação.

Figura 8 – Modelo de Sistema de Comunicação



Fonte: Adaptado de Lathi e Ding (2012).

A fonte dá origem à mensagem, podendo esta ser um sinal elétrico como corrente ou tensão, e ainda um sinal não elétrico como uma emissão sonora, uma variação de temperatura, dentre outros. Caso o sinal seja do tipo não elétrico, uma conversão faz-se necessária usando

um transdutor⁴. A mensagem convertida em uma onda elétrica é denominada de sinal de banda base. O transmissor geralmente modifica o sinal de banda base usando moduladores, codificadores e conversores para uma transmissão mais eficiente. O canal é o meio pelo qual o sinal elétrico que sai do transmissor é transportado até o receptor, podendo ser desde pares de fios até um enlace de rádio. O receptor reverte as alterações do sinal realizadas no transmissor de maneira a restaurar a mensagem para uma forma semelhante à entrada do sistema. Caso a mensagem seja um sinal não elétrico, novamente faz-se uso de um transdutor para converter o sinal elétrico de saída na mensagem original.

A transmissão em banda base é muitas vezes inviável, principalmente em se tratando de enlaces de rádio ou por satélite, dadas as dimensões exigidas pelas antenas. Nesses casos, o sinal precisa ser modificado para assumir uma forma que facilite o processo de transmissão. Segundo Haykin (2004) essa modificação é denominada modulação e consiste em usar a mensagem (sinal modulante) para modificar algum parâmetro de uma onda de maior frequência (portadora). A mensagem assume uma nova forma (sinal modulado) e é propagada através do canal. No receptor, o processo inverso denominado de demodulação, precisa ocorrer para que a mensagem original possa ser recuperada.

Existem algumas técnicas de modulação usadas na transmissão de dados que dependem do tipo de sinal elétrico disponível. Quando esse sinal é contínuo no tempo, as técnicas empregadas compreendem o grupo da modulação analógica, onde a portadora é um sinal cosenoidal ao qual se modificam a amplitude, a frequência ou a fase. Quando se modifica a amplitude da portadora, de forma que esta varie proporcionalmente ao sinal da mensagem, tem-se a modulação em amplitude (AM). No caso da modulação FM a frequência da portadora varia proporcionalmente ao sinal da mensagem, enquanto que para a modulação PM, o ângulo de fase da portadora é modificado pelo sinal modulante. Lathi (2012) esclarece que há uma dependência intrínseca entre as modulações FM e PM de forma que ao examinar esses sinais não se pode facilmente distinguir a técnica usada, e portanto ele unifica os dois processos na definição de modulação em ângulo.

Quando o sinal elétrico da mensagem apresenta-se de forma discreta no tempo, as técnicas usadas estão no grupo da modulação digital. Nos sistemas de transmissão digital, os sinais podem ser transmitidos em forma binária ou multi-nível. Quando cada um dos bits é transmitido isoladamente, diz-se que a transmissão é binária, mas quando os bits são agrupados em palavras binárias e representados por símbolos, diz-se que a transmissão é

⁴ Transdutores são dispositivos capazes de converter uma forma de energia em outra, como por exemplo, a conversão de energia mecânica em sinais elétricos.

multi-nível. Nesses sistemas, a qualidade da transmissão é medida através da probabilidade de o receptor interpretar um bit recebido de forma errada. Na modulação por chaveamento de amplitude (ASK) o sinal modulado representa uma variação da amplitude da portadora de acordo com os bits a serem transmitidos. Na modulação por chaveamento de frequência (FSK) o sinal modulado compreende a portadora com uma variação na frequência de acordo com os bits transmitidos. Na modulação por chaveamento de fase (PSK) o sinal modulado tem sua fase deslocada temporalmente de acordo com os bits transmitidos.

Tanto os sinais contínuos quanto os discretos transmitidos estão sujeitos a ação degradante de agentes internos e externos ao sistema como distorções e ruídos em todos os estágios da comunicação, porém é no canal que essa influência representa maiores proporções. Em ambos os casos de modulação a onda portadora possui uma frequência muito maior do que qualquer um dos componentes de frequência contidos no sinal da mensagem, isso é uma forma de eliminar parte das interferências, mas não se configura como suficiente. Nesse aspecto, a comunicação digital leva vantagem, já que é possível acrescentar um elemento ao sistema denominado de codificação, que permite dentre outras coisas controlar as características do sinal removendo correlações indesejadas e impondo correlações controladas entre os bits, reduzindo a largura de banda e eliminando frequências indesejadas.

Quanto ao fluxo de dados, a comunicação entre dois dispositivos pode ser simplex, onde a comunicação é unidirecional, ou seja, somente um dos dois dispositivos pode transmitir podendo o outro apenas receber. Half-duplex, onde cada um dos dois dispositivos pode transmitir e receber, mas não simultaneamente, ou seja, o tráfego de dados flui em ambas as direções, mas no momento em que um dos dispositivos estiver transmitindo, o outro ficara restrito à recepção. Full-duplex, onde ambos dispositivos podem transmitir e receber dados simultaneamente. Para esse ultimo caso, Forouzan (2010) salienta que para haver a comunicação simultânea, ou o link precisa ser separado fisicamente em dois caminhos distintos, ou a capacidade de transmissão do canal deve ser dividida entre os sinais que trafegam.

