

Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Através de Transformada de Wavelet Contínua, Pontos de Extremo e Teoria de Ondas Viajantes

Fernando Ferreira Lucas
Universidade Católica de Pelotas
Companhia Estadual de Energia
Elétrica - CEEE
Pelotas, RS, Brasil
fernando.lucas@sou.ucpel.edu.br

Everton Granemann Souza
Universidade Católica de Pelotas
Pelotas, RS, Brasil
everton.granemann@ucpel.edu.br

Chiara das Dores do
Nascimento
Universidade Católica de Pelotas
Pelotas, RS, Brasil
chiara.nascimento@ucpel.edu.br

ABSTRACT

In this paper, we present a hybrid algorithm for electrical fault location based on the traveling wave theory. The temporal location of fault points and the first reflected waves has been determined with continuous wavelet transforms (CWT) and concepts of extreme values, respectively. The analyzed signals were created by the software ATPDraw considering parameters of a real high voltage line situated between the cities of Pelotas and Candiota, both in the state of Rio Grande do Sul. Phase-to-ground faults for different transmission line lengths, incidence angles, and fault resistances have been analyzed. The results showed the efficiency of this type of algorithm, exhibiting low relative errors, mainly for nonzero incident angles.

KEYWORDS

SMART GRIDS, ATPDRAW, TRANSFORMADA DE WAVELET CONTÍNUA, ONDAS VIAJANTES, TRANSFORMADOR POTENCIAL CAPACITIVO

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de transmissão de energia elétrica deve permanecer estável e funcionando continuamente para que atenda aos requisitos de qualidade e segurança estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)[1]. Embora a ANEEL seja a agência reguladora, a transmissão de energia elétrica no Brasil é controlada por outro órgão, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [2], que constitui de um aglomerado de empresas de todo o país, trabalhando de forma interligada, formando assim o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN).

As dimensões continentais do Brasil fazem a extensa estrutura do SIN ser susceptível a diversos tipos de falhas elétricas [3]. No âmbito da análise de falhas, uma das mais severas, e também mais frequente, ocorrendo em aproximadamente 70% dos casos, é a de curto-circuito, decorrente da ruptura da isolação entre fases ou entre uma fase e o terra [4, 5]. A forma do sinal e a magnitude da corrente de curto-circuito dependem de vários fatores, como a capacidade do sistema de geração, topologia do sistema, método de conexão, ângulo de incidência, distância elétrica da falha em relação às unidades geradoras, dentre outros.

O conhecimento de tais variáveis é fundamental para o design e a parametrização de relés de proteção, que desligam setores problemáticos da rede elétrica, objetivando sempre a rápida detecção da localização da falta, evitando o mal funcionamento de componentes do sistema e garantindo a continuidade de fornecimento de energia elétrica [6].

Devido a grande quantidade de variáveis envolvidas, diversas técnicas de localização de falhas são encontradas na literatura. No âmbito geral, os algoritmos utilizam filtros baseados em transformadas janeladas de Fourier e de Wavelet combinadas com técnicas de redes neurais [7], lógica fuzzy [8], filtros morfológicos [9], equações diferenciais [10] e teoria de ondas viajantes [11, 12].

Estas últimas, baseadas na fusão de transformadas de Wavelet com teoria das ondas viajantes, têm se destacado pela grande acurácia dos seus resultados [13]. No entanto, não há um consenso geral na literatura sobre qual é a melhor maneira de combinar tais técnicas, principalmente em relação a detecção das ondas de reflexão do sinal de falta.

Neste trabalho, apresentaremos um algoritmo híbrido para localização de falhas baseado na teoria de ondas viajantes, transformadas de wavelets contínuas, e cálculo de pontos de extremo. Para detecção do ponto de falta, decomporemos o sinal originalmente descrito no domínio do tempo, através da transformada contínua de wavelet, e determinaremos o instante de ocorrência da falta. Em seguida, as ondas refletidas serão determinadas a partir de um critério de seleção baseado nos máximos e mínimos locais subsequentes ao ponto de falta.

