



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES: UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

NILSON PEREIRA DA CRUZ JUNIOR

Feira de Santana – BA, Brasil
Dezembro de 2020

Nilson Pereira da Cruz Junior

TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES: UM ESTUDO
BIBLIOGRÁFICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Unidade de
Ensino Superior de Feira de Santana, em
cumprimento as exigências para obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Me. Reginaldo Barnabé
Gonzalez Grimaldi

Feira de Santana
2020

Nilson Pereira da Cruz Junior

TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES: UM ESTUDO
BIBLIOGRÁFICO

Feira de Santana, / /

Banca Examinadora:

Professor Me. Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador

Professora Dra. Viviane de Souza Martins

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliadora

Professor Me. Márcio da Silva Pereira Bove

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, pelos exemplos de vida que tantos nos ensinaram e nos orientaram a chegar até aqui!

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Aos nossos pais, em vida ou *in memoriam*, pelo apoio e dedicação continua em tudo que se tornasse necessário para nossa formação profissional e como ser humano.

As esposas, filhos, amores e demais familiares, por serem as dádivas de Deus em nossas vidas.

Ao nosso orientador o Prof. Me. Reginaldo Grimaldi, pela paciência, atenção, dedicação e orientações para construção deste estudo, sem a qual não conseguiríamos finalizar com êxito.

Aos colegas de turma pelos laços de amizade, pelos momentos de tensão nos dias de avaliação e pelas horas de descontração que demarcam e registram nossa trajetória acadêmica. Ficamos na história da UNEF/FAN, mas iremos avante para novos sonhos e projetos na vida profissional

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a consecução de mais esta etapa de nossas vidas, o nosso: Muito Obrigado!

*“Existe uma força mais forte que a
eletricidade, o vapor e a energia
atômica: A VONTADE.”*

Albert Einstein

RESUMO

Os isoladores são equipamentos que compõe as linhas de transmissão de energia que auxiliam na manutenção de sua qualidade e na prevenção de falhas em seu fornecimento, por esse motivo, se torna oportuno que eles estejam sempre em condições adequadas de funcionamento, devendo estes, serem, portanto, submetidos a um processo de monitoramento contínuo. Motivados pela busca de ser ter um maior conhecimento das medidas utilizadas pela gestão e manutenção da energia, este estudo teve como problema identificar quais as principais técnicas de monitoramento existentes e aplicadas aos diversos tipos de isoladores. Nesse sentido, objetivou-se descrever as principais técnicas de monitoramento aplicadas aos diferentes tipos de isoladores, segundo a literatura científica dos últimos 20 anos. Trata-se de uma pesquisa exploratória, descritiva, bibliográfica e qualitativa, cujo levantamento de dados se processou junto a publicações disponíveis em língua portuguesa ou em inglês nas bases de dados da Scielo, Portal de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, da Universidade Federal de Campina Grande, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal de Minas Gerais e da Universidade Católica de Campinas. Um total de 34 estudos compuseram a base de dados. Os resultados demonstram que existem uma variedade de técnicas utilizadas para o monitoramento de isoladores, são elas: inspeção visual, monitoramento da corrente de fuga, processamento de imagens e uso de redes neurais, uso de sensores e rádio frequência, medição da temperatura interna, medidores de poluição, medição de campo elétrico e tensão, medição de hidrofobicidade, imagem infravermelha e raio-X, micro-ondas e simulação computacional. Notou-se que nas diferentes abordagens as técnicas contribuíram para prevenção e identificação de falhas e desgastes nos isoladores. Conclui-se, de forma geral, que as técnicas de monitoramento constituem elementos estratégicos de importante apoio para a gestão de manutenção das linhas de transmissão de energia.

Palavras-chave: Técnicas de Monitoramento, Isoladores, Energia Elétrica.

ABSTRACT

Insulators are equipment that make up the power transmission lines that help to maintain their quality and prevent failures in their supply. For this reason, it is advisable that they are always in proper working condition, and these should therefore be, submitted to a continuous monitoring process. Motivated by the search to have a greater knowledge of the measures used by energy management and maintenance, this study had the problem of identifying which are the main monitoring techniques existing and applied to the different types of insulators. In this sense, the objective was to describe the main monitoring techniques applied to different types of insulators, according to the scientific literature of the last 20 years. This is an exploratory, descriptive, bibliographic and qualitative research, whose data collection was carried out with publications available in Portuguese or in English in the databases of Scielo, Portal of Theses and Dissertations of the University of São Paulo, of the University Federal University of Campina Grande, the Federal University of Rio Grande do Sul, the Federal University of Rio de Janeiro, the Federal University of Minas Gerais and the Catholic University of Campinas. A total of 34 studies made up the database. The results demonstrate that there are a variety of techniques used for the monitoring of insulators, they are: visual inspection, leakage current monitoring, image processing and use of neural networks, use of sensors and radio frequency, internal temperature measurement, meters pollution, electric field and voltage measurement, hydrophobicity measurement, infrared and X-ray image, microwave and computer simulation. It was noted that in the different approaches the techniques contributed to the prevention and identification of failures and wear in the insulators. It is concluded, in general, that the monitoring techniques constitute strategic elements of important support for the maintenance management of the power transmission lines.

Keywords: Monitoring Techniques, Insulators, Electrical Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica	18
Figura 2 - Linha de transmissão subterrânea em São Paulo.	18
Figura 3 - Exemplo de Cabo para-raios.....	20
Figura 4 - Exemplo de cabo condutor de LTA.....	21
Figura 5 - Exemplo de LTS com o cabo condutor.	21
Figura 6 - Exemplos de Estrutura de LT.	23
Figura 7 - Isolador de porcelana tipo roldana.....	26
Figura 8 - Isolador de vidro do tipo disco	26
Figura 9 - Imagem Isolador Polimérico.....	27
Figura 10 - Isolador tipo pino de vidro.....	27
Figura 11 - Exemplo de Isolador tipo pilar	28
Figura 12 - Isolador do tipo castanha de porcelana.....	29
Figura 13 - Distribuição dos Estudos analisados por tipo de técnica de monitoramento empregada.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das Estruturas das Linhas de Transmissão	22
Quadro 2 - Evidências relacionadas a técnica de monitoramento sua aplicabilidade e eficácia.....	36
Quadro 3 - Estudos que associaram o uso de sensores a sua técnica principal.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
LT	Linhas de Transmissão
LTA	Linhas de Transmissão Aérea
LTS	Linhas de Transmissão Subterrâneas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO	17
3.1.1 Classificação das Linhas de Transmissão.....	17
3.1.2 Componentes das Linhas de Transmissão	19
3.1.2.1 Cabos para-raios.....	19
3.1.2.2 Condutores	20
3.1.2.3 Estruturas	21
3.1.2.4 Cadeia de Isoladores e Ferragens.....	23
3.2 ISOLADORES.....	23
3.2.1 Tipos de Isoladores quanto ao material.....	25
3.2.1.1 Isoladores cerâmicos.....	25
3.2.1.2 Isoladores orgânicos ou poliméricos	26
3.2.2. Tipos de isoladores quanto a estrutura ou local de fixação	27
3.3 Características Mecânicas e Elétricas do Isoladores, principais falhas e sua Importância para os Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia	29
4 METODOLOGIA.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES	40
5.1.1 Inspeção Visual e Radiação Ultravioleta	41
5.1.2 Monitoramento da Corrente de Fuga.....	41
5.1.3 Processamento de Imagens e uso de redes neurais.....	45
5.1.4. Uso de sensores e rádio frequência	46
5.1.5 Medição de Temperatura interna	47
5.1.6 Medidores de Poluição	48
5.1.7 Medição de Campo elétrico e tensão.....	50
5.1.8 Medição da hidrofobicidade	51
5.1.9 Imagens infravermelhas e Raio-X.....	51
5.1.10 Micro-ondas e Simulação Computacional.....	52

5.2EFICÁCIA E APLICABILIDADE DAS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a energia elétrica é um dos principais componentes do processo de evolução humana, sendo um elemento indispensável para o funcionamento das diferentes tecnologias utilizadas tanto no ambiente doméstico quanto industrial.

O processo de transmissão ou distribuição de energia é demarcado por diversos aspectos, principalmente, relacionados aos equipamentos necessários para sua disseminação aos pontos receptores e isso abrange os cabos condutores de fases, cabos para-raios ou cabos de guardas, isoladores e estruturas (FUCHS, 2015).

O desempenho das linhas de transmissão (LT) está associado diretamente ao comportamento dos isoladores, que constituem equipamentos cuja função é realizar a sustentação dos cabos e mantê-los eletricamente isolados da estrutura. Em geral, quando estes apresentam anormalidades pode ocorrer fuga de energia, motivo pelo qual há uma necessária preocupação com o seu processo de montagem e monitoramento. Quanto aos tipos, estes podem ser constituídos de cerâmica, vidro ou polímeros (DEUTSCH, 2016; MENEZES, 2015).

A literatura tem apontado a existência de diversas técnicas de monitoramento, que podem contribuir para acompanhamento dos isoladores auxiliando na identificação de anormalidades que possam aparecer no decorrer da evolução do processo de vida útil dos equipamentos responsáveis pela transmissão de energia elétrica. Estudos como os de Bezerra *et al.* (2010), Costa *et al.* (2009), Guedes (2015) e Menezes (2015), apresentam informações sobre diversas técnicas de monitoramento, baseado no monitoramento da corrente de fuga, nas medições de acústicos, nas medições de corrente elétrica, nas medições de temperatura, nas medições de poluentes, em imagens infravermelhas, em imagens ultravioletas, em micro-ondas, entre outros. Nesse sentido, busca-se nesse estudo apresentar contribuições para uma melhor compreensão e conhecimento sobre esses procedimentos que são de importante valor no processo de gestão e manutenção de energia elétrica.

A qualidade do processo de transmissão de energia elétrica depende das condições de funcionalidade e proteção dos componentes utilizados na sua disseminação. Os isoladores são os principais elementos de apoio nesse sentido, por possibilitarem evitar a dissipação de energia ou mesmo a ocorrência de não isolamento (BEZERRA, 2010;

FUCHS, 2015). Existem diversas técnicas de monitoramento que podem dar suporte a esse processo, permitindo recolher o correto diagnóstico e estado de uma cadeia de isoladores. Sua utilização corresponde a uma importante estratégia preventiva utilizada no processo de gestão e manutenção da energia elétrica, devido a estas contribuírem para avaliação da degradação sofrida pelos componentes dos isoladores durante sua vida útil, indicado seu nível de funcionalidade ou necessidades de reposição (FUCHS, 2015).

Esse aspecto denota a relevância da temática proposta, que visa por meio deste estudo fornecer maiores informações sobre as técnicas de monitoramento de isoladores, abordando não apenas suas características, como também introduzindo reflexões sobre sua aplicabilidade, eficiência e eficácia, aspectos que na literatura atual ainda são escassos ou tratados de forma incipiente, sendo a perspectiva da presente pesquisa a de contribuir para dirimir tal lacuna.

Visa-se responder ao seguinte problema de pesquisa: Quais as principais técnicas de monitoramento existentes e aplicadas aos diversos tipos de isoladores?

Assim esse estudo é motivado pela busca em se ter um maior conhecimento das medidas utilizadas pela gestão e manutenção da energia elétricas para manutenção da qualidade da sua transmissão ou distribuição.

A fim de se promover uma melhor compreensão da temática, o presente Trabalho de Conclusão de Curso foi estruturado em 5 (quatro) capítulos além deste, que abordarão o seguinte:

No segundo capítulo são descritos os objetivos a serem alcançados pela pesquisa.

O terceiro capítulo perfaz uma breve revisão bibliográfica sobre as principais temáticas que embasam o estudo proposto, sendo assim tratadas: Linhas de Transmissão de Energia, seus tipos, características e componentes.

No quarto capítulo, passa-se a apresentar os procedimentos metodológicos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa.

No quinto capítulo serão apresentados e analisados os resultados acerca do que foi desenvolvido em relação ao tema.

No sexto capítulo, o trabalho é finalizado, apresentando-se as considerações finais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Descrever as principais técnicas de monitoramento aplicadas aos diferentes tipos de isoladores, segundo a literatura científica dos últimos 20 anos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as características das principais técnicas de monitoramento existentes aplicada aos diferentes tipos isoladores, e;
- Identificar dentre as técnicas de monitoramento existentes se há alguma mais usual, destacando os fatores que motivam tal ocorrência
- Realizar uma breve avaliação crítica da eficácia e aplicabilidade das principais técnicas de monitoramento de isoladores.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo Menezes (2015) as Linhas de Transmissão, LT, constituem sistemas responsáveis para condução da energia elétrica da sua fonte de geração (hidráulica, eólica, térmica, fotovoltaica, etc.) até o limite dos sistemas de distribuição.

Hayt (1983) relata que as LT “são sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga através de um campo eletromagnético” (*apud SILVA et al*, 2016, p. 3).

Fuchs (1979) relata que as LT são componentes do sistema de energia elétrica e podem ser caracterizadas como:

São linhas que operam com as tensões mais elevadas do sistema, tendo como função principal o transporte de energia entre os centros de produção e centros de consumo, como também a interligação de centros de produção e mesmo sistema independente. Em geral são terminadas em subestações abaixadoras regionais, onde a tensão é reduzida de nível para o início da distribuição a granel pelas linhas de subtransmissão (p.5)

Logo, percebe-se que as LT têm como principal contribuição possibilitarem o processo de condução da energia da sua origem até os sistemas distribuição, sendo de certa forma, uma parte essencial para possibilitar que esta chegue até as subestações e seus consumidores.

3.1.1 Classificação das Linhas de Transmissão

Considerando-se os locais e os tipos de tensões vinculadas as linhas de transmissão, pode-se de dizer que elas podem ser classificadas quanto ao local em que estão estruturadas e quanto a tensão/potência.

Em relação aos tipos, pode-se dizer que as linhas de transmissão são classificadas em linhas aéreas e subterrâneas.

As linhas aéreas “são caracterizadas por utilizarem condutores nus em sua extensão, conectados nas estruturas por isoladores “(MENEZES, 2015, p. 7). Denomina-

se aéreas porque elas estão montadas em estrutura metálicas estando suspensas do subsolo. A figura 1, apresenta exemplos de linhas de transmissão aéreas.

Figura 1 - Exemplos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica



Fonte: JS Florestal (2020)

A primeira linha de transmissão aérea no Brasil, data de 1883 na Cidade de Diamantina, Minas Gerais, e tinha por finalidade transportar a energia produzida por uma Usina Hidrelétrica (LABEGALINI *et al*, 1992). Atualmente representam a maioria dos tipos de linhas de transmissão existente no país em suas diferentes redes de distribuição

As linhas subterrâneas conforme relatam Almeida *et al.* (2008) são linhas cujos cabos são diretamente enterrados por meio de valas escavadas em vias públicas, sendo estes instalados em formação plano ou em trifólio. A figura 2 apresenta exemplos deste tipo de linhas de transmissão.

