

Poluição em Isoladores Elétricos de Alta Tensão: uma Revisão sobre Metodologias de Avaliação e Medidas Mitigadoras^{*}

Robson do N. Silva^{*} Marcus V. A. Nunes^{*} Allan R. A. Manito^{*}
André M. de Morais^{*} Marcel A. de A. Romano^{**}
Vanilze V. M. de Almeida^{**} Adriel B. da Silva^{**}
Adiel L. de O. Matos^{**}

^{*} Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão, LEAT - UFPA, Belém-PA,
(e-mail: robsonnascimento@ufpa.br, mvan@ufpa.br,
allanmanito@ufpa.br, andremmorais@ufpa.br)

^{**} Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica,
PPGEE-UFPA, (e-mail: antonionni@gmail.com,
vanilzevaz@gmail.com, adrielbritto15@gmail.com,
adiel.matos@itec.ufpa.br)

Abstract: This article presents a detailed and updated review of the state of the art on the impact of pollution on electrical insulators applied to electrical power systems, highlighting the importance of pollution characterization and monitoring. It categorizes pollution into biological, industrial and natural, highlighting the pollution profiles found in the Amazon region, discussing how each type affects the efficiency of insulators. It also addresses the use of analytical and numerical models to model insulators affected by pollution and discusses techniques used to measure and analyze the severity of local pollution, and the operating conditions of insulators. Mitigation strategies such as periodic washing, use of hydrophobic coatings, and adjustments to insulator design to improve electric field distribution are discussed based on case studies.

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão detalhada e atualizada do estado da arte sobre o impacto da poluição em isoladores elétricos aplicados à sistemas elétricos potência, destacando a importância da caracterização e monitoração da poluição. Categoriza a poluição em biológica, industrial e natural, com destaque para os perfis de poluição encontrados na região Amazônica, discutindo como cada tipo afeta a eficiência dos isoladores. Também aborda o uso de modelos analíticos e numéricos para a modelagem de isoladores afetados pela poluição e discorre sobre técnicas utilizadas para medir e analisar a severidade da poluição local, com base na condição de operação de isoladores. Estratégias de mitigação, como a lavagem periódica, uso de revestimentos hidrofóbicos e ajustes no design dos isoladores para melhorar a distribuição do campo elétrico, são discutidas a partir de estudos de caso.

Keywords: Pollution; Electrical Insulators; Electrical Power Systems; Flashover; Operating condition; Numerical Modeling; Measurements; Mitigation Strategies

Palavras-chaves: Poluição; Isoladores Elétricos; Sistemas Elétricos de Potência; Disrupção, Condição de operação; Modelagem Numérica; Medições; Estratégias de Mitigação;

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade do sistema elétrico de potência (SEP) é uma questão de grande preocupação para concessionárias, tanto no âmbito da transmissão, quanto da distribuição. Interrupções no fornecimento de energia causam transtornos e prejuízos significativos aos consumidores, além de acarretarem danos financeiros e de imagem às empresas concessionárias. Diversos trabalhos técnicos apontam que os isoladores são um dos componentes do SEP que apresentam o maior risco de falha, estando também associados

^{*} Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa e a PROPESP/UFPA pelo apoio para participação em evento e publicação do artigo.

a uma porcentagem significativa de interrupções, conforme pode ser visto na pesquisa conduzida pelo CIGRE (Garcia and Santos Filho, 2003) e no relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018). Assim, a monitorização desses componentes torna-se crucial para garantir a confiabilidade do SEP.

Os isoladores elétricos utilizados em redes e linhas aéreas de energia são dispositivos projetados para suportar tensões eletromecânicas e fatores ambientais. Os 3 tipos de isoladores mais encontrados no SEP brasileiro são: vidro, porcelana e, mais recentemente, polímeros (De Souza Pereira Gomes et al., 2020).

Nesse contexto, considerando o aumento da incidência de descargas atmosféricas no Brasil, especificamente na re-

gião Amazônica, vem se tornando fundamental o aprofundamento quanto às análises relacionadas ao desempenho dos isoladores nas redes elétricas, principalmente no que diz respeito às suas características, materiais utilizados e presença de poluição. Em relação a este último aspecto, a disrupção ocasionada pelo depósito de poluição na superfície de isoladores, tem sido um dos problemas mais significativos para a transmissão e distribuição de energia e, em razão disso, é objeto de vários estudos (Benguesmia et al., 2018; He et al., 2019b; Chen et al., 2022; Porfirio et al., 2018). A poluição sob ambiente de floresta tropical foram avaliadas nas pesquisas realizadas em (De Mello et al., 2008; De Mello, 2017), nas quais foram realizados estudos visando soluções para mitigar problemas causados por contaminantes típicos encontrados na região Amazônica, como: limo, musgo, líquen, etc.

A influência da poluição na degradação da suportabilidade de isoladores tem sido também objeto de análise computacional, via métodos analíticos e numéricos, destacando-se neste último caso a utilização do método de elementos finitos (MEF) para o cálculo do campo elétrico (\vec{E}), do potencial elétrico (V) e da corrente de fuga (CF) (Benguesmia et al., 2018; Frizzo Stefenon et al., 2018; Ghiasi et al., 2021). Em termos experimentais e de avaliação em campo, observa-se na literatura técnica diferentes estratégias (com e sem contato) para medição da severidade da poluição local (SPL) (Porfirio et al., 2018) e também dos efeitos eletromecânicos produzidos em decorrência do depósito de poluição em isoladores (Werneck et al., 2014; Ahmadi-Joneidi et al., 2017; Ivanov et al., 2021; Semensato and Silva, 2023; Esmieli et al., 2024). Nesse sentido, também são verificadas algumas proposições para avaliar a condição de operação dos isoladores com base nas medições (Dias et al., 2019; Florentino et al., 2019; Silva et al., 2022; Esmieli et al., 2024), além de medidas visando mitigar a ocorrência de desligamentos intempestivos associados à poluição em isoladores (Suwarno and Wibowo, 2012; m. George et al., 2014; Rosli et al., 2022; Mustafa et al., 2022; Araújo et al., 2023)

A contribuição deste artigo de revisão se caracteriza por facilitar o acesso às pesquisas em poluição em isoladores de alta tensão, sintetizando as características e respostas dos isoladores sob atmosfera poluente. Além disso, o artigo aponta também técnicas para mitigação de falhas relacionadas à poluição nos isoladores.

