



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado de Engenharia Elétrica

LUCAS DA SILVA LOPES

APLICAÇÃO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Bom Jesus da Lapa–BA
Dezembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado de Engenharia Elétrica

Lucas da Silva Lopes

**APLICAÇÃO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior

Bom Jesus da Lapa–BA
Dezembro de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

L864

Lopes, Lucas da Silva

Aplicação das redes neurais artificiais na localização de faltas em linhas de transmissão. / Lucas da Silva Lopes. – 2021.

62f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias da Silva Júnior

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2021.

1. Redes Neurais. 2. Engenharia Elétrica. I. Silva Júnior, Manoel Messias da. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 006.32

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS DA SILVA LOPES

APLICAÇÃO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Esta monografia foi aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 30 de Dezembro de 2021

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior (UFOB)
(Orientador)

Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira (UFOB)

Profa. Dr. Stefânia de Oliveira Silva (UFOB)

Esta monografia é dedicada aos meus pais, irmã e minha namorada, pilares da minha formação como ser humano.

Agradecimentos

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus que tornou possível cada passo dado nessa jornada de graduação. Agradeço também aos meus pais, Cleide e Joaquim, e a minha irmã Geovanna que nunca mediram esforços para que eu alcançasse os meus objetivos.

Agradeço à minha namorada, Bianca, pelo infindável apoio, por estar ao meu lado compartilhando todos os bons e maus momentos. E à todos os meus amigos que direta ou indiretamente colaboraram para que toda essa batalha tivesse um desfecho positivo.

À estimada Professora Andressa Pereira, pelas orientações, ensinamentos e dicas, pelo tempo dedicado a esse trabalho e pela preocupação, disponibilidade, apoio e prestabilidade exaltados por todos que com ela convivem.

*“Onde todos pensam do mesmo jeito, ninguém
pensa muito.”*

(Walter Lippmann)

Resumo

Estudos sobre localização de faltas seguem se expandindo devido o crescimento da quantidade de Linhas de Transmissão (LT)'s no Brasil e no mundo, visando a garantia dos serviços de fornecimento da energia elétrica com qualidade. Assim, métodos que identificam o local de ocorrência de faltas com precisão têm sido frequentemente reportados na literatura com o objetivo de melhorar o processo de restabelecimento de LT's após desligamentos não programados. Dentre as metodologias mais utilizadas, destacam-se métodos inteligentes, a exemplo as redes neurais artificiais, no qual neste trabalho através da *Radial Basis Function* (RBF) expõe-se uma solução para a classificação, detecção e localização das faltas. Fazendo o uso de parâmetros de tensão e corrente, obtidos em um dos terminais da linha através de um relé digital de potência e que com a utilização das Redes Neurais Artificiais (RNA) entregam resultados com precisão média de 92,32% validando a utilização dos métodos inteligentes aplicada a identificação dos distúrbios e garantia da continuidade do transporte e fornecimento de energia elétrica.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais, Faltas em Linhas de Transmissão, Classificação de faltas, Localização de faltas

Abstract

Studies on fault location continue to expand due to the growth in the number of Linhas de Transmissão (LT)'s in Brazil and in the world, aiming at guaranteeing quality electric energy supply services. Thus, methods that accurately identify the location of faults have been frequently reported in the literature with the objective of improving the process of restoring LT's after unscheduled shutdowns. Among the most used methodologies, intelligent methods stand out, such as artificial neural networks, in which in this work, through *Radial Basis Function* (RBF), a solution for the classification, detection and location of faults is exposed. Making use of voltage and current parameters, obtained at one of the line terminals through a digital power relay and that with the use of Redes Neurais Artificiais (RNA) deliver results with an average accuracy of 92.32% validating the use of the Intelligent methods applied to the identification of disturbances and guarantee of the continuity of the transport and supply of electric energy.

Keywords: Artificial Neural Networks, Faults in Transmission Lines, Fault Classification, Fault Location.

Lista de Figuras

1	Marcos da Indústria Elétrica.....	16
2	Mapa Sistema de Transmissão - Horizonte 2024.....	17
3	Diagrama de um sistema elétrico de potência.	23
4	Diagrama unifilar.	23
5	Diagramas de impedância e reatância.	24
6	Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta.	25
7	Circuito equivalente de uma linha de transmissão média.....	26
8	Diagrama esquemático de uma linha de transmissão representada por parâmetros distribuídos.	27
9	Propagação de onda eletromagnética resultante de falha elétrica.....	28
10	Localizador de faltas tipo A e diagrama de rede.	29
11	Localizador de faltas tipo D e diagrama de rede.	30
12	Localizador de faltas tipo E e diagrama de rede.	31
13	Diagrama unifilar para a linha compreendida entre os barramentos 1 e 2.....	32
14	Zonas de proteção.....	33
15	Representação RNA genérica	34
16	Redes direta e com cilos	35
17	Etapas da aplicação de uma rede neural.	36
18	Diagrama unifilar da LT proposta.	38
19	Diagrama unifilar da LT estudada.	39
20	Fluxograma dos algoritmos construídos.	40
21	Método classificador da RBF	41
22	Método localizador da RBF	42
23	Gráfico de corrente falta AG	44
24	Gráfico de tensão falta AG	44

25	Gráfico de tensão falta AG com falta em diferentes distâncias	45
26	Gráfico de corrente falta AG com falta em diferentes distâncias	46

Lista de Tabelas

1	Dados característicos da LT	38
2	Parâmetros da RBF	39
3	Resultado da aplicação na classificação.....	43
4	Resultado da aplicação na localização.....	45

Lista de Programas

1	Algoritmo RBF no Matlab.....	52
---	------------------------------	----

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ATP	<i>Alternative Transient Program</i> [®]
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LT	Linhas de Transmissão
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
MSE	<i>Mean squared error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVR	<i>Support Vector Regression</i>
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDR	Transformada Wavelet Discreta Redundante
UFOB	Universidade Federal do Oeste da Bahia

Lista de Símbolos

Δ	Letra grega delta maiúscula
δ	Letra grega delta minúscula
γ	Letra grega gama minúscula
λ	Letra grega lambda minúscula
ζ	Letra grega zeta minúscula
π	Letra grega Pi
γ	Impedância característica da linha
l	Comprimento
Hz	Hertz
A	Ampere
I	Corrente
V	Volt
W	Watt
Y	Admitância
Z	Impedância

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específico.....	18
1.3	Justificativa	18
1.4	Estado da Arte.....	19
1.5	Organização do trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Sistema elétrico de potência.....	22
2.1.1	Modelagem do SEP.....	24
2.2	Propagação de ondas em linhas polifásicas	28
2.3	Relé digital de potência	29
2.4	Proteção dos sistemas elétricos de potência.....	31
2.5	Redes neurais artificiais	34
2.5.1	Redes neurais artificiais aplicadas a faltas em LT.....	36
2.5.2	<i>Radial Basis Function</i> (RBF)	37
3	APLICAÇÃO DAS RNA's PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LT	38
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	51
	Apêndice	52
A	ALGORITMO PARA A APLICAÇÃO DA RBF	52

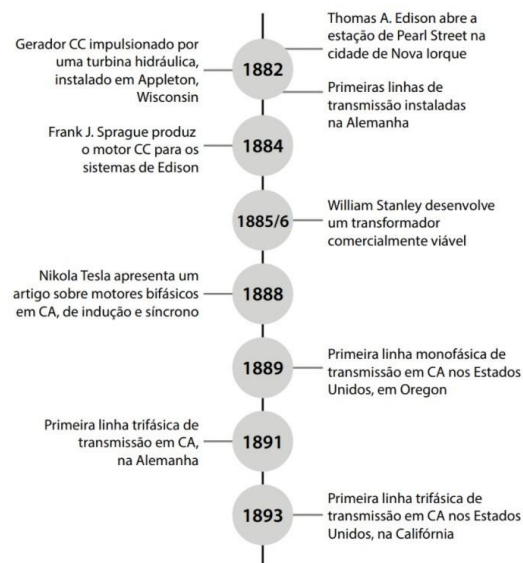
A.1	Algoritmo de classificação das faltas.....	52
A.2	Algoritmo de Localização das faltas	56

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Historicamente, a geração de energia elétrica é datada do ano de 1882, no qual houve a tão conhecida batalha das correntes, sendo confrontada a geração e transmissão de energia em Corrente Contínua (CC) *versus* a Corrente Alternada (CA), prevalecendo a energia CA em virtude da sua capacidade de elevação dos níveis de tensão, propiciando um transporte mais econômico da energia, na Figura 1 são detalhados os marcos históricos da indústria elétrica (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011).

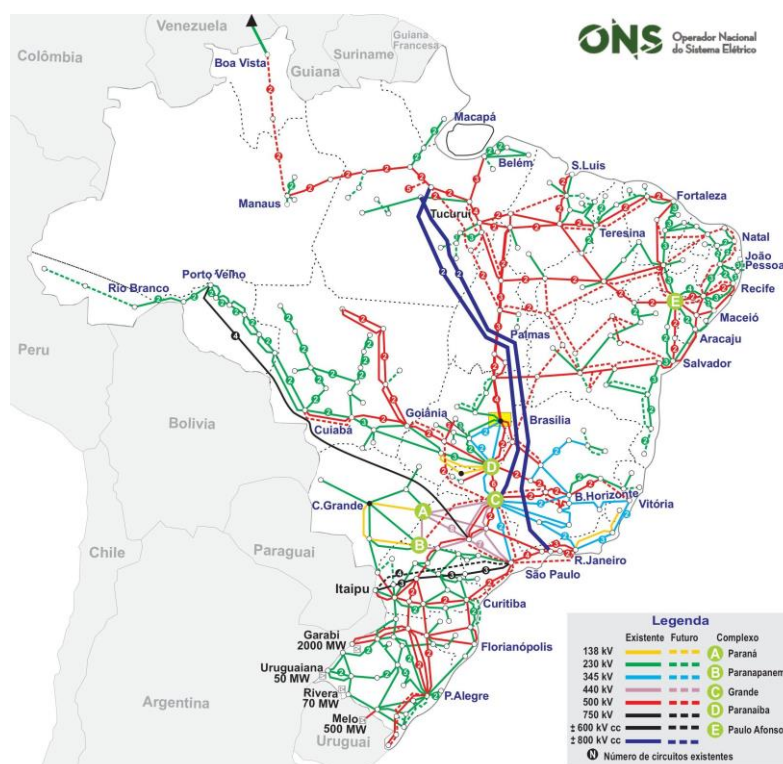
Figura 1 – Marcos da Indústria Elétrica



Fonte: (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011)

"O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários."(ONS, 2021). Dividido em geração, transmissão e distribuição, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como um dos principais elementos as linhas de transmissão, com a capacidade de transportar grandes quantidades de energia, partindo dos centros de produção aos centros de consumo. Por apresentar grandes extensões, as linhas de transmissão são suscetíveis a distúrbios provenientes da ação dos ventos, chuvas, descargas atmosféricas e a presença de animais ou objetos provocando curtos circuitos. Na Figura 2 é apresentada a extensão do sistema de transmissão brasileiro (ROBBA et al., 2020).

Figura 2 – Mapa Sistema de Transmissão - Horizonte 2024.



Fonte: (ONS, 2021).

O curto-circuito dá origem a correntes elevadas circulando em todos os elementos energizados do sistema de potência, este é a causa de falha mais comum entre os sistemas de potência, outra anormalidade recorrente é a sobrecarga podendo ocasionar danos materiais significativos. Ademais, existem outros dois eventos, não menos severos, que podem ocorrer nos sistemas elétricos: as sub e sobretensões com diferentes origens, desde descargas atmosféricas até manobras no sistema (FILHO; MAMEDE, 2020).

Desta forma, devido a sua susceptibilidade aos distúrbios, a obtenção de um diagnóstico rápido e preciso dos defeitos ocorridos no sistema de transmissão é de fundamental importância para o seu pronto restabelecimento, visto que o fornecimento de energia elé-

trica na atualidade é importante para o dia a dia do ser humano. Neste contexto, fica claro que a aplicação de métodos eficientes para a classificação e localização de faltas se tornam cada vez mais recorrente, podendo assim evitar longas interrupções de fornecimento de energia, assegurando a retomada da distribuição de energia elétrica por meio de um reestabelecimento rápido de Linhas de Transmissão (LT) com defeito (FILHO; MAMEDE, 2020; ROBBA et al., 2020; GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

De forma geral, objetiva-se a aplicação das RNA para realizar a classificação e localização de faltas em linhas de transmissão, baseada nos valores de tensão e corrente e com dados de um dos terminais da linha.

1.2.2 Objetivos Específico

- Descrever a arquitetura da RNA, RBF, para a solução do problema de classificação e localização das faltas nas linhas de transmissão;
- Aplicar a arquitetura RBF para a classificação das faltas nas linhas de transmissão;
- Aplicar a arquitetura RBF para a localização das faltas nas linhas de transmissão;
- Avaliar a arquitetura aplicada, quanto a classificação e localização das faltas.

1.3 Justificativa

A divisão de um sistema de potência é projetada nas seguintes partes: geradores, transformadores, barramentos, circuitos de distribuição e transmissão e carga (BLACKBURN; DOMIN, 2006). Dentre estes elementos, percebe-se que a LT é o elemento mais susceptível a faltas, dado que 68% das interrupções ocorrem nas LT's, desta forma é validada a necessidade de uma maior atenção para este setor (FILHO; MAMEDE, 2020). Em caso de faltas que implicaram no desligamento da LT por meio do sistema de proteção, mas que permaneceram conectadas à rede elétrica, uma equipe de manutenção deve ser enviada para análise e inspeção do defeito, reparando-o o mais brevemente possível, onde sua localização deve ser informada com precisão para que a manutenção seja realizada (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010). Nesse âmbito, assegurar a resolução dos

distúrbios ganhou notoriedade no tocante da qualidade do fornecimento de energia, a aplicação das redes neurais, que chegaram com o advento da evolução da tecnologia, se mostraram viável na substituição dos modos manuais arcaicos de localização das faltas.