Figura 2 - Linha de transmissão subterrânea em São Paulo.



Fonte: Engeform Engenharia (2020)

Nas linhas de transmissão subterrâneas de alta tensão podem ser instaladas por cabos diretamente enterrados de materiais termicamente e mecanicamente estáveis, os chamados cabos de backofiii, cabos em bancos de dutos, cabos em canaletas ou em bandejas. Sendo que nos centros urbanos, em geral os cabos são enterrados em dutos envolvidos por backofiii ou concreto (OLIVEIRA, 2010).

Abreu, Oliveira e Silva (2008, p. 2) destacam que:

A principal característica da rede subterrânea é sua alta confiabilidade, pois ao contrário das redes aéreas convencionais, sua operação não é vulnerável a fenômenos meteorológicos como raios, chuvas e ventos. Ainda assim, pode acontecer de tais fenômenos atingirem a parte do sistema que opera a céu aberto, como os terminais da LT nas subestações responsáveis por alimentar os fios que correm pelo subsolo, porém, em muito menor grau.

Outra questão relacionada às linhas subterrâneas reside no fato de que estas contribuem para preservação ambiental, pois não exigem a devastação de espaços de vegetação, além de não causarem a poluição visual como ocorre nas instalações de linhas de transmissão aéreas (ABREU, OLIVEIRA; SILVA, 2008).

Em relação ao contexto histórico, sabe-se que em 1879, Thomas Edison desenvolveu um sistema subterrâneo para iluminação externa da cidade de Nova York, o qual se expandiu notoriamente principalmente junto as áreas urbanas, com os surgimentos dos condomínios residenciais no Estados Unidos. Nos países europeus, o desenvolvimento dessa forma de transmissão elétrica ocorreu a partir da década de 1970, estando a Holanda em destaque por ter sido o país que mais expandiu as LT. No Brasil, foi a partir de 1902 que foram implantados os primeiros sistemas subterrâneos em São Paulo e posteriormente em 1905 e 1909 no Rio de Janeiro. Atualmente o quantitativo das LT representam apenas 1% dos sistemas existentes, sendo superado pelas linhas aéreas por serem consideradas de baixo custo (CABRAL, 2018).

Em relação a tensão/potência, pode-se dizer que existem linhas de alta, média e baixa tensão. Segundo informações da Energisa (2017) no Brasil as tensões típicas de operação das linhas de transmissão são: 69kV, 138kV, 230kV, 345kV, 440kV, 500kV e 765kV, e são classificadas em: linhas de Transmissão (tensão igual ou maior que 230kV) e linhas de Subtransmissão (tensão abaixo de 230kV).

As LT podem transportar energia em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Nas linhas do tipo CA são utilizadas redes trifásicas com um ou mais condutores por fase sendo o mais utilizado devido a suas potencialidades permitirem gerar, transmitir e distribuir energia de modo mais econômico. As linhas em CC, normalmente são utilizadas para transportar grandes blocos de potência a elevadas distâncias (MENEZES, 2015).

3.1.2 Componentes das Linhas de Transmissão

3.1.2.1 Cabos para-raios

Os cabos para-raios são equipamentos que ocupam a parte superior das estruturas das linhas de transmissão e servem para interceptar as descargas atmosféricas protegendo os condutores quanto ao seu impacto, buscando assim reduzir a possibilidade de interrupções do sistema (SILVA *et al.* 2016).

Pela sua função, percebe-se que são partes essenciais, principalmente porque possuem relação direta com a qualidade da energia que é repassada as subestações e consumidores.

Labegalini *et al.* (1992) destacam que os principais tipos de cabo para-raios são os cordoalha de fios de aço (zincada), cabos CAA extra fortes e cabos aço-alumínio. A figura 3, ilustra um exemplo de cabo para-raios.

Figura 3 - Exemplo de Cabo para-raios



Fonte: Sonata Engenharia (2020)

3.1.2.2 Condutores

Os cabos condutores são elementos ativos das linhas de transmissão e atuam como “guias” dos campos magnéticos e campos elétricos que são os agentes transmissões de energia elétrica (SILVA *et al.*, 2016).

As características que definem os cabos condutores são sua bitola, seção transversal, diâmetro, peso, carga de ruptura, resistência elétrica, raio médio geométrico, reatância e ampacidade (MENEZES, 2015, p. 61).

A figura 4 apresenta um exemplo de cabo condutor para Linha de Transmissão Aérea, LTA

Figura 4 - Exemplo de cabo condutor de LTA



Fonte: Nexans (2020)

Na figura 5, tem-se uma demonstração da instalação de uma Linha de Transmissão Subterrânea, LTS, e percebe-se na imagem acoplada ao esquema apresentado os cabos utilizados para transmissão de energia.

Figura 5 - Exemplo de LTS com o cabo condutor.



Fonte: Moreira et al. (2016)

3.1.2.3 Estruturas

As estruturas são os elementos com maior facilidade de visualização nas linhas de transmissão e são elas que sustentam os equipamentos formativos da LTA em relação a suas alturas do solo. Nas linhas LTS a estrutura corresponde ao suporte de que são utilizados para sustentação dos cabos e demais elementos do projeto de transmissão, e normalmente são de concreto.

Braga (2016) menciona que:

As estruturas são responsáveis pela sustentação dos condutores e para-raios nas suas respectivas alturas do solo. Elas podem ser construídas segundo vários tipos e materiais, de acordo com a solicitação mecânica e nível de isolamento

requerido. Elas podem ser usadas apenas para sustentar os cabos, sendo chamada de suspensão, ou para tracionar os cabos e dar ângulos no traçado (caminho) da LT, sendo chamada de ancoragem (p. 7).

Labegalini *et al.* (1992) destacam que nas linhas aéreas de transmissão as estruturas são os elementos responsáveis pela manutenção da distância segura entre os cabos, entre os cabos e o solo e entre estes e toda a parte energizada da LT. Destacam ainda que elas podem ser classificadas quanto a função estrutural, quanto a forma de existir e quanto aos materiais estruturais, conforme resume o quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das Estruturas das Linhas de Transmissão

Quanto a função estrutural	Quanto a forma de resistir	Quanto aos materiais estruturais
Estruturas de suspensão	Estrutura autoportantes	Estrutura de madeiras
Estruturas de ancoragem	Estruturas rígidas	
Estruturas por ângulo	Estruturas flexíveis	Estruturas metálicas
Estruturas por derivação	Estrutura mistas ou semi-rígidas	Estruturas de concreto armado
Estruturas por transposição de fases	Estruturas estaiadas	

Fonte: Adaptado de Labegalini et al. (1992).

Em relação a função, sabe-se que as estruturas de suspensão são aquelas dimensionadas para suportar esforços verticais devido ao peso dos cabos. As estruturas de ancoragem são utilizadas no início e fim das linhas com o objetivo de manter os cabos esticados. As estruturas por ângulo são dimensionadas para suportar esforços verticais e transversais, também resultantes da tração dos cabos. As estruturas por derivação são aquelas em que são realizadas sangrias nas linhas para alimentar um ramal. As estruturas por transposição de fases são constituídas para manter o equilíbrio eletromagnético das linhas de transmissão (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Em relação a forma de resistir pode-se dizer que as estruturas rígidas não apresentam deformações elásticas, sendo mais reforçadas e volumosas. As estruturas flexíveis estão sujeitas a sofrerem deformações quando submetidas ações solicitantes de maiores intensidades. As estruturas mistas possuem um lado rígido e um flexível, sendo a parte rígida evidenciada em uma das direções principais. As estruturas estaiadas são empregadas para absorver impactos em diferentes posições e normalmente são feitas de aço galvanizado (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Quanto aos materiais, as estruturas de madeiras são as mais tradicionais e devem ser produzidas por tipos de madeiras resistentes a fungos, no Brasil ela é utilizada para

linhas de até 230 kV. As estruturas metálicas são compostas por aço ou alumínio. As estruturas de concreto armado são muito utilizadas pelo seu baixo valor econômico para linhas de até 500 kV (LABEGALINI *et al*, 1992).

Na figura 6 são apresentados exemplos de estrutura de LT.

Figura 6 - Exemplos de Estrutura de LT.



Fonte: Gabor (2020)

3.1.2.4 Cadeia de Isoladores e Ferragens

Segundo a Energisa (2017, p. 8) denomina-se cadeia de isoladores ao:

Conjunto articulado constituído de uma penca de isoladores, ou de várias pencas interligadas, e das ferragens necessárias em serviço, que isola eletricamente um condutor e o fixa ao suporte da linha.

As cadeias de isoladores são fundamentais para manutenção das distâncias dielétricas. Os cabos são suportados pelas estruturas por meio dos isoladores, e devem resistir tanto as solicitações mecânicas quanto às elétricas.

Os isoladores são importantes instrumentos de apoio ao adequado funcionamento das linhas e transmissão, protegendo quando a fuga de energia, bem como auxiliando na sustentação da estrutura da LT (DEUTSH, 2016). Suas tipologias e demais aspectos serão tratados de modo mais específico no subtópico seguinte. Resolve-se apresentar um conteúdo com maiores detalhes, tendo em vista esse conteúdo fazer parte do núcleo temático deste estudo.

As ferragens por sua vez, são as peças que devem ligar os cabos aos isoladores, suportando a estrutura das linhas de transmissão (FUCHS, 1979).

3.2 ISOLADORES

Os isoladores são elementos importantes no processo de transmissão e distribuição de energia e para isso seu desempenho deverá ser continuamente avaliado, uma vez, que quaisquer falhas podem resultar em perda ou até interrupções que podem prejudicar o acesso à energia junto aos seus consumidores. Reforçando este pensamento, Karunarathna *et al* (2018, p. 93) destacam que:

Isoladores de alta tensão são componentes vitais em sistemas de transmissão e distribuição em uma rede de energia. A maioria dos isoladores é usada em aplicações ao ar livre, onde são submetidos a diferentes condições ambientais. A exposição a essas diferentes condições climáticas e contaminações determina seu desempenho como isolantes. O monitoramento das condições dos isoladores da linha de energia é um requisito importante para o gerenciamento de ativos e engenheiros em uma rede de energia, a fim de manter um sistema de energia saudável.

O processo de obtenção de energia elétrica passa por várias etapas até sua chegada ao consumidor. Após a geração, a energia é transmitida com o auxílio de linhas de transmissão, que em sua maioria, são aéreas, possuindo como isolantes o ar que circunda os condutores e os isoladores elétricos. Estes últimos são responsáveis por garantir a manutenção da qualidade da energia distribuída na medida em que isolam os condutores de energia protegendo-os de falhas e sobretensões (XAVIER, 2017; THOMAZINI, 2009).

Bonomo (2003) destaca que o objetivo dos isoladores é promover o isolamento elétrico, dar suporte mecânico, rígido e flexível para os condutores elétricos, sejam eles de linhas de transmissão e distribuição, subestações, etc. Em relação a classificação, estes podem ser cerâmicos (vidro, porcelana) ou orgânicos (silicone, resina epóxi, etc.).

Em relação ao uso, Deutsh (2016) menciona que os primeiros isoladores a serem utilizados em uma rede elétrica foram com uso de estacas de madeira, contudo, estes não eram muito eficazes à medida que crescia o comprimento ou a tensão elétrica das linhas de transmissão. Foi, contudo, a partir de 1840, que o uso de outros materiais para fabricação de isoladores passou a ser inserido no mercado e tal contribuição se deve o pioneirismo ao Reino Unido, a partir da introdução de isoladores de porcelana e vidro.

A partir da década de 1930, surgiram os isoladores de vidro temperado, que ganharam destaque por facilitarem o processo de inspeção. Contudo, com o desenvolvimento industrial acelerado novas alternativas para fabricação de isoladores foram surgindo, sendo introduzidos os materiais poliméricos a partir da década de 1970

na América do Norte, os quais por serem mais duradouros, foram gradualmente substituindo os isoladores de vidro e porcelana (GUBANSKI *et al.*, 2007).

Para uma maior evidenciação das características dos isoladores, nos subtópicos seguintes iremos destacar os aspectos gerais dos isoladores existentes quanto ao tipo de material, quanto as características elétricas e sua importância.

3.2.1 Tipos de Isoladores quanto ao material

A classificação dos isoladores quanto as suas características construtivas ou ao material de formação, segundo Mamede (2013), engloba três materiais básicos: cerâmica, vidro e fibra. Deutsh (2016) considera apenas dois aspectos para categorizar os isoladores em relação aos materiais de sua construção, os cerâmicos e os orgânicos. No primeiro estão incluídos todos aqueles formados por porcelana e vidro, e os orgânicos são os também denominados poliméricos. Para fins desse estudo, utilizaremos esta última classificação.

3.2.1.1 Isoladores cerâmicos

Os isoladores cerâmicos de porcelana constituem um dos principais tipos com maior frequência de fabricação entre os isoladores. A porcelana utilizada nestes tipos de equipamentos é do tipo não porosa e de elevada resistência mecânica. Sua fabricação se dá pelo chamado processo de desumidificação, que é realizado por gesso ou à vácuo (DEUTSCH, 2015).

Os tipos mais comuns utilizados para esse tipo de isoladores, conforme Mamede (2013) são: o isolador roldana e castanha, isolador pino, isolador de suspensão ou disco, isolador pilar e isoladores de vidro.

A figura 7 a seguir ilustra um exemplo da estrutura de um isolador de porcelana do tipo roldana.

Figura 7 - Isolador de porcelana tipo roldana



Fonte: Foxlux (2020)

Os Isoladores de Vidro: são os mais utilizados em linhas de transmissão de extra-alta tensão (EAT) devido ao seu menor custo de manutenção e experiência de funcionamento comprovada. As partes de um isolador de vidro são: a cupilha, o cimento, o vidro temperado e o pino (apud DEUTSH, 2016).

A figura 8 apresenta um exemplo de isolador de vidro do tipo disco.

Figura 8 - Isolador de vidro do tipo disco



Fonte: Hayton (2020)

3.2.1.2 Isoladores orgânicos ou poliméricos

Outra modalidade de isoladores são os orgânicos ou poliméricos. Xavier (2017) destaca que esses começaram a ser utilizados na década de 1940, e possuíam como material orgânico o epóxi. A principais vantagens desses isoladores em relação aos cerâmicos é a capacidade de manter sua hidrofobia, mesmo em ambientes poluídos. A figura 9 apresenta um exemplo de isolador polimérico.