Esta pesquisa irá concentrar-se no fluxograma ilustrado na Figura 1 com o objetivo de caracterizar o estado da arte. Pretende-se com isso embasar pesquisas realizadas na área quanto aos desenvolvimentos mais recentes.



Figura 1. Fluxograma da revisão do estado da arte.

2. PERFIS DE POLUIÇÃO EM ISOLADORES

Diversos estudos vem sendo realizados na tentativa de caracterização dos contaminantes, sejam estes provenientes de uma atmosfera rural, urbana, industrial, costeira ou proveniente da ação humana. Nestes, as intempéries locais são relacionadas com os efeitos de degradação de isoladores e componentes dos sistemas elétricos.

2.1 Poluição Natural e Industrial

O perfil de poluição natural varia de acordo com a umidade, temperatura, fluxos de poeira, composição do solo, tipos de vegetação local, deslocamentos de massas de ar, entre outros processos naturais que carregam ou emitem particulados na atmosfera, que posteriormente se depositam nos equipamentos ao longo de sua vida útil.

Nos estudos de Chen et al. (2022) e He et al. (2019a), é possível verificar que a umidade é um fator de grande influência na tensão de uma cadeia de isoladores contaminados, favorecendo a assimetria de tensão e erros na averiguação do estado do equipamento sob operação. A caracterização dos compostos presentes na superfície dos isoladores poluídos com íons solúveis combinados com os fatores climáticos, como a umidade, favorecem as falhas na operação destes equipamentos.

O trabalho de He et al. (2019b), verifica a caracterização dos contaminantes naturais encontrados em isoladores de vidro na China a partir do fator de enriquecimento de elementos em partículas para determinar a parcela de poluição natural e a parcela advinda da ação humana. Verificou-se que a poluição natural é a principal fonte de contaminação dos componentes insolúveis na superfície do isolador estudado. Enquanto, o fator de enriquecimento metálico dos componentes é encontrado em maior quantidade na parte inferior do isolador motivado pela ação humana. Devido o uso de fertilizantes no solo próximo dos isoladores, foi possível verificar a presença de óxidos de nitrogênio volatilizados na atmosfera, o que também contribui para a corrosão dos componentes. Além disso, a ação humana com a presença de indústrias, rodovias, usinas termelétricas, fábricas de materiais químicos, entre outros, contribuem e enriquecem a poluição dos isoladores com metais pesados.

O estudo de Porfirio et al. (2018), realizado com o intuito de caracterizar a poluição dos isoladores de subestações localizadas na região Amazônica, nas cidades de Belém-PA, Barcarena-PA e São Luís-MA, avaliou os depósitos de poluentes encontrados na superfície de isoladores e os relacionou com os poluentes encontrados nas águas de chuva coletadas nos três locais de estudo. Os materiais solúveis encontrados foram avaliados por meio de cromatografia iônica e os materiais insolúveis por espectrometria (LIBS) e a morfologia por meio de espectrometria de energia dispersiva, com raios-X e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados de Porfirio and da Costa (2018), mostraram a incidência de particulado com muitos íons, tanto de contribuições marinhas como os íons de Na^+ e Cl^- , quanto de contribuições antrópicas com a presença de fluoretos, sulfatos e nitratos. A análise revelou que a deposição nos isoladores de Barcarena tiveram muita influência do setor industrial da região.

No estudo de Porfirio et al. (2018), foram encontrados deposição de partículas esféricas carbonáceas indicativas da queima de combustíveis fósseis e fuligem. Também, devido a presença de indústrias transformadoras de alumínio na região, foram encontradas partículas aglomeradas de minerais e de alumino-silicatos de mais variados tamanhos e formas.

2.2 Poluição Biológica

A sazonalidade da região Amazônica pode favorecer o aparecimento de outros tipos de contaminante além dos particulados, no estudo de De Mello et al. (2008), realizado na região Amazônica nos municípios de Belém-PA, e Rurópolis-PA foram encontrados equipamentos de subestações contaminados com agentes biológicos, como microalgas (Cyanophyta e Chlorophyta) e fungos (esporos e hifas), popularmente chamados de "limo", no qual foram detectados mais de 10 espécies diferentes de microalgas. A poluição em conjunto com fatores como chuva, névoa, chuvisco e orvalho, pode acarretar em falhas nos isoladores, pois os compostos presentes na poluição podem ser diluídos e formar camadas condutoras na superfície do isolador como citado por De Mello (2017).

As condições que favorecem o surgimento da poluição biológica foram estudadas por Xia et al. (2016), Ouyang et al. (2019), Tshubwana et al. (2020) e Dinesh et al. (2008), que constataram que áreas quentes e úmidas favoreciam a aparição de algas, fungos e bactérias parasitas sobre a superfície dos equipamentos, e que os materiais de borracha de silicone com propriedades hidrofóbicas facilitaria o crescimento destes organismos, além de perder suas características de hidrofobicidade, favorecendo o aumento da CF e a degradação dos equipamentos.