1.4 Estado da Arte

Jorge, Coury e Carvalho (1999) utilizaram as redes neurais artificiais fazendo o uso do método de *Multilayer Perceptron* (MLP) treinadas com backpropagation e propôs uma solução para a rápida localização de uma falta na linha de transmissão. Com esse arranjo, o mesmo apresentou uma solução fazendo o uso dos valores de tensão e corrente anteriores a falta (pré-falta) e posteriores a falta (pós-falta) em um dos extremos da linha de transmissão.

Visando a importante função de proteção das linhas de transmissão, Giovanini (2000) apresentou em sua dissertação um novo sistema que tem como função a detecção de falta rápida e confiável, fazendo o uso das correntes trifásicas das linhas de transmissão. Baseado nos métodos de MLP e RBF, da teoria de redes neurais artificiais, os sistemas empregados foram capazes de detectar e classificar corretamente 100% dos casos estudados sendo que, em sua maioria os resultados foram obtido com 5 iterações máximas, com tempo total de 5ms.

Oleskovicz, Coury e Aggarwal (2003) apresentaram a implementação de um sistema de proteção aplicando a teoria de Redes Neurais Artificiais, que foram desenvolvidas por meio da aplicação do *software NeuralWorks*[®], no qual as arquiteturas das RNA's empregam os valores amostrados das tensões e correntes trifásicas de pré e de pós-falta adquiridas no *Alternative Transient Program*[®] (ATP), tanto para o processo de treinamento como para o de testes da localização e classificação de faltas. Por fim, a conexão de todos os módulos de redes neurais desenvolvidos é feita por meio de um algoritmo computacional, em linguagem de programação "C".

Amorim e Huais (2004) estudaram a viabilidade da aplicação de técnicas de redes neurais nas faltas em linhas de transmissão fazendo a utilização do registro de tensão e corrente através de um relé digital em apenas um dos terminais da linha de transmissão, porque às vezes os sinais na outra extremidade não são frequentemente registrados. No terminal analisado foi feito o uso de métricas *Root Mean Square Error* (RMSE) e *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Para a determinação da estimativa e também a classificação do tipo de falta, Menezes (2008) desenvolveu rotinas no ambiente do *Matlab*[®] com a utilização de redes neurais artificiais, levando em consideração os erros de medição dos fasores, obtendo desta forma um algoritmo com eficiência e precisão que faz uso apenas do equacionamento elétrico.

Diante de um grande número de simulação de faltas, Metello (2012) fez o uso de um algoritmo de localização de faltas, por meio de ondas viajantes utilizando dois terminais, onde tem por objetivo a comparação do desempenho da Transformada Wavelet Discreta (TWD) e da sua variante a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR), explorando diferentes wavelets mãe da família Daubechies e diferentes frequências de amostragem dos sinais, em que aplica todo o conjunto à localização de faltas por ondas viajantes e por fim, apresenta uma alternativa de utilização para algoritmos da TWDR como proposta viável e nova.

Shaik e Pulipaka (2015) trabalharam com a aplicação da transformada wavelet para localização e classificação de faltas em linhas de transmissão. Os mesmos fizeram a utilização de um *Global Positioning System* (GPS) para a sincronização da amostragem dos valores de tensão e corrente em ambas as extremidades da linha de transmissão, no qual esses valores são usados para o cálculo dos índices de faltas, empregando os algoritmos de RNA's para a comparação dos valores de tensão e corrente atuais com os valores de base.

Fei, Qi e Li (2018) realizaram a localização de faltas em linha de transmissão baseada na *Support Vector Regression* (SVR), por meio da medida de amplitudes das ondas de tensão medidas em uma das barras. A tensão de falta é obtida 1/8 ciclo do sinal de pós-falta, que mediante um filtro todo o ruído é eliminado. Após essa eliminação, a SVR previamente treinada executa a localização da falta na linha de transmissão levando aproximadamente 0,6s para localização.

Budak e Akbal (2021) através de um conjunto de dados feitos no programa PSCAD-EMTDC, era registrada a imagem da mudança de impedância do diagrama de impedância do relé de proteção de distância, em faltas de curto-circuito criadas em diferentes sistemas de aterramento. As imagens criadas foram aplicadas a diferentes modelos de RNA no qual, através de técnicas de extração de recursos e processamento de imagem o modelo de RNA com a maior precisão de estimativa de localização de falhas foi escolhido.

1.5 Organização do trabalho

Capítulo 2 – é apresentada a fundamentação teórica, abordando os sistemas elétricos de potência, as proteções de SEP e redes neurais artificiais;

Capítulo 3 – é apresentada a aplicação das RNA's aplicada para localização de faltas em LT;

Capítulo 4 – são apresentadas as análises dos resultados da aplicação para classificação e localização das faltas e por fim, são feitas as discussões sobre todo arranjo;

Capítulo 5 – são apresentadas as conclusões da monografia e propostas para trabalhos futuros;

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Sistema Elétrico de Potência é o principal elemento no tocante da produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo assim, este capítulo trata da conceituação dos sistemas elétricos de potência e dos seus principais elementos de proteção, bem como, o equacionamento e as características que os descrevem (SAADAT, 1999).

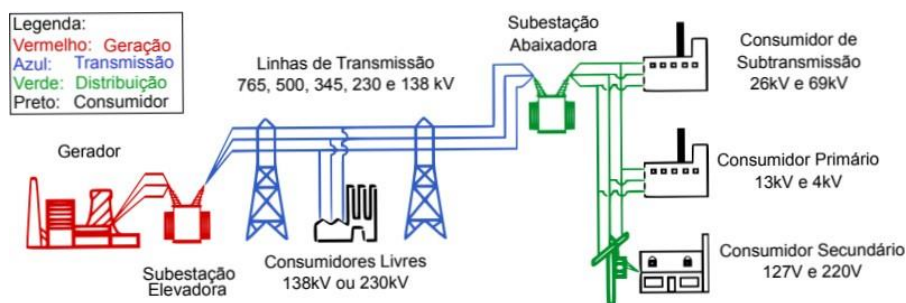
2.1 Sistema elétrico de potência

A energia elétrica é altamente popular visto que a mesma possui um custo razoável atrelado a facilidade de transporte com alta eficiência. O sistema elétrico de potência é responsável pela entrega da energia elétrica ao consumidor final, sob as seguintes divisões:

- **Geração:** responsável pela produção de energia elétrica, composta pela junção dos motores síncronos funcionando como geradores responsável pela geração de energia, e por transformadores que são os responsáveis pela elevação da tensão, propiciando assim, uma redução nos custo do transporte;
- **Transmissão e Subtransmissão:** é responsável pela transferência de energia elétrica das unidades geradoras dispostas em vários locais, com a finalidade de interconectar o sistema de geração com as cargas conectadas ao sistema;
- **Distribuição:** responsável pela conexão das subestações de distribuição aos equipamentos de entrada de serviço dos consumidores, sendo definida em sua linha primária na faixa de 4 a 34,5 kV;
- **Cargas:** em essência, é o trecho final do sistema de transmissão responsável pelo consumo da energia gerada e transmitida, podendo possui 3 divisões, sendo elas:

consumidor de subtransmissão, primário e secundário. Na Figura 3 é apresentado o diagrama completo do sistema elétrico.

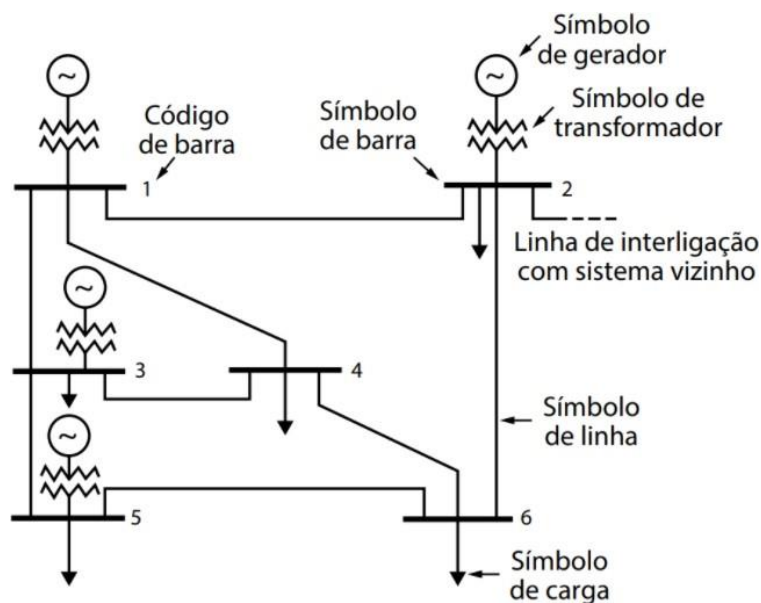
Figura 3 – Diagrama de um sistema elétrico de potência.



Fonte: (SILVA, 2016)

Diagramas unifilares tem como finalidade fornecer as informações significativas sobre o sistema. Dessa forma, a Figura 4 apresenta um diagrama unifilar composto pelos principais dispositivos básicos das estruturas de SEP. Ademais, os circuitos equivalentes dos componentes do sistema de potência podem ser representados pelos diagramas de impedância e reatância, apresentado na Figura 5, em que: (a) apresenta o diagrama de impedância da linha de transmissão e (b) o diagrama de impedância do transformador (GRAINGER; STEVENSON, 1994; NASAR, 1990).

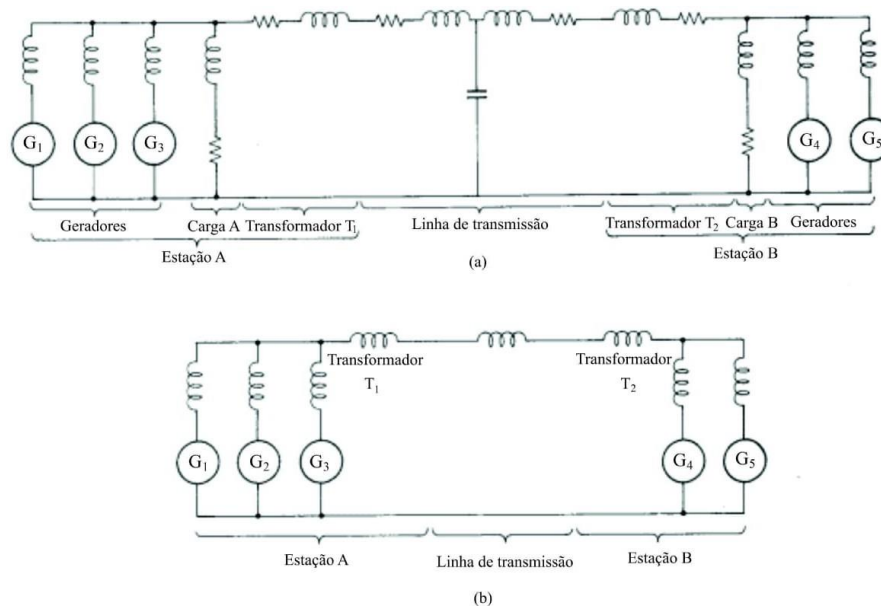
Figura 4 – Diagrama unifilar.



Fonte: Adaptada de (ELGERD, 1976)

Na Figura 5 tem-se: o gerador representado por uma fonte de tensão em série com uma reatância indutiva. A resistência interna do gerador é insignificante em comparação com a reatância, as cargas são indutivas, o transformador representado por uma reatância, a linha de transmissão é média e pode ser denotada por um circuito simples. O transformador conectado em estrela-triângulo que pode ser substituído por um estrela-estrela equivalente de modo que o diagrama possa ser desenhado por fase.

Figura 5 – Diagramas de impedância e reatância.



Fonte: Adaptada de (NASAR, 1990)

2.1.1 Modelagem do SEP

Uma linha de transmissão possui quatro parâmetros principais: resistência, indutância, capacitância e condutância, que influenciam o comportamento como elementos de um sistema de potência. A resistência e a indutância uniformemente distribuídas ao longo de uma linha formam a impedância (Z) em série, enquanto a capacitância e condutância estão presentes entre linhas ou entre condutor e o neutro de de uma linha trifásica formando a admitância (Y) em derivação.

As linhas de transmissão são classificadas quanto a sua extensão, que podem ser definidas como: se uma linha aérea é classificada como curta em que, a capacitância em derivação é pequena ao ponto de ser desprezada por completo sem perda de precisão, sendo suficiente a representação apenas com a resistência e a indutância ambas em série. Já na linha média, a capacitância da linha pode ser representada em duas partes localizadas próximo à fonte e à carga, formando o modelo pi. Por fim, as linhas longas

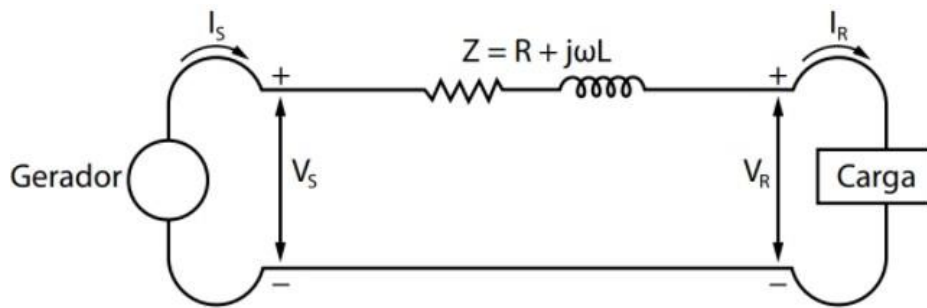
são caracterizadas por parâmetros que são distribuídos ao longo da linha (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Linha de transmissão curta

As linhas de transmissão curtas são linhas aéreas de até 80 km de extensão, com circuito equivalente mostrado na Figura 6, no qual a tensão no gerador pode ser calculada conforme a Equação 1.