Figura 9 - Imagem Isolador Polimérico



Fonte: Judy Cabos (2020)

3.2.2. Tipos de isoladores quanto a estrutura ou local de fixação

Labegolini *et al* (1992) destacam três tipos de isoladores que podem ser encontrados nas linhas de transmissão: isoladores de pino, isoladores tipo pilar e isoladores de suspensão.

O Isolador tipo pino são empregados principalmente em redes de distribuição primárias e são fixados junto a estrutura por meio de pinos de aço e são fabricados tanto com vidro ou porcelana. Em geral são empregados em linhas de média tensão, podendo variar de 38 kV ou ir até 66/75 kV (LABEGALINI *et al.* 1992; DEUTSH, 2016).

Labengalini *et al.* (1992) relatam que em linhas superiores a 25 kV, são compostas de várias partes cimentadas entre si.

A figura 10 apresenta um exemplo de isolador tipo pino de vidro.

Figura 10 - Isolador tipo pino de vidro.



Fonte: Coisarada Produtos (2020)

O Isolador pilar: seu maior uso está relacionado as redes de distribuição primária (média tensão até 38kV) ou em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72kV) (DEUTSH, 2016).

Labelini *et al*, (1992) relatam que os isoladores tipo pilar são pouco utilizados no Brasil e normalmente são construídos em uma única peça em porcelana ou em vidro temperado.

A figura 11 apresenta um exemplo de isolador tipo pilar.

Figura 11 - Exemplo de Isolador tipo pilar



Fonte: Distribuidora de Produtos Elétricos Onix (2020)

O Isolador de suspensão: são empregados em redes de distribuição primária (média tensão até 38kV) e em linhas de subtransmissão (alta tensão até 138kV) (DEUTSH, 2016).

Quanto a estrutura os isoladores de suspensão podem ser do tipo monobloco ou disco. Os do tipo monobloco, são feitos de uma única peça de porcelana ou vidro. E os em forma de disco, são compostos pelo disco que forma o dielétrico, um pino metálico e a campânula e podem ser de porcelana ou vidro (LABELINI et al, 1992).

Quanto a tensão, Labelini *et al*. (1992) discordam dos dados apresentados por Deutsh (2016) e destacam que estes os isoladores de suspensão podem atender tensões de até 220 kV.

Deutsh (2016) ainda apresentam os isoladores do tipo roldana e castanha e destaca que eles são utilizados em redes de distribuição secundárias (baixa tensão, de 127V a 440V).

A figura 12 apresenta um exemplo de isolador do tipo castanha de porcelana.

Figura 12 - Isolador do tipo castanha de porcelana



Fonte: Germer Isoladores (2020)

Analisando formação, percebe-se que existe uma variedade de isoladores, cujos aspectos diferenciados podem ser fixados em várias espécies de estruturas. Vale ressaltar, que ainda é possível se verificar a formação de isoladores compostos, que podem ser fabricados com materiais poliméricos e outros componentes, a exemplo de vidros ou materiais metálicos.

Além dos aspectos tratados com maior detalhes por esse estudo, verificou-se em Bonomo (2003) um terceira classificação para os isoladores, essa relacionada a seus níveis de tensão, embora não fora traçado detalhes quanto as seus aspectos, a autora diferencia quatro tipos de isoladores: isoladores para extra-alta tensão, isoladores para alta tensão, isoladores para média tensão e isoladores para baixa tensão.

3.3 Características Mecânicas e Elétricas do Isoladores, principais falhas e sua Importância para os Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia

Conforme relatam Gorur e Cherney e Burnham (1999, p. 89):

Os isoladores são elementos sólidos dotados de propriedades mecânicas capazes de suportar os esforços produzidos pelos condutores. Eletricamente, exercem a função de isolar os condutores, submetidos a uma diferença de potencial em relação à terra (estrutura suporte) ou em relação a um outro condutor de fase).

Quanto à resposta a uma solicitação elétrica, os isoladores ainda podem se diferenciar entre os isolamentos não-regenerativos e auto-regenerativos. O primeiro tipo, envolvem aqueles cujo dielétrico não consegue se recuperar após a ocorrência de uma solicitação elétrica que supere suas características fundamentais. O segundo, por sua vez, tem a capacidade de se recuperar após a ocorrência de uma solicitação elétrica, sendo,

portanto, mais eficazes oferecendo menor riscos de falhas e melhor autoproteção (GORUR; CHERMEY; BURHNAM, 1999).

Fuchs (1979) menciona ainda que um isolador deve ser capaz de resistir as solicitações elétricas, sendo capaz de absorver as tensões e subtensões das redes e linhas de redes elétricas.

No que se refere à sua função de suportabilidade mecânica, os isoladores são submetidos a três tipos de solicitações mecânicas, que normalmente são transmitidas por ele as suas estruturas:

- forças verticais que são devidas ao próprio peso dos condutores;
- forças horizontais axiais no sentido dos eixos longitudinais das linhas para que os condutores se mantenham suspensos sobre o solo;
- forças horizontais transversais, em sentido ortogonal (perpendicular) aos eixos longitudinais das linhas, devido à ação da pressão do vento sobre os próprios cabos.

Quaresma (2016) relata que as principais causas que provocam diminuição da capacidade dielétrica de um isolador são advindas de aumento da passagem da corrente de fuga, a condutividade da massa do isolador, a perfuração da sua massa e a descarga disruptiva.

O aumento da passagem da corrente de fuga normalmente está associado a contaminações que ocorrem na superfície do isolador que podem ocorrer em virtude da ação de poluentes, como poeiras, presença de minerais condutivos como carbono, óxidos metálicos e soluções de água e sal. A condutividade da massa, consiste na sua perda de capacidade dielétrica e pode ocorrer também pela presença de impurezas que danificam suas propriedades de funcionamento. Os isoladores em alta tensão são mais suscetíveis a perfuração da massa e sua ocorrência implica na perda da rigidez dielétrica o que pode levar o equipamento à explosão e consequente queda do condutor, motivo pelo qual se faz necessário uma avaliação contínua e criteriosa para se evitar esse tipo de situação, devido a intensidade de sua repercussão que pode cessar o processo de transmissão ou distribuição de energia (QUARESMA, 2016).

Em relação a descarga disruptiva, sabe-se que ela é produzida

Através do ar sob o aspecto de uma faísca ou arco, ou ainda de um conjunto de faíscas e arcos, que estabelecem conexão elétrica entre as peças metálicas do isolador, submetidas à tensão de serviço. Sabe-se que a superfície do isolador é composta de óxidos metálicos que possuem alta energia superficial e que confere elevado caráter hidrofílico ao mesmo. Esta alta molhabilidade pode ocasionar a formação de uma película de água sobre a peça, que, se for contínua pode conduzir corrente e fechar um arco elétrico. Em decorrência disto fica incapacitada a transmissão e distribuição de energia elétrica pela rede, o que caracteriza a descarga disruptiva (o chamado *flashover*). O referido fenômeno é um problema que constantemente se agrava com o aumento contínuo da poluição e a crescente concentração de indústrias próximas ao litoral. A poluição e os sais depositam-se com o passar do tempo sobre a superfície do isolador até alcançar uma concentração tal que, em presença de umidade, podem formar uma película contínua condutora e causar o *flashover* (LIEBERMAN, 2000 *apud* QUARESMA, 2016, p. 45-46)

Queirós (2013) acrescenta ainda que, no caso de isoladores de linha, são as condições ambientais desfavoráveis que contribuem para a ocorrência de *flashover*, sendo estas determinantes para a rigidez dielétrica do equipamento.

Queirós (2013) ainda aponta outros tipos de falhas ou danos que podem ocorrer nos isoladores ou em suas estruturas decorrentes do processo de envelhecimento, degradações de natureza ambiental ou química (efeitos do gelo, chuva, poeira, altas temperaturas, ação de agentes químicos) e altas tensões, são exemplos delas:

- Fratura frágil: consiste em uma falha que pode resultar na separação completa de parte do núcleo do isolador, em duas ou mais partes, de forma transversal e é decorrente de ataques químicos com a tensão mecânica exigida pelo isolador em serviço;
- Rastejamento e queimadura- é um tipo de degradação cuja natureza é irreversível e que normalmente se dá na superfície do material polímero, que fica com a aparência carbonizada.
- A perda de hidrofobia são agressões que ocorrem no revestimento do isolador decorrente de poluições ou atividades elétricas além do nível suportado pelo equipamento.
- Corrosão- ocorre principalmente junto as peças metálicas que fazem parte da estrutura do isolador, e podem concorrer para prejudicar sua segurança mecânica, são decorrentes principalmente da ação ambiental sobre o equipamento.

- Escamação- esta degradação consiste na formação de gretamentos (fissuras muito finas) no revestimento do isolador que torna a superfície frágil.
- Mudança de cor – pode ocorrer devido a oxidação, exposição ultravioleta, agentes contaminantes ou descargas parciais.

Em relação a importância dos isoladores, sabe-se que esta relaciona-se ao seu objetivo-fim que é permitir a condução de energia sem falhas ou quebras de transmissão. Nesse sentido, percebe-se que eles são elementos imprescindíveis para a promoção da qualidade da energia transmitida e distribuída pelos sistemas de energia.

4 METODOLOGIA

O estudo em questão quanto aos objetivos classifica-se como uma pesquisa exploratória e descritiva, pois objetiva trazer ao campo científico uma contribuição na apresentação das diversas técnicas de monitoramento relacionadas aos diferentes tipos de isoladores, descrevendo suas principais características, eficácia e aplicabilidade.

Segundo Gil (2014), as pesquisas descritivas têm como finalidade principal a descrição das características de determinada população ou fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis.

Cervo, Bervian e Da Silva (2010, p.61) destacam que:

A pesquisa descritiva observa, registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos (variáveis) sem manipulá-los. Procura descobrir com a maior precisão possível, a frequência com que um fenômeno ocorre, sua relação e conexão com outros, sua natureza e suas características.

O estudo descritivo, como a própria etimologia da palavra nos revela, tem por finalidade descrever algo que está sendo abordado, visto ou observado, levando em consideração sua relação com outro objeto, porém sem que o pesquisador altere o que já existe.

O estudo exploratório, segundo Gil (2014) é aquele que visa proporcionar uma maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo explícito ou mesmo visando a construção de hipóteses. Esse tipo de estudo auxilia o aprimoramento de ideias sobre algum objeto ou fenômeno, na medida em que apresenta detalhes, aspectos anteriormente não evidenciados ou mesmo pouco conhecidos.

Quanto a abordagem do problema o estudo em questão é de natureza qualitativa, uma vez que não se prende a dados estatísticos ou numéricos. Sobre este tipo de pesquisa Minayo (2014) concorda que esta trabalha com um nível de realidade que não pode ser quantificado, ou seja, discutido a partir de uma base numérica, ou de valor, mas que busca traduzir ou apresentar significados, aspirações, atitudes.

Quanto as técnicas de coleta de dados, essa pesquisa é do tipo bibliográfica, pois se baseia na revisão de literatura disponível sobre a temática, a partir de estudos nacionais e internacionais (artigos em inglês) publicados nos últimos 20 anos.

Para levantamento de dados, os seguintes descritores foram utilizados: técnicas de monitoramento, isoladores, energia elétrica. Os critérios utilizados para inclusão

foram: estudos em português ou inglês, publicados entre os anos 2000 e 2020 e cuja temática se alinham aos objetivos da pesquisa em questão. Para o levantamento de estudos em língua inglesa, os termos utilizados para busca serão: *monitoring techniques, insulators e electricity*.

Os critérios de exclusão foram para pesquisas que não sejam publicados em inglês ou português, que não atendam ao recorte temporal estabelecido, ou cuja abordagem não se alinham aos objetivos do estudo.

Para fins deste estudo foram utilizadas apenas aquelas pesquisas apresentadas na modalidade de artigos, teses e dissertações, estando as mesmas disponibilizadas na íntegra.

As seguintes bases de dados foram utilizadas para levantamento dos estudos : Scielo, Portal de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, da Universidade Federal de Campina Grande, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal de Minas Gerais e da Universidade Católica de Campinas, sendo utilizadas as seguintes plataformas de busca: Portal de Periódicos da CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior e o Google Acadêmico.

Para análise de dados foram utilizadas as contribuições de análise de conteúdo de Bardin (2011) a partir da técnica de análise e interpretação referencial. O processo de análise dos artigos se deu por meio da identificação de afinidade pelo título com a devida quantificação. O processo de seleção foi realizado com a leitura de todos os resumos recuperados. Aqueles que apresentaram clareza nos objetivos, método e conclusão foram pré-selecionados e contabilizados. Uma nova leitura dos resumos foi realizada buscando adequação aos critérios de inclusão previamente apresentados. A próxima etapa consistiu na leitura integral das publicações selecionadas, que foram analisadas à luz do problema e objetivos de estudo.

Para evidenciação dos achados, as publicações selecionadas foram apresentadas em um quadro contendo o autor (s) e ano, tipo de técnica, características/aplicabilidade e resultados/benefícios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Atualmente, não existe uma técnica consolidada de monitoramento dos isoladores, mas sim um conjunto de ações que normalmente são utilizadas com a intenção de se chegar a um diagnóstico preciso e rápido. Esse é na opinião de Xavier (2017) o maior desafio envolvido na análise dos fenômenos elétricos que envolvem os isoladores. Em geral uma diretriz inicialmente utilizada é a avaliação do acúmulo de poluição presente nesses equipamentos, somado aos fatores ambientais que possam impactar no seu desempenho ou a existência de determinadas condições que possam indicar falhas nesses equipamentos.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar as principais técnicas de monitoramento de isoladores existentes de acordo com a literatura. A partir do levantamento realizado foi possível identificar que há uma diversidade de métodos e que cada uma a seu modo pode atuar no monitoramento, a escolha, no entanto, vai depender dos fatores e condições associadas ao seu uso e instalações, e o que se deseja avaliar como elemento mais predominantemente prejudicial ao seu funcionamento ou seja o melhor indicativo para indícios de falhas.

Um total de 34 estudos foram selecionados. No quadro 2, são apresentadas as evidências relacionadas as técnicas de monitoramento sua aplicabilidade e eficácia, conforme apontam os estudos analisados.

