



Localização de Faltas em Sistemas HVDC Utilizando Perceptron Multicamadas e Transformada *Wavelet Packet*: Uma Abordagem Sustentável para a Integração de Energias Renováveis

Messias Silva de Melo

Mestrando, UFPI, Brasil
Messias.silva@ufpi.edu.br
ORCID iD 0009-0002-9901-4826

Guilherme Alexandre Lopes Neto

Mestrando, UFPI, Brasil
guilhermelopes@ufpi.edu.br
ORCID iD 0000-0002-3023-3265

Rui Bertho Junior

Professor Doutor, IFSP, Brasil
rui.bertho@ifsp.edu.br
ORCID iD 0000-0001-5526-3201

Hermes Manoel Galvão Castelo Branco

Professor Doutor, UFPI, Brasil
hermescb@ufpi.edu.br
ORCID iD 0000-0003-4921-7035

Submissão: 16/02/2025

Aceite: 14/03/2025

MELO, Messias Silva de; LOPES NETO, Guilherme Alexandre; BERTHO JUNIOR, Rui; BRANCO, Hermes Manoel Galvão Castelo. Localização de Faltas em Sistemas HVDC Utilizando Perceptron Multicamadas e Transformada Wavelet Packet: Uma Abordagem Sustentável para a Integração de Energias Renováveis. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2025. DOI: [10.17271/1980082721120255589](https://doi.org/10.17271/1980082721120255589). Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5589

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Localização de Falhas em Sistemas HVDC Utilizando Perceptron Multicamadas e Transformada Wavelet Packet: Uma Abordagem Sustentável para a Integração de Energias Renováveis

RESUMO

Objetivo: O estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar um modelo baseado em redes neurais, especificamente o Perceptron Multicamadas (MLP) em conjunto com a Transformada Wavelet Packet (TWP), para aprimorar a localização de falhas em sistemas de transmissão de energia em corrente contínua de alta tensão (HVDC), visando contribuir para a sustentabilidade ambiental ao aumentar a eficiência e a confiabilidade desses sistemas.

Metodologia: A pesquisa utiliza dados de corrente medidos na linha HVDC como entradas para treinar o modelo MLP, avaliando seu desempenho por meio de métricas como Erro Absoluto Médio (MAE) e Erro Quadrático Médio (MSE). O estudo simula diferentes condições operacionais para testar a eficácia do modelo.

Originalidade/relevância: O trabalho se insere no gap teórico relacionado à necessidade de técnicas mais eficientes e precisas para localização de falhas em sistemas HVDC, destacando a relevância acadêmica e prática de soluções que minimizem o tempo de resposta e maximizem a eficiência energética, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

Resultados: O modelo proposto demonstra alta precisão na localização de falhas, reduzindo significativamente o erro de estimação e eventualmente a redução do tempo de inatividade da linha de transmissão.

Contribuições teóricas/metodológicas: O estudo contribui com uma abordagem que combina MLP e TWP, oferecendo um método robusto para a localização de falhas em sistemas HVDC, com aplicações potenciais em outros sistemas de transmissão de energia.

Contribuições sociais e ambientais: A pesquisa reforça os benefícios ambientais das linhas HVDC, como a eficiência energética e o menor impacto ambiental, ao propor uma solução que reduz o tempo de inatividade e aumenta a confiabilidade do sistema, promovendo a sustentabilidade na transmissão de energia.

PALAVRAS-CHAVE: HVDC. Localização de falhas. Sustentabilidade.

Fault Location in HVDC Systems Using Multilayer Perceptron and Wavelet Packet Transform: A Sustainable Approach for Renewable Energy Integration

ABSTRACT

Objective: The study aims to develop and evaluate a model based on neural networks, specifically the Multilayer Perceptron (MLP) combined with the Wavelet Packet Transform (WPT), to improve fault location in High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission systems, contributing to environmental sustainability by enhancing the efficiency and reliability of these systems.

Methodology: The research uses current data measured from the HVDC line as inputs to train the MLP model, evaluating its performance through metrics such as Mean Absolute Error (MAE) and Mean Squared Error (MSE). The study simulates different operational conditions to test the model's effectiveness.

Originality/relevance: This work addresses a theoretical gap concerning the need for more efficient and accurate techniques for fault location in HVDC systems. It highlights both the academic and practical relevance of solutions that minimize response time and maximize energy efficiency, thereby contributing to the reduction of environmental impact.

Results: The proposed model exhibits high accuracy in fault location, significantly reducing estimation errors and, consequently, transmission line downtime.

Theoretical/methodological contributions: The study contributes with an innovative approach combining MLP and WPT, offering a robust method for fault location in HVDC systems, with potential applications in other energy transmission systems.

Social and environmental contributions: The research highlights the environmental benefits of HVDC lines, including energy efficiency and reduced environmental impact, by proposing a solution that minimizes downtime and enhances system reliability, thereby promoting sustainability in power transmission.

KEYWORDS: HVDC. Fault Location. Sustainability.

Localización de Fallas en Sistemas HVDC Utilizando Perceptrón Multicapa y Transformación de Paquetes Wavelet: Un Enfoque Sostenible para la Integración de Energías Renovables

RESUMEN

Objetivo: El estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar un modelo basado en redes neuronales, específicamente el Perceptrón Multicapa (MLP) combinado con la Transformada de Paquetes de Wavelets (TPW), para mejorar la localización de fallas en sistemas de transmisión de energía de corriente continua de alta tensión (HVDC), contribuyendo a la sostenibilidad ambiental al aumentar la eficiencia y confiabilidad de estos sistemas.

Metodología: La investigación utiliza datos de corriente medidos en la línea HVDC como entradas para entrenar el modelo MLP, evaluando su desempeño mediante métricas como el Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Cuadrático Medio (MSE). El estudio simula diferentes condiciones operativas para probar la eficacia del modelo.

Originalidad/relevancia: El trabajo aborda la brecha teórica relacionada con la necesidad de técnicas más eficientes y precisas para la localización de fallas en sistemas HVDC, destacando la relevancia académica y práctica de soluciones que minimicen el tiempo de respuesta y maximicen la eficiencia energética, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.

Resultados: El modelo propuesto demuestra una alta precisión en la localización de fallas, reduciendo significativamente los errores de estimación y, eventualmente, el tiempo de inactividad de la línea de transmisión.

Contribuciones teóricas/metodológicas: El estudio contribuye con un enfoque innovador que combina MLP y TPW, ofreciendo un método robusto para la localización de fallas en sistemas HVDC, con aplicaciones potenciales en otros sistemas de transmisión de energía.

