



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE
ATRAVÉS DE REDE NEURAL ARTIFICIAL**

Ana Carolina Pereira de Oliveira

Belo Horizonte

Maio de 2022



PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE ATRAVÉS DE REDE NEURAL ARTIFICIAL

Ana Carolina Pereira de Oliveira

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Linha de Pesquisa: Planejamento e Operação do Sistema Elétrico de Potência

Orientador: Prof. Dr. Márcio Matias Afonso

Belo Horizonte

Maio de 2022

O48p Oliveira, Ana Carolina Pereira de
Proteção de distância em linhas de transmissão com compensação
série através de rede neural artificial / Ana Carolina Pereira de Oliveira. –
2022.

71 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o
CEFET-MG.

Orientador: Márcio Matias Afonso.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais.

1. Energia elétrica – Transmissão – Teses. 2. Linhas elétricas – Teses.
3. Relés elétricos – Teses. 4. Inteligência artificial – Teses. 5. Redes
neurais (Computação) – Teses. 6. ATP (Programa de computador) –
Teses. I. Afonso, Márcio Matias. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. III. Universidade Federal de São João
del-Rei. IV. Título.

CDD 621.319

(folha de aprovação a ser anexada)

*Aos meus pais, Luiz Guilherme e
Andréisa, e à minha família.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luiz Guilherme Lozi de Oliveira e Andréia Asmar Pereira de Oliveira, pelo apoio incondicional, pela paciência e compreensão em todas as dificuldades e por proporcionarem o melhor para mim; aos meus familiares e ao meu irmão Pedro Henrique Pereira de Oliveira. Agradeço também a Deus por me dar saúde, pelas alegrias e conquistas.

Agradeço aos amigos que conheci durante a minha trajetória estudantil no Magnum e no CEFET-MG. Agradeço em especial à Kamila Costa, ao Gabriel Luiz Almeida, ao Caio Mendes, à Nataly Monken e ao Marcílio Queiroz, por todo apoio, paciência e companheirismo durante esses anos.

Agradeço à Furnas Centrais Elétricas pelos dados disponibilizados para o estudo e, particularmente, ao Paulo Estevan de Carvalho por todo auxílio e disponibilidade. Por fim, agradeço aos meus professores que sempre me incentivaram durante a formação acadêmica e agregaram conhecimento. Em especial ao meu orientador Márcio Matias Afonso, ao meu coorientador Eduardo Gonzaga da Silveira e a Simone Rocha por toda a disponibilidade, interesse e atenção.

*“Fé não faz as coisas
serem fáceis, mas as tornam
totalmente possíveis, creia.
(Romanos 5:8)”*

Resumo

O contínuo aumento das unidades consumidoras implica a necessidade de maior transmissão de energia elétrica. Dentre as alternativas, a compensação série em linhas de transmissão da rede básica tem como vantagem o aumento da capacidade de transmissão, a melhoria da estabilidade do sistema, a diminuição da necessidade de equipamentos de controle de tensão, além de ser mais econômica que as demais opções de aumento da transmissão de energia. Entretanto, tal alternativa pode gerar alguns problemas no sistema, principalmente relacionados à proteção de distância. O relé de distância é um dos principais equipamentos empregados na proteção do sistema elétrico, sendo muito utilizado na proteção principal em linhas de transmissão mais longas e na proteção de retaguarda nas mais curtas. A filosofia dessa proteção fundamenta-se na medição e na avaliação da impedância e, no caso de ocorrência de um curto-circuito, é proporcional à distância ao ponto de defeito, considerando-se a resistência de falta igual a zero. No entanto, a compensação série da linha e a proteção do banco de capacitores alteram os parâmetros de acionamento do relé. Este trabalho tem por objetivo utilizar redes neurais artificiais para a melhoria da exatidão na identificação do tipo de falta e determinação da zona de atuação do relé de distância em linhas de transmissão compensadas. Para isso, simulou-se uma batelada de casos de falta em linhas do tronco Norte-Sul I do Sistema Elétrico Brasileiro, com capacitores série nas duas extremidades. Para geração dos dez tipos de curto-circuito, utilizou-se a variação do ângulo de incidência, da resistência de falta e da distância de ocorrência. Com os resultados, foi possível comparar o desempenho das redes neurais em diferentes cenários e entre o relé convencional e o modelo proposto baseado em rede neural.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão com Compensação Série, Relé de Distância, Rede Neural Artificial, ATP

Abstract

The continuous increase in power demand require higher capacity for electric power transmission. Among the alternatives, the installation of series compensation on long High Voltage transmission line has the advantage of increasing the power transmission capacity, improving the stability of the system, reducing the need for voltage control equipment, in addition to being more economical than another options for increasing power transmission. However, some problems might happen in the system when using this alternative, mainly related to protection. The distance relay is one of the main equipment for electrical systems protection, it is widely used in the main protection in longer transmission lines and in the rear protection in the shorter ones. The philosophy of this protection is based on the measurement and evaluation of the impedance of the short-circuited section, which is proportional to the distance to the fault point. However, line series compensation and capacitor bank protection change the relay trigger parameters. This work aims to improve the accuracy in identifying the type of fault and determining the zone of action of the distance relay in compensated transmission lines using artificial neural networks. For this, a batch of fault cases was simulated in lines of the North-South trunk of the Brazilian electrical system, with series capacitors at both ends. The angle of incidence, the fault resistance and the distance of occurrence were varied to generate the ten types of short circuit. The results allow to compare the performance of neural networks in different scenarios and between the conventional relay and the proposed model based on neural network.

Keywords: Transmission Line with Series Compensation, Distance Relay, Neural Network, ATP

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Sinais de entrada para unidade fase-terra e fase-fase do relé de distância. Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016).	23
Tabela 3.2 – Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta. Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016).	23
Tabela 4.1 – Dados dos condutores e cabos para-raios das torres da interligação Norte- Sul I. Fonte: (GOMES, 2012).	38
Tabela 4.2 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas da interligação Norte-Sul I calculados para frequência de 60 Hz. Fonte: (GOMES, 2012).	39
Tabela 4.3 – Dados da batelada de treinamento	43
Tabela 4.4 – Dados da batelada de validação	43
Tabela 4.5 – Resposta da RNA no treinamento e validação para o tipo de falta.....	47
Tabela 4.6 – Resposta da RNA no treinamento e validação para duas zonas de proteção.	47
Tabela 4.7 – Resposta da RNA no treinamento e validação para a zona de proteção..	48
Tabela 5.1 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para a LT Serra da Mesa – Gurupi.....	57
Tabela 5.2 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para a LT Gurupi - Miracema.....	57
Tabela 5.3 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para a LT Serra da Mesa – Gurupi.....	58
Tabela 5.4 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para a LT Gurupi – Miracema.....	59

Tabela 5.5 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta, com treinamento na LT Serra da Mesa – Gurupi e validação na LT Gurupi – Miracema.	60
Tabela 5.6 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação, com treinamento na LT Serra da Mesa – Gurupi e validação na LT Gurupi – Miracema.	61
Tabela 5.7 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.	62
Tabela 5.8 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.	63
Tabela 5.9 – Resposta da RNA para identificação da zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.	63
Tabela 5.10 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema com duas redes neurais distintas.	64
Tabela 5.11 – Resposta do relé de distância para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.	65

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Influência do grau de compensação na potência transmitida por uma linha de transmissão. Fonte: (FERREIRA, 2018) e (MANTELE, 1999).....	7
Figura 2.2 – Representação paramétrica de uma linha de transmissão. Fonte: adaptado de (CONCEIÇÃO, 2015).	8
Figura 2.3 – Representação do fluxo de potência em uma linha de transmissão. Fonte: Adaptado de (FRONTIN e et al., 2013) e (FERREIRA, 2018).....	9
Figura 2.4 – Critério das áreas iguais para análise de estabilidade do sistema. Fonte: (GONÇALVES, 2007).	11
Figura 2.5 – Proteção com centelhador simples. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).....	12
Figura 2.6 – Proteção com centelhador duplo. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).....	13
Figura 2.7 – Proteção com varistores. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).	14
Figura 2.8 – Corrente na linha de transmissão com CSF de modo que $XC < Xf + XL$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).....	16
Figura 2.9 – Inversão de corrente na linha de transmissão com CSF onde $XC > Xf + XL$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).....	16
Figura 2.10 – Tensão na linha de transmissão com CSF de modo que $XC < Xf + XL$ e $XC < XL$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).	17
Figura 2.11 – Inversão de tensão em linha de transmissão com CSF onde $XC < Xf + XL$ e $XC > XL$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).	17
Figura 2.12 – Diagrama R-X do transitório da impedância de falta em uma linha compensada. Fonte: (GONÇALVES, 2007).....	19
Figura 3.1 – Diagrama R-X. Fonte: Adaptado de (GONÇALVES, 2007).....	25
Figura 3.2 – Características do relé de impedância. Fonte: (GONÇALVES, 2007).	25

Figura 3.3 – Característica do relé de impedância com a unidade direcional. Fonte: (GONÇALVES, 2007).	26
Figura 3.4 – Característica do relé de reatância. Fonte: (LIMA,2006).	26
Figura 3.5 – Característica do relé de reatância com alta resistência de falta. Fonte: (LIMA,2006).	26
Figura 3.6 – Característica do relé mho. Fonte: (LIMA, 2006)	27
Figura 3.7 – Característica do relé mho deslocado para acomodar maior resistência de falta. Fonte: (LIMA, 2006).	27
Figura 3.8 – Zonas de proteção do relé de distância. Fonte: (SILVA, 2020).....	28
Figura 3.9 – Diagrama R-X com as zonas de proteção do relé de distância tipo mho. Fonte (SILVA, 2020).....	29
Figura 3.10 – Representação da característica mho no diagrama R-X. Fonte: (SILVA, 2016).....	30
Figura 3.11 - Relação entre as fases das impedâncias de operação e polarização para o caso da impedância vista pelo relé: (a) dentro da característica mho, (b) sobre a característica mho, (c) fora da característica mho. Fonte: (SILVA, 2016).....	31
Figura 3.12 - Relação entre as magnitudes das impedâncias de operação e polarização para o caso da impedância vista pelo relé: a) dentro da característica mho, (b) sobre a característica mho, (c) fora da característica mho. Fonte: (SILVA, 2016).....	32
Figura 3.13 – Modelo linearizado da impedância do varistor com o capacitor. Fonte (ANDERSON, 1999).	33
Figura 3.14 – Resistência e reatância efetivas de um banco de capacitores protegido por varistor em função da corrente. Fonte: (ANDERSON, 1999).....	33
Figura 3.15 – Resistência e reatância efetivas no plano de impedância complexo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	34

Figura 3.16 – Mudança na impedância vista pelo relé de distância quando a CSF está localizada entre o relé e o ponto de falta. Fonte: (FERREIRA, 2013).	34
Figura 3.17 – Zona de proteção e impedância vista pelo relé para uma falta AT em 85% da LT com CSF.	35
Figura 3.18 - Zona de proteção e impedância vista pelo relé para uma falta AT em 90% da LT com CSF.	35
Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema com a sinalização das linhas em estudo. Fonte: Adaptado de (GOMES, 2012).	38
Figura 4.2 – Silhueta típica das torres do tronco Norte-Sul I. Fonte: (GOMES, 2012). ..	39
Figura 4.3 – Mapa geoeletrico da região sudeste/centro-oeste. Fonte (BRITO, 2014). 40	
Figura 4.4 – Configuração da LT no ATP considerando o modelo <i>JMarti</i>	41
Figura 4.5 – Entrada de dados da torre para a representação da LT no ATP considerando o modelo <i>JMarti</i>	42
Figura 4.6 – Simulação da linha de transmissão Serra da Mesa – Gurupi.	42
Figura 4.7 – Simulação da linha de transmissão Gurupi – Miracema.	42
Figura 4.8 – Neurônio na RNA. Fonte: (GIOVANINI e ET AL, 1999).	44
Figura 4.9 – Rede neural grafo orientado. Fonte: (GONÇALVES, 2008).....	44
Figura 4.10 – Representação esquemática da RNA. Fonte: (GONÇALVES, 2008).	45
Figura 4.11 - Fluxograma da estrutura do algoritmo de processamento dos dados para a classificação e localização da falta na LT por meio da Rede Neural Artificial.	46
Figura 4.12 – Estruturas das redes neurais implementadas. (a) Tipo de falta, (b) tipo de falta e zona de operação para uma linha, (c) tipo de falta e zona de operação para duas linhas, (d) tipo de falta e zona de operação para duas linhas de forma separada.	48
Figura 4.13 – Fluxograma da estrutura do algoritmo de processamento dos dados para o relé de distância.....	49

Figura 4.14 – Fluxograma do processo de simulação.....	50
Figura 5.1 – Tensões de fase para uma falta fase-terra AT em 5% da linha de transmissão.	52
Figura 5.2 – Correntes de fase para uma falta fase-terra AT em 5% da linha de transmissão.....	53
Figura 5.3 – Tensões de fase para uma falta fase-fase AB em 20% da linha de transmissão.	53
Figura 5.4 – Correntes de fase para uma falta fase-fase AB em 20% da linha de transmissão.....	54
Figura 5.5 – Tensões de fase para uma falta fase-fase-terra BCT em 60% da linha de transmissão.....	54
Figura 5.6 – Correntes de fase para uma falta fase-fase-terra BCT em 60% da linha de transmissão.....	55
Figura 5.7 – Tensões de fase para uma falta trifásica ABC em 75% da linha de transmissão.....	55
Figura 5.8 – Correntes de fase para uma falta trifásica ABC em 75% da linha de transmissão.....	56

Lista de Abreviações

AB	Falta envolvendo as fases A e B
ABC	Falta envolvendo as fases A, B e C
ABT	Falta envolvendo as fases A, B e o terra
AT	Falta envolvendo a fase A e o terra
ATP	Alternative Transient Program
BT	Falta envolvendo a fase B e o terra
BC	Falta envolvendo as fases B e C
BCT	Falta envolvendo as fases B, C e o terra
CA	Falta envolvendo as fases C e A
CAT	Falta a envolvendo as fases C, A e o terra
CSF	Compensação Série Fixa
CT	Falta envolvendo a fase C e o terra
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LT	Linha de transmissão
LTs	Linhas de transmissão
MOV	Varistor de Oxido Metálico
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDE	Plano Decenal da Expansão de Energia
PU	Por unidade
RNA	Rede Neural Artificial
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional

Lista de Símbolos

C	Capacitância da linha de transmissão [F/km]
C_1	Capacitor 1 da linha de transmissão Serra da Mesa – Gurupi [F]
C_2	Capacitor 2 da linha de transmissão Serra da Mesa – Gurupi [F]
C_3	Capacitor 1 da linha de transmissão Gurupi – Miracema [F]
C_4	Capacitor 2 da linha de transmissão Gurupi – Miracema [F]
f_0	Frequência fundamental do circuito [Hz]
f_e	Frequência elétrica natural de oscilação [Hz]
G	Condutância da linha de transmissão [S/km]
\hat{I}_0	Fasor de corrente de sequência zero [A]
\hat{I}_a	Fasor de corrente da fase A [A]
\hat{I}_b	Fasor de corrente da fase B [A]
\hat{I}_c	Fasor de corrente da fase C [A]
\hat{I}_r	Corrente medida pelo relé [A]
K_0	Fator de compensação
k	Grau de compensação da linha de transmissão [%]
L	Indutância da linha de transmissão [H/km]
P_{SR}	Potência transmitida entre os terminais da linha de transmissão [W]
R	Resistência da linha de transmissão [Ω /km]
R_{ext}	Raio externo do condutor [m]
R_{int}	Raio interno do condutor [m]
\hat{V}_a	Fasor de tensão da fase A [V]
\hat{V}_b	Fasor de tensão da fase B [V]
\hat{V}_c	Fasor de tensão da fase C [V]
\hat{V}_{op}	Fasor de tensão de operação [V]
\hat{V}_{pol}	Fasor de tensão de polarização [V]
\hat{V}_r	Fasor de tensão medida pelo relé [V]
V_R	Tensão no terminal receptor da linha de transmissão [V]
V_S	Tensão no terminal emissor da linha de transmissão [V]
ω	Frequência angular [rad/s]
X	Reatância da Linha [Ω]
X_C	Reatância do capacitor série [Ω]
X_f	Reatâncias indutivas da fonte [Ω]
X_L	Reatância longitudinal da linha de transmissão [Ω]
Z_A	Impedância de alcance do relé [Ω]
Z_{AT}	Unidade de impedância fase-terra, fase A [Ω]
Z_{BT}	Unidade de impedância fase-terra, fase B [Ω]

Z_{CT}	Unidade de impedância fase-terra, fase C [Ω]
Z_{AB}	Unidade de impedância fase-fase, fases A e B [Ω]
Z_{BC}	Unidade de impedância fase-fase, fases B e C [Ω]
Z_{CA}	Unidade de impedância fase-fase, fases A e C [Ω]
Z_C	Impedância característica da linha de transmissão [Ω]
Z_{L1}	Impedância de sequência positiva [Ω]
Z_{L0}	Impedância de sequência zero [Ω]
Z_{op}	Impedância de operação do relé [Ω]
Z_{pol}	Impedância de polarização do relé [Ω]
\widehat{Z}_r	Impedância calculada pelo relé [Ω]
α	Coefficiente de amortecimento [Np/km]
β	Coefficiente de fase [rad/km]
γ	Constante de propagação [1/km]
μ_r	Permeabilidade magnética
δ	Diferença angular entre as tensões nos terminais da linha

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Organização do Texto.....	4
1.5	Publicação Originada da Dissertação	4
2	Compensação Série	5
2.1	Compensação Série	5
2.2	Grau de Compensação	6
2.3	Linhas de Transmissão.....	7
2.3.1	<i>Linha de Transmissão não Compensada.....</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Linha de Transmissão com Compensação Série Fixa</i>	<i>9</i>
2.4	Estabilidade do Sistema com Compensação Série	10
2.5	Proteção dos Bancos de Capacitores.....	11
2.5.1	<i>Proteção por Centelhador</i>	<i>12</i>
2.5.2	<i>Proteção por Centelhador Duplo</i>	<i>13</i>
2.5.3	<i>Proteção por Varistores.....</i>	<i>13</i>
2.6	Impactos Técnicos da Compensação Série no Sistema	14
2.6.1	<i>Ressonância Subsíncrona</i>	<i>15</i>
2.6.2	<i>Inversão de Corrente</i>	<i>16</i>
2.6.3	<i>Inversão de Tensão.....</i>	<i>17</i>
2.6.4	<i>Alcance e Coordenação dos Relés de Proteção.....</i>	<i>18</i>
2.6.5	<i>Efeitos Transitórios.....</i>	<i>18</i>
2.7	Considerações Finais	19
3	Proteção de Distância	20
3.1	Fundamentos da Proteção	20
3.2	Unidades de Impedância de Falta	22

3.3	Características de Operação.....	24
3.3.1	<i>Diagrama R-X.....</i>	24
3.3.2	<i>Relé de Impedância.....</i>	25
3.3.3	<i>Relé de Reatância.....</i>	26
3.3.4	<i>Relé MHO.....</i>	26
3.4	Zonas de Proteção de Distância.....	27
3.5	Comparadores.....	29
3.5.1	<i>Comparador de Fase.....</i>	29
3.5.2	<i>Comparador de Magnitude.....</i>	31
3.6	Alcance de Relé de Distância.....	32
3.7	Considerações Finais.....	36
4	Sistema em Estudo.....	37
4.1	Interligação Norte-Sul.....	37
4.1.1	<i>Aspectos Gerais.....</i>	37
4.1.2	<i>Tronco Norte-Sul I.....</i>	38
4.2	Simulação do Sistema Elétrico.....	40
4.2.1	<i>Simulação das Linhas de Transmissão no Software ATP.....</i>	40
4.2.2	<i>Geração em Batelada.....</i>	43
4.3	Classificação e Localização de Falhas em Linhas de Transmissão a partir da Rede Neural Artificial.....	44
4.3.1	<i>Rede Neural Artificial.....</i>	44
4.3.2	<i>Classificação e Localização das Falhas.....</i>	46
4.4	Relé de Distância.....	49
4.5	Modelagem do Processo.....	50
4.6	Considerações Finais.....	51
5	Resultados e Análises.....	52
5.1	Resultados e Análises.....	52
5.1.1	<i>Representação gráfica das tensões e correntes de fase.....</i>	52
5.1.2	<i>Relé de RNA na identificação do tipo de falta para treinamento e validação em uma mesma LT.....</i>	56
5.1.3	<i>RNA na identificação do tipo de falta e da zona de proteção para treinamento e validação em uma mesma LT.....</i>	58

5.1.4	<i>RNA na identificação do tipo de falta para treinamento e validação em LTs distintas</i>	59
5.1.5	<i>RNA na identificação do tipo de falta e zona de proteção para treinamento e validação em LTs distintas</i>	60
5.1.6	<i>RNA na Identificação do Tipo de Falta e Zonas de Proteção para o Sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema</i>	61
5.1.7	<i>Relé de Distância na Identificação do Tipo de Falta e Zonas de Proteção para o Sistema Serra da Mesa – Miracema</i>	64
6	Conclusão	66
6.1	Considerações Iniciais	66
6.2	Resultados Alcançados	66
6.3	Propostas de continuidade	67
7	Referências	68

1 Introdução

1.1 Motivação

As linhas de transmissão (LT) de energia elétrica são componentes essenciais no sistema elétrico de potência (SEP), uma vez que são responsáveis por transmitir a energia gerada nas usinas aos centros consumidores. Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), o Brasil possui mais de 169900 km de linhas de transmissão pertencentes à rede básica, de modo a atender as diferentes regiões que o compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), um dos mais robustos do mundo (ONS, 2022).