Quadro 2 - Evidências relacionadas a técnica de monitoramento sua aplicabilidade e eficácia

Nº	Autor (ano)	Técnica Utilizada/Relatada	Características /Aplicabilidade	Resultados/ Benefícios
1	Werneck et al. (2003)	Uso do método da corrente de fuga	Foi utilizado um sistema de monitoramento de isoladores por meio do método da corrente de fuga que usou um sensor de natureza optoeletrônica, onde a sua interconexão com o módulo demodulador, situado em potencial terra, é realizada através de fibra óptica. Nesse sistema, o formato de onda e o valor rms da corrente de fuga são medidos e enviados para localizações remotas via linha telefônica privada	Na opinião dos autores o monitoramento das correntes de fuga contribui para avaliar a gestão operacional de funcionamento de isoladores e o uso de sensores eletrônicos permitem melhor eficácia uma vez que eles possibilitam a análise em tempo real.
2	Werneck et al. (2005)	Uso do método da corrente de Fuga	Foi utilizado o método da corrente de fuga associado ao desenvolvimento de um sensor eletrônico para linhas de transmissão de 500 KV, cujo transdutor emite sinal pela fibra óptica de plástico a uma Unidade Remota (UR) autônoma, fixada à torre, que contém hardware eletrônico responsável pela demodulação e transformação do sinal óptico em elétrico por meio de transceiver.	Os autores consideraram que o método foi eficaz, uma vez que foi possível avaliar as variações da corrente de fuga durante o dia,
3	Portella et al. (2008)	Uso do método da corrente de Fuga	Foi utilizado um sistema de monitoramento que contou com a análise do método da corrente de fuga adicionado a avaliação das descargas parciais e resistência em isoladores. Os isoladores foram aterrados por m cabos coaxiais e conjuntos de resistores, que permitiram a medição das correntes de fuga e das descargas ao longo do tempo de exposição ao meio.	Os resultados demonstraram que os métodos aplicados foram eficazes para a avaliação da influência dos poluentes e das condições atmosféricas locais sobre a suportabilidade destes isoladores
4	Bezerra et al (2009)	Medidores de Poluição	Utilizou-se a avaliação de vários recursos, sendo observados as contribuições da técnica linear (Fisher e Karhunen – Loève e de redes neurais	Os resultados indicaram que a poluição pode ser avaliada pelas técnicas propostas, especialmente, quando uma combinação de sensores é empregada.
5	Costa (2009)	Inspeção Visual e Radiação Ultravioleta	Isoladores limpos e poluídos foram inspecionados com câmeras infravermelhas e ultravioleta	Observou que a técnica foi capaz de avaliar os níveis de poluição.
6	Qaddoumi et al (2009)	Micro-ondas e Sistemas Computacionais	Foi utilizado a técnica de micro-ondas para detecção de defeitos em isoladores	Os resultados mostraram a técnica eficaz por ela contribuir para identificação das descargas dielétricas.

7	Godoy et al. (2010)	Imagens Infravermelhas e Raio-x	Foi utilizado imagens capturas de 189 radiografias digitais geradas em um sistema de tomografia tridimensional para identificação de falhas em isoladores.	Os resultados confirmam que a técnica pode contribuir com precisão para identificação de falhas em isoladores poliméricos
8	Mendonça et al. (2010)	Uso do método da corrente de fuga	Utilizou-se sensor eletrônico para cadastrar as variações na corrente de fuga dos isoladores, cujos dados posteriormente eram registrados e enviados para um celular pré-cadastrado	O método mostrou-se eficaz na avaliação dos isoladores e permitiu identificar os efeitos dos níveis de poluição sobre o seu funcionamento.
9	Liu, Xi e Li (2010)	Medição de campo elétrico e tensão	Utilizou-se processadores de campo eletromagnético	A técnica permite identificar os isoladores defeituoso.
10	Diu e Liu (2011)	Medição da hidrofobicidade	O método de degradação da corona e câmeras de alta velocidade foram utilizados para capturar imagens dos fenômenos das descargas superficiais e hidrofobicidade.	Foi percebido que o aumento na intensidade do brilho e dimensão fractal do padrão de descarga pode revelar a diminuição da hidrofobicidade.
11	Ferreira et al. (2012)	Medidores de Poluição	Utilizou-se um aparelho ultrassônico associado a redes neurais para avaliar a poluição em isoladores	O resultado demonstrou que a técnica consegue ser eficaz na avaliação de poluições em isoladores, mas não acompanha a mesma eficácia em algumas partes relacionadas a esse equipamento, havendo diferença na resposta entre os padrões percebido junto aos disjuntores e a ancora da corda de isolamento.
12	Silva (2012)	Uso de sensores e radio frequência	Uso de frequência 915 Mhz, sensores e plataforma Arduino no monitoramento de isoladores	Os resultados confirmaram a frequência adequada por apresentar baixíssimo índice de degradação nas transmissões de dados.
13	Silva et al. (2012)	Imagens Infravermelhas, UV e Raio- X	Foram utilizados a tomografia computadorizada e raio-X para identificação de falhas em isoladores	Os resultados mostraram-se eficaz para identificação e falhas, uma vez que permitiu a evidenciação de danos que geralmente não são vistos a olhos nus.
14	Tingtao et al. (2012)	Uso do método da corrente de fuga	Foi utilizado um sistema de monitoramento de isoladores pelo método da corrente de fuga que utilizou controle para avaliação da tensão e gravação dos dados baseadas no microcontrolador ARM CórteX e coletor de dados baseado em notebook. Uma rede sem fio é implementada para transferir dados entre unidades de aquisição de dados e coletor de dados.	O sistema não precisa de fiação, também, não precisa gastar nenhuma taxa de uso de rede em relação ao sistema de monitoramento de rede baseado em GPRS. O sistema pode monitorar a corrente de fuga e os pulsos de alta frequência. Além do método possibilitar prevenção de falhas em isoladores.
15	Albuquerque (2014)	Processamento de imagens e redes neurais	Uso de rede neural para avaliar os níveis de poluição e falhas em isoladores	A rede não apresentou padrão aceitável para o que foi proposto.
16	Maraaba, Al-Hamouz e Al-Duwaish (2014)	Processamento de imagens e redes neurais	Foi utilizado uma câmera digital para capturar imagens da contaminação de isoladores e uma rede neural foi instalada para relacionar o nível de contaminação e o isolador.	O teste realizado mostrou uma alta taxa de sucesso na estimativa do nível de contaminação de isoladores.

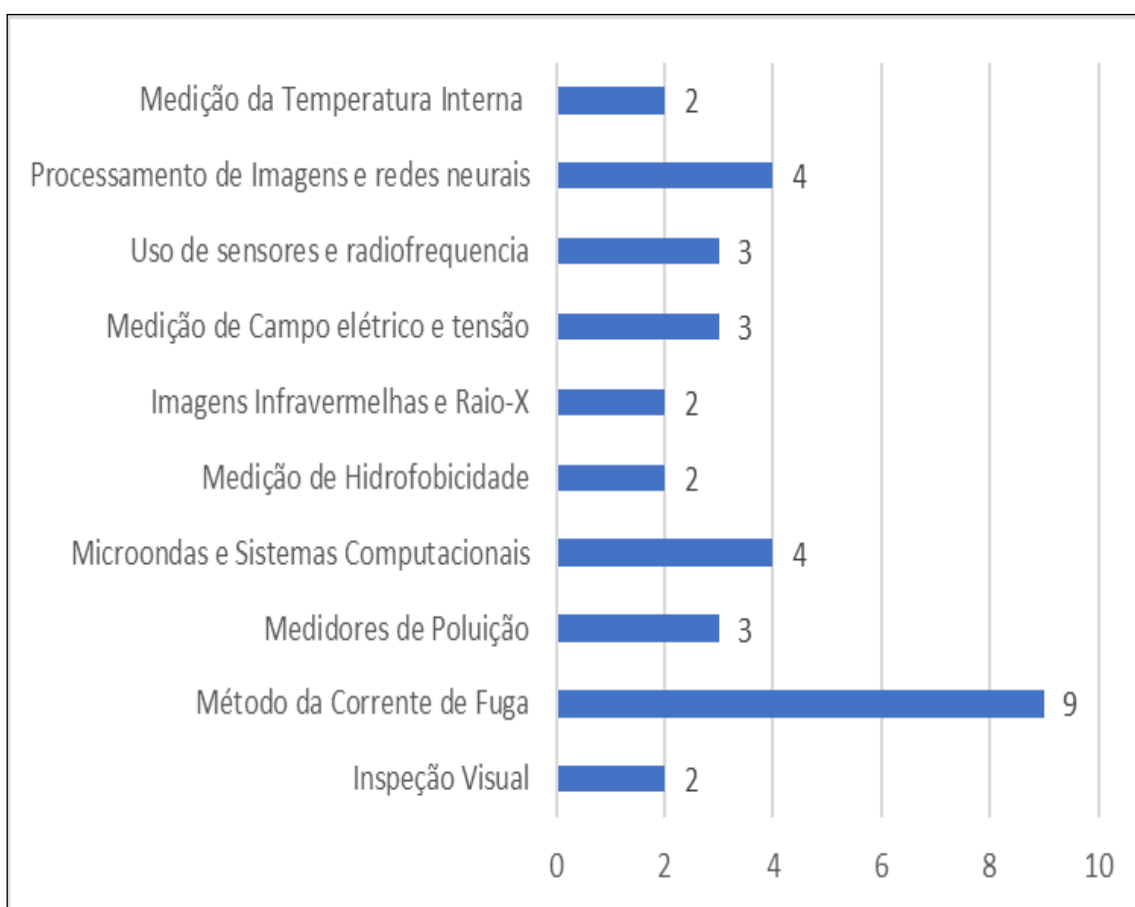
17	Narayanan et al. (2014)	Medidores de Poluição	Utilizaram uma ferramenta de diagnóstico de <i>flashover</i> e a poluição em isoladores com base na transformada wavelet e na abordagem fuzzy c-means	Os resultados do estudo confirmaram que o diagnóstico proposto foi capaz de perceber o <i>flashover</i> e a gravidade da poluição dos isoladores, sendo um sistema facilmente aplicável para medições baseadas na Web em tempo real.
18	Werneck, Santos e Nazaré et al. (2014)	Monitoramento da Corrente de Fuga	Analisaram as variações da corrente de fuga de isoladores a partir da utilização de um sensor eletrônico.	Os resultados do estudo confirmaram a técnica como eficaz, possibilitando o monitoramento das condições do isolador e garantindo a gestão operacional de seu estado de funcionamento.
19	Alvarez-Nasrallah et al. (2015)	Monitoramento da Corrente de Fuga	Uso da Corrente de Fuga e emissões acústicas para avaliar o nível de poluição em isoladores	Os resultados demonstraram que o modelo utilizado obteve bons resultados para representar a corrente de fuga de variáveis como emissões acústicas e variáveis climáticas.
20	Guedes (2015)	Inspeção visual e radiação ultravioleta	Uso da radiação UV para estimar defeitos em isoladores.	Os resultados demonstraram que a técnica foi eficaz.
21	Wang et al. (2016)	Medição da Hidrofobicidade	Foram utilizadas redes neurais e imagens para avaliar o nível de hidrofobicidade de isoladores	Os resultados apresentados demonstraram que a técnica favoreceu identificar os níveis de contaminação, mas em áreas adjacentes se faz necessário ainda aprimoramento para que os resultados sejam mais próximos do real.
22	Anjum et al. (2017)	Uso de sensores e radio frequência	Foi realizado o uso de sensores, redes neurais e uma técnica on-line de processamento de dados baseada em rádio frequência (RF) para monitorar isoladores de discos cerâmicos visando a detecção de defeitos	Na opinião dos autores as variações de RF podem indicar problemas no funcionamento de isoladores, sendo importantes vetores para avaliação de seu desempenho.
23	Chen e Tang (2017)	Medição Interna da Temperatura	Foi utilizado um sensor FBG e hastes de polímero reforçado com fibra para avaliar a temperatura interna do isolador.	A técnica foi considerada eficaz. Para os atores ao se capturar as variações de temperatura é possível prever possíveis desgastes no equipamento o que favorece a prevenção e manutenção do equipamento.
24	Dias (2017)	Micro-ondas e Simulação computacional	Foi utilizada simulação computacional para determinar os níveis de poluição em isoladores de vidro	Os testes mostraram a técnica eficiente para identificar diferentes níveis de poluição em isoladores.
25	Liu, Du, Farzaneh (2017)	Medição de corrente elétrica e tensão	Utilizou-se análise multivariada autonormalizante para medir as descargas e corrente de fuga	Conforme a nevoa aumenta as condições de medição apresentam variações na descarga de superfície do isolador, indicando tendência de <i>flashover</i> o que confirma o método ser eficaz para monitoramento de isoladores
26	Reis (2017)	Micro-ondas e Simulação Computacional	Utilizou simulação computacional para avaliar a distorção do campo elétrico causada por gotas de água localizadas em superfícies hidrofóbicas	Os modelos tridimensionais construídos pelo sistema permitiram a análise realista dos impactos das gotas de

				água sobre o campo elétrico, sendo possível constatar o impacto destas sobre a distribuição do campo elétrico.
27	Karunarathna <i>et al.</i> (2018)	Uso do monitoramento da corrente de fuga	Utilizaram simuladores de poluição para averiguar os efeitos da corrente de fuga no funcionamento de isoladores.	Os resultados demonstraram que o método é eficaz na avaliação dos isoladores.
28	Silva (2018)	Micro-ondas e simulação computacional	Foi utilizado um sistema de simulação computacional para simular ondas bipolares oscilatórias visando avaliar os efeitos das sobretensões atmosféricas sobre o comportamento de isoladores.	O sistema permitiu evidenciar que a ocorrência de ondas bipolares oscilatórias pode contribuir para que os isoladores fiquem suscetíveis a descargas elétricas.
29	Yan <i>et al.</i> (2018)	Uso do método da corrente de fuga	O método de corrente de fuga foi utilizado adicionado ao uso de sensores de FBG, viga cantilever (estrutura em console) e bobina espiral.	Os autores consideram que a técnica utilizada é eficaz, contudo, no estudo em questão, percebeu-se em alguns pontos em que as medições foram imprecisas, necessitando de maiores investigações para avaliação dessas ocorrências.
30	Zoys <i>et al.</i> (2018)	Medição de campo elétrico e tensão	Foi utilizado o uso do método eletromagnético de detecção de descargas parciais para detectar e localizar descargas parciais em isoladores de alta tensão.	Observou-se que esse método foi favorável e possibilitou identificar variações de energia.
31	Aragão <i>et al.</i> (2019)	Uso de sensores e rádio frequência	Uso de sensor em tempo real para transmissão de dados sobre isoladores.	O método mostrou-se eficaz para acompanhamento dos dados.
32	Pernebayem <i>et al.</i> (2019)	Uso de imagens e redes neurais	Foi realizado o monitoramento de isoladores a partir do uso de imagens capturas com o auxílio de drones.	O uso de drones demonstrou-se eficaz no monitoramento de isoladores.
33	Wei <i>et al.</i> (2019)	Medição da Temperatura Interna	Avaliação a temperatura de isoladora com o uso de sensores de fibra de bragg grating (FBG).	Os resultados demonstraram que o sensor FBG embalado em um tubo de cerâmica pode auxiliar na deformação e sensibilidade da temperatura no equipamento
34	Mussina <i>et al.</i> (2020)	Processamento de imagens e redes neurais	São utilizadas imagens capturadas por uma câmera e redes neurais para avaliar a poluição do isolador.	A técnica mostrou-se eficaz para monitoramento do isolado

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Todos os estudos selecionados são de natureza experimental, que apresentavam relatos de técnicas utilizadas ou simulações realizadas visando-se identificar possíveis condições desfavoráveis que pudessem contribuir negativamente para o funcionamento de isoladores. Em relação as técnicas empregadas, percebeu-se na literatura, haver um maior número de publicações relacionados ao método de corrente de fuga, micro-ondas e sistemas computacionais e processamento de imagens e redes neurais. A figura 13 ilustra essa realidade encontrada a partir da contagem dos estudos por técnica empregada.