3. MODELAGEM DE ISOLADORES E MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DA POLUIÇÃO LOCAL

Diversos trabalhos encontrados na literatura técnica apresentam desenvolvimentos envolvendo a modelagem do fenômeno da disrupção, considerando cenários com isoladores poluídos. Nesta seção serão abordadas a modelagem e as metodologias disponíveis para quantificar a SPL em isoladores.

3.1 Modelagem Analítica e Numérica para Isoladores Poluídos

Métodos analíticos (MA) e diferentes métodos numéricos, como método das diferenças finitas, método dos elementos finitos (MEF), método dos elementos de fronteira e método de simulação de carga, são usados para calcular V , \vec{E} e a CF (Benguesmia et al., 2018; Frizzo Stefenon et al., 2018; Ghiasi et al., 2021).

Em (El-Zohri et al., 2015) é proposto um modelo dinâmico para a disrupção de um isolador com poluição não uniforme, com solicitação em frequência industrial, levando em consideração as características do arco dinâmico, o modelo de Obenaus, as equações de arco de Rizk combinadas com as equações dinâmicas da mudança na resistência do arco de Mayr e adotando o critério de Hampton para

propagação de arco, permitindo calcular as mudanças instantâneas na corrente do arco, no comprimento do arco, na resistência do arco e no nível de poluição na cadeia de isoladores em que a disrupção ocorre em determinado nível de tensão.

Segundo Ahmadi-Joneidi et al. (2017) uma das técnicas úteis para avaliar tanto a poluição características como o envelhecimento, em isoladores poliméricos sob condições úmidas, é a medição da resistência superficial. Como a degradação da superfície causa incremento de CF, pode-se deduzir que as medições da resistência superficial podem ser usadas como indicadores para avaliar o envelhecimento em isoladores poliméricos. No referido trabalho, foi abordado um modelo que, baseado na teoria de circuitos, calcula a resistência de superfície do isolador sob condições de poluição uniforme e não uniforme.

Entretanto, conforme visto em (Benguesmia et al., 2018), (Frizzo Stefenon et al., 2018) e (Ghiasi et al., 2021) os modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos apresentam melhores resultados na modelagem do fenômeno da disrupção em isoladores poluídos em comparação a outras abordagens numéricas e também a modelos estáticos e dinâmicos.

Em (Ahmadi-Joneidi et al., 2017) e (Benguesmia et al., 2018) foram analisados o comportamento, sob tensão alternada, de isoladores polimérico e de vidro poluído, respectivamente. Para tanto, as distribuições de V e \vec{E} ao longo do isolador de alta tensão são investigadas utilizando o MEF. Nesses artigos, V e \vec{E} são obtidas nas simulações sob cenários limpos e poluídos e aplicação de diferentes valores de condutividade elétrica (σ). Em (Frizzo Stefenon et al., 2018) simulações com MEF foram realizadas considerando isoladores cerâmicos de média tensão sob alguns cenários típicos (superfície condutiva uniforme, presença de ninho de pássaro, etc), sendo também avaliados V e \vec{E} ao longo do isolador. A pesquisa conduzida por (Dias et al., 2019) analisou o desempenho de isoladores de 15 kV submetidos a diferentes níveis de poluição na superfície dos isoladores (modeladas com MEF), obtendo o V , o \vec{E} e a densidade de corrente (\vec{J}) nos isoladores poliméricos.

No artigo desenvolvido por Zhang et al. (2020) são simuladas, com MEF, as características da distribuição espacial do \vec{E} de isoladores poliméricos de 110 kV, sendo analisados os efeitos de diferentes condições de superfície (limpo, poluição uniforme e banda seca). Com base nisso, é proposto um método de monitoramento sem contato para avaliar a poluição em isoladores poliméricos. A proposta de Ghiasi et al. (2021) aborda dois tipos convencionais de poluição não uniforme, conhecidos como em forma de leque e em forma de anel, os quais são modelados, utilizando MEF, para um isolador polimérico de 20 kV, sendo feita uma comparação em termos do \vec{E} entre as duas configurações usando diferentes espessuras e σ da camada de poluição.

Em (Gao et al., 2022) isoladores não poliméricos, de nível de tensão de 220 kV, foram modelados usando MEF com o objetivo de analisar as características da distribuição espacial do \vec{E} sob a influência de condições de degradação (alterando a permissividade, ϵ , e a σ dos materiais). No referido trabalho foram investigadas também as implicações da curvatura de cadeias longas de isoladores (15 elementos) e a influência da distância de medição do \vec{E} , tendo em vista

a utilização de drone embarcado com sensor de campo elétrico para avaliação da condição de operação sem contato. Leite et al. (2023) desenvolveram um modelo baseado em MEF para um isolador de borracha de silicone vulcanizada à alta temperatura. A corrente de fuga é calculada para diferentes depósitos de poluição contínuos e descontínuos e, em seguida, a defasagem entre a CF e a tensão aplicada são extraídas para cada tipo de camada de poluição para identificar a existência de bandas secas na superfície do isolador.

Conforme visto nas referências abordadas, o aumento da CF e as mudanças no \bar{E} são indicadores importantes da deterioração do isolador. Parâmetros como a intensidade e a frequência dos arcos elétricos, juntamente com o nível da CF e a intensidade do \bar{E} , são utilizados para determinar o grau de degradação do isolador e, conseqüentemente, sua viabilidade em campo, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento do SEP em diferentes condições de operação e ambiente.

3.2 Métodos de Avaliação da Severidade da Poluição Local

A norma ABNT NBR IEC 60815-1 (ABNT, 2014) estabelece a avaliação da SPL, incluindo o procedimento de cálculo da densidade de depósito de sal equivalente (DDSE) e a densidade de depósito não-solúvel (DDNS) na superfície de cadeias de isoladores (Porfirio et al., 2018; Nader et al., 2022).