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (1)$$

Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta.



Fonte: Adaptada de (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

- I_S e I_R correntes no gerador e na carga, respectivamente.
- V_S e V_R são as tensões entre linha e neutro no gerador e na carga, respectivamente.
- Z a impedância total em série da linha.

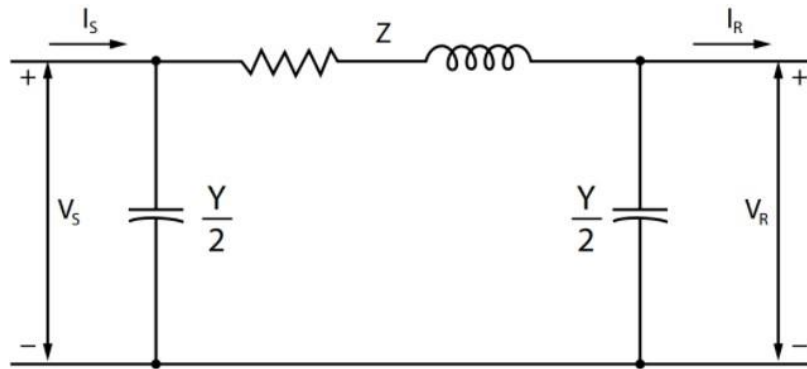
Linha de transmissão média

As linhas de transmissão médias são linhas aéreas de 80 km até 240 km de extensão, representadas pelo circuito equivalente conhecido como modelo pi, conforme Figura 7. O efeito capacitivo da linha é dado pela admitância total por fase Y , obtido pela razão entre a admitância Y e o comprimento l da linha. A admitância total é dividida em duas partes iguais colocadas nos terminais do gerador e da carga.

Por análise nodal, conclui-se que a tensão V_S na fonte é definida segundo a Equação 2.

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right)V_R + ZI_R \quad (2)$$

A corrente na fonte I_S , já considerando o valor de V_S , é dada pela Equação 3.

Figura 7 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão média.

Fonte: Adaptada de (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

$$I_S = \gamma \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_R \quad (3)$$

Matricialmente, essa relação pode ser representada pela Equação 4.

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ V_S & = & A & B & V_R \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ I_S & & C & D & I_R \end{matrix} \quad (4)$$

sendo: $A = D = \left(\frac{ZY}{4} + 1\right)$; $B = Z$; $C = \left(1 + \frac{ZY}{4}\right)\gamma$

Linha de transmissão longa

As linhas de transmissão longas são definidas como linhas aéreas maiores que 240 km de extensão, para a obtenção da solução, deve-se considerar que os parâmetros resistivos, indutivos e capacitivos estão distribuídos, uniformemente, ao longo da linha. Se a linha tem comprimento l , a cada avanço infinitesimal dl os parâmetros da linha variam e, proporcionam uma pequena variação de tensão dV , além de uma pequena variação de corrente dI ao longo da linha, conforme exposto na Figura 8.

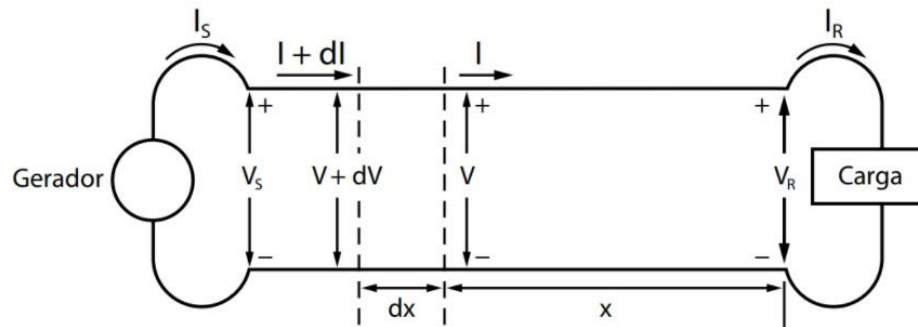
Devido o incremento da tensão ao longo da linha, na extremidade mais próxima do gerador, a tensão será $V + dV$, como visto nas Equações 5 e 6.

$$dV = I z dx \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dx} = I z \quad (6)$$

A corrente dI que flui pela admitância do elemento infinitesimal dx é dada nas

Figura 8 – Diagrama esquemático de uma linha de transmissão representada por parâmetros distribuídos.



Fonte: (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

Equações 7 e 8.

$$dl = V y dx \quad (7)$$

$$\frac{dl}{dx} = V y \quad (8)$$

Derivando as equações da tensão e da corrente, supracitadas, obtém-se as Equações 9 e 10.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dl}{dx} \quad (9)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad (10)$$

Obtendo assim as Equações 11 e 12.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV \quad (11)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yzI \quad (12)$$

Com a solução das equações diferenciais desenvolvidas, e utilizando as condições na extremidade da linha, dado $x = 0$, $V = V_R$ e $I = I_R$, são obtidas as Equações 13 e 14.

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} e^{-\gamma x} \quad (13)$$

$$I = \frac{V_R/Z_C + I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R/Z_C - I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (14)$$

sendo $Z_C = \frac{\mathbf{q}}{z/y}$ a chamada impedância característica da linha e $\gamma = \sqrt{zy}$ constante de propagação da onda.

Em sua maioria, os estudos se concentram nas tensões e correntes nas extremidades das linhas. Dificilmente, se tem interesse em conhecer a tensão em todos os pontos. Logo, ao considerar $x = l$ e aplicando as funções hiperbólicas a tensão e a corrente no gerador tem-se as Equações 15 e 16 respectivamente (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

$$V_S = V_R \cosh(\gamma l) + I_R Z_C \sinh(\gamma l) \quad (15)$$

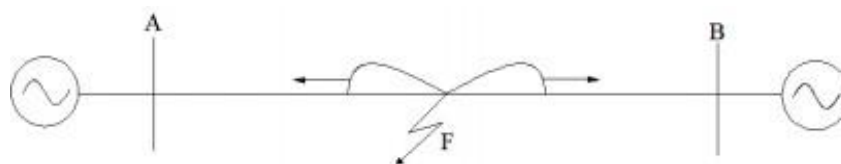
$$I_S = I_R \cosh(\gamma l) + \frac{V_R}{Z_C} \sinh(\gamma l) \quad (16)$$

c

2.2 Propagação de ondas em linhas polifásicas

Curto circuito, descargas atmosféricas ou operações de chaveamento, provocam ondas viajantes curtas (na ordem de microssegundos a milissegundos). Esse transiente é caracterizado pela mudança significativa e repentina da tensão em um ponto da LT causando ondas eletromagnéticas que se propagam a partir do ponto de falta como visto na Figura 9 (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Figura 9 – Propagação de onda eletromagnética resultante de falha elétrica



Fonte: (KRZYSZTOF et al., 2011)

A propagação da onda através da LT é caracterizada pela distorção e atenuação que se dá em decorrência do efeito corona, perda de energia nas resistências dos condutores e a capacidade de carga dos condutores.

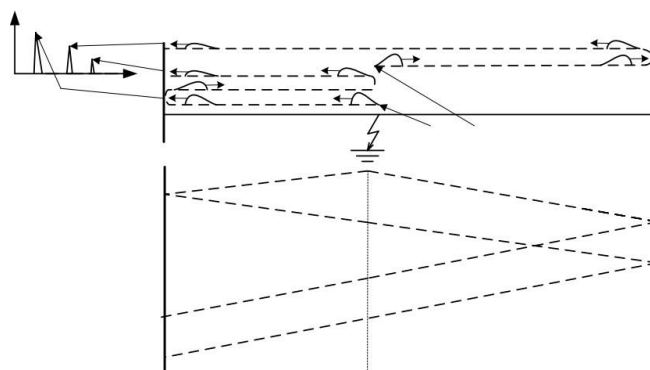
A RBF é usada para a análise de sinais não estacionários, fazendo o uso de dispositivos como os relés digitais de potência que fornecem informações características (como os valores de corrente e tensão, velocidade e frequência de propagação), possibilitando análise e determinação dos dados da falta (KRZYSZTOF et al., 2011).

2.3 Relé digital de potência

Com o avanço da tecnologia e surgimento dos microprocessadores, surgiu o relé digital, no qual suas funções podem ser dividida em cinco modos de operação: tipos A, B, C, D e E, em que todos esses localizadores se baseiam no princípio básico da análise da onda eletromagnética de entrada que é resultado da ocorrência de uma falha (GIOVANINI, 2000; KRZYSZTOF et al., 2011; GALE et al., 1993).

Tipo A: é um método de terminal único, dependente de uma descontinuidade grande o suficiente para reflexão do sinal retornando para o ponto defeituoso, consequentemente possibilitando assim a determinação do local da falta. a determinação é feita analisando a distância através dos instante da ocorrência da falta em comparação com o instante de reflexão desta. A Figura 10 ilustra o procedimento e a distância pode ser calculada por meio da Equação 17.

Figura 10 – Localizador de faltas tipo A e diagrama de rede.



Fonte: (KRZYSZTOF et al., 2011)

$$D = \frac{t_3 - t_1}{2} \cdot v \quad (17)$$

sendo:

D - distância até o local da falha [m].

t_1 - momento em que a primeira onda gerada no local da falta chega à subestação A [s].

t_3 - tempo em que a primeira onda refletida da localização da falta chega na subestação A [s].

v - velocidade da onda [m/s].

Tipo B: é um método de dois terminais que é subdividido em 3 tipos B1, B2 e B3. Os métodos B1 e B2 determinam o local da falta enviando um sinal para a extremidade oposta e fazendo a análise do momento da chegada do mesmo, já o tipo B3, faz a detecção

a partir de um sinal injetado a partir do pulso de defeito e faz o uso de um tempo para mensurar a chegada e reflexão da falha.

Tipo C: é um método de terminal único que se assemelha a um radar fazendo o uso do reflexo do pulso injetado na linha pela própria unidade para a localização, operando como um circuito fechado. Geralmente esses acoplamentos de unidades são caros.

Tipo D: faz o uso de unidades temporizadas, funcionando em sincronismo e fazendo o uso de GPS. Baseiam-se nos dados de dois terminais para a determinação da localização da falta na linha de transmissão a distância determinada pela Equação 18 ilustrado na Figura 11 (KRZYSZTOF et al., 2011; GALE et al., 1993; LOPES, 2011).

$$D = \frac{L + (t_A - t_B) \cdot v}{2} \quad (18)$$

sendo:

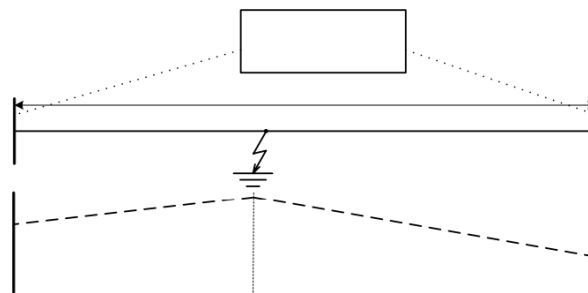
t_A - momento em que a primeira onda gerada no local da falta chega à subestação A [s].

t_B - tempo em que a primeira onda gerada no local da falta chega na subestação B [s].

L - comprimento da linha [m].

v - velocidade da onda [m/s].

Figura 11 – Localizador de faltas tipo D e diagrama de rede.



Fonte: (KRZYSZTOF et al., 2011)

Tipo E: esses localizadores fazem o uso de medições em uma extremidade da linha de transmissão, usando a onda que é gerada pelo fechamento do disjuntor na linha de transmissão. A análise de localização da falta é feita a partir da diferença de tempo entre o pulso gerado pelo fechamento de um disjuntor e um impulso refletido da falha, calculado com base na Equação 19, esse princípio de operação é apresentado na Figura 12.

$$D = \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) \cdot v \quad (19)$$

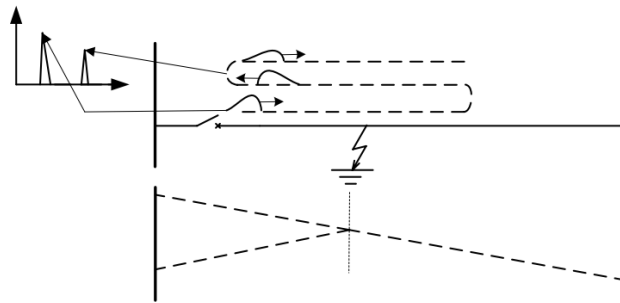
sendo:

t_1 - tempo em que a onda é gerada pelo fechamento do disjuntor [s].

t_2 - o tempo em que a onda refletida atinge uma subestação [s].

v - velocidade da onda [m/s].

Figura 12 – Localizador de faltas tipo E e diagrama de rede.



Fonte: (KRZYSZTOF et al., 2011)

2.4 Proteção dos sistemas elétricos de potência

O surgimento dos primeiros esquemas de proteção deu-se simultaneamente ao advento dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, no qual tem como finalidade proteger o sistema de faltas que possa ocorrer, resultantes de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e problemas de chaveamento (CAMINHA, 1977).