Figura 13 - Distribuição dos Estudos analisados por tipo de técnica de monitoramento empregada



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Para melhor compreensão das técnicas de monitoramento, a discussão apresentada irá acompanhar suas respectivas tipologias, conforme se observa nos subtópicos seguintes.

5.1 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES

5.1.1 Inspeção Visual e Radiação Ultravioleta

Costa *et al.* (2009) destacam a inspeção e o uso da medição da radiação ultravioleta como métodos que podem ser utilizados no monitoramento de isoladores. A primeira trata da avaliação de todos os aspectos do isolador, bem como da avaliação das descargas de corona que possam ter ocorrido, pois elas podem provocar degradação das características do material. A segunda envolve a introdução de um termovisor que visa avaliar a qualidade do estado do isolador por meio da radiação infravermelha, emitida pelos objetos que estejam sendo focalizados, em uma escala de cores. As imagens térmicas registradas podem servir para comparar o equipamento com imagens anteriores e identificar possíveis anormalidades. No estudo realizado por eles, isoladores limpos e poluídos foram inspecionados com câmeras infravermelhas e ultravioleta, e a influência de anéis corona em condições poluídas foi avaliada. Os resultados confirmaram que a técnica foi capaz de avaliar os níveis de poluição e variações elétricas, podendo contribuir para prevenção de falhas em isoladores.

Guedes *et al.* (2015) visando identificar o processo degenerativo de isoladores poliméricos, realizaram inspeção técnica usando radiação UV emitida pelos níveis de descargas de corona, realizada por meio de simulação em laboratório. No respectivo experimento imagens ultravioletas foram obtidas e processadas sendo utilizados um Sistema Fuzzy Logic para classificar as condições de degradação do isolador. Os resultados demonstraram que a técnica foi eficaz.

5.1.2 Monitoramento da Corrente de Fuga

Mendonça *et al.* (2010) e Karunarathna *et al.* (2018) destacam o monitoramento da corrente de fuga do isolador como um meio de avaliar a qualidade do equipamento e para isso orienta o uso de sensores que podem auxiliar a evidenciar o desempenho dos isoladores a partir do conhecimento de sua expectativa de vida útil. Para os autores, o monitoramento contínuo dos níveis de corrente de fuga permite que se estabeleça uma estratégia preventiva operacional de limpeza ou substituição de isoladores em circuitos que apresentam condições favoráveis para valores elevados de corrente de fuga.

Tingtao *et al.* (2012) relatam que a corrente de fuga é eficaz porque ao se medir com precisão seus níveis e a gravidade da contaminação das colunas isolantes é possível

prevenir fatores que podem desencadear falhas em isoladores, o que confirma a técnica como uma medida perfeita para proteção em operação de redes de energia.

Alvarez- Nasrallah *et al.* (2015) apresentaram uma análise de correlação entre a corrente de fuga e as emissões acústicas medidas em uma subestação elétrica de 230 kV na cidade de Barranquilla, Colômbia. Além disso, as variáveis climáticas foram consideradas para desenvolver um modelo de caracterização do processo de contaminação do isolador. As medições da corrente de fuga foram realizadas com a utilização de uma bobina em torno do isolador. Para medição das emissões acústicas foi utilizado um medidor de som digital Extech modelo 407764, com dados visuais, um microfone foi instalado perto do isolador para capturar melhor o ruído. Os resultados demonstraram que o modelo utilizado obteve bons resultados para representar a corrente de fuga de variáveis como emissões acústicas e variáveis climáticas. Confirmou-se também que mudanças na umidade e voltagem são bons indicativos da mudança na corrente de fuga, portanto, as alterações de carga devem ser consideradas.

Werneck *et al.* (2003) desenvolveram um sistema de sensoriamento em tempo real de correntes de fuga que ocorrem em isoladores submetidos a 13,8 kV (ou mais). Foi utilizado um sistema de monitoramento por meio da instalação de um sensor de natureza optoeletrônica, onde a sua interconexão com o módulo demodulador, situado em potencial terra, foi feita através de fibra óptica. Nesse sistema, o formato de onda e o valor RMS da corrente de fuga são medidos e enviados para localizações remotas via linha telefônica privada. No estudo a técnica foi instalada em seis isoladores de poste que foram analisados, e estes eram do tipo cerâmica, vidro e polimérico. No protocolo de acompanhamento as condições estipuladas para acionar o processo de armazenamento dos valores RMS e das temperaturas, se deram a partir da ocorrência de variações em RMS de 0,25 mA. Nestes casos, são gravados os valores, as temperaturas, a data e hora. No estudo a técnica se mostrou eficaz para obtenção dos resultados das correntes de fuga. Contudo, os autores sinalizaram que após 30 dias de uso, foi observada degradação do sensor de temperatura externa e o rompimento de um dos cabos de fibra óptica ligado ao isolador cerâmico (chamado de isolador nº 5), fato que eles declararam estar sendo investigados.

Em 2005, Werneck *et al.* apresentaram um novo estudo sobre o uso de sistemas de corrente de fuga, o qual contou com o desenvolvimento de um sensor óptico eletrônico para linhas de transmissão de 500 kV, cujo transdutor emite sinal pela fibra óptica de plástico a uma Unidade Remota (UR) autônoma, fixada à torre, que contém hardware

eletrônico responsável pela demodulação e transformação do sinal óptico em elétrico por meio de transceiver. Os dados são transmitidos com o auxílio da internet, para usuários cadastrados. Os autores consideraram que o método foi eficaz, uma vez que foi possível avaliar as variações da corrente de fuga durante o dia, sendo observados correntes de fugas mais baixas entre as 5 e 6 horas da manhã, propiciando condições favoráveis de umidade que aumentam a corrente de fuga.

Portella *et al* (2008) realizaram um estudo que na subestação de energia elétrica de Paripe- Salvador, os isoladores foram aterrados por cabos coaxiais e conjuntos de resistores, que permitiram a medição das correntes de fuga e das descargas ao longo do tempo de exposição ao meio. Para a coleta de dados atmosféricos: temperatura, direção e velocidade dos ventos, umidade, pressão, precipitação e ponto de orvalho, foi utilizado o sistema de aquisição de dados meteorológicos “Eletronic Weather Station – HUNGER”, e o “software Skyview systems Weather View”. Para a verificação do efeito dos poluentes depositados sobre a superfície dos isoladores foram realizadas medições da resistência de isolamento e da corrente de fuga e descargas parciais em função do tempo. As medidas de resistência de isolamento em isoladores foram efetuadas entre a cabeça do isolador e o pino ou ferragem de sustentação. O equipamento utilizado para as medidas foi um medidor de altas resistências marca Hewlett Packard, modelo 4339A. O sistema de medição foi acoplado a um computador industrial, no qual foram armazenadas as devidas grandezas medidas. No estudo foi possível identificar os períodos críticos de poluição, por meio da variação nos efeitos da corrente de fuga. Os autores consideraram que a medida da corrente de fuga e a descarga parcial medidas nos isoladores energizados foram técnicas conclusivas do efeito da poluição devido aos seus depósitos de poluentes. A técnica permitiu evidenciar as maiores perdas elétricas, inferindo a possibilidade de surtos do sistema de energia nos períodos noturnos, quando houve maior concentração de umidade e, também, nos períodos chuvosos. Os dados confirmaram a importância da técnica como preventiva para falhas em isoladores.

Mendonça *et al*. (2010) realizaram um estudo em que foi introduzido um sensor eletrônico para monitorar a corrente de fuga, o mesmo contabiliza as atuações encontradas e envia uma mensagem para um telefone celular pré-cadastrado, quando a corrente atingir o valor máximo é feito um alerta. Os isoladores foram levados a laboratório para teste das condições do nível de poluição, sendo constatado que o método contribuiu para avaliar os fatores críticos de funcionamento, que estavam mais relacionados a poluição do que ao estado do equipamento.

Tingtao *et al.* (2012) realizaram um estudo do uso do método de corrente de fuga em que foi utilizado medidas de controle da tensão e gravação de dados a fim de avaliar a qualidade do funcionamento dos isoladores. Por meio da técnica, foi feito um monitoramento contínuo dos isoladores e gravadas os resultados das poluições identificadas, quando estas chegaram a níveis críticos um sinal de alerta era lançado. Uma bobina toroidal foi inserida ao isolador para acompanhar a evolução da corrente de fuga. O monitoramento se deu de forma on-line e os dados de evolução da poluição foram avaliados pelo sistema. Os resultados confirmaram que o método de corrente de fuga é eficaz no processo de avaliação dos isoladores e pode prevenir possíveis problemas em seu funcionamento.

Werneck, Santos e Nazaré *et al.* (2014) realizaram um estudo em que foi utilizado um sensor optoeletrônico para identificação das variações na corrente de fuga em isoladores de alta tensão. A corrente de fuga aciona uma LED verde que produz um sinal de luz AM. O opticamente sinal codificado por intensidade é acoplado a uma fibra óptica de plástico de 1 mm e transmitido do ponto de medição de alto potencial para a Unidade Remota em potencial de terra. Após a demodulação, os valores identificados são contabilizados em um registrador de dados e enviados para uma estação remota a 150km por tecnologia GPRS. Os resultados do estudo confirmaram a técnica como eficaz, possibilitando o monitoramento das condições do isolador e garantindo a gestão operacional de seu estado de funcionamento.

Karunarathna *et al.* (2018) realizaram uma simulação de condições de tempo chuvoso em uma câmara de produção de chuva artificial, para avaliar os impactos da corrente de fuga com a condição do isolador. Os resultados confirmaram a técnica eficaz para auxiliar no monitoramento das condições de funcionamento de isoladores.

Yan *et al.* (2018) destacam a corrente de fuga tem uma relação íntima com a segurança elétrica em isoladores, sua análise pode contribuir para prevenção de grandes falhas nestes equipamentos. No estudo realizado por eles, o método de corrente de fuga foi utilizado adicionado ao uso de sensores de fibra de bragg grating (FBG), viga cantilever (estrutura console) e bobina espiral. Quando a maior parte da corrente de fuga é introduzida na bobina espiral, a bobina gera um campo magnético. À medida que a corrente de fuga muda, as mudanças no sistema magnético fazem com que a força de repulsão do ímã no feixe do cantilever mude, o que faz com que a tensão nos FBGs mude. A corrente de fuga pode ser obtida monitorando as mudanças na tensão sobre os FBGs. Os autores consideram que a técnica utilizada é eficaz devido a se constituir em um

método passivo, livre de interferência eletromagnética, confiável e pode suportar uma detecção multiponto. Contudo no estudo em questão, percebeu-se na faixa de medição do sensor é 0-1A e a corrente de fuga medição não é suficientemente precisa. No entanto, a medição do componente de 50 Hz é preciso. Foi sugerido investigar as possíveis causas para as imprecisões ocorridas.

5.1.3 Processamento de Imagens e uso de redes neurais

O processamento de imagens envolve a captura de imagens e depois uma análise detalhada dos objetos capturados, que pode ser realizada por sistemas ou inteligência artificial a partir do emprego de redes neurais que vão avaliar os conjuntos de parâmetros regulares ou irregulares encontrados com o emprego de algoritmos ou abordagens estatísticas específicas. No monitoramento de isoladores, tem sido percebido o emprego desta modalidade de avaliação principalmente no auxílio a evidênciação de poluições e descargas parciais (WANG *et al.*, 2016).

Albuquerque (2014) desenvolveu uma ferramenta para diagnóstico de poluição em cadeias de isoladores aéreos através da utilização de inteligência artificial (redes neurais) e de sensores eletrônicos para mensurar as descargas parciais em linhas de transmissão no Nordeste do Brasil. Foi realizada simulação laboratorial em cinco níveis distintos de poluição e utilizada a rede neural para classificação dos dados coletados pelos sensores visando-se evidenciar quais os isoladores que pelos níveis de poluição e alto índice de predisposição as falhas deveriam ser substituídas. No estudo, a rede neural não apresentou percentual desejado para ser considerada eficaz, contudo, o trabalho apresentou meios que podem contribuir para sua aprimoração, nem como avaliação das condições que podem auxiliar uma adequada inspeção nestes tipos de equipamentos.

Pernebayeva *et al.* (2019) também defendem o uso de imagens digitais para monitoramento do estudo de isoladores e destacam o uso de drones como componentes que podem auxiliar nesse sentido, principalmente em condições extremas de inverno e terrenos complexos. Diferentemente de Wang *et al.* (2016) que defendem técnicas mais atuais para avaliação das imagens, Pernebayeva *et al.* (2019) asseveram que as aplicações tradicionais de aprendizado de máquinas (Bayes Net, *Decision Tree Lazy*, Regras e Meta Classificadores) com seleção adequada de recursos podem mostrar alta precisão de

classificação das superfícies do isolador, ajudando a determinar suas condições e a orientar as medidas preventivas para sua proteção.

Maraaba, Al-Hamouz e Al-Duwaish (2014) utilizaram a técnica de processamento de imagens e redes neurais para avaliar o nível de contaminação de isoladores, auxiliando na prevenção e manutenção desses equipamentos. No estudo uma câmera digital foi utilizada para capturar imagens de poluição e uma rede neural estatística foi relacionada. Os resultados confirmaram a técnica eficaz para avaliação do estado do isolador.

Pernebayam *et al.* (2019) realizaram o monitoramento dos isoladores com o uso de drones para capturar as imagens da sua superfície, visando avaliar suas condições de funcionamento e os graus de hidrofobicidade e poluição. Para analisar os dados, diferentes abordagens foram utilizadas a exemplo daquelas com base em redes neurais e a com base em métodos tradicionais (por exemplo, Bayes Net, Decision Tree, Lazy, Rules e Meta classifiers). Na opinião dos autores, a técnica auxilia o monitoramento de isoladores, contudo os métodos tradicionais de processamento apresentaram melhores contribuições, principalmente diante de isoladores de vidros que tendem a sofrer a influência da luz, o que pode provocar variações na avaliação da imagem.