O fornecimento confiável e ininterrupto de energia elétrica é imprescindível para o desenvolvimento socioeconômico dos países. Com isso, a confiabilidade e a capacidade de expansão da rede elétrica são primordiais para o perfeito funcionamento do sistema de energia. Conforme o Plano Decenal da Expansão de Energia (PDE) emitido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), espera-se um crescimento do consumo de energia no país com uma taxa média de 2,2 % anuais entre 2019 e 2030 (EPE, 2021).

Portanto, torna-se necessário transmitir maiores blocos de energia, sem comprometer a segurança e a estabilidade do sistema. Dentre as principais alternativas disponíveis, destacam-se a criação de novas linhas, a elevação da tensão nominal do sistema e a alocação de bancos de capacitores em série (DINIZ, 2016). Deve-se ressaltar que as restrições ambientais, o elevado investimento e atrasos em obras dificultam a construção de novas LTs e os princípios construtivos dos equipamentos juntamente com os limites impostos pelos órgãos regulamentadores tornam-se um complicador para a transmissão de maior potência (FERREIRA, 2018).

Com isso, a compensação série se torna uma opção viável, uma vez que aumenta a capacidade de transmissão da linha, melhora a estabilidade do sistema e diminui a necessidade de equipamentos de controle de tensão resultando em economia se comparada com as demais alternativas. No entanto, tal procedimento pode implicar diversos problemas no sistema, principalmente relacionados à proteção com relés de

distância, como a variação do alcance, a inversão de corrente e tensão, a ressonância subsíncrona e os efeitos transitórios (OLIVEIRA, 2007).

A proteção de distância é a base para a proteção de linhas de transmissão, uma vez que pode ser utilizada como proteção principal em linhas mais longas e proteção de retaguarda em linhas mais curtas e em outros equipamentos elétricos, como barramentos, transformadores, alimentadores e geradores. Destaca-se como principal característica dessa proteção a medição e a avaliação da impedância do trecho em curto-circuito, a qual é proporcional à distância do ponto de falta. Além disso, atua de forma unidirecional com zonas de atuação com diferentes tempos de *trip* (FERREIRA, 2018).

Deve-se ressaltar que a compensação em série da linha altera os parâmetros de acionamento do relé. Além disso, é necessário proteger os bancos de capacitores contra o aumento de tensão, para tanto, utiliza-se um varistor, componente com resistência variável durante sua condução. Tais interferências no sistema contribuem para os problemas anteriormente citados (OLIVEIRA, 2005).

A fim de obter exatidão e precisão na classificação e localização da falta, propõem-se a utilização de redes neurais artificiais (RNA) aplicadas a diferentes linhas de transmissão. Deve-se ressaltar que o modelo utilizado é caracterizado pela adaptação por experiências, pela capacidade de aprendizagem, pela habilidade de generalização, pela organização de dados, entre outros, de modo a ser uma boa opção para o problema (SALAZAR, 2018).

1.2 Objetivos

Este trabalho visa à análise comparativa do desempenho da rede neural artificial na classificação e localização das faltas em relação ao relé de distância convencional em linhas de transmissão com compensação série. Para tanto, são considerados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o impacto da compensação série no sistema de proteção de distância das linhas de transmissão;

- Modelar o sistema em estudo no *software Alternative Transient Program (ATP)* a fim de gerar os dados em batelada;
- Avaliar o desempenho da rede neural a partir do treinamento e validação da rede com dados da mesma linha de transmissão;
- Avaliar o desempenho da rede neural a partir do treinamento e validação da rede com dados de linhas de transmissão diferentes;
- Avaliar o desempenho da rede neural e do relé de distância convencional na linha em estudo, ambos desenvolvidos no *software Matlab*;
- Comparar os resultados obtidos nos dois relés a partir do tipo e localização da falta de acordo com as zonas de proteção.

1.3 Metodologia

Para a realização deste trabalho, apresenta-se uma breve contextualização, com base nos planos de operação e expansão do sistema elétrico emitidos pelos órgãos regulamentadores de energia no Brasil, do cenário energético do país. Além disso, desenvolve-se um estudo sobre a contribuição da compensação série no sistema e seus impactos técnicos.

Posteriormente, apresentam-se as principais características e dinâmicas de operação dos relés de distância, objeto principal do estudo. A partir dos dados das linhas de transmissão Serra da Mesa - Gurupi e Gurupi – Miracema do Tronco Norte-Sul I, desenvolve-se computacionalmente a geração em batelada dos casos de treinamento e validação da rede, a partir dos *softwares ATP e Matlab*. Explica-se, de forma simplificada, o funcionamento da rede neural para a classificação e localização de faltas no sistema.

Por fim, explicitam-se os resultados obtidos para os diversos casos estudados, bem como suas análises. Tem-se como principal objetivo a comparação do desempenho da rede neural com o relé de distância convencional na classificação e localização da falta. Conclui-se com a melhora substancial nos parâmetros analisados. Assim, tem-se a possibilidade, para trabalhos futuros, de implementação prática e análise do tempo de resposta.

1.4 Organização do Texto

Este trabalho está organizado, como descrito na sequência, em seis capítulos, incluindo a presente introdução.

No Capítulo 2, é feita uma apresentação do estado da arte da compensação série e de seus impactos técnicos no sistema.

No Capítulo 3, são apontadas as principais características da proteção de distância, zonas de atuação e unidades de relé de acordo com a ocorrência da falta.

O Capítulo 4 apresenta os dados do sistema a ser estudado, o processo da simulação, a geração em batelada e a implementação da rede neural.

No capítulo 5, são desenvolvidos os resultados e as análises das simulações da rede neural e do relé de distância convencional para diferentes casos.

O Capítulo 6 apresenta uma conclusão geral acerca do trabalho desenvolvido e sugere propostas de continuidade relacionadas ao tema em estudo.

1.5 Publicação Originada da Dissertação

Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série através de Redes Neurais Artificiais no XV SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão de Sistemas de Energia Elétrica (OLIVEIRA e et al., 2022).

2 Compensação Série

Este capítulo aborda as principais características da compensação série no sistema de transmissão de energia, os efeitos na estabilidade do sistema, as alternativas utilizadas para a proteção dos bancos de capacitores e os impactos técnicos causados pela compensação série frente às alterações da condição normal de funcionamento da rede.

2.1 Compensação Série

A idealização da compensação série fixa (CSF) se deu na década de 1950 com o intuito de permitir a transmissão de energia em corrente alternada para longas distâncias, tendo seu uso comercial a partir de 1960. Essa técnica consiste na instalação de bancos de capacitores com valores fixos em série com a linha de transmissão, a fim de diminuir a reatância indutiva do sistema (FERREIRA, 2018).

A menor reatância acarreta na redução da impedância série da linha de transmissão e, por consequência, minimiza as quedas de tensão e a distância elétrica entre as barras. Assim, a compensação série aumenta a capacidade de transferência de potência das LTs, o que possibilita um aproveitamento mais eficiente do sistema elétrico e posterga a necessidade da expansão da rede (CONCEIÇÃO, 2015).

Deve-se ressaltar que os bancos de capacitores, por consistirem de elementos passivos, não demandam fonte de energia externa. Dessa forma, consistem em uma alternativa econômica e de fácil instalação na garantia dos requisitos básicos de um sistema de transmissão em corrente alternada (CONCEIÇÃO, 2015). Além disso, a utilização da compensação série proporciona (FRONTIN e et al., 2013):

- Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
- Aumento da estabilidade do sistema;
- Diminuição das necessidades de equipamentos de controle da tensão, como capacitores em derivação, pois propicia menor queda de tensão ao longo da linha;
- Melhor divisão de potência entre linhas, reduzindo as perdas globais do sistema;

- Economia nos custos, quando comparados a outras alternativas tecnicamente possíveis.

Apesar das vantagens citadas, a compensação série pode gerar problemas no sistema, principalmente relacionados a atuação da proteção das linhas de transmissão por relés de distância, uma vez que estes são dependentes dos parâmetros de impedância da LT. Dentre eles, pode-se destacar (FERREIRA, 2018):

- Variação no alcance e coordenação do relé de distância;
- Inversão de corrente;
- Inversão de tensão;
- Ressonância subsíncrona;
- Efeitos transitórios.

2.2 Grau de Compensação

O dimensionamento correto da compensação série em linhas de transmissão é de grande importância para o funcionamento do sistema. O grau de compensação é determinado pela relação entre a reatância capacitiva do banco X_C e a reatância indutiva da linha de transmissão X_L . Este valor é dado em percentual e definido conforme a equação 2.1.

$$k = \frac{X_C}{X_L} \cdot 100\%$$

(2.1)

Onde:

k é o grau de compensação da linha de transmissão [%];

X_C é a reatância do capacitor série [Ω];

X_L é a reatância longitudinal da linha de transmissão [Ω];

Deve-se ressaltar que o grau de compensação série varia de 20% a 75%. O limite inferior é restringido por valores econômicos, uma vez que, devido ao elevado custo, não é financeiramente viável compensar uma linha de transmissão abaixo de 20%. Em

contrapartida, as compensações acima de 75% costumam alcançar limites térmicos dos condutores (FERREIRA, 2018).

O efeito do grau de compensação na capacidade de transmissão de uma linha pode ser avaliado no gráfico apresentado na Figura 2.1. Deve-se destacar que, no eixo vertical, tem-se a potência transmitida da linha de transmissão, e, no eixo horizontal a diferença angular entre as tensões nos terminais δ . A quantidade k equivale ao grau de compensação série da LT.

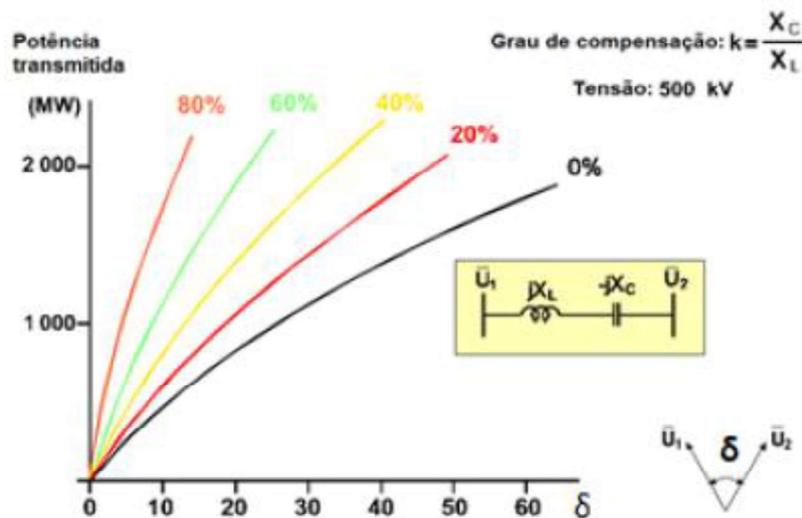


Figura 2.1 – Influência do grau de compensação na potência transmitida por uma linha de transmissão. Fonte: (FERREIRA, 2018) e (MANTELE, 1999).

Pode-se analisar que, para uma diferença angular fixa entre as tensões nos terminais da LT, a capacidade de transmissão aumenta com a intensificação do grau de compensação. Além disso, para o mesmo valor de potência transmitida, a diferença angular diminui com o aumento no nível de compensação, o que implica no aumento da estabilidade dinâmica do sistema (FERREIRA, 2018).

2.3 Linhas de Transmissão

A compensação série fixa altera os parâmetros elétricos das linhas a fim de permitir a transmissão de maiores blocos de energia. Dessa forma, para melhor exemplificar seus efeitos no sistema, é analisado, inicialmente, o comportamento de uma LT sem compensação e, posteriormente, os efeitos da compensação.

2.3.1 Linha de Transmissão não Compensada

A linha de transmissão não compensada, representada na Figura 2.2, é definida através de parâmetros distribuídos por unidade de comprimento. Portanto, tem-se a resistência (R , em Ω/km), a indutância (L , em H/km), a condutância (G , em S/km) e a capacitância (C , em F/km), todas por unidade de comprimento. As variáveis V_S e V_R são, respectivamente, a tensão nos terminais emissor e receptor.

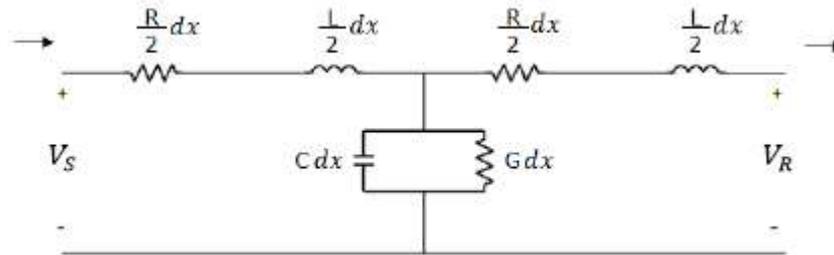


Figura 2.2 – Representação paramétrica de uma linha de transmissão.
Fonte: adaptado de (CONCEIÇÃO, 2015).

Dessa forma, com os parâmetros distribuídos citados, define-se a impedância característica da linha de transmissão Z_C , estabelecida através da razão entre as ondas de tensão e de corrente que se propagam em qualquer ponto da LT, conforme descrito na equação 2.2. Deve-se ressaltar que ω corresponde a frequência angular nominal da rede (CONCEIÇÃO, 2015).

$$Z_C = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} = R_C + jX_C \quad (2.2)$$

Para a determinação da tensão e da corrente em qualquer ponto da linha de transmissão é necessário o cálculo da constante de propagação (γ , em $1/\text{km}$), definida com base no coeficiente de amortecimento (α , em Np/km) e no coeficiente de fase (β , em rad/km), conforme a equação 2.3. Com isso, obtêm-se as equações 2.4 e 2.5 a partir das tensões e correntes no terminal emissor, ressaltando-se que x representa a distância ao ponto considerado da LT e $Y_C = \frac{1}{Z_C}$ (PEREIRA, 2015).

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.3)$$

$$V(x) = \left[\frac{1}{2}(V_S + Z_C I_S) \right] e^{-\gamma x} + \left[\frac{1}{2}(V_S - Z_C I_S) \right] e^{\gamma x} \quad (2.4)$$

$$I(x) = Y_C \left\{ \left[\frac{1}{2} (V_S + Z_C I_S) \right] e^{-\gamma x} - \left[\frac{1}{2} (V_S - Z_C I_S) \right] e^{\gamma x} \right\} \quad (2.5)$$

Pode-se representar, portanto, o modelo EFGH de solução fechada para as equações de onda no domínio da frequência para linhas de transmissão, conforme descrito nas equações 2.6 e 2.7 (PEREIRA, 2015).

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_C \sinh(\gamma x) \\ -Y_C \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3.2 Linha de Transmissão com Compensação Série Fixa

A compensação série fixa (CSF) em linhas de transmissão permite a redução da diferença de tensões nas barras terminais, em módulo e em ângulo. A Figura 2.3 representa o sistema simplificado com as tensões terminais, a potência transmitida e a reatância da linha de transmissão (FRONTIN e et al., 2013).

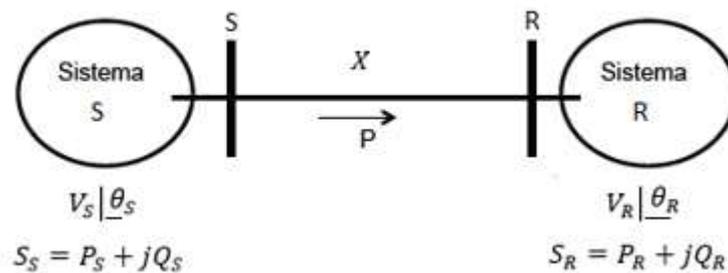


Figura 2.3 – Representação do fluxo de potência em uma linha de transmissão. Fonte: Adaptado de (FRONTIN e et al., 2013) e (FERREIRA, 2018)

Para linhas de alta tensão, a resistência por unidade de comprimento apresenta um valor muito pequeno se comparado à reatância, de modo que permita desconsiderar seu efeito, o que implica na potência transmitida entre os terminais dada pela equação 2.8 (FRONTIN e et al., 2013).

$$P_{SR} = \frac{|V_R||V_S|}{|X|} \text{sen } \alpha, \quad \alpha = \theta_S - \theta_R \quad (2.8)$$

Com isso, pode-se desenvolver as seguintes considerações (FRONTIN e et al., 2013):

- A elevação de V_R e V_S proporciona o aumento de P_{SR} .
- O aumento de α até 90° também proporciona um aumento de P_{SR} , que pode ser mais significativo que as outras alternativas. No entanto, deve-se ressaltar que na ocorrência de um defeito no sistema, para a mesma potência transmitida, quanto menor o ângulo, maior a margem de estabilidade.
- A redução da reatância série proporciona um aumento de P_{SR} . Desta forma, a reatância negativa do capacitor permite que a reatância entre os terminais emissor e receptor seja bastante reduzida.

Dessa forma, o aumento da capacidade de transmissão através da redução de X , reatância da LT, possibilita a elevação das tensões terminais e redução de α , de modo a melhorar as condições de estabilidade do sistema (FRONTIN e et al., 2013).

2.4 Estabilidade do Sistema com Compensação Série

A estabilidade do sistema pode ser definida como a capacidade da rede de se manter em equilíbrio em condições normais de operação e de restabelecê-lo após perturbações (CONCEIÇÃO, 2015). Deve-se destacar que os distúrbios implicam a alteração das grandezas elétricas de modo a se estabelecer um novo ponto de operação. O período necessário para o reajuste é caracterizado por oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema (GONÇALVES, 2007).

Portanto, uma determinada oscilação do rotor implica em um torque elétrico, composto por duas componentes ortogonais, de mesma frequência e proporcional à amplitude do evento. O torque sincronizante está relacionado à região de estabilidade, o que implica a capacidade da máquina de se manter em sincronismo diante de um distúrbio. O torque de amortecimento implica no tempo de estabelecimento do novo ponto de operação (GONÇALVES, 2007).

O critério de áreas iguais permite a avaliação da estabilidade do sistema, uma vez que estabelece que a área referente à aceleração das máquinas deve ser igual à área de desaceleração. A compensação série permite a ampliação da região de estabilidade do sistema, pois, ao diminuir a reatância equivalente do sistema, há um aumento da potência ativa (CONCEIÇÃO, 2015).

A Figura 2.4 representa a relação de potência versus ângulo para distúrbios no sistema com e sem compensação série fixa. No instante em que o ângulo é representado por δ_0 ocorre uma perturbação, a máquina acelera, e há um deslocamento para o ângulo δ_1 , onde o efeito é eliminado. A máquina começa a desacelerar até que a área A_1 se iguale a área A_2 .

Deve-se destacar que o ângulo final deve ser menor que o ângulo crítico δ_m , para que o sistema não perca estabilidade. No sistema com compensação série, observa-se que a área de desaceleração aumenta, o que implica em maiores condições do sistema de retornar a um ponto de operação estável após perturbações (GONÇALVES, 2007).

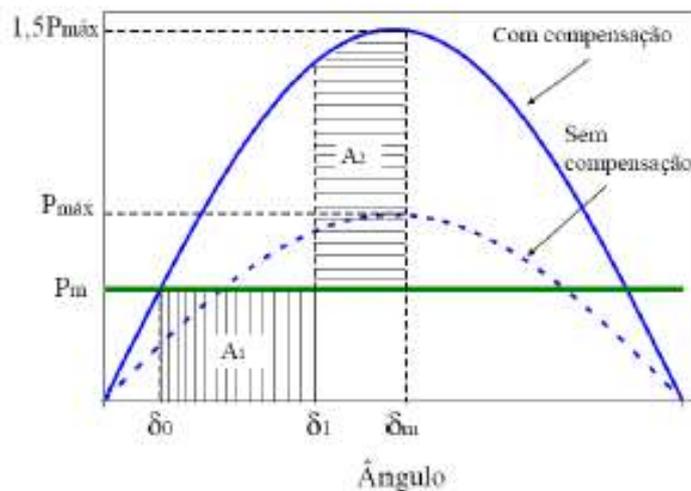


Figura 2.4 – Critério das áreas iguais para análise de estabilidade do sistema.
Fonte: (GONÇALVES, 2007).

2.5 Proteção dos Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores, por estarem conectados em série às linhas de transmissão, estão sujeitos a severos transitórios de tensão e corrente e intenso sobrecarregamento relacionado a curtos-circuitos. Portanto, torna-se imprescindível o uso de um sistema de proteção rápido e eficiente para limitar a tensão nos terminais do capacitor e impedir danos no equipamento.

Dessa forma, o sistema de proteção deve especificar o valor máximo de sobretensão que cada unidade capacitiva pode suportar, de modo a retirar o equipamento do sistema quando esse valor é alcançado. Em contrapartida, para tensões inferiores ao

limite determinado, o banco de capacitor deve operar normalmente. Os principais dispositivos de proteção são o centelhador simples, o centelhador duplo e o varistor de óxido metálico (CONCEIÇÃO, 2015).

2.5.1 Proteção por Centelhador

O centelhador foi a primeira tecnologia empregada na proteção dos bancos de capacitores série (FRONTIN e et al., 2013). Sua filosofia consiste em dois eletrodos separados fisicamente, conectados em paralelo ao banco, o que permite estabelecer um caminho ionizado de modo a desviar o fluxo de corrente do equipamento em caso de sobretenção (CONCEIÇÃO, 2015). O esquema simplificado é representado na Figura 2.5.