O método DDSE é utilizado para o cálculo da poluição média com base na densidade média de sal solúvel e é expresso em massa de cloreto de sódio (NaCl) por unidade de área exposta do isolador (mg/cm^2). O DDSE é obtido por meio da lavagem do isolador em um volume conhecido (utilizando água filtrada e com σ menor que $5 (\mu\text{S}/\text{cm})$). Após essa etapa, mede-se σ da solução resultante da lavagem. No caso da DDNS, a medição é realizada filtrando a solução da DDSE e secando o filtro em uma estufa. A quantidade de poluição retida é então quantificada por meio de pesagem. Essa correlação entre os níveis de DDSE e DDNS possibilita avaliar a severidade da poluição no local onde o isolador está instalado.

4. DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO

Em síntese, os métodos e dispositivos de medição podem ser categorizados de duas formas: com medição por contato direto e medição a distância.

4.1 Métodos e Dispositivos com Medição por Contato Direto

Esses tipos de dispositivos atuam conectados diretamente ao sistema, medindo CF, níveis de poluição, avaliando danos estruturais, etc. Werneck et al. (2014) usaram um sistema optoeletrônico, através de um diodo emissor de luz de alta eficiência, capaz de medir, armazenar e transmitir via rádio, por meio de conexão GPRS (Serviço de Rádio de Pacote Geral) os dados de CF do isolador, utilizando tecnologia de fibra óptica plástica (Ahmadi-Joneidi et al., 2017).

Castillo-Sierra et al. (2021), também desenvolveram um sistema semelhante, focado na medição e análise da CF de isoladores cerâmicos aplicados à transformadores de potencial, utilizando uma bobina instalada no isolador e um miliamperímetro para coleta de dados de corrente induzida na bobina. Como resultado, foi obtida uma rotina preditiva de lavagem dos isoladores, já que as subestações e linhas de transmissão estudadas ficam em áreas de intensa poluição salina próxima ao Mar do Caribe, na região Colombiana de Barranquilla.

Já o trabalho de Ahmadi-Joneidi et al. (2017) analisou a CF em isoladores poliméricos poluídos de formas uniforme e não uniforme, a metodologia foi implementada a partir de ensaios laboratoriais onde foram simuladas as condições de poluição ambiental nos isoladores (Ahmadi-Joneidi et al., 2017). Na Figura 2 observa-se o arranjo utilizado nos ensaios.

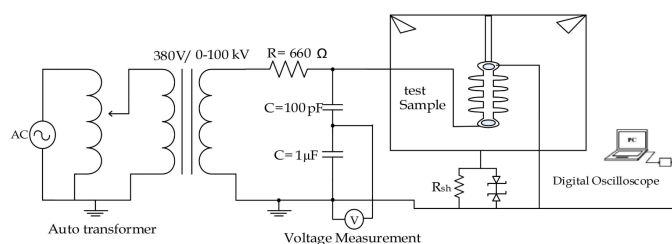


Figura 2. Arranjo utilizado na medição de corrente de fuga.
Fonte: Ahmadi-Joneidi et al. (2017)

Os ensaios foram realizados utilizando uma câmara salina acoplada a um gerador de névoa, um transformador, um medidor capacitivo, um *shunt* resistivo, além de diodos zenner, protegendo de sobretensões eventuais. Além disso foi realizado o cálculo da CF numericamente para efeito de comparação com os resultados de ensaios.

Um trabalho semelhante é o de Esmieli et al. (2024). A estratégia e o arranjo de ensaio são praticamente os mesmos, a diferença se dá no método de análise, enquanto em Ahmadi-Joneidi et al. (2017) buscou-se comparar a intensidade da CF de acordo com os perfis de poluição, em Esmieli et al. (2024) a análise foi feita em torno das componentes harmônicas, para os perfis de poluição, isoladores e umidades. Os resultado de ensaios foram obtidos para isoladores poliméricos de classe 20 kV.

4.2 Métodos e dispositivos de medição sem contato direto

Os métodos e dispositivos sem contato direto abrangem diversas técnicas complexas para medição e diagnóstico do estado operacional de isoladores de alta tensão entre outros dispositivos. No trabalho de Ivanov et al. (2021), foram apresentadas as principais configurações para medição e diagnóstico sem contato, como mostrado na Figura 3.

A medição é realizada de forma simultânea por meio eletromagnético ou ultrassônico, analisando-se também as condições ambientais. As medições são trianguladas para detectar os elementos que apresentam maiores níveis de descargas parciais, chegando-se a um diagnóstico preventivo.

A medição (MC) é composta por antenas diretivas que captam o sinal de alta frequência emitido pelas descargas

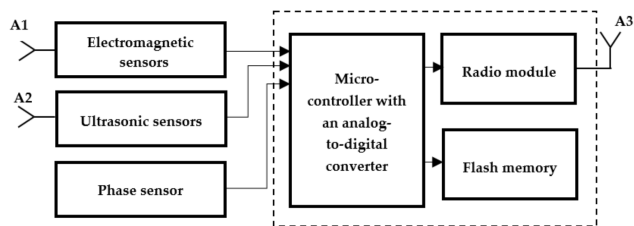


Figura 3. Fluxograma geral de dispositivo sem contato direto. Fonte: Ivanov et al. (2021)

parciais (DP), e após processamento a localização da fonte de DP é realizada com uma precisão de 0,5 metros. Em um arranjo semelhante, pode-se utilizar microfones de alta sensibilidade, que captam as ondas sonoras das descargas (ultrassom) e pelo atraso do sinal entre os diversos pontos de captação conseguem também localizar equipamentos ou isoladores produzindo DP.

Outra forma bastante usada na atualidade é a avaliação do nível de poluição pela inspeção de DP por imagens, com câmera ultravioleta (UV). Esse tipo de método, precisa de uma análise prévia relativa aos fatores ambientais, já que temperatura e umidade podem afetar drasticamente os resultados. As inspeções podem ser realizadas ao solo ou aéreo com apoio de helicópteros e drones.