Para todos os testes, os sinais serão simulados com o software ATPDraw [14], uma versão gráfica do software ATP-EMTP, desenvolvido especificamente para análise de transitórios eletromagnéticos. Os parâmetros utilizados na simulação foram obtidos a partir de dados reais de uma linha de transmissão (LT) de 128 km, acoplada a um transformador potencial capacitivo (TPC), que liga as cidades de Candiota e Pelotas, ambas situadas no estado do Rio Grande do Sul. Durante os testes, foram realizadas falhas do tipo fase-terra, com variações da distância do ponto de falta até o relé de proteção e do ângulo de incidência da falta, ambos descritos na literatura como principais fontes de erro na modelagem com ondas viajantes [13].

A organização do trabalho será feita da seguinte maneira. Na seção II descreveremos os parâmetros utilizados na modelagem da LT e do TPC e ilustraremos um exemplo de sinal de falta do tipo

fase-terra. Na seção III descreveremos a transformada contínua de wavelet e o escalograma do sinal da falta exibida na seção II. Na seção IV explicaremos a teoria de ondas viajantes e deduziremos as expressões para localização dos pontos de falta. Na seção V discutiremos o algoritmo proposto e os resultados obtidos, e na seção VI concluiremos o trabalho.

2 DESCRIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO E DOS SINAIS DE FALTA

Para avaliar e validar a técnica de localização de faltas através de ondas viajantes, foram utilizados os parâmetros elétricos da LT que interliga a Usina Presidente Médici (UPME), localizada no município de Candiota-RS, à subestação Pelotas 3 (PEL3) na cidade de mesmo nome. A tabela 1 ilustra esses parâmetros.

Tabela 1: Parâmetros da Linha de Transmissão, com extensão de 128 km, referentes a sequência positiva (+) e sequência zero (0)

$R+$ (Ω/km)	$R0$ (Ω/km)	$C+$ (nF/km)	$C0$ (nF/km)	$L+$ (mH/km)	$L0$ (mH/km)
0,0568	0,4109	9,0000	5,4000	1,2750	4,1610

O patamar de carga também pode influenciar na morfologia das faltas e pode ser classificado como leve, médio e pesado, de acordo com o intervalo de tempo em que ocorre o consumo de energia elétrica [15]. Nas simulações, por livre escolha, foi considerado um patamar de carga leve para a Subestação Pelotas 3 (SE PEL3), com a escolha da potência complexa no valor de $\hat{S} = 66 + j6 \text{ VA}$.

Para obter uma solução com alto grau de precisão deve-se considerar que os parâmetros de uma LT não estão concentrados em um ponto, mas sim, uniformemente distribuídos ao longo de todo o seu comprimento. Essa é uma das características que define uma *linha com parâmetros distribuídos*. A figura 1 mostra vários trechos monofásicos desse tipo de LT, consistindo de n comprimentos infinitesimais, Δx_i , onde, L , R e C são, respectivamente, a indutância, a resistência em série e a capacitância shunt da linha por unidade de comprimento. Adotaremos para esse modelo de LT e os dados da tabela 1 para todas as análises desse trabalho. Além disso, para diminuir os efeitos de acoplamento entre as fases, a simetria elétrica da LT foi obtida através de transposição de fases em toda a extensão.

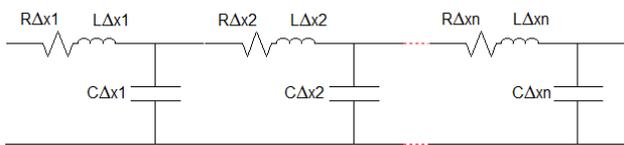


Figura 1: Representação genérica de uma linha de transmissão modelada com parâmetros distribuídos

Na modelagem da LT no software ATPDraw, foi utilizado o componente LINE3 que, com exceção das descargas atmosféricas, permite simular todos os tipos de falta nas quais uma linha de transmissão está susceptível. Nesse componente é possível variar o ponto e a resistência de falta bem como sua duração.