Mussina *et al.* (2020) realizaram também um estudo onde o processo de imagens foi realizado com o auxílio de câmeras com sensores de 12 megapixels e redes neurais, acompanhamento dos registros e fusão das informações que auxiliavam no monitoramento do estado dos isoladores. Cinco tipos de superfícies isolantes foram analisados, ou seja, uma superfície limpa e superfícies poluídas com água, neve, pó de metal e sal, sendo classificados os níveis e impactos destas. O sistema de fusão das classificações neurais foi capaz de fornecer maior precisão de classificação dos estados críticos com menos tempo e consumo de memória. A técnica mostrou-se eficaz no monitoramento de isoladores.

5.1.4. Uso de sensores e rádio frequência

Os sensores são equipamentos que apresentam sensibilidade a um determinado estímulo para o qual foi direcionado (ruído, temperatura) e constituem equipamentos utilizados no processo de monitoramento de isoladores em conjunto com diversas aplicações pela sua possibilidade garantir precisão no levantamento de dados. O uso de

rádio frequência por sua vez é um método empregado quando no trabalho busca-se métodos para avaliar a ondas por nível de ocorrência (ANJUM *et al.*, 2017).

Anjum *et al.* (2017) realizaram um estudo com o uso de sensores, redes neurais e uma técnica on-line de processamento de dados baseada em rádio frequência (RF) para monitorar isoladores de discos cerâmicos visando a detecção de defeitos. A aplicabilidade da técnica baseada em RF proposta é verificada usando uma linha Test-HV; com detecção bem-sucedida de PD de até 2,5m de distância com energização de 45kV. Os experimentos controlados e conduzidos no estudo demonstraram que os recursos baseados em wavelet em conjunto com a RNA produziram uma taxa de detecção de 95% demonstrando eficácia da técnica utilizada. Na opinião dos autores as variações de RF podem indicar problemas no funcionamento de isoladores, sendo importantes vetores para avaliação de seu desempenho.

Aragão *et al.* (2019) utilizaram um sensor óptico composto por uma placa microcontrolada, fibra óptica e dois conversores de mídia, para transmissão de dados. Após o levamento de informações por meio dos sensores ópticos, o sinal elétrico e processado com o auxílio de conversores analógicos-digitais na unidade microcontrolada, que gera um sinal modulado por largura de pulso que é armazenado e enviado. Antes de serem transmitidos, os dados são encapsulados em mensagens SV, no qual abstrai camadas do modelo OSI (*Open System Interconnection*) para emissão em tempo real por meio de internet. Com os resultados obtidos, observou-se o quão o sistema de transmissão é eficiente, verificada a recepção dos pacotes com o uso do software Wireshark, assim como a taxa de transmissão do sinal óptico.

Silva (2012) realizou um estudo sobre o uso de rádio frequência 915MHz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos. A análise da variação foi obtida com o uso de anéis anti-corona, sendo seus valores obtidos por meio de simulações realizadas com o auxílio dos softwares Gmsj e GetDP. A comunicação de dados foi ensaiada com o uso de sensores RFBee padrão IEEE 802. 15. 4 e a plataforma Arduino. Os resultados encontrados sugeriram que a frequência utilizada é eficaz na transmissão de dados sobre os isoladores havendo pouca degradação.

5.1.5 Medição de Temperatura interna

Chen e Tang (2017) abordam a análise da temperatura interna do isolador como um elemento importante no monitoramento de seus estados. Na opinião dos autores aumento anormal da temperatura deste equipamento é um indicador de defeito na transmissão de energia. Com a finalidade de se fazer a avaliação da temperatura eles propuseram um método usando a incorporação da Fibra Bragg de grade (FBG) que é um sensor potencialmente não destrutivo e que pode ser imune à corrosão com a introdução de hastes de polímero reforçado com fibra (PRF). Ao capturar as variações de temperatura é possível prever possíveis desgastes provocados pela ação do tempo e do próprio calor sobre o equipamento, cabendo a decisão de trocas quando evidenciados defeitos.

Wei *et al.* (2019) utilizaram um método para avaliar a formação de gelo e temperatura em isoladores, baseado em sensores de fibra de bragg grating (FBG). O sensor e temperatura FBG foi embalado em um tubo de cerâmica cilíndrico de 30 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro para isolamento. Para o experimento foi realizada uma simulação da temperatura em laboratório variando entre -15 a 50° C. Os resultados demonstraram que o sensor FBG embalado em um tubo de cerâmica pode auxiliar na deformação e sensibilidade da temperatura no equipamento. O valor médio da sensibilidade encontrada foi de 10,68 pm / °C. Observou-se também que o método pode detectar a carga de gelo que porventura tenha se formado na superfície do isolador.

5.1.6 Medidores de Poluição

As técnicas utilizadas para medição da poluição depositada são normalmente feitas a partir do valor do ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) e do NSDD (*Non Soluble Deposit Density*). O ESDD é responsável pela condutividade elétrica e o NSDD é responsável pela fixação da camada de poluição na superfície do isolador. (XAVIER *et al.*, 2017).

Convencionalmente, a maioria dos estudos que analisam a poluição em isoladores utilizam o método da corrente de fuga (ALVAREZ- NASRALLAH *et al.*, 2014). A técnica da corrente de fuga já foi tratada em tópico específico, contudo, sabe-se que outras abordagens podem ser utilizadas. Por isso, o sentido deste subtópico é trazer ao campo da discussão proposta as demais técnicas que são utilizadas para medição da poluição em isoladores e que são destacadas pela literatura.

Os estudos de Bezerra *et al.* (2009), Ferreira *et al.* (2012) e Narayanan *et al.* (2014) apresentam exemplos de técnicas utilizadas para avaliar os níveis de poluição em isoladores, seus detalhes são descritos a seguir.

Bezerra *et al.* (2009) realizaram um estudo que objetivou a construção de critérios e procedimentos capazes de identificar características e implementações técnicas para diagnosticar poluições em isoladores e alta tensão. Vários recursos em conjunto foram observados visando-se evidenciar aqueles cujas contribuições fossem mais favoráveis ao atendimento os objetivos da pesquisa. Dois grupos de técnicas de reconhecimento de padrões foram aplicados: linear (Fisher e Karhunen – Loève) e não linear (rede neural artificial). Os resultados indicaram que a poluição pode ser avaliada pelas técnicas propostas, especialmente, quando uma combinação de sensores é empregada.

Ferreira *et al.* (2012) utilizaram um sistema de processamento de ruídos em ultrassom para avaliar o estado de isoladores, avaliando os níveis de poluição, no método foi adicionado o uso de redes neurais artificiais autoassociativas. O sistema extrai informações espectrais do ruído ultrassônico emitido pelas descargas como que ocorrem nas proximidades do isolamento elétrico e em seguida correlaciona a informação previamente conhecida sobre a intensidade da poluição no local. O estudo foi realizado em uma usina termelétrica localizada no Complexo Portuário de Suape, em Pernambuco. A voltagem da operação foi de 230 kV. O detector ultrassônico empregado foi um UE Sistemas Ultraprobe 2000 MPh que detecta o ultrassom e converte frequências entre 20KHz e 100 KHz para uma faixa audível ($20 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$). O áudio exportado pelo detector é posteriormente digitalizado e gravado por um computador portátil e processado com algoritmo SSM. Os resultados demonstraram que a técnica consegue ser eficaz na avaliação de poluições em isoladores, mas não acompanha a mesma eficácia em algumas partes relacionadas a esse equipamento, havendo diferença na resposta entre os padrões percebido junto aos disjuntores e a ancora da corda de isolamento.

Narayanan *et al.* (2014) apresentaram uma proposta de desenvolvimento de uma ferramenta de diagnóstico para prever *flashover* e poluição em isoladores de linhas de transmissão de energia de alta tensão com base na transformada wavelet e na abordagem fuzzy c-means. A técnica de transformada wavelet discreta é empregada para extrair características dos sinais de corrente de fuga. Variação da magnitude da corrente de fuga e razão de distorção em diferentes níveis de poluição foram analisados. O algoritmo fuzzy c-means é usado para agrupar as características dos dados de corrente de fuga. Os resultados do estudo confirmaram que o diagnóstico proposto foi capaz de perceber o

flashover e a gravidade da poluição dos isoladores, sendo um sistema facilmente aplicável para medições baseadas na Web em tempo real.

5.1.7 Medição de Campo elétrico e tensão

Medidas de campo elétrico e tensão são importantes indicadores da qualidade do funcionamento de isoladores, bem como podem evidenciar falhas ou alta taxa de poluição sobre os mesmos, motivo pelo qual as técnicas nesse sentido têm sido empregadas para auxiliar na avaliação do estado desses tipos de equipamentos (LIU; XI; LEE, 2010).

Liu, Xi e Lee (2010) realizaram um estudo em que o processamento de campo elétrico foi utilizado como medida para avaliar o desempenho de isoladores. Para os autores esse pode analisar a deficiência de isolamento interno de isoladores compostos, bem como auxiliar a monitorar suas condições de funcionamento. A avaliação do campo elétrico nesses casos, são visualizadas a partir da apresentação do alinhamento das curvas de distribuição do campo elétrico. Em casos em que não há defeito, sua distribuição é suave, ocorrendo algum tipo de falha ela se apresenta distorcida no local oposto ao defeito, o que mostra sua eficiência para distinguir aqueles isoladores em bom estado e os que apresentam algum tipo de defeito. Sensores são utilizados para capturar os registros eletromagnéticos. A unidade terminal remota faz a captura de dados que é transmitida para um microprocessador com chip. A unidade terminal remota pode identificar o sinal eletromagnético e enviá-lo para a central de computador para reduzir o desperdício de energia elétrica. Os resultados confirmam que a técnica pode auxiliar a identificar o isolador defeituoso.

Liu, Du e Farzaneh (2017) utilizaram a análise multivariada autonormalizante (SNM) para monitorar as descargas de superfície dinâmicas para *flashover* em isolador de polímero em condições severas de poluição por névoa e identificar as características da corrente de fuga. Nessa sistemática, percebeu-se que conforme a névoa aumenta os indicadores SNM mostram uma tendência decrescente, irregular e aleatória relacionada as atividades de descarga na superfície do isolador, indicando alta probabilidade de *flashover*.

Zoysa *et al.* (2018) discutem o uso do método eletromagnético de detecção de descargas parciais como forma de avaliação do desempenho de isoladores. Para esses autores, as descargas parciais que se formam nos isoladores constituem um dos principais

fatores motivadores de falhas nesses equipamentos e nesse sentido, a sua detecção pode atuar como medida preventiva. Em seu estudo, realizaram a avaliação de isoladores com o auxílio de uma antena periódica de log de registro na faixa de 0,9 a 2 GHz montada em um veículo aéreo não tripulado. Observou-se que esse método foi favorável e possibilitou identificar variações de energia.

5.1.8 Medição da hidrofobicidade

Du e Liu (2011) relatam que a hidrofobicidade é uma característica proeminente da borracha de silicone para isoladores de polímero. Porém, devido à influência ambiental, a diminuição até mesmo a perda de a hidrofobia ocorrerá, o que causa a preocupação essencial no sistema elétrico em decorrência da susceptibilidade para acidentes induzidos pelo envelhecimento de isoladores poliméricos.

Buscando avaliar os níveis de hidrofobicidade da borracha de isoladores de polímero, Du e Liu (2011) realizaram um experimento e utilizaram o teste da queda dinâmica das descargas superfícies geradas pelo comportamento das gotas de água para avaliar as propriedades hidrofóbicas da borracha de silicone de isoladores em diferentes níveis de envelhecimento. O método de degradação da corona, e câmeras de alta velocidade foram utilizados para capturar imagens dos fenômenos das descargas superficiais. O processamento de imagens e dimensão fractal foram empregados, visando-se avaliar as relações entre os padrões de luz de descarga e os níveis de hidrofobicidade. Foi percebido que o aumento na intensidade do brilho e dimensão fractal do padrão de descarga pode revelar a diminuição da hidrofobicidade. O que confirma que o método aplicado no monitoramento de isoladores.

Wang *et al.* (2016) utilizaram redes neurais e imagens para avaliar o nível de hidrofobicidade de isoladores. Por meio do processamento de imagens digital dos isoladores, e futura extração e segmentação, os dados relacionados a hidrofobicidade eram capturados, sendo utilizada redes neurais de probabilidade para julgar os graus hidrofóbicos. Os resultados iniciais mostraram conformidade com os requisitos reais nas áreas superficiais, no entanto, não com a mesma qualidade em áreas adjacentes, o que sugere a necessidade de seu aprimoramento.

5.1.9 Imagens infravermelhas e Raio-X

No subtópico, foi avaliado o uso de processamento de imagens como técnica no monitoramento de isoladores, mas visando-se complementar este conteúdo, neste subtópico é tratado especificamente as imagens infravermelhas e aquelas decorrentes do uso de equipamentos computacionais, a exemplo do raio-x.

Durante o levantamento realizado pela literatura, percebeu-se ainda serem escassos estudos específicos sobre estas técnicas, sendo evidenciadas contribuições de apenas dois autores.

Godoi *et al.* (2016) destacam que isoladores de polímeros normalmente apresentam falhas em seu interior que não podem ser percebidos sem um mecanismo de avaliação específico. Nesse sentido, eles relatam o uso da tomografia tridimensional computadorizada como um mecanismo capaz de auxiliar a detecção automática de falhas nos isoladores. Para isso, realizaram um estudo que utilizou 180 radiografias digitais adquiridas por um sistema de alta resolução cuja segmentação de imagens se deu com o auxílio do algoritmo Marching Cubes na linguagem de programação Java. Por fim, redes neurais foram inseridas para estimar com precisão as características obtidas dos objetos capturados. Os resultados confirmaram que a técnica auxiliou para identificação de falhas por meio dos testes realizados, sendo possível alcançar boa taxa de classificação dos problemas indicados a partir das imagens 3D das tomografias tridimensional evidenciadas nos raios -X realizados. No entanto, como as amostras disponíveis eram limitadas não foi possível tirar conclusões finais sobre o desempenho com dados do teste.

Estudo semelhante também foi o realizado por Silva et al. (2012) que utilizaram tomografia computadorizada para avaliar isoladores envelhecidos que eram utilizados em linhas de transmissão de 230 Kv por quase 10 anos. O processo foi simulado em laboratório, com a finalidade de compreender a fratura frágil com o uso da técnica, avaliação do raio x e processamento das imagens, foi possível identificar danos antes não possíveis de serem evidenciados a olhos nus. Informações como a profundidade da rachadura e sua proximidade da haste puderam ser também identificadas, confirmado que a técnica é eficaz para prevenção de falhas.