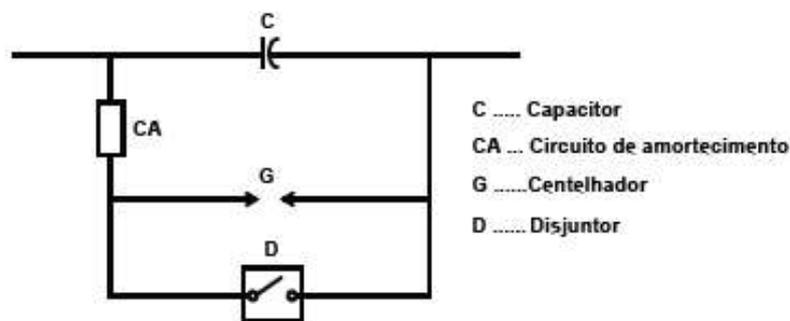


Figura 2.5 – Proteção com centelhador simples. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).

O funcionamento da proteção, após a ocorrência de defeito na rede de transmissão, ocorre da seguinte forma (FRONTIN e et al., 2013):

- O centelhador G dispara e desvia a corrente do capacitor assim que o nível de tensão entre seus terminais atinja o ajuste.
- Após o disparo, o disjuntor D é fechado, de modo a desviar a corrente do centelhador e permitir seu resfriamento e condições dielétricas adequadas à proteção do capacitor.
- Algum tempo após a eliminação do defeito, o disjuntor é aberto, de modo a restabelecer o capacitor à operação.

2.5.2 Proteção por Centelhador Duplo

A proteção por centelhador duplo implica no dobro de centelhadores e disjuntores. No entanto, os requisitos para esses equipamentos são menores, uma vez que para falhas internas, o disjuntor é aberto e as seccionadoras são acionadas para isolação, sem que haja necessidade de abertura da linha. A Figura 2.6 representa o esquema simplificado da proteção.

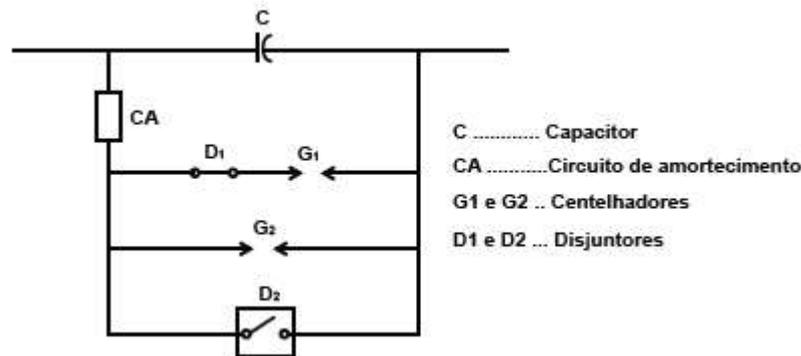


Figura 2.6 – Proteção com centelhador duplo. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).

Deve-se destacar que o centelhador de desvio da corrente G_1 , tem ajuste da tensão de disparo na ordem de 20% inferior ao de reinserção G_2 . Desta forma, após a ocorrência de defeito na rede de transmissão, o funcionamento do sistema de proteção ocorre da seguinte forma (FRONTIN e et al., 2013):

- O centelhador G_1 dispara e desvia a corrente do capacitor assim que o nível de tensão ajustado seja atingido.
- Eliminada a falta, o disjuntor D_1 abre e, quando a linha é religada o capacitor passa a ser protegido pelo centelhador G_2 e, durante o tempo de recuperação de G_1 , o sistema funciona como demonstrado com o centelhador simples.
- Decorrido o tempo, D_1 é fechado e o esquema é restaurado.

2.5.3 Proteção por Varistores

Os varistores de óxido metálico (MOV) são resistores que tem como característica a alta não linearidade, de modo a funcionar como um circuito aberto até atingir a tensão de condução. Dessa forma, com a sobretensão através do capacitor igual ou superior ao

nível de disparo, o varistor passa a conduzir, desviando a corrente. Após a eliminação do defeito, as condições de operação são restabelecidas. O sistema simplificado da proteção é apresentado na Figura 2.7.

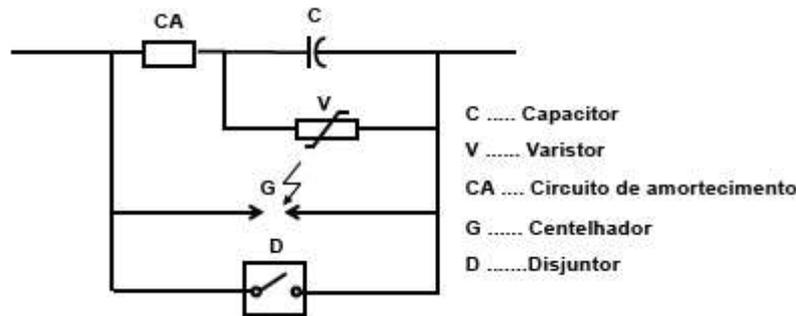


Figura 2.7 – Proteção com varistores. Fonte: (FRONTIN e et al., 2013).

Deve-se ressaltar que o varistor pode ser dimensionado para dissipar toda a energia em qualquer defeito do sistema, no entanto, devido a uma maior economia, para as faltas internas, permite-se que haja o disparo do centelhador, de modo a retirar também o capacitor de operação. Com isso, o centelhador é disparado quando a proteção do varistor detecta sobrecarga e o disjuntor é fechado para proteger o equipamento (FRONTIN e et al., 2013).

2.6 Impactos Técnicos da Compensação Série no Sistema

A compensação série, conforme descrito anteriormente, é um dos mecanismos mais eficientes para se reduzir a reatância da linha de transmissão e, por consequência, aumentar a transferência de potência. No entanto, tal alternativa apresenta alguns aspectos técnicos desfavoráveis, que podem impactar no funcionamento da proteção do sistema.

A seguir, explanam-se detalhadamente os aspectos principais de cada um dos pontos supracitados no item 2.1. Ressalta-se, porém, que, ao limitar a compensação em 70%, tais problemas apresentam soluções técnicas viáveis de modo a não comprometer a aplicação da compensação série em sistemas de potência (CONCEIÇÃO, 2015).

2.6.1 Ressonância Subsíncrona

O fenômeno da ressonância subsíncrona ocorre devido à interação dos bancos de capacitores, da compensação série, com a reatância indutiva da linha, de modo a formar um circuito LC, cuja frequência elétrica natural de oscilação é dada pela equação 2.9 (CONCEIÇÃO, 2015).

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.9)$$

Onde:

ω é a frequência angular [rad/s];

f_0 é a frequência fundamental do circuito [Hz];

L é a indutância da linha de transmissão [H];

C é a capacitância do banco [F];

X_L é a reatância indutiva da linha de transmissão [Ω];

X_C é a reatância do banco de capacitores série [Ω].

Verifica-se, portanto, que a frequência natural de oscilação sempre apresentará valores inferiores à frequência fundamental da rede, porquanto $X_C < X_L$. Em geral, seu valor se restringe entre 15 a 90% da fundamental, por isso, é denominada de frequência de ressonância subsíncrona (CONCEIÇÃO, 2015).

Com isso, quando o sistema compensado sofre perturbações, o circuito ressonante produz correntes na frequência elétrica f_e no estator das unidades geradoras. Tal efeito, por conseguinte, acarreta correntes supersíncronas ($f_0 + f_e$) e subsíncronas ($f_0 - f_e$) no rotor das máquinas. Deve-se ressaltar que as correntes subsíncronas se destacam por interagir negativamente com o eixo da turbina-gerador, o que gera problemas relacionados a autoexcitação e aos torques transitórios (GONÇALVES, 2007).

2.6.2 Inversão de Corrente

A inversão de corrente é um fenômeno que ocorre quando a reatância capacitiva, X_C , da compensação série fixa é maior que a soma das reatâncias indutivas da fonte, X_f , e da linha de transmissão, X_L . Este evento ocorre, principalmente, para faltas sem atuação do centelhador e do MOV, uma vez que X_C pode fazer parte do laço de falta. A Figura 2.8 e a Figura 2.9 representam o sistema com e sem a inversão de corrente, onde R é a resistência de falta (OLIVEIRA, 2007).

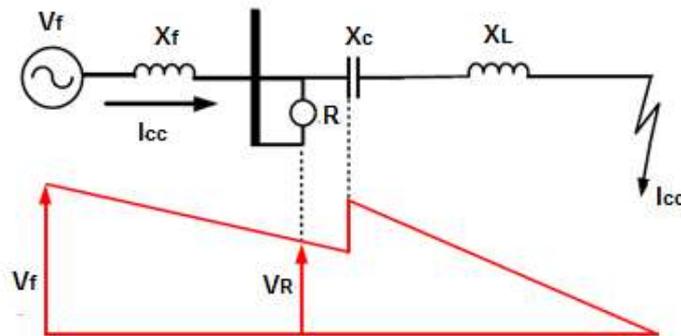


Figura 2.8 – Corrente na linha de transmissão com CSF de modo que $|X_C| < |X_f + X_L|$.

Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).

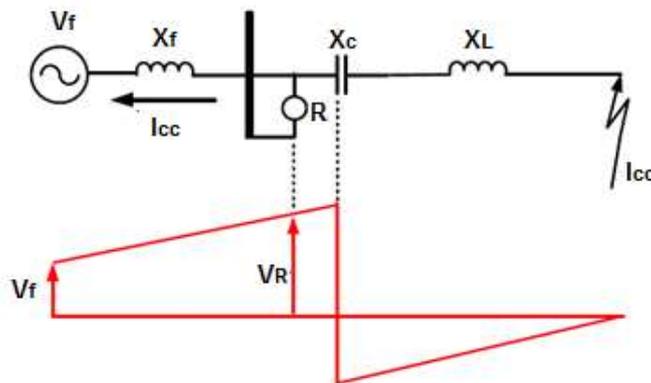


Figura 2.9 – Inversão de corrente na linha de transmissão com CSF onde $|X_C| > |X_f + X_L|$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).

Destaca-se, portanto, que as chances de ocorrência da inversão de corrente variam de acordo com a localização da falta, o grau de compensação e o posicionamento do banco de capacitores. Além disso, tal evento compromete a capacidade de discriminação da direcionalidade dos relés de proteção (GONÇALVES, 2007).

2.6.3 Inversão de Tensão

A inversão de tensão é um fenômeno que ocorre quando a reatância capacitiva, X_C , da compensação série fixa é menor que a soma das reatâncias indutivas da fonte, X_f , e da linha de transmissão, X_L , porém é maior que a reatância da linha de transmissão até o ponto de falta. Este evento ocorre, principalmente, para falta sem atuação do centelhador e do MOV, no ponto que a reatância indutiva da linha de transmissão se iguala em módulo a reatância capacitiva do banco. A Figura 2.10 e a Figura 2.11 representam o sistema com e sem a inversão de tensão (OLIVEIRA, 2007).

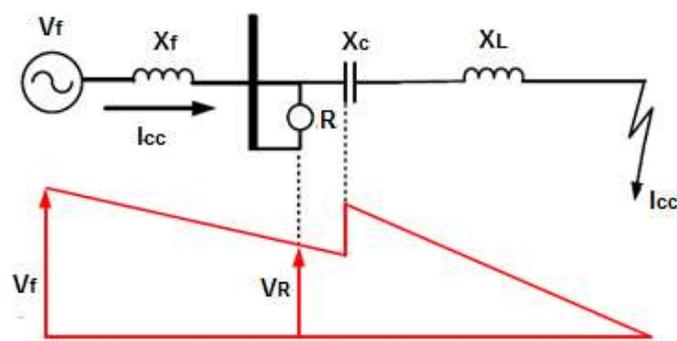


Figura 2.10 – Tensão na linha de transmissão com CSF de modo que $|X_C| < |X_f + X_L|$ e $|X_C| < |X_L|$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).

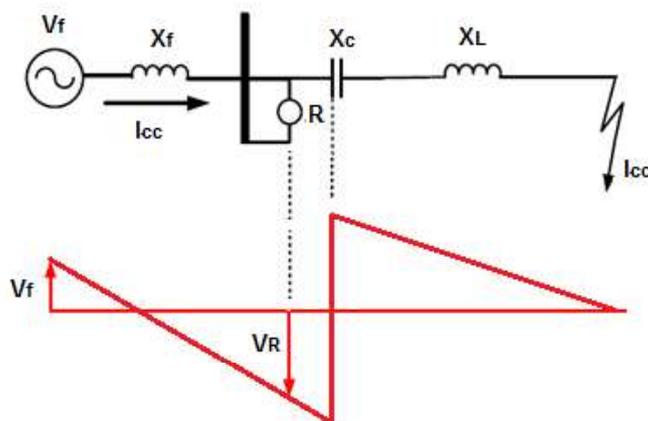


Figura 2.11 – Inversão de tensão em linha de transmissão com CSF onde $|X_C| < |X_f + X_L|$ e $|X_C| > |X_L|$. Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2014).

Destaca-se, portanto, que a inversão de tensão compromete a capacidade de discriminação da direcionalidade dos relés de proteção. Desta forma, caso a leitura dos sinais de tensão do relé seja localizada no lado da barra da subestação, uma falta interna

pode ser interpretada como falta externa e vice-versa, o que pode ocasionar o desligamento indesejado da linha de transmissão (OLIVEIRA, 2007)

2.6.4 Alcance e Coordenação dos Relés de Proteção

Os bancos de capacitores conectados em série com a linha de transmissão dispõem de um sistema de proteção que, normalmente, envolve o centelhador ou o MOV. Desta forma, os ajustes das zonas de proteção do relé podem ou não levar em conta a atuação da proteção. De acordo com a premissa utilizada, é possível verificar sobrealcançe ou subalcançe do relé.

Ao considerar a atuação do centelhador no ajuste do relé, e a mesma não ocorrer durante o distúrbio no sistema, poderá ocorrer o sobrealcançe das zonas de atuação. Em contrapartida, se não optar por não levar em consideração a atuação do centelhador no ajuste do equipamento e, ocorrer a falta com sua atuação, será observado o sobrealcançe do relé.

Na proteção do capacitor série por MOV, sua atuação deve ser considerada no ajuste do relé. Com isso, quando a intensidade da corrente de falta não é suficiente para a atuação do centelhador, mas uma sobretensão é medida nos terminais do capacitor, verifica-se a atuação do MOV. Este evento não remove por completo o capacitor série, o que implica um circuito série equivalente complexo, parte real e imaginária, que variam em função da corrente da linha. Destaca-se que a gravidade dos problemas de alcance das zonas é diretamente proporcional ao grau de compensação (GONÇALVES, 2007).

2.6.5 Efeitos Transitórios

Para uma linha de transmissão sem a compensação série, os transitórios relacionados à falta apresentam decaimento em função da componente CC. Por outro lado, os transitórios em linhas compensadas são sinais CA com frequência não fundamental, determinada pela associação da capacitância série com a indutância do sistema. Ao considerar que a capacitância série normalmente é menor que a indutância do sistema, a frequência dos transitórios é de ordem menor que a fundamental.

Desta forma, o transitório cuja frequência é inferior a fundamental causa uma variação não linear na impedância calculada pelo relé, de modo a aumentar o tempo de atuação do equipamento ou a perda de seletividade. Destaca-se que a impedância segue um percurso espiral desde o ponto de carga até sua impedância final, conforme demonstrado na Figura 2.12 (GONÇALVES, 2007).

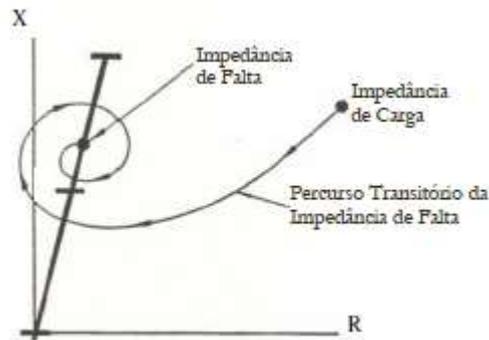


Figura 2.12 – Diagrama R-X do transitório da impedância de falta em uma linha compensada. Fonte: (GONÇALVES, 2007).

2.7 Considerações Finais

A compensação série, frente às demais alternativas apresentadas, dispõe da melhor relação custo e benefício para a transmissão de maiores blocos de energia no sistema. Evidenciam-se, portanto, a determinação do grau de compensação que deve ser utilizado, as equações que regem o modelo da linha de transmissão com e sem compensação série e os detalhes da proteção do banco de capacitor.

Deve-se ressaltar, ainda, que a compensação série implica alterações no sistema de transmissão, como a estabilidade de tensão, inversão de corrente e tensão, reatância subsíncrona, efeitos transitórios e alcance da proteção. Torna-se, portanto, necessário o planejamento cuidadoso para sua utilização no sistema.

3 Proteção de Distância

Neste capítulo, são desenvolvidos os principais fundamentos que envolvem a proteção de distância. Primeiramente, destacam-se as principais características dessa função, em seguida as diretrizes para o cálculo da impedância de falta, as características das zonas de operação e zonas de proteção, os comparadores de fase e magnitude para a determinação da atuação do relé e, por fim, uma descrição detalhada da variação do alcance do relé devido à compensação série na linha de transmissão.

3.1 Fundamentos da Proteção

O sistema elétrico, durante a operação, está sujeito a eventos que comprometem seu perfeito funcionamento. A principal função do sistema de proteção é assegurar que haja a desconexão do circuito com anormalidade de funcionamento, além de fornecer informações necessárias para a rápida e exata localização da fonte de alteração dos limites de operação. Desaa forma, os critérios utilizados para a detecção de um defeito são descritos por (SILVA, 2016):

- Elevação de corrente;
- Elevação e redução de tensão;
- Inversão no sentido da corrente;
- Alteração da impedância do sistema;
- Comparação de módulo e ângulo de fase na entrada e saída do sistema em análise.

Com isso, para um bom desempenho de um projeto de proteção, deve-se considerar os seguintes requisitos básicos (SILVA,2016):

- Sensibilidade: capacidade do elemento de proteção de reconhecer com precisão e exatidão a faixa e os valores ajustados para sua operação;
- Confiabilidade: habilidade de cumprir corretamente as funções que lhe foram confiadas;
- Segurança: habilidade de evitar operações indevidas;

- Seletividade: técnica responsável pela atuação do elemento de proteção mais próximo ao trecho defeituoso, de modo desconectar a menor parte do sistema.
- Coordenação: determinação dos ajustes apropriados do sistema de proteção, a fim de obter seletividade em sua operação;
- Velocidade: característica do tempo de atuação da proteção a partir da detecção da falta, de forma a minimizar os danos no sistema protegido.
- Economia: Garantia do melhor custo e benefício na escolha da proteção para o sistema;
- Simplicidade: utilização mínima dos equipamentos e circuitos na execução da proteção;
- Manutenibilidade: Capacidade de permitir a manutenção rápida e precisa, a fim de reduzir os custos e tempo que o sistema fica fora de serviço.

Deve-se ressaltar que os relés constituem um dos principais elementos de proteção do sistema elétrico, uma vez que são responsáveis por detectar a anormalidade e enviar o comando para a desconexão do trecho defeituoso, geralmente realizada pelo disjuntor. Existem, atualmente, três tipos de relés disponíveis no mercado, os eletromecânicos, os eletrônicos e os digitais. Devido aos avanços tecnológicos e ao incorporamento de funções de comunicação, controle, sinalização e acesso remoto, além da proteção, os relés digitais apresentam uma maior utilização. (SILVA, 2016).

No sistema elétrico, os equipamentos que estão mais sujeitos a defeitos temporários ou permanentes são as linhas de transmissão. Dessa forma, pode-se usar diversas funções de proteção nos terminais da linha, como os relés direcional, sobrecorrente, subtensão e distância (SILVA, 2016). Os ajustes e coordenação dos relés são alterados com mudanças na configuração da rede, o que torna um empecilho a utilização das unidades de sobrecorrente e subtensão (KINDERMANN, 2005).

O relé de distância, por operar com a medição dos parâmetros da linha de transmissão até o ponto de falta, consegue suprir a deficiência dos relés anteriormente citados, uma vez que possui fácil ajuste e coordenação (KINDERMANN, 2005). Ademais, a predileção pela sua utilização na proteção pode ser destacada pela maior cobertura na atuação instantânea, pela maior sensibilidade e pelas zonas de proteção fixas (PAZ, 2015).

3.2 Unidades de Impedância de Falta

A proteção de distância é fundamentada no cálculo da impedância aparente da linha de transmissão através das medições dos níveis de tensão (\widehat{V}_r) e corrente (\widehat{I}_r) pelo relé. A ocorrência de uma falta nas LTs implica o aumento nos níveis de corrente e redução nos níveis de tensão. Como a impedância medida pelo relé é definida por $\widehat{Z}_r = \widehat{V}_r / \widehat{I}_r$, tem-se uma diminuição da impedância aparente quando há ocorrência da falta. Quanto mais próximo o evento ocorrer do relé, menor será o valor lido pelo equipamento.

Um ponto importante da proteção de distância envolve a seleção dos sinais de tensão e corrente medidos pelo relé uma vez que, nas condições de qualquer curto-circuito franco, a impedância medida por alguma das unidades do equipamento deve ser igual a impedância de sequência positiva no ponto de falta. Deve-se ressaltar que seu valor é distribuído e constante por unidade de comprimento, depende das características dos condutores e de suas disposições geométricas, além de ser comum em todos os tipos de falta, diferentemente da impedância de sequência zero (SILVA, 2016).