Contribuciones sociales y ambientales: La investigación refuerza los beneficios ambientales de las líneas HVDC, como la eficiencia energética y el menor impacto ambiental, al proponer una solución que reduce el tiempo de inactividad y aumenta la confiabilidad del sistema, promoviendo la sostenibilidad en la transmisión de energía.

PALABRAS CLAVE: HVDC. Localización de fallas. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão de corrente contínua em alta tensão, do inglês High Voltage Direct Current (HVDC) são uma solução viável para a transmissão de energia a longas distâncias, superando muitas limitações dos sistemas de corrente alternada em alta tensão, do inglês High Voltage Alternating Current (HVAC). Enquanto os sistemas HVAC sofrem com perdas significativas de energia em transmissões em longas distâncias, os sistemas HVDC oferecem maior eficiência, reduzindo tais perdas de forma considerável (NGUYEN; ETINGOV; ELIZONDO, 2023). Estudos indicam que, dependendo da distância e das condições da linha, as perdas em transmissão podem ser reduzidas em 30-50% com a adoção da tecnologia HVDC ao comparado a linhas AC (YOUSAF et al., 2024). Além disso, a transmissão de energia em HVDC melhora a estabilidade operacional e facilita a interligação de redes de diferentes regiões e países (MERZAH; ABBAS; TUAIMAH, 2024).

No contexto do desenvolvimento sustentável, conforme estabelecido na Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU), a adoção de tecnologias energeticamente eficientes é fundamental para minimizar o impacto ambiental. A transmissão HVDC está alinhada com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), pois contribui para a redução das emissões de carbono e melhora a confiabilidade das redes elétricas por meio da integração de energias renováveis (PURIFICAÇÃO, RAMOS & KNISS, 2020). Portanto, além de otimizar a transmissão de eletricidade, a HVDC fortalece as iniciativas globais de sustentabilidade e promove o uso responsável dos recursos.

Outro diferencial das linhas HVDC é sua compatibilidade com fontes de energia renováveis, como fotovoltaica e eólica. A corrente contínua possibilita a transmissão intermitente e o armazenamento dessas energias, características cruciais para uma matriz energética mais sustentável (HUSIN et al., 2021). Em áreas com alto potencial renovável, a aplicação de sistemas HVDC mitiga os problemas de estabilidade e restrições físicas causados pela variabilidade das fontes.

Além disso, o sistema HVDC requer menor espaço para instalação, utilizando faixas de servidão mais estreitas em comparação com as linhas HVAC. Essa vantagem é essencial em áreas ecologicamente sensíveis ou onde a infraestrutura interfere no uso do solo, como regiões de conservação ambiental. Essa característica reduz impactos ambientais e facilita projetos em áreas de difícil desapropriação (ANDERSEN, 2023). A tecnologia HVDC também é fundamental para a viabilidade de sistemas offshore conectados ao continente. A utilização de sistemas HVDC em parques eólicos offshore permite a transmissão eficiente de grandes quantidades de energia para o continente, reduzindo o número de cabos necessários e minimizando os impactos ambientais associados (RAHMAN et al., 2021). Portanto, as linhas HVDC apresentam benefícios econômicos e ambientais significativos. Sua menor invasividade no território e impacto reduzido nos ecossistemas as tornam uma opção sustentável. Contudo, a viabilidade da tecnologia depende da capacidade de oferecer transmissão contínua, minimizando interrupções. Para tal, é essencial o uso de sistemas eficientes de detecção e localização de falhas.

A localização de falhas em sistemas HVDC é particularmente desafiadora devido à falta de cruzamento pelo zero da corrente (em inglês current zero-crossing), e a rápida propagação dos transitórios elétricos. Métodos tradicionais, baseados em medições de impedância,

frequentemente não são eficazes para lidar com a complexidade das transmissões em corrente contínua (PRAGATI et al., 2023). Para superar essas limitações, Rohani and Koochaki (2020) exploram o uso de métodos baseados em inteligência artificial e análise de sinais, possibilitando uma identificação mais eficiente da falha e reduzindo o tempo de resposta e assegurando a continuidade das operações, maximizando os benefícios da tecnologia HVDC.

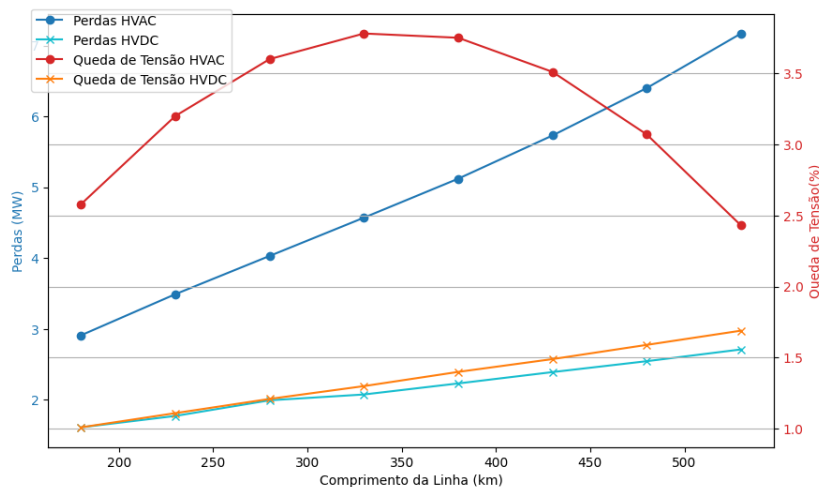
Nesse sentido, este estudo propõe a aplicação de um algoritmo de rede neural artificial do tipo perceptron multicamadas (MLP) combinado à técnica da Transformada Wavelet Packet (TWP) para localização precisa de falhas. A TWP possibilita a obtenção de informações no domínio do tempo das ondas transitórias geradas no momento da falha, permitindo identificar sua localização com precisão. Essa abordagem melhora a detecção de falhas e acelera a restauração das operações, assegurando a continuidade da transmissão e os benefícios ambientais da HVDC.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A promoção do uso de fontes de energia renováveis tem se tornado uma importante estratégia política para mitigar as mudanças climáticas e melhorar a segurança energética (Ribeiro e Braghini Junior, 2023). Nesse contexto, a demanda por soluções energéticas de menor impacto ambiental impulsiona a adoção da transmissão de energia em HVDC, uma tecnologia que reduz perdas de energia em transmissões em longas distâncias. No sistema HVAC, as perdas por efeito Joule são altas, exigindo subestações intermediárias para compensação (NGUYEN; ETINGOV; ELIZONDO, 2023). Já a HVDC transmite energia com menores perdas e menor necessidade de infraestrutura adicional, como subestações e cabos (WANG; LI; GUO, 2022). Estudos mostram que uma linha HVDC pode apresentar até 56% menos perdas de energia e 58% menor queda de tensão em relação a uma linha HVAC equivalente (ALAM et al., 2022). Além da eficiência técnica, a HVDC se alinha às estratégias globais para mitigação das mudanças climáticas e segurança energética, pois sua menor perda de energia contribui para um uso mais eficiente da geração elétrica, reduzindo a necessidade de produção adicional e, consequentemente, as emissões de CO₂.