Para detecção de faltas em situações reais, os relés de proteção microprocessados necessitam de um transformador para reduzir a tensão da LT a níveis adequados de leitura. Então, para aumentar a fidedignidade dos resultados, a medição de tensão no barramento da SE PEL3 foi realizada através de um transformador de potencial capacitivo (TPC), cujo modelo leva em consideração as não linearidades dos núcleo ferromagnéticos desse transformador. A topologia da LT considerada para aplicação de curtos circuitos fase - terra bem como o TPC estão ilustrados na figura 2

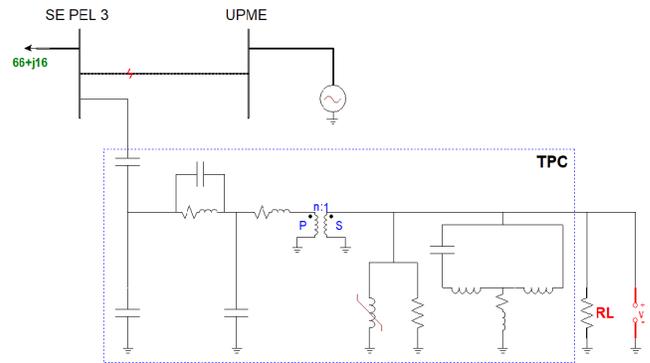


Figura 2: Circuito elétrico analisado no ATPDraw

Na figura 3, temos o exemplo de uma falta fase-terra, com a duração $\Delta t = 0.2 \text{ s}$, devido a um curto-circuito, causado a 12,8 km do relé de proteção situado no barramento da UPME, equivalente à 10% do comprimento total da linha. Após um transiente de energização dos capacitores presentes no TPC, nos instantes iniciais, a falta inicia-se com um pico de sobretensão em $t = 0.1 \text{ s}$. Em $t = 0.3 \text{ s}$ a falta é interrompida e o sistema entra em regime de estabilização com a rede elétrica voltando a oscilar próximo da frequência $\omega = 60 \text{ Hz}$. Repare que nessa configuração as faltas são caracterizadas principalmente por transições abruptas, associadas à componentes de alta frequência. Essa característica, comum aos sinais de falta, garante que transformadas como a de wavelet e de Fourier registrem picos de falta em frequências diferentes da frequência de oscilação da rede elétrica, conforme veremos na próxima seção.

3 TRANSFORMADA DE WAVELET CONTÍNUA

A transformada de wavelet contínua decompõe um sinal, $x(t)$, definido no domínio do tempo em outro, no domínio do tempo e da frequência. A maneira tradicional de analisar essa decomposição é plotar as variáveis de tempo e frequência por meio de um escalograma do sinal, onde a terceira dimensão, usualmente representada por uma cor, é o módulo quadrado da transformada contínua de wavelet, conforme veremos a seguir. No domínio do tempo, a transformada contínua de wavelet pode ser definida como [16, 17]:

$$CWT(a, b)(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

onde $\psi^*(\cdot)$ indica o complexo conjugado da wavelet mãe $\psi(\cdot)$, b é o parâmetro de translação da wavelet mãe $\psi(\cdot)$ em relação ao tempo t e a é o parâmetro de escala. O termo $1/\sqrt{|a|}$ é o fator de

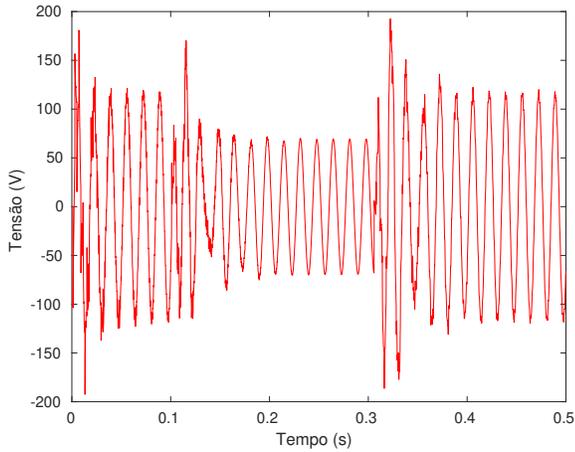


Figura 3: Exemplo de falta fase-terra medida no secundário do TPC. O tempo de duração da falta é $\Delta t = 0.2$.