O relé de distância deve atuar de forma precisa na detecção das faltas dentro das zonas de proteção e distinguir o tipo de falta que a linha de transmissão está sujeita, a fim de reduzir o impacto do evento no sistema. Para isso, o equipamento possui seis unidades de impedância, instaladas próximo ao terminal da linha, de modo a cobrir os dez tipos de curtos-circuitos que o sistema elétrico está sujeito, sendo eles (SILVA, 2020):

- Trifásico: envolve todas as fases do circuito ABC;
- Bifásico: envolve duas fases do circuito, resultando em três variações AB, BC e CA;
- Bifásico-terra: envolve duas fases do circuito e o terra, ocasionando em três variações ABT, BCT e CAT;
- Monofásico: Envolve uma das fases do circuito e o terra, possuindo três variações AT, BT e CT.

Deve-se ressaltar que no curto-circuito trifásico, há a presença apenas do equivalente de sequência positiva, no curto-circuito bifásico, os equivalentes de sequência positiva e negativa, por fim, nos curtos-circuitos bifásico-terra e monofásico, os equivalentes de

sequência positiva, negativa e zero (SILVA, 2016). Com isso, os sinais de entrada necessários para a determinação das unidades são representados na Tabela 3.1, sendo Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT} as unidade de impedância fase-terra, Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} , as unidade de impedância fase-fase, \widehat{V}_a , \widehat{V}_b e \widehat{V}_c os fasores de tensão de fase, \widehat{I}_a , \widehat{I}_b e \widehat{I}_c os fasores de corrente de fase, \widehat{I}_0 o fasor de corrente de sequência zero e K_0 o fator de compensação, definido pela relação entre as impedâncias de sequência positiva, Z_{L1} , e negativa, Z_{L0} , da LT, conforme a equação 3.1 (SILVA, 2020).

Tabela 3.1 – Sinais de entrada para unidade fase-terra e fase-fase do relé de distância. Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016).

Unidade	Sinais de Tensão	Sinais de Corrente
Z_{AT}	\widehat{V}_a	$\widehat{I}_a + K_0\widehat{I}_0$
Z_{BT}	\widehat{V}_b	$\widehat{I}_b + K_0\widehat{I}_0$
Z_{CT}	\widehat{V}_c	$\widehat{I}_c + K_0\widehat{I}_0$
Z_{AB}	$\widehat{V}_a - \widehat{V}_b$	$\widehat{I}_a - \widehat{I}_b$
Z_{BC}	$\widehat{V}_b - \widehat{V}_c$	$\widehat{I}_b - \widehat{I}_c$
Z_{CA}	$\widehat{V}_c - \widehat{V}_a$	$\widehat{I}_c - \widehat{I}_a$

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (3.1)$$

Dessa forma, uma vez definida as unidades de impedância do relé de distância, torna-se possível a determinação do tipo de falta que incide na linha de transmissão através da seleção das unidades capazes de medir a impedância de sequência positiva do trecho de linha entre o terminal do relé e o ponto de falta. A Tabela 3.2 representa as unidades do relé que atuam em cada um dos tipos de falta (SILVA, 2016).

Tabela 3.2 – Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta. Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016).

Tipo de Falta	Fases Envolvidas	Sigla	Unidades do Relé					
			Z_{AT}	Z_{BT}	Z_{CT}	Z_{AB}	Z_{BC}	Z_{CA}
Monofásica	A	AT	Y	-	-	-	-	-
	B	BT	-	Y	-	-	-	-
	C	CT	-	-	Y	-	-	-

Tipo de Falta	Fases Envolvidas	Sigla	Unidades do Relé					
			Z_{AT}	Z_{BT}	Z_{CT}	Z_{AB}	Z_{BC}	Z_{CA}
Bifásica	A e B	AB	-	-	-	Y	-	-
	B e C	BC	-	-	-	-	Y	-
	C e A	CA	-	-	-	-	-	Y
Bifásica para Terra	A e B	ABT	Y	Y	-	Y	-	-
	B e C	BCT	-	Y	Y	-	Y	-
	C e A	CAT	Y	-	Y	-	-	Y
Trifásica	A, B e C	ABC	Y	Y	Y	Y	Y	Y

3.3 Características de Operação

As características de operação da proteção de distância devem possibilitar que faltas sólidas ou resistivas, com ou sem carregamento prévio, sejam acomodadas. Portanto, deve-se ressaltar que as faltas resistivas dependem, sobretudo, das condições impostas pelo sistema elétrico, da característica de operação do relé e do nível de corrente de falta medida. Pode-se destacar ainda outros fatores que afetam a acomodação das diversas faltas, sólidas ou resistivas, tais como o acoplamento magnético e as fontes intermediárias (GONÇALVES, 2007).

3.3.1 Diagrama R-X

As impedâncias medidas pelo relé de distância são representadas, de forma apropriada, por meio do diagrama R-X, conforme apresentado na Figura 3.1. Tem-se, portanto, na abcissa e ordenada, as componentes real e imaginária da impedância calculada pelo relé, que são dadas, respectivamente, por $r_r = |Z_r| \cos \theta_r$ e $x_r = |Z_r| \sin \theta_r$. Dessa forma, a atuação do equipamento de proteção será conforme a característica de operação e o valor da impedância vista pelo equipamento (SILVA, 2016).

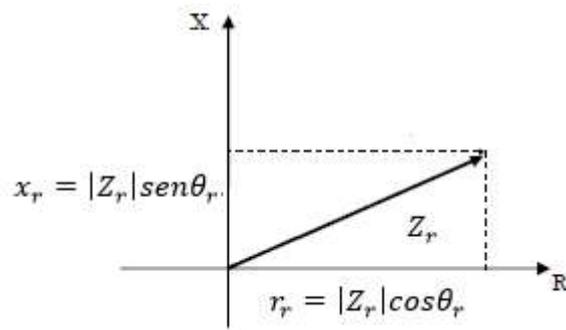


Figura 3.1 – Diagrama R-X. Fonte: Adaptado de (GONÇALVES, 2007)

3.3.2 Relé de Impedância

O relé de impedância é um equipamento de sobrecorrente com retenção por tensão, aplicável à unidade de partida. Conforme a Figura 3.2, observa-se que sua característica não é inerentemente direcional, uma vez que enxerga nas duas direções em relação à barra em que a unidade é instalada. O ajuste do equipamento consiste em um valor de impedância Z , de modo que, para os valores medidos pelo relé inferiores ao definido, há atuação. Em contrapartida, para valores maiores, não há sensibilização do relé (GONÇALVES, 2007).

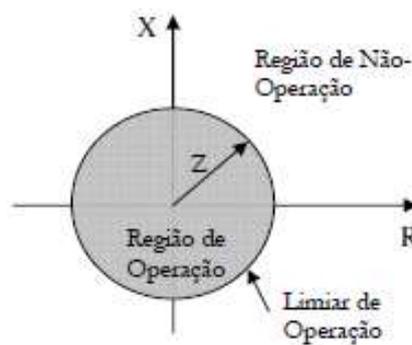


Figura 3.2 – Características do relé de impedância. Fonte: (GONÇALVES, 2007).

Em contrapartida, a fim de garantir a direcionalidade de operação, o relé de impedância pode ser combinado com uma unidade direcional, cuja característica está representada na Figura 3.3. Desta forma, apenas faltas na linha a jusante da proteção conseguem sensibilizar o equipamento (GONÇALVES, 2007).

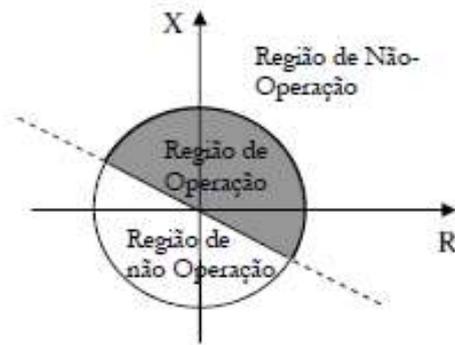


Figura 3.3 – Característica do relé de impedância com a unidade direcional.

Fonte: (GONÇALVES, 2007).

3.3.3 Relé de Reatância

O relé de reatância, conforme descrito na Figura 3.4, não apresenta direcionalidade e ocupa uma área infinita no diagrama R-X, ou seja, é susceptível para as operações em condições de carga. Destaca-se, portanto, como principal ponto positivo, a imunidade às resistências de falta, análogo ao que é apresentado na Figura 3.5 (LIMA, 2006).

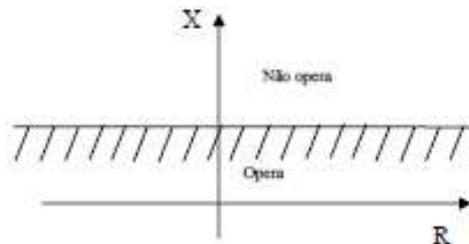


Figura 3.4 – Característica do relé de reatância. Fonte: (LIMA,2006).

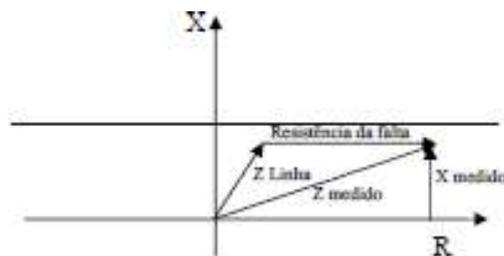


Figura 3.5 – Característica do relé de reatância com alta resistência de falta.

Fonte: (LIMA,2006).

3.3.4 Relé MHO

O relé mho, ou de admitância, conforme descrito na Figura 3.6, apresenta característica direcional, sua área de sensibilidade passa pela origem com inclinação e diâmetro dados pela impedância da linha que se deseja proteger. Pode-se destacar que algumas

alterações desta característica podem ser realizadas, como a alteração da inclinação da curva de atuação, o que permite a operação para maiores resistências de falta, análogo ao que é apresentado Figura 3.7 (LIMA, 2006).

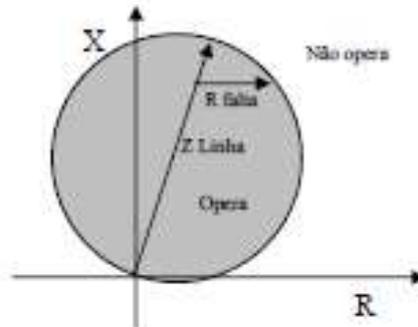


Figura 3.6 – Característica do relé mho. Fonte: (LIMA, 2006)



Figura 3.7 – Característica do relé mho deslocado para acomodar maior resistência de falta. Fonte: (LIMA, 2006).

3.4 Zonas de Proteção de Distância

A seletividade e a coordenação dos relés de distância estão diretamente relacionadas aos ajustes de suas zonas de proteção, uma vez que seus alcances estão associados a diferentes tempos de atuação. Deve-se ressaltar que, comumente, são utilizadas três zonas de proteção, mas, a depender da aplicação, podem ser acrescentadas mais zonas de atuação (SILVA, 2016). Portanto, os critérios de ajustes são definidos por (SILVA, 2020):

- Primeira zona: alcance da proteção correspondente à porcentagem de 80 a 85% da impedância total da linha de transmissão. O tempo de atuação refere apenas ao tempo de detecção da falta, sem possuir atraso intencional em sua operação.

- Segunda zona: alcance da proteção correspondente a 100% da linha de atuação da primeira zona, acrescido de 50% da linha de transmissão adjacente. O tempo de atuação apresenta um atraso intencional de 250 a 400 ms após a detecção da falta.
- Terceira zona: alcance da proteção corresponde a 100% da linha de atuação da primeira zona, acrescido de 100% da linha de transmissão adjacente. O tempo de atuação apresenta um atraso intencional na ordem de 800 ms após a detecção da falta. Deve-se ressaltar que sua principal função é a proteção de retaguarda.

Para melhor exemplificar, a Figura 3.8 representa as zonas de proteção do relé de distância em linhas de transmissão, de modo a evidenciar os alcances e tempos de detecção das faltas. Dessa forma, para uma falta no primeiro terço do trecho entre as barras H e R, o relé de distância instalado na barra H atuará imediatamente dentro da primeira zona de proteção (Z_{1y}). Caso não ocorra a atuação, o relé instalado na barra G irá atuar na segunda zona (Z_{2x}), com o tempo de atraso (SILVA, 2020).

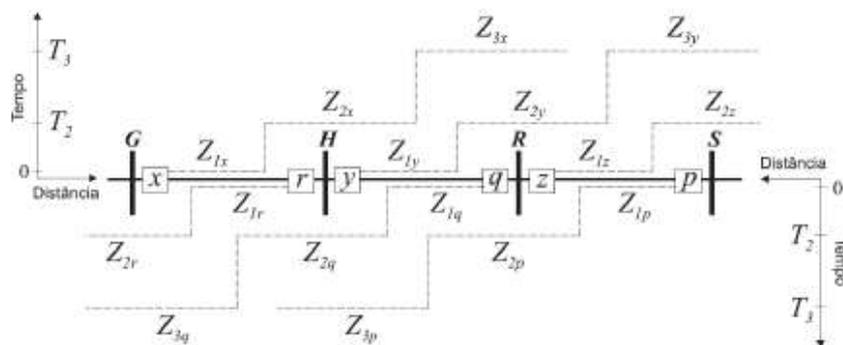


Figura 3.8 – Zonas de proteção do relé de distância. Fonte: (SILVA, 2020).

Deve-se ressaltar que, pelos parâmetros implementados no comparador da proteção de distância, pode-se obter a característica mho de proteção com as diferentes zonas de proteção dos relés. Com isso, a Figura 3.9 representa o diagrama R-X para os relés situados nas barras H e R do circuito descrito na Figura 3.8 (SILVA, 2016).

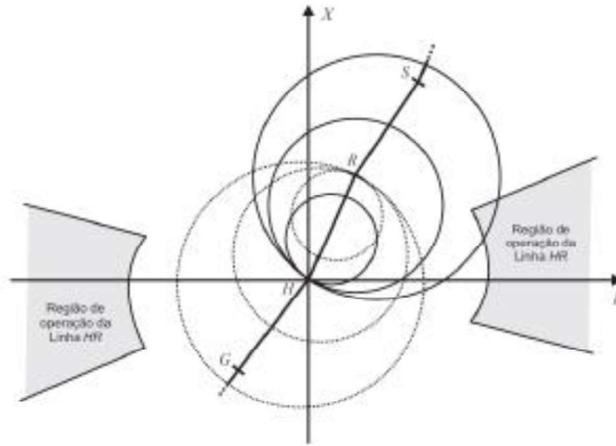


Figura 3.9 – Diagrama R-X com as zonas de proteção do relé de distância tipo mho. Fonte (SILVA, 2020).

3.5 Comparadores

Os comparadores de fase e de magnitude são métodos implementados na proteção de distância desde os relés eletromecânicos. Tem-se por finalidade a distinção entre uma situação normal de operação do sistema e uma falta, que se dá pela comparação entre as impedâncias de ajuste e os valores lidos pelo equipamento, em módulo e defasagem angular. Portanto, serão abordados os comparadores para a característica de operação mho, uma vez que é a mais difundida na proteção dos sistemas (SILVA, 2016).

3.5.1 Comparador de Fase

O comparador por fase é responsável por determinar se a diferença angular entre dois fasores está dentro da margem especificada. Para o relé de distância com característica de operação mho, utilizam-se os fasores de tensão de operação \widehat{V}_{op} e de polarização \widehat{V}_{pol} , que são definidos pelas Equações 3.2 e 3.3:

$$\widehat{V}_{op} = Z_A \widehat{I}_r - \widehat{V}_r \quad (3.2)$$

$$\widehat{V}_{pol} = \widehat{V}_r \quad (3.3)$$

onde \widehat{V}_r e \widehat{I}_r são os fasores de tensão e corrente medidos pelo relé e Z_A a impedância de alcance do relé, que é obtida conforme a Equação 3.4:

$$Z_A = \frac{hZ_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)} \quad (3.4)$$

em que h é a porcentagem a ser protegida do comprimento total da linha de transmissão, θ_{L1} o ângulo da impedância de sequência positiva e τ o ângulo de projeto da característica mho, ou ângulo de torque máximo do relé, conforme ilustrado na Figura 3.10 (SILVA,2016).

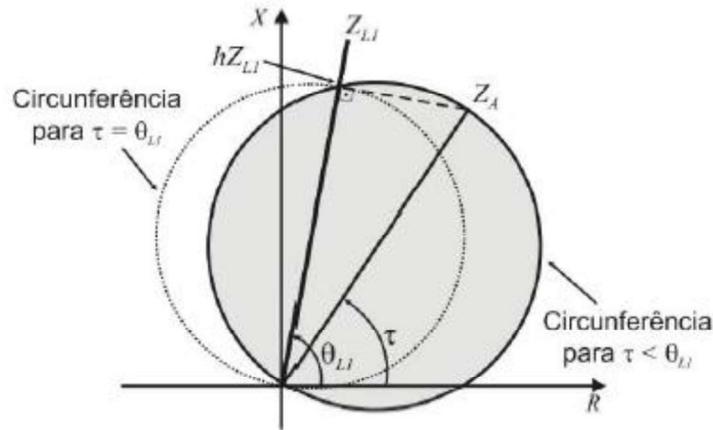


Figura 3.10 – Representação da característica mho no diagrama R-X. Fonte: (SILVA, 2016).

Assim, para que a falta seja detectada e amortecida pelo relé de distância em sua zona de proteção, a condição imposta pela Equação 3.5 deve ser satisfeita.

$$-90^\circ < \arg\left(\frac{\widehat{V}_{op}}{\widehat{V}_{pol}}\right) < 90^\circ \quad (3.5)$$

Pode-se destacar ainda que as grandezas de operação e polarização do comparador por fase podem ser representadas em termos de impedâncias, dadas, respectivamente, por Z_{op} e Z_{pol} . Dessa forma, para tanto, pode-se dividir as Equações 3.2 e 3.3 pela corrente vista pelo relé. Obtém-se as Equações 3.6 e 3.7, com a impedância aparente Z_r vista pelo relé, dada por $\frac{\widehat{V}_r}{\widehat{I}_r}$ (SILVA, 2016).

$$Z_{op} = Z_A - Z_r \quad (3.6)$$

$$Z_{pol} = Z_r \quad (3.7)$$

Evidencia-se, portanto, que para todas as diferenças angulares que não estão contidas no intervalo da Equação 3.5, a impedância medida pelo relé está fora da zona de atuação da unidade mho. As possíveis condições angulares de funcionamento são representadas na Figura 3.11 e definidas por (SILVA, 2016):

- Operação, dentro da característica mho:

$$-90^\circ < \arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_{pol}}\right) < 90^\circ \quad (3.8)$$

- Restrição, fora da característica mho:

$$90^\circ < \arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_{pol}}\right) < -90^\circ \quad (3.9)$$

- Indeterminado, nos limites da característica mho:

$$\arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_{pol}}\right) = \pm 90^\circ \quad (3.10)$$

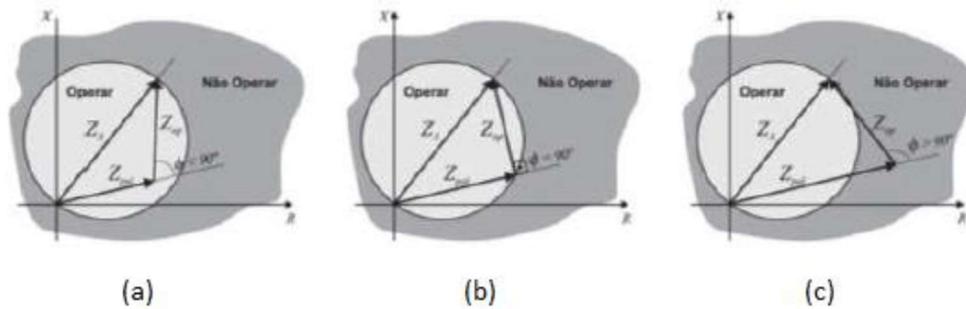


Figura 3.11 - Relação entre as fases das impedâncias de operação e polarização para o caso da impedância vista pelo relé: (a) dentro da característica mho, (b) sobre a característica mho, (c) fora da característica mho. Fonte: (SILVA, 2016).