5.1.10 Micro-ondas e Simulação Computacional

O uso da avaliação da transmissão de micro-ondas consiste no emprego de técnicas que analisam este tipo de sinal e conseguem por meio de simuladores ou sensores

analisar a partir de abordagens padrões já existentes se há defeitos em isoladores (QADDOUMI *et al.*, 2009; SILVA, 2018).

No levantamento realizado, percebeu-se também escassez de estudos relacionados ao uso de micro-ondas e Simulação Computacional, o que sugere serem ainda estas técnicas uma lacuna para pesquisas futuras. Um total de quatro autores apresentaram contribuições significativas para o entendimento dessas aplicações técnicas, conforme se observa nos relatos a seguir

Qaddoumi *et al.* (2009) relatam que as técnicas que utilizam micro-ondas para detectar falhas em isoladores e avaliam a transmissão dessas micro-ondas usando a magnitude, fase ou reflexão do sinal para criar uma imagem bidimensional de um objeto, obter varreduras ou medição em um ponto único. A abordagem para maiores proximidades é mais eficaz e utiliza sondas simples e um sensor, sem a necessidade do uso de uma antena como as abordagens para campos mais distantes. No estudo realizado por eles foi utilizado o uso de micro-ondas para detecção de defeitos em isoladores não cerâmicos. O sistema de inspeção de micro-ondas utiliza um sensor que opera a uma frequência de 24 GHz. Um sistema de acomodação de dados foi usado para registrar as medições realizados. Os resultados demonstraram que o sistema conseguiu identificar todos os defeitos com alta sensibilidade, sendo ainda capaz de detectar variações de espessura na haste de borracha de silicone do isolador. Além de serem eficazes, esse tipo de técnica é eficaz, confiável e barata, não exige que nenhuma posição especial para o sensor, pode ser utilizada a curvas e outras superfícies complicadas, pode determinar os defeitos com precisão e para sua aplicação não necessita de nenhuma habilidade especial do operador. Os resultados encontrados demonstram que a técnica possibilitou a detecção de diferentes tipos de defeitos, e isso se deve a capacidade das micro-ondas de penetrar nos dielétricos.

Dias (2017) investigou o efeito dessa poluição sobre os isoladores, a partir da implementação de um modelo computacional que relaciona o aspecto visual do limo no isolador (intensidade, forma e local) com a sua corrente de fuga obtida por simulação e correlaciona eficiência da simulação com experimentos em laboratório. O sistema utilizado usa a interface *COMSOL Multiphysics* 5.2 para determinar a geometria do isolador em 2D com simetria de revolução e posteriormente por meio da simulação com o módulo *Electrical Current* se obteve a densidade da corrente do isolador. Para a simulação foram utilizados isoladores de vidro limpos e poluídos com limo. As simulações computacionais utilizam o Método dos Elementos Finitos e medições

laboratoriais em diferentes condições de umidade. Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de simular a poluição em todos os níveis, sendo observada uma espessura de 2mm. Os dados confirmam a técnica eficaz para evidenciar a poluição e as distorções causadas por ela na corrente de fuga.

Reis (2017) investigou a distorção do campo elétrico causada por gotas de água localizadas em superfícies hidrofóbicas de isoladores poliméricos de 138 KV com diferentes níveis de contaminação a partir da introdução de um sistema computacional aplicado para esta finalidade. Os níveis de campo elétrico foram determinados a partir da simulação de três condições operacionais: ambiente limpo e seco, em seguida, limpo e úmido e molhado e contaminado. Os modelos tridimensionais construídos pelo sistema permitiram a análise realista dos impactos das gotas de água sobre o campo elétrico, sendo possível constatar o impacto destas sobre a distribuição do campo elétrico, bem como perceber que grandes níveis de água podem produzir o corona.

Silva (2018) avaliou o comportamento de isoladores de média tensão quando sujeitos a sobretensões atmosféricas bipolares oscilatórias. Foi utilizado um sistema computacional *Extendend Rusk Model (ERM)* para representar as ondas bipolares oscilatórias. Os resultados confirmaram que a ocorrência desses eventos não é um fato raro e que isoladores que apresentarem sob estas condições podem estar suscetíveis a ocorrências de descargas. Observou-se que a técnica permitiu uma avaliação precisa da realidade, evidenciando a necessidade de que tais aspectos não passem despercebidos durante a gestão preventiva e de manutenção desses equipamentos.

5.2 EFICÁCIA E APLICABILIDADE DAS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES

A partir da literatura analisada, foi possível perceber que as diferentes técnicas empregadas no monitoramento de isoladores não são classificadas pelos autores por tipo de isoladores. Contudo, há que se considerar que determinadas características presentes neles, podem contribuir para um maior ou menor grau de poluição e hidrofobicidade. Em isoladores poliméricos, por exemplo, conforme foi abordado por Godoi *et al.* (2016) é muito comum a presença de corrosão, poluição alterações no revestimento por enfeito do envelhecimento, ou mesmo falhas internas não facilmente percebidas, no entanto pela

própria composição são eles mais resistentes a rachaduras e quebras do que os isoladores de vidro e cerâmicos.

No entanto, verifica-se que o campo que tem direcionado o uso de certas técnicas é a abordagem que a gestão de energia deseja realizar e que pode englobar o emprego de mais de um método, visando garantir maior precisão nos resultados.

Nos estudos analisados, verificou-se por exemplo que o uso de sensores, foi útil em outras diversas abordagens, sendo este o item mais comum no emprego da análise de variações de temperatura e ruídos. O quadro 3, a seguir apresenta um resumo sobre o seu emprego, a partir dos dados apresentados pela literatura analisada.

Quadro 3 - Estudos que associaram o uso de sensores a sua técnica principal

Autor (ano)	Técnica de monitoramento predominante	Uso do sensor foi adicionado para:
Werneck et al. (2003;2005), Werneck, Santos, Nazare et al. (2014) e Yan <i>et al</i> (2018)	Método da corrente de fuga	Auxiliar na captura de sinal e no monitoramento das variações da corrente de fuga.
Albuquerque (2014), Mussina et al, (2020)	Processamento de imagens e redes neurais	Auxiliar na mensuração de descargas parciais.
Yan et al. (2018)	Medição de corrente elétrica e tensão	Capturar sinais eletromagnéticos.
Qaddoumi et al. (2009).	Micro-ondas	Capturar sinais de ondas

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação ao levantamento realizado, embora não seja possível identificar a técnica com maior aceitação, observou-se que o método da corrente de fuga é o que está mais presente nas pesquisas, o que pode indicar que os gestores de energia podem ter preferência pela detecção da corrente de fuga como elemento para avaliar falhas em isoladores.

Quanto a efetividade, percebeu-se que de modo geral, embora diferentes técnicas tenham sido empregadas no monitoramento de isoladores, a grande maioria dos autores destacaram que estas corresponderam às expectativas auxiliando na prevenção e identificação de falhas nestes equipamentos. Contudo no estudo de Albuquerque (2014) as redes neurais utilizadas não permitiram o alcance dos resultados estimados e no estudo de Yan *et al.* (2018) apesar de os autores consideraram a técnica do método da corrente de fuga eficaz, relataram que em alguns pontos ela teve falhas na demonstração de evidências, demonstrando a necessidade de investigações futuras, para se avaliar o que ocorreu nesses locais.

Convém esclarecer, que geralmente as diferenciações de resultados para uma mesma técnica ocorre devido ao emprego de diferentes abordagens para se chegar ao que

se deseja, fato que confirma que os resultados para os estudos neste âmbito não podem ser comparados entre si, mesmo tendo a mesma técnica predominante empregada, a menos que o tipo de isolador e suas condições sejam iguais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da literatura analisada verificou-se que o monitoramento de isoladores constitui uma ação necessária e de importante apoio a gestão de manutenção de energia elétrica, tendo em vista possibilitar a prevenção de falhas na qualidade transmissão de energia, que é a principal ocorrência existente quando os isoladores desses sistemas apresentam falhas.

Quanto aos tipos de isoladores, o estudo empregou a abordagem de Deutsch (2016) que distinguindo estes entre os cerâmicos (porcelana e vidro) e os orgânicos (poliméricos).

Em relação as técnicas de monitoramento, constatou-se haver uma variedade de opções, que associadas ou não podem servir para a evidenciação de falhas, níveis de descargas parciais, poluição, variações na corrente de fuga, prevenindo as principais ocorrências que sugerem problemas no funcionamento de isoladores, são elas: inspeção visual, monitoramento da corrente de fuga, processamento de imagens e uso de redes neurais, uso de sensores e rádio frequência, medição da temperatura interna, medidores de poluição, medição de campo elétrico e tensão, medição de hidrofobicidade, imagem infravermelha e raio-X, micro-ondas e simulação computacional.

A maioria dos estudos apresentaram evidências da eficiência e aplicabilidade das técnicas de monitoramento de isoladores as mais diferentes necessidades identificadas pela gestão de manutenção de energia (análise da hidrofobicidade, descargas parciais, poluição, etc.). Apenas os estudos de Albuquerque (2014) e Yan *et al.* (2018) apresentaram limitações quanto a eficácia, sugerindo investigações futuras para aprimoramento ou identificação do que impediu que os resultados alcançados atendessem ao que se tinha como esperado.

Com base nos dados relatados, percebe-se que o estudo apresentado, respondeu ao problema, bem como atendeu aos seus objetivos. Contudo não tem ele um fim em si mesmo, e sugere novas pesquisas que possam ampliar a discussão aqui proposta a partir das seguintes considerações:

- Observou-se haver diferentes caminhos utilizados pelos pesquisadores para se alcançar êxito no monitoramento de isoladores com base nas técnicas existentes, contudo a heterogeneidade dos estudos não permite

comparar qual das práticas associadas ou modelos são mais eficazes. Assim, seria oportuno o uso de pesquisas que pudessem utilizar diferentes parâmetros para o alcance de um mesmo resultado, a exemplo: análise da corrente de fuga, níveis de poluição, o que poderia trazer dados valiosos, para se verificar qual caminho fosse mais eficaz quanto aos resultados finais.

- A escassez de estudos sobre temas como as técnicas de micro-ondas e sistemas computadorizados, medição de hidrofobicidade, medição de temperatura interna, uso de imagens infravermelhas e raio-x, sugerem estes temas como importantes caminhos para novas pesquisas.

REFERÊNCIAS

ABREU, I. P.; OLIVEIRA, M. M.; SILVA, N. Restabelecimento alternativo das cargas de 20 KV da região central de São Paulo. In: Encontro para debates de assuntos de operação, 10, São Paulo: EDAO, **Anais...** 2010. Disponível em: http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/EDAO/10/Artigo_X_EDAO_SP-A-02_Restabelecimento_Alternativo_das_Cargas_de_20_kV.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

ALBUQUERQUE, E. L.. Análise e tomada de decisão utilizando sistema de monitoramento via satélite para poluição em cadeia de isoladores de alta tensão, **UFCG: Universidade Federal de Campina Grande**, Paraíba Brasil, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/9364>. Acesso em: 20 out. 2020.

ALVAREZ-NASRALLAH, B. *et al* . Correlation analysis between ceramic insulator pollution and acoustic emissions. **TecnoL.**, Medellín , v. 18, n. 34, p. 101-108, Jan. 2015. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100009&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 30 out. 2020.

ANJUM, S. et al. Detection and Classification of Defects in Ceramic Insulators using RF Antenna . **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [s.l.], v. 24, n 1, p. 183-190, fev. 2017. Disponível em: doi: 10.1109/TDEI.2016. Acesso em: 12. mar. 2020.

ARAGÃO, B. L. C. S. et al. Sistema de Transmissão Óptico de Dados de Isoladores Presentes em Linhas de Alta Tensão. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s.l.], v. 10, n. 2, p.71-80, Agosto/2018 Disponível em: https://www.google.com.br/search?sxsrf=ALeKk00zqofMztlcPkAbe-LVQN9KajHw0g%3A1603950007479&source=hp&ei=t1WaX-GdG96U5OUPw9-0-AU&q=SISTEMA+DE+TRANSMISS%C3%83O+%C3%93PTICO+DE+DADOS+DE+ISOLADORES+PRESENTES+EM+LINHAS+DE+ALTA+TENS%C3%83O&oq=SISTEMA+DE+TRANSMISS%C3%83O+%C3%93PTICO+DE+DADOS+DE+ISOLADORES+PRESENTES+EM+LINHAS+DE+ALTA+TENS%C3%83O&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQA1DjAljjAmC0BmgAcAB4AIABAIGBAJIBAJgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&scclient=psy-ab&ved=0ahUKEwih1bmzi9nsAhVeCrkGHcMvDV8Q4dUDCAc&uact=5#. Acesso em: 19 out. 2020.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. 3 ed. Lisboa: Edições 70, 2011.

BEZERRA, J. M. B. et al. An Evaluation of Alternative Techniques for Monitoring Insulator Pollution," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, [s.l.], v. 24, n. 4, p. 1773-1780, out. 2009. Disponível em: doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016628. Acesso em: 20 out. 2020.

BEZERRA; R. C.; *et al*. **Estudo para o aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da Eletronorte**. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262373233_Estudo_para_Aumento_da_Con

fiabilidade_de_Isoladores_Polimericos_nas_Linhas_de_Transmissao_da_Eletronorte>. Acesso em: 13 mar. 2020.

BONOMO, A. Estudo sobre isoladores poliméricos à base de resina poliuretanas para ambiente externo. **USP:Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2003. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-09052017-153952/publico/Dissert_Bonomo_Angela_cor.pdf. Acesso em: 29 abr. 2020

BRAGA, G. E. Avaliação da integridade estrutural e gestão dos ativos fundações metálicas de linhas aereas de transmissão de energia elétrica devido a corrosão; **UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto**. Ouro Preto- Minas Gerais, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6553>. Acesso em: 20 out. 2020.

CABRAL, D. S. Estudo de amplicidade de linhas de transmissão subterrâneas. **UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/179469>. Acesso em: 29 abr. 2020.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A; DA SILVA, R. **Metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Makron Books, 2010.

CHEN, W; TANG, M. Monitoring on internal temperature of composite insulator with embedding fiber Bragg grating for early diagnosis. IN: **Optical Fiber Sensors Conference (OFS)**, 25, 2017, **Anais:** Jeju, 2017, p. 1-4 Disponível em: doi: 10.1117/12.2264374. Acesso em 24 mar. 2020.

COISARADA PRODUTOS. **Isolador tipo pino**. Disponível em: <https://www.coisarada.net/produtos?categoria=Germer>. Acesso em: 30 out. 2020.