5. MÉTODOS DE ANÁLISE

Existem diferentes métodos para avaliar a condição de um isolador no SEP. Alguns métodos utilizam parâmetros como σ e ϵ , enquanto outros fazem uso da CF para avaliar a condição do isolador.

Um dos métodos utiliza uma correlação entre níveis de poluição (leve, média e pesada), variando σ e ϵ e verificando o desempenho do isolador por meio do cálculo de V , \vec{E} e \vec{J} , como pode ser visto em Dias et al. (2019).

Outros métodos analisam a CF, como apresentado por Silva et al. (2022), Xavier (2017), Esmieli et al. (2024), Oliveira et al. (2009) e Castillo-Sierra et al. (2021), porém, com diferentes abordagens, como descrito a seguir. Em Silva et al. (2022), por meio do valor de pico, valor eficaz e componente harmônica fundamental da CF, é caracterizada a intensidade da poluição. Neste trabalho, os autores classificaram os diferentes níveis de poluição (limpo, muito leve, leve, moderado e pesado) utilizando técnicas de inteligência artificial (Máquinas de Vetor de Suporte, Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen e Naive Bayes) e identificaram através de indicadores, como acurácia, precisão, sensibilidade, $f1$ -score e matriz de confusão, que apesar de todas as técnicas de inteligência artificial apresentarem bons resultados, a técnica de mapas de Kohonen teve melhor desempenho.

No trabalho desenvolvido por Xavier (2017), foram analisados outros parâmetros da CF para classificar os isoladores quanto ao nível de poluição, quais sejam: pulsos da CF, componentes harmônicas e as características do centroide do sinal de corrente. Como resultado, foi constatado, por meio de uma rede neural artificial, que o parâmetro que apresentou melhor desempenho na classificação da poluição dos isoladores foi o que considerava as componentes harmônicas.

A análise das componentes harmônicas também foi utilizada por Esmieli et al. (2024), para avaliar a condição do isolador. Neste trabalho, buscou-se avaliar o efeito do envelhecimento assimétrico em isoladores, para diferentes condições de umidade e poluição, nas componentes harmônicas e no ângulo de fase da CF, o que caracteriza a contribuição do referido trabalho, uma vez que tal condição (envelhecimento assimétrico) não vinha sendo abordado na literatura. Com relação aos resultados, os autores constataram que o efeito da assimetria é não linear e esta não linearidade aumenta com o grau da poluição. Adicionalmente, foi constatado que o grau de envelhecimento afetava positivamente a amplitude da CF, da componente fundamental e da componente de 3ª ordem, contudo, afetava negativamente a componente de 5ª ordem.

A análise da CF no trabalho desenvolvido por Oliveira et al. (2009), se dá por meio da detecção de uma componente que os autores chamaram de componente iônica da CF, caracterizada por pulsos muito rápidos, sendo esta componente correlacionada com a ocorrência de DP em isoladores, como pode ser visto na Figura 4. Um aspecto importante relatado por Oliveira et al. (2009) está relacionado ao método de medição desta CF, em que no referido trabalho foi utilizado um sensor óptico para captura desta corrente, eliminando assim, interferências causadas pelo sinal da linha de alta tensão, como pode ocorrer em métodos de aquisição da CF utilizando transdutores resistivos por exemplo. Com isso, os autores classificaram a CF em três níveis diferentes, chamados de N1 (CF de baixa intensidade, 5 mA), N2 (CF não agressiva, 10 mA) e N3 (CF altamente agressiva, 20 mA), sendo que para este último nível (N3) é recomendada uma manutenção imediata no isolador.

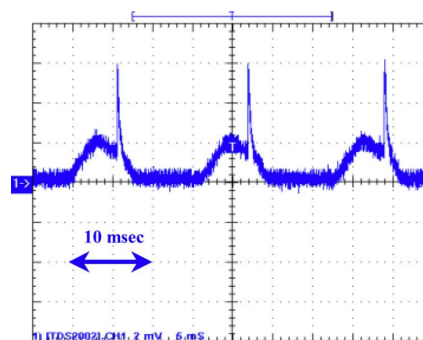


Figura 4. Forma de onda da corrente de fuga de isoladores de vidro. Fonte: Oliveira et al. (2009)

Na metodologia desenvolvida por Castillo-Sierra et al. (2021), utiliza-se da previsão de um modelo de CF ao longo do tempo, e um gráfico de controle para reduzir a quantidade de ciclos de lavagens desnecessárias, reduzindo assim as interrupções. Neste trabalho, constam como contribuições principais o uso de um gráfico de controle de Média Móvel Ponderada Exponencialmente (EWMA) para analisar os limites de CF e a previsão dos dias adequados para serem realizadas limpezas programadas nos isoladores, sempre mantendo a CF o mais baixo possível. No trabalho de Florentino et al. (2019), evidenciam-se 2 procedimentos e 4 tipos de abordagens práticas, quanto aos procedimentos são divididos em experimentais e computacionais. Os procedimentos experimentais incluem captação

de imagens UV de DP tipo corona e superficial, além de inspeção visual dos isoladores poliméricos, com ensaios sob alta tensão. Os procedimentos computacionais envolvem processamento digital de imagens e extração de atributos de DP, e quatro abordagens práticas são detalhadas, a saber: determinação de parâmetros de captação de câmera UV; correlação entre atributos de imagem e classificação visual; correção entre atributos de imagem e descargas corona; e, correlação entre atributos de imagem e defeitos de isoladores.