3.5.2 Comparador de Magnitude

O comparador por magnitude, para o relé de distância tipo mho, é responsável por determinar se a diferença de módulo entre os fasores de tensão de operação \widehat{V}_{op} e de polarização \widehat{V}_{pol} , que são definidos pelas Equações 3.11 e 3.12, satisfazem a condição de operação definida pela Equação 3.13. Deve-se ressaltar que a impedância de alcance do relé, Z_A , é determinada conforme a Equação 3.4.

$$\widehat{V}_{op} = \frac{Z_A}{2} \widehat{I}_r \quad (3.11)$$

$$\widehat{V}_{pol} = -\widehat{V}_r + \frac{Z_A}{2} \widehat{I}_r \quad (3.12)$$

$$|\widehat{V}_{op}| \geq |\widehat{V}_{pol}| \quad (3.13)$$

Assim como no comparador por fase, as grandezas de operação e polarização do comparador por magnitude podem ser representadas em termos de impedâncias, dadas, respectivamente, por Z_{op} e Z_{pol} . Dessa forma, para tanto, pode-se dividir as

Equações 3.11 e 3.12 pela corrente vista pelo relé. Obtém-se as Equações 3.14 e 3.15, com a impedância aparente Z_r vista pelo relé dada por $\frac{\widehat{V}_r}{\widehat{I}_r}$ (SILVA, 2016).

$$\widehat{V}_{op} = \frac{Z_A}{2} \quad (3.14)$$

$$\widehat{V}_{pol} = -Z_r + \frac{Z_A}{2} \quad (3.15)$$

Evidencia-se, portanto, que para todas as condições fora da Equação 3.13, a impedância medida pelo relé está fora da zona de atuação da unidade mho. As possíveis condições de funcionamento são representadas na Figura 3.12 e definidas por (SILVA, 2016):

- Operação, dentro da característica mho:

$$|\widehat{V}_{op}| \geq |\widehat{V}_{pol}| \quad (3.16)$$

- Restrição, fora da característica mho:

$$|\widehat{V}_{op}| \leq |\widehat{V}_{pol}| \quad (3.17)$$

- Indeterminado, nos limites da característica mho:

$$|\widehat{V}_{op}| = |\widehat{V}_{pol}| \quad (3.18)$$

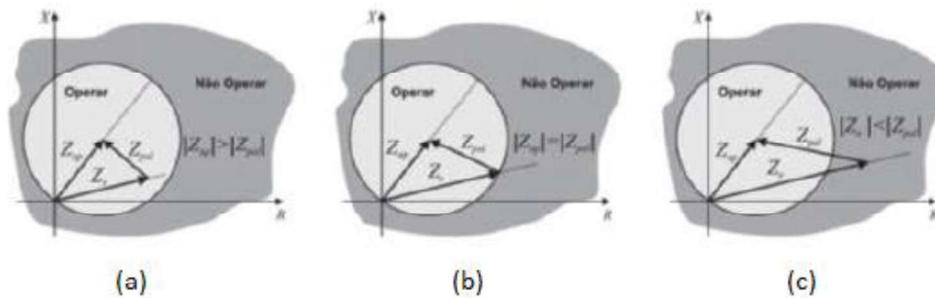


Figura 3.12 - Relação entre as magnitudes das impedâncias de operação e polarização para o caso da impedância vista pelo relé: a) dentro da característica mho, (b) sobre a característica mho, (c) fora da característica mho. Fonte: (SILVA, 2016).

3.6 Alcance de Relé de Distância

Dentre os efeitos da compensação série no sistema de proteção descritos no capítulo anterior, a alteração do alcance das zonas de operação do equipamento é um dos mais recorrentes. Destaca-se, portanto, que o capacitor, associado ao elemento de proteção contra sobretensões (varistor de óxido metálico), altera a impedância medida pelo equipamento de forma não linear.

A fim de exemplificar melhor este efeito, propuseram-se expressões analíticas que descrevem, na frequência fundamental, a impedância efetiva do conjunto composto pelo capacitor e seu respectivo MOV de proteção. A Figura 3.13 apresenta o modelo proposto, que consiste em um circuito série com um capacitor e um resistor variáveis, R_C e X_C , em função da corrente (ANDERSON, 1999).

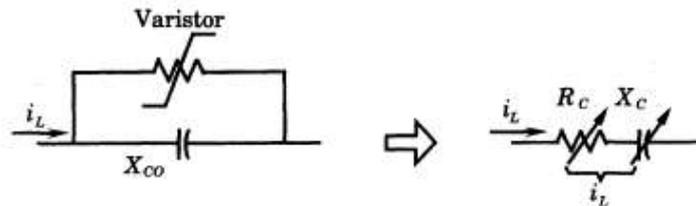


Figura 3.13 – Modelo linearizado da impedância do varistor com o capacitor. Fonte (ANDERSON, 1999).

O gráfico apresentado na Figura 3.14 indica que tanto a resistência e quanto a capacitância variam de forma não linear em função da corrente do capacitor. O eixo horizontal representa a corrente por unidade (pu), em que 1 pu representa a corrente máxima possível no capacitor sem a condução do varistor, ou seja, para valores inferiores a este, o modelo equivale a reatância da compensação série fixa (ANDERSON, 1999).

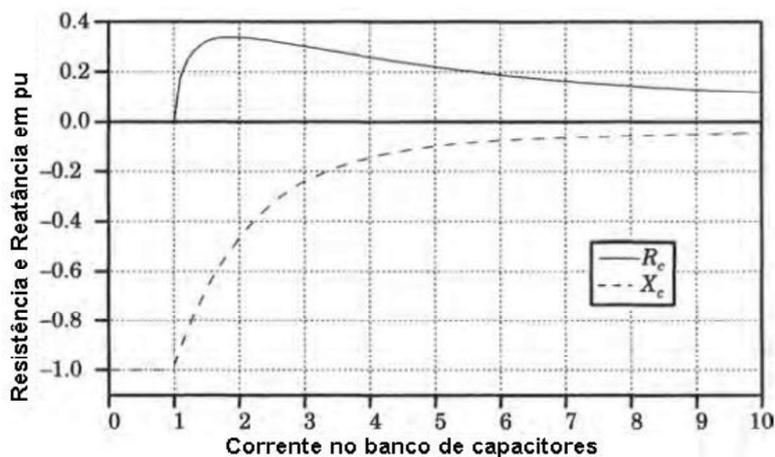


Figura 3.14 – Resistência e reatância efetivas de um banco de capacitores protegido por varistor em função da corrente. Fonte: (ANDERSON, 1999).

Destaca-se, portanto, que, para valores de correntes superiores a 1 pu, o MOV entra em condução e, à medida que a corrente aumenta, a reatância capacitiva do modelo decai, enquanto o valor da resistência cresce inicialmente e, em seguida, começa a diminuir. Portanto, quanto maior a corrente, maior o tempo de condução do varistor e menor a

impedância efetiva do sistema. Destaca-se, ainda que, ao atingir valores de correntes muito elevados, o sistema se torna praticamente resistivo.

Outra forma de visualização da característica da impedância, conforme descrita anteriormente, é por meio do gráfico R-X que apresenta, no plano complexo, os valores de R_C e X_C em pu, com base na reatância do capacitor na frequência fundamental do sistema. De acordo com a Figura 3.15, ressalta-se que a corrente igual a 1 pu é definida como o valor para início da condução do MOV. (ANDERSON, 1999).

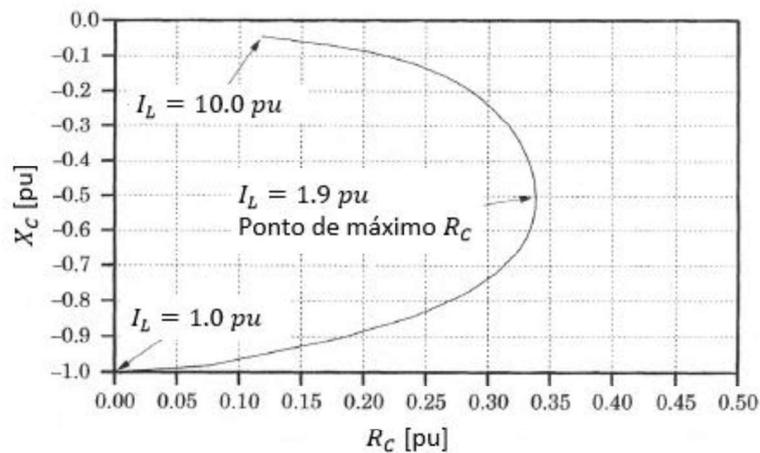


Figura 3.15 – Resistência e reatância efetivas no plano de impedância complexo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Por consequência, com a atuação do relé de distância, se a compensação série estiver localizada entre o relé e o ponto de falta, a impedância vista pelo equipamento de proteção contém a impedância da linha, a resistência de falta e o circuito equivalente composto pelo capacitor e pelo varistor. A Figura 3.16 apresenta o diagrama R-X para a impedância vista pelo relé (FERREIRA, 2013).

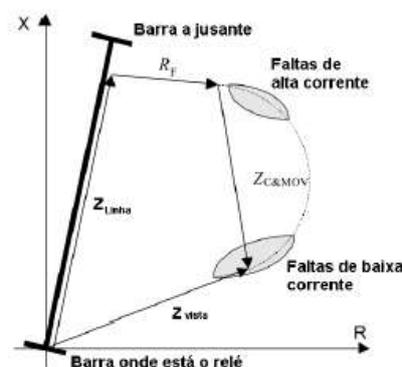


Figura 3.16 – Mudança na impedância vista pelo relé de distância quando a CSF está localizada entre o relé e o ponto de falta. Fonte: (FERREIRA, 2013).

Destaca-se que, para as faltas de baixa corrente para as quais o varistor não conduz, a impedância equivalente é apenas a reatância da CSF, o que altera consideravelmente os parâmetros vistos pelo relé. No entanto, para faltas de corrente com intensidade suficiente para condução parcial do MOV, acresce a resistência do equipamento a da falta, quando houver (FERREIRA, 2013). A fim de demonstrar tal efeito no sistema, a Figura 3.17 e a Figura 3.18 representam uma falta fase-terra na LT com CSF onde há o sobrealcançe do relé de proteção, em que o ajuste da primeira zona é de 80%.

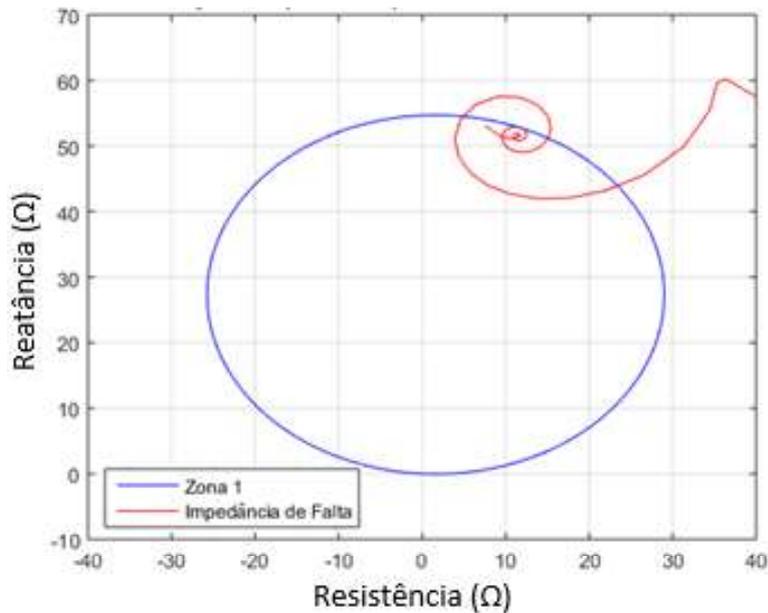


Figura 3.17 – Zona de proteção e impedância vista pelo relé para uma falta AT em 85% da LT com CSF.

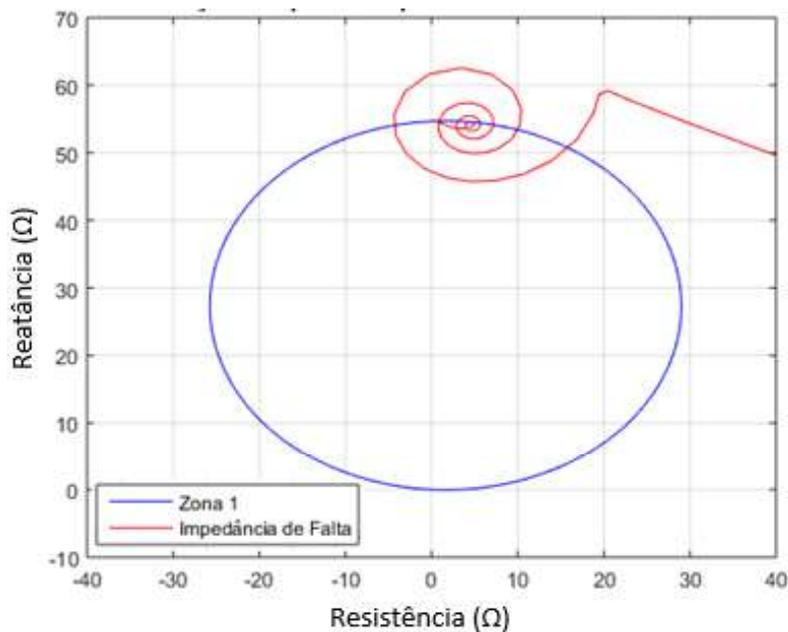


Figura 3.18 - Zona de proteção e impedância vista pelo relé para uma falta AT em 90% da LT com CSF.

3.7 Considerações Finais

Os relés de distância são amplamente utilizados na proteção de linhas de transmissão, principalmente na rede básica do sistema interligado nacional. Ressalta-se, portanto, que esses equipamentos apresentam quesitos importantes ao se tratar da proteção de sistemas elétricos como a segurança, a velocidade, a sensibilidade, a confiabilidade e a seletividade frente a perturbações na rede.

Com isso, a partir das principais características de operação e coordenação da proteção de distância desenvolvidas no capítulo, é possível analisar qual representa a melhor alternativa para a proteção, bem como os ajustes das zonas de proteção. Fundamentado nos cálculos das unidades de impedância e dos comparadores por fase e magnitude, torna-se possível o desenvolvimento computacional dos relés de distância para as linhas posteriormente estudadas.

4 Sistema em Estudo

Este capítulo aborda as principais características do sistema elétrico em estudo com as linhas de transmissão com compensação série da interligação Norte-Sul, a simulação de dados no ATP e a geração dos casos em batelada, a implementação do relé convencional e o princípio de funcionamento da rede neural artificial.

4.1 Interligação Norte-Sul

Os sistemas de transmissão Norte/Nordeste e Sul/Sudeste/Centro-Oeste, até meados de 1998, operavam separadamente e concentravam cerca de 95% do consumo de energia elétrica do país. A interligação Norte-Sul permitiu a integração do sistema elétrico nacional com a equalização dos níveis de risco, aumento da confiabilidade, redução das necessidades de reserva girante global e possibilidade de otimização dos programas de manutenção (SANTOS e et al., 1999).

4.1.1 Aspectos Gerais

A interligação Norte-Sul proporcionou o surgimento do SIN, uma vez que integrou as bacias hidrográficas das regiões Norte e Nordeste às do Sul e do Sudeste. Eletricamente, conta-se com uma rede tronco de transmissão estendendo-se, no sentido leste-oeste, do norte da Bahia ao Pará e, no sentido norte-sul, do Maranhão a Goiás e ao sul através de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Do eixo principal, derivam-se os atendimentos radiais aos demais estados brasileiros, com exceção da região amazônica (SANTOS e et al., 1999).

Com isso, o sistema é composto pelas interligações das linhas Norte-Sul I, Norte-Sul II e Nordeste-Sudeste, de modo a formar um tronco de aproximadamente 2600 km, conforme representado na Figura 4.1 (GOMES, 2012). Deve-se destacar que as linhas apresentam como característica a compensação série fixa de 60% da reatância série (SANTOS e et al., 1999). O presente trabalho tem como objeto de estudo duas linhas do tronco Norte-Sul I.

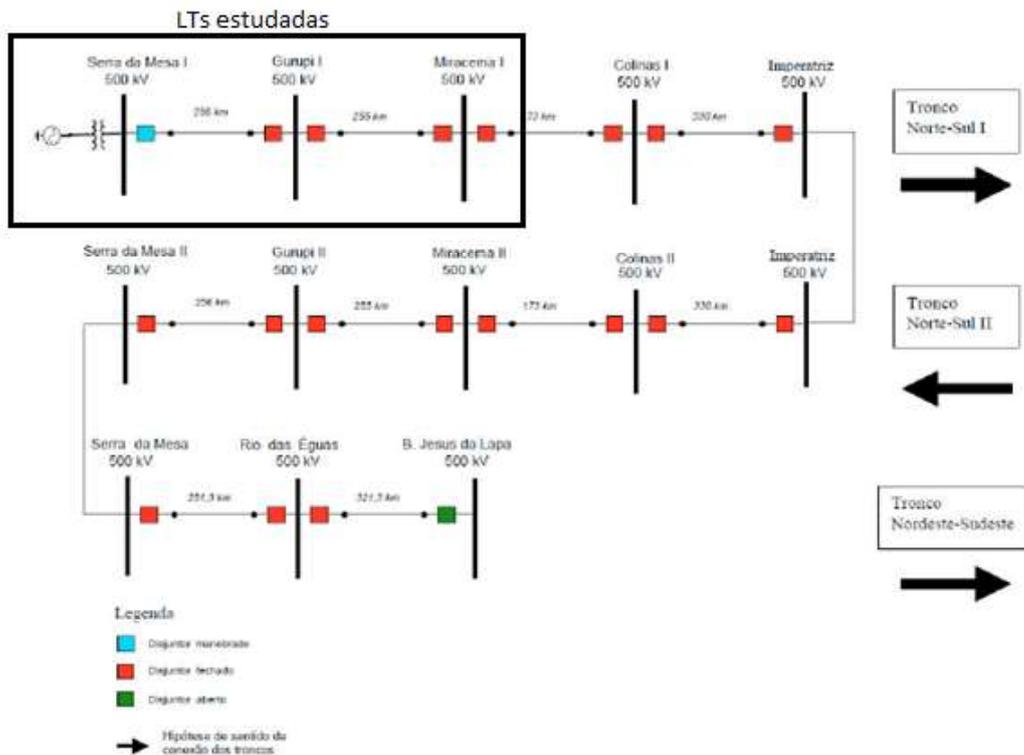


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema com a sinalização das linhas em estudo. Fonte: Adaptado de (GOMES, 2012).

4.1.2 Tronco Norte-Sul I

A interligação Norte-Sul I é constituída pelas linhas de transmissão de 500 kV Serra da Mesa – Gurupi – Miracema – Colinas – Imperatriz, conforme a Figura 4.1. Deve-se ressaltar que cada tronco apresenta diferentes configurações, de modo que a Tabela 4.1 apresenta as características dos condutores, em que R_{ext} e R_{int} são, respectivamente, os raios internos e externos dos condutores e μ_r a permeabilidade magnética, e a Figura 4.2 descreve a silhueta típica das torres da interligação (GOMES, 2012).

Tabela 4.1 – Dados dos condutores e cabos para-raios das torres da interligação Norte-Sul I. Fonte: (GOMES, 2012).

Condutor	Resistência Unitária (Ω/km)	R_{ext} (m)	R_{int} (m)	μ_r
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
PR-Aço Galvanizado EHS	3,15	0,00457	-	1

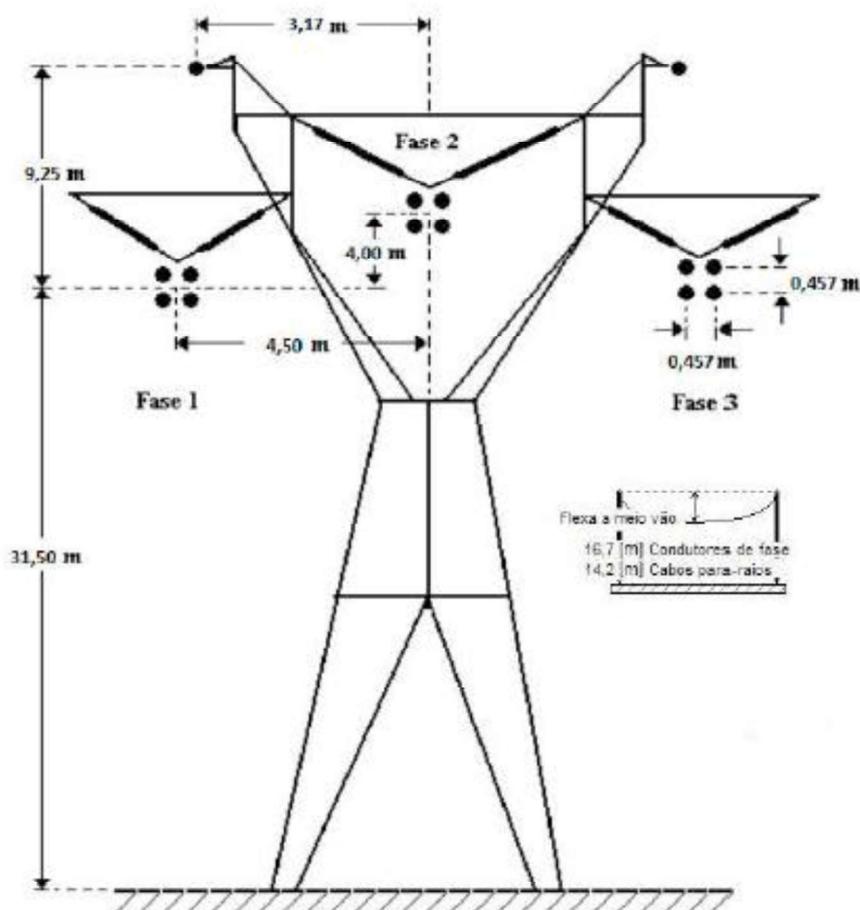


Figura 4.2 – Silhueta típica das torres do tronco Norte-Sul I. Fonte: (GOMES, 2012).

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros elétricos longitudinais e transversais por unidade de comprimento calculados para a linha idealmente transposta, em componentes de sequência, com frequência de 60 Hz. Além disso, considerou-se a resistividade do solo em $4000 \Omega\text{m}$, devido aos altos valores encontrados na região (GOMES, 2012).

Tabela 4.2 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas da interligação Norte-Sul I calculados para frequência de 60 Hz. Fonte: (GOMES, 2012).

Componentes de sequência	Resistência Unitária (Ω/km)	Reatância Unitária (Ω/km)	Admitância Unitária ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Zero	0,4696	1,5777	2,7370
Positiva/Negativa	0,0159	0,2670	6,0810

As linhas de transmissão com compensação série utilizadas no trabalho são Serra da Mesa – Gurupi e Gurupi – Miracema, cuja concessão pertence a Furnas. Para a melhor visualização da região em estudo, a Figura 4.3 apresenta o mapa geoeletrico da região sudeste/centro-oeste próximo à subestação de Serra da Mesa.