A escolha dos meios a serem empregados para levar a mensagem até o destino dependerá de alguns fatores como quantidade e tipo de dispositivos utilizados, distância entre os dispositivos, taxa de transferência de dados, etc. Os meios físicos mais comumente usados são: cabo coaxial, par trançado, fibra óptica, radio frequência, redes sem fio entre outras. Como o dispositivo em estudo busca a identificação remota do isolador em falha a curtas distâncias, deve-se utilizar um sistema de comunicação que atenda ao propósito com o menor gasto energético possível, tendo em vista que a energia recuperada com o transformador

toroidal compreende uma potência muito baixa, limitando-se a alguns poucos milésimos de Watt.

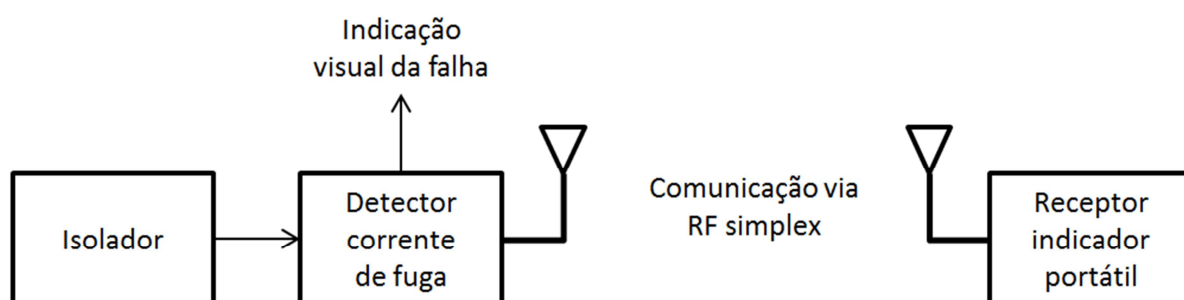
Nesse sentido, os módulos de rádio frequência (RF) possuem uma infraestrutura simples, operam com baixas taxas de transmissão de dados e consumo energético reduzido. O alcance desses módulos fica entre 10m e 100m, o que atende perfeitamente ao problema proposto. As faixas de frequência usuais para esse tipo de comunicação estão entre 315MHz e 433MHz. No Brasil, essas faixas estão liberadas para redes destinadas ao serviço de radioamador em domínio público não exclusivo (ANATEL 2018).

3. METODOLOGIA

Como já mencionado, as técnicas de inspeção atuais acarretam em altos custos operacionais. Caso a equipe de manutenção dispusesse de um equipamento que facilitasse o processo de localização do ponto de falha, reduzindo o raio de busca, isso concentraria a atenção em apenas um conjunto de dispositivos e automaticamente estaria isolando todo o trecho da rede apontado por relés e algoritmos a um único ponto. Um equipamento como este poderia promover uma redução drástica dos indicadores coletivos de continuidade de fornecimento, melhorar significativamente a qualidade do serviço e consequentemente reduzir os custos de operação das concessionárias.

A pesquisa desenvolvida é experimental, de natureza aplicada, com objetivo explicativo. Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica na busca por fontes que fornecessem um embasamento científico que possibilitasse estruturar a visão ainda abstrata da ideia. Posteriormente foram analisados trabalhos científicos correlacionados com as cadeias de isoladores e com a recuperação de energia eletromagnética para se obter modelos apropriados à materialização do dispositivo proposto. A Figura 9 trás um modelo simplificado do dispositivo.

Figura 9 – Modelo Simplificado do Detector de Corrente de Fuga



Fonte: Autoria própria (2019).

O desenvolvimento do hardware deu-se em algumas etapas. Testes de circuitos detectores de corrente foram seguidamente realizados em laboratório até atingir a especificação adequada de todos os componentes eletrônicos que viriam a integrar o sistema. Protótipos de hardware para indicação local e remota das falhas foram desenvolvidos, testados e ajustados até se obter um conjunto de dispositivos com satisfatório índice de precisão na amostragem.

4. DESENVOLVIMENTO

Quando se propõe a construção de um dispositivo com o intuito de criar um produto a ser comercializado, muitas são as etapas que precisam ser criteriosamente seguidas para garantir primeiramente a qualidade, e posteriormente a adequação a todas as normas regulamentadoras. Esse conjunto de atividades que envolvem desde o levantamento de requisitos para identificar a real necessidade do mercado até as limitações tecnológicas e estruturais, costuma demandar tempo e recursos de ordem humana e financeira implicando tanto no custo final, quanto no valor agregado do produto. No entanto, respeitando as muitas limitações, o estudo em questão busca apenas alcançar as funcionalidades idealizadas para o dispositivo detector de fuga de corrente, ficando sua otimização em nível de produto para trabalhos futuros.

4.1. Especificações da Placa de Aquisição

Como parte do levantamento dos requisitos do hardware, determinou-se a sequência de funcionamento do dispositivo. Inicialmente, o isolador ao apresentar uma falha interna, seja por perfuração ou trinca, estará submetido a uma corrente elétrica de baixa intensidade que fluirá pela ferragem e escoará através da torre ou poste. Nesse caso, um sensor de corrente com geometria toroidal estará envolvendo a ferragem ou ainda um cabo condutor ligado a esta, de maneira que a energia que circula em forma de corrente seja recuperada e usada através do acoplamento magnético, para gerar uma tensão nos terminais secundários deste sensor. Cabe ressaltar que a depender da posição em que o sensor se localize, as correntes que escoam no exterior dos isoladores também podem ser detectadas. A tensão gerada estará de acordo com os aspectos construtivos do sensor e pode ser determinada pela Equação 5.