6. CRITÉRIOS DE INTERVENÇÃO E MEDIDAS MITIGADORAS

As condições climáticas comumente encontradas ao longo da linha e a caracterização físico-química do depósito podem impactar significativamente na escolha da medida mitigadora mais adequada, sua performance e custos associados. A aplicação dos métodos de medição da poluição nos permitem a classificação do seu nível (de Barros Bezerra et al., 2009), o que permite a escolha adequada do perfil do isolador, sendo que os fabricantes oferecem em seus catálogos diversas opções, em função do nível de poluição.

Após construída, por questões de dinâmica de ocupação humana, presença industrial nas adjacências ou mesmo alterações na dinâmica do clima (Berrêdo et al., 2020), pode haver a degradação da performance da linha, com consequente aumento do índice de desligamentos, implicando na adoção de medidas mitigatórias por parte das equipes de manutenção.

A primeira medida a ser tentada por essas equipes geralmente está associada a procedimentos de lavagem periódica, para a remoção mecânica da camada superficial de contaminação e pode ser realizada tanto com a linha em operação, quanto em um desligamento programado (George et al., 2018). Esta, embora efetiva, são dispendiosas, intensivas em mão de obra especializada e com efeito limitado ao longo do tempo, haja vista que seus efeitos perduram enquanto não ocorrer nova deposição de material contaminante.

Desse modo, formas não invasivas de medição do nível de poluição, associadas a melhorias no planejamento do cronograma do ciclo de lavagem, podem otimizar esse processo e levar a redução dos índices de desligamento e/ou economias financeiras associadas a uma postergação segura de uma manutenção agendada (Castillo-Sierra et al. (2021)). Outra abordagem é a troca de isoladores visando um aumento na distância de escoamento, o que exige a compatibilização da coordenação de isolamento.

Haja vista que um mecanismo importante de falha associada a poluição é o aumento da condutividade superficial por aumento da umidade, a troca de isoladores de vidro e cerâmica por uma contraparte de material polimérico, que possua a propriedade de hidrofobicidade pode amenizar esses efeitos. Importante destacar que em compostos de silicone, a hidrofobicidade é transferida para a camada superficial, de modo que equipamentos poluídos também se beneficiam deste aspecto.

Uma forma de manter a aplicação e características de equipamentos de invólucro de vidro (Mustafa et al. (2022)) e cerâmica, ao mesmo tempo que possam se beneficiar da

hidrofobicidade superficial é a aplicação de revestimentos (Suwarno and Basuki (2011); Suwarno and Wibowo (2012); Berrêdo et al. (2020)). Existem compostos que conferem essas características e podem ser aplicados em equipamentos já instalados de forma periódica.

Revestimentos também podem ter outras finalidades, como por exemplo o controle da contaminação biológica (De Mello et al. (2008)), assim como composições químicas, como materiais semicondutores (Prette et al. (2009)). Também é possível incorporar o processo de revestimento superficial durante a fabricação do equipamento, com a vantagem de dispensar reaplicações periódicas (m. George et al. (2014)).

Outras intervenções são possíveis, de forma a otimização da distribuição de \bar{E} no equipamento em condições de operação. A utilização e o correto posicionamento de anéis anti-corona e a inserção de micro-varistores no invólucro podem auxiliar nesta direção, de acordo com simulações computacionais (Rosli et al. (2022)). Outras frentes e possibilidades de mitigação vão surgindo à medida em que novos mecanismos de falha são investigados e descobertos como em Araújo et al. (2023).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou aspectos importantes da poluição em isoladores elétricos, destacando os métodos de medição e análise, e as metodologias adequadas de mitigação deste problema. Observou-se que existem poucos estudos específicos sobre a poluição na região Amazônica, contudo os estudos existentes em outras regiões tropicais podem ser correlacionados para efeito de análise.

Sobre os métodos de medição da condição de operação observou-se pouca diversidade, em contrapartida, há uma grande variedade de dispositivos disponíveis. A medição instalada individualmente no isolador é viável, porém demanda grandes investimentos técnicos e financeiros. Por outro lado, as medições à distancia tem a vantagem de serem deslocadas e utilizadas de acordo com a necessidade de monitoramento e manutenção, contudo são bem menos precisas por sofrer interferências de sinais gerados por outros equipamentos adjacentes. Os parâmetros mais usados na literatura para medição da condição dos isoladores são a CF e a aferição das descargas parciais.

Verificou-se que a modelagem de isoladores poluídos abrange diferentes métodos, os quais podem ser divididos em dois grupos: métodos numéricos e métodos analíticos. Constatou-se uma grande quantidade de trabalhos utilizando métodos numéricos, como o MDF, MEF entre outros, para calcular parâmetros como campo elétrico, distribuição de potencial elétrico e CF. Enquanto que os métodos analíticos fazem uso de equações para representar os arcos decorrentes da degradação de isoladores.

Com relação às análises das medições, muitos trabalhos utilizam parâmetros da CF, como o valor de pico e o valor eficaz da componente fundamental e componentes harmônicas, além do registro da forma de onda para identificar pulsos muito rápidos, correlacionados com a ocorrência de descargas parciais e, consequentemente, ao nível de poluição do isolador. Foi constatado também formas não invasivas de caracterização de isoladores poluídos, seja por

meio de dados provenientes de câmeras UV e de infravermelho ou através de dispositivos de ultrassom e antenas de alta frequência, ou até mesmo combinações destes sensores. É importante mencionar que, juntamente com esses sensores, o uso de técnicas de IA não lineares trazem bons resultados para diagnosticar isoladores poluídos, como é o caso do uso de RNAs.

Uma vez identificado o perfil da poluição, bem como a condição operativa de isoladores poluídos, parte-se para medidas mitigadoras, com o intuito de restabelecer o nível de isolamento necessário.