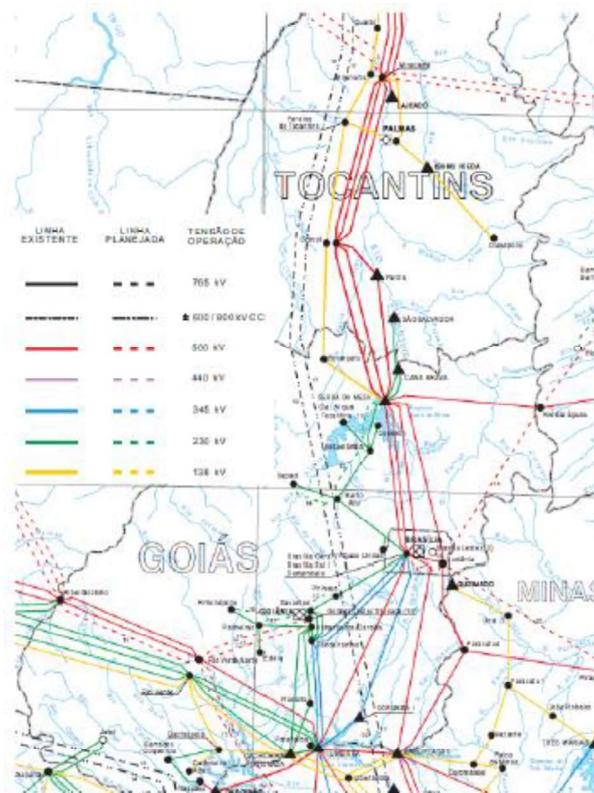


Figura 4.3 – Mapa geoeletrico da região sudeste/centro-oeste. Fonte (BRITO, 2014).

4.2 Simulação do Sistema Elétrico

A simulação do sistema elétrico em estudo envolve duas etapas: a representação no *software Alternative Transient Program (ATP)* e a geração em batelada para diferentes tipos de falta em cada um dos casos analisados (Alternative Transient Program Rule Book, 1987). Os dados dos equipamentos e os equivalentes de *Thèvenin* dos circuitos foram fornecidos pela concessionária responsável.

4.2.1 Simulação das Linhas de Transmissão no *Software ATP*

Para o estudo, simularam-se três casos: primeiramente, as linhas separadas Serra da Mesa – Gurupi e Gurupi – Miracema e, posteriormente, Serra da Mesa – Gurupi – Miracema. Os valores de tensão e corrente foram medidos nas respectivas barras.

As subestações são representadas por uma fonte de tensão equilibrada seguida por uma impedância equivalente, que permite a representação do sistema a montante da linha analisada. A compensação série é realizada nas extremidades das linhas, o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema contempla quatro bancos de capacitores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , respectivamente. Os capacitores C_2 , C_3 e C_4 apresentam o mesmo valor, enquanto C_1 apresenta uma capacitância 1,5 vezes maior que os anteriores.

Os dados anteriormente citados foram disponibilizados pela concessionária Furnas Centrais Elétricas. Os parâmetros dos varistores de óxido metálico foram calculados a partir da curva fornecida por um fabricante (HINRICHSEN, 2001).

Na modelagem das linhas de transmissão, após verificação dos modelos que o software disponibiliza para a representação do sistema, adotou-se o modelo de *JMarti*, que considera os parâmetros distribuídos e variáveis com a frequência. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 representam a configuração utilizada na simulação para uma falta a 5% da LT Serra da Mesa – Gurupi.

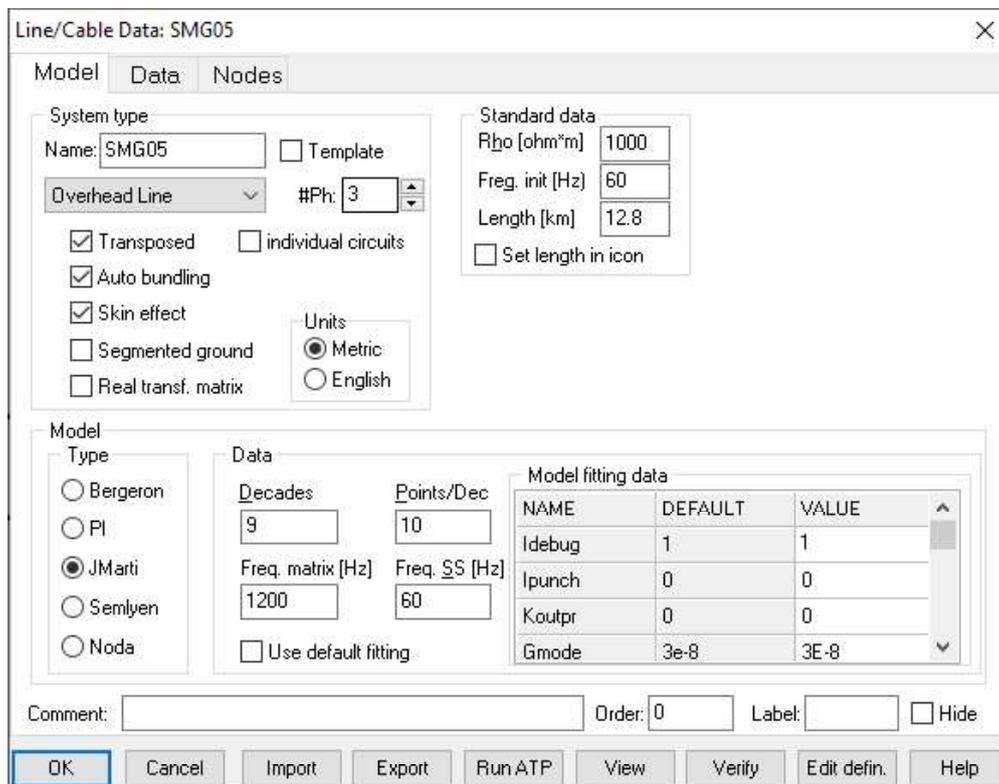


Figura 4.4 – Configuração da LT no ATP considerando o modelo *JMarti*.

Line/Cable Data: SMG05

Model Data Nodes

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.37	1.4795	0.0614	-4.5	31.5	14.8	45.7	45	4
2	2	0.37	1.4795	0.0614	0	35.5	18.8	45.7	45	4
3	3	0.37	1.4795	0.0614	4.5	31.5	14.8	45.7	45	4
4	0	1E-6	0.457	3.51	-3.17	40.75	26.55	0	0	0
5	0	1E-6	0.457	3.51	3.17	40.75	26.55	0	0	0

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 4.5 – Entrada de dados da torre para a representação da LT no ATP considerando o modelo *JMarti*.

Para a modelagem da falta, optou-se por uma resistência em série com chaves seccionadoras que possibilitam alterar o tipo de falta e o ângulo de incidência a partir das configurações de fechamento. A Figura 4.6 e a Figura 4.7 representam os sistemas simulados com uma linha, onde $C_2 = C_3 = C_4$, enquanto $C_1 = 1,5C_2$.

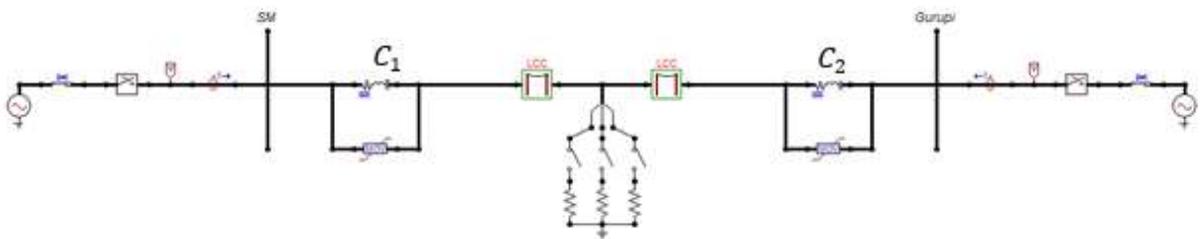


Figura 4.6 – Simulação da linha de transmissão Serra da Mesa – Gurupi.

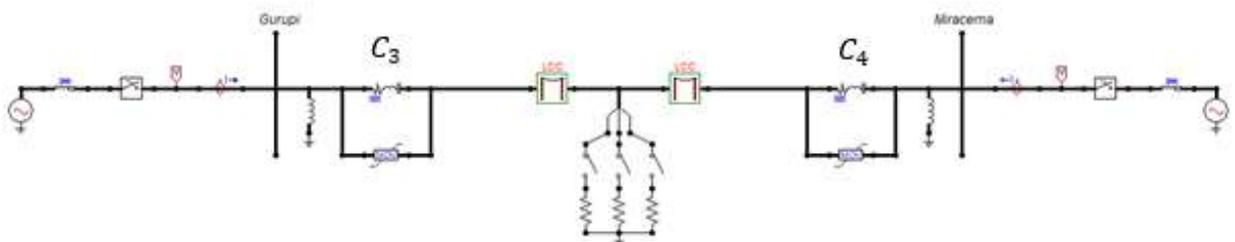


Figura 4.7 – Simulação da linha de transmissão Gurupi – Miracema.

4.2.2 Geração em Batelada

A simulação do sistema elétrico em diferentes condições de operação é realizada a partir da geração em batelada dos casos a serem estudados. Portanto, a partir da rotina desenvolvida no *software* MATLAB (DEMUTH e et al, 2015), é possível formar o conjunto de dados ao variar o tipo, a distância e a resistência de falta, além do ângulo de incidência da falta nos sistemas implementados no ATP. Utilizou-se um método para automatizar a tarefa, que consiste no uso de arquivos com extensão *.bat* e permite a simulação em batelada através do ATP (SU e et al, 2008).

Portanto, são analisados os dez tipos de falta, sendo três fase-terra (AT, BT e CT), três fase-fase (AB, BC, CA), três fase-fase-terra (ABT, BCT, CAT) e a trifásica (ABC). Os ângulos de incidência variam em três posições (0°, 45° e 90°). Deve-se ressaltar a necessidade de criar condições com parâmetros diferentes de treinamento e validação da rede neural, de modo a apresentar distâncias e resistências de falta distintas, conforme descrito na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Dados da batelada de treinamento

Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
Fase-Terra	5, 10, 15, ..., 90, 95	0,01 – 4 – 8 – 12 – 16 – 20 – 24 – 28 – 32 – 36
Fase-Fase-Terra		0,01 – 3 – 6 – 9 – 12 – 15 – 18 – 20 – 24 – 27
Fase-Fase e Trifásica		0,01 – 2,5 – 5

Tabela 4.4 – Dados da batelada de validação

Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
Fase-Terra e Fase-Fase-Terra	16 – 23 – 34 – 46 – 57 – 62 –	10 – 21 – 31
Fase-Fase e Trifásica	73 – 89	3

Os parâmetros apresentados acima foram utilizados na simulação com apenas uma linha de transmissão. Para o circuito com duas linhas interligadas os parâmetros de resistência e ângulo de incidência permaneceram os mesmos da simulação anterior, enquanto a distância de falta variou-se de 5% em 5% ao longo de todo o comprimento.

4.3 Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão a partir da Rede Neural Artificial

4.3.1 Rede Neural Artificial

Os avanços tecnológicos relacionados às técnicas de inteligência artificial permitem o desenvolvimento de diferentes modelos computacionais para a solução de problemas. A teoria de Redes Neurais Artificiais (RNAs) permite o uso de processos inteligentes, tem-se como principal característica o reconhecimento de padrões que, em termos gerais, compreendem a identificação e classificação da informação em categorias (OLESKOVICZ e et al, 2003).

Uma RNA é constituída por um conjunto de unidades de processamento interligadas, denominadas neurônios, que influenciam uns aos outros de modo a formar um sistema maior, capaz de armazenar o conhecimento adquirido a partir de exemplos apresentados e realizar inferências sobre novos exemplos (GONÇALVES, 2008). A Figura 4.8 apresenta o neurônio da rede neural.

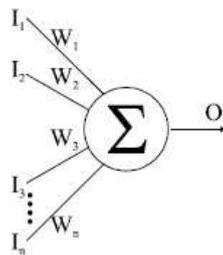


Figura 4.8 – Neurônio na RNA. Fonte: (GIOVANINI e ET AL, 1999).

Portanto, as redes neurais artificiais são comumente apresentadas como um grafo orientado, onde os vértices são os neurônios e as arestas o tipo de alimentação. Existem diferentes tipos de alimentação para a RNA. A Figura 4.9 apresenta um exemplo de grafo orientado (GONÇALVES, 2008).

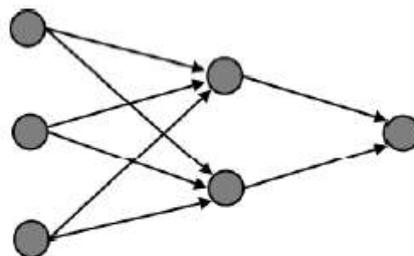


Figura 4.9 – Rede neural grafo orientado. Fonte: (GONÇALVES, 2008).

No modelo de RNA estudado, os dados de alimentação da rede são propagados através dos neurônios, pela camada de entrada até a cada de saída, podendo existir uma ou mais camadas internas, denominadas de camadas ocultas. Deve-se destacar que os neurônios são ligados aos neurônios das camadas subseqüentes, não havendo ligação entre os da mesma camada, conforme representado na Figura 4.10.

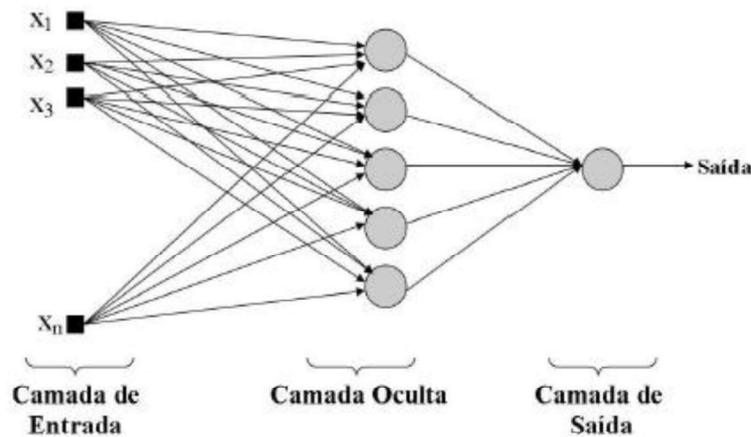


Figura 4.10 – Representação esquemática da RNA. Fonte: (GONÇALVES, 2008).

A aprendizagem da rede ocorre por meio de um processo iterativo, conhecido por aprendizagem por experiência, de modo que os dados de treinamento são apresentados à rede e a partir dos erros obtidos, são realizados ajustes nos pesos sinápticos com o intuito de diminuir o erro na próxima iteração. O principal algoritmo de treinamento é o de retroprogramação de erro, baseado na aprendizagem por correção de erro. Destaca-se que o número de iterações e o erro calculado podem ser fatores que limitam o término do treinamento da rede (GONÇALVES, 2008).

Assim, ao aplicar a RNA nos problemas de reconhecimento de padrões, no contexto da classificação e da localização de faltas em uma linha de transmissão, torna-se indispensável a elaboração de um conjunto de padrões que representem as situações de falta no sistema analisado. Destaca-se que esses devem, da melhor maneira possível, englobar os casos em que o sistema está sujeito, uma vez que serão utilizados para o treinamento da rede (OLESKOVICZ e et al, 2003).

Outro aspecto importante a se destacar é a capacidade de generalização e adaptação da RNA às operações do sistema elétrico. Com isso, a rede deve fornecer as saídas

desejadas não somente para dados conhecidos, mas também para qualquer entrada relacionada aos padrões treinados (OLESKOVICZ e et al, 2003).

4.3.2 Classificação e Localização das Faltas

O estudo do relé de distância e das características da rede neural artificial possibilitou o desenvolvimento computacional do programa para classificação e localização de faltas na LT. A partir da simulação em batelada de treinamento e validação para os diferentes circuitos implementados no *software* ATP, torna-se possível desenvolver várias vertentes de análise. Os sinais de tensão e corrente são processados de acordo com o fluxograma da Figura 4.11.

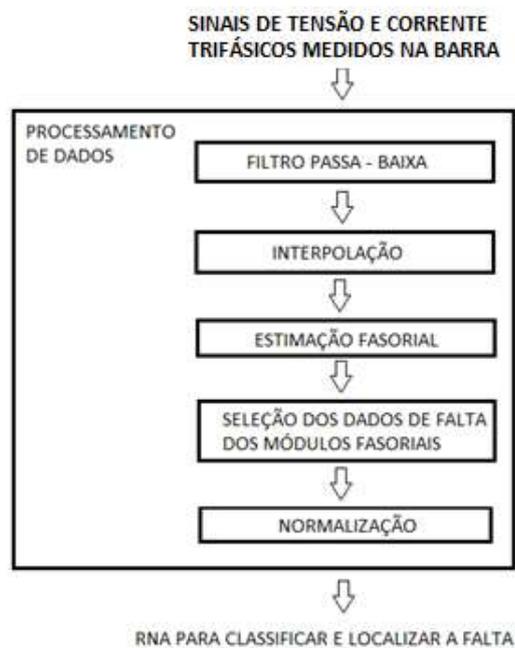


Figura 4.11 - Fluxograma da estrutura do algoritmo de processamento dos dados para a classificação e localização da falta na LT por meio da Rede Neural Artificial.

Inicialmente, os dados são interpolados para uma frequência de amostragem de 4 kHz, e preparados para a estimação de fasores em 60 Hz, por meio de um filtro *butterworth* passa-baixa de segunda ordem. Posteriormente, os dados de corrente e tensão são interpolados a partir da padronização do número de pontos por ciclos, 960 Hz. A estimação fasorial das componentes é realizada pelo método dos mínimos quadrados. Por fim, os dados são selecionados de acordo com o tempo em que a falta ocorre no sistema e são normalizados em relação ao máximo valor de corrente e tensão pré-falta.

Dessa forma, a partir dos sinais de tensão e corrente, é possível treinar e validar a rede neural artificial. Nas simulações dos circuitos com apenas uma linha, Serra da Mesa – Gurupi e Gurupi – Miracema, os valores de saída da rede definem o tipo da falta que o sistema está sujeito, conforme a Tabela 4.5. Deve-se ressaltar que, neste estudo, realizou-se o treinamento e validação para a mesma linha de transmissão e para uma linha diferente, a fim de verificar a resposta do sistema.

Tabela 4.5 – Resposta da RNA no treinamento e validação para o tipo de falta.

Tipo de Falta	Fases Envolvidas	Sigla	Valor de saída para a Fase A	Valor de saída para a Fase B	Valor de saída para a Fase C	Valor de saída para o Terra
Monofásica	A	AT	1	0	0	1
	B	BT	0	1	0	1
	C	CT	0	0	1	1
Bifásica	A e B	AB	1	1	0	0
	B e C	BC	0	1	1	0
	C e A	CA	1	0	1	0
Bifásica para Terra	A e B	ABT	1	1	0	1
	B e C	BCT	0	1	1	1
	C e A	CAT	1	0	1	1
Trifásica	A, B e C	ABC	1	1	1	0

Para uma segunda análise, além da definição do tipo de falta, acrescenta-se a zona de atuação do relé, definida conforme a Tabela 4.6. Com isso, por envolver apenas uma linha de transmissão, definem-se duas zonas. As simulações são realizadas para todos os cenários anteriormente estudados.

Tabela 4.6 – Resposta da RNA no treinamento e validação para duas zonas de proteção.

Distância de Falta	Valor de saída da Zona 1	Valor de saída da Zona 2
80% da primeira LT	1	1
A partir de 80% da primeira LT	0	1

Na terceira análise, o circuito em estudo apresenta duas linhas de transmissão, Serra da Mesa – Gurupi – Miracema, cuja resposta do relé é a definição do tipo de falta e zona de atuação, conforme a Tabela 4.5 e a Tabela 4.7. Portanto, esse estudo permite a comparação entre as respostas obtidas pela RNA e pelo relé de distância. A fim de obter mais um objeto de análise, optou-se por dois treinamentos: uma RNA cuja saída é o tipo de falta e a zona de atuação e duas RNAs que fornecem tais respostas separadamente.

Tabela 4.7 – Resposta da RNA no treinamento e validação para a zona de proteção.

Distância de Falta	Valor de saída da Zona 1	Valor de saída da Zona 2	Valor de saída da Zona 3
80% da primeira LT	1	1	1
A partir de 80% da primeira LT até 50% da segunda LT	0	1	1
A partir de 50% da segunda LT	0	0	1

Em todos os casos estudados, a rede neural utilizada era composta por três camadas intermediárias com 24, 16 e 12 neurônios, respectivamente. Deve-se ressaltar que várias outras configurações de rede foram testadas, no entanto, nenhuma apresentou melhor custo e benefício. Para melhor visualização, a Figura 4.12 representa as estruturas das redes neurais implementadas.