normalização que garante que a energia de $\psi(\cdot)$ seja independente dos parâmetros a e b . A escolha da wavelet mãe depende muito da forma geométrica da falta e também do sinal como um todo, além disso, deve obedecer condições de admissibilidade e ter energia unitária para que possa ser reconstruída sem perdas de informação [18]. De maneira geral, quando os valores do parâmetro de escala a são pequenos, temos wavelets comprimidas, que se ajustam com segmentos do sinal que possuem mudanças rápidas e consequentemente, se relacionam com as altas frequências, como é o caso das faltas que analisaremos nesse trabalho. Da mesma maneira, valores grandes de a registram as mudanças mais lentas do sinal, associadas com as frequências mais baixas. Para esse trabalho utilizaremos como wavelet mãe a função wavelet generalizada de Morse [19, 20], que se destaca na literatura para análise de sinais modulados tanto na amplitude como na frequência e de descontinuidades. Ela é comumente definida no domínio da frequência como

$$\psi_{\beta,\gamma}(\omega) = U(\omega)\alpha_{\beta,\gamma}\omega^\beta e^{-\omega^\gamma} \quad (2)$$

onde $U(\omega)$ é a função de Heaviside. O termo $\alpha_{\beta,\gamma}$ é uma constante de normalização da wavelet. Os parâmetros β e γ são responsáveis pelo decaimento ou compacidade e simetria da função wavelet, respectivamente, mudando assim sua forma [21]. Assim, para que haja uma clara correspondência entre a equação 1, a equação 2 e o sinal analisado $x(t)$, a equação 1 deve ser reescrita no domínio da frequência:

$$CWT(a,b)(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{\beta,\gamma}^*(\omega)X(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

onde $\psi(\omega)$ é a transformada de Fourier da wavelet $\psi(t)$ e $X(\omega)$ é a transformada de Fourier do sinal analisado $x(t)$. Para nossas análises, utilizamos um parâmetro de simetria $\gamma = 3$ e um parâmetro de decaimento $\beta = 20$.

Na figura 4 temos o resultado do escalograma da falta produzida na figura 2, onde a escala de cores representa o módulo quadrado de $\psi(\cdot)$.

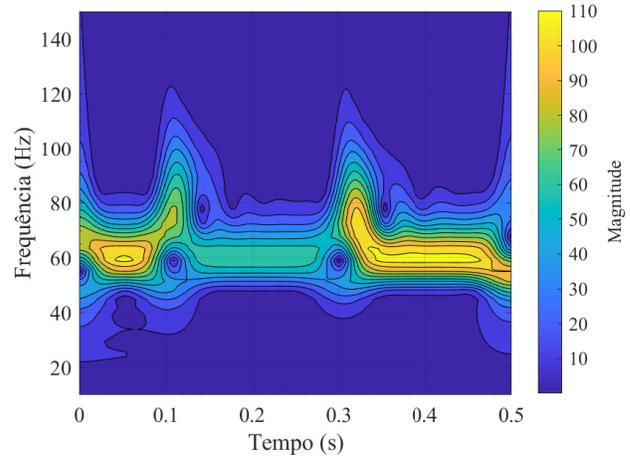


Figura 4: Escalograma da transformada de Wavelet contínua do sinal exibido na figura 3

Perceba que a magnitude do módulo quadrado dos coeficientes da wavelet possuem um valor alto para frequência de $\omega = 60$ Hz, para o intervalo de tempo entre $0.1 > t > 0.3$ s, que indica a dominância da frequência da rede elétrica nessa região. Também fica evidente o aumento da frequência na região de falta quando $t = 0.1$ s. Essa mudança abrupta no sinal produz um aumento nos coeficientes da wavelet centralizados próximos a essa descontinuidade, não só nas escalas menores mas em basicamente todas as escalas.

4 TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

Ondas viajantes são ondas de corrente e tensão que viajam de um extremo ao outro ponto da linha de transmissão. Quando ocorre uma falta, de acordo com a teoria das ondas viajantes [22], tanto a corrente quanto a tensão sofrem refrações e reflexões tanto no ponto de falta quanto nos extremos, onde estão localizados terminais (barramentos) de medição. Assim, é possível identificar picos nos sinais de tensão e corrente os quais possibilitam o cálculo do instante de ocorrência da falta. Graficamente, podemos visualizar esses fenômenos utilizando o diagrama de Bewley [23] (do inglês: *Bewley's lattice diagram*) para uma linha com extremos A e B situados a uma distância l entre eles conforme indica a figura 5:

Supondo que t_{1A} e t_{1B} correspondam aos tempos que duas ondas viajam do ponto de falta até os terminais A e B, respectivamente, se assumirmos que o sinal é medido no terminal A, a diferença de tempo entre a primeira (t_{1A}) e segunda reflexão (t_{2A}) em A pode ser relacionada com a distância x até o ponto de falta através da seguinte relação:

$$x = \frac{v(t_{1A} - t_{2A})}{2} \quad (4)$$

onde $v = 1/\sqrt{LC}$ é a velocidade de fase de propagação das ondas de correntes e tensão na linha de transmissão, C e L são a capacitância e indutância da linha, respectivamente. Nesse trabalho, para fins práticos e ideais, consideraremos v igual a velocidade da luz c (linha sem atenuação e sem perdas). Equivalentemente, para o terminal de medição B, obteríamos a seguinte relação geométrica:

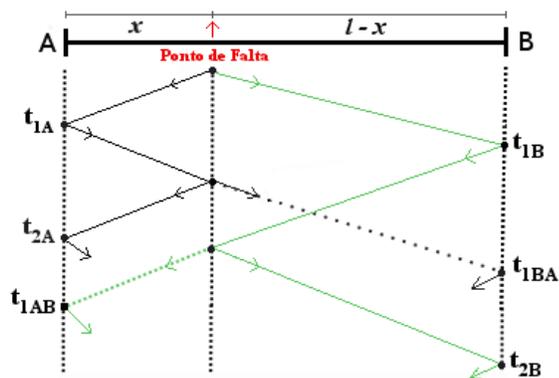


Figura 5: Diagrama de Bewley para ilustração da teoria de ondas viajantes.

$$x = l - \frac{v(t_{1B} - t_{2B})}{2} \quad (5)$$

onde $l - x$ é a distância do ponto de falta até o terminal B. Caso o ponto de falta estivesse localizado a uma distância maior que a metade da linha, para uma medição em A, a onda associada ao tempo t_{1AB} chegaria antes ao ponto A do que a onda referente ao ponto t_{2A} (não visível na figura), logo, a distância do ponto de falta seria calculada de maneira análoga à equação anterior, levando em conta as devidas modificações no índices de tempo