Foram apresentadas algumas medidas mitigadoras, como a lavagem de isoladores poluídos, até intervenções que otimizam a distribuição do campo elétrico nestes equipamentos. No que diz respeito à lavagem, tal solução se torna mais eficiente quando associada a um planejamento ótimo, porém, ainda assim trata-se de uma medida dispendiosa, pois requer mão de obra especializada e possui prazo de efetividade, devido a periodicidade.

Outra solução consiste na troca destes isoladores, investindo em materiais com tecnologia mais avançada com maior propriedade de hidrofobicidade ou revestindo-os com produtos que possuem tais propriedades.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2014). Seleção e dimensionamento de isoladores para alta tensão para uso sob condições de poluição - parte 1: Definições, informações e princípios gerais. Abnt iec/ts 60815 1:2014, Rio de Janeiro. URL <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=326592>.
- Ahmadi-Joneidi, I., Shayegani-Akmal, A.A., and Mohseni, H. (2017). Leakage current analysis of polymeric insulators under uniform and non-uniform pollution conditions. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(11), 2947–2957.
- ANEEL, R. (2018). Relatório de análise: desligamentos forçados do sistema de transmissão. agência nacional de energia elétrica. *Brasília: ANEEL*.
- Araújo, J.A., Oliveira, G.A.B., Garcia, M.A., Mendonça, N.M., da Silva, C.R.M., Garcia, P.A.N., and Badibanga, R.K. (2023). A case study of glass insulator pin failure in 500 kv transmission line. *Engineering Failure Analysis*, 153, 107582. doi:10.1016/J.ENGFAILANAL.2023.107582.
- Benguesmia, H., M'Ziou, N., and Boubakeur, A. (2018). Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method. *Diagnostyka*, 19, 41–52. doi:10.29354/diag/86414.
- Berrêdo, A.C.S., Coutinho, F.S., Silva, S.A., and Sousa, A.R. (2020). Case study for using monitoring composite insulators on overhead lines under natural pollution. URL <https://ofilsystems.com/articles>.
- Castillo-Sierra, R., Oviedo-Trespalacios, O., Candelo-Becerra, J.E., Soto, J.D., and Calle, M. (2021). A novel method for prediction of washing cycles of electrical insulators in high pollution environments. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 130. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107026.
- Chen, L., Lin, F., Chen, M., Huang, X., He, R., and Zheng, Y. (2022). Influence for ambient relative humidity and pollution on infrared detection of zero resistance insulators. *Frontiers in Energy Research*, 10. doi:10.3389/fenrg.2022.942408.
- de Barros Bezerra, J.M., Lima, A.M.N., Deep, G.S., and da Costa, E.G. (2009). An evaluation of alternative techniques for monitoring insulator pollution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24, 1773–1780. doi:10.1109/TPWRD.2009.2016628.
- De Mello, D.R. et al. (2008). Avaliação de equipamentos de subestações e linhas de transmissão contaminados com limo.
- De Mello, Darcy R., G.R.W.S. (2017). Avaliação de isoladores naturalmente poluídos retirados de linhas de transmissão.
- De Souza Pereira Gomes, G., Araujo, D.C.P., De Campos, A.F.M., Da Silva, F.D., Fehlberg, R.P., Sardinha, B.F., Rabelo, D.A., and Flauzino, R.A. (2020). An approach to condition assessment of high-voltage insulators by ultrasound and an ensemble of convolutional neural networks. In *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5. doi:10.1109/ISGT45199.2020.9087701.
- Dias, B.A., Costa, E.G., Diniz, L., Neto, A.F.L., Rocha, J.M.L., and Moreno, V.G. (2019). Análise comparativa do desempenho elétrico de isoladores tipo pino sob diferentes condições de poluição. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, (47), 160–171.
- Dinesh, M., Vasudev, N., Nambudri, P.V., Suryanarayana, K., Ravi, K., and Krishnan, V. (2008). Performance of composite insulators with and without bio contamination. In *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 124–127. IEEE.
- El-Zohri, E.H., Ziedan, H., and Procházka, R. (2015). A new proposed dynamic arc model for flashover performance of a non-uniform polluted insulator string under hvac stress. *Electric Power Systems Research*, 119, 278–286. doi:10.1016/j.epsr.2014.10.005.
- Esmaili, M., Khodsuz, M., and Nouri, H. (2024). Condition assessment criteria evaluation of asymmetric aged and fully aged silicone rubber insulators based on leakage current harmonics. *IET Science, Measurement & Technology*. doi:10.1049/smt.2.12176.
- Florentino, M.T.B. et al. (2019). Caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos usando atributos das descargas corona.
- Frizzo Stefenon, S., Policarpo Americo, J., Henrique Meyer, L., Bartnik Grebogi, R., and Nied, A. (2018). Analysis of the electric field in porcelain pin-type insulators via finite elements software. *IEEE Latin America Transactions*, 16(10), 2505–2512. doi:10.1109/TLA.2018.8795129.
- Gao, S., Jia, J., Huang, X., Liu, Y., Zhang, B., Zhang, Y., and Geng, J. (2022). Research on electric field detection of degraded insulators based on a sensitive detection method under complex operating conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12. doi:10.3390/app12115680.
- Garcia, R. and Santos Filho, N. (2003). Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 2: avaliação de desempenho. *Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré*, 2.
- George, J.M., Lepley, D., Brocard, E., Virlogeux, F., and Roude, S. (2018). Pollution mitigation solutions for