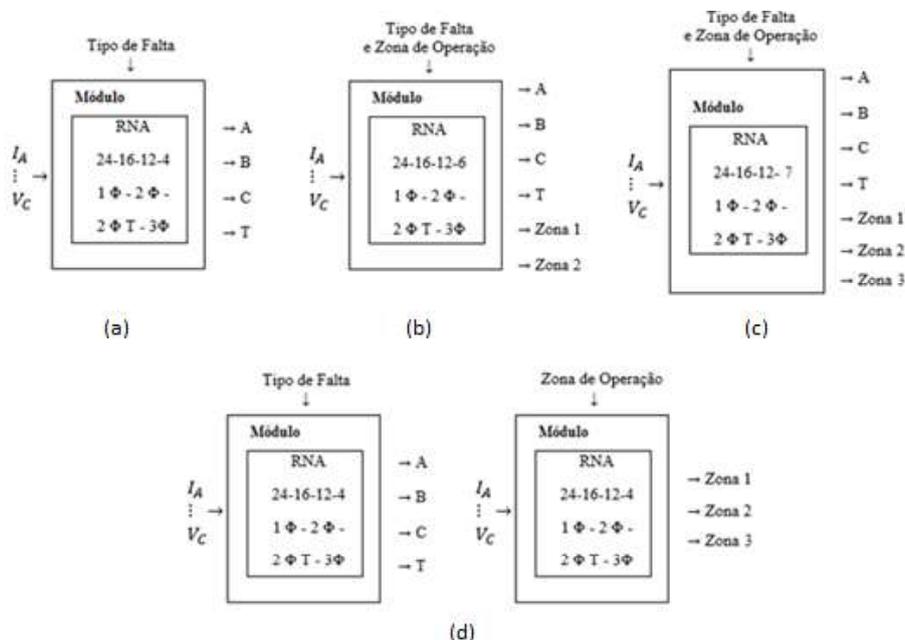


Figura 4.12 – Estruturas das redes neurais implementadas. (a) Tipo de falta, (b) tipo de falta e zona de operação para uma linha, (c) tipo de falta e zona de operação para duas linhas, (d) tipo de falta e zona de operação para duas linhas de forma separada.

Dessa forma, nas simulações com apenas uma linha de transmissão, implementaram-se 4632 cenários para treinamento e 528 para validação; ao analisar o sistema com duas LTs, tem-se 9264 para treinamento e 1056 para validação. Além disso, a rede depende da forma com que os dados de entrada são definidos, a fim de não influenciar na resposta, optou-se por simular o mesmo sistema dez vezes com a entrada dos casos de forma randômica (MONTGOMERY e et al, 2016).

4.4 Relé de Distância

A partir do estudo desenvolvido acerca do relé de distância, foi possível implementá-lo computacionalmente. Os sinais de entrada, tensão e corrente na barra emissora, foram obtidos através dos arquivos de validação do circuito Serra da Mesa – Miracema. Com isso, torna-se possível realizar a comparação dos resultados obtidos com a rede neural. O processamento dos dados é realizado de acordo com o fluxograma da Figura 4.13.



Figura 4.13 – Fluxograma da estrutura do algoritmo de processamento dos dados para o relé de distância.

O princípio do processamento é o mesmo da rede neural, os dados são interpolados para uma frequência de amostragem de 4 kHz e preparados para a estimação de fasores em 60 Hz, por meio do filtro *butterworth* passa-baixa de segunda ordem. Posteriormente, os dados de corrente e tensão são interpolados a partir da padronização do número de pontos por ciclos, 960 Hz. A estimação fasorial das

componentes é realizada pelo método dos mínimos quadrados. Por fim, os dados são selecionados de acordo com o tempo em que a falta ocorre no sistema e são combinados nas unidades fase-terra e fase-fase.

Após a obtenção das tensões e correntes fase-terra e fase-fase, inicia-se o processo de classificação e localização da falta para o relé mho. Cada uma das seis unidades do relé é testada de modo a verificar o tipo de falta que ocorreu na linha. Em seguida, realiza-se a comparação a fim de verificar qual a zona de atuação do equipamento. Deve-se ressaltar que, não sendo detectada falta na primeira zona, efetua-se o cálculo para a segunda zona e, posteriormente, para a terceira.

4.5 Modelagem do Processo

A exemplificação de forma macro do processo de simulação do estudo é apresentada conforme a Figura 4.14 – Fluxograma do processo de simulação. Deve-se destacar que para cada um dos casos estudados, cada linha de transmissão separada e o sistema concatenado, realizou-se esse processamento dos dados.

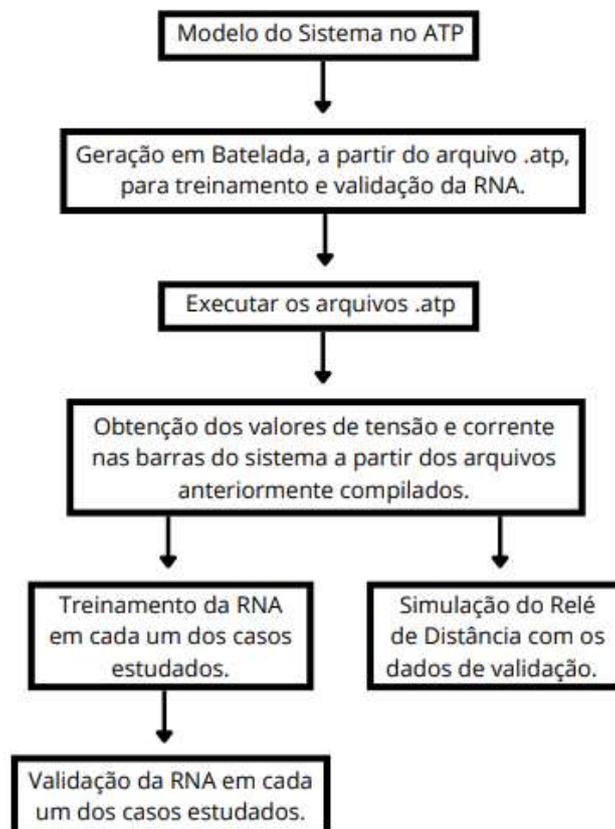


Figura 4.14 – Fluxograma do processo de simulação.

O tempo de simulação em cada uma das partes do processo varia de acordo com a quantidade de casos, para o sistema com apenas uma LT tem-se 4632 cenários de treinamento e 528 para validação, a aquisição dos dados e processamento gasta em média 5 horas. Ao analisar o sistema com duas LTs, tem-se 9264 para treinamento e 1056 para validação, o tempo dobra, o que implica em média 10 horas.

Após a aquisição dos dados, o treinamento da rede neural varia de acordo com a complexidade da mesma. Na identificação apenas do tipo de falta em uma LT, tem-se um tempo estimado de 30 minutos, enquanto, ao considerar também a zona de atuação, o treinamento da rede passa demandar 1 hora. Para as simulações com duas LTs, o tempo de processamento é de 3 horas e 30 minutos. Deve-se ressaltar que a resposta da rede, após o treinamento, é em cerca de 15 segundos para cada um dos casos.

4.6 Considerações Finais

A partir da caracterização do sistema de transmissão utilizado, da rede neural artificial e dos processos de simulação para classificação e localização das faltas e do relé de distância convencional, é possível compreender as etapas necessárias neste estudo. Após a geração em batelada dos arquivos de treinamento e validação, o pré-processamento dos dados para os dois objetos de estudo é praticamente o mesmo, diferindo na obtenção dos sinais fase-terra e fase-fase.

Em contrapartida, destaca-se que o relé de distância necessita das especificações de seus parâmetros para o cálculo das zonas de proteção e comparadores, enquanto para classificação e localização da falta na LT por meio da RNA demanda as características da rede na qual será implementado. Observa-se, portanto, que é possível generalizar o programa para diferentes circuitos e alterar apenas alguns parâmetros e os dados de entrada.

5 Resultados e Análises

Neste capítulo, são apresentados os gráficos das tensões e correntes, para cada tipo de falta, na barra emissora das duas linhas de transmissão e os resultados das simulações com a rede neural artificial e o relé de distância. Além disso, com base nos dados apresentados avalia-se o desempenho frente aos diferentes casos analisados.

5.1 Resultados e Análises

5.1.1 Representação gráfica das tensões e correntes de fase

A seguir, são apresentados os gráficos de tensão e corrente de fase, no terminal emissor, para as mesmas condições de curto-circuito em duas linhas de transmissão, Serra da Mesa - Gurupi (SM-GU) e Gurupi - Miracema (GU-MI). Na Figura 5.1 e na Figura 5.2, tem-se a representação de uma falta monofásica AT em 5% da LT; pode-se observar que, para as mesmas condições, as tensões e correntes nas duas linhas apresentam valores diferentes devido à compensação série.

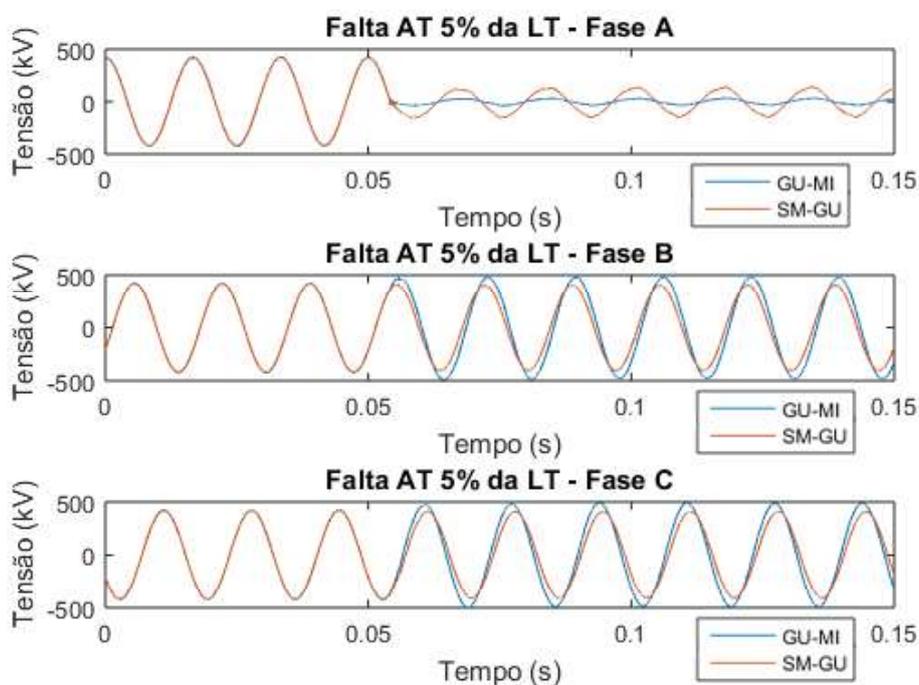


Figura 5.1 – Tensões de fase para uma falta fase-terra AT em 5% da linha de transmissão.

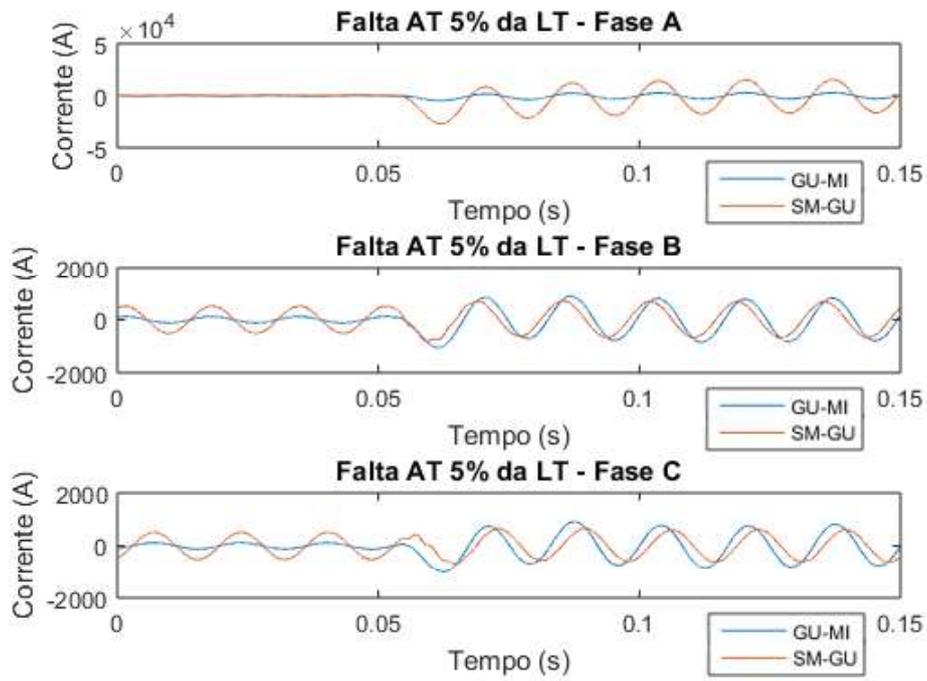


Figura 5.2 – Correntes de fase para uma falta fase-terra AT em 5% da linha de transmissão.

Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 verifica-se a alteração da tensão e da corrente após a falta bifásica AB em 20% das linhas de transmissão.

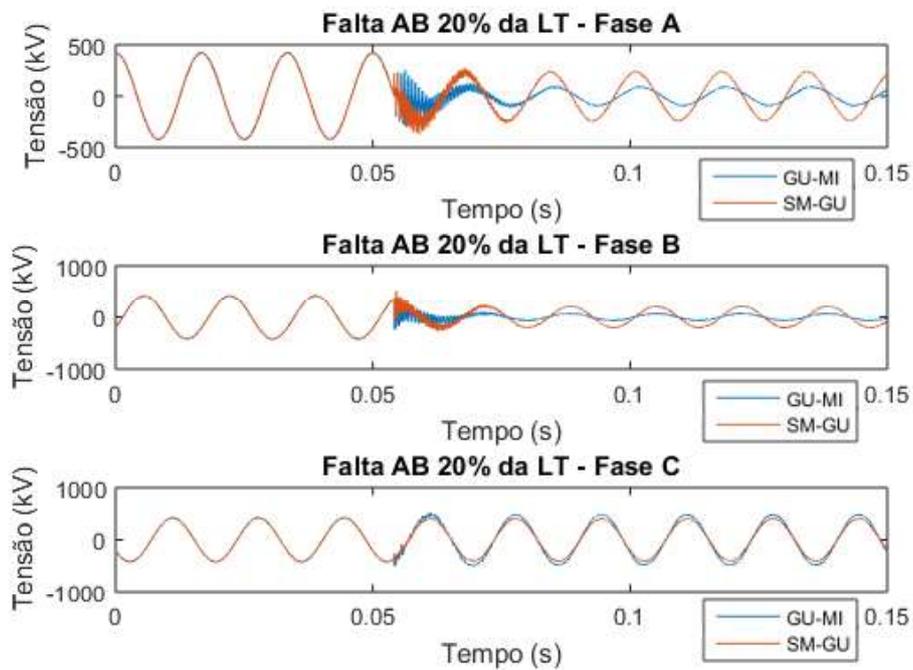


Figura 5.3 – Tensões de fase para uma falta fase-fase AB em 20% da linha de transmissão.

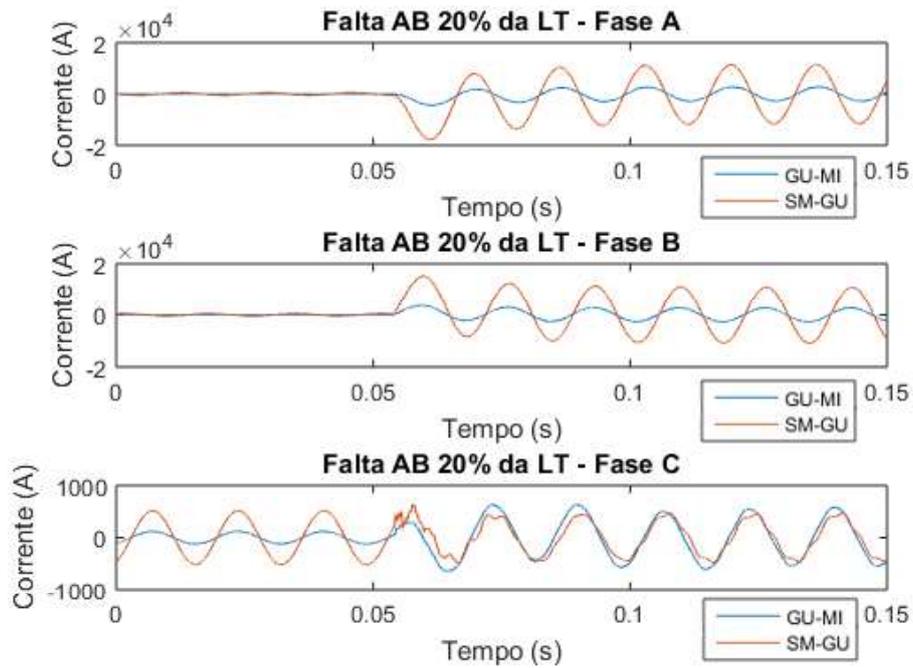


Figura 5.4 – Correntes de fase para uma falta fase-fase AB em 20% da linha de transmissão.

Para a representação da falta bifásica para terra, optou-se pelo cenário de curto-circuito nas fases B e C em 60% da linha. Na Figura 5.5 e na Figura 5.6 observa-se, conforme esperado, a variação significativa das tensões e das correntes nas fases com defeito.

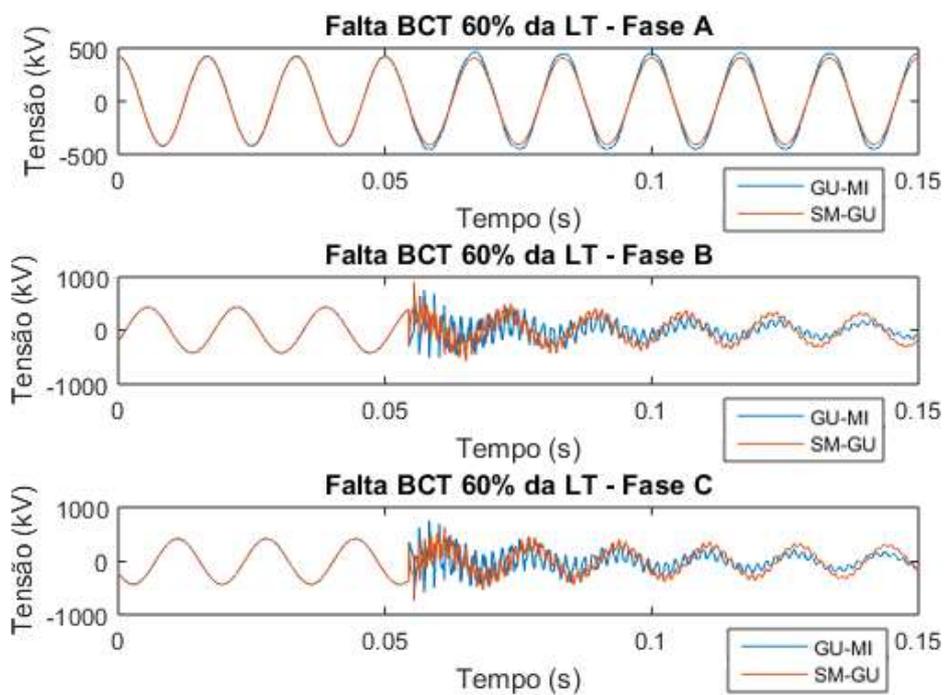


Figura 5.5 – Tensões de fase para uma falta fase-fase-terra BCT em 60% da linha de transmissão.

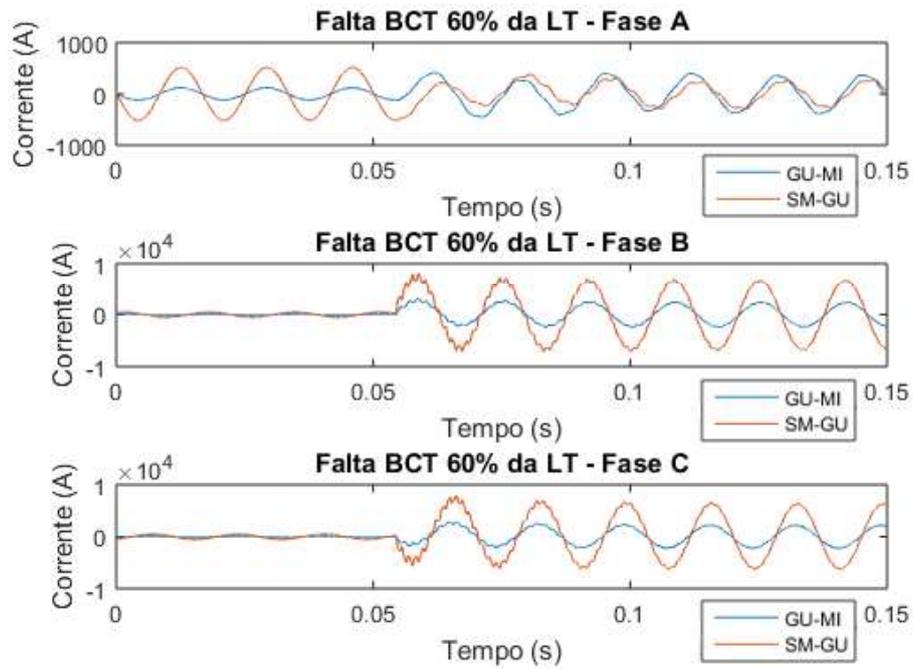


Figura 5.6 – Correntes de fase para uma falta fase-fase-terra BCT em 60% da linha de transmissão.

Na Figura 5.7 e na Figura 5.8, observam-se os gráficos de tensão e de corrente para uma falta trifásica, ABC, em 75% das linhas de transmissão.