Na identificação local da falha, essa tensão gerada será usada de forma direta para alimentar um circuito contendo um elemento que possibilite a indicação visual. O dispositivo

que mais se adéqua a esse fim, dada a simplicidade do seu funcionamento e o baixo consumo energético é o diodo emissor de luz. Dessa forma, um circuito contendo um LED de alto brilho e baixa potência fornecerá a indicação visual da corrente de fuga.

Na identificação remota, um circuito mais elaborado se fez necessário. Primeiramente, a presença da tensão gerada no sensor precisa ser identificada e convertida em um estado lógico, independente do nível desta. Para executar essa função, como alternativa mais simples, foram usados transistores do tipo TJB devidamente polarizados. Posteriormente, esse sinal de estado lógico foi codificado usando um circuito integrado apropriado, para então ser levado a um módulo emissor de rádio frequência. Por fim, o módulo emissor de RF disponibiliza esse sinal codificado ao irradiá-lo em todas as direções para ser detectado a curtas distâncias. Como a energia recuperada no sensor é insuficiente para alimentar o sistema de comunicação, uma fonte auxiliar precisa ser introduzida para fornecê-la. Neste caso, o conjunto formado por um pequeno painel fotovoltaico combinado com uma bateria desponta como alternativa. Medições realizadas em laboratório mostram que esse sistema de microgeração terá dimensão reduzida, pois a potência demandada pelo circuito será inferior a um Watt.

Esse sinal codificado estando disponível dentro de certa área de cobertura, um dispositivo receptor pode então ser usado para recuperá-lo e permitir que as equipes de manutenção identifiquem remotamente o ponto de falha ao percorrer a linha. Esse dispositivo portátil, alimentado por bateria, será constituído por um receptor de rádio frequência auxiliado por um circuito integrado, para efetuar a decodificação do sinal e sensibilizar os demais componentes que indiquem a presença da falha.

4.2. Especificações do Sensor de Corrente

Em sua forma idealizada, o recuperador de energia toroidal seria parte integrante do corpo do isolador, porém essa característica exige um estudo mais elaborado, pois precisa passar pelos estágios de prototipagem e análise de desempenho, regulamentados em norma. No entanto, considerando os sistemas já em operação, o desafio diz respeito à sua instalação, que deverá envolver o elemento condutor por onde escoará a corrente elétrica de fuga. Nesse sentido, os testes de laboratório foram executados simulando um fluxo controlado de corrente com intensidade que poderia variar de zero a um ampere. De acordo com a Equação 2, a intensidade do campo magnético não depende do nível de tensão do circuito primário, e com isso, a tensão de 12V em corrente alternada foi usada para a simulação da corrente no TC. A

Figura 10 mostra um dispositivo construído para os testes no laboratório, com a finalidade exclusiva de simular os diversos níveis de corrente dentro do intervalo determinado entre zero e um ampere.

Figura 10 – Dispositivo Construído para Simular as Correntes de Fuga



Fonte: Autoria própria (2019).

Como forma de determinar os aspectos construtivos do sensor de corrente, alguns parâmetros foram estabelecidos. A tensão máxima nos terminais secundários foi limitada a 5V, ao passo que a corrente máxima foi fixada em 5mA. Considerando um núcleo toroidal construído com Ferrita, e usando as dimensões citadas na Tabela 3, foi possível determinar a quantidade de espiras necessárias ao estimar uma corrente de fuga máxima de 1A. A Tabela 4 mostra os dados resumidos do recuperador de energia magnética a ser construído.

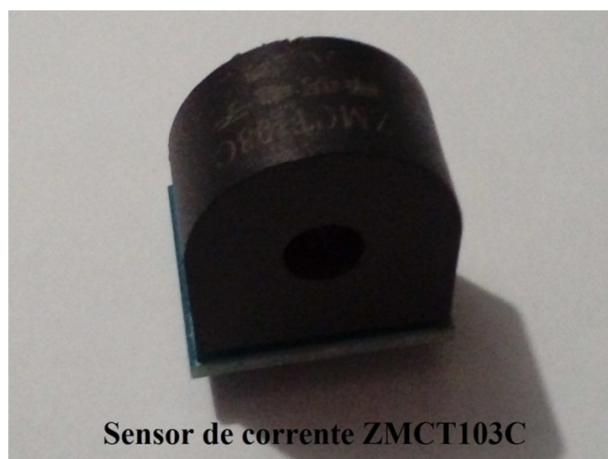
Tabela 4 – Características Construtivas do Sensor de Corrente

Parâmetros	Valor estabelecido/calculado
Corrente de fuga máxima	1,0A
Corrente máxima no secundário	5,0mA
Tensão máxima no secundário	5,0V
Diâmetro externo do sensor	3,6cm
Diâmetro interno do sensor	1,0cm
Espessura do sensor	0,5cm
Número de espiras do secundário	2500
Comprimento médio da espira	3,6cm
Comprimento aproximado do fio condutor	90,0m

Fonte: Adaptado de Silva (2016).