A figura 1. Ilustra a relação de perdas em função da distância para uma linha de transmissão de 400 kV com distâncias de 180 – 700 km, onde é possível perceber os valores mais acentuados de perdas tanto de energia quanto de tensão em função do crescimento da linha de transmissão HVAC em relação a HVDC (ALAM et al., 2022).

Figura 1 - Comparativo de Perdas de Energia e Tensão em função do comprimento da linha.



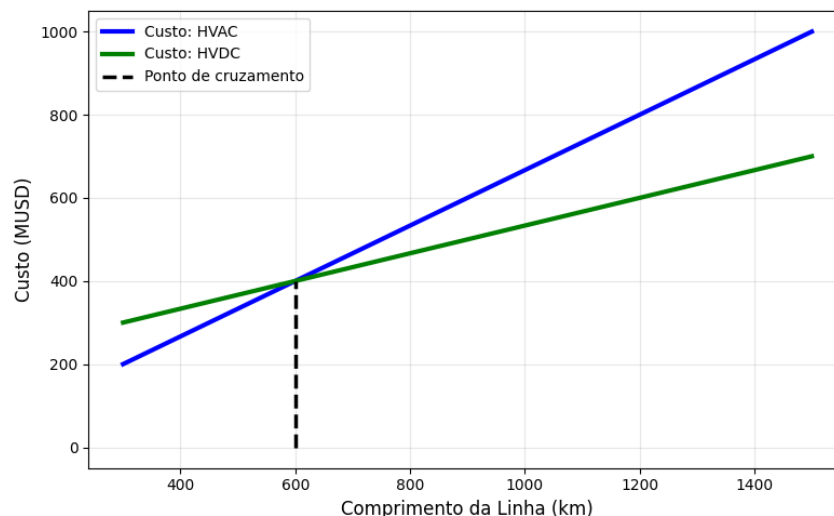
Fonte: Adaptado de tabela 3 (ALAM et al., 2022).

A adoção de tecnologias sustentáveis na transmissão de energia é fundamental para impulsionar a transição para fontes renováveis e cumprir compromissos internacionais de descarbonização, garantindo um sistema elétrico mais seguro e economicamente viável.

A figura 2, ilustra os custos associados de forma geral, demonstrando que as linhas HVAC, não somente apresentam perdas maiores, mas também possuem custos que tendem a aumentar consideravelmente à medida que o comprimento da linha aumenta. Além disso, no caso de transmissão de longa distância em corrente alternada, existem custos adicionais relacionados à necessidade de compensação reativa.

Devido ao efeito Ferranti, a tensão ao longo da linha pode aumentar consideravelmente, principalmente em sistemas de alta tensão operando com carga reduzida ou desligada. Esse fenômeno ocorre devido à predominância do efeito capacitivo sobre o efeito indutivo da linha, levando a um aumento de tensão no meio e no final da linha de transmissão. Como consequência, a potência transferida pode ser limitada, exigindo medidas corretivas para manter a estabilidade do sistema. Assim, para mitigar esse efeito e otimizar a transmissão de energia, são normalmente instalados Compensadores Estáticos de Reativos em pontos estratégicos ao longo da linha. Esse fator contribui ainda mais para a elevação do custo das linhas HVAC (MUSHI; SUWI; JUSTO, 2024), tornando a tecnologia HVDC uma alternativa economicamente mais viável para distâncias superiores ao ponto de cruzamento identificado no gráfico.

Figura 2 – HVDC vs HVAC: Comparativo de custo em função do comprimento da linha.



Fonte: Adaptado de (ALAM et al., 2022).

Outro benefício do sistema HVDC é sua capacidade de suportar linhas subterrâneas, reduzindo o impacto visual e preservando paisagens naturais, especialmente em áreas turísticas e rurais (HUSIN et al., 2021). Isso minimiza conflitos com comunidades locais e reduz a necessidade de desapropriações, além de ser menos invasiva em áreas ambientalmente sensíveis.

A menor interferência eletromagnética das linhas HVDC também é um atrativo. Estudos apontam que os campos eletromagnéticos gerados são mais estáveis e menos intensos que os de linhas HVAC, diminuindo os possíveis efeitos sobre a fauna e flora (WATSON; WATSON, 2020). Essa característica é especialmente relevante em regiões de biodiversidade sensível, onde os projetos devem equilibrar eficiência energética e conservação ambiental (ANDERSEN, 2023).

A integração da HVDC com fontes renováveis, como solar e eólica, é destacada como um fator chave para o desenvolvimento de matrizes energéticas sustentáveis. Sua capacidade de gerenciar a intermitência dessas fontes sem comprometer a estabilidade da rede favorece a transição para uma economia de baixo carbono. Além disso, a interconexão de redes entre diferentes países e regiões, utilizando HVDC, maximiza a troca e utilização de energia renovável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (HUSIN et al., 2021).

Por fim, a literatura destaca a importância de sistemas eficientes de localização de falhas em linhas HVDC. Métodos tradicionais nem sempre são adequados para lidar com as complexidades das transmissões em corrente contínua, especialmente em linhas extensas (PRAGATI et al., 2023). A aplicação de algoritmos avançados (ROHANI; KOOCHAKI, 2020), como o perceptron multicamadas aliadas ao TWP, oferece maior precisão e rapidez na localização de falhas, assegurando a continuidade das operações e os benefícios associados à HVDC.

3 OBJETIVOS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Com a crescente demanda por sistemas de transmissão eficientes e sustentáveis, as linhas HVDC se destacam, mas a localização de falhas continua sendo um desafio técnico que

requer novas abordagens, especialmente em linhas de longa distância. Isto posto, este estudo tem como principal objetivo desenvolver e avaliar um modelo baseado em redes neurais, especificamente o Perceptron Multicamadas (MLP), para aprimorar a localização de falhas em sistemas de transmissão. A velocidade e precisão da localização da falta apresenta um impacto direto no tempo de atuação da equipe responsável para correção da falha e, consequentemente, no tempo de reestabelecimento da transmissão de energia após uma falha.