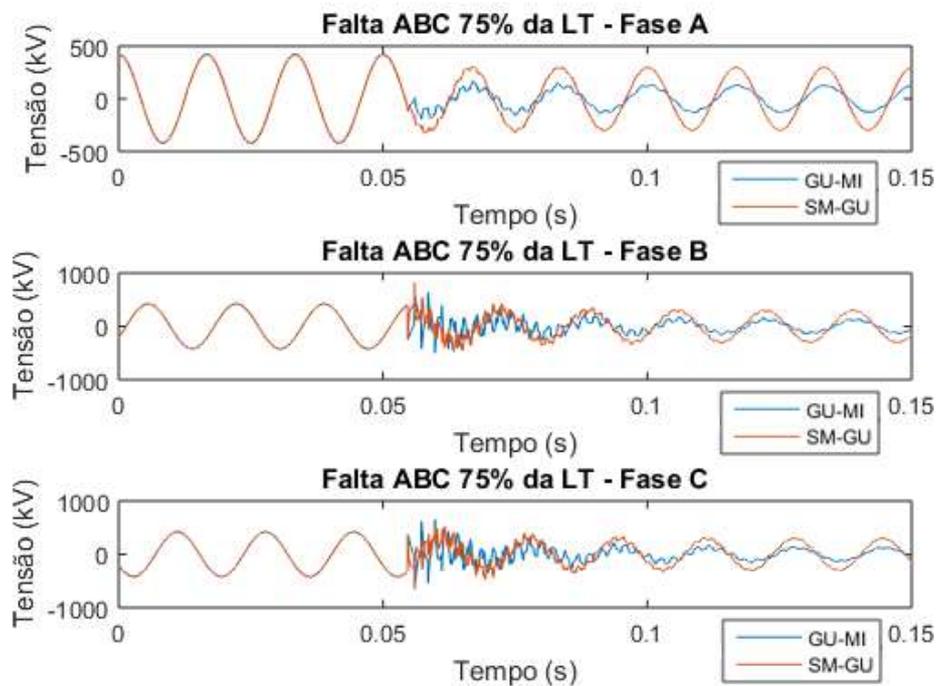


Figura 5.7 – Tensões de fase para uma falta trifásica ABC em 75% da linha de transmissão.

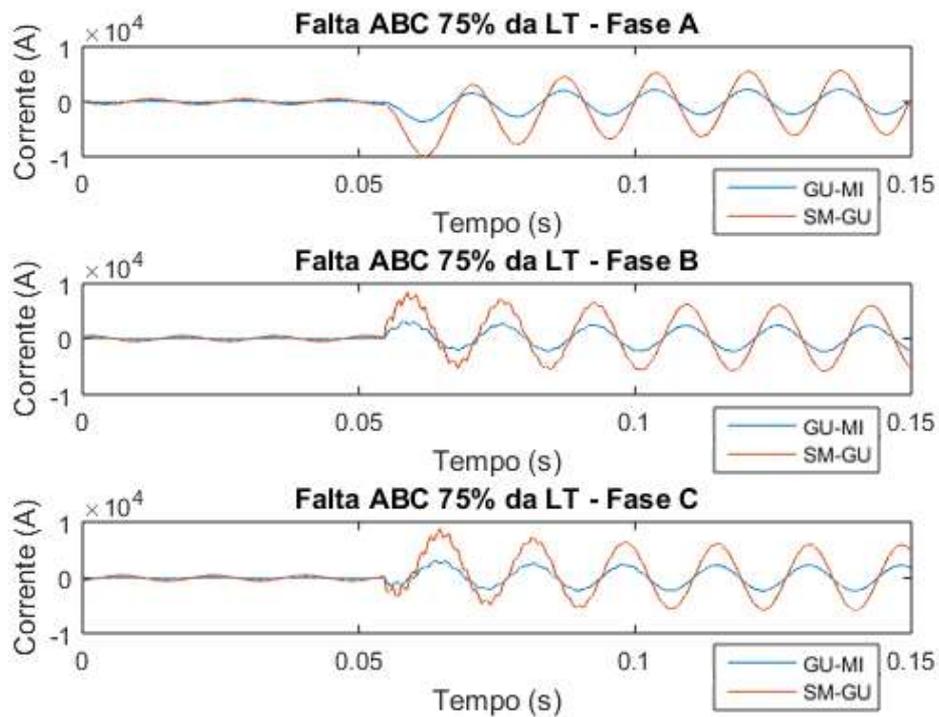


Figura 5.8 – Correntes de fase para uma falta trifásica ABC em 75% da linha de transmissão.

Portanto, em todos os casos observados, as tensões e correntes nas fases do sistema em curto-circuito apresentaram alterações nos valores, conforme esperado. Deve-se ressaltar que a variação no valor dos bancos de capacitor nas extremidades das linhas de transmissão e dos equivalentes de *Thèvenin* resulta em curvas, tensão e corrente, diferentes para o mesmo cenário de falta, o que justifica os estudos analisados para o treinamento com a LT SM – GU e validação com a LT GU – MI.

5.1.2 Relé de RNA na identificação do tipo de falta para treinamento e validação em uma mesma LT

A Tabela 5.1 e a

Tabela 5.2 apresentam as respostas do relé de RNA para identificação do tipo de falta nas LTs Serra da Mesa – Gurupi e Gurupi – Miracema, respectivamente. Nos dois cenários analisados, o relé apresentou resultado satisfatório quando o treinamento e a validação da RNA foram realizados para a mesma LT, alcançando-se eficiência média superior a 99%.

Tabela 5.1 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para a LT Serra da Mesa – Gurupi.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	528	0	100
2	526	2	99,62
3	518	10	98,11
4	527	1	99,81
5	525	3	99,43
6	528	0	100
7	528	0	100
8	525	3	99,43
9	528	0	100
10	525	3	99,43
Média de Eficiência			99,58

Tabela 5.2 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para a LT Gurupi - Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	526	2	99,62
2	528	0	100
3	503	25	95,27
4	528	0	100
5	525	3	99,43
6	528	0	100
7	520	8	98,48
8	528	0	100
9	528	0	100
10	527	1	99,81
Média de Eficiência			99,26

Deve-se ressaltar, conforme descrito no capítulo anterior, que o desempenho da rede neural varia de acordo com a entrada dos dados para treinamento. Assim, uma vez que os dados foram inseridos de forma aleatória, diversas simulações não apresentaram erros, enquanto algumas foram menos eficientes. Ainda assim, o percentual de acertos foi superior a 95% em todas as simulações realizadas.

5.1.3 RNA na identificação do tipo de falta e da zona de proteção para treinamento e validação em uma mesma LT

A Tabela 5.3 e a Tabela 5.4 apresentam as respostas da RNA para identificação do tipo de falta e zona de proteção nas LTs Serra da Mesa – Gurupi e Gurupi – Miracema, respectivamente. Neste estudo, optou-se por uma única rede neural, cuja saída engloba os dois objetos de análise.

Deve-se ressaltar que, por se tratar de uma linha de transmissão para treinamento e validação da rede, apenas a zona 1 e a zona 2 foram consideradas. Nos dois cenários analisados, os resultados são satisfatórios, alcançando-se eficiência média superior a 98%.

Tabela 5.3 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para a LT Serra da Mesa – Gurupi.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	524	4	99,24
2	528	0	100
3	524	4	99,24
4	524	4	99,24
5	523	5	99,05
6	528	0	100
7	526	2	99,62
8	525	3	99,43
9	527	1	99,81
10	524	4	99,24
Média de Eficiência			99,49

Tabela 5.4 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para a LT Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	526	2	99,62
2	524	4	99,24
3	498	30	94,32
4	525	3	99,43
5	527	1	99,81
6	526	2	99,62
7	525	3	99,43
8	501	27	94,89
9	523	5	99,05
10	528	0	100
Média de Eficiência			98,54

Verifica-se que, em algumas simulações, a resposta da rede apresentou 100% de acerto, enquanto algumas foram menos eficientes. No entanto, o cenário de pior resposta ainda apresentou eficiência maior que 94%, o que é satisfatório.

5.1.4 RNA na identificação do tipo de falta para treinamento e validação em LTs distintas

A Tabela 5.5 apresenta as respostas para a identificação do tipo de falta que atinge a linha de transmissão. Neste estudo, a etapa de treinamento foi realizada com arquivos de falta da LT Serra da Mesa – Gurupi, 4104 casos, e a validação com dados da LT Gurupi – Miracema, 528 casos.

Deve-se ressaltar que outros cenários, com a rede neural mais robusta, foram verificados, mas apresentaram maior custo computacional e resposta próxima da rede já utilizada nos casos anteriores, o que não justificava a alteração.

Tabela 5.5 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta, com treinamento na LT Serra da Mesa – Gurupi e validação na LT Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	343	185	64,96
2	356	172	67,42
3	355	173	67,23
4	392	136	74,24
5	405	123	76,70
6	385	143	72,92
7	385	143	72,92
8	342	186	64,77
9	402	126	76,14
10	363	165	68,75
Média de Eficiência			70,61

Para essa condição de treinamento e validação, observou-se uma eficiência média inferior, comparada à condição anterior. Tal comportamento é resultante das diferenças entre os parâmetros das LTs, principalmente relacionados ao valor dos bancos de capacitores da compensação série.

5.1.5 RNA na identificação do tipo de falta e zona de proteção para treinamento e validação em LTs distintas

A Tabela 5.6 apresenta as respostas para a identificação do tipo de falta e da zona de operação. Conforme o estudo anteriormente realizado, a etapa de treinamento foi realizada com arquivos de falta da LT Serra da Mesa – Gurupi e a validação com dados da LT Gurupi – Miracema.

Deve-se ressaltar que a saída da rede neural utilizada engloba as duas variáveis analisadas. Além disso, devido ao estudo ser com apenas uma linha de transmissão, foram considerados as zonas 1 e 2.

Tabela 5.6 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação, com treinamento na LT Serra da Mesa – Gurupi e validação na LT Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	347	181	65,72
2	292	236	55,31
3	373	155	70,64
4	249	279	47,16
5	246	282	46,59
6	276	252	52,27
7	311	217	58,91
8	286	242	54,17
9	380	148	71,97
10	288	240	54,54
Média de Eficiência			57,73

Verifica-se que, ao considerar os dois parâmetros, a média de eficiência da RNA não apresentou resultado satisfatório, acima de 57%, uma vez que em alguns casos a resposta foi inferior a 50%. No entanto, nos cenários de maior eficiência, apresentou um índice de acerto acima de 70%, o que é satisfatório.

5.1.6 RNA na Identificação do Tipo de Falta e Zonas de Proteção para o Sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema

A simulação com duas LTs permite explorar melhor a zona de proteção em que o equipamento de proteção deve atuar. Neste estudo optou-se por uma rede neural cuja resposta envolve os dois parâmetros juntos.

Deve-se ressaltar que foram utilizados para o treinamento e para a validação da rede, respectivamente, 8208 e 1056 cenários de falta. A Tabela 5.7 apresenta as respostas da rede neural para as simulações cujo objetivo é a identificação do tipo de falta que atinge a linha de transmissão e a zona de atuação.

Tabela 5.7 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	1040	16	98,48
2	1039	17	98,39
3	1034	22	97,92
4	1039	17	98,39
5	1044	12	98,86
6	1043	13	98,77
7	1039	17	98,39
8	1040	16	98,48
9	1049	7	99,34
10	1040	16	98,48
Média de Eficiência			98,55

Ao realizar o treinamento e validação da RNA para as Linhas de transmissão Serra da Mesa – Gurupi – Miracema, obteve-se uma eficiência média superior a 98%. Observa-se que, no pior dos cenários de simulação, a rede apresentou acerto de mais de 97%, o que é bastante satisfatório.

A fim de realizar uma comparação, optou-se por treinar duas redes cujas respostas, o tipo de falta e a zona de operação do relé, são dadas separadamente. Deve-se ressaltar que a forma com que os dados de treinamento foram inseridos é a mesma para as duas RNAs.

As redes implementadas apresentam as mesmas configurações estruturais dos estudos anteriores, uma vez que, ao reduzir a quantidade de camadas e o número de neurônios, o resultado apresentado não foi satisfatório. Portanto, obtém-se os resultados para cada um dos objetos de estudo, conforme podem ser verificados na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	1048	8	99,24
2	1054	2	99,81
3	1055	1	99,91
4	1046	10	99,05
5	1039	17	98,39
6	1056	0	100
7	1056	0	100
8	1054	2	99,81
9	1054	2	99,81
10	1055	1	99,91
Média de Eficiência			99,59

Tabela 5.9 – Resposta da RNA para identificação da zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	1050	6	99,43
2	1046	10	99,05
3	1045	11	98,96
4	1040	16	98,48
5	1036	20	98,11
6	1050	6	99,43
7	1033	23	97,82
8	1043	13	98,77
9	1036	20	98,11
10	1038	18	98,23
Média de Eficiência			98,65

Após o processo de treinamento e validação, verifica-se quais casos foram assertivos para os dois cenários apresentados. A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos a partir dessa comparação.

Tabela 5.10 – Resposta da RNA para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema com duas redes neurais distintas.

Nº Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
1	1042	14	98,67
2	1044	12	98,86
3	1044	12	98,86
4	1036	20	98,11
5	1026	30	97,16
6	1050	6	99,43
7	1033	23	97,82
8	1041	15	98,58
9	1034	22	97,92
10	1037	19	98,20
Média de Eficiência			98,36

Observa-se que a eficiência média ao considerar os dois parâmetros foi superior à 98% e que, no pior dos cenários, ainda foi acima de 97%. Dessa forma, verificou-se que a divisão da rede neural não influencia de forma significativa, além de possuir um tempo de processamento maior se comparado com apenas uma RNA com as duas respostas.

5.1.7 Relé de Distância na Identificação do Tipo de Falta e Zonas de Proteção para o Sistema Serra da Mesa – Miracema

A Tabela 5.11 apresenta as respostas do relé de distância na identificação do tipo de falta e da zona de proteção para os mesmos casos desenvolvidos nas simulações com a rede neural, cujos resultados foram apresentados na Tabela 5.7 e na Tabela 5.10.

Tabela 5.11 – Resposta do relé de distância para identificação do tipo de falta e zona de operação para o sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.

Simulação	Acertos	Erros	Eficiência (%)
Tipo de Falta	606	450	57,39
Zona de Operação	870	186	82,39
Tipo de Falta e Zona de Operação	552	504	52,27

A simulação com o relé de distância apresentou eficiência inferior à resultante das simulações com o relé de RNA. Para a determinação da zona de operação, obteve-se uma eficiência de 82,39%, enquanto para a identificação do tipo de falta, a eficiência foi de apenas 57,39%.

6 Conclusão

6.1 Considerações Iniciais

Os principais pontos evidenciados neste trabalho consistiram no estudo da compensação série e seus impactos no sistema de transmissão de energia e na proteção de distância das linhas de transmissão. Vale ressaltar que, apesar dos efeitos decorrentes do acréscimo do banco de capacitor em série com a LT, esta é a alternativa que apresenta melhor custo e benefício no aumento da transmissão de energia.

Posteriormente, fundamentada em análises acerca do tema, exemplificou-se o sistema elétrico em estudo, a geração em batelada dos cenários que são analisados, a rede neural artificial e sua atuação para o sistema de proteção, além do desenvolvimento e processamento dos dados. Desse modo, tem-se uma base de todo o processo de simulação da proteção, a fim de comparar diferentes situações.

Em seguida, foram apresentados os gráficos de tensão e corrente em cada uma das fases na barra emissora, a fim de comparar, para um mesmo cenário de falta, as duas linhas de transmissão em estudo. Desenvolveram-se os resultados de simulação para a avaliação da distância de falta e zona de operação para apenas uma linha, com treinamento e validação para uma mesma linha e para linhas distintas. Posteriormente, realizou-se a comparação com a rede neural, em distintas situações, com o relé de distância.

6.2 Resultados Alcançados

A partir dos estudos da proteção de distância e rede neural, tornou-se possível desenvolver computacionalmente uma aplicação para melhoria dos problemas causados pela compensação série em LTs no contexto da proteção de distância. Para avaliação da eficiência da aplicação de redes neurais em proteção de linhas de transmissão, foram desenvolvidas diferentes simulações para identificação do tipo de falta e de zonas de atuação, utilizando parâmetros de linhas do sistema Serra da Mesa – Gurupi – Miracema.

Os resultados obtidos para treinamento e validação em uma mesma LT indicaram eficiência na identificação do tipo de falta e das zonas de operação. Além disso, o treinamento e a validação da rede neural a partir de LTs distintas, com variações de valores característicos, apresentou uma eficiência satisfatória. Tal aplicação indica uma possibilidade de otimizar o processo de treinamento e validação, já que, uma vez treinada uma RNA, é possível aplicá-la para proteção de outras LTs com parâmetros semelhantes.

Ademais, observou-se que não há diferença significativa entre o treinamento da rede neural de forma separada, uma rede para o tipo de falta e uma para a zona de operação, em relação a uma única rede capaz de gerar as duas respostas. Ao realizar a comparação do relé de distância e a rede neural, observou-se uma melhora na eficiência da identificação do tipo de falta e da zona de atuação.

6.3 Propostas de continuidade

O desenvolvimento deste trabalho propicia o suporte para uma análise mais avançada da aplicação de inteligência artificial na proteção de linhas de transmissão, em especial com compensação série. Com os resultados obtidos, a partir do estudo dos efeitos da compensação série nas LTs, da proteção de distância, desenvolvimento computacional da rede neural com treinamento e validação de diferentes cenários de falta no sistema em estudo, pode-se citar como objeto de estudo na continuidade deste trabalho:

- Desenvolver o sistema de proteção com rede neural em uma linguagem mais robusta e de processamento mais rápido;
- Avaliar o tempo de processamento em hardware;
- Desenvolver uma interface capaz de implantar em uma linha de transmissão com CSF e verificar a atuação a partir dos dados em tempo real.

7 Referências

Alternative Transient Program Rule Book, European EMTP Center. Leuven. Bélgica, 1987.

ANDERSON, O. M. **Power System Protection**. [S.l.] Wiley - IEEE, 1999.

BRITO, P. M. **Análise Paramétrica da Rede Elétrica no Estudo de Zeros Atrasados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Março de 2014.

CONCEIÇÃO, J. B. R. **Análise de Transitórios em Linhas de Transmissão com Compensação Série**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Julho de 2015.

DEMUTH, H.; BEALE, M., **Neural Network Toolbox User's Guide**, The Math Work, 2015.

DINIZ, O. P. **Análise no Plano Alfa da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão com Compensação Série**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, Junho de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, 2021. Disponível em: <<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>>>

FERREIRA, M. A. **Avaliação do Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Controlada por Tiristor**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília, Goya Editora LTDA., 2013.

GIOVANINI, R.; COURY, D. V. **Classificação Rápida de Faltas em Sistemas Elétricos Utilizando Redes Neurais Artificiais**. Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks. IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais pp. 281-286, July 20-22, 1999 - ITA, São José dos Campos - SP - Brasil.

GOMES, E. C. **Utilização de Linhas de Transmissão Semelhantes no Ensaio de Energização de um Tronco com Pouco mais de Meio Comprimento de Onda.** Dissertação de Mestrado de Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas, Fevereiro de 2012.

GONÇALVES, A. R. **Fundamentos e Aplicações Técnicas de Aprendizagem de Máquina.** Dissertação de Bacharel em Ciência da Computação. Universidade Estadual de Londrina, Novembro de 2008.

GONÇALVES, D. D. N. **Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro de 2007.

HINRICHSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arrester Fundamentals 1st Edition.** Siemens AG, Berlin, Julho de 2001.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência Volume 1 - 2ª Edição Modificada e Ampliada.** Florianópolis, UFSC - EEL - LABPLAN, 2005.

LIMA, M. M. M. **Alguns fatores afetando o Desempenho de Relés de Distância.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro de 2006.

MANTELE, M. **Enhancing of transmission capability of power corridors by means of series compensation.** PowerTech Conference, Outubro 1999.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, 6ª.Ed., LTC Livros Técnicos e Científicos, 2016.

OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. **O Emprego de Redes Neurais Artificiais da Detecção, Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão.** Universidade de São Paulo. Revista Controle & Automação/ Vol.14. no.2/ Abril, Maio, Junho 2003.

OLIVEIRA, A. L. P. **Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Fixa Através da Simulação Digital em Tempo**

Real. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá, Janeiro de 2007.

OLIVEIRA, C. P. O., AFONSO, M. M., SILVEIRA, K. C., ROCHA, S. A. **Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série através de Redes Neurais Artificiais**, XV SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão de Sistemas de Energia Elétrica, CIGRE-BRASIL, Foz do Iguaçu 15 a 18 de Março de 2022.

OLIVEIRA, J. J. **Proteção de Distância em LT com Compensação Série.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Julho de 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Sumário Executivo - PAR/PEL Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN 2022 – 2026.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<<http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes>>>

PAZ, M. C. R. **Contribuição para proteção de distância em linhas compensadas com dispositivos UPFC.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

PEREIRA, C. **Redes Elétricas no Domínio da Frequência - Técnicas de Análises, Modelos de Componentes, Técnicas Computacionais.** São Paulo, Artliber Editora LTDA, 2015.

RAMOS, E. P. P. S. **Proteção de Linha de Transmissão com Compensação Série Utilizando Relé Diferencial.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2014.

SALAZAR, P. D. P. **Monitoramento em tempo real da estabilidade de tensão usando redes neurais artificiais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo, 2018.

SANTOS, M. G.; GOMES, P.; MONTEATH, L.; LUIZ, J. C. F.; SCHILLING M. T.; FERREIRA, L. E. S.; MARTINS A. C. B.; MACEDO, N. J. P.; SILVA, I. J. **Interligação Note-Sul: Desafios, Problemas, Soluções e Perspectivas para a Operação Elétrica Integrada Nacional.** XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, Outubro de 1999.

SILVA, J. C. M. **Avaliação da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo com Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Goiás, 2020.

SILVA, V. E. C. **Análise da Característica MHO Dinâmica da Proteção de Distância de Linhas de Transmissão.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Dezembro de 2016.

SU, S.; DUAN, X.; ZENG, X. **ATP-Based Automated Fault Simulation.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 3, 2008.