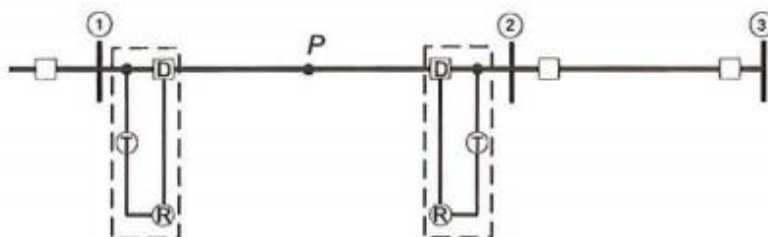
Os esquemas de proteção são subdivididos em três partes:

- **Transdutores:** são transformadores de corrente e tensão responsáveis pela alimentação do relé;
- **Relé:** corresponde ao elemento lógico do esquema de proteção, tendo como função detectar faltas dentro de seu alcance, e a partir disto energizar as bobinas de disparo dos seus disjuntores associados;
- **Disjuntores:** são acionados pelos relés e isolam a parte do sistema em que ocorreu a falta.

A Figura 13 apresenta o diagrama unifilar com duas LT's e os elementos do esquema de proteção compreendida entre os barramentos 1 e 2 neste, temos que o sistema de proteção atua de tal maneira que, quando ocorre uma falha na LT (ponto P), considerando a existência de fontes de energias em ambos os lados, uma corrente adicional flui de ambos

os terminais da LT para a falha, aumentando o nível de corrente na LT e conseqüente queda de tensão. Os transdutores (T) são os responsáveis pela conversão da corrente e tensão a níveis mais baixos, servindo de entrada para o relé (R). O relé é responsável pela decisão de ocorrência ou não de falta na LT. Caso uma falta seja detectada, o relé energiza a bobina de disparo do disjuntor (D), fazendo que os contatos deste em série com a LT, abram e desconectem a LT do sistema, isolando assim a parte defeituosa da rede (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Figura 13 – Diagrama unifilar para a linha compreendida entre os barramentos 1 e 2.



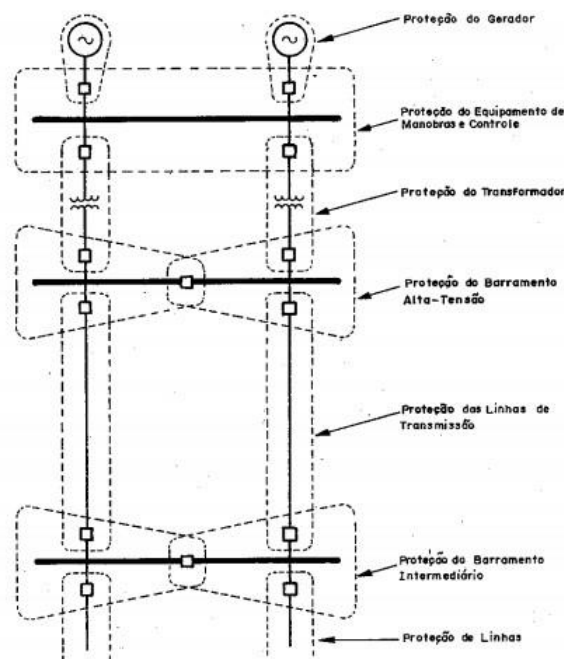
Fonte: (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

A filosofia de um esquema de proteção consiste basicamente na divisão do SEP em pequenas partes, de modo que, uma proteção adequada seja assegurada, bem como a garantia de que apenas uma pequena parte do sistema seja desconectado. Caso haja ocorrência de uma falta, tal filosofia pode ser observada na Figura 14 (CAMINHA, 1977; GRAINGER; STEVENSON, 1994).

O princípio fundamental do releamento compreende:

- **Releamento primário ou de primeira linha:** faz o uso da seletividade para estabelecer uma zona de proteção ao redor de cada elemento do sistema;
- **Releamento de retaguarda ou de socorro:** tem por finalidade atuar na manutenção do releamento primário ou da falha deste;
- **Releamento auxiliar:** tem a função de multiplicador de contatos, sinalização ou temporizador.

Das características funcionais do releamento tem-se a **velocidade** ou rapidez de ação na ocorrência de um curto circuito, visando a diminuição da extensão do dano ocorrido. A **sensibilidade** que é a capacidade de resposta as anomalias nas condições de operação frente aos curtos circuitos para as quais foi projetada. **Confiabilidade** como a probabilidade de um componente, um equipamento ou um sistema satisfazer a função prevista, sob dadas circunstâncias. E por fim, mas não menos importante,

Figura 14 – Zonas de proteção.

Fonte: (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

a **seletividade** definida como a propriedade da proteção em reconhecer e selecionar o requerimento imediato de operação, ou a não necessidade da mesma (CAMINHA, 1977).

Dentre as diversas técnicas de proteção frequentemente utilizadas para a proteção de LT's, destacam-se a proteção de **sobrecorrente**, a proteção **direcional**, a proteção de **distância** e a proteção de **relé a fio piloto**, no qual:

- Relés de **sobrecorrente** tem um princípio de funcionamento simples e eficaz de usar a magnitude da corrente como um indicador de falta, já que a corrente de falta é quase sempre maior do que a corrente de carga pré-falha em qualquer elemento do sistema de potência. Podem ser usados para proteger praticamente qualquer elemento do sistema de energia, ou seja, linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores;
- Relés **direcionais** respondem ao ângulo de fase entre duas entradas, comumente usado para comparar o ângulo de fase de uma corrente com uma tensão, ou ainda, o ângulo de fase de uma corrente que pode ser comparado com outra corrente. Aplicados quando o sistema de energia não é radial, um relé de sobrecorrente pode não ser capaz de fornecer proteção adequada;
- Relés de **distância** em redes de alta e extra-alta tensão, devem ser ajustados entre a corrente de carga máxima e a corrente de falta mínima. O relé de distância fornece excelente proteção em todas as circunstâncias;

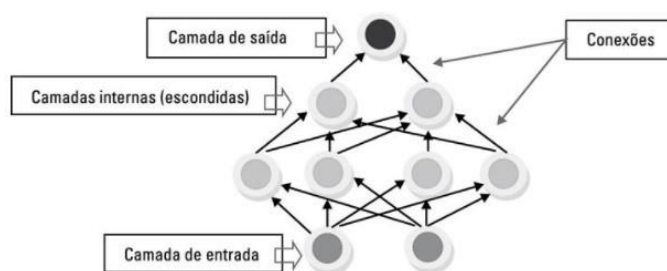
- Relés **a fio piloto** é usado para proteger as linhas de transmissão quando se deseja que uma linha inteira seja fornecida com proteção de alta velocidade. Este utiliza informações obtidas de locais remotos como um sinal de entrada e geralmente comunica a decisão tomada por um relé local de um dos tipos descritos acima para relés nos terminais remotos de uma linha de transmissão (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

2.5 Redes neurais artificiais

Baseado na redes neurais biológicas tomando como inspiração a estrutura e o funcionamento do sistema nervoso, as RNA's estão entre os modelos mais eficientes para a solução de vários problemas vindo a ser cada vez mais utilizados na solução dos problemas (GAMA et al., 2021).

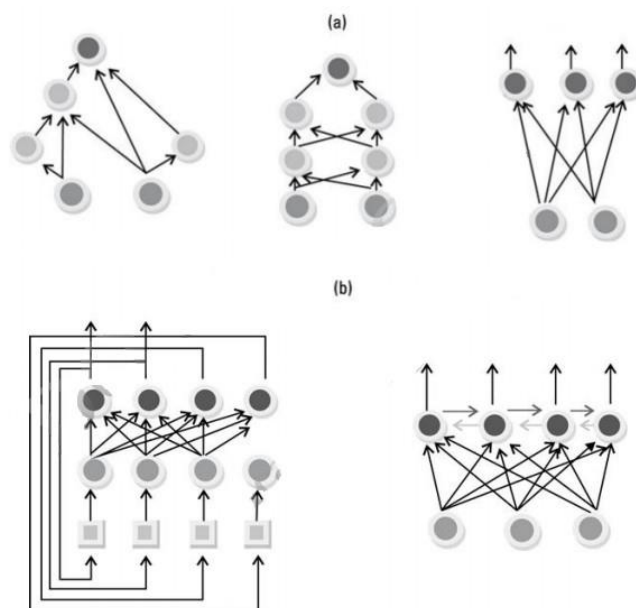
A rede neural é um modelo de neurônio artificial que busca simular o processo de aprendizado do cérebro humano e é moldado matematicamente inspirado no sistema nervoso, em que o mesmo é constituído de várias unidades conectadas entre si, geralmente dividido em camada de entrada e camada de saída, podendo ainda conter camadas intermediárias conhecidas como camadas ocultas. Cada camada executa uma função pré determinada como, a obtenção dos dados, o tratamento e manipulação dos mesmos, e a entrega dos dados já tratados. A Figura 15 apresenta um arranjo genérico de uma RNA (BISHOP, 2016; LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

Figura 15 – Representação RNA genérica



Fonte: (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016)

Quanto as topologias de redes neurais representada na Figura 16 (a), tem como característica principal ser monocamadas ou multicamadas. A segunda se trata da topologia de redes com ciclos, Figura 16 (b), os neurônios tem a possibilidade de realimentarem outros neurônios dividindo-se em redes recorrentes e redes competitivas, dos quais as arquiteturas básicas são as redes Perceptron e Adaline (GAMA et al., 2021; LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

Figura 16 – Redes direta e com cilos

Fonte: (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016)

As principais características das RNA's são a sua arquitetura e a capacidade de aprendizado via treinamento utilizando dados disponibilizados para treino, dado por um aprendizado autoajustável. Em geral, a capacidade de generalização é o grande trunfo das RNA's para resolução dos problemas diante dos dados de treinamento, fazendo a extensão do aprendizado dos dados de treinamento, e utilizando dos mesmos no tratamento dos dados que venham a serem estudados (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

Com base no algoritmo, o modelo de rede neural controla e ajusta pesos sinápticos que são utilizados na delimitação do problema, dado pelo arranjo arbitrário, em que os pesos são ajustados de forma contínua a partir das variações estatísticas do comportamento do sistema. Todo esse processo é denominado filtro adaptativo, pois o processo de adaptação dos pesos sinápticos a rede neural tem a capacidade de filtrar os dados de treinamento, adaptando os mesmos para a identificação e solução dos problemas aplicados (HAYKIN, 2001).

Os dados originais de entrada são geralmente subdividido em três subconjuntos: treinamento, validação e teste. O conjunto de treinamento apresenta uma quantidade dos dados elevada, permitindo assim a generalização do aprendizado. A validação se dá pela verificação da eficiência da capacidade generalizada de dados treinados. Por fim, são efetuados testes para comprovação do treinamento e validação .

Já a definição da configuração da rede é um tanto trabalhoso e tem passos pré-definidos. Em geral é dividida em três processos, sendo: seleção do tipo de rede, determinação da topologia e determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções

de ativação utilizadas. Em essência a rede neural tem a capacidade de representação, raciocínio e aprendizagem diante dos dados fornecidos e de sua pré configuração (HAYKIN, 2001; LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

O aprendizado da rede neural se dá pela modificação dos pesos simpáticos das conexões e seu nível de bias, que ocorre de forma gradual, estabelecendo uma rotina (algoritmo) que estabelece a maneira com que os pesos são ajustados. Entre as regras de aprendizagem tem-se aprendizagem por correção do erro, que consiste em uma filtragem ótima dos dados, no qual os ajustes do pesos é proporcional ao produto do sinal do erro com o sinal de entrada da sinapse. Aprendizagem baseado em memória, trabalha utilizando explicitamente os dados de treinamento disponíveis para a redeneural, e por fim a aprendizagem hebbiana e competitiva que tomam como inspiração os neurônios biológicos e a aprendizagem de boltzmann que tem como base a mecânica estatística (HAYKIN, 2001).

No teste da rede é verificado a capacidade de generalização da RNA, além disso, o monitoramento do desempenho do sistema deve ser periodicamente realizado, executando possíveis manutenções ou atualizações, quando for necessário.

Nesse contexto, o objetivo é aplicar os métodos descritos afim de solucionar os problemas de classificação e localização de faltas em LT. Com isso, através das arquiteturas da Rede Neural Artificial e fazendo o uso dos dados obtidos para um sistema de transmissão, será possível localizar e classificar as faltas com acurácia, rapidez e precisão (GAMA et al., 2021; LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

2.5.1 Redes neurais artificiais aplicadas a faltas em LT

A técnica das redes neurais artificiais é estruturada na classificação e localização de distúrbios nas LT's conforme Figura 17, sendo que, inicialmente deve-se analisar o problema a ser resolvido, delimitando as informações que serão utilizadas na rede neural (neste caso os valores de tensão e corrente), e a partir da delimitação do problema torna-se necessário a seleção de amostras via coleta de dados utilizados para o aprendizado das RNA's.

Figura 17 – Etapas da aplicação de uma rede neural.



Fonte: Adaptada de (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016)

Ademais, é realizado um pré processamento dos dados visando uma padronização

e redução na dimensionalidade dos mesmos, minimizando os ruídos presentes nos dados e reduzindo as informações desnecessárias (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016).

2.5.2 Radial Basis Function (RBF)

Para o problema proposto foi escolhida a rede neural do tipo RBF que se trata de um problema de ajuste de curva (aproximação) em um espaço de alta dimensionalidade. O mesmo, pode ser subdividido em três camadas, sendo a primeira de entrada de dados, a segunda a camada oculta, não linear e de alta dimensionalidade e por fim a camada linear de saída (HAYKIN, 2001; MATHWORKS, 2021).

As diferentes camadas de uma RBF realizam diferentes tarefas que podem ser baseadas na interpolação, elas possuem funções com centros fixos separados ao acaso, seleção auto-organizada ou seleção supervisionada dos centros. Ademais métodos de regularização podem ser empregados como o método da interpolação escrita com regularização, podendo esses métodos separar a otimização das camadas ocultas e de saída da rede (HAYKIN, 2001).