Diante dos parâmetros estabelecidos fica evidente que a construção de um protótipo de sensor implicaria em uma série de dificuldades, e assim, buscou-se um toroide no mercado que possuísse características construtivas aproximadas. Dentre os muitos modelos comerciais analisados, aquele que possuía os parâmetros mais próximos era o ZMCT103C mostrado na Figura 11. Esse modelo de sensor é produzido na China e está disponível nas plataformas nacionais e internacionais de comércio eletrônico. Um detalhe importante que precisa ser levado em consideração é a diferença entre as correntes elétricas de fundo de escala do sensor projetado e do sensor comercial utilizado, pois isso implicará diretamente na precisão da amostragem. A Tabela 5 trás as principais características do dispositivo ZMCT103C.

Figura 11 – Foto do Sensor de Corrente ZMCT103C



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 5 – Características do Sensor de Corrente ZMCT103C

Parâmetros	Especificações
Corrente máxima do primário	5,0A
Corrente máxima no secundário	5,0mA
Tensão máxima no secundário	5,0V
RTC	1000:1
Diâmetro externo do sensor	1,8cm
Diâmetro interno do sensor	0,5cm
Espessura do sensor	1,0cm
Número de espiras do secundário	2500
Comprimento médio da espira	3,3cm
Comprimento aproximado do fio condutor	82,5m

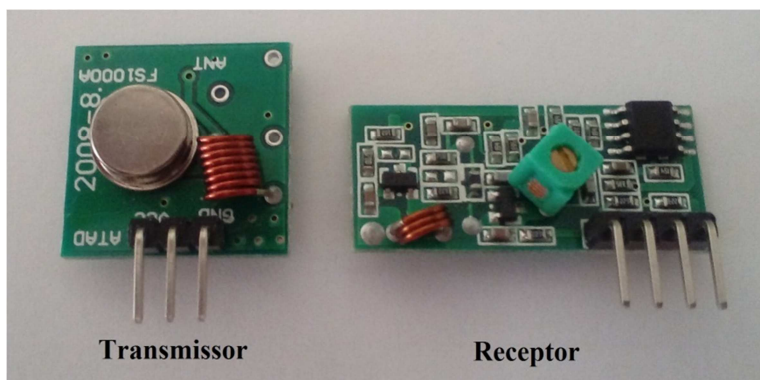
Fonte: Energiazero.org (2019).

4.3. Especificações do Sistema de Transmissão de Dados

Durante as manutenções, as equipes percorrem as linhas executando uma inspeção visual. As distâncias entre os pontos de observação e os elementos analisados dependem da altura das torres ou postes, mas geralmente são inferiores a cem metros. Do ponto de vista dos sistemas de comunicação pertencentes às faixas de frequência liberadas para uso não exclusivo em domínio público, os módulos de rádio frequência se mostram como alternativa viável para aplicação na identificação remota dos detectores de fuga, pois suas características funcionais atendem aos requisitos, portanto, serão utilizados para este fim.

A frequência de 433MHz escolhida para a transmissão dos dados é liberada pela ANATEL, inclusive sendo largamente utilizada em sistemas de automação e segurança eletrônica. O emissor trata-se do módulo modelo MX-RM-5V, enquanto que o receptor é o módulo MX-05V. A Figura 12 mostra os módulos citados, enquanto que a Tabela 6 trás os detalhes e especificações destes dispositivos.

Figura 12 – Foto dos Módulos de Comunicação em Rádio Frequência



Fonte: Autoria própria (2019).

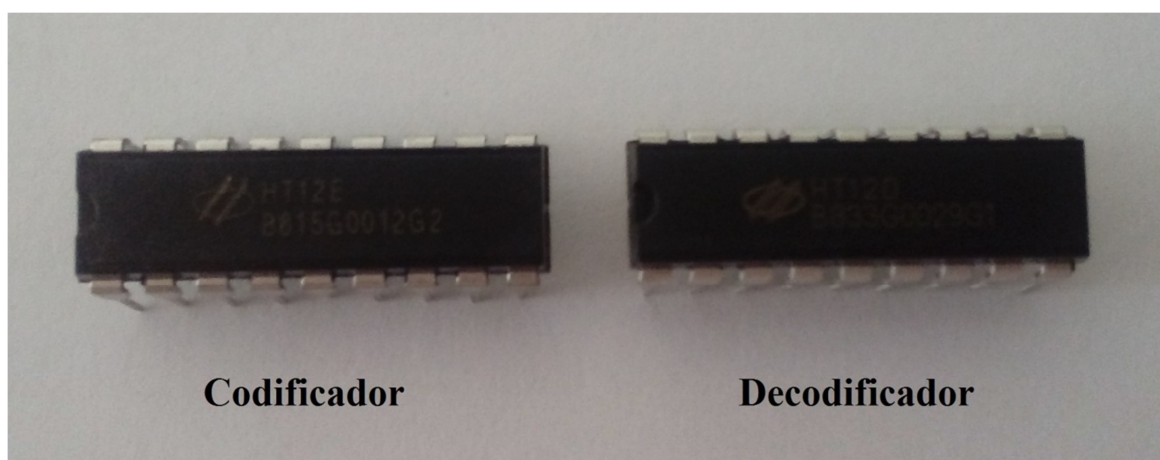
Tabela 6 – Especificações dos Módulos de Rádio Frequência

Parâmetros	Especificações
Frequência	433MHz
Modo de operação	Modulação em amplitude
Potência	20mW
Alcance	200m
Tensão típica de operação	5,0V
Taxa de transferência	4kB/s
Sensibilidade	-105dB

Fonte: Energiazero.org (2019).