COSTA, E. G. *et al.* Characterization of polymeric Insulators using Thermal and UV Imaging under Laboratory Conditions. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, .[s.l.], v. 16, n . 4, ago.2009. Disponível em: doi: 10.1109/TDEI.2009.5211844. Acesso em: 24 mar. 2020.

DEUTSCH, N. M. Diferenças entre isoladores de Porcelana e Poliméricos. **UFRGS :Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/157865>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

DIAS, B. A. **Simulação computacional da poluição biológica em isoladores de vidro**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica); Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/476>. Acesso em: 31 out. 2020.

DISTRIBUIDORA DE PRODUTOS ELÉTRICOS ONIX. **Isolador polimérico tipo pilar**. Disponível em: <https://onixcd.com.br/produtos/redes-aereas-e-instalacoes/isoladores/polimerico/isolador-polimerico-pilar-34kv-m20-34-10-8-fe-m20-cinza-70775/>. Acesso em: 30 out. 2020.

DU, B. X.; LIU, Y. Pattern analysis of discharge characteristics for hydrophobicity evaluation of polymer insulator, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, [s.l.], v. 18, n. 1, p 114-121, February 2011, Disponível em : doi: 10.1109/TDEI.2011.5704500. Acesso em: 20 out. 2020.

ENERGISA. **Norma de Transmissão Unificada NTU 004 – Projetos Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Linhas Aéreas de Alta Tensão.** 2017. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTU%20004%20Crit%C3%A9rio%20pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.

ENGEFORM ENGENHARIA. **Linha de Transmissão Subterrânea São Paulo:** a maior túnel urbano para transmissão de energia elétrica do Brasil. Disponível em: <https://www.engeform.com.br/engenharia/linha-de-transmissao-eit-norte-eit-miguel-reale-2/>, Acesso em: 30 out. 2020.

FERREIRA, T.V. et al. Intelligent Ultrasound Processing Applied to Insulation Pollution Estimation. In: *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2012, Anais. Montreal, QC, 2012, IEEE, 2012, p. 924-927. Disponível em: doi: 10.1109/CEIDP.2012.6378932. Acesso em: 12 out. 2020.

FOXLUX. **Isolador de Porcelana.** Disponível em: www.foxlux.com.br. Acesso em: 30 out. 2020.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica.** 3 ed. Uberlândia-MG: EDUFU, 2015.

FUCHS, R. D **Transmissão de energia elétrica** : linhas aéreas; teorias da linhas em regime permanente. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1979.

GABOR, A. **Estrutura de Linhas de Transmissão.** Disponível em: <https://pxhere.com/pt/photo/1446511>. Acesso em : 30 out. 2020.

GERMER ISOLADORES. **Isolador tipo castanha.** Disponível em: <http://www.germerisoladores.com.br/produto/isolador-tipo-castanha-85-x-90mm/>. Acesso em 30 out. 2020.

GUEDES, C. P. G. Classification of the degradation of polymeric insulators by UV Radiation Levels (Corona) and Fuzzy Logic. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 19, 2015, Pilsen, Czech Republic, **Anais.....2015**, p. 1-5. Disponível em: https://e-cigre.org/publication/ISH2015_550-classification-of-the-polymeric-insulators-degradation-conditions-by-uv-radiation-levels-corona-and-fuzzy-logic. Acesso em: 20. Out. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 9. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

GODOI, W. et al. Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Digital Portátil para a Detecção de Defeitos em Isoladores Poliméricos. 2016. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Desenvolvimento-de-um-Sistema-de-Radiografia-Digital-Porta%CC%81til-para-a-Detec%CC%A7a%CC%83o-de-Defeitos-em-Isoladores-Polime%CC%81ricos.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A. ; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Ravi Gorur Inc., 1999.

GUBANSKI, S.M; *et al.* Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [s.l.], v. 14, n.5 , p. 1065-1080, out. 2007.

GUEDES, C. P. G. Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV e a lógica fuzzy. **UFCG : Universidade Federal de Campina Grande**, Paraíba, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/9363>, Acesso em: 15 jun. 2020.

HAYTON, S. **A conformidade termomecânica das unidades de isoladores para a cadeia**. Disponível em: <https://qualidadeonline.wordpress.com/2020/09/30/a-conformidade-termomecanica-das-unidades-de-isoladores-para-cadeia/>. Acesso em: 30 out. 2020.

JS FLORESTAL. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.jsflorestal.com.br/project/linhas-de-transmissao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 30 out. 2020.

JUDY CABOS. **Isolador de Suspensão Polimérico**. Disponível em: <https://judycabos.com.br/produto/isolador-de-suspensao-polimerico/>. Acesso em: 30 out. 2020.

KARUNARATHNA, M. A. M. *et al.* Condition Monitoring System for Outdoor Insulators In: **International Conference On Electrical Engineering (EECon)**, 2, 2018, **Anais...** Colombia, p. 93-98, Disponível em: doi: 10.1109/EECon.2018.8541012. Acesso em: 13 jun.2020

LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos mecânicos das linhas aereas de transmissão**. 2 ed. Rio de Janeiro: Edgar Blush, 1992.

LIU, Y.; XIE, C. ; LI, N. L. B. Insulation Monitoring For Suspension Insulator Using Electromagnetic Signal Processing . In: **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**, 2010, **Anais.....** Chengdu, IEEE, 2010, p 1-4, Disponível em: doi: 10.1109/APPEEC.2010.5449359. Acesso em : 20 out. 2020.

LIU, Y.; DU, B, X; FARZANEH, M.. IEEE Transactions on Power Delivery, [s.l.], v. 32, n. 3, p 1279-1286, jun 2017. Disponível em: doi: 10.1109/TPWRD.2017.2650214.. Acesso em: 20 out. 2020.

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

MARAABA, L. ; AL-HAMOUZ, Z. ; AL-DUWAISH, H. Estimation of High voltage Insulator Contamination Using a Combined Image Processing and Artificial Neural Networks. **International Power Engineering and Optimization Conference, 8, 2014, Anais IEEE**, Langkawi, 2014, p.. 214-219. Disponível em: doi: 10.1109/PEOCO.2014.6814428.. Acesso em: 20 out. 2020.

MENDONÇA, P. L. *et al.* Monitoramento de Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão através de Sensor de Corrente de Fuga. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 19, 2010. **Anais....** São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Monitoramento-de-Isoladores-Polime%CC%81ricos-em-Linhas-de-Transmissa%CC%83o-atrave%CC%81s-de-Sensor-de-Corrente-de-Fuga.pdf>. Acesso em: 18 out. 2020.

MENEZES, V. P. Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: aspectos técnicos, orçamentários e construtivos. **UFRJ : Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10015383.pdf>>. Disponível em: 23 mar. 2020.

MINAYO, M. C. de S. (Org.). **Pesquisa social: teoria método e criatividade**. 25ª ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2014.

MOREIRA, R. *et al.* **Campo magnético das linhas subterrâneas**. 2016. Disponível em: <https://www.osetorelétrico.com.br/campo-magnetico-das-linhas-subterraneas/>. Acesso em: 12 out. 2020.

MUSSINA, D. *et al.* Multi-Modal Data Fusion Using Deep Neural Network for Condition Monitoring of High Voltage Insulator . IEEE Access, [s.l.], v. 8, p. 184486-184496, 2020. Disponível em: doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027825.. Acesso em : 20 out. 2020.

NARAYANAN, V. J, Prediction of Flashover and Pollution Severity of High Voltage Transmission Line Insulators Using Wavelet Transform and Fuzzy C-Means Approach.J **Electr Eng Technol**, [s.l.], v. 9, n. 5, p. 1677-1685, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5370/JEET.2014.9.5.1677>. Acesso em: 20 out. 2020.

NEXANS. **Cabos para linhas de transmissão de energia..** Ilustração. Disponível em : https://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/navigatepub_228648_-19777/Nexans_fecha_contrato_de_26_milh_es_de_euros_em_ca.html. Acesso em : 30 out. 2020

OLIVEIRA, F. G. **Estudo de Instalações de linhas de alta tensão com relação a campos magnéticos**. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2010.

PERNEBAYEVAM, D. *et al.* High voltage outdoor insulator surface condition evaluation using aerial insulator images, *High Voltage*, [s.l.], v. 4, n.3, p. 178-185, 2019. Disponível em: doi: 10.1049/hve.2019.0079. Acesso em: 25 jun. 2020.

PORTELLA, K. F. *et al.* Monitoramento da Corrente de Fuga, Descargas Parciais e Resistência de Isolamento de Isoladores sob Poluição Industrial e Litorânea. In : Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI , 18, 2008, **Anais...** Pernambuco, 2009.. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Monitoramento-da-Corrente-de-Fuga-Descargas-Parciais-e-Resist%C3%A2ncia-de-Isolamento-de-Isoladores-sob-Polui%C3%A7%C3%A3o-Industrial-e-Litor%C3%A2nea.pdf>; Acesso em : 20 out. 2020.

QADDOUMI, N. Detecting damages in outdoor non-ceramic insulators using near field microwave non-destructive testing, In : **IEEE Electrical Insulation Conference**, 2009, **Anais...** Montreal, QC...2009, p. 64-66. Disponível em: doi: 10.1109/EIC.2009.5166325. Acesso em: 20 out. 2020.

QUARESMA, G. H. Avaliação do Desempenho de Isoladores Elétricos de Porcelana através do Uso de Recobrimentos Poliméricos Hidrofóbicos. **CEFET MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Belo Horizonte: 2018. Disponível em: http://www.posmat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/120/2019/06/Vers%C3%A3o-Final_Giovanni_Claudinei.pdf. Acesso em 29 abr. 2020.

QUEIRÓS, J. P. M. Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais. **UP- Universidade do Porto**. Lisboa: 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/143396706.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2020.

REIS, D. F. Estudo Experimental e Computacional dos níveis de campo elétrico em isoladores poliméricos de 138 KV sob condições de contaminação e umidade. **UFMG- Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte: 2017. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1362M.PDF>. Acesso em: 30 out. 2020.

SILVA, C. A. *et al.* Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal. **ForSci.: r. cient.** IFMG, Formiga, v. 4, n. 2 (e00206), p. 1-16, ago./dez. 2016.

SILVA, A. R. Avaliação do comportamento de isoladores de média tensão frente a sobretensões atmosféricas bipolares. **USP - Universidade de São Paulo: São Paulo**. São Paulo, 2018. Disponível em; https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-17102018-102649/publico/Alexandre_Rigotti_Silva_REV.pdf. Acesso em: 30 out. 2020.

SILVA, H. A. B. Utilização da Frequência de 915 Mhz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão 500 kv. **PUC Campinas - Pontifícia Universidade Católica de Campinas**, Campinas: 2012. Disponível em: <http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/handle/tede/537>. Acesso em: 30 out. 2020.

SILVA, P. P. J. C. *et al.* In-Service Aged Composite Insulators at Transmission Line Investigated by the Micro-Computerized Tomography . **Materials Transactions**, [s.l.], v. 53, n. 4, p. 617 – 620, 2012. Disponível em: doi: 10.2320/mater-trans.I-M2012802. Acesso em: 20 out. 2020.

SONATA ENGENHARIA. **SPDA**: até onde chega a proteção de um para-raios? Disponível em: <https://www.sonataengenharia.com.br/spda-alcance-da-protecao-de-um-para-raios/>. Acesso em : 30 out. 2020.

THOMAZINI, D. Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Poliméricos de Alta Tensão. **USP- Universidade de São Paulo**. São Carlos: 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-04032009-151829/publico/Thomazini.pdf>. Acesso em; 29 abri. 2020.

TINGTAO, Z. . *et al.* On-line Monitoring System of Insulator Leakage Current Based on AR In: **IEEE International Conference on Industrial Informatics**, 10, 2012, **Anais.....**Beijing, 2012, p 75-79, Disponível em; doi: 10.1109/INDIN.2012.6301125. Acesso em: 20 out. 2020.

WANG, Q. *et al.* The Hydrophobic Detection of Transformer Composite Insulator Bushing Based on Digital Image Processing Technique. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [s.l.], v. 16, n. 4, p. 985-992, ago. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5211844>, Acesso em : 20 jun. 2020.

WEI, J. *et al.* Detection of Glaze Icing Load and Temperature of Composite Insulators Using Fiber Bragg Grating . **Sensors**, [s.l.], v.19, n. 1321, p. 1-9, 2019. Disponível em: doi:10.3390/s19061321. Acesso em: 18 out, 2020.

WERNECK, M. M. *et al.* Desenvolvimento de Sistema de Detecção e Monitoramento de Correntes de Fuga em Isoladores Através de Fibra Óptica . In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, CITNEL, 2, 2003 **Anais**: Salvador, 2003. Disponível em : <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Desenvolvimento-de-Sistema-de-Detecc%CC%A7a%CC%83o-e-Monitoramento-de-Correntes-de-Fuga-em-Isoladores-Atrave%CC%81s-de-Fibra-O%CC%81ptica.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.

WERNECK, M. M. *et al.* Sistema de monitoramento de corrente de fuga para linhas de transmissão de 500kV. In: III Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, CITNEL, 3, 2005, **Anais**: Florianópolis, 2005. Disponível em : [giti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/Sistema-de-monitoramento-de-corrente-de-fuga-para-linhas-de-transmissao-de-500kV.pdf](https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/Sistema-de-monitoramento-de-corrente-de-fuga-para-linhas-de-transmissao-de-500kV.pdf). Acesso em: 20 Out. 2020.

WERNECK, M. M.; SANTOS, D. M.; NAZARÉ, F. V. B. ; *et al.* Detection and Monitoring of Leakage Currents in Distribution Line Insulators. **IEEE Sensors Journal**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 1338-1346, mar. 2015, Disponível em: doi: 10.1109/JSEN.2014.2361788. Acesso em: 19 out. 2020.

XAVIER, J. A. R. Ajustamento de técnicas de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais. **UFPE : Universidade Federal**

de **Pernambuco**, Recife, 2017. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/39830/1359036/303_JoseXavier/c4dccdd5-e04b-4ea9-beed-0510453c1ad5. Acesso em: 09 mai. 2020.

YAN, Z. *et al.* Insulator string leakage current-monitoring sensor based on fiber Bragg grating. **Optics Express**, [s.l.], v. 26, n. 19 , p. 1-11, set. 2018. Disponível em: 10.1109/ACP.2018.8595781. Acesso em : 15 out. 2020.

ZOYSA, R. T . *et al.* Log Periodic Antenna Based Partial Discharge Detector for Condition Monitoring of High Voltage Insulators, In: **Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)**, 2018, **Anais.....**Moratuwa, p. 477-481. Disponível em: doi: 10.1109/MERCon.2018.8421927. Acesso em: 25 jun. 2020.