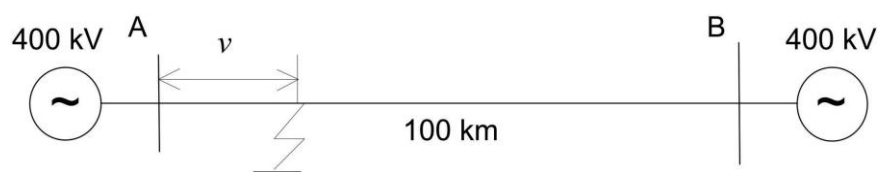
O processo de aprendizagem se dá a partir do ajuste de pesos simpáticos que são não lineares quando associados a redes ocultas e são lineares quando associados a camada de saída, os pesos possuem respostas diferentes quanto a sua linearidade, sendo os pesos não lineares associados a uma evolução lenta em uma escala de tempo, e os pesos lineares associados a um ajuste rápido (HAYKIN, 2001; BISHOP, 2016).

Nesse âmbito, o conjunto de softwares *Simulink*[®] e *Matlab*[®] foram utilizados para simulação e tratamento dos dados. A implementação e aplicação dos métodos de redes neurais mencionados busca solucionar o problema para classificação e localização de faltas nas LT's. (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2016)

APLICAÇÃO DAS RNA'S PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LT

Nesse capítulo, a RNA é aplicada no processo de detecção, classificação e localização de faltas em um sistema de transmissão através do desenvolvimento de um algoritmo computacional utilizando a RNA do tipo RBF. O objeto estudado foi uma linha de transmissão com extensão de 100 km conforme Figura 18. Os parâmetros pertencentes a mesma são apresentados na Tabela 1.

Figura 18 – Diagrama unifilar da LT proposta.



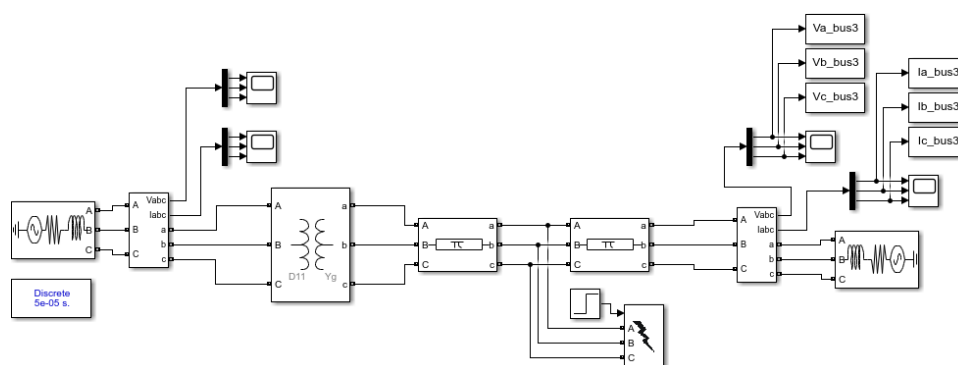
Fonte: Adaptada de (SILVEIRA; SEARA; ZüRN, 2001)

Tabela 1 – Dados característicos da LT

Tensão de alimentação	V_s	400	kV
Impedância da fonte	Z_s	$0,2 + j4,5$	Ω (por fase)
Parâmetros de sequência positiva	R	2,34	Ω
	L	95,10	mH
	C	1,24	mF
Parâmetros de sequência zero	R	38,85	Ω
	L	325,08	mH
	C	0,845	mF

Já na Figura 19 o mesmo arranjo da LT pode ser visto após ser implementado no *Simulink*[®], a única diferença se deu somente pela presença de um transformador, que neste caso possui uma relação de espiras 1:1 não afetando nos parâmetros da linha e estando presente apenas para o melhor funcionamento da simulação.

Figura 19 – Diagrama unifilar da LT estudada.



Fonte: Autoria Própria

O arranjo apresentado em *Simulink*[®] é o responsável pela geração dos dados das faltas, sejam elas monofásicas, bifásicas ou trifásicas, conectadas ou não ao terra, cedendo esses dados ao *Matlab*[®], que por sua vez foi o responsável pela implementação e execução da rede neural, aplicada ao treinamento, teste e validação da RBF.

Para a simulação foi utilizado um computador pessoal da marca HP, equipado com um *hardware* composto por um processador Intel[®] core[™] i3 (5^o geração), 8,00 GB de memória RAM e um armazenamento em disco de estado sólido de 256 GB.

A aplicação dos dados na RBF se dá com o auxílio de uma função interna do *Matlab*[®] a *newrb* (que junto a um localizador do tipo A) é responsável pela criação da rede interativa que gera um neurônio por vez, até que o erro da soma quadrada caia abaixo de uma meta de erro ou um número máximo de neurônios seja alcançado. Sua sintaxe se apresenta da seguinte forma pela função $net = newrb(P, T, GOAL, SPREAD, MN, DF)$, a Tabela 2 detalha a função de cada parâmetro.

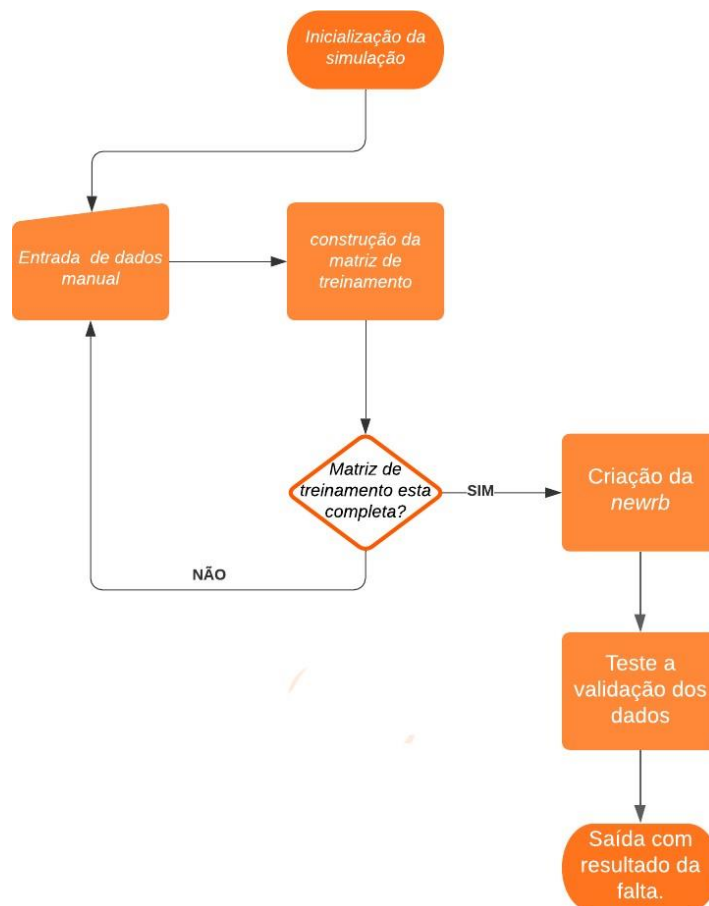
Tabela 2 – Parâmetros da RBF

P	Matriz R por Q com Q vetores de entrada
T	Matriz S por Q com Q vetores de classe de destino (<i>target</i>)
GOAL	Meta de erro quadrático médio (default = 0.0)
SPREAD	Propagação de funções de base radial (default = 1.0)
MN	Número máximo de neurônios (default = Q)
DF	Número de neurônios adicionados entre camadas ocultas (default = 25)

P e T são matrizes de vetores de entrada e *target* (resposta esperada para a entrada de dados em questão) respectivamente, e os demais parâmetros foram utilizados como *default*.

Para as matrizes P e T foram utilizados os dados gerados pela simulação no *Simulink*[®], onde a partir da simulação da falta e geração dos dados foi feita uma filtragem dos dados e foram construídas diversas submatrizes contendo os dados de cada falta em específico. No final, foi construída uma matriz geral (P), contendo todas as submatrizes com os dados de cada falta. Essa matriz junto a matriz de *target* foi utilizada para o treinamento da rede neural, após isso, foi validada a funcionalidade da rede, a Figura 20 apresenta o fluxograma dos algoritmos implementados.

Figura 20 – Fluxograma dos algoritmos construídos.



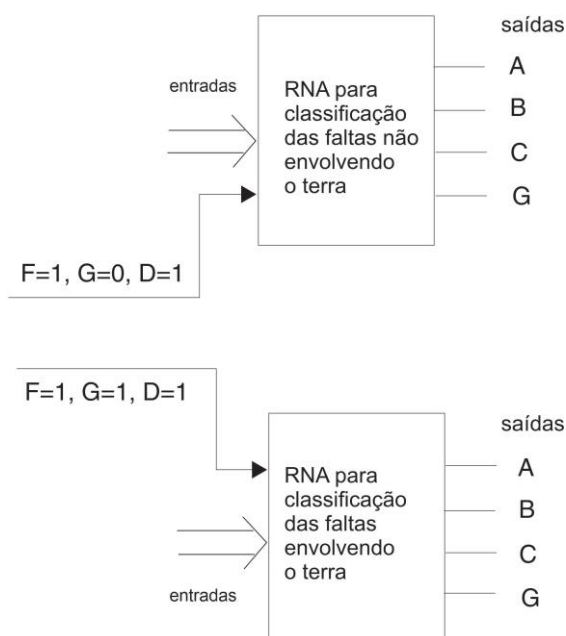
Fonte: Autoria Própria

A Figura 21 apresenta um diagrama que exemplifica a construção do classificador de faltas em RBF, devido a quantidade e similaridade dos dados de faltas, uma única rede neural contendo todos os tipos de falta não é capaz de classificar o tipo de falta presente. Desta forma, foi dividido em dois algoritmos de classificação, no qual o primeiro

faz a classificação das faltas envolvendo o terra e outro a classificação das faltas que não envolve o terra. O pré-requisito para o funcionamento de ambos os algoritmos foi a presença de distúrbio na LT ($F=1$) para que o mesmo possa ser detectado.

A entrada de dados deu-se pela matriz geral contendo dados de corrente pré e pós falta de todos os tipos de faltas. A saída (ou target) é dada de forma binária, com 04 (quatro) saídas, uma para cada tipo de falta (A, B e C) e a última para o envolvimento ou não do terra (G). A interpretação da saída se dá com 1 (um) indicando a presença e 0 (zero) o não envolvimento da falta ou do aterramento. Por exemplo, para a saída 1 0 0 1 significa a presença uma falta monofásica, na fase A envolvendo terra, falta AG.

Figura 21 – Método classificador da RBF.

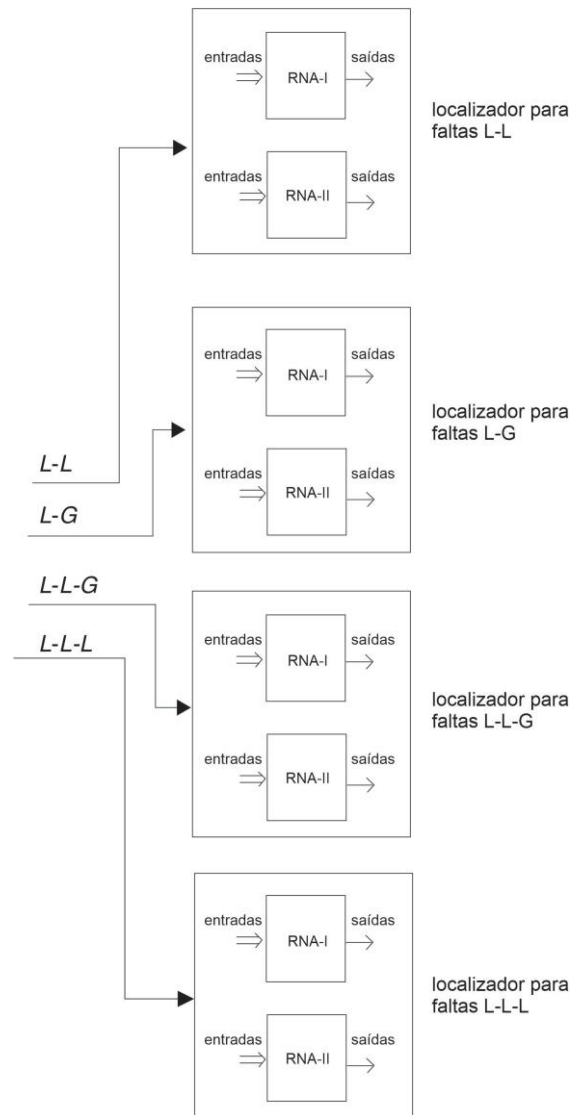


Fonte: Adaptada de (MAHANTY; GUPTA, 2004)

A Figura 22 apresenta o diagrama para o localizador da falta. O sistema foi dividido em quatro categorias, sendo um para cada tipo de falta. Tal divisão se deu devido a localização exigir uma precisão maior na saída, sendo que antes 0,8 e 0,9 ambos significavam a presença de faltas (pois eram arredondados para 1), agora cada um representa um percentual de distância da incidência da falta. Ademais ainda devido a similaridade entre os dados, para cada tipo de categoria foi associado 2 algoritmos, sendo o primeiro para localização da falta até 50% do trecho e caso esse não seja capaz de localizar o segundo algoritmo era acionando, fazendo a localização de 50 a 100% do trecho. Outro detalhe é que para a localização foram utilizados valores de tensão e corrente, porém os valores de pré-falta não expõem dados relevantes para determinação da distância. Para os dados de entrada, além de uma normalização foi necessário um janelamento, para os valores de

tensão e corrente pós-falta. A saída é dada de forma decimal variando de 0 a 1, representando o percentual de distância mediante a localização da falta. Por exemplo 0,2 e 0,3 representam 20 e 30 Km, respectivamente, de distância da falta medida a partir da barra de leitura.