De forma a reduzir as interferências e proporcionar certa segurança aos dados, o sinal precisa ser codificado. Para esse propósito, junto ao emissor é usado o circuito integrado modelo HT12E, e junto ao receptor é usado o circuito integrado HT12D, que respectivamente irão codificar e decodificar os dados transmitidos. Esses CI's são desenvolvidos exclusivamente para aplicação em sistemas de controle remoto, fabricados com larga escala de integração. Possuem oito pinos de entrada que podem ser configurados externamente com nível lógico alto ou baixo para controlar a codificação interna CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Os circuitos integrados são mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Foto dos Circuitos Integrados Responsáveis pela Codificação do Sinal



Fonte: Autoria própria (2019).

4.4. Desenvolvimento do Circuito Eletrônico

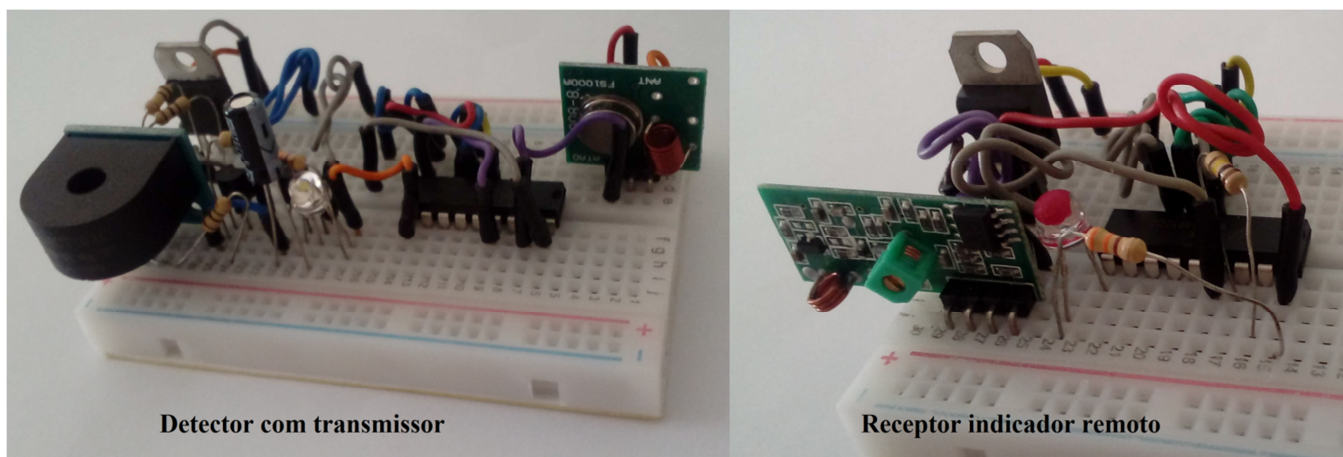
Na etapa inicial do desenvolvimento, o primeiro desafio estava no fato da quantidade de energia recuperada pelo sensor de corrente ser pequena a ponto de não conseguir alimentar o circuito de identificação local, já que o sensor utilizado possuía um fundo de escala sensivelmente diferente do idealizado. Buscando superar essa adversidade, o circuito indicador foi dimensionado utilizando um diodo emissor de luz de alto brilho, em série com um resistor que limitasse a corrente a valores muito baixos, porém suficientes para permitir a operação funcional do diodo. Testes foram executados utilizando os valores de corrente disponíveis no simulador para determinar a funcionalidade e sensibilidade do circuito detector. A indicação visual ocorria a partir do ponto em que a energia recuperada era suficiente para polarizar o diodo, ou seja, a corrente de fuga só passa a ser identificada quando seu valor implica na quantidade mínima de energia exigida pelo circuito detector.

Quando o foco volta-se para a indicação remota da falha, a quantidade de energia requerida pelos circuitos adicionados ao conjunto inicial supera definitivamente a capacidade

de recuperação do sensor, sendo assim necessário o incremento de uma fonte auxiliar. Como o objetivo do equipamento é a análise das falhas em isoladores nas linhas de transmissão, a alimentação precisa preferencialmente ser independente, evitando que as oscilações da rede interfiram diretamente na leitura. Pensando em um sistema autônomo, o uso isolado de baterias configura uma alternativa inviável dos pontos de vista técnico e econômico, pois a autonomia reduzida exigiria operações contínuas de manutenção. No entanto, a introdução de uma fonte auxiliar como um micro gerador solar permite a alimentação do circuito e a carga da bateria durante as horas de sol pleno, ao passo que a bateria fornece a energia necessária nos demais períodos do dia. O circuito do detector foi então projetado para operar com tensões variando entre 9Vcc e 20Vcc, reduzindo sua sensibilidade à possíveis flutuações da fonte. Isso garante a operabilidade do sistema tanto em situações de elevada profundidade de descarga da bateria quanto em períodos onde a fonte geradora auxiliar esteja no seus valores máximos de tensão.

A imagem da corrente elétrica nos terminais secundários do toroide poderia ser convertida em um sinal binário de diversas maneiras, para assim indicar a presença da falha. Uma das formas mais eficientes seria através de amplificadores operacionais devidamente configurados, porém a simetria da sua alimentação exigiria a implementação de circuitos mais complexos, por isso buscou-se um circuito mais simples com o uso de transistores de junção bipolar. Os transistores devidamente polarizados produzem um sinal binário de nível lógico alto a partir de um valor mínimo de corrente de fuga, valor esse que depende do ganho aplicado ao circuito. O sinal binário segue então para as etapas de codificação, modulação e transmissão. Os circuitos de detecção e identificação remota montados em matriz de contatos podem ser visualizados na Figura 14.