$$x = l - \frac{v(t_{1A} - t_{1AB})}{2} \quad (6)$$

5 RESULTADOS E ALGORITMO PROPOSTO

Para detecção dos instantes de falta, foi utilizado os coeficientes de wavelet de escala 1, já que os mesmos se associam com as altas frequências e representam melhor tanto o instante da falta quanto suas reflexões, conforme discutido na seção III. O algoritmo adotado consiste na aplicação direta da transformada contínua de wavelet no sinal de tensão para a fase onde ocorreu a falta, que para todos os casos analisados, foram do tipo fase-terra. As outras duas fases, embora sofram perturbações devido ao acoplamento dos sinais, foram ignoradas. Em seguida, a primeira reflexão foi obtida através da detecção do primeiro máximo consecutivo a falta. Para assegurar sua localização, foram aplicados conceitos de pontos de extremo (cálculos de máximos e mínimo) através do conceito de derivada. A exclusão de falsos máximos, é garantida através do cruzamento das informações dos picos detectados no sinal de tensão com os picos detectados na wavelet, que possuem morfologias diferentes. Assim, foi determinado uma distância limiar entre picos, pois em alguns casos, quando a geometria do sinal de falta possui formato quadrado, e a wavelet detecta dois máximos onde deveria haver somente um, conforme exibido na figura 6. A frequência de amostragem também possui bastante influência na alturas dos picos da transformada de wavelet. Nesse trabalho adotamos uma frequência de amostragem $f_s = 1.4$ MHz. Na tabela 2 temos as condições consideradas para localização das faltas totalizando oito séries temporais com parâmetros distintos.

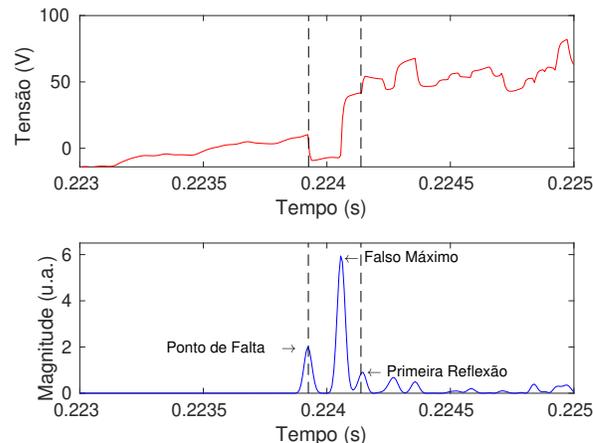


Figura 6: Exemplo de falso máximo gerado entre o ponto de falta e a sua primeira reflexão. Para essa simulação foi utilizado um ângulo de incidência de falta de 0° , resistência de falta de 10Ω e uma distância do ponto de falta até o ponto de medição de 32 km.

Os resultados sugerem que para um ângulo de incidência de falta baixo, $\theta = 0^\circ$, o algoritmo possui dependência dos valores das resistências de falta, e um erro relativo alto, contudo não revela nenhum padrão definido para essa dependência. No entanto, para $\theta = 90^\circ$, percebe-se um diminuição do erro relativo, indicando que tanto o ponto de falta na LT quanto o valor da resistência de falta tornam-se menos relevantes para as localização das mesmas.

Tabela 2: Condições de falta avaliadas

Ângulo ($^\circ$)	0				90			
Distância real (km)	32	76	32	76	32	76	32	76
Resist. de Falta (Ω)	10	100	10	100	10	100	10	100
Distância Simulada (km)	31.49	45.14	53.55	69.29	30.45	30.45	71.4	69.3
Erro Relativo (%)	1.59	40.9	29.5	8.8	4.84	4.84	6.0	8.8

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, estudamos um algoritmo para detecção de faltas baseado em transformadas contínuas de wavelet, cálculo de pontos de extremo e teoria de ondas viajantes. Para geração do sinal elétrico, foi utilizado o software ATPDraw onde foi simulado uma linha de transmissão de 128 km que conecta as cidades de Pelotas e Candiota. Além disso, um TPC foi conectado a subestação de Pelotas para

efetuar as medidas do sinal de tensão, levando em conta assim também as não linearidades dos núcleos ferrosos do transformador.

Em todos os testes foram geradas faltas do tipo fase-terra. Os resultados exibidos na tabela 2 sugerem que o algoritmo implementado possui alta dependência da resistência e do ponto de falta para ângulos de incidência de falta de $\theta = 0^\circ$. O mesmo fenômeno não se repete quando $\theta = 90^\circ$ já que os valores dos erros relativos foram inferiores a 8.8%. É sabido que em linhas de transmissão trifásicas há um acoplamento mútuo entre as fases o que impacta diretamente as ondas viajantes. Isso significa que não há uma velocidade de propagação única para cada fase, o que pode ser resolvido por meio de uma redução dimensional transformando as tensões e correntes de fase para o domínio modal aplicando transformadas como a de Clarke, Karrembauer ou análise de componentes principais (ACP) (do inglês: *PCA (Principal Component Analysis)*). Acreditamos que a ausência de tais transformações e do efeito de dispersão na velocidade das ondas refletidas sejam as principais fontes de erro no algoritmo proposto.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). <http://www.aneel.gov.br>, 2019.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). [www.http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema](http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema), 2019.
- [3] P. M. Anderson. *Power System Protection*. McGraw Hill, 1st edition, 1998.
- [4] H. A. Rocha Jr. Limitação de correntes de curto-circuito em sistemas elétricos industriais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1982.
- [5] P. C. K. Decourt. Facilidades do programa anafas para estudos de curto-circuito e proteção de sistemas de energia elétrica. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [6] J. Mamede Filho. *Manual de Equipamentos Elétricos*. LTC, 4ª edição, 2013.
- [7] A. Yadav and Y. Dash. An overview of transmission line protection by artificial neural network: fault detection, fault classification, fault location, and fault direction discrimination. *Adv. Artif. Neural Syst.*, pages 1–21, 2014. doi: 10.1109/.
- [8] T. Nguyen and Y. Liao. Transmission line fault type classification based on novel features and neuro-fuzzy system. *Electr. Power Compon. Syst.*, 6(38):695–709, 2010. doi: 10.1109/.
- [9] P. A. H. Cavalcante. Localização de faltas em linhas de transmissão usando morfologia matemática. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [10] R. A. Macedo e D. V. Coury. Um esquema completo para proteção rápida de linha de transmissão com o uso de equações diferenciais. *Revista Controle & Automação*, 2(14), 2003. doi: 10.1109/.
- [11] A. R. Almeida J. G. S. Carvalho B. F. S. Junior e F. C. M. Abreu M. H. S. Alves, O. M. Almeida. Teoria das ondas viajantes e filtragem adaptativa de sinais para localização de faltas em linhas de transmissão. *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional - (ABRICO)*, Curitiba, pages 1–6, 2015. doi: 10.1109/.
- [12] F. H. Magnago and A. Abur. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4):1–6, 1998. doi: 10.1109/.
- [13] D. Rasolomampionona e S. Anwar G. Krzysztof, R. Kowalik. Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview. *Journal of Electrical Systems*, 7:287–296, 2011. doi: 10.1109/.
- [14] ATPDraw. <https://www.atpdraw.net/>, 2019.
- [15] Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). www.ccee.org.br, 2019.
- [16] S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA, 3rd edition, 2009.
- [17] I. Daubechies. *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial & Applied Mathematics, 1992.
- [18] M. O. Domingues, O. Mendes, M. K. Kaibara, V. E. Menconi, and E. Bernardes. Explorando a transformada wavelet contínua. *Revista Brasileira de Ensino Física*, 38(3):287–296, Junho 2016. doi: 10.1109/.
- [19] S. C. Olhede and A. T. Walden. Generalized morse wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 11(50):2661–2670, Junho 2002. doi: 10.1109/.
- [20] J. M. Lilly and S. C. Olhede. On the analytic wavelet transform. *IEEE Transactions on Information Theory*, 8(56):4135–4156, 2010. doi: 10.1109/.
- [21] J. M. Lilly and S. C. Olhede. Higher-order properties of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1(57):146–160, 2009. doi: 10.1109/.
- [22] P. C. Magnusson, A. Weisshaar, V. K. Tripathi, and G. C. Alexander. *Transmission Lines and Wave Propagation*. CRC Press, 4th Edition, 2000.

- [23] L. V. Bewley. *Travelling Waves on Transmission Systems, Chapters 1-4*. Dover Publications, 2nd edition, Mineola, NewYork, 1963.