Para alcançar o objetivo de localizar, com precisão, a falta em uma linha HVDC, foram utilizados como entradas da rede neural os valores de corrente medidos na linha. Com o treinamento adequado, a rede neural será capaz de identificar, através do perfil de variação da corrente, a correta localização da falta na linha de transmissão.

Dentre os objetivos específicos, este trabalho busca analisar os benefícios ambientais das linhas HVDC, destacando suas vantagens em termos de eficiência energética e impacto reduzido no meio ambiente, bem como os eventuais benefícios gerados pela precisão na detecção das faltas nos sistemas HVDC.

A principal contribuição deste trabalho é a avaliação do desempenho do modelo MLP em termos de precisão na localização de falhas, observando métricas como Erro Absoluto Médio (MAE) e Erro Quadrático Médio (MSE) em diferentes condições operacionais de forma a reduzir o tempo necessário para manutenção da linha e assim preservar os benefícios ambientais associados a essa tecnologia. Dessa forma, o estudo contribui tanto para a inovação na engenharia elétrica quanto para os objetivos globais de sustentabilidade na transmissão de energia.

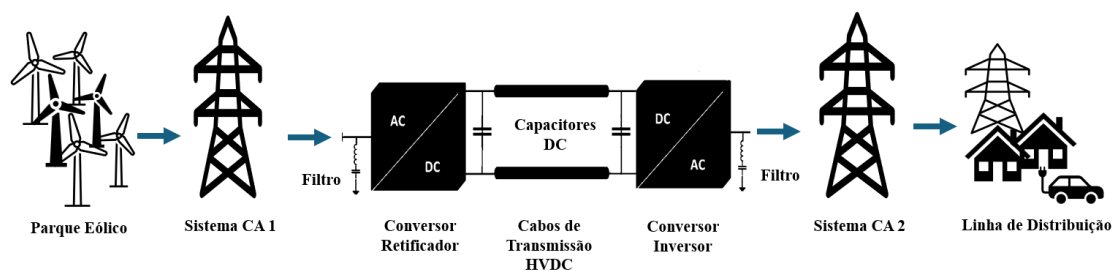
4 LINHAS DE TRANSMISSÃO HVDC: DEFINIÇÃO, FUNCIONAMENTO E IMPORTÂNCIA

As linhas de transmissão HVDC representam uma inovação significativa na transmissão de energia elétrica, especialmente em cenários de longa distância e em sistemas intercontinentais. Ao contrário dos sistemas HVAC, que operam com corrente alternada, as linhas HVDC utilizam corrente contínua em alta tensão para transportar eletricidade de um ponto a outro (KALAIR; ABAS; KHAN, 2016). A transmissão em corrente contínua minimiza perdas resistivas, melhorando a eficiência, especialmente quando se trata de conectar redes elétricas geograficamente distantes e com diferentes frequências ou topologias de rede (FARGHALI et al., 2023).

2.6 4.1 Funcionamento das Linhas HVDC

A figura abaixo ilustra um sistema de rede HVDC que interconecta um parque eólico a uma rede de distribuição de energia elétrica, destacando o processo de transmissão em corrente contínua. O sistema é composto por uma estação conversora retificadora, uma linha de transmissão em corrente contínua (CC), uma estação conversora inversora e sistemas de corrente alternada (CA) nas extremidades para integração com a rede convencional.

Figura 3 - Interligação entre Parque Eólico e Rede de distribuição via HVDC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A integração do sistema HVDC com redes CA ocorre por meio de estações conversoras localizadas nas extremidades da linha de transmissão. Essas estações têm o papel fundamental de converter a energia elétrica de CA para CC e vice-versa, garantindo a compatibilidade entre o HVDC e as redes CA.

Na estação conversora retificadora, localizada próxima à fonte de geração de energia, como o parque eólico, a energia elétrica em CA é convertida para CC, o que permite a transmissão com menores perdas e maior eficiência. A linha de transmissão em corrente contínua é composta por dois condutores, o polo positivo e o negativo, em contraste com os três condutores requeridos por sistemas trifásicos em corrente alternada. Essa configuração reduz custos e simplifica a infraestrutura.

Além disso, o uso de CC praticamente elimina o efeito pelicular, fenômeno que limita a utilização completa do condutor em sistemas de corrente alternada, contribuindo para uma maior eficiência na transmissão (MATHELUBA; MBULI, 2024).

Na extremidade receptora, a estação conversora inversora realiza o processo inverso, convertendo a energia CC para CA, permitindo sua integração à rede de distribuição convencional. Essa configuração possibilita uma conexão eficiente entre fontes de energia renováveis e os sistemas de corrente alternada, garantindo maior flexibilidade e estabilidade na operação da rede elétrica, além de proporcionar uma maior capacidade de transmissão e controle preciso do fluxo de potência.

4.2 Aplicações e Cenários Favoráveis ao Uso de HVDC

A tecnologia HVDC é especialmente vantajosa em aplicações que exigem transmissão de energia em longa distância, interligações intercontinentais e em ambientes offshore, como parques eólicos (RAHMAN et al., 2021). Em situações nas quais é necessário transmitir energia por mais de 600 km, como em linhas que conectam regiões isoladas a centros urbanos, as linhas HVDC tornam-se economicamente viáveis, pois as perdas resistivas se mantêm menores do que as de sistemas HVAC, mesmo em distâncias extremas (ALAM et al., 2022).

Além disso, a transmissão HVDC é uma solução ideal para interligar redes que operam com frequências diferentes, como é o caso das redes da América do Norte (60 Hz) e Europa (50 Hz). Outro exemplo é a interligação entre o Brasil e o Paraguai, que utiliza tecnologia HVDC para conectar as redes de 60 Hz do Brasil e 50 Hz do Paraguai. Esse tipo de conexão permite uma maior integração entre redes internacionais, fortalecendo a segurança e a estabilidade do fornecimento de energia. Em regiões com restrições ambientais e territoriais, a HVDC também

se destaca pela menor faixa de servidão e menor impacto visual, uma vez que exige menos estruturas para suportar a linha de transmissão.

4.3 Importância e Benefícios das Linhas HVDC

As linhas de transmissão HVDC desempenham um papel crucial em sistemas energéticos que buscam a descarbonização e a integração de energias renováveis. A tecnologia permite conectar parques eólicos e solares remotos diretamente a centros de consumo, minimizando as perdas de energia e promovendo a utilização de fontes renováveis. Com a demanda crescente por energias renováveis, a capacidade da HVDC de realizar a transmissão de energia em alta eficiência e estabilidade auxilia na transição para um sistema elétrico mais sustentável e resiliente.