Figura 22 – Método localizador da RBF.



Fonte: Adaptada de (MAHANTY; GUPTA, 2004)

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante de todo arranjo apresentado no Capítulo 3, o produto final, obtido com uma média de 1800 cenários diferentes, foi uma rede capaz de fazer a detecção e a classificação precisa das faltas. No entanto, a localização enfrentou dificuldades para executar com precisão a tarefa a ela proposta.

Os dois algoritmos implementados com finalidade da detecção foram suficientes para, identificar o tipo de falta. A Tabela 3 apresenta a eficiência da RBF de classificação para cada tipo de falta e ainda as variações de impedância de faltas que foram testadas em ambos os algoritmos.

Tabela 3 – Resultado da aplicação na classificação

Tipo de falta		Precisão	MSE	Impedância(ohms)
Sem Terra	AB	99%	0,140625	0,001
	AC			1
	BC			10
	ABC			20
Com Terra	AG	95%	0,0312498	0,001
	BG			1
	CG			10
	ABG			10
	ACG			20
	BCG			20

sendo: Precisão = $\text{somatório}(T=y')/\text{tamanho}(T,1)$.

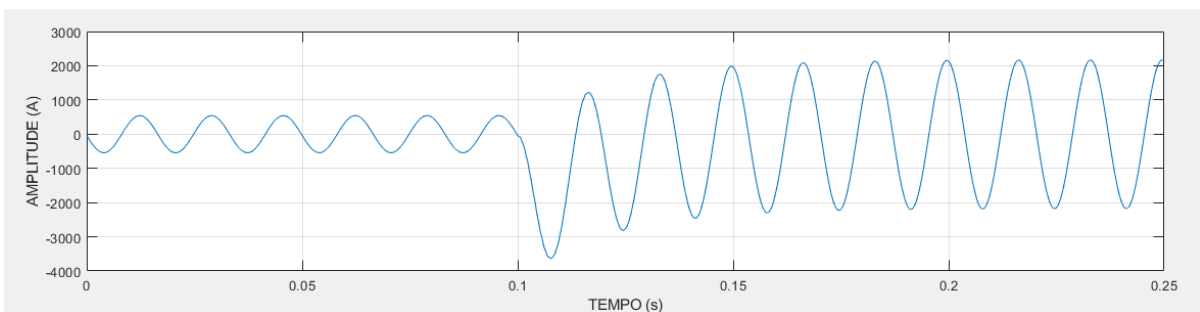
$y = \text{sim}(\text{net}, P')$.

sim = com condições iniciais a zero, retorna a resposta simulada de um modelo identificado

usando os dados de entrada, P.

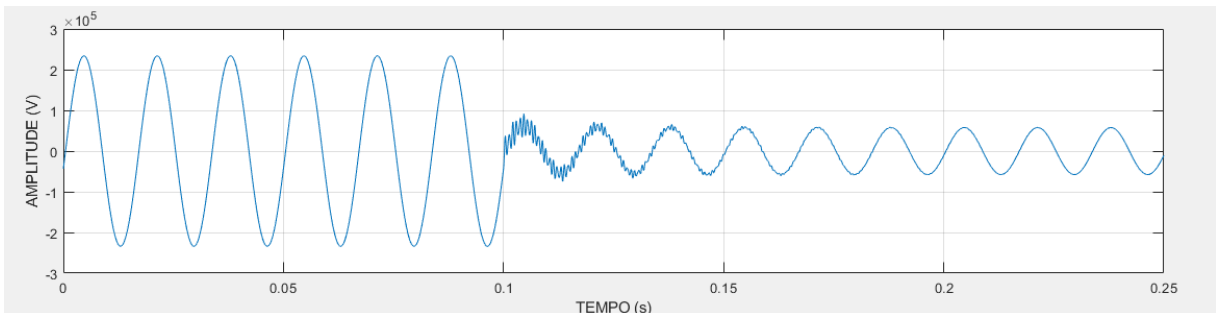
A Figura 23 apresenta o gráfico de corrente para uma falta monofásica do tipo AG, após a ocorrência da falta observa-se o aumento na amplitude da corrente. Assim, visto que nos dados de treinamento estão envolvidos os valores de pré e pós falta, a rede é capaz de caracterizar o tipo de falta presente ali. Ademais, na Figura 24 é apresentado o gráfico de tensão (no qual, apesar de não utilizado na classificação, apresenta características que merecem ser destacadas), onde a distinção do momento da falta pode ser feita através do ponto onde há uma brusca atenuação da amplitude da mesma (característica inversa ao gráfico de corrente).

Figura 23 – Gráfico de corrente falta AG



Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Gráfico de tensão falta AG



Fonte: Autoria Própria

Já para a localização, a RBF foi escolhida para implementar um algoritmo inicial para a tentativa de localização da falta presente até metade do trecho da LT. Entretanto o mesmo só foi capaz de localizar faltas até 40% da LT e apenas para a falta monofásica conectada ao terra. Ademais, algumas alternativas foram utilizadas para tentar estabelecer o funcionamento da RBF para localização, desde a divisão em 3 algoritmos para a localização, utilização dos valores de tensão ao invés de tensão e corrente e a mudança dos parâmetros da simulação para incremento na capacidade da rede neural, entretanto sem êxito para o cumprimento do objetivo. Na Tabela 4 são apresentados os resultados para

a localização até 40% da LT e o erro pode ser calculado conforme a Equação 20 (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

$$Erro = \frac{|Re - Rt|}{l} * 100 \quad (20)$$

sendo:

Re - Resultado encontrado (Km).

Rt - Resultado teórico (Km).

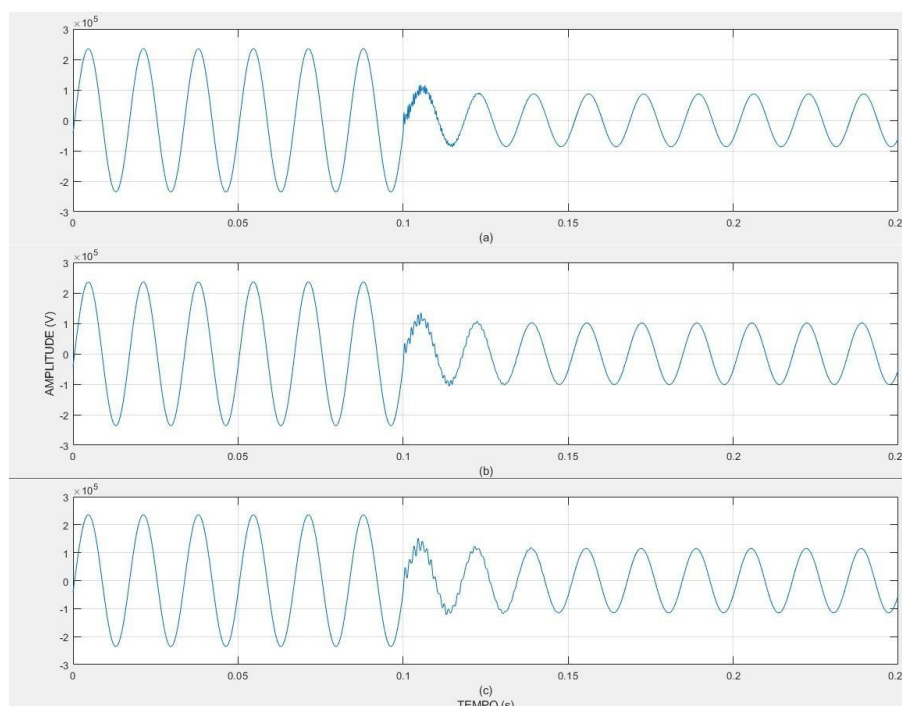
l - comprimento (Km).

Tabela 4 – Resultado da aplicação na localização

Tipo de falta	MSE	Distância (Km)	Resultado teórico	Resultado encontrado	Erro
AG	0,0125	10	0,1	0,1768	7,68%
AG	0,0125	20	0,2	0,2258	2,58%
AG	0,0125	30	0,3	0,2990	0,10%
AG	0,0125	40	0,4	0,4000	0,00%

A Figura 25 apresenta os gráficos de tensão para a falta AG onde a distâncias são de 30 (a), 60 (b) e 90 (c) km de distância. Através da análise dos gráficos fica evidente que a variação da distância de localização da falta causa apenas um incremento ou decréscimo de variação instantes após a ocorrência da falta.

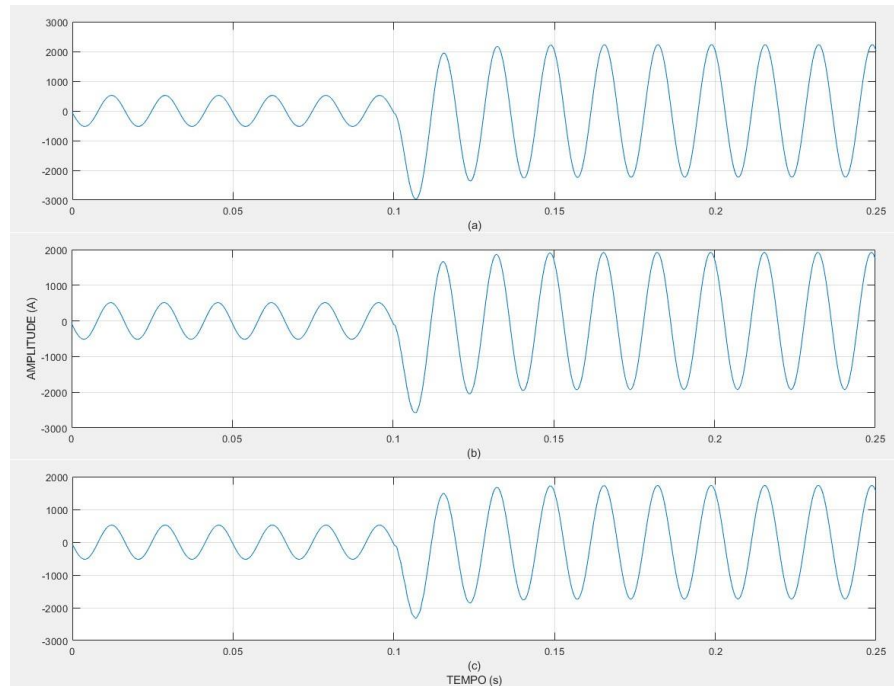
Figura 25 – Gráfico de tensão falta AG com falta em diferentes distâncias



Fonte: Autoria Própria

Já na Figura 26, os gráficos de corrente para as distâncias de 30 (a), 60 (b) e 90 (c) km mostram uma variação pós falta ainda menor quando comparada as variações nos gráficos de tensão.

Figura 26 – Gráfico de corrente falta AG com falta em diferentes distâncias



Fonte: Autoria Própria

Apesar de aplicada com sucesso por (MAHANTY; GUPTA, 2004; MENEZES, 2008), o insucesso da localização abordada nesta monografia pode ser explicado segundo (MATHWORKS, 2021), que exemplifica que mesmo quando projetadas de forma eficiente, as RBF tendem a ter muitas vezes mais neurônios do que uma rede do tipo *feedforward*, isso porque quanto maior o espaço de entrada (em termos de número de entradas e as faixas nas quais essas entradas variam), mais neurônios são necessários. Desta forma, devido a grande quantidade de dados de entrada e a similaridade entre os mesmos, a rede não é capaz de entregar uma saída precisa.

CONCLUSÃO

As LT's estão presentes em todo o território nacional, sendo a principal responsável pelo transporte de energia elétrica no país, entretanto, devido a grande incidência de distúrbios presente nas mesmas os métodos computacionais inteligentes se mostram extremamente necessários no auxílio da resolução dos problemas visando o pronto reestabelecimento do transporte de energia elétrica.

Sendo assim, como aplicado neste trabalho a RNA do tipo RBF, usada como meio para a identificação, viabilizando posteriormente a solução do problema. Podemos ver o método se mostrando totalmente funcional para a classificação de faltas que venham ocorrer nas LT, o que diminui a problemática de identificação do defeito, adiante a aplicação na localização das faltas é apresentada, infelizmente o método selecionado aqui não alcançou, por completo, o objetivo a ele proposto, sendo capaz de realizar sua função apenas para um tipo de falta e ainda com limitação de a falta estar de 0 a 40% (nesse caso, com uma eficiência de 92,32%). Entretanto, a não localização eficiente pela metodologia aplicada à arquitetura escolhida não descaracteriza a necessidade da aplicação dos métodos inteligentes para a resolução dos problemas referentes as linhas de transmissão.

Diversos fatores podem ter influenciado no produto final obtido, desde a escolha dos parâmetros de modelagem do sistema, interferindo nos resultados da simulação até a dimensionalidade dos dados, de forma a não permitir a localização precisa das faltas. Dessa forma, a localização requer uma abordagem diferente da escolhida neste trabalho.

Dos objetivos, ao final deste trabalho todos foram abordados, desde os objetivos alcançados com sucesso (classificação das faltas), quando os não bem sucedidos (a localização das faltas), evidenciando a necessidade e viabilidade da aplicação das RNA's no tocante da resolução dos problemas atrelados as LT's.

