

Estudos sobre aplicações de Inteligência Artificial em disjuntores de média e alta tensão

Vinicius Faria Costa Mendanha
Universidade Federal de Goiás – Goiás

André Pereira Marques
Instituto Federal de Goiás – Goiás

Cacilda de Jesus Ribeiro
Universidade Federal de Goiás – Goiás

RESUMO

A Inteligência Artificial (IA) tem desempenhado importante aplicação ao contribuir em diversas aplicações de engenharias, incluindo-se a manutenção preventiva e a detecção de falhas em equipamentos elétricos de alta tensão. Dentre eles, destacam-se os disjuntores de média e de alta tensão, os quais são componentes estratégicos, utilizados não apenas em manobras, mas na proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos nos sistemas elétricos de potência. As falhas desses equipamentos podem levar a interrupções significativas no fornecimento de energia, causando, por vezes, grandes prejuízos econômicos e sociais, bem como riscos à segurança das instalações. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar diferentes estudos científicos sobre IA aplicada a disjuntores de média e alta tensão, visando as análises e as comparações entre eles. A justificativa desses estudos é evidenciada pela necessidade de se identificar precocemente as falhas, mecânicas e elétricas, minimizando tempos de inatividade não planejados e custos associados à manutenção corretiva desses equipamentos. A metodologia adotada é baseada em estudos científicos disponíveis com seleção e análise de casos sobre a aplicação de IA em diagnóstico de falhas incipientes de disjuntores de média e alta tensão. Os resultados evidenciam a eficiência da integração de algoritmos de IA. Eles apresentam diferentes métodos, como técnicas de processamento de sinais, por exemplo: Transformada *Wavelet* e Entropia de Energia de Decomposição em Modo Empírico Melhorado; Aprendizado de Máquina, a saber: *Principal Component Analysis* (PCA), *K-means*, Floresta Aleatória e *Support Vector Machine* (SVM); e Aprendizado Profundo, como: Rede *AlexNet* e *Autoencoder*, para extrair características relevantes dos sinais de vibração e tensão desses equipamentos. Logo, este trabalho destaca a importância da aplicação de Inteligência Artificial visando as inovações na área de Engenharia de Manutenção. Diante dos desafios e das perspectivas na área, propõem-se complementações com estudos que utilizem métodos que lidem bem com poucos dados e possam ser utilizados para monitoramento mais constante do estado de operação dos disjuntores de média e alta tensão. Além disso, essas ferramentas devem ser capazes de identificar quando o equipamento possui por intervenção e se o estado dele melhorou, bem como apresentar previsões de falhas em função do seu histórico, uma vez que a aplicação de técnicas de IA mostra-se promissora na detecção precoce de falhas, na manutenção preventiva e na melhoria da eficiência operacional desses importantes equipamentos para o sistema elétrico de potência.

Palavras-chave: Disjuntor de média e alta tensão, Inteligência Artificial, Manutenção, Processamento de sinais, Técnicas preditivas.

1 INTRODUÇÃO

A Inteligência Artificial (IA) tem desempenhado um importante e crescente papel em diversas



aplicações científicas, incluindo aplicações em equipamentos elétricos de alta tensão. Em particular, os disjuntores de média e alta tensão são componentes essenciais em sistemas de energia elétrica, responsáveis pela proteção das redes contra falhas decorrentes de surtos de corrente, tais como os de curtos-circuitos. A própria falha desse equipamento pode levar a interrupções significativas no fornecimento de energia, causando prejuízos econômicos e riscos à segurança. Tradicionalmente, a manutenção desses equipamentos tem sido realizada de forma preventiva ou corretiva, baseando-se em inspeções periódicas e no histórico de ocorrências com os disjuntores.

Com o avanço das ferramentas de IA, tal como o aprendizado profundo e de máquinas, novas oportunidades surgem para aprimorar a detecção de falhas incipientes em disjuntores de média e alta tensão. Esses métodos mais recentes podem analisar grandes volumes de dados provenientes de sensores e históricos de manutenção, identificando padrões e categorias. Assim, a manutenção preventiva baseada em IA pode, potencialmente, contribuir para a redução do tempo de inatividade dos disjuntores de média e alta tensão, minimizando custos operacionais e melhorando a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar estudos sobre a aplicação de inteligência artificial (IA) em disjuntores de média e de alta tensão, visando contextualizar as aplicações existentes na literatura, destacando os principais métodos, algoritmos, abordagens, desafios e as perspectivas da área de manutenção desses equipamentos. A motivação para este estudo é compreender como a IA pode ser aplicada na manutenção de disjuntores de média e alta tensão, o que é fundamental para avanços tecnológicos no setor de energia elétrica.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada baseou-se na revisão da literatura, por meio de análises de estudos sobre a aplicação de inteligência artificial (IA) em disjuntores de média e alta tensão, investigando e esclarecendo os mecanismos pelos quais as técnicas de IA podem identificar falhas incipientes nesses equipamentos, a fim de reunir os desenvolvimentos existentes sobre manutenção preventiva e identificar lacunas e complementações necessárias na área de pesquisa.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS DISJUNTORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Os disjuntores de média e alta tensão são ativos essenciais à operação segura e confiável dos sistemas elétricos. Esses equipamentos devem interromper surtos de correntes, em especial, as provenientes de curtos-circuitos, e cessar correntes de sobrecarga, bem como seccionar partes de circuitos para permitir trabalhos de manutenção, e ainda manobras de linhas de transmissão e chaveamentos de bancos de



capacitores e reatores [1-8]. Ao serem expostos a grandes esforços mecânicos e eletromagnéticos, podem sofrer degradação, levando à diminuição dos seus desempenhos. Eles são constituídos de três módulos principais [5]:

- **Câmara de extinção:** compartimento vedado que envolve os contatos elétricos, o meio extintor e isolante. É onde ocorre a extinção de arco elétrico, que se forma através dos gases e materiais ionizados entre os contatos já separados. Desse modo, o restabelecimento da condição dielétrica do meio isolante deve ocorrer o mais rápido possível.
- **Mecanismo de acionamento e acumulador de energia:** sistema mecânico composto por molas, transmissão mecânica, mecanismo pneumático ou hidráulico, ou ainda pneumo-hidráulico. Fornece a energia e a transmissão de movimento necessários para fechar e abrir os contatos, e podendo ser acionado tanto manualmente como por meio de atuadores elétricos.
- **Circuito de controle:** sistema elétrico, interligado com relés de proteção, de acionamento local e/ou remoto, responsável pelas ações de comando para as operações de fechamento e abertura dos contatos.
- Em relação ao meio de extinção, os disjuntores podem ser subdivididos em: pequeno e grande volume de óleo, ar comprimido, vácuo ou SF₆. Quanto ao mecanismo de acionamento: mecânico, pneumático ou hidráulico [1]. Quanto aos acumuladores de energia: mola ou pneumático.

5 MANUTENÇÃO DE DISJUNTORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

A manutenção de disjuntores de média e alta tensão visa prolongar a vida útil desses equipamentos e mantê-los em bom estado operativo a fim de reduzir a probabilidade de sua falha [9, 10]. De forma geral, as estratégias de manutenção podem ser classificadas em corretivas ou preventivas [11]. A segunda, devido ao seu impacto na confiabilidade e na vida útil dos disjuntores, pode reduzir os custos de falha e postergar o investimento para substituição de equipamentos antigos [12].