Além disso, as linhas HVDC permitem maior controle sobre o fluxo de energia, reduzindo o risco de flutuações e desequilíbrios na rede elétrica. Diferentemente das linhas HVAC, onde a sincronização entre as diferentes regiões deve ser mantida de forma rigorosa, as linhas HVDC oferecem uma solução mais flexível e controlada ativamente por sistemas eletrônicos. Isso facilita a integração de grandes blocos de energia em redes complexas, onde o controle sobre a direção e a quantidade de energia pode ser ajustado com maior precisão.

A crescente demanda por sistemas de transmissão HVDC reflete a importância da tecnologia em um cenário global de transição energética. Seu uso amplia a capacidade de transmissão entre países e continentes, atende à necessidade de eficiência energética e oferece uma alternativa mais viável do ponto de vista ambiental em comparação aos sistemas HVAC.

5 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO HVDC

As linhas de transmissão HVDC têm se mostrado uma alternativa ambientalmente vantajosa em comparação às linhas de transmissão convencionais em corrente alternada (HVAC). Além de reduzir as perdas de transmissão ao longo de grandes distâncias, o HVDC diminui os impactos físicos e visuais no ambiente natural e contribui para a mitigação de emissões de carbono (HUSIN et al., 2021). Com a crescente necessidade de expansão das redes elétricas para suportar fontes de energia renovável, como a eólica e a solar, a transmissão HVDC surge como uma solução eficiente, que atende à demanda por sistemas mais sustentáveis e de menor impacto ambiental (KALAIR; ABAS; KHAN, 2016).

5.1 Menor Ocupação de Espaço e Faixa de Servidão Reduzida

As linhas HVDC requerem menos cabos condutores em comparação com as linhas HVAC para transmitir a mesma quantidade de energia. Em sistemas de HVAC, são necessárias três fases de cabo (trifásico), enquanto em HVDC basta apenas uma ou duas linhas condutoras. Isso diminui significativamente a largura da faixa de servidão exigida para a instalação das torres e da linha de transmissão, reduzindo o espaço físico ocupado no solo. Essa economia espacial permite que as linhas HVDC ocupem menos terreno, uma vantagem especialmente importante

em regiões densamente povoadas ou em áreas ecologicamente sensíveis, como florestas e áreas de proteção ambiental (RAMESH; LAXMI, 2012).

5.2 Impacto Visual Reduzido e Maior Aceitação Social

Devido à natureza da corrente contínua, as torres HVDC podem ser espaçadas a distâncias maiores do que as torres HVAC. Isso reduz o número total de torres necessárias ao longo do percurso da linha de transmissão. Além disso, devido a menor quantidade de condutores, quando comparados ao sistema HVAC, a infraestrutura necessária para suportar os condutores também é reduzida. Isso resulta em um menor impacto visual das linhas HVDC. Esse aspecto pode ser crucial para projetos que atravessam áreas habitadas, onde o impacto estético das infraestruturas de transmissão pode ser uma preocupação. Em áreas com alto valor paisagístico, a aceitação social dos projetos de transmissão HVDC tende a ser maior, uma vez que o impacto visual é menos intrusivo. Esse fator também é importante para minimizar a resistência de comunidades locais e tornar viável a expansão da infraestrutura de transmissão com menor oposição social (PILLAY; KABEYA; DAVIDSON, 2020).

No contexto de grandes metrópoles, uma alternativa são as linhas de transmissão HVDC subterrâneas, uma solução eficaz para reforçar redes elétricas em áreas urbanas densamente povoadas, onde a instalação de torres aéreas é inviável devido a restrições de espaço e preocupações estéticas. Nos Estados Unidos, projetos como o SOO Green HVDC Link exemplificam essa abordagem. Este projeto prevê a instalação de uma linha de transmissão subterrânea de 2.100 MW ao longo de servidões ferroviárias existentes, conectando mercados de energia significativos e minimizando o impacto visual e ambiental (FRENKEL, 2020). Conforme relatado pela organização Scenic America, em 2023, o projeto obteve aprovação das agências reguladoras do estado de Iowa e está previsto para entrar em operação em meados de 2029 (SCENIC AMERICA, 2024).

5.3 Redução de Emissões e Compatibilidade com Energias Renováveis

O sistema HVDC, além de mais eficiente em longas distâncias, apresenta um benefício ambiental significativo ao minimizar as perdas de energia. As perdas de energia nas linhas de transmissão HVAC aumentam com a distância devido a fatores como reatância e capacitância, o que implica em um consumo energético adicional para compensar as perdas. Por outro lado, as linhas HVDC não enfrentam essas mesmas limitações, o que resulta em uma transmissão mais limpa e com menor necessidade de geração de energia compensatória. Esse fator é ainda mais relevante no contexto da integração de energias renováveis, onde parques eólicos e solares geralmente estão localizados em áreas remotas e exigem uma transmissão eficiente até os centros de consumo urbano (FARGHALI et al., 2023).

5.4 Menor Efeito de Campo Magnético e Elétrico

As linhas HVDC também apresentam uma vantagem ao minimizar os efeitos de campos magnéticos e elétricos em áreas adjacentes à linha de transmissão. Enquanto linhas HVAC

produzem campos eletromagnéticos alternados que podem ter impactos sobre a saúde e o comportamento de animais e seres humanos, as linhas HVDC geram campos constantes, reduzindo esses possíveis efeitos adversos. Em áreas de conservação ambiental, essa característica faz com que as linhas HVDC sejam menos invasivas para a fauna e a flora locais, aumentando seu valor ambiental e ecológico (MATHEBULA; MBULI, 2024).

6 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS HVDC

Apesar de todos os benefícios ambientais, o HVDC apresenta desafios técnicos, especialmente relacionados aos sistemas de proteção e à localização de faltas. A natureza unidirecional da corrente contínua dificulta o desenvolvimento de sistemas de proteção que identifiquem e isolem falhas como já bem estabelecido em sistemas HVAC. Em sistemas HVAC, métodos de localização de falhas utilizam as oscilações de corrente e tensão, mas a corrente contínua em HVDC dificulta a aplicação dessas mesmas técnicas. De acordo com o estudo de Muniappan, 2021, as falhas em sistemas HVDC tendem a se propagar rapidamente, exigindo sensores e algoritmos especializados para uma detecção eficaz.