Figura 14 – Foto dos Circuitos Montados em Matriz de Contatos



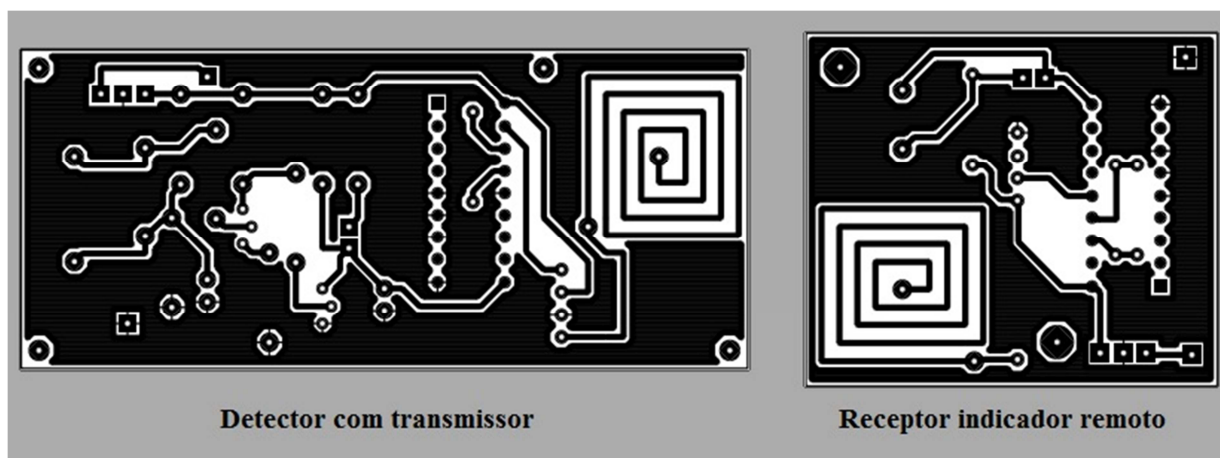
Fonte: Autoria própria (2019).

4.5. Montagem do Protótipo do Hardware

Após os ajustes que levaram o circuito montado em matriz de contatos a um comportamento satisfatório do ponto de vista funcional, pode-se iniciar o processo de desenvolvimento do esquema do circuito eletrônico. De forma a simplificar sua alimentação, o circuito terá uma entrada para fonte seguida de um circuito integrado regulador de tensão, controlando assim os níveis necessários. O esquema do circuito eletrônico completo desenvolvido está no APÊNDICE A.

Com o esquema finalizado, é possível iniciar o processo de desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso. É preciso fazer algumas ressalvas quanto ao aspecto construtivo da placa eletrônica, já que produtos desenvolvidos para o mercado precisam obedecer a diversas normas técnicas regulamentadoras, e também deve-se considerar outras variáveis como os efeitos magnéticos e de interferências por sinais elétricos dinâmicos e estáticos oriundos de fontes externas. Porém, por tratar-se de um protótipo onde o comportamento funcional basta para confirmar as hipóteses levantadas, apenas as características dos componentes eletrônicos e demais dispositivos utilizados foram levados em consideração para se determinar níveis de tensão e corrente elétrica, disposição dos elementos e espessura das trilhas e ilhas na placa eletrônica. Todo o processo construtivo da placa eletrônica deu-se utilizando a plataforma de desenvolvimento ExpressPCB, por ser uma ferramenta gratuita para quem precisa desenvolver circuitos eletrônicos com precisão e profissionalismo. O layout da placa do protótipo pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Layout da Placa de Circuito Impresso



Fonte: Autoria própria (2019).

5. RESULTADOS

O processo de análise dos resultados será baseado nas respostas do sistema aos ensaios realizados em laboratório. Para a realização desses ensaios foram utilizados além das placas eletrônicas dos detectores e do simulador de fuga de corrente, toda a infraestrutura necessária disponível no laboratório de eletrônica. Como parâmetros de desempenho para a detecção local da falha, foram coletados dados de resposta do sistema a alguns valores de corrente ao longo de todo o intervalo disponível no simulador. Já para a detecção remota, foram coletados dados de resposta a diferentes distâncias entre o sistema de detecção com transmissor e o receptor remoto.

5.1. Desempenho da Detecção de Falhas

O desempenho do circuito detector das correntes de fuga baseia-se na resposta do sistema à presença de diversos níveis de corrente no circuito primário do sensor recuperador. O laboratório não dispunha de equipamentos para simular correntes de fuga em níveis de tensão padronizados para linhas de transmissão e distribuição de energia, todavia, o princípio de funcionamento do sensor recuperador utilizado requer apenas a presença da corrente, sendo por hora dispensável o nível da tensão. Tendo em vista apenas a funcionalidade de detecção, o simulador de corrente com intervalo de 0 a 1000mA distribuídos em dez passos de 100mA é suficiente, mesmo que esses níveis de corrente de fuga sejam demasiadamente elevados para casos reais de falhas em isoladores. A Tabela 7 trás os dez passos de corrente de fuga com a respectiva resposta do sistema detector.