Os dados estatísticos em todo o mundo indicam que falhas mecânicas representam a maioria dos casos de falha em disjuntores de alta tensão, justificando práticas de manutenção preventiva nesses equipamentos [13-15], embora as revisões mecânicas periódicas sejam consideradas eficazes, apesar dos altos custos, representando grande dispêndio em mão de obra [16]. Assim, são necessárias manutenções baseadas em ações preventivas.

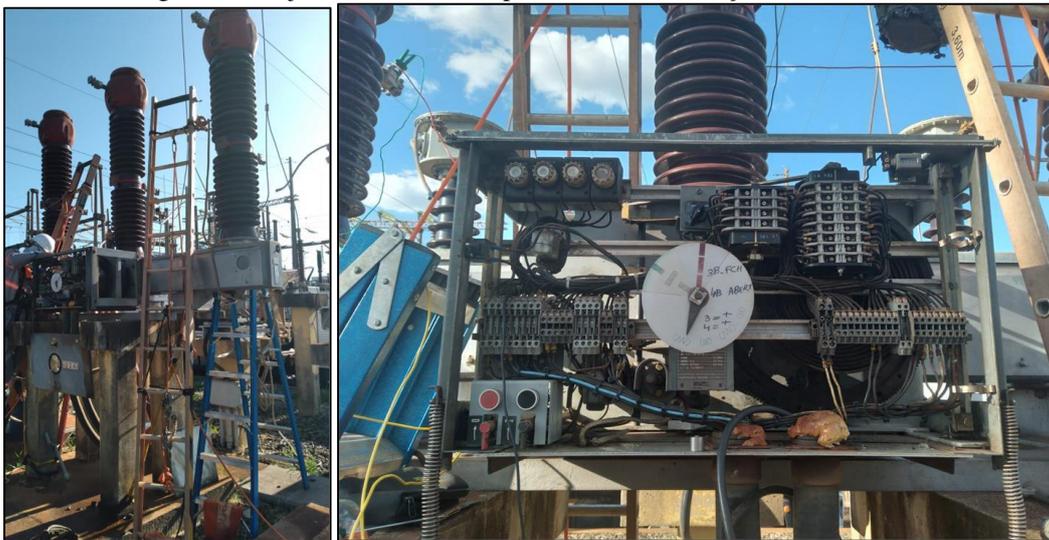
Nesse sentido, o conhecimento das condições de operação dos disjuntores é essencial para se tomar decisões sobre a manutenção [12, 17]. Assim, utiliza-se o conceito de índice de desempenho, sendo uma representação numérica do estado operativo do disjuntor de média e alta tensão, considerando-se dados específicos relacionados às técnicas preditivas, como [18, 19]:

- A. Ensaio elétrico de resistência de isolamento;

- B. Ensaios elétricos de resistência dos contatos;
- C. Ensaios de oscilografia (tempos de operação);
- D. Histórico de manutenção:
 - tempo decorrido desde a última manutenção;
 - número de manobras com corrente igual ou inferior à nominal; e
 - número de manobras em curto-circuito.
- E. Inspeções visuais e verificações locais; e
- F. Termografia.

Na Figura 1 [19], é ilustrada a manutenção em campo, de um disjuntor de tensão nominal de 69 kV, tipo pequeno volume de óleo (PVO), com acionamento a mola, corrente nominal de 2000 A e capacidade de interrupção nominal de 31,5 kA, com 40 anos de idade, que apresentou problemas mecânicos no seu mecanismo de comando.

Figura 1 – Disjuntor sendo aberto para fins de manutenção corretiva [19].



Fonte: Dias, Y.A. (2023) [19]

6 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA MANUTENÇÃO DE DISJUNTORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Existem diversos algoritmos de Inteligência Artificial utilizados na manutenção de disjuntores de média e alta tensão. Por exemplo, a perda de massa (erosão) dos contatos de disjuntores isolados a gás SF₆ poderia ser avaliada, propondo-se um modelo matemático para isso, em função de três parâmetros: corrente máxima de curto-circuito, tempo de duração do arco-elétrico e energia do fenômeno [20]. As fragilidades do ensaio mecânico de resistência de contato são discutidas, concluindo-se que ela é proporcional à velocidade de abertura [21]. Ademais, apresenta-se uma metodologia original para realização do ensaio

dinâmico de resistência de contato, utilizando, não somente, disjuntores isolados a gás SF₆, bem como a ar-comprimido [22, 23], enquanto pode-se avaliar a correlação entre vários níveis de degradação dos contatos e as formas de onda obtidas nos ensaios [24].

Outrossim, é possível utilizar métricas estatísticas para monitoramento do funcionamento de disjuntores de média e de alta tensão. A análise de variância para identificação de anomalias em disjuntores isolados a gás SF₆ é usada [25], enquanto, em [26], concluiu-se que os tempos de abertura e fechamento do equipamento obedecem à distribuição normal, permitindo a execução de testes de hipótese para identificação do desvio aceitável entre fases do disjuntor. Além disso, modelos multivariáveis são propostos [27, 28], utilizando Análise por Árvore de Decisão (FTA, do inglês *Fault Tree Analysis*), para avaliar a probabilidade de falha de disjuntores, e Cadeia de Markov, para construção do modelo de confiabilidade geral da subestação.

Ademais, propõe-se um método de ranqueamento baseado em regressões utilizando dados de temperatura e pressão do SF₆ [29], visando prever quando a pressão do disjuntor está próxima ao limite estabelecido pelo fabricante, criando uma priorização da manutenção. Outro aspecto abordado pelos métodos tradicionais é a capacidade de monitoramento dos tempos de abertura do disjuntor por meio de sistema radiométrico, a fim de determinar diversos parâmetros, como a duração e energia do arco elétrico [5, 30, 31].

Desse modo, a principal vantagem das ferramentas baseadas em IA é conseguir aplicar algoritmos de classificação multivariável, o que é uma atividade complexa. Como os disjuntores de média e alta tensão apresentam comportamento dependente da característica mecânica do ativo e, por consequência, do modelo e fabricante, essa tarefa se torna ainda mais onerosa [1, 5, 8, 13-15, 20, 32, 33]. Em face disso, o diagnóstico de falhas de disjuntores de média e alta tensão utiliza técnicas de IA, como: Floresta Aleatória (RF, do inglês *Random Forest*); Redes Neurais com Retropropagação (BPNN, do inglês *Back Propagation Neural Network*); Máquina de Aprendizado Extremo (ELM, do inglês *Extreme Learning Machine*); e Rede Neural com Regressão Generalizada (GRNN, do inglês *Generalized Regression Neural Network*) [31, 34-37].

Outro benefício dos métodos de diagnóstico baseados em IA é que eles fornecem uma solução rápida para automatizar o diagnóstico de disjuntores de média e alta tensão, ainda que a tecnologia seja aplicada remotamente. A partir da IA, modelos de diagnóstico são desenvolvidos, os quais aprendem com características relacionadas ao estado dos disjuntores de média e alta tensão, extraídas de vários sinais de monitoramento – como de corrente da bobina e da curva de deslocamento do contato e de vibração – para encontrar a correlação entre eles e a condição de operação dos equipamentos [27-31].