Contudo, avanços em eletrônica de potência e controle digital têm permitido que esses sistemas se tornem cada vez mais eficazes. Além disso, o uso de inteligência artificial e redes neurais para localização de faltas, oferece uma solução promissora para superar esses desafios, aumentando ainda mais o apelo ambiental do HVDC como um sistema de transmissão sustentável e tecnicamente viável (RAMESH; LAXMI, 2012).

Pesquisas recentes estão focadas no desenvolvimento de sistemas de proteção dedicados para redes HVDC, incluindo o uso de métodos de localização que combinem tecnologias de medição digital e análise de sinais. Estudos como o de Farkhani et al. (2024) indicam que o aprimoramento dos sistemas de proteção pode aumentar significativamente a segurança e a confiabilidade das redes HVDC, mas os desafios técnicos ainda precisam ser superados para atingir um nível de eficiência comparável ao das redes HVAC.

7 REDES NEURAIS APLICADAS À LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS HVDC

A utilização de redes neurais artificiais tem mostrado resultados promissores na localização precisa de falhas em linhas HVDC. Redes neurais multicamadas (MLP), são treinadas com dados históricos de falhas, permitindo que os algoritmos aprendam a identificar padrões específicos e a prever a localização de falhas com base nas características dos sinais de corrente e tensão (ALPSALAZ et al., 2024). Essa abordagem permite que sistemas HVDC tenham uma maior precisão na detecção de falhas, superando algumas limitações dos métodos tradicionais.

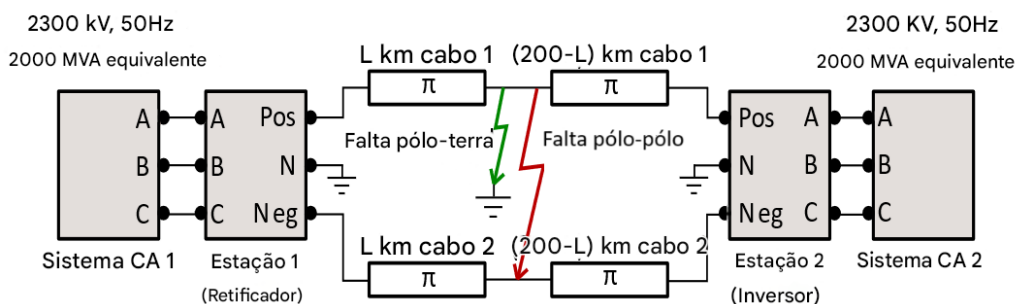
As redes neurais apresentam a capacidade de generalizar padrões de falhas complexos e de rápida propagação, o que é essencial para o sucesso dos sistemas HVDC. Um estudo conduzido por Zhang e Yu (2024), explora o uso de redes neurais para a identificação e localização de falhas em linhas HVDC e conclui que essa abordagem pode reduzir o tempo de resposta, melhorando a confiabilidade geral do sistema. Embora promissora, a implementação de redes neurais para proteção de HVDC exige um conjunto robusto de dados e um treinamento adequado para lidar com variações nas condições operacionais.

8 CENÁRIO DE APLICAÇÃO

Para avaliar o desempenho de uma rede neural aplicada à localização de faltas em sistemas de transmissão, foi utilizado um sistema HVDC de dois terminais modelado a partir de um sistema de testes presente no software MathWorks Simulink. O sistema analisado considerou dois tipos de falhas: entre polo e terra e entre polos.

O sistema de testes, ilustrado na Figura 4, consiste em dois sistemas CA operando a 50 Hz, conectados a duas estações conversoras que, por sua vez, estão interligadas por uma linha de transmissão HVDC. Os sistemas CA apresentam tensões de 230 kV e potência de 200 MVA, enquanto a linha de transmissão possui 200 km de extensão e opera com uma tensão de +/- 100 kV. Esse arranjo reflete um cenário de transmissão em sistemas HVDC ideal para avaliar a eficácia da abordagem proposta.

Figura 4 - Linha de transmissão HVDC baseada em VSC.



Fonte: adaptada de (BERTHO JUNIOR et al., 2014).

Para os testes, as simulações de condições de falha foram exploradas a fim de se obter um banco de dados representativo para posterior treinamento da rede neural. As resistências das faltas foram alteradas em incrementos de 2 ohms, variando de 1 a 299 ohms. O ponto de aplicação da falta na linha variou em incrementos de 5 km, abrangendo distâncias de 5 a 195 km do retificador. No total, foram realizadas 11.720 simulações, das quais os valores da corrente nos polos foram registrados com uma frequência amostral de 135 kHz.

Os sinais de corrente gerados pelas simulações foram registrados em janelas de 512 amostras, que equivalem a um período de 3,792 ms. Para a extração de características desses sinais, foi empregada a Transformada Wavelet Packet, aplicada ao sinal de corrente do polo positivo capturado na oscilografia de falta. A decomposição wavelet foi realizada utilizando a função Daubechies (DB1) até o quarto nível, gerando 16 conjuntos de coeficientes que representam bandas de frequência distintas. O valor máximo dos coeficientes de cada conjunto foi extraído e utilizado como entrada para a rede neural MLP.

Quanto à rede MLP, seu treinamento foi realizado utilizando o algoritmo de retropropagação Levenberg-Marquardt, conhecido por sua eficiência em problemas de regressão. Após uma série de testes preliminares, a arquitetura da rede que apresentou as melhores resposta foi composta por:

- Uma camada de entrada com 16 neurônios, correspondendo aos coeficientes gerados pela TWP.

- Duas camadas ocultas, configuradas com 60 neurônios na primeira camada e 30 neurônios na segunda camada.
- Uma camada de saída com um único neurônio, cuja função de ativação linear retorna diretamente a distância da falha em quilômetros.

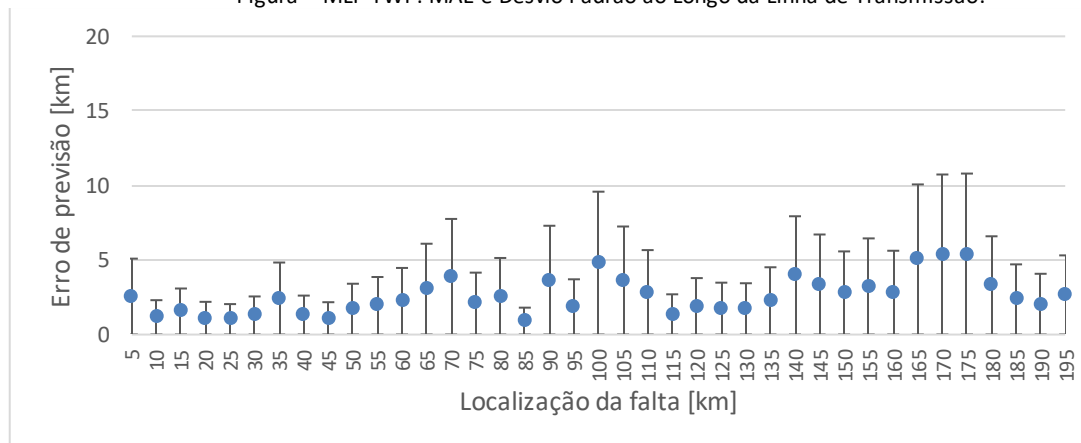
Os parâmetros de treinamento foram ajustados após diversos testes para obter o melhor desempenho. Foram executadas cinco iterações de 2.500 épocas, com taxa de aprendizado de 0,001. A função de ativação utilizada foi a ReLU, o otimizador foi o RMSprop, e a função de perda foi o Erro Quadrático Médio (MSE). Como métrica de avaliação, foi adotado o Erro Médio Absoluto (MAE), permitindo uma análise direta da precisão dos resultados.

Essa configuração demonstrou ser adequada para explorar a complexidade dos dados e garantir uma convergência consistente do modelo. O uso da TWP, aliado à arquitetura da rede neural, permitiu uma análise detalhada e precisa das condições de falha simuladas no sistema HVDC, fornecendo uma base sólida para a discussão dos resultados.

9 RESULTADOS

O modelo de rede neural MLP, aliado à TWP como técnica de extração de características, demonstrou um desempenho promissor na localização de faltas em linhas de transmissão HVDC, com características que reforçam sua aplicabilidade em sistemas reais. Como ilustrado na Figura 2, o erro médio absoluto (MAE) variou entre 2 e 3 km ao longo da linha de transmissão, que possui 200 km de extensão. Essa precisão é notável, considerando o tamanho total da linha e a complexidade dos cenários simulados.

Figura – MLP TWP: MAE e Desvio Padrão ao Longo da Linha de Transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise detalhada dos resultados revelou que cerca de 32,4% das previsões da localização de falta apresentaram erros no intervalo de -1 a 1 km, correspondendo a um erro absoluto inferior a 0,5% do comprimento total da linha. Este nível de acurácia reflete a robustez do modelo mesmo diante de variabilidades nas características de falha, como diferenças na resistência de falha e posição ao longo da linha.

Em termos de métricas gerais, o modelo alcançou um erro médio absoluto de 2,57 km, equivalente a 1,29% do comprimento total da linha, com um desvio padrão de 2,7 km. Esse

desempenho demonstra uma precisão consistente e adaptável, sobretudo em condições de falha associadas a resistências mais elevadas, nas quais o modelo exibiu notável estabilidade. Além disso, o erro médio manteve-se estável, evidenciando a aplicabilidade prática da solução em condições reais.

Outro ponto crucial é a contribuição do sistema para a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia em redes HVDC, especialmente considerando que essas linhas são frequentemente utilizadas para integrar fontes renováveis, como parques eólicos e usinas solares. Ao mitigar interrupções na transmissão, o modelo MLP-WPT fortalece a viabilidade de redes sustentáveis e resilientes, promovendo uma transição energética mais limpa e eficiente.

Embora o modelo tenha apresentado desempenho robusto, há margens para melhorias, especialmente em cenários críticos, como falhas de curta distância e baixa resistência. Ajustes específicos nesses casos podem aumentar a confiabilidade do sistema e, consequentemente, ampliar sua aplicação em ambientes ainda mais exigentes. Um sistema de localização de falta eficaz viabiliza a solidificação de sistemas HVDC como fontes de transmissão de energia.

10 CONCLUSÃO

Do ponto de vista técnico, a arquitetura proposta alia precisão e robustez em um sistema computacional eficiente, reduzindo significativamente os custos e o tempo de resposta em situações de falha. Adicionalmente, a utilização de técnicas avançadas de pré-processamento, como a TWP, demonstra como ferramentas modernas podem aprimorar a análise de sinais complexos, permitindo que modelos de aprendizado de máquina alcancem níveis elevados de desempenho.

Em um contexto ambiental, os benefícios da solução proposta são igualmente notáveis. Ao possibilitar uma identificação rápida e precisa de falhas, o modelo reduz a duração de interrupções no fornecimento de energia, diminuindo o impacto de paradas imprevistas em sistemas que integram fontes renováveis. Essa eficiência operacional não apenas aumenta a confiabilidade das redes de transmissão, mas também promove a redução de emissões de gases de efeito estufa associadas a manobras corretivas e ao uso de fontes menos sustentáveis como alternativa imediata. Além disso, o monitoramento automatizado e remoto reduz a necessidade de intervenções presenciais frequentes, contribuindo para a diminuição da pegada de carbono das operações de manutenção.

Apesar dos resultados promissores, o estudo aponta caminhos claros para avanços futuros. Ajustes direcionados para otimizar o desempenho em cenários críticos, como falhas de curta distância ou baixa resistência, podem elevar ainda mais a precisão e a confiabilidade do modelo. Paralelamente, a integração com sistemas de monitoramento em tempo real e a aplicação em redes de maior escala abrirão novas possibilidades para o uso prático dessa tecnologia.

Conclui-se, portanto, que o modelo de MLP com transformada Wavelet Packet não apenas representa uma solução viável e eficiente para a localização de falhas em sistemas de transmissão HVDC, mas também reforça a importância de abordagens tecnológicas no avanço de soluções sustentáveis para o setor elétrico. Ao aliar desempenho técnico de ponta com

benefícios ambientais, o trabalho posiciona-se como uma referência para o desenvolvimento de métodos inovadores que respondam simultaneamente às demandas de confiabilidade operacional e de preservação ambiental, essenciais para um futuro energético mais sustentável e resiliente.

11 REFERÊNCIAS

- ALAM, M.; RAHAMAN, M.; DHALI, F.; STUDENT, U. Technical comparison of modern HVAC and HVDC transmission system along with cost analysis. **Journal of Control and Instrumentation Engineering**, v. 8, 2022. DOI: 10.46610/JCIE.2022.v08i01.002.
- ALPSALAZ, F.; YALÇINÖZ, Z.; KAYGUSUZ, A.; MAMIŞ, M. S. Fault location prediction in power transmission lines using an artificial neural network model. In: **2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)**, Malatya, Turquia, 2024, p. 1-6. DOI: 10.1109/IDAP64064.2024.10710637.
- ANDERSEN, B. R. HVDC projects – management of environmental issues. In: **High Voltage DC Transmission Systems: HVDC**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 1-59.
- BERTHO JUNIOR, R. et al. Análise espectral das tensões e correntes durante a ocorrência de faltas em uma linha HVDC. In: **XX Congresso Brasileiro de Automática**. Belo Horizonte: [s.n.], 2014. p. 684-691.
- FARGHALI, M. et al. Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 3, p. 1381-1418, 2023.
- FARKHANI, J. S.; ÇELİK, Ö.; MA, K.; BAK, C. L.; CHEN, Z. A comprehensive review of potential protection methods for VSC multi-terminal HVDC systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 192, p. 114280, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114280.
- FRENKEL, S. **SOO green HVDC link**. 2020.
- HUSIN, H. et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. **Protection and Control of Modern Power Systems**, v. 6, n. 1, p. 1-18, 2021. DOI: 10.1186/s41601-021-00181-3.
- KALAIR, A.; ABAS, N.; KHAN, N. Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1653-1675, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.288.
- MATHEBULA, J.; MBULI, N. Potential factors for HVDC evaluation in selection of the suitable location within HVAC system. In: **2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)**, Melbourne, Austrália, novembro 2024, p. 1-6. IEEE.
- MERZAH, A.; ABBAS, A.; TUAIMAH, F. Enhancing power transmission stability with HVDC systems during load contingencies. **Journal Européen des Systèmes Automatisés**, v. 57, p. 177-185, 2024. DOI: 10.18280/jesa.570118.
- MUNIAPPAN, M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems. **Protection and Control of Modern Power Systems**, v. 6, n. 1, p. 1-20, janeiro 2021. DOI: 10.1186/s41601-020-00173-9.
- MUSHI, A. T.; SUWI, O.; JUSTO, J. J. Overview of renewable energy power system dynamics. In: **Modelling and Control Dynamics in Microgrid Systems with Renewable Energy Resources**. Academic Press, 2024. p. 3-18.
- NGUYEN, Q.; ETINGOV, P.; ELIZONDO, M. A. Characterizing HVDC transmission flexibility under extreme operating conditions. In: **2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)**, 2023. DOI: 10.1109/ISGT51731.2023.10066347.
- PILLAY, C. J.; KABEYA, M.; DAVIDSON, I. E. Transmission systems: HVAC vs HVDC. In: **5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, v. 10, agosto 2020.
- PURIFICAÇÃO, Rafael Alexandre do Nascimento; RAMOS, Heidy Rodriguez; KNISS, Cláudia Terezinha. Barreiras e facilitadores para o uso da energia fotovoltaica: uma revisão sistemática da literatura. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: [10.17271/1980082716220202327](https://doi.org/10.17271/1980082716220202327). Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/2327. Acesso em: 17 mar. 2025.

PRAGATI, N. et al. A comprehensive survey of HVDC protection system: fault analysis, methodology, issues, challenges, and future perspective. **Energies**, v. 16, n. 11, p. 4413, 2023.

RAHMAN, S. et al. A comparison review on transmission mode for onshore integration of offshore wind farms: HVDC or HVAC. **Electronics**, v. 10, n. 12, p. 1489, 2021. DOI: 10.3390/electronics10121489.

RAMESH, M.; LAXMI, A. J. Fault identification in HVDC using artificial intelligence — recent trends and perspective. In: **2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation**, Thrissur, Índia, 2012, p. 1-6. DOI: 10.1109/EPSCICON.2012.6175256.

RIBEIRO, Guilherme Fernando; BRAGHINI JUNIOR, Aldo. Utilização de resíduos agrícolas para geração de bioenergia: apresentação de cinco ideias para os setores industriais. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 19, n. 5, 2023. DOI: [10.17271/1980082719520234733](https://doi.org/10.17271/1980082719520234733). Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/4733. Acesso em: 17 mar. 2025.

ROHANI, R.; KOOCHAKI, A. A hybrid method based on optimized neuro-fuzzy system and effective features for fault location in VSC-HVDC systems. **IEEE Access**, v. 8, p. 70861-70869, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986919.

SCENIC AMERICA. **Scenic America | Protecting America's Scenic Beauty and Fighting Visual Blight**. 2023. Disponível em: <https://www.scenic.org/>. Acesso em: 5 jun. 2024.

WANG, W.; LI, G.; GUO, J. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals. **Engineering**, v. 19, p. 252-267, 2022. DOI: 10.1016/j.eng.2022.04.017.

WATSON, N. R.; WATSON, J. D. An overview of HVDC technology. **Energies**, v. 13, n. 17, p. 4342, 2020. DOI: 10.3390/en13174342.

YOUSAF, M. Z. et al. Enhancing HVDC transmission line fault detection using disjoint bagging and Bayesian optimization with artificial neural networks and scientometric insights. **Scientific Reports**, v. 14, p. 23610, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-74300-z.

ZHANG, Y.; YU, Y. An ultra-high-speed MMC-HVDC fault location algorithm based on regression neural network. In: **2024 16th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)**, Melbourne, Austrália, 2024, p. 725-729. DOI: 10.1109/ICCAE59995.2024.10569805.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios. A seguir, será apresentada a distribuição da contribuição específica de cada autor para a realização deste trabalho, destacando suas respectivas responsabilidades e participações ao longo do processo de pesquisa e desenvolvimento do estudo.

- **Concepção e Design do Estudo:** Rui Bertho Junior.
 - **Curadoria de Dados:** Messias Silva de Melo e Guilherme Alexandre Lopes Neto.
 - **Análise Formal:** Messias Silva de Melo.
 - **Aquisição de Financiamento:** Não aplicável.
 - **Investigação:** Messias Silva de Melo e Guilherme Alexandre Lopes Neto.
 - **Metodologia:** Messias Silva de Melo e Rui Bertho Junior.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Messias Silva de Melo.
 - **Redação - Revisão Crítica:** Rui Bertho Junior e Hermes Manoel Galvão Castelo Branco.
 - **Revisão e Edição Final:** Messias Silva de Melo.
 - **Supervisão:** Rui Bertho Junior e Hermes Manoel Galvão Castelo Branco.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Messias Silva de Melo, Guilherme Alexandre Lopes Neto, Hermes Manoel Galvão Castelo Branco e Rui Bertho Junior**, declaramos que o manuscrito intitulado **“Localização de Falhas em Sistemas HVDC Utilizando Perceptron Multicamadas e Transformada Wavelet Packet: Uma Abordagem Sustentável para a Integração de Energias Renováveis”**:

1. **Vínculos Financeiros:** “Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo”.
 2. **Relações Profissionais:** “Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida”.
 3. **Conflitos Pessoais:** “Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado”.
-