Tabela 7 – Respostas do Sistema aos Diferentes Níveis de Corrente de Fuga

Corrente (mA)	Resposta do detector	Corrente (mA)	Resposta do detector
0	Negativa	600	Positiva
100	Negativa	700	Positiva
200	Negativa	800	Positiva
300	Positiva	900	Positiva
400	Positiva	1000	Positiva
500	Positiva		

*Negativa – corrente de fuga não detectada

*Positiva – corrente de fuga detectada

Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com a Tabela 7, é possível perceber que a resposta do sistema é positiva para detecção das correntes de fuga em todos os demais pontos iguais ou superiores a 300mA, ao passo que para valores inferiores o sistema não foi capaz de indicar a presença da falha. Isso significa que a quantidade de energia recuperada pelo sensor comercial utilizado em valores de corrente inferiores a 300mA é insuficiente para sensibilizar o circuito eletrônico na configuração atual. No entanto, o comportamento do sistema para os demais valores aponta para um funcionamento condizente com a ideia inicial levantada. Isso implica que para a detecção de valores menores de corrente de fuga, basta o aprimoramento tanto do circuito eletrônico, quanto o desenvolvimento de um sensor capaz de recuperar quantidades maiores de energia.

Com relação ao aprimoramento do sensor, tendo em vista que o modelo toroidal representa a geometria mais eficiente, pode-se supor que as mudanças devem ocorrer nos aspectos construtivos relacionados ao projeto, como material do núcleo, material do enrolamento e relação de espiras. Já com relação ao circuito eletrônico, muitas são as possibilidades, indo desde a escolha, dimensionamento e configuração dos componentes até a metodologia de conversão do sinal gerado pelo sensor em um sinal elétrico para ser aproveitado na indicação da falha. Na configuração atual dos componentes, o sinal gerado pelo sensor é aproveitado para alimentar o circuito detector, não havendo uma isolamento galvânica entre essas duas etapas, fato esse que influencia diretamente na sensibilidade do detector.

5.2. Desempenho do Sistema de Comunicação

O desempenho do circuito de comunicação baseia-se na resposta do sistema quanto à efetivação do link entre os dispositivos em diferentes distâncias e a consistência dos dados no tocante ao nível lógico enviado pelo transmissor e o apresentado pelo receptor. Julgando pelo fato de que o sinal a ser detectado estará disposto de forma perene, a velocidade de resposta do sistema para efetivação do link ou para uma amostragem consistente dos dados não é fator determinante, portanto, não será considerado como parâmetro de desempenho.

Para o teste de efetividade do link, tomou-se como exemplo a distância padrão entre postes de uma rede de distribuição aérea urbana e assim os dispositivos transmissor e receptor foram dispostos em diferentes distâncias entre si, dentro do intervalo de zero a quarenta metros. Considerando que no vão entre os dois postes existirá a presença do sinal de mais de um detector, o circuito transmissor deve ter seu alcance limitado para que haja uma janela que

permita às equipes de manutenção identificar a origem do sinal. A Tabela 8 trás a resposta da efetividade do link a diferentes distâncias.

Tabela 8 – Efetividade do Link a Diferentes Distâncias

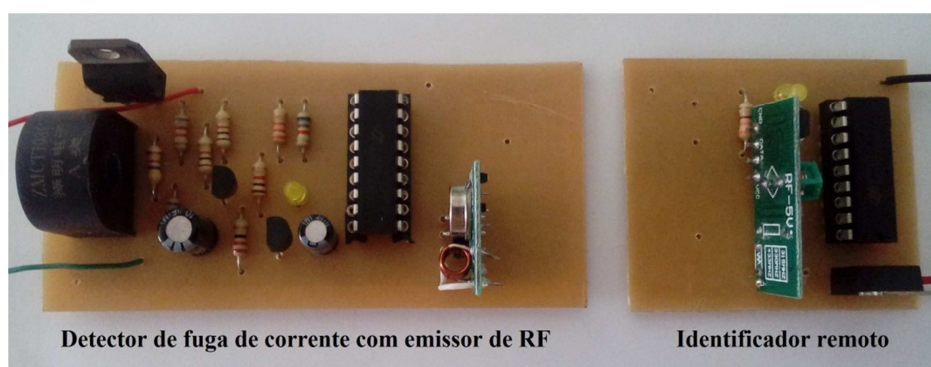
Distância entre os dispositivos (m)	Situação do link
5	Efetivado
10	Efetivado
15	Efetivado
20	Não efetivado
30	Não efetivado
40	Não efetivado

Fonte: Autoria própria (2019).

Percebe-se pelos dados dispostos na Tabela 8 que o link é efetivado até a distância de quinze metros, o que implica em uma janela de dez metros para os sinais de diferentes detectores entre os postes. Isso contribuirá para que as equipes de manutenção quando em deslocamento de vistoria de uma linha, possam identificar não só a presença de um sinal de falha, como também sua origem. Esse resultado foi conseguido através do ajuste – por tentativa – do tamanho da antena do transmissor, mantendo-se fixa a geometria helicoidal. Um estudo aprofundado das características como geometria, comprimento e material da antena é necessário para o projeto da comunicação em diferentes aplicações similares.

No que diz respeito à consistência dos dados, para todas as situações em que o link foi efetivado, existiu a conformidade entre o nível lógico enviado pelo detector e o apresentado pelo identificador remoto. Assim, pôde-se afirmar o bom desempenho do sistema de comunicação durante os ensaios no laboratório. Para confirmar a consistência dos dados, um estudo mais criterioso precisa ser realizado, pois testes de campo são necessários junto aos isoladores, para se garantir que os diversos sinais eletromagnéticos do meio não causarão interferências comprometedoras. A Figura 16 mostra a foto do protótipo final do sistema.

Figura 16 – Foto das Placas de Circuito Impresso do Protótipo



Fonte: Autoria própria (2019).

6. CONCLUSÕES

O trabalho teve como proposta inicial a criação de um dispositivo eletrônico capaz de detectar fugas de corrente em isoladores de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. O estudo teórico em fontes bibliográficas e a análise dos trabalhos científicos com aplicações práticas relacionadas auxiliaram na estruturação da visão ainda abstrata da ideia e contribuíram para a obtenção de modelos apropriados à materialização do dispositivo proposto. Como resultado, obtém-se um equipamento não só capaz de identificar a presença de falhas, como também possibilita a sua indicação remota, simplificando o trabalho das equipes de manutenção.

De uma forma geral, após a realização dos ensaios e verificação efetiva das funcionalidades, ficou evidente que o sistema desenvolvido mostrou-se adequado à proposta, ainda que seja um protótipo, necessitando de diversos estudos detalhados para o seu aprimoramento até atingir um nível de produto, assim como a adequação às normas de produção nacionais de dispositivos eletroeletrônicos e submissão aos testes de segurança e funcionalidade em laboratórios ligados a órgãos de fiscalização do governo.

Olhando especificamente para a sensibilidade na detecção, a quantidade de energia recuperada pelo sensor configurou-se como fator determinante. Por hora, os ensaios mostram que o comportamento do sistema é satisfatório, já que o foco da análise de desempenho não leva em consideração valores nominais de fuga de corrente em situações reais. Porém o aperfeiçoamento tanto do sensor quanto das etapas posteriores do circuito carece de uma maior atenção, para se melhorar a precisão da leitura.

No que diz respeito à identificação local e remota das falhas, o dispositivo confirmou a viabilidade construtiva, com a ressalva de que uma fonte auxiliar faz-se necessária, já que a energia recuperada pelo sensor não é suficiente para alimentar os componentes eletrônicos atualmente disponíveis no mercado. No entanto como alternativa, a microgeração fotovoltaica não só atenderia a necessidade, como também viabiliza o incremento de outras funcionalidades, pois a energia deixa de ser um fator limitante.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a integração da análise de temperatura ao sistema, já que a termografia é uma das principais formas de identificação das falhas. Hoje, a detecção por fuga de corrente e a análise de temperatura são duas técnicas utilizadas de modo separado pelas concessionárias. A junção destas em um único dispositivo daria mais robustez e confiabilidade ao sistema.

REFERÊNCIAS

MOURA, A. P.; ROCHA, E. P.; MOURA, A. A. F. Engenharia de Sistemas de Potência: Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada. Fortaleza: UFC, 2019.

BRITTO, T. M. **Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Para-raios de Alta Tensão**. 2006. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/89226/231354.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 10 set. 2019.

CAPELINI, R. M. **Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de Transmissão a Partir de Sinais de Descargas Parciais Externas**. 2015. 211 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em: < https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/122/tese_capelini_2015.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 set. 2019.

FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. 3 ed. Uberlândia: EDUFU, 2015.

MAMEDE, D. R.; MAMEDE FILHO, J. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CALLISTER, W. D. JR. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ABNT NBR 5032: Isoladores para Linhas Aéreas com Tensões Acima de 1 000 V - Isoladores de Porcelana ou Vidro para Sistemas de Corrente Alternada. Brasil, 2014. 61p

RODRIGUES, M. A. O. et al. Avaliação do Desempenho Elétrico de Isoladores de Vidro Revestidos por Verniz Nanométrico. **Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação - CGTI**, Campinas, 2011. Disponível em: < <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2017/09/Avaliação-do-Desempenho-Elétrico-de-Isoladores-de-Vidro-Revestidos-por-Verniz-Nanométrico.pdf> >. Acesso em: 12 set. 2019.

LISBOA, M. B. et al. Análise de Falha em Isolador Polimérico. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 811 – 818, 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v16n4/02.pdf> > Acesso em: 15 set. 2019.

BONOMO, A. **Estudo Sobre Isoladores Poliméricos à Base de Resinas Poliuretanas para Ambiente Externo**. 2003. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-09052017-153952/publico/Dissert_Bonomo_Angela_cor.pdf >. Acesso em: 11 set. 2019.

HALLIDAY, D. Fundamentos de Física, Volume 3: Eletromagnetismo. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SHADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

HAYT, W. H. JR.; BUCK, J. A. Eletromagnetismo. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

SILVA, T. L. V. N. **Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal para Recuperação de Energia Eletromagnética**. 2016. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/478/1/THA%C3%8DS%20LUANA%20VIDAL%20DE%20NEGREIROS%20DA%20SILVA%20%E2%80%93%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGEE%29%202016.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2019.

HAYKIN, S. Sistemas de Comunicação: Analógicos e Digitais. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

LATHI, B. P.; DING, Z. Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

FOROUZAN, B. A. Comunicação de Dados e Redes de Computadores. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ENERGIA ZERO. **Material de Ensino: Sensores**. Itália: EZ, 2017. Disponível em: <http://www.energiazero.org/arduino_sensori/5a_range_ac_current_transformer_current_sensor_module.pdf>. Acesso em: 01 out. 2019.