Nesse sentido, o monitoramento para diagnóstico de falhas destes disjuntores é essencial, a fim de proporcionar operação segura e confiável da rede elétrica [43-45]. Atualmente, o diagnóstico inclui, principalmente, três processos:

- A. Uso avançado de métodos de processamento de sinal para construir modelos que caracterizem a falhas nesses equipamentos, incluindo transformada de Fourier, transformada *wavelet*, decomposição em modo empírico e decomposição em modo variacional [34, 35, 46].
- B. Utilização do método de redução de dimensão para extrair parâmetros de características-chave. O método mais típico é o da Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*), o *autoencoder* e seus algoritmos aprimorados [46].
- C. O método de reconhecimento de padrões é usado para classificar as características das estruturas mencionadas. Os métodos mais populares são Máquinas de Vetores de Suporte (SVM, do inglês *Support Vector Machine*), Florestas Aleatórias (RF) e redes neurais artificiais [37, 40-42, 46].

7 PRINCIPAIS ALGORITMOS DE IA APLICADOS AOS ENSAIOS DE DISJUNTORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES

Os métodos de aprendizado profundo alcançaram bons resultados no diagnóstico de incipientes de disjuntores de média e alta tensão, com os recentes avanços em Inteligência Artificial. Além disso, um passo imperativo para a implementação de uma abordagem eficaz de avaliação de estados de operação é identificar os modos de falha e a origem das falhas ao longo do tempo [47]. Isso proporciona uma análise abrangente sobre as principais preocupações que merecem mais atenção e pesquisas adicionais para identificar sinais de diagnóstico eficazes.

Na literatura, estatísticas de falhas foram publicadas, considerando diversos dados históricos [12, 14, 48-52]. Em [49], por exemplo, apresenta-se um estudo extensivo de falhas de disjuntores de SF₆ e a óleo nos sistemas de transmissão suecos e finlandeses, incluindo 1.546 disjuntores com um histórico total de operação de 16.384 anos, concluindo-se que os disjuntores com maior frequência de operação, isto é, mais de 50 operações por ano, são mais vulneráveis a falhas.

Ademais, em [50], as falhas de 8.600 disjuntores de alta tensão (com tensões nominais superiores a 100 kV), incluindo os a óleo, a vácuo e SF₆, com cerca de 6800 falhas, foram investigadas para identificar a tendência da taxa de falhas e o tempo ideal de manutenção. Relatou-se que grande parte da origem das falhas está relacionada ao mecanismo de operação, alta tensão e circuitos secundários e auxiliares dos disjuntores. Além disso, foi analisado que o problema de envelhecimento pode não ser detectável até 15 anos de operação.

Logo, diversos ensaios de diagnóstico podem ser utilizados para avaliar a condição dos disjuntores em condições *offline/online*. Em relação à corrente da bobina, numerosos estudos têm abordado este sinal para identificar as características de diagnóstico adequadas, estabelecer uma relação entre falhas e essas características, e utilizar esse sinal em algoritmos de detecção de falhas [47].

Em [34, 53], a interação entre várias falhas resultantes de mau funcionamento na trava, tensão de

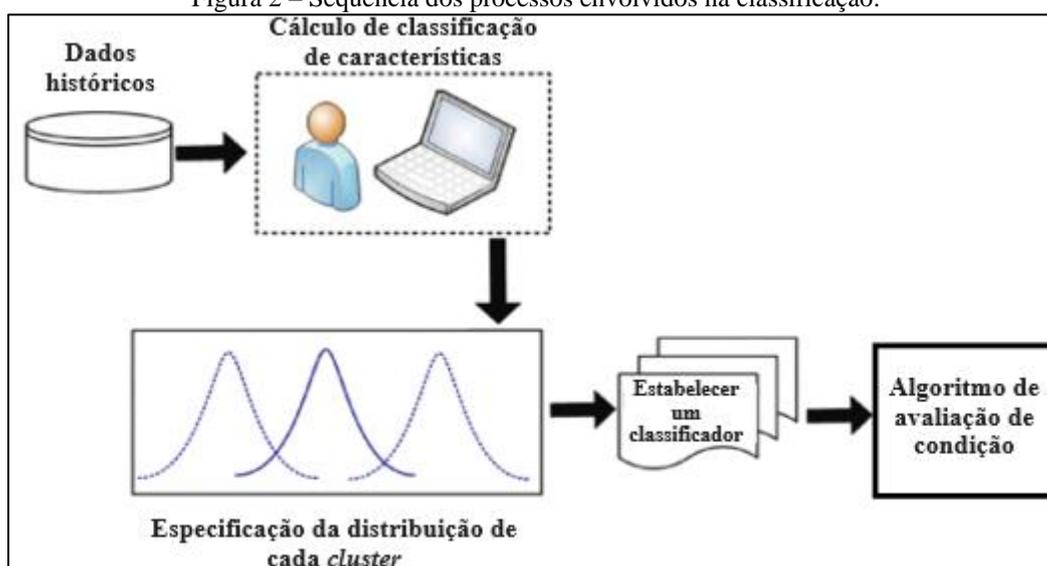
controle e bobina foi investigada. Enquanto que, em [15, 54], as características de diagnóstico apropriadas da corrente da bobina foram identificadas para aplicação na previsão de falhas. Esse sinal, juntamente com a curva de deslocamento, foi empregado para a detecção de falhas em disjuntores de alta tensão em [55].

Além disso, problemas de contatos degradados, bobina e fricção foram diagnosticados usando a corrente da bobina (CC) em [54, 56]. Em [57], utiliza-se o sinal de corrente da bobina para a detecção de envelhecimento dela, bloqueio do núcleo e falta de espaço para o deslocamento do núcleo. Mais do que isso, um dos desafios importantes no diagnóstico é a identificação do nível de limiar das características do estado normal (saudável) para o estado defeituoso [47], o que foi abordado em [15, 58], aplicando mineração de dados e abordagem probabilística. A Figura 2 [15] mostra a sequência dos processos envolvidos na classificação.

Para o deslocamento dos contatos no decorrer do tempo, outra metodologia aplicada utiliza a curva de deslocamento. Ela é capturada por meio de um transdutor e indica uma característica de tempo de duração de fechamento-abertura [47]. A velocidade de operação é calculada com base em dois pontos predefinidos na curva. Assim, a metodologia é aplicada para avaliação do tempo de operação dos disjuntores (teste de temporização), bem como para detecção de falhas no mecanismo de operação [34, 59, 60].

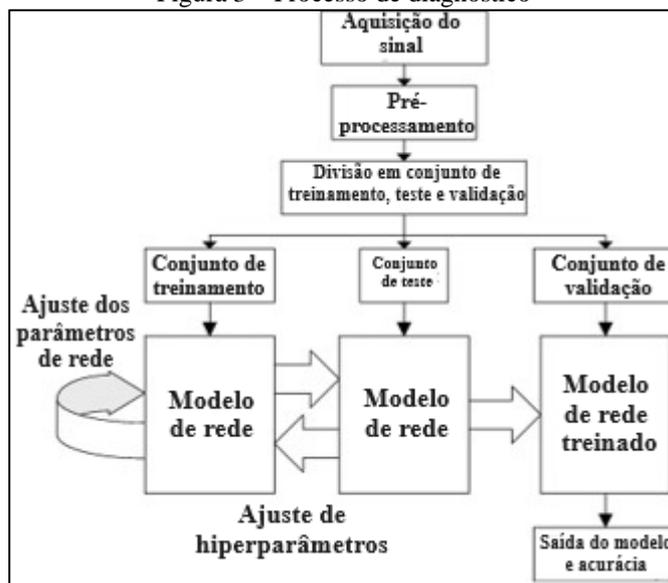
Em [61], uma nova *U-Net* com *CapsNet* é proposta para diagnóstico de falhas em disjuntores de alta tensão para resolver problemas com poucos dados, alcançando um diagnóstico robusto e de alta precisão de disjuntores de alta tensão de poucos disparos, conforme Figura 3 [61]. Os resultados experimentais mostram que, utilizando a arquitetura proposta, pode-se realizar, com rapidez e precisão, o diagnóstico de falhas incipientes de disjuntores de alta tensão, com uma precisão de 93,25%.