Desta forma, vale destacar a relevância dos resultados, onde a utilização dos métodos inteligentes almejam um cenário promissor, propiciando a toda a sociedade uma energia com melhor qualidade, onde as eventuais falhas possam ser superadas de maneira rápida e efetiva.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da RBF com adaptações no código, a fim de prover a localização para que todas as variações realizadas sejam bem sucedidas, podendo ter a utilização da função interna do *Matlab*[®] a *newrb*, com valores de *GOAL* e *SPREAD* variados. Ademais a aplicação do problema tratado aqui com outras funções de RBF também se mostra promissor. Ainda neste mesmo aspecto, uma decomposição do sinal de dados pode ser realizado antes do treinamento da RBF, com a aplicação de uma *Fast Fourier Transform* (FFT), para que com os dados tratados usados no treinamento, possam melhorar a eficiência do método computacional podendo o mesmo ser avaliado quanto a capacidade de localização de faltas pela RBF. Por fim, a implementação e comparação dos resultados obtidos aqui com outras arquiteturas das RNA.

Referências Bibliográficas

AMORIM, H. P.; HUAIS, L. **Faults location in transmission lines through neural networks**. *2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)*, p. 691–695, May 2004.

BISHOP, C. **Pattern Recognition and Machine Learning**. [S.l.: s.n.], 2016. 738 p. ISBN 9781493938438.

BLACKBURN, J.; DOMIN, T. **Protective Relaying: Principles and Applications, Third Edition**. [S.l.: s.n.], 2006. 635 p. ISBN 9780429115691.

BUDAK, S.; AKBAL, B. **Determination of Fault Location in Transmission Lines with Image Processing and Artificial Neural Networks**. 2021. 15 p.

CAMINHA, A. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. [S.l.: s.n.], 1977. 224 p. ISBN 9788521217589.

ELGERD, O. I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. [S.l.: s.n.], 1976. 604 p.

FEI, C.; QI, G.; LI, C. **Fault location on high voltage transmission line by applying support vector regression with fault signal amplitudes**. *Electric Power Systems Research*, v. 160, p. 173–179, 07 2018.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [S.l.: s.n.], 2020. 1-618 p. ISBN 9788521618843.

GALE, P. et al. **Fault location based on travelling waves**. In: *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 54–59.

GAMA, J. et al. **Inteligência Artificial - Uma Abordagem de Aprendizado de Máquina**. [S.l.: s.n.], 2021. 304 p. ISBN 9788521637349.

GIOVANINI, R. **Detecção e classificação rápida de faltas em linhas de transmissão utilizando redes neurais artificiais**. *Escola de Engenharia de São Carlos*, v. 1, p. 1–106, Agosto 2000.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. **Power System Analysis and Design**. [S.l.: s.n.], 2011. 1-782 p. ISBN 9781111425777.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. [S.l.: s.n.], 1994. 1-787 p. ISBN 9780071133388.

- HAYKIN, S. **Redes Neurais - 2ed.** [S.l.: s.n.], 2001. 900 p. ISBN 9788573077186.
- JORGE, D. C.; COURY, D. V.; CARVALHO, A. C. P. L. F. de. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Reconhecimento de Padrões.** In: *Anais do 4 Congresso Brasileiro de Redes Neurais*. São José dos Campos, SP: CNRN, 1999. p. 061–066.
- KRZYSZTOF, G. et al. **Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview.** *Journal of Electrical Systems*, v. 7, p. 287–296, Jan 2011.
- LIMA, I.; PINHEIRO, C.; SANTOS, F. **Inteligência Artificial.** [S.l.: s.n.], 2016. 184 p. ISBN 9788535278095.
- LOPES, F. V. **Localização de faltas em linhas de transmissão baseada em ondas viajantes.** (*Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica*), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, p. 94, Março 2011.
- MAHANTY, R.; GUPTA, P. **Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines.** *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 151, p. 201 – 212, 04 2004.
- MATHWORKS. *Radial Basis Neural Networks*. 2021. <https://www.mathworks.com/>. 02 de Dezembro, 2021. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/radial-basis-neural-networks.htm>>.
- MENEZES, M. P. **Classificação e localização de faltas em linhas de transmissão usando diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais.** *Escola Politécnica USP*, v. 1, n. 5, p. 1–175, Aug 2008.
- METELLO, E. **Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Falhas por Ondas Viajantes.** *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 509/2012, Departamento de Engenharia Elétrica*, p. 1–71, Nov 2012.
- NASAR, S. A. **Schaum's Outline of Theory and Problems of Electric Power Systems.** [S.l.: s.n.], 1990. 1-175 p.
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. **O emprego de redes neurais artificiais na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão.** *Sba: Controle Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 14, p. 138 – 150, Jun 2003. ISSN 0103-1759.
- ONS. *O QUE É O SIN: "Sistema Interligado Nacional"*. 2021. <http://www.ons.org.br/>. 16 de Novembro, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-si>>.
- ROBBA, E. J. et al. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica.** [S.l.: s.n.], 2020. v. 1. 1-522 p. ISBN 978-6555060072.
- SAADAT, H. **Power System Analysis.** [S.l.: s.n.], 1999. 1-697 p. ISBN 9780075616344.
- SAHA, M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks.** [S.l.: s.n.], 2010. v. 48. 1-422 p. ISBN 978-1-84882-885-8.

SHAIK, A.; PULIPAKA, R. **A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines.** *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 64, p. 35–40, Jan 2015.

SILVA, D. M. K. **Fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando redução de barras.** *Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina*, p. 73, Fevereiro 2016.

SILVEIRA, P. M. da; SEARA, R.; ZÜRN, H. H. **Localização de Fatas por Ondas Viajantes - Uma Nova Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet.** *XVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, v. 1, Outubro 2001.



ALGORITMO PARA A APLICAÇÃO DA RBF

A.1 Algoritmo de classificação das faltas

Programa 1 – Algoritmo RBF no Matlab

```

1  clc ;
2  close all ;
3  clear all ;
4  %% Training Side
5  load_system(' MODEL_IIIa ' ) % Carrega a simula o
6
7  %----- Dados falta AG -----
8  open_system(' MODEL_IIIa/Three-Phase Fault ' ) % Set falta AG
9
10 sim(' MODEL_IIIa ' ) % Executa simula o
11
12 data1 = [Ia_bus3 (100) Ib_bus3 (100) Ic_bus3 (100) 1/3*( Ia_bus3 (100)+Ib_bus3 (100) +
13          Ic_bus3 (100) );
14          Ia_bus3 (460) Ib_bus3 (460) Ic_bus3 (460) 1/3*( Ia_bus3 (460)+Ib_bus3 (460) +
15          Ic_bus3 (460) );
16          Ia_bus3 (820) Ib_bus3 (820) Ic_bus3 (820) 1/3*( Ia_bus3 (820)+Ib_bus3 (820) +
17          Ic_bus3 (820) );
18          Ia_bus3 (1180) Ib_bus3 (1180) Ic_bus3 (1180) 1/3*( Ia_bus3 (1180)+Ib_bus3 (1180) +
19          Ic_bus3 (1180) );
20          Ia_bus3 (1540) Ib_bus3 (1540) Ic_bus3 (1540) 1/3*( Ia_bus3 (1540)+Ib_bus3 (1540) +
21          Ic_bus3 (1540) );
22          Ia_bus3 (2100) Ib_bus3 (2100) Ic_bus3 (2100) 1/3*( Ia_bus3 (2100)+Ib_bus3 (2100) +
23          Ic_bus3 (2100) );
24          Ia_bus3 (2660) Ib_bus3 (2660) Ic_bus3 (2660) 1/3*( Ia_bus3 (2660)+Ib_bus3 (2660) +
25          Ic_bus3 (2660) );
26          Ia_bus3 (3220) Ib_bus3 (3220) Ic_bus3 (3220) 1/3*( Ia_bus3 (3220)+Ib_bus3 (3220) +
27          Ic_bus3 (3220) );
28          Ia_bus3 (3780) Ib_bus3 (3780) Ic_bus3 (3780) 1/3*( Ia_bus3 (3780)+Ib_bus3 (3780) +
29          Ic_bus3 (3780) );
30          Ia_bus3 (4340) Ib_bus3 (4340) Ic_bus3 (4340) 1/3*( Ia_bus3 (4340)+Ib_bus3 (4340) +
31          Ic_bus3 (4340) )];

```

```

22 target1 = [1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1; 1 0 0 1;
            1 0 0 1; 1 0 0 1];
23
24
25 %----- Dados falta BG -----
26 open_system(' MODEL_IIIa/Three-Phase Fault ') % Set falta BG
27
28 sim(' MODEL_IIIa ') % Executa simula o
29
30 data2 = [Ia_bus3(180) Ib_bus3(180) Ic_bus3(180) 1/3*(Ia_bus3(180)+Ib_bus3(180) +
            Ic_bus3(180));
31         Ia_bus3(540) Ib_bus3(540) Ic_bus3(540) 1/3*(Ia_bus3(540)+Ib_bus3(540) +
            Ic_bus3(540));
32         Ia_bus3(900) Ib_bus3(900) Ic_bus3(900) 1/3*(Ia_bus3(900)+Ib_bus3(900) +
            Ic_bus3(900));
33         Ia_bus3(1260) Ib_bus3(1260) Ic_bus3(1260) 1/3*(Ia_bus3(1260)+Ib_bus3(1260) +
            Ic_bus3(1260));
34         Ia_bus3(1620) Ib_bus3(1620) Ic_bus3(1620) 1/3*(Ia_bus3(1620)+Ib_bus3(1620) +
            Ic_bus3(1620));
35         Ia_bus3(2180) Ib_bus3(2180) Ic_bus3(2180) 1/3*(Ia_bus3(2180)+Ib_bus3(2180) +
            Ic_bus3(2180));
36         Ia_bus3(2740) Ib_bus3(2740) Ic_bus3(2740) 1/3*(Ia_bus3(2740)+Ib_bus3(2740) +
            Ic_bus3(2740));
37         Ia_bus3(3300) Ib_bus3(3300) Ic_bus3(3300) 1/3*(Ia_bus3(3300)+Ib_bus3(3300) +
            Ic_bus3(3300));
38         Ia_bus3(3860) Ib_bus3(3860) Ic_bus3(3860) 1/3*(Ia_bus3(3860)+Ib_bus3(3860) +
            Ic_bus3(3860));
39         Ia_bus3(4420) Ib_bus3(4420) Ic_bus3(4420) 1/3*(Ia_bus3(4420)+Ib_bus3(4420) +
            Ic_bus3(4420))];
40 target2 = [0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1; 0 1 0 1;
            0 1 0 1; 0 1 0 1];
41
42
43 %----- Dados falta CG -----
44 open_system(' MODEL_IIIa/Three-Phase Fault ') % Set falta CG
45
46 sim(' MODEL_IIIa ') % Executa simula o
47
48 data3 = [Ia_bus3(240) Ib_bus3(240) Ic_bus3(240) 1/3*(Ia_bus3(240)+Ib_bus3(240) +
            Ic_bus3(240));
49         Ia_bus3(640) Ib_bus3(640) Ic_bus3(640) 1/3*(Ia_bus3(640)+Ib_bus3(640) +
            Ic_bus3(640));
50         Ia_bus3(1000) Ib_bus3(1000) Ic_bus3(1000) 1/3*(Ia_bus3(1000)+Ib_bus3(1000) +
            Ic_bus3(1000));
51         Ia_bus3(1360) Ib_bus3(1360) Ic_bus3(1360) 1/3*(Ia_bus3(1360)+Ib_bus3(1360) +
            Ic_bus3(1360));
52         Ia_bus3(1720) Ib_bus3(1720) Ic_bus3(1720) 1/3*(Ia_bus3(1720)+Ib_bus3(1720) +
            Ic_bus3(1720));
53         Ia_bus3(2280) Ib_bus3(2280) Ic_bus3(2280) 1/3*(Ia_bus3(2280)+Ib_bus3(2280) +
            Ic_bus3(2280));
54         Ia_bus3(2840) Ib_bus3(2840) Ic_bus3(2840) 1/3*(Ia_bus3(2840)+Ib_bus3(2840) +
            Ic_bus3(2840));
55         Ia_bus3(3400) Ib_bus3(3400) Ic_bus3(3400) 1/3*(Ia_bus3(3400)+Ib_bus3(3400) +
            Ic_bus3(3400));
56         Ia_bus3(3960) Ib_bus3(3960) Ic_bus3(3960) 1/3*(Ia_bus3(3960)+Ib_bus3(3960) +
            Ic_bus3(3960));
57         Ia_bus3(4520) Ib_bus3(4520) Ic_bus3(4520) 1/3*(Ia_bus3(4520)+Ib_bus3(4520) +
            Ic_bus3(4520))];