- overhead line insulators. URL <https://www.sediver.com/download-center>.
- Ghiassi, Z., Faghihi, F., Shayegani-Akmal, A.A., CheshmehBeigi, H.M., and Rouzbehi, K. (2021). Fem analysis of electric field distribution for polymeric insulator under different configuration of non-uniform pollution. *Electrical Engineering*, 103, 2799–2808. doi:10.1007/s00202-021-01252-2.
- He, H., Luo, D., Lee, W.J., Zhang, Z., Cao, Y., and Lu, T. (2019a). A contactless insulator contamination levels detecting method based on infrared images features and rbfnn. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2455–2463. doi:10.1109/TIA.2018.2889835.
- He, Z., Gao, F., Tu, Z., Zhang, Y., and Chen, H. (2019b). Analysis of natural contamination components and sources of insulators on ± 800 kv dc lines. *Electric Power Systems Research*, 167, 192–198. doi:10.1016/j.epr.2018.10.033.
- Ivanov, D.A., Sadykov, M.F., Yaroslavsky, D.A., Golenishchev-Kutuzov, A.V., and Galieva, T.G. (2021). Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies*, 14(18), 5670. doi:10.3390/en14185670.
- Leite, R.C., Leite, R.C., Menezes, F.M., and Corrêa, L.K. (2023). Assessment of leakage current on polymeric insulator using finite element analysis. *Authorea Preprints*. doi:10.36227/TECHRIV.19686543.V1. URL <https://www.authorea.com/doi/full/10.36227/techriv.19686543.v1?commit=dad142965ed9b7d8966d8b8597b7365a40d3fe35>.
- m. George, J., Prat, S., Lumb, C., Virlogeux, F., Gutman, I., Lundengard, J., and Marzinotto, M. (2014). Field experience and laboratory investigation of glass insulators having a factory-applied silicone rubber coating. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21, 2594–2601. doi:10.1109/TDEI.2014.004600.
- Mustafa, T.I.A.H., Meyer, L.H., Cabral, S.H.L., Almaguer, H.A.D., Puchale, L.H.B., Cereia, J.E.M., Vier, G.B., and Caye, A. (2022). Rtv coated glass insulators applied in high humidity areas to reduce the risk of transmission line outage. 1–6. IEEE. doi:10.1109/ICECCME55909.2022.9987949.
- Nader, M.V.P.D., Valus, M.G., Marsola, V.J., Moutinho, E.A., Junior, M.D.C.R., Claudio, N.G., and de Holanda, G.M. (2022). Metodologia de inteligência de dados para previsão de nível de poluição dos isoladores de uma rede de distribuição de energia / data intelligence methodology for predicting the pollution level of insulators in a power distribution network. *Brazilian Journal of Development*, 8, 13497–13518. doi:10.34117/bjdv8n2-334.
- Oliveira, S.C., Fontana, E., et al. (2009). Optical detection of partial discharges on insulator strings of high-voltage transmission lines. volume 58, 2328–2334. doi:10.1109/TIM.2009.2013924.
- Ouyang, X., Yin, F., Jia, Z., Yang, S., Wang, Y., Bai, H., Zhang, X., Li, Y., and Chen, H. (2019). Research of biological contamination and its effect on the properties of rtv-coated insulators. *Electric Power Systems Research*, 167, 138–149. doi:10.1016/j.epr.2018.10.025.
- Porfírio, D.M. et al. (2018). *O intemperismo tropical como agente de degradação de cadeias de isoladores de alta tensão em subestações na Amazônia Oriental: estudo de caso em Barcarena-PA e São Luís-MA*. Ph.D. thesis, Instituto De Geociências.
- Porfírio, D.M., M.L. and da Costa, M. (2018). Rainwater geochemistry inside the barcarena power station at the mouth of the tocantins river. *Environmental Technology*, 41(8), 981–996. doi:10.1080/09593330.2018.1516801. URL <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1516801>. Pmid: 30148424.
- Prette, A.L.G., Sglavo, V.M., Alarcon, O.E., and Fredel, M.C. (2009). *Application of Semiconductor Ceramic Glazes to High-Voltage Ceramic Insulators*, 33–37. doi:10.1002/9780470584293.ch4.
- Rosli, M.A.F., Sham, N.M.B., Kamarudin, M.S., Yousof, M.F.M., Jamail, N.A.M., and Rahman, R.A. (2022). The effectiveness of mitigation schemes on electric field intensity (stress control) for overhead line glass insulator. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 12–17. doi:10.18178/ijeetc.11.1.12-17.
- Semensato, L. and Silva, A. (2023). Método de inspeção e classificação de severidade da poluição nas cadeias de isoladores em linhas de transmissão de 230 kv e 500 kv através da intensidade do efeito corona. xix eriac.
- Silva, N.P. et al. (2022). Metodologia para classificação de nível de poluição de isoladores com base na medição da corrente de fuga utilizando inteligência artificial.
- Suwarno and Basuki, A. (2011). Mitigation of outdoor insulators failure using silicone coating. 1–5. IEEE. doi:10.1109/ICEEI.2011.6021533.
- Suwarno and Wibowo, A.B. (2012). Increasing the performances of various types outdoor insulators by using rtv silicone rubber coating. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 4, 608–619. doi:10.15676/ijeeci.2012.4.4.7.
- Tshubwana, R.P., Gomes, C., Nnachi, A.F., and Katun, M.M. (2020). Microbial growth on insulator material surfaces under different climate conditions - review paper. In *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 691–695. doi:10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236509.
- Werneck, M.M., dos Santos, D.M., de Carvalho, C.C., de Nazaré, F.V.B., and Allil, R.C.d.S.B. (2014). Detection and monitoring of leakage currents in power transmission insulators. *IEEE sensors journal*, 15(3), 1338–1346.
- Xavier, J.A.R. (2017). *Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais*. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Xia, G., Yang, S., Wei, X., Zhang, J., and Chu, J. (2016). Hydrophobicity and insulated resistance of composite insulators with biological contamination. In *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 1–4. doi:10.1109/ICHVE.2016.7800881.
- Zhang, D., Liu, J., Fengbo, T., Huang, X., Yang, C., and Zhang, Z. (2020). Research on non-contact pollution monitoring method of composite insulator based on space electric field. In *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 1–4. doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279905.