Figura 2 – Sequência dos processos envolvidos na classificação.



Fonte: Traduzido de RAZI-KAZEMI, A. A. et al (2015) [15].

Figura 3 – Processo de diagnóstico



Fonte: YE, X. et al (2022) [61]

Outrossim, com base nas amostras coletadas da Yunnan Power Grid, na China [62], um novo sistema de indicadores de desempenho é construído utilizando probabilidade bayesiana para medir a correlação entre os indicadores individuais e os indicadores abrangentes no mesmo nível de status, para pesar os indicadores individuais. As seguintes propriedades foram utilizadas: mecânicas, como velocidade e tempo de abertura dos contatos; corrente da bobina de abertura; de isolamento, por exemplo, densidade de gás SF6 e descargas parciais; e de desempenho elétrico, como resistência do circuito elétrico principal e desgaste elétrico relativo. O método proposto apresentou as seguintes vantagens [62]:

- A. Um sistema eficaz de indicadores de estimativa, construído pela extração de regras de associação de muitos dados reais de amostras operacionais;
- B. O cálculo do peso de todos os indicadores individuais baseado na maior confiança, o que ultrapassa o limite do número de amostras;
- C. Os pesos dos indicadores abrangentes ajustados e determinado por um *perceptron* adaptativo que pode refletir os diferentes efeitos da mesma falha em equipamentos em diferentes estados operacionais; e
- D. Com base nas pontuações calculadas de todas as estimativas dos índices de desempenho, pode-se diagnosticar a falha potencial do equipamento até certo ponto.

Além disso, salienta-se que determinar quando o disjuntor necessita de manutenção é um problema importante e não trivial, uma vez que esses equipamentos são utilizados por longos períodos. Assim, propõe-se em [63] o uso de técnicas de mineração de dados para prever a necessidade de manutenção. Nos dados correspondentes, uma classe (minoria, ou classe positiva) está significativamente menos representada que a

outra (maioria, ou classe negativa). A Tabela 1 [63] exhibe as variáveis descritivas utilizadas no trabalho.

Tabela 1 – Variáveis descritivas utilizadas para determinação do desempenho em [63]

Nome	Tipo
Câmara de isolamento	Real
Suporte de isolamento	Real
Resistência de contato	Real
Pressão de gás SF ₆	Real
Resistência das bobinas	Real
Número de operações	Inteira
Terminais principais	Nominal {1-10}
Porcelana	Nominal {1-10}
Compensador de temperatura	Nominal {1-10}
Gabinetes	Nominal {1-10}
Aterramento	Nominal {1-10}
Conexões	Nominal {1-10}
Controle geral	Nominal {1-10}
Criticidade operacional	Nominal {Alta, normal ou baixa}
Desgaste elétrico	Nominal {Alto, normal ou baixo}
Desgaste do disjuntor	Nominal {Alto, normal ou baixo}

Fonte: Traduzido de RAMENTOL, E. (2016) [63]

Em seguida, introduz-se um novo algoritmo de pré-processamento de aprendizagem desequilibrado, denominado SMOTE-FRST2T. Ele combina a Técnica de Sobreamostragem Minoritária Sintética (TSMS) com uma estratégia de seleção de instâncias baseada na teoria dos conjuntos aproximados *fuzzy*. A análise experimental mostra a obtenção de melhores resultados do que uma série de algoritmos de última geração.

Ainda utilizando lógica *fuzzy*, em [64], determina-se o cálculo da confiabilidade entre as incertezas, com o objetivo de classificar o grau de criticidade na manutenção dos disjuntores na iminência de problemas técnicos, realizado uma manutenção preventiva, comparando com o método já utilizado pela empresa. Os resultados, obtidos a partir do histórico de manutenção dos equipamentos, demonstram maior precisão da metodologia proposta em relação ao modelo apresentado pela concessionária.

Outrossim, são abordados casos reais em que desligamentos de disjuntores foram evitados a partir das análises das listas de eventos e oscilografias dos dispositivos eletrônicos inteligentes, que compõem o sistema de proteção das subestações da Eletronorte, no Pará [65]. A técnica de análise de dados permitiu que a empresa executasse a manutenção preventiva, se antecipando ao problema. A informação útil para a melhor tomada de decisão, bem como possível a redução significativa de perdas financeiras no processo de operação e manutenção do seu sistema elétrico, são vantagens da metodologia proposta. Analogamente, em [66], o comportamento dos sistemas de proteção foi avaliado, tratado e analisado por registros de oscilografia gerados durante a ocorrência de falhas, conforme Figura 4 [66]. A especificação efetuada permitiu concluir que o desenvolvimento de um sistema automático de aquisição e tratamento de oscilografia é um processo complexo, o qual, todavia, pode trazer benefícios para as concessionárias, não só em nível da manutenção dos sistemas de proteção, mas como auxílio ao reestabelecimento rápido do serviço de energia elétrica.

Figura 4 – Características de um registro de oscilografia



Fonte: adaptado de GUERRA, M. M (2014) [66]

Desse modo, os métodos inteligentes de detecção de falhas e algoritmos de estimativa de vida são estabelecidos com base em dados e curvas de referência. Os passos para a detecção de falhas compreendem a obtenção das características de diagnóstico e a correlação entre essas características e os casos defeituosos e saudáveis, a fim de fornecer um algoritmo de avaliação de condição ou, um passo à frente, uma abordagem de previsão de falhas.

Além disso, de forma geral, esses métodos lidam extensivamente com sinais de vibração. Portanto, as características das formas de onda de sinais resultantes de várias falhas podem existir em diferentes componentes de frequência. A consideração do ruído na avaliação em tempo real aumenta a complexidade do processamento do sinal de vibração.

8 SINAL DE VIBRAÇÃO DE DISJUNTORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Para análise do sinal de vibração de disjuntores de média e alta tensão, o algoritmo de *Principal Component Analysis* (PCA) é utilizado, sendo uma técnica de redução de dimensão, que consiste em transformar um conjunto inicial de d variáveis correlacionadas em um novo, composto por variáveis não correlacionadas [1, 38, 39, 43, 44]. O processo produz um conjunto de saída com ordem decrescente de importância, de modo que o primeiro vetor representa a maior parte da variância. Assim, é possível realizar uma redução da dimensão sem gerar perda da informação. A Tabela 2 [1] representa o passo a passo para implementação do algoritmo.

Tabela 2 – Algoritmo de *Principal Component Analysis* (PCA)

Passo	Descrição
1	Obter base de dados (X) com n amostras e d dimensões
2	Calcular a média de cada vetor (amostra)
3	Calcular a matriz de covariância da base de dados
4	Calcular os autovalores e os autovetores da matriz de covariância
5	Ordenar os autovetores pelos autovalores em ordem decrescente
6	Transformar a base de dados original utilizando os autovetores escolhidos

Fonte: PEREIRA, L. D. N. (2023) [1]

Outro algoritmo utilizado é o *k-means*, representado na Tabela 3 [1].

Tabela 3 – Algoritmo básico de *k-means*

Passo	Descrição
1	Entrada: o número de <i>clusters</i> k e uma base de n amostras
2	Escolher k pontos da base de dados como centroides iniciais
3	Alocar cada amostra n ao centroide mais próximo
4	Calcular a distância de cada amostra n até o centroide mais próximo
5	Recalcular o centroide cada <i>cluster</i>
6	Repetir o processo até que os centroides converjam

Fonte: PEREIRA, L. D. N. (2023) [1]

A principal aplicação do *k-means* é para distinguir dados, o que torna possível seu uso para detecção de anomalias [1, 34]. Trata-se de um método iterativo baseado na distância para segregação de um conjunto de dados. Por outro lado, conforme o número de variáveis de entrada aumenta, o algoritmo converge para um valor constante, sendo necessário, portanto, um pré-tratamento para redução da dimensão [1].

A análise dos sinais de vibração gerados durante as operações de fechamento ou abertura do disjuntor mostra que é possível obter informações detalhadas sobre o mecanismo de operação, de transmissão e de interrupção [67]. Devido ao sistema mecânico muito complicado e ao tempo de operação extremamente curto do disjuntor, o sinal de vibração é não linear e não estacionário, o que dificulta a caracterização do equipamento para diagnóstico de falhas. Assim, a técnica dinâmica não linear caótica é proposta, oferecendo uma nova forma de estudar os sinais de vibração complexos [67]. Além disso, a análise de séries temporais não lineares é aplicada, com o objetivo de detectar anomalias mecânicas nos equipamentos.

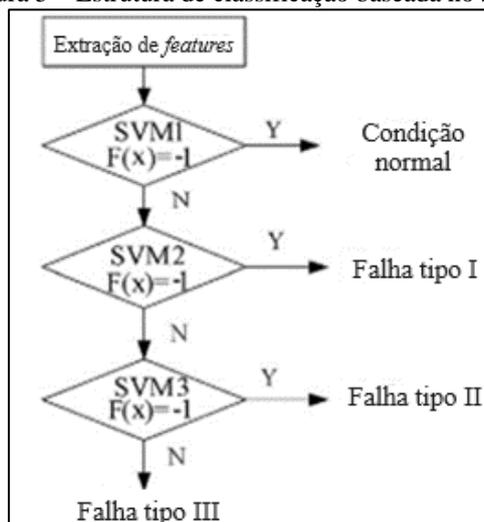
Outra abordagem utiliza decomposição de pacotes de *wavelet* e SVM [68]. Desse modo, um modelo de máquina de vetores de suporte com otimização por enxame de partículas é desenvolvido. A validade desse modelo de diagnóstico de falhas é determinada com um conjunto de dados reais do experimento de operação.

Adicionalmente, para garantir que os sinais gerados pelos modelos sejam idênticos aos reais, um algoritmo de otimização estocástica é proposto [69]. Com base nos dados produzidos pelos modelos otimizados, são propostos dois métodos: um baseado em correspondência rápida de modelos, que adota o algoritmo de agrupamento *k-means* para agrupar os dados e formar uma biblioteca de modelos e o outro combina uma rede profunda e um classificador *Softmax*, para extrair não apenas informações de alto nível dos sinais característicos, mas evitar o impacto negativo da grande dimensão nos resultados de classificação [69]. Nos estudos de simulação, os dois métodos são testados em vários cenários e o último mostra desempenho superior em relação ao primeiro.

Outro método proposto é baseado na entropia de energia de decomposição em modo empírico melhorado (EMD) e SVM multiclasse (MSVM) para diagnosticar falhas em disjuntores de alta tensão [70]. Uma nova classificação multicamadas de SVM, denominada abordagem de algoritmo “um contra os outros”, é proposta e aplicado ao diagnóstico de falhas de máquinas de disjuntores de alta tensão. Comparado com a rede de retropropagação (BPN), os resultados do teste do MSVM demonstram que a

aplicação de entropia de energia EMD melhorada aos sinais de vibração é superior àquela com base na análise de pacotes *wavelet* (WPT). Logo, estima-se o tipo de falha em condições de máquinas de alta tensão com precisão e rapidez [70]. Em seguida, com base no princípio darwiniano da sobrevivência do mais apto, o algoritmo genético (GA) obtém a solução ótima após uma série de computações iterativas e busca por uma melhor combinação dos parâmetros do kernel do SVM. O esquema de classificação proposto é mostrado na Figura 5 [70].

Figura 5 – Estrutura de classificação baseada no SVM



Fonte: Traduzido de HUANG, J.; HU, X.; GENG, X (2011) [70]

Outra abordagem, baseando-se na análise tempo-frequência dos campos elétricos transitórios (*E-fields*) radiados devido às operações de comutação fora do invólucro (campos elétricos transitórios de comutação), é apresentada em [71]. Com base na comparação e análise das principais características, os STEFs podem refletir os estados de operação e servir como indicador do defeito de isolamento precoce dos disjuntores de circuito de alta tensão. O método de detecção de defeitos proposto foi validado experimentalmente, aproveitando ao máximo a alta taxa de mudança da corrente induzida no invólucro do disjuntor, que por si só é um sinal fraco e difícil de capturar pelos meios tradicionalmente adotados. Esse método pode ser ainda mais uma referência útil para o diagnóstico de defeitos ou falhas nos equipamentos de comutação em operação.

Adicionalmente, desenvolve-se uma metodologia para utilizar o sinal de vibração do sistema operacional dos disjuntores de alta tensão, pela coleta das amplitudes de sinais de vibração normais, segmentados por uma escala de tempo [72]. Por meio do aprendizado em conjunto, características podem ser extraídas de cada parte do sinal dividido e utilizadas para construir um vetor, a partir de RG [72]. Em seguida, a seleção sequencial para frente (SFS) é aplicada para determinar o subconjunto ótimo, enquanto o Critério de Fisher Regularizado (RFC) é usado para analisar a capacidade de classificação [72]. Por fim, os

tipos de falha conhecidos são identificados usando RF, e os resultados de identificação são relacionados a um tipo de falha específico.

Novas abordagens utilizam de decomposição de pacotes *wavelet* e no RF [73]. O processo de diagnóstico de falhas de disjuntores de alta tensão com base em sinais de vibração inclui três partes: aquisição de dados sob falhas variáveis, extração de características usando a transformada de pacotes de wavelet (WPT) para análise tempo-frequência e modelo de identificação ótimo baseado RF [73]. Os resultados do experimento comparativo mostram que a precisão de classificação do método proposto com o espaço de características original alcançou 93,33% e chegou a 95,56% com vetor de características de entrada do classificador otimizado [73].

Em relação à redução de ruídos, o *autoencoder* empilhado é utilizado para realizar extração automática de características e classificação de reconhecimento de padrões nos dados pré-processados [74]. À medida que o número de amostras aumenta, a precisão de reconhecimento do *autoencoder* empilhado para redução de ruído supera o método tradicional.

Em [75], a avaliação e diagnóstico da gravidade de falhas mecânicas em disjuntores de 12 kV é estudada. Uma abordagem de diagnóstico baseada em aprendizado profundo é apresentada para superar as deficiências dos modelos de diagnóstico tradicionais [75]. As falhas simples e compostas são diagnosticadas com alta taxa de detecção e uma taxa de erro baixa, pois o método proposto é puramente baseado em dados e implementado diretamente utilizando apenas imagens de tempo-frequência dos dados brutos de vibração [75]. A validação é conduzida em um painel de comutação de 12 kV com disjuntor dentro, demonstrando a eficácia da abordagem proposta [75]. A arquitetura *AlexNet* é adotada como o modelo de diagnóstico.

Outro método de diagnóstico de falhas mecânicas para disjuntores de alta tensão é por meio da extração de características híbridas e da máquina de aprendizado extremo integrada (IELM) [76]. Primeiramente, a decomposição completa por modo empírico de conjunto com ruído adaptativo (CEEMDAN) é utilizada para decompor o sinal de vibração e obter funções de modo intrínseco (IMF) [76]. Em seguida, a reconstrução de subfaixas de cada componente IMF de ordem é realizada combinando a transformada de Hilbert e o filtro passa-banda para obter a matriz tempo-frequência [76]. As vantagens do esquema proposto são: em combinação com filtragem passa-banda, pode eliminar o *aliasing* modal, reduzir o número de adições de ruído auxiliar e melhorar a eficiência da decomposição [76].

Como desafio, quando a quantidade de dados diminui, o desempenho do diagnóstico de falhas cai severamente. Para resolver esses problemas, propõe-se um método de aprendizado de transferência de poucas amostras (FSTL) com mecanismo de atenção (AM) para realizar o diagnóstico de falhas mecânicas em disjuntores de alta tensão [77]. Os resultados experimentais mostram que o método proposto pode alcançar um diagnóstico de falhas altamente preciso e robusto com poucas amostras no local [77].

Por fim, um algoritmo de avaliação de condição baseado no modelo de arco do disjuntor de alta

tensão é desenvolvido. A tensão de arco iniciada após a operação do disjuntor contém informações vitais sobre a condição do mecanismo do equipamento. Após o episódio de arco, a tensão gerada inclui duas seções significativas [78]. Ambos são caracterizados de acordo com o mecanismo operacional do disjuntor. Portanto, a condição operacional do equipamento pode ser bem monitorada através da análise da tensão gerada através dele devido à operação de abertura dentro de um algoritmo de monitoramento de condição em tempo real. A Tabela 4 [47] apresenta as várias aplicações de IA em disjuntores de média e alta tensão.

Tabela 4 – Inteligência Artificial em disjuntores de média e alta tensão

Objeto	Métodos
Vibração	Entropia de energia [70], <i>Autoencoder</i> [74] e <i>AlexNet</i> [75]
Vibração e corrente da bobina	Pacote <i>wavelet</i> e <i>multi-mapping</i> [57]
Predição usando curva de deslocamento	Interação de vários modelos [32]
Curva de deslocamento e contato auxiliar	Sistema de Inferência <i>Neuro-fuzzy</i> [59]
Corrente da bobina	Agrupamento Hierárquico Aglomerativo e Mineração de Dados [15]
Curva de deslocamento e corrente da bobina	Rede neural e SVM [55]

Fonte: adaptado de RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K. (2021) [47]

Logo, as aplicações de IA em disjuntores de média e alta tensão representam inovações significativas na área de engenharia elétrica, pois são incorporados métodos avançados, relacionados ao aprendizado de máquina e à análise preditiva. Dessa maneira, a integração da IA a esses equipamentos possui potencial de melhorar a confiabilidade e as práticas de manutenção preventiva nesses equipamentos.

9 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os estudos sobre a aplicação de inteligência artificial em disjuntores de média e alta tensão, com as principais técnicas preditivas, o índice de desempenho, e de maneira geral, constatou-se que os métodos de aprendizado profundo têm alcançado resultados promissores no diagnóstico de falhas incipientes em disjuntores de média e alta tensão, beneficiando-se dos recentes avanços em IA. Assim, a identificação dos modos e origens das falhas ao longo do tempo se mostra essencial para implementar uma abordagem eficaz de avaliação dos estados de operação desses equipamentos.

Os estudos indicaram que os disjuntores com maior frequência de operação são mais vulneráveis a falhas, sendo que diversos ensaios de diagnóstico são utilizados para avaliar a condição deles, como a corrente da bobina e a curva de deslocamento. Outras abordagens utilizaram algoritmos, como *U-Net* com *CapsNet*, probabilidade bayesiana e lógica *fuzzy*, proporcionando altas taxas de sucesso. Ademais, técnicas de mineração de dados foram utilizadas para prever a necessidade de manutenção, lidando com a representação desigual de classes nos dados. Também, a análise de eventos e oscilografias foram úteis na manutenção preventiva e redução de perdas financeiras das concessionárias de energia elétrica.

A análise de sinais de vibração se mostrou bastante utilizada em IA aplicada a disjuntores de média



e alta tensão, para obter informações precisas sobre o mecanismo de operação dos disjuntores. Alguns algoritmos, como *Principal Component Analysis* (PCA), *k-means*, decomposição de pacotes de wavelet e SVM foram empregados para caracterizar e diagnosticar falhas. Além disso, modelos de aprendizado profundo, como o *autoencoder* empilhado e a arquitetura *AlexNet*, foram utilizados para classificação e redução de ruído nos dados.

Diante das análises destacam-se como limitações, a disponibilidade restrita de monitoramento e de informações sobre os diagnósticos e as manutenções nos disjuntores reais, para aplicação dos recursos de tratamento de dados, com um número significativos de amostras e de técnicas preditivas, otimizando e proporcionando uma validação precisa com a aplicação de IA.

Desta forma, conclui-se a contribuição deste trabalho em apresentar os estudos existentes sobre estes equipamentos e destacar a importância da aplicação de inteligência artificial visando as inovações na área de Engenharia de Manutenção. Portanto, diante dos desafios e das perspectivas na área, propõem-se complementações com estudos que utilizem métodos que lidem bem com poucos dados e possam ser utilizados para monitoramento mais constante do estado de operação dos disjuntores de média e alta tensão. Além disso, essas ferramentas devem ser capazes de identificar quando o equipamento possui por intervenção e se o estado dele melhorou, isto é, se houve efetividade na ação de manutenção, bem como apresentar previsões de falhas futuras em função do seu histórico, uma vez que a aplicação de técnicas de IA mostra-se promissora na detecção precoce de falhas, na manutenção preventiva e na melhoria da eficiência operacional destes importantes equipamentos para o sistema elétrico de potência.

10 AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia da Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), à Empresa APMarques Consultoria e Capacitação em Engenharia Elétrica e ao Instituto Federal de Goiás pelas colaborações.



REFERÊNCIAS

- [1] PEREIRA, L. D. N. Avaliação da degradação de disjuntores de alta tensão por meio de técnicas de machine learning. Mestrado em Sistemas de Potência, São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 abr. 2023.
- [2] CELG D DISTRIBUIÇÃO S.A. Norma Técnica CELG-D: NTC-45 Disjuntor de Alta Tensão Especificação. DT – SETOR DE NORMATIZAÇÃO TÉCNICA, 2014. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/one-hub-brasil---2018/nomas-t%C3%A9cnicas-gois/normas-t%C3%A9cnicas/NTC45.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2024
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. IEC 62271-100: Equipamentos de alta-tensão Parte 100: Disjuntores de alta-tensão de corrente alternada. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?Q=L1ZQVUN5WEZ4emZCM2dZWjlQK2Z2ZHZncyt2STZ4WEJKdzlxdjU1MGJETT0=>>>. Acesso em: 13 jun. 2024
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. IEC 62271-102: Manobra e comando de alta tensão. 2022. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=L1ZQVUN5WEZ4emQ0NG5FQVI5b3NjcTdkcnBuSllxOEdXNFN0SWFITEV4OD0=&Req=>>>. Acesso em: 13 jun. 2024
- [5] OLIVEIRA, A. C. de. Método de monitoramento radiométrico para de disjuntores de alta tensão. Tese de Doutorado, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- [6] IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers, 2018.
- [7] IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. IEEE Guide for Investigation, Analysis, and Reporting of Power Circuit Breaker Failures, 2011.
- [8] YAN, J.; WANG, Y. High-voltage Circuit Breaker Intelligent Diagnosis Technology for Mechanical Faults under Power Internet of Things Context. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Anais... Em: 2020 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 6 set. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9279574/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [9] ENDRENYI, J. et al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, n. 4, p. 638–646, nov. 2001.
- [10] ENDRENYI, J.; ANDERS, G. J.; LEITE DA SILVA, A. M. Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on reliability. An application [to power systems]. IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, n. 2, p. 576–583, maio 1998.
- [11] BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. Reliability evaluation of engineering systems. Plenum Press, 1992.
- [12] ABBASGHORBANI, M.; RAJABI MASHHADI, H.; DAMCHI, Y. Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 8, n. 9, p. 1583–1590, set. 2014.
- [13] CHEN, L.; WAN, S.; DOU, L. Improving Diagnostic Performance of High-Voltage Circuit Breakers on Imbalanced Data Using an Oversampling Method. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 37, n. 4, p. 2704–2716, ago. 2022.



- [14] JANSSEN, A.; MAKAREINIS, D.; SOLVER, C.-E. International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 808–814, abr. 2014.
- [15] RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Data Mining of Online Diagnosed Waveforms for Probabilistic Condition Assessment of SF6 Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 3, p. 1354–1362, jun. 2015.
- [16] RAZI-KAZEMI, A. A.; LEHTONEN, M. Aging failure model of circuit breakers equipped with condition monitoring systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 27, n. 12, dez. 2017.
- [17] SOUSA, H. F. et al. Analysis of alternative parameters of dynamic resistance measurement in high voltage circuit breakers. *High Voltage*, v. 4, n. 3, p. 197–202, set. 2019.
- [18] AMERICAN NATIONAL STANDARD. Standard For Maintenance Testing Specifications For Electrical Power Distribution Equipment And Systems, 2011.
- [19] DIAS, Y. A. Método para previsão dos índices de desempenho de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante e de disjuntores de média e alta tensão. Tese (Doutorado), Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2023.
- [20] MOHAMMADHOSEIN, M. et al. Online Assessment of Contact Erosion in High Voltage Gas Circuit Breakers Based on Different Physical Quantities. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 2, p. 580–587, abr. 2019.
- [21] LIU, Y. et al. Research on impact of opening velocity in DRM tests of SF6 high voltage circuit breakers. 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Anais... Em: 2017 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC POWER EQUIPMENT - SWITCHING TECHNOLOGY (ICEPE-ST). Xi'an: IEEE, out. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8188793/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [22] LANDRY, M.; TURCOTTE, O.; BRIKCI, F. A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 2, p. 710–716, abr. 2008.
- [23] STANISIC, Z. Method for static and dynamic resistance measurements of HV circuit breaker. 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Anais... In: 2011 2ND IEEE PES INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON “INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES” (ISGT EUROPE). Manchester, United Kingdom: IEEE, dez. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6162618/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [24] KHODDAM, M.; SADEH, J.; POURMOHAMADIYAN, P. Performance Evaluation of Circuit Breaker Electrical Contact Based on Dynamic Resistance Signature and Using Health Index. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 6, n. 10, p. 1505–1512, out. 2016.
- [25] BOKORO, P.; MALANDALA, K. Condition assessment of SF6 circuit breakers using analysis of variance (ANOVA). 2017 IEEE AFRICON. Anais... In: 2017 IEEE AFRICON. Cape Town: IEEE, set. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8095682/>>. Acesso em: 6 maio. 2024



- [26] MABUNDA, N.; BOKORO, P.; NICOLAE, D. Statistical analysis of operating times of high voltage SF6 circuit breakers. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Anais... In: 2016 IEEE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON
- [27] GUO, Z. et al. Reliable life calculation of circuit breaker based on FTA and reliability function. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Anais... In: 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION (ICHVE). Chengdu, China: IEEE, set. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7800592/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [28] ZHONG, J. et al. Incorporating a Condition Monitoring Based Aging Failure Model of a Circuit Breaker in Substation Reliability Assessment. IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 6, p. 3407–3415, nov. 2015.
- [29] RUDD, S. E. et al. Circuit breaker prognostics using SF6 data. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Anais... In: 2011 IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. San Diego, CA: IEEE, jul. 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6039599/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [30] MEIER, S. D.; MOORE, P. J.; COVENTRY, P. F. Radiometric Timing of High-Voltage Circuit-Breaker Opening Operations. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 3, p. 1411–1417, jul. 2011.
- [31] OLIVEIRA, A. C. de et al. Radiometric Monitoring Technique for High-Voltage Circuit Breakers. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 34, n. 4, p. 1656–1665, ago. 2019.
- [32] RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K.; NILCHI, R. A Probabilistic Model-Aided Failure Prediction Approach for Spring-Type Operating Mechanism of High-Voltage Circuit Breakers. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 34, n. 4, p. 1280–1290, ago. 2019.
- [33] DEHGHANIAN, P.; GUAN, Y.; KEZUNOVIC, M. Real-Time Life-Cycle Assessment of High-Voltage Circuit Breakers for Maintenance Using Online Condition Monitoring Data. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 55, n. 2, p. 1135–1146, mar. 2019.
- [34] RUDSARI, F. N.; RAZI-KAZEMI, A. A.; SHOOREHDELI, M. A. Fault Analysis of High-Voltage Circuit Breakers Based on Coil Current and Contact Travel Waveforms Through Modified SVM Classifier. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 34, n. 4, p. 1608–1618, ago. 2019.
- [35] CHANG, B. et al. Review of different fault detection methods and their impact on pre-emptive VSC-HVDC dc protection performance. High Voltage, v. 2, n. 4, p. 211–219, dez. 2017.
- [36] MA, S. et al. High-Voltage Circuit Breaker Fault Diagnosis Using a Hybrid Feature Transformation Approach Based on Random Forest and Stacked Autoencoder. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 66, n. 12, p. 9777–9788, dez. 2019.
- [37] LU, Y.; LI, Y. A novel fault diagnosis method for circuit breakers based on optimized affinity propagation clustering. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 118, p. 105651, jun. 2020.
- [38] CHATFIELD, A. C. C. Introduction to Multivariate Analysis. New York City: Chapman & Hall, 1980.



- [39] HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, v. 24, n. 6, p. 417–441, set. 1933.
- [40] PAN, Y. et al. An Approach for HVCB Mechanical Fault Diagnosis Based on a Deep Belief Network and a Transfer Learning Strategy. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, v. 14, n. 1, p. 407–419, jan. 2019.
- [41] YANG, Q. et al. Vibration Signature Extraction of High-Voltage Circuit Breaker by Frequency and Chaotic Analysis. *IEEE Access*, v. 7, p. 80884–80892, 2019.
- [42] YANG, Q. et al. Condition Evaluation for Opening Damper of Spring Operated High-Voltage Circuit Breaker Using Vibration Time-Frequency Image. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 18, p. 8116–8126, 15 set. 2019.
- [43] PEARSON, K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 2, n. 11, p. 559–572, nov. 1901.
- [44] ANAPARTHI, K. K. et al. Coherency Identification in Power Systems Through Principal Component Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1658–1660, ago. 2005.
- [45] WANG, Z.; ZHOU, Y.; LI, G. Anomaly Detection by Using Streaming K-Means and Batch K-Means. 2020 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA). *Anais... In: 2020 5TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA ANALYTICS (ICBDA)*. Xiamen, China: IEEE, maio 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9101212/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- [46] KHALYASMAA, A. I.; SENYUK, M. D.; EROSHENKO, S. A. High-Voltage Circuit Breakers Technical State Patterns Recognition Based on Machine Learning Methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1747–1756, ago. 2019.
- [47] RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K. Condition Monitoring of High Voltage Circuit Breakers: Past to Future. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 36, n. 2, p. 740–750, abr. 2021.
- [48] CARVALHO A. et al. Final Report of the 2004 – 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. *Electra (Paris)*, 2014. Disponível em: <<https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-casopis/187052>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- [49] LINDQUIST, T. M.; BERTLING, L.; ERIKSSON, R. Circuit breaker failure data and reliability modelling. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 2, n. 6, p. 813, 2008.
- [50] CIGRE. Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance. *Transmission & distribution equipment (A3)*, 2004. Disponível em: <<https://www.e-cigre.org/publications/detail/a3-305-2004-evaluation-of-failure-data-of-hv-circuit-breakers-for-condition-based-maintenance.html>>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- [51] CIGRE. The first international enquiry on circuit-breaker failures and defects in service. *Electra (Paris)*, 1984. Disponível em: <<https://www.e-cigre.org/publications/detail/elt-079-1-the-first-international-enquiry-on-circuit-breaker-failures-and-defects-in-service.html>>. Acesso em: 18 jun. 2024.



- [52] CIGRE. Final report of the second international enquiry on high voltage circuit-breaker failures and defects in service. *Electra* (Paris), 1994. Disponível em: <<https://www.e-cigre.org/publications/detail/083-final-report-of-the-2nd-international-enquiry-on-hv-circuit-breaker-failures-and-defects-in-service.html>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- [53] RUSEK, B. et al. Timings of high voltage circuit-breaker. *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 12, p. 2011–2016, dez. 2008.
- [54] RAZI-KAZEMI, A. A. Circuit breaker condition assessment through a fuzzy-probabilistic analysis of actuating coil's current. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 10, n. 1, p. 48–56, jan. 2016.
- [55] RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Circuit-Breaker Automated Failure Tracking Based on Coil Current Signature. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 1, p. 283–290, fev. 2014.
- [56] WAN, S.; CHEN, L. Fault Diagnosis of High-Voltage Circuit Breakers Using Mechanism Action Time and Hybrid Classifier. *IEEE Access*, v. 7, p. 85146–85157, 2019.
- [57] SCHOOL OF ELECTRIC POWER ENGINEERING. Multi-mapping fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on mathematical morphology and wavelet entropy. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019.
- [58] STRACHAN, S. M. et al. Providing Decision Support for the Condition-Based Maintenance of Circuit Breakers Through Data Mining of Trip Coil Current Signatures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 178–186, jan. 2007.
- [59] RAZI-KAZEMI, A. A. Applicability of auxiliary contacts in circuit breaker online condition assessment. *Electric Power Systems Research*, v. 128, p. 53–59, nov. 2015.
- [60] ABDOLLAH, M.; RAZI-KAZEMI, A. A. Condition assessment of arc contacts through dynamic resistance measurement (DRM) and wavelet analysis. 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Anais... In: 2017 IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING (ICEE). Tehran, Iran: IEEE, maio 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7985212/>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- [61] YE, X. et al. A novel U-Net and capsule network for few-shot high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis. *Measurement*, v. 199, p. 111527, ago. 2022.
- [62] GENG, S.; WANG, X.; SUN, P. State estimation of 500 kV sulphur hexafluoride high-voltage CBs based on Bayesian probability and neural network. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 13, n. 19, p. 4503–4509, out. 2019.
- [63] RAMENTOL, E. et al. Fuzzy-rough imbalanced learning for the diagnosis of High Voltage Circuit Breaker maintenance: The SMOTE-FRST-2T algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 48, p. 134–139, fev. 2016.
- [64] ELIAS, M. G. D. S. et al. APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY PARA PRIORIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE DISJUNTORES DE SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *COLLOQUIUM EXACTARUM*, v. 15, n. 1, p. 1–18, 20 dez. 2023.



[65] SILVA, V. G. A. da. Manutenção preditiva em sistemas elétricos de potência utilizando registros de dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). Dissertação de Mestrado, Belém: Instituto Federal do Pará, 2019.

[66] GUERRA, M. M. Especificação dos Requisitos de Um Sistema Automático de Aquisição e Tratamento de Oscilografia para Apoio à Manutenção dos Sistemas de Proteção da Rede Nacional de Transporte. Dissertação de Mestrado, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

[67] YANG, Q. et al. Chaotic Analysis and Feature Extraction of Vibration Signals From Power Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 3, p. 1124–1135, jun. 2020.

[68] LI, X. et al. Particle Swarm Optimization-Support Vector Machine Model for Machinery Fault Diagnoses in High-Voltage Circuit Breakers. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v. 33, n. 1, p. 6, dez. 2020.

[69] JI, T. et al. Typical current modelling and feature extraction of high voltage circuit breaker towards condition analysis and fault diagnosis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 14, n. 8, p. 1521–1527, abr. 2020.

[70] HUANG, J.; HU, X.; GENG, X. An intelligent fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EMD energy entropy and multi-class support vector machine. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 2, p. 400–407, fev. 2011.

[71] ZHANG, H.-Y. et al. Fault Detection for High-Voltage Circuit Breakers Based on Time–Frequency Analysis of Switching Transient E-Fields. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, n. 4, p. 1620–1631, abr. 2020.

[72] LIN, L. et al. A Novel Mechanical Fault Feature Selection and Diagnosis Approach for High-Voltage Circuit Breakers Using Features Extracted without Signal Processing. *Sensors*, v. 19, n. 2, p. 288, 12 jan. 2019.

[73] MA, S. et al. Intelligent Fault Diagnosis of HVCB with Feature Space Optimization-Based Random Forest. *Sensors*, v. 18, n. 4, p. 1221, 16 abr. 2018.

[74] YANG, W. et al. Fault Diagnosis of High-Voltage Circuit Breakers Using Hilbert-Huang Transform and Denoising-Stacked Autoencoder. 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). *Anais... Em: 2019 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND RENEWABLE ENERGY (ICPRE)*. Chengdu, China: IEEE, set. 2019c. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9034783/>>. Acesso em: 6 maio 2024

[75] ZHANG, H.-Y. et al. Fault Detection for High-Voltage Circuit Breakers Based on Time–Frequency Analysis of Switching Transient E-Fields. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, n. 4, p. 1620–1631, abr. 2020.

[76] GAO, W. et al. Mechanical Faults Diagnosis of High-Voltage Circuit Breaker via Hybrid Features and Integrated Extreme Learning Machine. *IEEE Access*, v. 7, p. 60091–60103, 2019.



[77] WANG, Y. et al. Few-Shot Transfer Learning with Attention Mechanism for High-Voltage Circuit Breaker fault diagnosis. 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Anais... Em: 2021 IEEE 2ND CHINA INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING (CIYCEE). Chengdu, China: IEEE, 15 dez. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9676790/>>. Acesso em: 6 maio 2024

[78] FEIZIFAR, B.; USTA, O. Condition monitoring of circuit breakers using arc models and failure detection algorithm. 2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG). Anais... In: 2017 5TH INTERNATIONAL ISTANBUL SMART GRID AND CITIES CONGRESS AND FAIR (ICSG). Istanbul, Turkey: IEEE, abr. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7947631/>>. Acesso em: 6 maio 2024.