```



```

94
95 %----- Dados falta BCG -----
96 open_system(' MODEL_IIIa/Three-Phase Fault ') % Set falta BCG
97
98 sim(' MODEL_IIIa ') % Executa simula o
99
100 data6 = [Ia_bus3(480) Ib_bus3(480) Ic_bus3(480) 1/3*(Ia_bus3(480)+Ib_bus3(480) +
101         Ic_bus3(480));
102         Ia_bus3(840) Ib_bus3(840) Ic_bus3(840) 1/3*(Ia_bus3(840)+Ib_bus3(840) +
103         Ic_bus3(840));
104         Ia_bus3(1200) Ib_bus3(1200) Ic_bus3(1200) 1/3*(Ia_bus3(1200)+Ib_bus3(1200) +
105         Ic_bus3(1200));
106         Ia_bus3(1560) Ib_bus3(1560) Ic_bus3(1560) 1/3*(Ia_bus3(1560)+Ib_bus3(1560) +
107         Ic_bus3(1560));
108         Ia_bus3(1920) Ib_bus3(1920) Ic_bus3(1920) 1/3*(Ia_bus3(1920)+Ib_bus3(1920) +
109         Ic_bus3(1920));
110         Ia_bus3(2480) Ib_bus3(2480) Ic_bus3(2480) 1/3*(Ia_bus3(2480)+Ib_bus3(2480) +
111         Ic_bus3(2480));
112         Ia_bus3(3040) Ib_bus3(3040) Ic_bus3(3040) 1/3*(Ia_bus3(3040)+Ib_bus3(3040) +
113         Ic_bus3(3040));
114         Ia_bus3(3500) Ib_bus3(3500) Ic_bus3(3500) 1/3*(Ia_bus3(3500)+Ib_bus3(3500) +
115         Ic_bus3(3500));
116         Ia_bus3(4060) Ib_bus3(4060) Ic_bus3(4060) 1/3*(Ia_bus3(4060)+Ib_bus3(4060) +
117         Ic_bus3(4060));
118         Ia_bus3(4720) Ib_bus3(4720) Ic_bus3(4720) 1/3*(Ia_bus3(4720)+Ib_bus3(4720) +
119         Ic_bus3(4720))];
120 target6 = [0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1; 0 1 1 1;
121           0 1 1 1; 0 1 1 1];
122
123
124 %----- Matriz geral para rede -----
125 data = [data1; data2; data3; data4; data5; data6]; % Matriz de dados
126 target = [target1; target2; target3; target4; target5; target6]; % Target de dados
127
128 %tic
129
130 % Create a radial basis neural net_awork
131 % Train the net_awork
132 net_a = newrb(data',target'); % net_a is the trained model. save it at end for
133         doing testing
134 save(' net_a.mat ', ' net_a ');
135
136 % train performance
137 y = sim(net_a,data');
138 y=round(y);
139 performance = sum(target==y)/size(target,1)
140
141 %% Testing Side
142 % for testing load the trained model
143
144 open_system(' MODEL_IIIa/Three-Phase Fault ')
145
146 sim(' MODEL_IIIa ') % Executa simula o
147
148
149 load(' net_a.mat ');
150 testdata = [Ia_bus3(100) Ib_bus3(100) Ic_bus3(100) 1/3*(Ia_bus3(100)+Ib_bus3(100) +
151         Ic_bus3(100))];
152 y = sim(net_a,testdata');

```

```

140 y=round(y);
141 y'
142
143 load('net_a.mat');
144 testdata = [Ia_bus3(180) Ib_bus3(180) Ic_bus3(180) 1/3*(Ia_bus3(180)+Ib_bus3(180)+
            Ic_bus3(180))];
145 y = sim(net_a, testdata');
146 y=round(y);
147 y'
148
149 load('net_a.mat');
150 testdata = [Ia_bus3(240) Ib_bus3(240) Ic_bus3(240) 1/3*(Ia_bus3(240)+Ib_bus3(240)+
            Ic_bus3(240))];
151 y = sim(net_a, testdata');
152 y=round(y);
153 y'
154
155 load('net_a.mat');
156 testdata = [Ia_bus3(320) Ib_bus3(320) Ic_bus3(320) 1/3*(Ia_bus3(320)+Ib_bus3(320)+
            Ic_bus3(320))];
157 y = sim(net_a, testdata');
158 y=round(y);
159 y'
160
161 load('net_a.mat');
162 testdata = [Ia_bus3(400) Ib_bus3(400) Ic_bus3(400) 1/3*(Ia_bus3(400)+Ib_bus3(400)+
            Ic_bus3(400))];
163 y = sim(net_a, testdata');
164 y=round(y);
165 y'
166
167 load('net_a.mat');
168 testdata = [Ia_bus3(480) Ib_bus3(480) Ic_bus3(480) 1/3*(Ia_bus3(480)+Ib_bus3(480)+
            Ic_bus3(480))];
169 y = sim(net_a, testdata');
170 y=round(y);
171 y'
172
173 %toc

```

A.2 Algoritmo de Localização das faltas

```

1  clc;
2  close all;
3  clear all;
4  %% Training Side
5  load_system('MODEL_IV') % Carrega a simulação
6
7  % -----
8  open_system('MODEL_IV') % Set falta AG 10m
9
10 sim('MODEL_IV') % Executa simulação
11
12 % Janelamento dos dados
13 Ia_PF = normalize(Ia_bus3(2001:3001));
14 Ib_PF = normalize(Ib_bus3(2001:3001));

```

```

15 Ic_PF = normalize (Ic_bus3 (2001:3001));
16 Va_PF = normalize (Va_bus3 (2001:3001));
17 Vb_PF = normalize (Vb_bus3 (2001:3001));
18 Vc_PF = normalize (Vc_bus3 (2001:3001));
19
20 data1 = [Ia_PF (1) Ib_PF (1) Ic_PF (1) Va_PF (1) Vb_PF (1) Vc_PF (1);
21         Ia_PF (100) Ib_PF (100) Ic_PF (100) Va_PF (100) Vb_PF (100) Vc_PF (100);
22         Ia_PF (200) Ib_PF (200) Ic_PF (200) Va_PF (200) Vb_PF (200) Vc_PF (200);
23         Ia_PF (300) Ib_PF (300) Ic_PF (300) Va_PF (300) Vb_PF (300) Vc_PF (300);
24         Ia_PF (400) Ib_PF (400) Ic_PF (400) Va_PF (400) Vb_PF (400) Vc_PF (400);
25         Ia_PF (500) Ib_PF (500) Ic_PF (500) Va_PF (500) Vb_PF (500) Vc_PF (500);
26         Ia_PF (600) Ib_PF (600) Ic_PF (600) Va_PF (600) Vb_PF (600) Vc_PF (600);
27         Ia_PF (700) Ib_PF (700) Ic_PF (700) Va_PF (700) Vb_PF (700) Vc_PF (700);
28         Ia_PF (800) Ib_PF (800) Ic_PF (800) Va_PF (800) Vb_PF (800) Vc_PF (800);
29         Ia_PF (900) Ib_PF (900) Ic_PF (900) Va_PF (900) Vb_PF (900) Vc_PF (900)];
30 target1 = [0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1
31            0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1;
32            0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1
33            0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1; 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
34
35 % -----
36 open_system (' MODEL_IV ' ) % Set falta AG 20m
37
38 sim (' MODEL_IV ' ) % Executa simula o
39
40 % Janelamento dos dados
41 Ia_PF = normalize (Ia_bus3 (2001:3001));
42 Ib_PF = normalize (Ib_bus3 (2001:3001));
43 Ic_PF = normalize (Ic_bus3 (2001:3001));
44 Va_PF = normalize (Va_bus3 (2001:3001));
45 Vb_PF = normalize (Vb_bus3 (2001:3001));
46 Vc_PF = normalize (Vc_bus3 (2001:3001));
47
48 data2 = [Ia_PF (2) Ib_PF (2) Ic_PF (2) Va_PF (2) Vb_PF (2) Vc_PF (2);
49         Ia_PF (110) Ib_PF (110) Ic_PF (110) Va_PF (110) Vb_PF (110) Vc_PF (110);
50         Ia_PF (210) Ib_PF (210) Ic_PF (210) Va_PF (210) Vb_PF (210) Vc_PF (210);
51         Ia_PF (310) Ib_PF (310) Ic_PF (310) Va_PF (310) Vb_PF (310) Vc_PF (310);
52         Ia_PF (410) Ib_PF (410) Ic_PF (410) Va_PF (410) Vb_PF (410) Vc_PF (410);
53         Ia_PF (510) Ib_PF (510) Ic_PF (510) Va_PF (510) Vb_PF (510) Vc_PF (510);
54         Ia_PF (610) Ib_PF (610) Ic_PF (610) Va_PF (610) Vb_PF (610) Vc_PF (610);
55         Ia_PF (710) Ib_PF (710) Ic_PF (710) Va_PF (710) Vb_PF (710) Vc_PF (710);
56         Ia_PF (810) Ib_PF (810) Ic_PF (810) Va_PF (810) Vb_PF (810) Vc_PF (810);
57         Ia_PF (910) Ib_PF (910) Ic_PF (910) Va_PF (910) Vb_PF (910) Vc_PF (910)];
58 target2 = [0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2
59            0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2;
60            0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2
61            0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2; 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2];
62
63 % -----
64 open_system (' MODEL_IV ' ) % Set falta AG 30m
65
66 sim (' MODEL_IV ' ) % Executa simula o
67
68 % Janelamento dos dados
69 Ia_PF = normalize (Ia_bus3 (2001:3001));
70 Ib_PF = normalize (Ib_bus3 (2001:3001));
71 Ic_PF = normalize (Ic_bus3 (2001:3001));

```

```

70 Va_PF = normalize (Va_bus3 (2001:3001));
71 Vb_PF = normalize (Vb_bus3 (2001:3001));
72 Vc_PF = normalize (Vc_bus3 (2001:3001));
73
74 data3 = [Ia_PF (3) Ib_PF (3) Ic_PF (3) Va_PF (3) Vb_PF (3) Vc_PF (3);
75          Ia_PF (120) Ib_PF (120) Ic_PF (120) Va_PF (120) Vb_PF (120) Vc_PF (120);
76          Ia_PF (220) Ib_PF (220) Ic_PF (220) Va_PF (220) Vb_PF (220) Vc_PF (220);
77          Ia_PF (320) Ib_PF (320) Ic_PF (320) Va_PF (320) Vb_PF (320) Vc_PF (320);
78          Ia_PF (420) Ib_PF (420) Ic_PF (420) Va_PF (420) Vb_PF (420) Vc_PF (420);
79          Ia_PF (520) Ib_PF (520) Ic_PF (520) Va_PF (520) Vb_PF (520) Vc_PF (520);
80          Ia_PF (620) Ib_PF (620) Ic_PF (620) Va_PF (620) Vb_PF (620) Vc_PF (620);
81          Ia_PF (720) Ib_PF (720) Ic_PF (720) Va_PF (720) Vb_PF (720) Vc_PF (720);
82          Ia_PF (820) Ib_PF (820) Ic_PF (820) Va_PF (820) Vb_PF (820) Vc_PF (820);
83          Ia_PF (920) Ib_PF (920) Ic_PF (920) Va_PF (920) Vb_PF (920) Vc_PF (920)];
84 target3 = [0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3
85            0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3;
86            0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3
87            0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3; 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3];
88
89 % -----
90 open_system (' MODEL_IV ') % Set falta AG 40m
91
92 sim (' MODEL_IV ') % Executa simula o
93
94 % Janelamento dos dados
95 Ia_PF = normalize (Ia_bus3 (2001:3001));
96 Ib_PF = normalize (Ib_bus3 (2001:3001));
97 Ic_PF = normalize (Ic_bus3 (2001:3001));
98 Va_PF = normalize (Va_bus3 (2001:3001));
99 Vb_PF = normalize (Vb_bus3 (2001:3001));
100 Vc_PF = normalize (Vc_bus3 (2001:3001));
101
102 data4 = [Ia_PF (4) Ib_PF (4) Ic_PF (4) Va_PF (4) Vb_PF (4) Vc_PF (4);
103          Ia_PF (130) Ib_PF (130) Ic_PF (130) Va_PF (130) Vb_PF (130) Vc_PF (130);
104          Ia_PF (230) Ib_PF (230) Ic_PF (230) Va_PF (230) Vb_PF (230) Vc_PF (230);
105          Ia_PF (330) Ib_PF (330) Ic_PF (330) Va_PF (330) Vb_PF (330) Vc_PF (330);
106          Ia_PF (430) Ib_PF (430) Ic_PF (430) Va_PF (430) Vb_PF (430) Vc_PF (430);
107          Ia_PF (530) Ib_PF (530) Ic_PF (530) Va_PF (530) Vb_PF (530) Vc_PF (530);
108          Ia_PF (630) Ib_PF (630) Ic_PF (630) Va_PF (630) Vb_PF (630) Vc_PF (630);
109          Ia_PF (730) Ib_PF (730) Ic_PF (730) Va_PF (730) Vb_PF (730) Vc_PF (730);
110          Ia_PF (830) Ib_PF (830) Ic_PF (830) Va_PF (830) Vb_PF (830) Vc_PF (830);
111          Ia_PF (930) Ib_PF (930) Ic_PF (930) Va_PF (930) Vb_PF (930) Vc_PF (930)];
112 target4 = [0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4
113            0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4;
114            0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4
115            0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4; 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4];
116
117 %% neural netork
118 data = [data1; data2; data3; data4]; % Matriz de dados
119 target = [target1; target2; target3; target4]; % Target de dados
120
121 % Create a radial basis neural net_awork
122 % Train the net_awork
123 net_a = newrb (data', target'); % net_a is the trained model. save it at end for
124 doing testing
125 save (' net_a.mat ', ' net_a ');

```

```
124 clc
125 %% Testing Side
126
127 load('net_a.mat');
128 testdata = [Ia_PF(1) Ib_PF(1) Ic_PF(1) Va_PF(1) Vb_PF(1) Vc_PF(1)];
129 y = sim(net_a, testdata');
130 %y=round(y);
131 y'
132
133 load('net_a.mat');
134 testdata = [Ia_PF(2) Ib_PF(2) Ic_PF(2) Va_PF(2) Vb_PF(2) Vc_PF(2)];
135 y = sim(net_a, testdata');
136 %y=round(y);
137 y'
138
139 load('net_a.mat');
140 testdata = [Ia_PF(3) Ib_PF(3) Ic_PF(3) Va_PF(3) Vb_PF(3) Vc_PF(3)];
141 y = sim(net_a, testdata');
142 %y=round(y);
143 y'
144
145 load('net_a.mat');
146 testdata = [Ia_PF(4) Ib_PF(4) Ic_PF(4) Va_PF(4) Vb_PF(4) Vc_PF(4)];
147 y = sim(net_a, testdata');
148 %y=round(y);
149 v'
```

CorujaT_EX



Este volume foi tipografado em L^AT_EX na classe CorujaT_EX como uma demanda do Colegiado do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) (https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX).