



**AVALIAÇÃO DAS PROTEÇÕES DIFERENCIAL
TRANSVERSAL E DE DISTÂNCIA APLICADAS ÀS LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO**

VITOR RIBEIRO SERPA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DAS PROTEÇÕES DIFERENCIAL
TRANSVERSAL E DE DISTÂNCIA APLICADAS ÀS LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO**

VITOR RIBEIRO SERPA

ORIENTADOR: KLEBER MELO E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM - 754/20

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO - 2020

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DAS PROTEÇÕES DIFERENCIAL
TRANSVERSAL E DE DISTÂNCIA APLICADAS ÀS LINHAS
DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO**

VITOR RIBEIRO SERPA

Dissertação de mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre.

APROVADA POR:

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Oureste Elias Batista, D.Sc. (UFES)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 4 de dezembro de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

SERPA, VITOR RIBEIRO

Avaliação das Proteções Diferencial Transversal e de Distância Aplicadas às Linhas de Transmissão de Circuito Duplo. [Distrito Federal] 2020.

xiii, 86p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre em Engenharia Elétrica, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|--|--------------------------|
| 1. Proteção Diferencial Transversal | 2. Proteção de Distância |
| 3. Linhas de Transmissão de Circuito Duplo | 4. ATP |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SERPA, V. R. (2020). Avaliação das Proteções Diferencial Transversal e de Distância Aplicadas às Linhas de Transmissão de Circuito Duplo, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEEDM - 754/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vitor Ribeiro Serpa

TÍTULO: Avaliação das Proteções Diferencial Transversal e de Distância Aplicadas às Linhas de Transmissão de Circuito Duplo.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Vitor Ribeiro Serpa

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Silvio e Marta, pelo apoio e incentivo em todas as minhas decisões. Obrigado por todos os ensinamentos, pelo companheirismo e amor durante toda a minha trajetória.

Ao professor Kleber, por me orientar desde a iniciação científica no âmbito da graduação até o mestrado. Sou muito grato por ter me apresentado ao mundo da pesquisa e pelo conhecimento obtido ao longo destes 4 anos de orientação. Obrigado pela confiança e pela amizade.

Ao professor Felipe, pela disposição em ajudar todos os alunos do LAPSE no que fosse preciso.

Aos amigos de infância, Klaus, Gabriel Yoshimi, Gustavo Taffarel, Pedro Henrique Soares, e outros tão importantes quanto, por estarem sempre ao meu lado durante esta jornada. Sou grato pela amizade e pelos momentos vividos com vocês. Obrigado pelo companheirismo.

Aos meus amigos do LAPSE, Rodrigo Tenorio, João Vitor Leite, Tiago Honorato, Letícia Gama, Pedro Campos, Gustavo Cunha, Jônatas Costa, Eduardo Passos, dentre outros tão importantes quanto. Obrigado por todos os momentos vividos e pelas horas da resenha. Agradecimento especial a Tiago Honorato e João Vitor Leite, os quais participaram das pesquisas desenvolvidas durante o mestrado, por me incentivarem na pesquisa e contribuírem nas publicações e no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos da graduação da UnB, Renan Raeder, João Vitor Lemos, Rodrigo Rianelly, Ricardo Marra, Gustavo Carvalho, Matheus Morais, Pedro Caiafa, Fernando Pappas, Letícia Lima, Nathália Viana e outros tão importantes quanto. Obrigado pelos momentos vividos e pela amizade.

À Universidade de Brasília (UnB), por me fornecer todo o suporte para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À CAPES, pelo apoio financeiro aos trabalhos realizados ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado lida com a avaliação das proteções diferencial transversal e de distância aplicadas às linhas de transmissão de circuito duplo. Com o intuito de se avaliar o desempenho destes elementos de proteção, simulações computacionais e procedimentos experimentais foram realizados em sistemas modelados no *software* ATP (*Alternative Transients Program*). As simulações computacionais consistiram na análise da resposta em regime transitório de curto-circuito de cada elemento de proteção, além de análises de sensibilidade paramétrica, por meio da variação de parâmetros de falta e do sistema, baseando-se em grandezas de regime permanente. Para se avaliar o desempenho da proteção diferencial transversal experimentalmente, o algoritmo da proteção foi implementado em um relé comercialmente disponível e testado em um sistema real modelado do Sistema Interligado Nacional (SIN). O desempenho da proteção diferencial transversal foi comparado com o algoritmo de distância nativo do relé de proteção, por meio de uma metodologia de simulações em massa. Para isto, uma base de dados de curto-circuito foi reproduzida em um equipamento de testes de relés de proteção e estes elementos de proteção foram comparados por meio da análise de suas operações. De acordo com os resultados obtidos, é concluído que a proteção diferencial transversal é capaz de promover uma maior cobertura da linha no modo instantâneo quando comparada com a proteção de distância. Além disto, esta pode ser usada para se complementar os esquemas de proteção, especialmente durante falhas de comunicação.

Palavras-chave: Proteção Diferencial Transversal, Proteção de Distância, Linha de Transmissão de Circuito Duplo, ATP.

ABSTRACT

This master's dissertation deals with a performance evaluation of the cross-differential and distance protection applied to double-circuit transmission lines. In order to assess these protection elements performance, computational simulations and experimental procedures were carried out in systems modeled on ATP (Alternative Transients Program) software. The computational simulations consisted on analyzing the short-circuit transient response of each protection element and also sensitivity analyses through fault and system parameters variation, based on steady-state quantities. In order to evaluate the cross-differential protection experimentally, the protection algorithm was implemented in a commercially available relay and tested using a real modeled system of Brazilian Interconnected System. The cross-differential protection performance was compared with the relay's native distance element through a massive simulation scheme. To do so, a short-circuit database was reproduced by a protective relay test equipment and the protection elements were compared by the observations of their operation. According to obtained results, it is concluded that the cross-differential protection can provide a greater coverage of the line in the instantaneous mode when compared to distance protection. Furthermore, it can be used in order to complement the protection schemes, especially during communication loss.

Keywords: Cross-Differential Protection, Distance Protection, Double-Circuit Transmission Line, ATP.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Glossário	xiii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Publicações	4
1.5 Organização do Texto	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	6
Capítulo 3 – Fundamentação Teórica	11
3.1 Proteção de Sistemas Elétricos	11
3.2 Linhas de Transmissão de Circuito Duplo	12
3.2.1 Acoplamento mútuo	13
3.3 Fundamentos da Proteção Diferencial Transversal	16
3.3.1 Elemento Convencional	16
3.3.2 Elemento Percentual	17
3.3.3 Modos de Operação	18
3.3.4 Método das Correntes Sobrepostas	18
3.3.5 Plano Alfa	19
3.4 Fundamentos da Proteção de Distância	21
3.4.1 Determinação dos Valores Apropriados de Tensão e Corrente	22

3.4.1.1	Curto-circuito Trifásico	22
3.4.1.2	Curto-circuitos Bifásico e Bifásico para Terra Entre as Fases B e C	24
3.4.1.3	Curto-circuito monofásico na fase A	26
3.4.2	Unidades de Impedância	28
3.4.3	Zonas de Proteção	28
3.4.4	Diagrama de Impedâncias	30
3.4.5	Comparadores do relé de distância	30
3.4.5.1	Característica Mho Autopolarizada	31
3.4.6	Polarização por memória de tensão de sequência positiva	33
Capítulo 4 – Metodologia e Implementações		35
4.1	Sistemas de Potência Avaliados	35
4.1.1	Sistema-teste	36
4.1.2	Sistema real	37
4.2	Simulações Computacionais	38
4.3	Avaliações Experimentais	40
4.3.1	Relé SEL-411L	41
4.3.1.1	<i>SELOGIC Control Equation Programming</i>	41
4.3.2	Metodologia de Testes	42
Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados		45
5.1	Simulações Computacionais	45
5.1.1	Análise de regime transitório de curto-circuito	45
5.1.1.1	Caso 1 - Análise de um curto-circuito bifásico BC para terra aplicado em 50% do circuito 1	46
5.1.2	Análises de Sensibilidade Paramétrica	49
5.1.2.1	Caso 1 - Análise da variação da localização de falta para um curto-circuito trifásico franco aplicado no circuito 1	50
5.1.2.2	Caso 2 - Análise da variação da localização de falta para um curto-circuito monofásico franco aplicado no circuito 1	53
5.1.2.3	Caso 3 - Análise da variação da resistência de falta para um curto-circuito monofásico aplicado em 50% do circuito 1	56
5.1.2.4	Caso 4 - Análise da variação do carregamento para curto-circuito monofásico aplicado em 7% do circuito 1	59
5.1.2.5	Caso 5 - Análise da variação da força da fonte remota para curtos-circuitos monofásicos aplicados no circuito 1	62
5.2	Avaliações Experimentais	66

5.2.1	Caso 1 - Análise pontual de curto-circuito bifásico aplicado em 60% do circuito 1	67
5.2.2	Caso 2 - Análise em massa do tempo de atuação para curtos-circuitos monofásicos aplicados no circuito 1	69
5.2.3	Caso 3 - Análise em massa do tempo de atuação para curtos-circuitos <i>cross-country</i> aplicados na fase A do circuito 1 e fase C do circuito 2 . . .	74
	Capítulo 6 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	80
6.1	Propostas de Trabalhos Futuros	82
	Referências Bibliográficas	83

LISTA DE FIGURAS

3.1	Acoplamento mútuo entre circuitos.	13
3.2	Proteção diferencial transversal.	16
3.3	Plano alfa.	20
3.4	Proteção de distância.	21
3.5	Circuito de sequência para um curto-circuito trifásico.	22
3.6	Circuitos de sequência para um curto-circuito bifásico entre as fases B e C.	24
3.7	Circuitos de sequência para um curto-circuito bifásico para terra entre as fases B e C.	25
3.8	Circuito de sequência para um curto-circuito monofásico na fase A.	26
3.9	Zonas da proteção de distância.	29
3.10	Diagrama de Impedâncias.	30
3.11	Característica mho autopolarizada.	31
3.12	Característica mho autopolarizada - Grandezas de operação e polarização: (a) Falta interna (b) Limiar de atuação (c) Falta externa.	32
3.13	Característica mho polarizada - Grandezas de operação e polarização : (a) Falta direta (b) Falta reversa.	33
4.1	Sistema teste.	36
4.2	Localização do sistema real.	37
4.3	Sinais de tensão e corrente.	40
4.4	Visão geral das funções de proteção do relé SEL-411L.	41

4.5	Metodologia de testes.	43
5.1	Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	46
5.2	Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	47
5.3	Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	48
5.4	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	50
5.5	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	51
5.6	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	52
5.7	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	53
5.8	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	54
5.9	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	55
5.10	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	56

5.11	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	57
5.12	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	58
5.13	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	59
5.14	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	60
5.15	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	61
5.16	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	62
5.17	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.	64
5.18	Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.	65
5.19	Avaliação Experimental - Caso 1 - Oscilografia: (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	68
5.20	Avaliação Experimental - Caso 2 - Tempo de atuação em função da localização da falta - Curto-circuito monofásico AT franco: (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	69
5.21	Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	71

5.22	Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	71
5.23	Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	73
5.24	Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	73
5.25	Avaliação Experimental - Caso 3 - Tempo de atuação em função da localização da falta - Curto-circuito <i>cross-country</i> franco - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	75
5.26	Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	77
5.27	Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	77
5.28	Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	79
5.29	Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.	79

LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo das referências bibliográficas.	10
3.1	Unidades de impedância e sinais utilizados.	28
3.2	Unidades de impedância e tensões de polarização.	34
4.1	Tensões e correntes medidas pelos elementos de proteção.	40
5.1	Casos simulados na análise de sensibilidade paramétrica.	49
5.2	Atuações dos elementos de distância.	64
5.3	Atuações da proteção diferencial transversal.	66
5.4	Casos experimentais simulados.	67

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Operador de transformação de componentes simétricas.
β	Coefficiente do filtro de memória de tensão de sequência positiva.
$\Delta\bar{I}_1$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 1.
$\Delta\bar{I}_{1,L}$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 1 local.
$\Delta\bar{I}_{1,R}$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 1 remoto.
$\Delta\bar{I}_2$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 2.
$\Delta\bar{I}_{2,L}$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 2 local.
$\Delta\bar{I}_{2,R}$	Fasor de corrente sobreposta do circuito 2 remoto.
δ	Defasagem angular entre as barras local e remota.
I_{lim}	Limiar preestabelecido.
I_{op}	Corrente de operação.
I_{res}	Corrente de restrição.
I_{pickup}	Corrente de <i>pickup</i> .
\bar{I}_1	Fasor de corrente do circuito 1.
\bar{I}_2	Fasor de corrente do circuito 2.
$\bar{I}_{1,carga}$	Fasor de corrente de carga, ou pré-falta, do circuito 1.
$\bar{I}_{2,carga}$	Fasor de corrente de carga, ou pré-falta, do circuito 2.
$\bar{I}_{1,L}$	Fasor de corrente do circuito 1 local.
$\bar{I}_{1,R}$	Fasor de corrente do circuito 1 remoto.

$\bar{I}_{2,L}$	Fasor de corrente do circuito 2 local.
$\bar{I}_{2,R}$	Fasor de corrente do circuito 2 remoto.
\bar{I}_{0M}	Fasor de corrente de sequência zero do circuito paralelo.
\bar{I}_{R0}	Fasor de corrente de sequência zero lida pelo relé.
\bar{I}_{R1}	Fasor de corrente de sequência positiva lida pelo relé.
\bar{I}_{R2}	Fasor de corrente de sequência negativa lida pelo relé.
\bar{I}_{Ra}	Fasor de corrente da fase A lida pelo relé.
\bar{I}_{Rb}	Fasor de corrente da fase B lida pelo relé.
\bar{I}_{Rc}	Fasor de corrente da fase C lida pelo relé.
K	Ajuste de sensibilidade da proteção diferencial transversal percentual.
K_0	Fator de compensação de sequência zero.
K_{0M}	Fator de compensação de acoplamento mútuo de sequência zero entre circuitos.
L	Constante de tempo de decaimento.
M	Coeficiente no plano alfa.
$M_{1,L}$	Coeficiente no plano alfa - Elemento local do circuito 1.
$M_{2,L}$	Coeficiente no plano alfa - Elemento local do circuito 2.
$M_{1,R}$	Coeficiente no plano alfa - Elemento remoto do circuito 1.
$M_{2,R}$	Coeficiente no plano alfa - Elemento remoto do circuito 2.
m	Localização da falta em p.u. do comprimento do circuito.
N	Taxa de amostragem em amostras/ciclo.
φ	Saída do comparador de fase da característica mho.
R_f	Resistência de falta.
SIR_L	<i>Source-to-Line Impedance Ratio</i> local.
SIR_R	<i>Source-to-Line Impedance Ratio</i> remota.

\bar{V}_{0M}	Fasor de tensão de sequência zero induzida pelo acoplamento entre circuitos.
\bar{V}_{F0}	Fasor de tensão de sequência zero no ponto da falta.
\bar{V}_{F1}	Fasor de tensão de sequência positiva no ponto da falta.
\bar{V}_{F2}	Fasor de tensão de sequência negativa no ponto da falta.
\bar{V}_{R0}	Fasor de tensão de sequência zero lida pelo relé.
\bar{V}_{R1}	Fasor de tensão de sequência positiva lida pelo relé.
\bar{V}_{R2}	Fasor de tensão de sequência negativa lida pelo relé.
\bar{V}_{Ra}	Fasor de tensão da fase A lida pelo relé.
\bar{V}_{Rb}	Fasor de tensão da fase B lida pelo relé.
\bar{V}_{Rc}	Fasor de tensão da fase C lida pelo relé.
\bar{V}_{op}	Fasor de tensão de operação.
\bar{V}_{pol}	Fasor de tensão de polarização.
$\bar{V}_{R1,mem}$	Fasor de tensão de memória de sequência positiva.
Z_{012}	Matriz de impedâncias de sequência.
Z_{0M}	Impedância de acoplamento mútuo de sequência zero.
Z_{abc}	Matriz de impedâncias de fase.
Z_{AT}	Unidade de impedância de terra que engloba a fase A.
$Z_{AT,L}$	Unidade de impedância local de terra que engloba a fase A.
$Z_{AT,R}$	Unidade de impedância remota de terra que engloba a fase A.
Z_{BT}	Unidade de impedância de terra que engloba a fase B.
Z_{CT}	Unidade de impedância de terra que engloba a fase C.
Z_{AB}	Unidade de impedância de fase que engloba as fases A e B.
Z_{BC}	Unidade de impedância de fase que engloba as fases B e C.
$Z_{BC,L}$	Unidade de impedância local de fase que engloba as fases B e C.

$Z_{BC,R}$	Unidade de impedância remota de fase que engloba as fases B e C.
Z_{CA}	Unidade de impedância de fase que engloba as fases C e A.
Z_{L0}	Impedância de sequência zero do circuito.
Z_{L1}	Impedância de sequência positiva do circuito.
Z_{L2}	Impedância de sequência negativa do circuito.
$Z_{Local,0}$	Equivalente local de sequência zero do sistema.
$Z_{Local,1}$	Equivalente local de sequência positiva do sistema.
$Z_{Local,2}$	Equivalente local de sequência negativa do sistema.
Z_A	Impedância de alcance.
Z_{op}	Impedância de operação.
Z_{pol}	Impedância polarização.
Z_R	Impedância medida.
Z_s	Impedância própria.
Z_m	Impedância mútua entre os condutores de um circuito específico.
Z_p	Impedância de acoplamento entre circuitos .
Z_G	Parâmetro de modo terra .
Z_L	Parâmetro de modo aéreo .
Z_{IL}	Parâmetro de modo associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos.
$Z_{Remoto,0}$	Equivalente remoto de sequência zero do sistema.
$Z_{Remoto,1}$	Equivalente remoto de sequência positiva do sistema.
$Z_{Remoto,2}$	Equivalente remoto de sequência negativa do sistema.

GLOSSÁRIO

21	<i>Proteção de Distância</i>
87L	<i>Proteção Diferencial Longitudinal</i>
87LT	<i>Proteção Diferencial Transversal</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
SIR	<i>Source-to-Line Impedance Ratio</i>
TC	<i>Transformador de Corrente</i>
TPC	<i>Transformador de Potencial Capacitivo</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
UnB	<i>Universidade de Brasília</i>

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O desenvolvimento da sociedade moderna, tanto no contexto social quanto econômico, tem relação direta com a disponibilidade de uma fonte confiável e eficiente de energia elétrica. Aplicações em inúmeros setores, como comunicações, transportes, indústria, dentre outros, necessitam constantemente de uma fonte de energia elétrica contínua e de qualidade para permanecerem em suas condições operativas. De fato, um dos fatores determinantes para se indicar o desenvolvimento e a qualidade de vida de uma sociedade está relacionado com a disponibilidade de energia, visto que esta é responsável por proporcionar suporte mecânico, térmico e elétrico para o exercício das atividades humanas (ANEEL, 2008; PAITHANKAR; BHIDE, 2011).

Devido à crescente demanda pelo fornecimento de energia elétrica pela sociedade, sistemas elétricos de potência complexos foram construídos para suprir tal demanda em níveis de confiança, qualidade e segurança ideais para os consumidores. Contudo, o planejamento, construção e operação de tais sistemas também são igualmente complexos, além de estarem sujeitos a diversos pontos de falha (GERS; HOLMES, 2004; ANDERSON; FOUAD, 2008).

Dentre os elementos integrantes do sistema elétrico de potência, as linhas de transmissão têm papel fundamental, uma vez que estas são responsáveis por interligar centros de geração aos de consumo. Considerando-se esta demanda no Brasil por energia elétrica e a diversidade de sistemas de geração existentes no país, foi desenvolvido o Sistema Interligado Nacional (SIN). Este sistema é composto por uma grande malha de transmissão, responsável pela interligação dos subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte, e também pela integração de diversas fontes hidro-termo-eólicas de grande porte ¹. O SIN é coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o qual é responsável pela coordenação e

¹Informação extraída de <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em 04/11/2020.

controle da operação da geração e transmissão de energia elétrica, além do planejamento da operação dos sistemas isolados do país ².

Dentre as topologias de linhas de transmissão usuais, destacam-se as linhas de transmissão de circuito duplo. Este modelo de linha é capaz de proporcionar uma maior capacidade de transferência de potência, aliada ao compartilhamento das mesmas torres de transmissão e faixa de servidão, sendo amplamente utilizada em redes de transmissão devido às suas vantagens econômicas e ambientais em relação às linhas de transmissão de circuitos simples (BO *et al.*, 2003; SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

As linhas de transmissão, no geral, estão sujeitas a uma maior probabilidade de ocorrências de curtos-circuitos quando comparadas com outros elementos do sistema elétrico de potência, devido a sua maior exposição aos agentes externos, como as condições climáticas e a influência da vegetação. Por conta disto, sistemas capazes de preservar os elementos presentes devem ser desenvolvidos, com o intuito de se evitar discontinuidades na transmissão de energia elétrica. Estes sistemas são reconhecidos como sistemas de proteção (PAITHANKAR; BHIDE, 2011).

No que concerne às linhas de transmissão de circuito duplo, é de conhecimento que a proximidade entre os circuitos, além da presença do acoplamento de sequência zero e a probabilidade de ocorrências de faltas inter-circuitos, proporciona aspectos desafiadores para o engenheiro de proteção, de tal forma que algumas funções de proteção têm seu desempenho comprometido (SPOOR; ZHU, 2005; APOSTOLOV *et al.*, 2007; SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

No que se refere aos esquemas de proteção atualmente utilizados nas linhas de transmissão de circuito duplo, pode-se citar o uso da proteção diferencial longitudinal, denominada pelo código ANSI 87L, associada ao uso da função de distância, reconhecida pelo código ANSI 21, como função de *backup*. Contudo, o uso da proteção diferencial longitudinal e de esquemas de teleproteção requer o uso de canais de comunicação, o que se reflete em um aumento de custos e complexidade do esquema de proteção. Portanto, o uso de uma função de proteção que não necessite de canais de comunicação é benéfico para o esquema de proteção (BO *et al.*, 2003).

Portanto, a proteção diferencial transversal mostra-se como uma solução viável para aplicações em linhas de transmissão de circuito duplo, visto que esta função de proteção não depende de canais de comunicação. Seu princípio básico está baseado na comparação das magnitudes

²Informação extraída de <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em 04/11/2020.

das correntes de determinado terminal da linha de circuito duplo. Caso a diferença entre as magnitudes seja maior que um limiar preestabelecido, uma falta é declarada (WANG *et al.*, 2005a).

1.2 MOTIVAÇÃO

Como as linhas de transmissão de circuito duplo são amplamente utilizadas nos sistemas elétricos de potência, devido às suas vantagens supracitadas, estudos acerca das filosofias de proteção utilizadas nestas topologias de linha são importantes, com o intuito de proteger os equipamentos do sistema.

Contudo, sabe-se que mesmo utilizando-se a função diferencial longitudinal, durante perdas de comunicação, a linha deve ser protegida por funções de proteção que não necessitem do uso deste recurso. Portanto, análises acerca de funções de proteção baseadas em um terminal são importantes.

Neste sentido, esta dissertação avalia o desempenho de duas funções de proteção baseadas em um terminal, as proteções diferencial transversal e de distância.

Entretanto, como a proteção diferencial transversal não está disponível comercialmente em relés de proteção, este trabalho também aborda os resultados de sua implementação, através do uso de relés de proteção comerciais.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho da proteção diferencial transversal em relação à função de distância, quando aplicadas às linhas de transmissão de circuito duplo. Como estas funções podem operar sem uso de canais de comunicação, um entendimento acerca do desempenho destes elementos é importante para se complementar os esquemas de proteção, principalmente durante situações de falhas de comunicação.

Com o intuito de se realizar esta avaliação, análises computacionais e implementações em relés comerciais foram realizadas, como forma de validar o desempenho destas funções de proteção.

Por conta disto, são estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Apresentar os fundamentos das proteções diferencial transversal e de distância;
- Realizar a implementação dos algoritmos de proteção computacionalmente;
- Realizar a modelagem de linhas de transmissão de circuito duplo através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*);
- Analisar computacionalmente o comportamento das proteções diferencial transversal e de distância através de análises transitórias e de sensibilidade paramétrica;
- Implementar o algoritmo da proteção diferencial transversal em um relé de proteção;
- Realizar análises da função diferencial transversal implementada no relé com a função de distância nativa do dispositivo;

1.4 PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos para elaboração desta dissertação proporcionaram as publicações dos artigos citados abaixo:

- (Aceito) SERPA, V. R., HONORATO, T. R., PEDROSA, J. V. L., SILVA, K. M.; Avaliação Comparativa do Desempenho da Proteção Diferencial Transversal Perante o das Funções de Distância e Diferencial Longitudinal quando Aplicadas às Linhas de Transmissão de Circuito Duplo. XV Seminário Técnico de Proteção e Controle (XV STPC), Rio de Janeiro - RJ, 2021.
- SERPA, V. R., HONORATO, T. R., SILVA, K. M.; *Evaluation of Cross-Differential Protection Applied to Double-Circuit Transmission Lines Under Inter-Circuit Faults*. VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020), Santo André-SP (Online), 2020.
- SERPA, V. R., HONORATO, T. R., PEDROSA, J. V. L., SILVA, K. M., LOPES, F.V.; *Experimental Evaluation of Cross-Differential Protection Applied to Series-Compensated Double-Circuit Lines*. *The 15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP-2020)*, Liverpool-UK, 2020.
- SERPA, V. R., HONORATO, T. R., SILVA, K. M., NEVES, E. T.; Avaliação Experimental da Função Diferencial Transversal Aplicada na Proteção de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo. XVIII Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguaçu-PR, 2019.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Com o intuito de se cumprir os objetivos propostos , este trabalho é estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito das proteções diferencial transversal e de distância aplicadas em linhas de transmissão de circuito duplo;
- No Capítulo 3, são apresentadas as fundamentações teóricas acerca das proteções diferencial transversal e de distância;
- No Capítulo 4, são apresentadas as metodologias e desenvolvimentos realizados para avaliação das duas funções de proteção;
- No Capítulo 5, são apresentados os resultados e análises provenientes das simulações computacionais e dos procedimentos experimentais;
- No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e propostas para futuros trabalhos envolvendo os assuntos citados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos desenvolvimentos e análises das proteções diferencial transversal e de distância, além de outros algoritmos aplicados em linhas de transmissão de circuito duplo, apresentando também as problemáticas e as soluções relatadas por cada trabalho.

Phadke & Jihuang (1985) propõem uma proteção de distância integrada a qual substitui as unidades de fase e de terra da proteção de distância convencional, além de ser capaz de promover uma decisão segura acerca das fases afetadas durante faltas simultâneas. A proteção de distância convencional é afetada quando da ocorrência de faltas inter-circuitos envolvendo uma fase de um circuito e outra fase do circuito paralelo, de tal forma que elementos convencionais de fase do relé podem detectar a falta e emitir uma atuação tripolar. O esquema de proteção proposto considera os seis condutores no ponto de vista da proteção de distância, além de ser facilmente realizável em dispositivos digitais. A metodologia aplicada considera um relé de distância de dois estágios. O primeiro usa as correntes de um circuito único e uma média das magnitudes das correntes do circuito vizinho. Já o segundo estágio considera os dois circuitos como um sistema integrado. A identificação da fase defeituosa é seguida por uma unidade direcional, a qual determina a direção da falta por meio da comparação da direção da corrente e tensão de sequência positiva. Após este procedimento, a respectiva lógica da proteção de distância é realizada. O algoritmo proposto é capaz de selecionar e atuar somente nas fases afetadas para todos os tipos de falta. Além disto, a implementação em *hardware* resultou em tempos de operação entre meio ciclo e um ciclo.

Gilany *et al.* (1992) apresenta um esquema de proteção aplicado a linhas de transmissão paralelas por meio do uso de um único relé em cada terminal. O esquema de proteção adota um método recursivo baseado no cálculo de uma medida proporcional à média das amostras de corrente, denominado de componente médio, o qual é obtido através do somatório das

magnitudes das amostras em cada ciclo. Como componentes de alta frequência podem causar erros na comparação entre as correntes dos dois circuitos, é utilizado um filtro de *Butterworth* nas amostras com intuito de reduzir a influência das componentes de alta frequência. O valor do componente médio em cada fase de um circuito é comparado com o circuito paralelo para a fase correspondente. Para se detectar a falta, a diferença entre os componentes médios do circuito defeituoso e o paralelo deve ultrapassar um limiar pré-estabelecido, além do componente médio ser superior a um segundo limiar. Para se avaliar o desempenho, um sistema modelado no programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) foi analisado. De acordo com os resultados, a solução proposta é estável perante condições de chaveamento, além de promover atuações em torno de 5 ms.

Jongepier & Sluis (1994) apresentam uma proteção de distância adaptativa aplicada a linhas de transmissão de circuito duplo. Devido ao fato de não ser possível se calcular todos os possíveis estados do sistema, um conjunto de situações deve ser simulada, e um controlador interpolador deve ser adicionado ao relé. A impedância de ajuste é calculada de acordo com a impedância da linha, do alcance desejado e de um fator de correção de acoplamento mútuo considerando-se o comportamento dinâmico do sistema, o qual é dependente da corrente lida no circuito paralelo. Para se calcular esta corrente no circuito paralelo, utilizam-se os equivalentes de *Thévenin* do sistema para os diferentes estados, estimados por meio de medições de fluxos de carga e simulações realizadas para as diversas configurações do sistema. Com estes valores estimados, calcula-se o novo ajuste de impedância, dependente destas estimativas. Para se avaliar o desempenho do algoritmo, um sistema de 440 kV foi utilizado. De acordo com o trabalho, por meio da estimativa das impedâncias de sequência zero dos equivalentes de *Thévenin*, é possível operar com uma maior precisão e promover uma proteção mais seletiva e confiável.

Eissa & Malik (1996) apresentam um novo elemento diferencial transversal direcional, baseado em elementos incrementais de corrente, como meio de melhorar o desempenho da proteção sem prejudicar as vantagens do esquema convencional da proteção diferencial transversal. A técnica sugerida evita o sinal de tensão utilizado nos relés convencionais, desta forma evitando o colapso na tensão que ocorre para faltas perto da localização do relé. A metodologia utilizada é baseada apenas nos sinais de correntes e os atributos dos esquemas direcionais. A técnica adotada é explicada através da análise de dois componentes principais, o primeiro definido como

um elemento de partida e um elemento diferencial. O elemento de partida, considerado como o primeiro passo de operação do relé, é acionado quando a magnitude da corrente de pós-falta excede a magnitude da corrente de pré-falta por um limite especificado, sendo realizada através da análise de um conjunto consecutivo de amostras. Já o elemento diferencial atua após o elemento de partida e diferencia faltas internas e externas, sendo realizado pela comparação do desvio de sinal de corrente, de tal forma que o circuito com maior desvio do sinal de corrente corresponde ao circuito defeituoso. Nesta formulação, é utilizado um sinal diferencial de corrente de falta, definido como o somatório das diferenças das magnitudes para cada desvio de sinal de corrente, realizado entre os dois circuitos até a amostra mais recente. Com isto, a identificação do circuito defeituoso é determinado por este elemento direcional, responsável por determinar a direção do fluxo de corrente durante a falta.

Wang *et al.* (2005a) apresentam o uso da proteção diferencial transversal percentual com o intuito de se melhorar o desempenho da proteção diferencial transversal. Os autores citam que os ajustes da proteção diferencial transversal convencional devem ser ajustados para valores significativamente altos, devido a fatores ligados ao desbalanço de corrente para faltas externas, a máxima corrente de carga durante operação de circuito único, e a corrente diferencial na fase sã durante uma falta fase-terra no modo de operação sucessiva. Estas condições acabam por reduzir a sensibilidade da proteção, o que acaba por reduzir a zona de operação instantânea. Devido a esses fatores, os autores sugerem o uso do método percentual como forma de se melhorar o desempenho da proteção. Os autores também apresentam outros elementos com o intuito de se melhorar a estabilidade do elemento diferencial transversal percentual. O primeiro deles, denominado elemento de partida de tensão, conta com elementos de sobretensão de sequência negativa e elementos de subtensão fase-fase, responsáveis por se melhorar a segurança do relé perante condições de circuito aberto. Com o intuito de se garantir a segurança para faltas no modo sucessivo nas fases sãs, são utilizados seletores de fase e elementos de bloqueio. Para analisar o desempenho da função diferencial transversal, os autores realizam simulações utilizando o *software* EMTP e também é avaliada a função por meio do dispositivo RTDS (*Real Time Digital System Simulator*), com a técnica implementada no relé AREVA MiCOM, assim como também apresentado em Wang *et al.* (2005c). De acordo com os resultados, o relé percentual apresentou uma melhora no desempenho, não somente no aumento da zona de operação instantânea, mas como na melhora da sensibilidade para faltas internas e também da

estabilidade para faltas externas.

Wang *et al.* (2005b) apresentam o método incremental das correntes, conhecido como método das correntes sobrepostas, aplicado na proteção diferencial transversal percentual. Esta metodologia utilizada consiste no cálculo das correntes sobrepostas, as quais são os fasores de corrente lidos subtraídos dos respectivos fasores de corrente de carga, ou pré-falta. De acordo com os autores, esta técnica é capaz de melhorar o desempenho da proteção diferencial transversal perante a influência da corrente de carga e da força das fontes, de tal forma a operar corretamente principalmente em terminais com reduzida contribuição de curto-circuito, visto que para estes terminais, as correntes totais de falta dos dois circuitos tendem a ter magnitudes mais próximas do que quando comparadas com terminais fortes. Para avaliar o desempenho do método das correntes sobrepostas, foram realizadas simulações no *software* EMTP em um sistema de 400 km de extensão e 500 kV de tensão nominal, realizando-se também a comparação com o método convencional. De acordo com os resultados, é concluído que o método das correntes sobrepostas é capaz de ser mais sensível e também operar corretamente tanto em fontes fracas quanto fortes, além de ser capaz de garantir uma operação rápida e segura para diversas configurações de falta e do sistema.

Sanaye-Pasand & Jafarian (2011) introduzem um algoritmo de proteção baseado no diagrama de estados para proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, através da combinação das funções diferencial transversal e algoritmos baseados em impedância, por meio do uso de informações obtidas no terminal em análise. Para isto, é proposto o uso de uma nova técnica envolvendo a proteção diferencial transversal, por meio da comparação das correntes das respectivas fases de cada circuito constituinte da linha de transmissão de circuito duplo, realizada em um espaço bidimensional, o qual é separado em seis áreas capazes de cobrir todos os possíveis estados de operação da linha de circuito duplo. O algoritmo baseado em impedância é supervisionado pela proteção diferencial transversal e adequadamente compensa o efeito do acoplamento mútuo considerando-se a condição operativa da linha de transmissão. Como forma de validar o desempenho do algoritmo proposto, uma vasta quantidade de simulações foi realizada por meio do *software* PSCAD/EMTDC. Por meio dos resultados encontrados, foi mostrado que o algoritmo proposto é capaz de classificar corretamente as fases defeituosas, além de operar em menos de um ciclo, graças à alta sensibilidade da proteção diferencial transversal.

Borges (2014) apresenta a análise da proteção diferencial transversal aplicada em linhas de transmissão de circuito duplo. Por meio da representação nos planos operacional e alfa, é apresentado o desempenho da proteção diferencial transversal através do uso do método das correntes sobrepostas perante análises transitórias e de sensibilidade paramétrica. As simulações foram realizadas em uma linha de transmissão de circuito duplo modelada no *software* ATP. De acordo com os resultados, é concluído que a proteção diferencial transversal possui boa sensibilidade quando os dois circuitos estão em operação.

Neves (2019) apresenta a análise das proteções diferencial longitudinal e transversal aplicadas às linhas de transmissão de circuito duplo. Por meio do uso do plano alfa, são analisadas as proteções por meio de um sistema modelado no *software* ATP. Os desempenhos dos elementos de proteção são avaliados por meio de análises transitórias e análises de sensibilidade paramétrica. É também realizado o mapeamento das características de restrição no plano alfa, por meio das correntes de operação e restrição.

A tabela com o resumo das referências descritas são apresentadas abaixo:

Tabela 2.1. Resumo das referências bibliográficas.

Referência	Conteúdo			
	21	87LT	87L	ADR
Phadke & Jihuang (1985)	✓	—	—	—
Gilany <i>et al.</i> (1992)	—	✓	—	—
Jongepier & Sluis (1994)	✓	—	—	—
Eissa & Malik (1996)	—	✓	—	—
Wang <i>et al.</i> (2005a)	—	✓	—	✓
Wang <i>et al.</i> (2005b)	—	✓	—	—
Wang <i>et al.</i> (2005c)	—	✓	—	✓
Sanaye-Pasand & Jafarian (2011)	✓	✓	—	—
Borges (2014)	—	✓	—	—
Neves (2019)	—	✓	✓	—

Legenda:

21: Proteção de Distância

87LT: Proteção Diferencial Transversal

87L: Proteção Diferencial Longitudinal

ADR: Avaliação em Dispositivo Real

Fonte: Autoria Própria.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

O capital investido em sistemas elétricos de potência nos âmbitos da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica torna imprescindível a adoção de medidas preventivas, não somente com o intuito de garantir a operação dos equipamentos próximos de suas eficiências ótimas, mas também para que estes dispositivos estejam protegidos das adversidades presentes no sistema (WARRINGTON, 2012). Neste cenário, os sistemas de proteção tem papel fundamental, visto que estes são responsáveis por promover a integridade dos componentes do sistema elétrico.

De acordo com Mason (1956), a função do relé de proteção é promover a remoção imediata, através da coordenação de disjuntores, de elementos do sistema elétrico submetidos a curtos-circuitos ou operações anormais, os quais podem acarretar em danos ou interferir na operação do resto do sistema.

Alguns dos conceitos básicos relacionados aos sistemas de proteção são indicados abaixo (ANDERSON, 1999 apud SILVA, 2009):

- **Confiabilidade:** Probabilidade do sistema atuar corretamente quando exigido;
- **Segurança:** Capacidade do sistema em evitar operações impróprias;
- **Sensibilidade:** Eficiência na detecção das diversas anomalias do sistema;
- **Seletividade:** Propriedade do sistema de proteção em operar somente para os equipamentos afetados, executando a menor quantidade de desconexões possíveis;
- **Velocidade:** Característica do sistema em operar no menor tempo possível, evitando assim danos aos equipamentos;
- **Coordenação:** Configuração do sistema de proteção por meio de ajustes gradativos realizados para se garantir a seletividade da proteção;

- **Economia:** Princípio da implementação do esquema de proteção mais eficiente associado ao menor custo possível;
- **Simplicidade:** Uso da menor quantidade de equipamentos para execução do esquema de proteção;

Portanto, por meio da compreensão do papel e dos conceitos básicos a respeito da proteção de sistemas elétricos, são apresentadas a seguir as características básicas relacionadas às linhas de transmissão de circuito duplo, bem como o embasamento teórico das proteções diferencial transversal e de distância.

3.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO

As linhas de transmissão de circuito duplo têm sido amplamente utilizadas nas redes de transmissão, em razão da sua alta capacidade de transferência de potência, disponibilidade e o compartilhamento da mesma faixa de servidão (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

As linhas de circuito duplo podem ter diferentes configurações, a depender das conexões em seus terminais. De acordo com Apostolov *et al.* (2007), pode-se citar as seguintes configurações:

- Os circuitos compartilham dos mesmos barramentos em ambos terminais da linha;
- Os circuitos compartilham do mesmo barramento somente em um terminal;
- Os circuitos não compartilham dos mesmos barramentos em nenhum dos terminais;

Além disto, a configuração ainda pode se tornar mais desafiadora quando os circuitos estão operando em níveis de tensão diferentes. Por conta disto, Apostolov *et al.* (2007) citam os seguintes cenários:

- Os circuitos estão conectados na mesma subestação nos dois terminais da linha;
- Os circuitos estão conectados na mesma subestação somente em um dos terminais;
- Os circuitos não estão conectados na mesma subestação em nenhum dos terminais;

A característica principal desta topologia de linha é relacionada à presença do acoplamento mútuo de sequência zero entre circuitos, o que faz com que a proteção desta topologia de linha se torne um aspecto desafiador ao engenheiro de proteção (APOSTOLOV *et al.*, 2007; SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

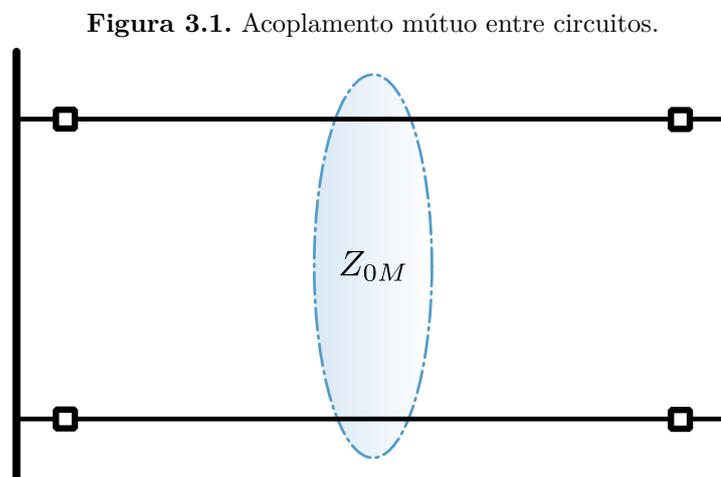
Além disto, devido à proximidade entre os circuitos, a probabilidade de ocorrência de faltas entre circuitos é maior. Mesmo o curto-circuito *cross-country*, o qual consiste em curtos-circuitos monofásicos que ocorrem em circuitos distintos e/ou localizações distintas, sendo a modalidade mais comum de falta entre circuitos, a ocorrência de faltas entre circuitos que não envolvam a terra gera correntes de sequência zero que não fluem externamente aos barramentos da linha, comprometendo o funcionamento de algumas funções de proteção (COOK, 1977; SPOOR; ZHU, 2005).

Portanto, como meio de se obter um entendimento a respeito do acoplamento mútuo de sequência zero em linhas de transmissão de circuito duplo, o equacionamento de tal efeito é apresentado a seguir.

3.2.1 Acoplamento mútuo

Linhas de transmissão que operam paralelamente umas as outras, denominadas neste trabalho por circuitos, são afetadas por impedâncias mútuas, as quais são responsáveis por modificar os perfis de tensão e corrente lidos pelos relés de proteção instalados em cada terminal (CALLERO, 2007).

O acoplamento magnético mútuo, apresentado na Figura 3.1, influencia principalmente as redes de sequência zero, afetando desta forma elementos direcionais de sobrecorrente de terra e elementos de distância de terra, os quais respondem a grandezas de sequência zero (TZIOUVARAS *et al.*, 2014).



Fonte: Adaptado de Tziouvaras *et al.* (2014).

O fluxo vinculado ao circuito paralelo pode ser significativo, e sua magnitude é inversamente proporcional à distância entre os condutores. Com isto, a corrente de sequência zero que flui em um dos circuitos induz uma tensão de sequência zero no circuito paralelo (TZIOUVARAS *et al.*, 2014).

Para qualquer arranjo de condutores de uma linha de circuito duplo, a matriz de impedâncias de fase (Z_{abc}) é dada por (CALERO, 2007):

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} & Z_{aa'} & Z_{ab'} & Z_{c'a} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{ba'} & Z_{bb'} & Z_{bc'} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} & Z_{ca'} & Z_{b'c} & Z_{cc'} \\ Z_{aa'} & Z_{a'b} & Z_{ca'} & Z_{a'a'} & Z_{a'b'} & Z_{c'a'} \\ Z_{ab'} & Z_{bb'} & Z_{b'c} & Z_{a'b'} & Z_{b'b'} & Z_{b'c'} \\ Z_{c'a} & Z_{bc'} & Z_{cc'} & Z_{c'a'} & Z_{b'c'} & Z_{c'c'} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

em que Z_{ii} representa a impedância própria de fase, enquanto Z_{ij} representa a impedância mútua entre as fases i e j . As fases A, B e C do circuito 1 são representadas pelos subscritos a , b e c respectivamente, enquanto as fases A, B e C do circuito 2 são representadas por meio de a' , b' e c' (CARSON, 1926).

A relação entre tensões e correntes de fase é dada por meio da seguinte expressão (CALERO, 2007):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{abc} \\ \bar{V}_{abc'} \end{bmatrix} = Z_{abc} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{abc} \\ \bar{I}_{abc'} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

sendo \bar{V}_{abc} e \bar{I}_{abc} as matrizes de tensão e corrente de fase do circuito 1, e $\bar{V}_{abc'}$ e $\bar{I}_{abc'}$ as matrizes de tensão e corrente de fase do circuito 2.

A formulação da transformação das grandezas do domínio de fase para as correspondentes grandezas no domínio das componentes de sequência é apresentada pela seguinte expressão (CALERO, 2007; TZIOUVARAS *et al.*, 2014):

$$\begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{012} \\ \bar{V}_{012'} \end{bmatrix} = Z_{abc} \cdot \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{012} \\ \bar{I}_{012'} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

sendo \bar{V}_{012} e \bar{I}_{012} as matrizes de tensão e corrente de sequência do circuito 1, e $\bar{V}_{012'}$ e $\bar{I}_{012'}$ as matrizes de tensão e corrente de sequência do circuito 2. Já a matriz A e $[0]$ são dadas por (CALERO, 2007; TZIOUVARAS *et al.*, 2014):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad [0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

sendo o parâmetro a definido como o operador de transformação de componentes simétricas, representado por:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (3.5)$$

Por meio da manipulação matemática, a matriz de tensões de sequência pode ser representada por:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{012} \\ \bar{V}_{012'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix}^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{012} \\ \bar{I}_{012'} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Portanto, (3.6) pode ser representado por:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{012} \\ \bar{V}_{012'} \end{bmatrix} = Z_{012} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{012} \\ \bar{I}_{012'} \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

onde Z_{012} é a matriz de impedâncias de componentes de sequência, dada por meio da seguinte expressão:

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix}^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

O objetivo da transposição da linha é eliminar os termos de acoplamento mútuo da matriz de impedâncias de sequência. Com a transposição total da linha, os acoplamentos de sequências negativa e positiva podem ser removidos. Entretanto, ainda resta o acoplamento de sequência zero entre os circuitos, representado pelo parâmetro Z_{0M} , como é possível ver por meio da matriz de impedâncias de componentes de sequência apresentada a seguir (CALERO, 2007; TZIOUVARAS *et al.*, 2014):

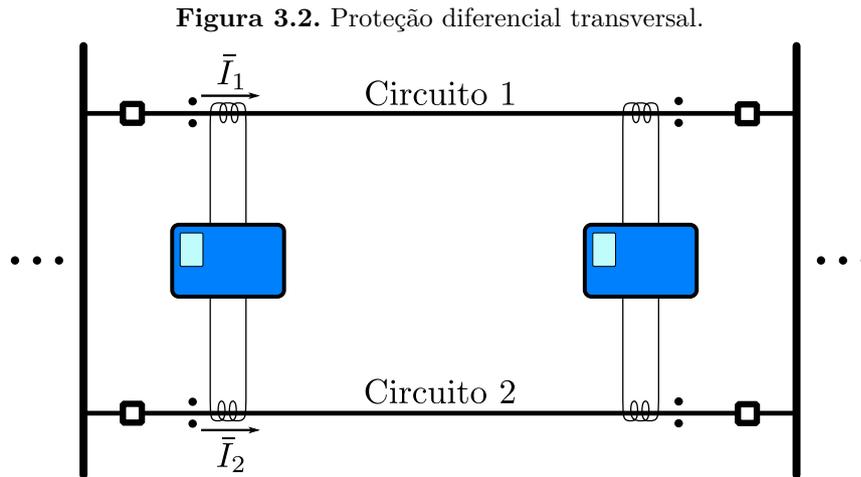
$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_{00} & 0 & 0 & Z_{0M} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{22} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{0M} & 0 & 0 & Z_{00'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{11'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{22'} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

em que Z_{00} , Z_{11} e Z_{22} representam as impedâncias próprias de sequência zero, positiva e negativa do circuito 1 respectivamente, enquanto $Z_{00'}$, $Z_{11'}$ e $Z_{22'}$ representam as impedâncias próprias de sequência zero, positiva e negativa do circuito 2. Já o parâmetro Z_{0M} representa a impedância mútua de sequência zero entre os circuitos.

Portanto, a corrente de sequência zero no circuito paralelo faz com que seja induzida uma tensão de sequência zero no circuito de referência, o que pode comprometer o desempenho de algumas funções de proteção.

3.3 FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL TRANSVERSAL

A proteção diferencial transversal ou cruzada, nomeada pelo código 87LT, é uma função de proteção baseada em um terminal. Sua fundamentação está baseada na comparação das amplitudes dos sinais de corrente dos dois circuitos, lidos em um terminal da linha de circuito duplo (WANG *et al.*, 2005a).



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2005a).

O princípio de funcionamento do elemento diferencial transversal consiste em dois elementos conhecidos, o elemento convencional e o percentual (WANG *et al.*, 2005a). Estes elementos são descritos a seguir.

3.3.1 Elemento Convencional

O elemento convencional da proteção diferencial transversal é baseado na comparação das magnitudes dos fasores de corrente dos dois circuitos. As condições de operação do elemento diferencial transversal convencional para os circuitos 1 e 2 são apresentadas em (3.10) e (3.11) respectivamente (WANG *et al.*, 2005a; WANG *et al.*, 2005b).

$$|\bar{I}_1| - |\bar{I}_2| > I_{lim}, \quad (3.10)$$

$$|\bar{I}_2| - |\bar{I}_1| > I_{lim}, \quad (3.11)$$

em que \bar{I}_1 representa o fasor de corrente obtido para determinada fase no circuito 1 e \bar{I}_2 representa o fasor de corrente referente ao circuito 2, enquanto I_{lim} representa um limiar de

operação preestabelecido.

Durante condições normais de operação, as grandezas elétricas são semelhantes, sendo diferentes durante faltas internas, de tal maneira que (3.10) ou (3.11) podem ser satisfeitas e a falta interna pode ser detectada (WANG *et al.*, 2005a; WANG *et al.*, 2005b).

Todavia, o valor da grandeza de operação I_{lim} deve ser maior que os valores das correntes diferenciais quando submetidas às seguintes condições (WANG *et al.*, 2005a):

- Corrente de desequilíbrio durante faltas externas;
- Máxima corrente de carga durante operação de circuito único;
- Corrente diferencial da fase sã para faltas fase-terra na zona de operação sucessiva;

Devido a estes requisitos, o valor da grandeza I_{lim} deve ser selecionado para valores elevados, o que acaba por reduzir a sensibilidade do relé de proteção, fazendo com que uma maior quantidade de faltas seja eliminada por meio da operação sucessiva (WANG *et al.*, 2005a).

3.3.2 Elemento Percentual

Levando-se em consideração as problemáticas apresentadas para o elemento convencional, o elemento percentual tem sido reportado para melhorar o desempenho da proteção diferencial transversal. Este elemento consiste no cálculo de duas grandezas fundamentais, as correntes de operação (I_{op}) e de restrição (I_{res}), apresentadas em (3.12) para o elemento referente ao circuito 1 e em (3.13) para o elemento referente ao circuito 2 (WANG *et al.*, 2005b; MILLER *et al.*, 2010; BORGES, 2014).

$$I_{op} = |\bar{I}_1| - |\bar{I}_2|, \quad I_{res} = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2|, \quad (3.12)$$

$$I_{op} = |\bar{I}_2| - |\bar{I}_1|, \quad I_{res} = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| \quad (3.13)$$

As condições de operação do elemento diferencial transversal percentual utilizado são apresentadas em (3.14), em que K representa um ajuste de sensibilidade da proteção e I_{pickup} representa a corrente de *pickup* (WANG *et al.*, 2005b; MILLER *et al.*, 2010; BORGES, 2014).

$$I_{op} > KI_{res}, \quad I_{op} > I_{pickup} \quad (3.14)$$

Os valores do parâmetro K são projetados considerando-se o maior desequilíbrio de correntes durante falta externa, em conjunto com I_{pickup} (WANG *et al.*, 2005a; WANG *et al.*, 2005b).

3.3.3 Modos de Operação

A proteção diferencial transversal é caracterizada por dois modos de operação característicos, os modos de operação instantâneo e sucessivo. O primeiro modo, caracterizado por faltas próximas a cada relé e no meio da linha, é definido por situações nas quais cada relé é capaz de identificar a falta independentemente da atuação remota. Caso cada relé detecte a falta instantaneamente, esta é extinguida por completo instantaneamente. (WANG *et al.*, 2005b; BORGES, 2014)

Já no modo de operação sucessivo, somente um dos relés é capaz de identificar a falta instantaneamente, de tal forma que a falta é eliminada somente em um dos terminais. Contudo, ao haver a abertura de um dos terminais da linha, a contribuição de falta é alterada, o que faz com que o relé remanescente seja capaz de identificar a falta e então abrir seus disjuntores (WANG *et al.*, 2005b; BORGES, 2014). Como esta atuação depende da atuação remota, seu tempo de atuação fica dependente do tempo de abertura dos disjuntores, os quais geralmente têm duração entre um ciclo e meio e três ciclos (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

3.3.4 Método das Correntes Sobrepostas

A proteção diferencial transversal percentual, apresentada anteriormente, é capaz de aumentar a sensibilidade da proteção diferencial transversal. Contudo, esta é afetada pela corrente de carregamento do sistema. Além disto, quando a diferença entre as forças das fontes nos dois terminais da linha é considerável, as amplitudes das correntes no terminal mais fraco são similares, de tal forma que o relé diferencial transversal pode não operar para este terminal (WANG *et al.*, 2005b).

Como meio de aperfeiçoar o desempenho da proteção diferencial transversal perante os casos supracitados, o método das correntes sobrepostas, ou incremental, pode ser utilizado. Seu funcionamento é baseado no fato de que durante a ocorrência de faltas, correntes sobrepostas serão produzidas, as quais podem ser definidas como a diferença entre as correntes lidas e os respectivos valores de pré-falta (WANG *et al.*, 2005b).

Portanto, considerando-se o elemento diferencial transversal percentual, as formulações das correntes de operação e restrição passam a ser definidas de acordo com (3.15) para o elemento do circuito 1 e (3.16) para o elemento do circuito 2 (WANG *et al.*, 2005b).

$$I_{op} = |\Delta \bar{I}_1| - |\Delta \bar{I}_2|, \quad I_{res} = |\Delta \bar{I}_1| + |\Delta \bar{I}_2|, \quad (3.15)$$

$$I_{op} = |\Delta \bar{I}_2| - |\Delta \bar{I}_1|, \quad I_{res} = |\Delta \bar{I}_1| + |\Delta \bar{I}_2|, \quad (3.16)$$

na qual $\Delta \bar{I}_1$ e $\Delta \bar{I}_2$ representam os fasores de correntes sobrepostas dos circuitos 1 e 2 respectivamente, de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta \bar{I}_1 = \bar{I}_1 - \bar{I}_{1,carga}, \quad \Delta \bar{I}_2 = \bar{I}_2 - \bar{I}_{2,carga}, \quad (3.17)$$

em que os fasores $\bar{I}_{1,carga}$ e $\bar{I}_{2,carga}$ representam os fasores de carga (pré-falta) para os circuitos 1 e 2 respectivamente.

3.3.5 Plano Alfa

O plano alfa é uma representação geométrica da razão entre dois fasores corrente, de fase ou de sequência, apresentados no plano complexo. Esta técnica tem sido uma ferramenta disponível para engenheiros de proteção com o intuito de se estudar as características de proteção diferenciais e de falta. Também é de conhecimento que qualquer elemento diferencial pode ser mapeado no plano alfa, de tal maneira que regiões de operação e restrição podem ser determinadas pelas especificações do sistema de proteção. (BENMOUYAL, 2005).

Para a representação do plano alfa na proteção diferencial transversal, o coeficiente é dado pela razão entre o fasor de corrente do circuito em análise e o fasor de corrente de seu circuito paralelo. Portanto, para o circuito 1, a razão no plano alfa é dada pela equação (3.18) (BORGES, 2014; NEVES; SILVA, 2018).

$$M = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = x + jy = r \angle \theta \quad (3.18)$$

$$x = \frac{|\bar{I}_1|}{|\bar{I}_2|} \cos(\theta) = r \cos(\theta) \quad y = \frac{|\bar{I}_1|}{|\bar{I}_2|} \sin(\theta) = r \sin(\theta) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.19)$$

É possível realizar o mapeamento no plano alfa das características de restrição por meio das correntes de operação e restrição declaradas anteriormente, assim como apresentado em (ROBERTS *et al.*, 2001; NEVES, 2019). Portanto, por meio da substituição das correntes de operação e restrição para o circuito 1, apresentadas em (3.12), na primeira condição de operação definida em (3.13), encontra-se:

$$|\bar{I}_1| - |\bar{I}_2| > K(|\bar{I}_1| + |\bar{I}_2|) \quad (3.20)$$

Realizando-se a divisão de (3.20) por $|\bar{I}_2|$, encontra-se:

$$\left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| - 1 > K \left(\left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| + 1 \right), \quad (3.21)$$

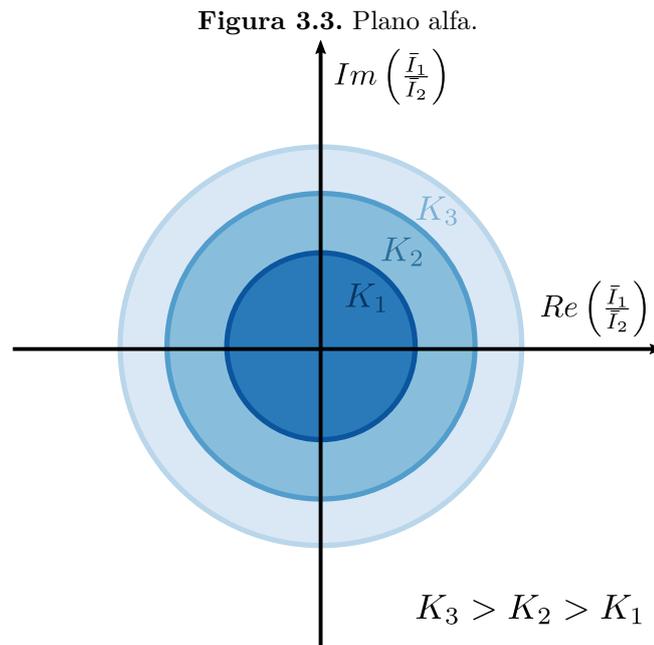
$$(1 - K) \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| > (1 + K) \quad (3.22)$$

Isolando-se o termo $\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2}$ em (3.22), encontra-se:

$$\left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| > \frac{1 + K}{1 - K} \quad (3.23)$$

Portanto, a região de operação para o circuito 1 é definida por uma região externa a uma circunferência de raio e centro apresentados em (3.24).

$$\text{Centro} = (0, 0), \quad \text{Raio} = \frac{1 + K}{1 - K} \quad (3.24)$$



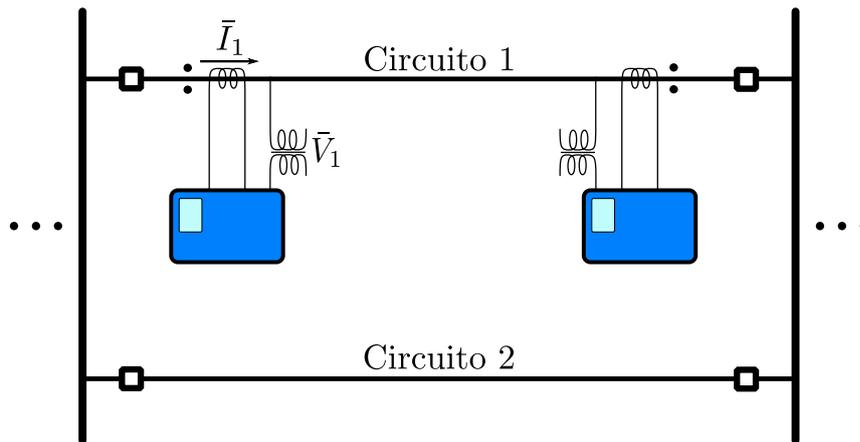
Fonte: Adaptado de Neves (2019).

3.4 FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

A proteção de distância é um elemento de proteção amplamente utilizado em linhas de transmissão de alta tensão. Assim como a proteção diferencial transversal, é essencialmente uma função de proteção baseada em um terminal (COOK, 1985).

O princípio básico de funcionamento da proteção de distância é baseado na determinação da localização da falta por meio da medição da impedância aparente entre o relé e o ponto da falta, realizada através da comparação entre os fasores de tensão e corrente lidos em um terminal da linha de transmissão. Na ausência de resistência de falta, a impedância medida pelo relé é diretamente proporcional à distância entre o relé e a falta. Esta impedância é comparada com a impedância da linha, e caso esta seja menor que o valor de ajuste definido, uma falta interna é declarada e um sinal de *trip* é enviado ao respectivo disjuntor (COOK, 1985; ZIEGLER, 2011).

Figura 3.4. Proteção de distância.



Fonte: Autoria própria.

A impedância medida consiste na razão entre um fasor de tensão e corrente, assim como apresentado em (3.25) (COOK, 1985).

$$Z_R = \frac{\vec{V}_R}{\vec{I}_R} \quad (3.25)$$

Para se obter a localização da falta, utiliza-se a impedância de sequência positiva, devido ao fato desta ser uniformemente distribuída e constante ao longo da linha, uma vez que esta é dependente dos condutores e suas localizações geométricas. Além do mais, esta impedância está presente em todos os tipos de falta, além de não ser dependente da resistividade do solo, diferentemente da impedância de sequência zero da linha de transmissão (SILVA, 2009).

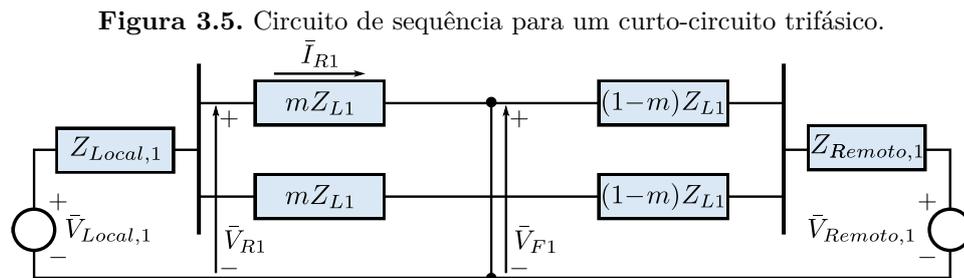
Contudo, devido às imprecisões na medição da distância, provenientes de erros de medição gerados em parte por erros de transformadores de potencial e de corrente, além da imprecisão na determinação na impedância da linha, a qual é usualmente baseada em cálculos e não em medições, o ajuste de alcance de 100% do comprimento da linha não é utilizado na prática. Por conta disto, geralmente se utiliza uma cobertura entre 80% e 90% do comprimento total da linha. Isso faz com que a proteção de distância de alta velocidade seja um elemento de subalcançe, visto que este é projetado para não cobrir a linha inteiramente (PAITHANKAR; BHIDE, 2011; ZIEGLER, 2011).

3.4.1 Determinação dos Valores Adequados de Tensão e Corrente

A proteção de distância portanto consiste na medição da impedância de sequência positiva entre o relé e o ponto do defeito. Contudo, durante cada tipo de falta, a configuração de tensões e correntes é tal que grandezas apropriadas devem ser utilizadas para se estimar o valor da impedância de sequência positiva entre o relé e o ponto da falta (COOK, 1985). As deduções dos coeficientes para medição da impedância de sequência positiva para cada tipo de falta são apresentadas a seguir, semelhante ao procedimento apresentado por Silva (2009) para linhas de circuito simples.

3.4.1.1 Curto-circuito Trifásico

A Figura 3.5 apresenta a configuração do diagrama de sequência positiva da linha de circuito duplo para um curto-circuito trifásico franco aplicado em uma localização m em p.u. do comprimento total de um dos circuitos.



Fonte: Autoria própria.

Na qual Z_{L1} representa a impedância de sequência positiva do circuito defeituoso e $Z_{Local,1}$ e $Z_{Remoto,1}$ representam os equivalentes local e remoto de sequência positiva do sistema.

Para um curto-circuito trifásico, há a presença apenas da componente de sequência positiva na análise de curto-circuito, devido à simetria deste tipo de falta. Portanto, o fasor de tensão de sequência positiva (\bar{V}_{R1}) lido pelo relé é apresentado em (3.26).

$$\bar{V}_{R1} = mZ_{L1}\bar{I}_{R1}, \quad (3.26)$$

sendo \bar{I}_{R1} o fasor de corrente sequência positiva medido pelo relé. Portanto, a impedância medida pelo relé é dada por (3.27).

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{R1}}{\bar{I}_{R1}} \quad (3.27)$$

As relações entre os fasores de tensão e corrente de fase e de sequência para o curto-circuito trifásico são apresentadas em (3.28) e (3.29) respectivamente.

$$\bar{V}_{Ra} = \bar{V}_{R1}, \quad \bar{V}_{Rb} = a^2\bar{V}_{R1}, \quad \bar{V}_{Rc} = a\bar{V}_{R1} \quad (3.28)$$

$$\bar{I}_{Ra} = \bar{I}_{R1}, \quad \bar{I}_{Rb} = a^2\bar{I}_{R1}, \quad \bar{I}_{Rc} = a\bar{I}_{R1} \quad (3.29)$$

Portanto, (3.27) pode ser representada por (3.30).

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{Ra}} = \frac{\bar{V}_{Rb}}{\bar{I}_{Rb}} = \frac{\bar{V}_{Rc}}{\bar{I}_{Rc}} \quad (3.30)$$

Desta forma, ao utilizar os sinais de tensão e corrente de fase, é possível medir a impedância de sequência positiva entre o relé e o ponto de falta para faltas trifásicas.

As relações entre os fasores de tensão e corrente entre fases e as grandezas de sequência positiva são apresentadas em (3.31) e (3.32).

$$\bar{V}_{Ra} - \bar{V}_{Rb} = (1 - a^2)\bar{V}_{R1}, \quad \bar{V}_{Rb} - \bar{V}_{Rc} = (a^2 - a)\bar{V}_{R1}, \quad \bar{V}_{Rc} - \bar{V}_{Ra} = (a - 1)\bar{V}_{R1} \quad (3.31)$$

$$\bar{I}_{Ra} - \bar{I}_{Rb} = (1 - a^2)\bar{I}_{R1}, \quad \bar{I}_{Rb} - \bar{I}_{Rc} = (a^2 - a)\bar{I}_{R1}, \quad \bar{I}_{Rc} - \bar{I}_{Ra} = (a - 1)\bar{I}_{R1} \quad (3.32)$$

Portanto, (3.27) pode ser representada por (3.33).

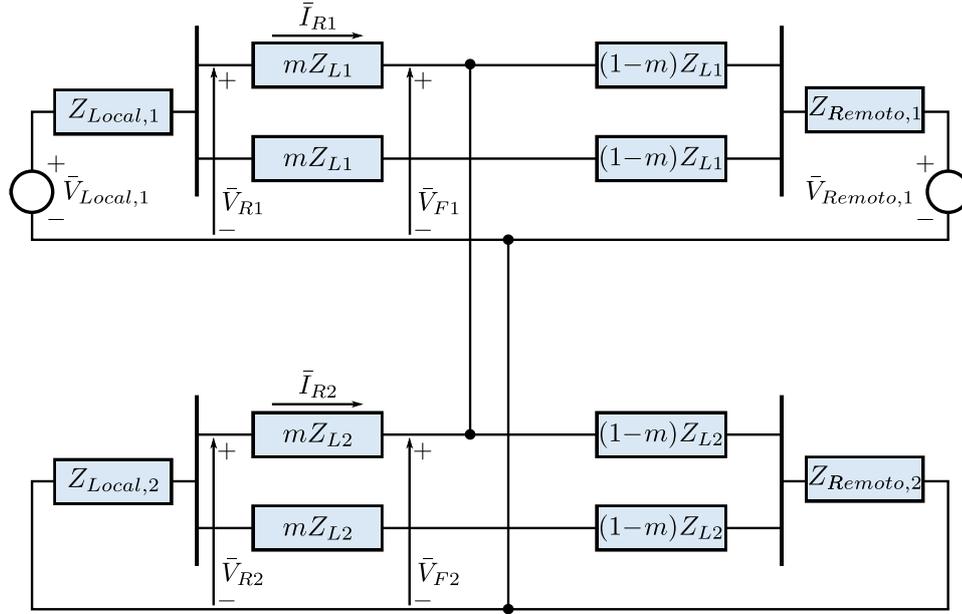
$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{Ra} - \bar{V}_{Rb}}{\bar{I}_{Ra} - \bar{I}_{Rb}} = \frac{\bar{V}_{Rb} - \bar{V}_{Rc}}{\bar{I}_{Rb} - \bar{I}_{Rc}} = \frac{\bar{V}_{Rc} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{Rc} - \bar{I}_{Ra}} \quad (3.33)$$

Portanto, por meio do uso de grandezas entre fases para os sinais de tensão e corrente, é possível medir a impedância de sequência positiva entre o relé e o ponto do defeito para faltas trifásicas.

3.4.1.2 Curtos-circuitos Bifásico e Bifásico para Terra Entre as Fases B e C

A Figura 3.6 apresenta a configuração dos diagramas de seqüência positiva e negativa da linha de circuito duplo para um curto-circuito bifásico franco entre as fases B e C, aplicado em uma localização m em p.u. do comprimento total de um dos circuitos.

Figura 3.6. Circuitos de seqüência para um curto-circuito bifásico entre as fases B e C.



Fonte: Autoria própria.

Para um curto-circuito bifásico entre as fases B e C, há a presença dos componentes de seqüência positiva e negativa. Considerando-se estes elementos, é possível ver que no ponto da falta, as tensões de seqüência positiva e negativa são iguais. Com isto, os fasores de tensão de seqüência positiva e negativa no ponto de falta são dados por:

$$\bar{V}_{F1} = \bar{V}_{F2} = \bar{V}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R1} = \bar{V}_{R2} - mZ_{L2}\bar{I}_{R2} \quad (3.34)$$

Considerando-se as impedâncias de seqüência positiva e negativa como sendo iguais, (3.34) pode ser formulada de acordo com (3.35) e (3.36).

$$\bar{V}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R1} = \bar{V}_{R2} - mZ_{L1}\bar{I}_{R2} \quad (3.35)$$

$$\bar{V}_{R1} - \bar{V}_{R2} = mZ_{L1}\bar{I}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R2} \quad (3.36)$$

Portanto, a impedância de seqüência positiva pode ser obtida através dos fasores de tensões e correntes de seqüência positiva e negativa lidos pelo relé, assim como apresentado em (3.37).

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{R1} - \bar{V}_{R2}}{\bar{I}_{R1} - \bar{I}_{R2}} \quad (3.37)$$

Analisando-se a relação entre as componentes de sequência e de fase:

$$\bar{V}_{R1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{Ra} + a\bar{V}_{Rb} + a^2\bar{V}_{Rc}), \quad \bar{V}_{R2} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{Ra} + a^2\bar{V}_{Rb} + a\bar{V}_{Rc}) \quad (3.38)$$

$$\bar{I}_{R1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{Ra} + a\bar{I}_{Rb} + a^2\bar{I}_{Rc}), \quad \bar{I}_{R2} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{Ra} + a^2\bar{I}_{Rb} + a\bar{I}_{Rc}) \quad (3.39)$$

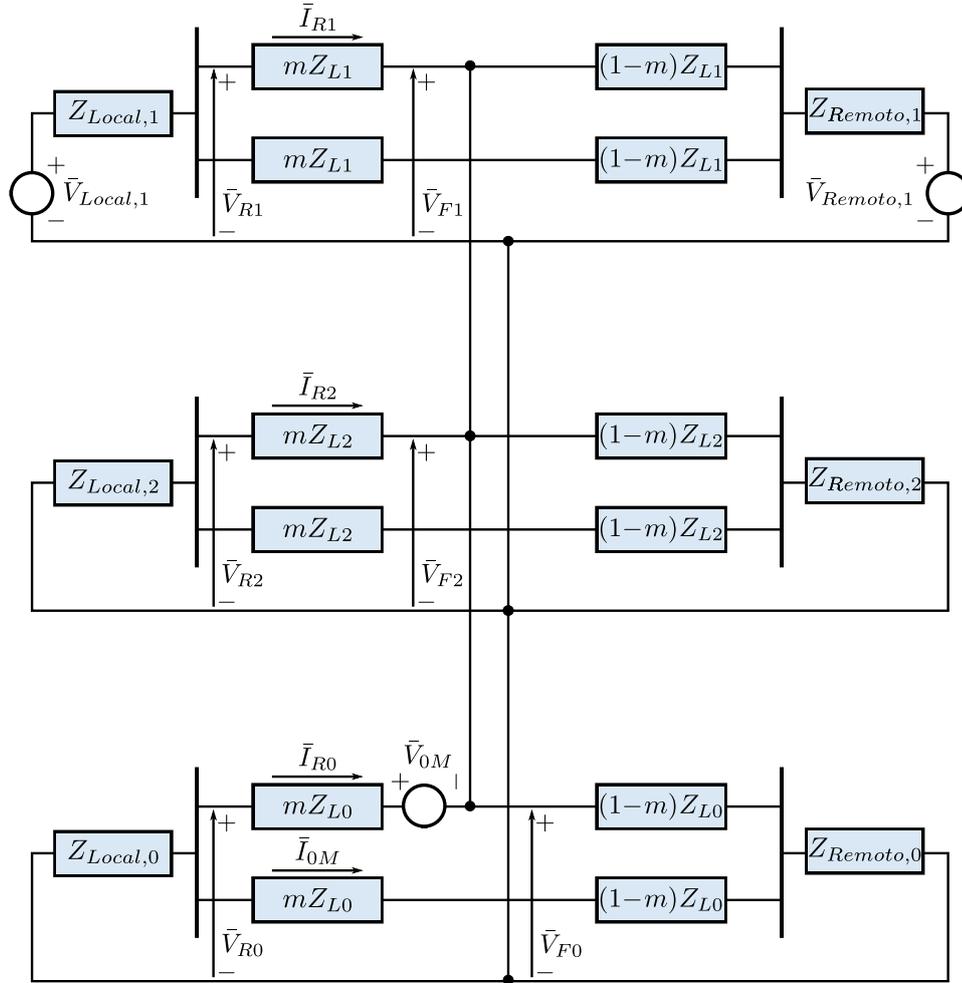
Logo, a impedância de sequência positiva pode ser dada pela seguinte expressão:

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{Rb} - \bar{V}_{Rc}}{\bar{I}_{Rb} - \bar{I}_{Rc}} \quad (3.40)$$

Portanto, utilizando-se as tensões e correntes nas fases B e C, é possível medir a impedância de sequência positiva entre o relé e o ponto do defeito para faltas bifásicas entre as fases B e C.

Já a Figura 3.7 apresenta a configuração dos diagramas de sequência positiva, negativa e zero para um curto-circuito bifásico franco para terra entre as fases B e C.

Figura 3.7. Circuitos de sequência para um curto-circuito bifásico para terra entre as fases B e C.



Fonte: Autoria própria.

Considerando-se esta configuração, é possível ver que as tensões de sequência positiva, negativa e zero são iguais no ponto da falta, assim como apresentado em (3.41).

$$\bar{V}_{F1} = \bar{V}_{F2} = \bar{V}_{F0} = \bar{V}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R1} = \bar{V}_{R2} - mZ_{L2}\bar{I}_{R2} = \bar{V}_{R0} - mZ_{L0}\bar{I}_{R0} - \bar{V}_{0M}, \quad (3.41)$$

em que \bar{V}_{0M} descreve a tensão induzida pelo acoplamento, dada em (3.42), e Z_{0M} e \bar{I}_{0M} denotam a impedância de acoplamento mútuo e a corrente do circuito paralelo, ambas de sequência zero.

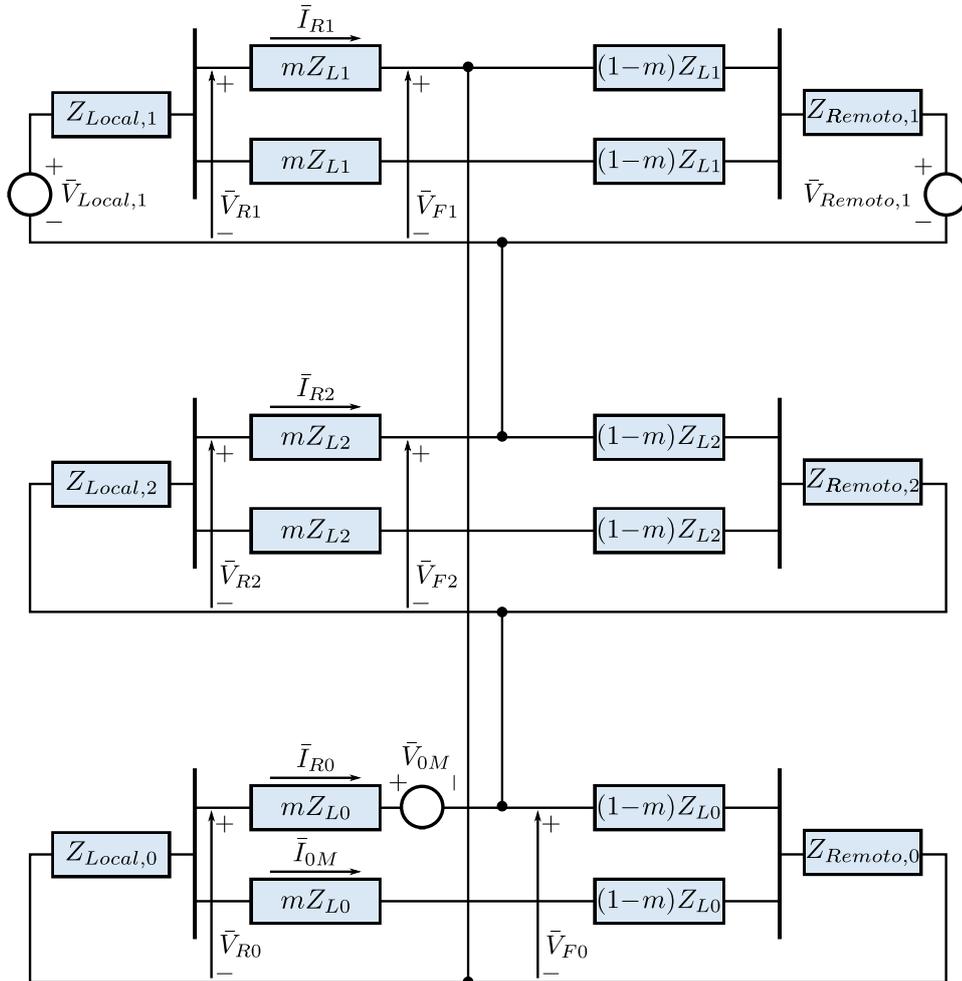
$$\bar{V}_{0M} = mZ_{0M}\bar{I}_{0M} \quad (3.42)$$

Contudo, as relações entre as tensões de sequência positiva e negativa são as mesmas da falta bifásica da Figura 3.7, e a impedância de sequência positiva pode ser medida por meio de (3.40).

3.4.1.3 Curto-circuito monofásico na fase A

A Figura 3.8 apresenta a configuração dos diagramas de sequência para um curto-circuito monofásico franco na fase A localizado em m p.u. do comprimento total de um dos circuitos.

Figura 3.8. Circuito de sequência para um curto-circuito monofásico na fase A.



Fonte: Autoria própria.

Para um curto-circuito monofásico, há a presença das componentes de sequência positiva, negativa e zero. Por meio da aplicação da Lei de *Kirchhoff* das Tensões, é possível ver que no ponto da falta, as tensões de sequência positiva, negativa e zero são relacionadas por meio de (3.43).

$$(\bar{V}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R1}) + (\bar{V}_{R2} - mZ_{L2}\bar{I}_{R2}) + (\bar{V}_{R0} - mZ_{L0}\bar{I}_{R0} - mZ_{0M}\bar{I}_{0M}) = 0 \quad (3.43)$$

Novamente, considerando-se a impedância de sequência positiva e negativa iguais, encontra-se a expressão apresentada em (3.44).

$$\bar{V}_{R1} - mZ_{L1}\bar{I}_{R1} + \bar{V}_{R2} - mZ_{L1}\bar{I}_{R2} + \bar{V}_{R0} - m\frac{Z_{L1}}{Z_{L1}}(Z_{L0} + Z_{L1} - Z_{L1})\bar{I}_{R0} - mZ_{0M}\bar{I}_{0M}\frac{Z_{L1}}{Z_{L1}} = 0 \quad (3.44)$$

Agrupando-se os termos, encontram-se as expressões definidas em (3.45) e (3.46).

$$\bar{V}_{R0} + \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} - mZ_{L1}(\bar{I}_{R0} + \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2}) + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\bar{I}_{R0} + \frac{Z_{0M}}{Z_{L1}}\bar{I}_{0M} = 0, \quad (3.45)$$

$$\underbrace{\bar{V}_{R0} + \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2}}_{\bar{V}_{Ra}} = mZ_{L1}\underbrace{(\bar{I}_{R0} + \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2})}_{\bar{I}_{Ra}} + \underbrace{\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}}_{K_0}\bar{I}_{R0} + \underbrace{\frac{Z_{0M}}{Z_{L1}}}_{K_{0M}}\bar{I}_{0M}, \quad (3.46)$$

na qual K_0 representa o fator de compensação de sequência zero, semelhante ao apresentado para linhas de circuito simples, enquanto K_{0M} representa o fator de compensação de acoplamento mútuo entre circuitos (COOK, 1985; TZIOUVARAS *et al.*, 2014).

Portanto, a impedância medida para uma falta monofásica na fase A é dada por (3.47).

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{Ra} + K_0\bar{I}_{R0} + K_{0M}\bar{I}_{0M}} \quad (3.47)$$

Contudo, o método da compensação do efeito do acoplamento mútuo entre circuitos de sequência zero somente elimina os erros de medição de impedância no circuito defeituoso. Pode ocorrer o caso do relé do circuito são perder a direcionalidade durante uma falta monofásica reversa próxima no circuito paralelo, devido ao fato da corrente de compensação de sequência zero superar a corrente atual do circuito. Devido a isto e a outros fatores, o uso deste fator de compensação geralmente não é recomendado, de tal forma que muitos relés comerciais não contam com este recurso (COOK, 1985; TZIOUVARAS *et al.*, 2014).

Portanto, para o cálculo da impedância de sequência positiva, geralmente são utilizados somente a compensação de sequência zero do circuito com falta, de tal forma que para se detectar a falta na fase A utiliza-se a expressão dada em (3.48).

$$mZ_{L1} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{Ra} + K_0\bar{I}_{R0}} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{Ra} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\bar{I}_{R0}} \quad (3.48)$$

3.4.2 Unidades de Impedância

A proteção de distância, portanto, é baseada na utilização de seis unidades para detecção das diferentes configurações de falta. Estas unidades são classificadas em unidades de fase e unidades de terra. As unidades de fase são compostas pelas unidades Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA} , e responsáveis por detectar faltas bifásicas e trifásicas. Já as unidades de terra são compostas pelas unidades Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT} e são responsáveis por detectar faltas monofásicas, bifásicas para terra, além de faltas trifásicas. Os sinais utilizados por cada unidade de impedância são descritas na Tabela 3.1 (COOK, 1985; SILVA, 2009).

Tabela 3.1. Unidades de impedância e sinais utilizados.

Unidade	Sinais de Tensão	Sinais de Corrente
Z_{AT}	\bar{V}_{Ra}	$\bar{I}_{Ra} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{BT}	\bar{V}_{Rb}	$\bar{I}_{Rb} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{CT}	\bar{V}_{Rc}	$\bar{I}_{Rc} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{AB}	$\bar{V}_{Ra} - \bar{V}_{Rb}$	$\bar{I}_{Ra} - \bar{I}_{Rb}$
Z_{BC}	$\bar{V}_{Rb} - \bar{V}_{Rc}$	$\bar{I}_{Rb} - \bar{I}_{Rc}$
Z_{CA}	$\bar{V}_{Rc} - \bar{V}_{Ra}$	$\bar{I}_{Rc} - \bar{I}_{Ra}$

Fonte: Silva (2009).

Na qual K_0 representa o fator de compensação de sequência zero, apresentado em (3.49) (COOK, 1985; SILVA, 2009).

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (3.49)$$

3.4.3 Zonas de Proteção

Esquemas de proteção de distância são utilizados na maioria dos países ao redor do mundo para proteção de linhas de transmissão de alta tensão. A proteção deve atuar rapidamente para faltas dentro do alcance desejado, contudo para faltas além deste ajuste predefinido, a falta deve ser eliminada de alguma forma. Esta extinção do curto-circuito é realizada por meio da adoção de mais um elemento de distância embarcado no mesmo relé, porém com um ajuste de alcance e tempo de atuação distintos, de forma a manter a coordenação da proteção de

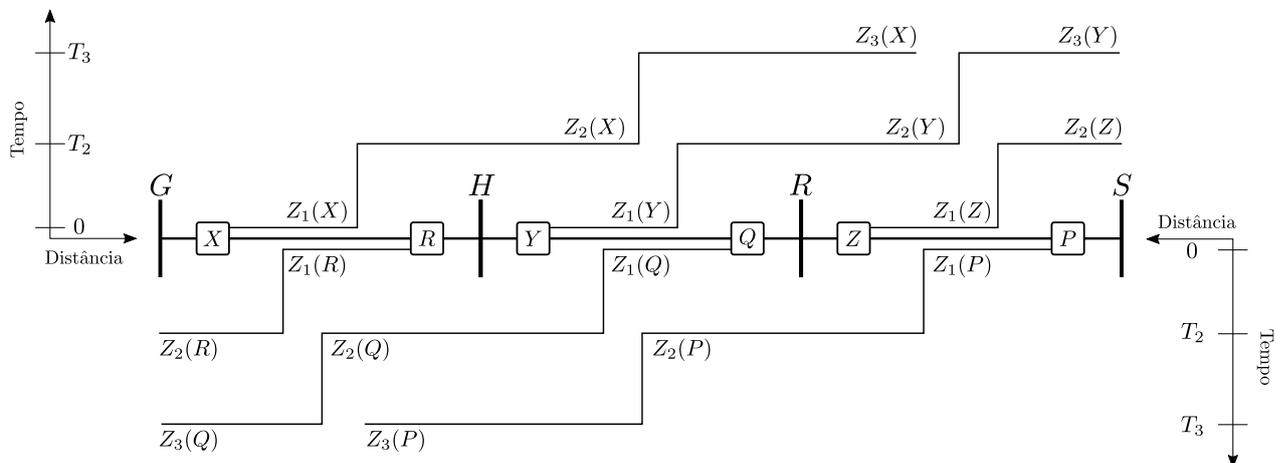
distância (ANDERSON, 1999).

Esta coordenação da proteção é realizada por meio da sobreposição de zonas de proteção, de tal forma que nenhuma parte do sistema é desprotegida e somente a zona protegida é desconectada. A comparação de sinais locais de tensão e corrente obtidos pelo relé são utilizadas para determinar em qual zona está localizada a falta, através da obtenção da distância entre o relé e a falta (COOK, 1985; ANDERSON, 1999).

A primeira zona de proteção, denominada de zona de subalcance, é configurada para proteger em média de 70 a 90% da linha protegida. Esta zona de proteção não possui atraso de tempo intencional. A segunda zona, comumente denominada de zona de sobrealcance, é geralmente configurada para cobrir 100% da linha protegida acrescida de 50% da linha mais curta adjacente ao terminal remoto, com um atraso de tempo intencional típico entre 400-500 ms para relés eletromecânicos e entre 250-300 ms no caso de relés estáticos ou numéricos (ANDERSON, 1999; SILVA, 2009; ZIEGLER, 2011; PAITHANKAR; BHIDE, 2011).

Já a terceira zona é configurada para cobrir 100% da linha protegida e da linha adjacente, além de 25% da linha adjacente ao terminal remoto da segunda linha, com um atraso de tempo intencional maior que o da segunda zona. Esta metodologia garante a coordenação da proteção, de tal forma que há um intervalo de coordenação temporal entre as zonas. Com isto, a função de distância é capaz de proporcionar uma proteção de *backup* para linhas adjacentes (ANDERSON, 1999; SILVA, 2009; ZIEGLER, 2011). A representação das zonas de atuação e seus respectivos tempos de atraso intencionais são apresentados na Figura 3.9.

Figura 3.9. Zonas da proteção de distância.



Fonte: Anderson (1999).

3.4.4 Diagrama de Impedâncias

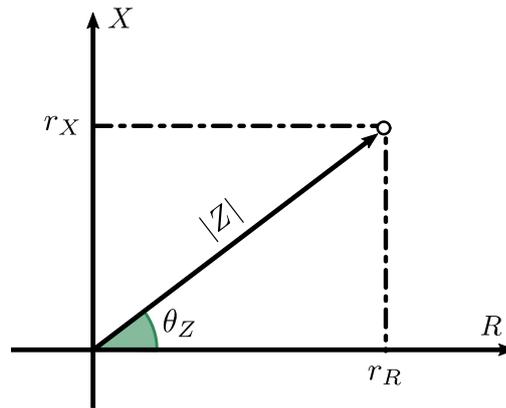
O diagrama de impedâncias é uma ferramenta geométrica fundamental para a avaliação da proteção de distância. Sua representação é realizada por meio do plano complexo R-X, de tal forma que é possível representar visualmente a característica do relé de proteção e o comportamento das impedâncias medidas pelo equipamento (ZIEGLER, 2011).

Por meio da razão entre os fasores de tensão \bar{V}_R e corrente \bar{I}_R , é possível obter as componentes relacionadas ao diagrama de impedâncias, apresentadas em (3.50) e (3.51) (SILVA, 2009).

$$Z = \frac{\bar{V}_R}{\bar{I}_R} = r_R + jr_X = |Z|\angle\theta_Z \quad (3.50)$$

$$r_R = |Z|\cos(\theta_Z) \quad r_X = |Z|\sin(\theta_Z) \quad (3.51)$$

Figura 3.10. Diagrama de Impedâncias.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

3.4.5 Comparadores do relé de distância

Relés de proteção são essencialmente comparadores de amplitude ou de fase. A operação do comparador de amplitude é dada pela relação entre as amplitudes de dois sinais. Já para o comparador de fase, a operação é definida pela diferença angular entre dois sinais de entrada (COOK, 1985).

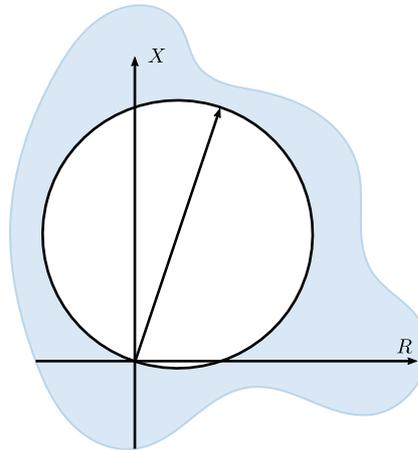
Considerando a operação de proteção de distância, existem diversas características de operação que foram desenvolvidas ao longo do tempo, como a característica impedância, reatância, dentre outras. Contudo, dentre todas as características, a característica mho, conhecida também como característica admitância, tem sido a mais utilizada, tanto em relés eletromecânicos

quanto em estáticos e digitais (ZIEGLER, 2011).

3.4.5.1 Característica Mho Autopolarizada

A característica mho autopolarizada é representada como um círculo no diagrama de impedâncias. Seu diâmetro se estende da origem do diagrama de impedâncias até o alcance definido e possui como característica inerente a combinação de medições direcionais e de distância. Esta característica foi capaz de proporcionar considerável vantagem econômica em relés eletromecânicos e é utilizada até hoje em relés numéricos. A operação do elemento é dada caso a impedância esteja dentro da região circular (ZIEGLER, 2011; FENTIE, 2016).

Figura 3.11. Característica mho autopolarizada.



Fonte: Autoria Própria.

Para se determinar se a impedância medida se encontra dentro ou fora da característica mho autopolarizada, pode ser utilizado o comparador de fase, por meio da relação entre os ângulos de duas grandezas, denominadas grandezas de operação (Z_{op}) e polarização (Z_{pol}), definidas em (3.52) e (3.53) respectivamente (SILVA, 2009; PAITHANKAR; BHIDE, 2011; FENTIE, 2016).

$$Z_{op} = Z_A - Z_R, \quad (3.52)$$

$$Z_{pol} = Z_R, \quad (3.53)$$

em que Z_A representa a impedância de alcance e Z_R a impedância aparente medida.

Portanto, o comparador de fase avalia a defasagem entre as grandezas Z_{op} e Z_{pol} para definir se a impedância se encontra fora ou dentro da característica mho, de acordo com (3.54) (SILVA, 2009; PAITHANKAR; BHIDE, 2011; FENTIE, 2016).

$$\varphi = \arg \left(\frac{Z_{op}}{Z_{pol}} \right) \quad (3.54)$$

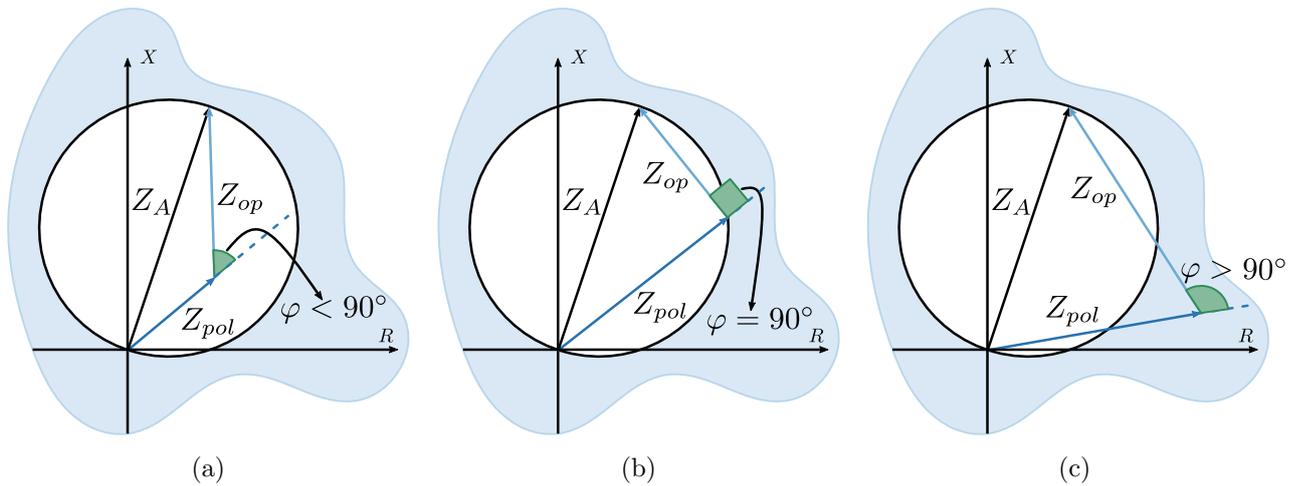
Este comparador de fase pode ser formulado por meio do uso de grandezas de tensão \bar{V}_{op} e \bar{V}_{pol} , assim como apresentado em (3.55) e (3.56) (SILVA, 2009; PAITHANKAR; BHIDE, 2011).

$$\bar{V}_{op} = Z_A \bar{I}_R - \bar{V}_R, \quad (3.55)$$

$$\bar{V}_{pol} = \bar{V}_R \quad (3.56)$$

A Figura 3.12 apresenta o resultado do comparador de fase, com saída φ , para condições de falta interna, no limiar de atuação e para faltas externas.

Figura 3.12. Característica mho autopolarizada - Grandezas de operação e polarização: (a) Falta interna (b) Limiar de atuação (c) Falta externa.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Portanto, para se detectar a operação do elemento mho autopolarizado, a saída do comparador de fase deve satisfazer a condição dada em (3.57) ou em (3.58).

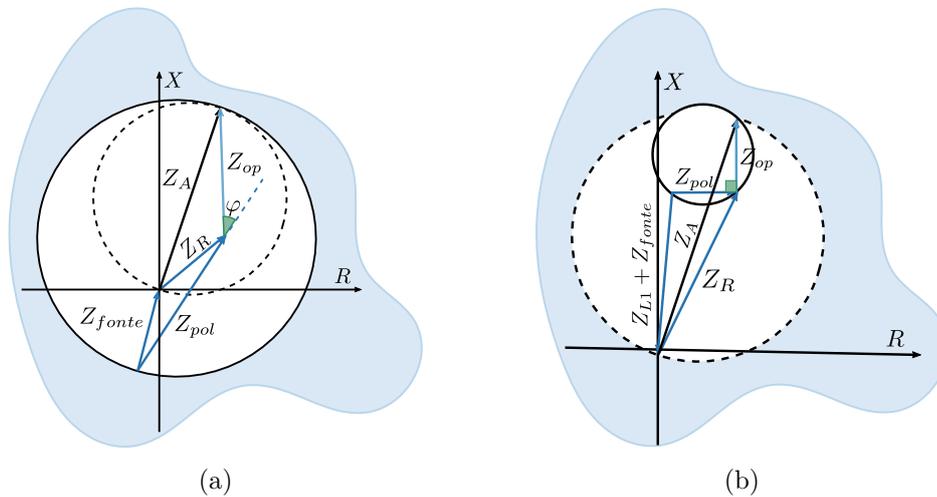
$$-90^\circ < \varphi < 90^\circ, \quad (3.57)$$

$$|\varphi| < 90^\circ \quad (3.58)$$

Contudo, a característica mho autopolarizada tem seu desempenho prejudicado durante faltas próximas, ao ponto da medição de tensão ter sua magnitude muito reduzida. Por conta disto, os relés de proteção contam com outras formas de grandezas de polarização, para poder cobrir uma maior quantidade de faltas, além de proporcionar uma maior segurança ao elemento (FENTIE, 2016).

Dentre as polarizações existentes, podem-se citar as polarizações cruzada e de tensão de sequência positiva. Estes recursos têm como característica básica promover uma operação mais eficiente e segura da característica mho. Esta operação é caracterizada por expansões da característica mho durante faltas diretas, de tal forma a englobar a origem e assim cobrir faltas com tensões próximas de zero. Além disto, a operação também é definida por retrações da característica mho durante faltas reversas, garantindo assim uma melhoria na segurança do elemento (SILVA, 2009; ZIEGLER, 2011). A Figura 3.13 apresenta o comportamento da característica mho polarizada para faltas diretas e reversas.

Figura 3.13. Característica mho polarizada - Grandezas de operação e polarização : (a) Falta direta (b) Falta reversa.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Contudo, estas duas técnicas não são confiáveis para faltas trifásicas próximas do relé devido ao fato da tensão em todas as fases reduzir a aproximadamente zero. Por conta disto, soluções envolvendo filtros de memória de tensão tem sido utilizadas nas grandezas de polarização (FENTIE, 2016).

3.4.6 Polarização por memória de tensão de sequência positiva

O uso da polarização por memória de tensão de sequência positiva consiste no uso de um filtro de memória, o qual faz com que a tensão de sequência positiva decaia lentamente durante o tempo. Esta técnica é capaz de proporcionar uma solução para lidar com faltas trifásicas localizadas próximas ao relé de distância (FENTIE, 2016).

Portanto, levando isso em consideração, Silva & Almeida (2015) propuseram um filtro de memória de tensão de sequência positiva para aplicações em relés numéricos. Este filtro é baseado na conversão de um filtro passa-baixa analógico de primeira ordem em um filtro digital de reposta ao impulso infinito, através do método das diferenças regressivas.

De acordo com a formulação, a saída do filtro é modelada com a equação das diferenças apresentada em (3.59) (SILVA; ALMEIDA, 2015).

$$\bar{V}_{R1,mem}(k) = \beta \bar{V}_{R1}(k) + (1 - \beta) \bar{V}_{R1,mem}(k - 1), \quad (3.59)$$

na qual $\bar{V}_{R1,mem}$ é a saída do filtro de memória de tensão sequência positiva, \bar{V}_{R1} a tensão de sequência positiva da unidade de impedância em análise, k é a amostra atual, enquanto β é representado por (3.60) (SILVA; ALMEIDA, 2015).

$$\beta = \frac{1}{LN + 1}, \quad (3.60)$$

em que N representa a taxa de amostragem, em amostras/ciclo, enquanto L representa a constante de tempo de decaimento, dada em ciclos.

Portanto, considerando-se a unidade de impedância Z_{AT} , a tensão de sequência positiva de entrada para o filtro de memória de tensão é dada por (3.61), de acordo com a matriz de transformação de Fortescue, e a saída do filtro é dada por (3.62).

$$\bar{V}_{Ra1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{Ra} + a\bar{V}_{Rb} + a^2\bar{V}_{Rc}), \quad (3.61)$$

$$\bar{V}_{Ra1,mem}(k) = \beta \bar{V}_{Ra1}(k) + (1 - \beta) \bar{V}_{Ra1,mem}(k - 1) \quad (3.62)$$

Os valores de memória de tensão apropriados para cada unidade de impedância são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Unidades de impedância e tensões de polarização.

Unidades	\bar{V}_{pol}		Sinais de Corrente
	autopolarizada	memória de tensão	
Z_{AT}	\bar{V}_{Ra}	$\bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Ra} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{BT}	\bar{V}_{Rb}	$a^2 \cdot \bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Rb} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{CT}	\bar{V}_{Rc}	$a \cdot \bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Rc} + K_0 \bar{I}_{R0}$
Z_{AB}	$\bar{V}_{Ra} - \bar{V}_{Rb}$	$-j \cdot a \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Ra} - \bar{I}_{Rb}$
Z_{BC}	$\bar{V}_{Rb} - \bar{V}_{Rc}$	$-j \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Rb} - \bar{I}_{Rc}$
Z_{CA}	$\bar{V}_{Rc} - \bar{V}_{Ra}$	$-j \cdot a^2 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{Ra1,mem}$	$\bar{I}_{Rc} - \bar{I}_{Ra}$

Fonte: Adaptado de Fentie (2016).

METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as metodologias e implementações utilizadas com o intuito de se avaliar as proteções diferencial transversal e de distância. Para isto, simulações computacionais e experimentais foram realizadas para se analisar o desempenho dos dois elementos.

4.1 SISTEMAS DE POTÊNCIA AVALIADOS

Com o intuito de se analisar o comportamento das proteções avaliadas, dois sistemas de potência foram utilizados, um sistema teste e um sistema real, ambos modelados e compostos por linhas de transmissão de circuito duplo.

A modelagem das linhas de transmissão de circuito duplo foi realizada por meio da rotina LINE CONSTANTS do ATP. Esta rotina é capaz de realizar o cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão, os quais são necessários para a realização de estudos de transitórios eletromagnéticos, bem como para se obter os valores de acoplamento entre linhas paralelas ou objetos próximos. A rotina calcula os parâmetros de linha por meio da disposição geométrica dos cabos e de suas características elétricas (LEUVEN, 1987; FILHO; PEREIRA, 1996).

A partir dos resultados da rotina LINE CONSTANTS para a linha de transmissão modelada, foi realizada a modelagem do modelo computacional de linha de transmissão de circuito duplo a parâmetros distribuídos, o qual conta com duas linhas trifásicas individualmente transpostas com acoplamento mútuo entre si (LEUVEN, 1987).

O bloco utilizado é caracterizado pela matriz de impedâncias de fase apresentada em (4.1).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Em que os parâmetros Z_s e Z_m representam as impedâncias própria e mútua entre os condutores de um circuito em específico, enquanto Z_p representa o termo de acoplamento entre circuitos (LEUVEN, 1987).

Os parâmetros de entrada do bloco são fornecidos em função dos parâmetros de impedância citados acima. Tais parâmetros, definidos como Z_G , Z_L e Z_{IL} , são apresentados em (4.2), (4.3) e (4.4) respectivamente (LEUVEN, 1987):

$$Z_G = Z_s + 2Z_m + 3Z_p, \quad (4.2)$$

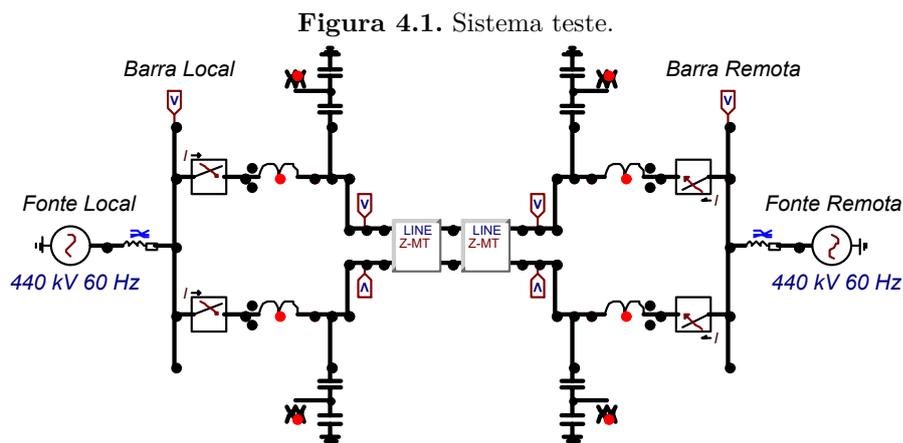
$$Z_L = Z_s - Z_m, \quad (4.3)$$

$$Z_{IL} = Z_s + 2Z_m - 3Z_p, \quad (4.4)$$

em que Z_G apresenta o parâmetro de modo terra, Z_L representa o parâmetro de modo aéreo, e Z_{IL} representa o modo associado com acoplamento de sequência zero entre os circuitos (LEUVEN, 1987).

4.1.1 Sistema-teste

O sistema teste utilizado neste trabalho para avaliar o desempenho das proteções diferencial transversal e de distância é apresentado na Figura 4.1.



Fonte: Autoria própria.

O sistema consiste em uma linha de transmissão de circuito duplo de 440 kV de tensão nominal e 250 km de extensão, cuja geometria da torre e cabos utilizados são descritos por Prado *et al.* (2002). A linha é conectada em cada terminal por um equivalente de *Thévenin*, os

quais foram modelados baseando-se no SIR, do inglês *Source-to-Line Impedance Ratio*, o qual representa a razão entre a impedância do equivalente de *Thévenin* conectado no terminal em análise e a impedância da linha (CARPENTER *et al.*, 1999). Porém, para o cálculo do SIR, foi utilizada a impedância da linha de circuito duplo como um todo, considerando os circuitos conectados no mesmo barramento nos dois terminais. Além disto, para realizar o cálculo dos parâmetros de impedância, a rotina LINE CONSTANTS foi executada para a linha equivalente trifásica.

Com o intuito de representar os instrumentos de medição, foram utilizados transformadores de corrente (TCs) com relação de transformação de 2000-5, de acordo com Committee *et al.* (2004). Já para medições de tensão, foram utilizados modelos de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) de 500 kV, descritos por Pajuelo *et al.* (2008).

Este sistema teste foi modelado com o intuito de se realizarem análises mais abrangentes a respeito dos parâmetros de falta e do sistema, visto que sistemas reais são limitados às condições de operação determinadas pelo resto do sistema.

4.1.2 Sistema real

O sistema real modelado, cuja localização geográfica é apresentada na Figura 4.2, consiste em uma linha de transmissão do SIN de 230 kV e 99 km de extensão, localizada entre as subestações de Lages e Rio do Sul, situada no estado de Santa Catarina, cuja geometria de torre e topologia de cabos são apresentadas em Nunes (2019).

Figura 4.2. Localização do sistema real.



Fonte: Adaptado de ONS (2019).

Os cenários de carga e de contribuição de curto-circuito utilizados consistiram em dados disponibilizados pelo ONS. Já para representação das medições, foram utilizados TCs com relação de transformação de 2000-5, apresentado por Committee *et al.* (2004), enquanto os TPCs utilizados consistiram no modelo Haefely 230, cujos parâmetros são detalhados em Carvalho Jr (2008).

4.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais consistiram na implementação das funções de proteção em interfaces de programação, com o intuito de se avaliar as funções de proteção diferencial transversal e de distância. Nesta metodologia de simulação, foram adotadas análises de regime transitório de curto-circuito e de sensibilidade paramétrica, realizadas com ênfase no sistema teste apresentado na Subseção 4.1.1. Na análises de regime transitório de curto-circuito, são apresentados os comportamentos das proteções perante regime transitório de falta. Já para as análises de sensibilidade paramétrica, são estudados os comportamentos das proteções durante regime permanente de falta, por meio da variação de parâmetros de falta e do sistema.

As análises apresentadas nestas simulações, referentes à proteção diferencial transversal, são apresentadas através do plano alfa. Já para a proteção de distância, é utilizada a característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva, com filtro de memória de tensão apresentado por Silva & Almeida (2015). Contudo, devido ao dinamismo desta característica, tanto para regime transitório quanto permanente de falta, a visualização do comportamento da proteção por meio da análise do diagrama de impedâncias se torna inviável.

Portanto, como forma de analisar a proteção de distância para estes cenários, foram utilizados os resultados dos comparadores de fase dos elementos mho polarizados. Além disto, para se mostrar o efeito nas impedâncias medidas para as duas modalidades de análise, também foram apresentados os diagramas de impedâncias, com o uso da característica mho autopolarizada como referência. Contudo, os indicativos de atuações foram obtidos por meio dos comparadores das características mho polarizadas.

Além disto, para a modalidade de análise de regime transitório de curto-circuito, foi utilizado o filtro de memória de tensão de sequência positiva adaptativa, o qual adota uma constante de

decaimento de 10 ciclos, e caso a tensão de sequência positiva decaia a 10% da tensão nominal, a constante de decaimento é alterada para 100 ciclos, assim como apresentado por Silva & Almeida (2016). Em relação à análise de sensibilidade paramétrica, foi considerado o filtro com a constante de decaimento fixa de 100 ciclos.

Com o intuito de se analisarem os resultados obtidos das análises de sensibilidade paramétrica, foram considerados os comportamentos das proteções em aproximadamente 10 ciclos após a aplicação das faltas.

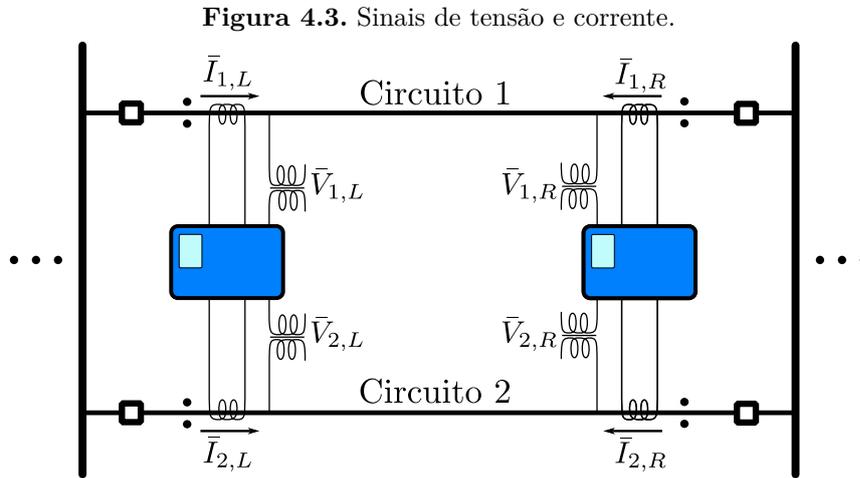
O processo de aquisição de sinais foi realizado por meio das oscilografias provenientes das simulações realizadas no *software* ATP. Os sinais secundários de tensão e corrente de cada circuito foram tratados por um filtro passa-baixa de *Butterworth* de terceira ordem e frequência de corte de 180 Hz, e foram amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo. Os fasores estimados foram obtidos por meio do algoritmo do filtro cosseno modificado (HART *et al.*, 2000).

O algoritmo da proteção de distância utilizado considerou o alcance da primeira zona de 80% do circuito em análise, enquanto a segunda zona considerou 100% do circuito em análise mais 20% do circuito paralelo.

Para a parametrização da proteção diferencial transversal, foram realizadas análises em regime permanente de diversas modalidades de falta externa e de força das fontes, considerando-se uma linha paralela com os parâmetros de cada circuito alterados. Para um dos circuitos, os parâmetros foram alterados para 2% a mais dos valores obtidos pela modelagem, enquanto que no circuito paralelo, os parâmetros foram ajustados para 2% a menos dos valores modelados, considerando-se valores próximos de erros encontrados na literatura para algoritmos de estimação de parâmetros de linha, assim como apresentado em Wang & Xu (2015).

Além das diferenças nos erros das impedâncias de cada circuito, também foram adotados erros percentuais de 10% nas medições dos TCs, de tal forma que a combinação dos erros fornecesse a maior corrente de operação da proteção diferencial transversal para faltas externas. Diante deste cenário, e para o valor de *pickup* considerado, analisou-se o parâmetro de ajuste da sensibilidade crítico para que não fosse detectada falta externa, adicionando-se erros de medições e fatores de segurança (WANG *et al.*, 2005a; WANG *et al.*, 2005b).

Para se avaliar as proteções diferencial transversal e de distância, foram analisados os quatro elementos responsáveis por proteger cada terminal de cada circuito. Os sinais de corrente e tensão disponíveis são apresentados na Figura 4.3, enquanto os sinais lidos pelos instrumentos de medição, para cada elemento de proteção, são apresentados na Tabela 4.1.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.1. Tensões e correntes medidas pelos elementos de proteção.

Terminal	Circuito	21		87LT	
		Corrente	Tensão	Correntes	Plano alfa
Local	Circuito 1	$\bar{I}_{1,L}$	$\bar{V}_{1,L}$	$\bar{I}_{1,L}$ e $\bar{I}_{2,L}$	$M_{1,L} = \frac{\Delta \bar{I}_{1,L}}{\Delta \bar{I}_{2,L}}$
	Circuito 2	$\bar{I}_{2,L}$	$\bar{V}_{2,L}$	$\bar{I}_{1,L}$ e $\bar{I}_{2,L}$	$M_{2,L} = \frac{\Delta \bar{I}_{2,L}}{\Delta \bar{I}_{1,L}}$
Remoto	Circuito 1	$\bar{I}_{1,R}$	$\bar{V}_{1,R}$	$\bar{I}_{1,R}$ e $\bar{I}_{2,R}$	$M_{1,R} = \frac{\Delta \bar{I}_{1,R}}{\Delta \bar{I}_{2,R}}$
	Circuito 2	$\bar{I}_{2,R}$	$\bar{V}_{2,R}$	$\bar{I}_{1,R}$ e $\bar{I}_{2,R}$	$M_{2,R} = \frac{\Delta \bar{I}_{2,R}}{\Delta \bar{I}_{1,R}}$

Fonte: Autoria própria.

4.3 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

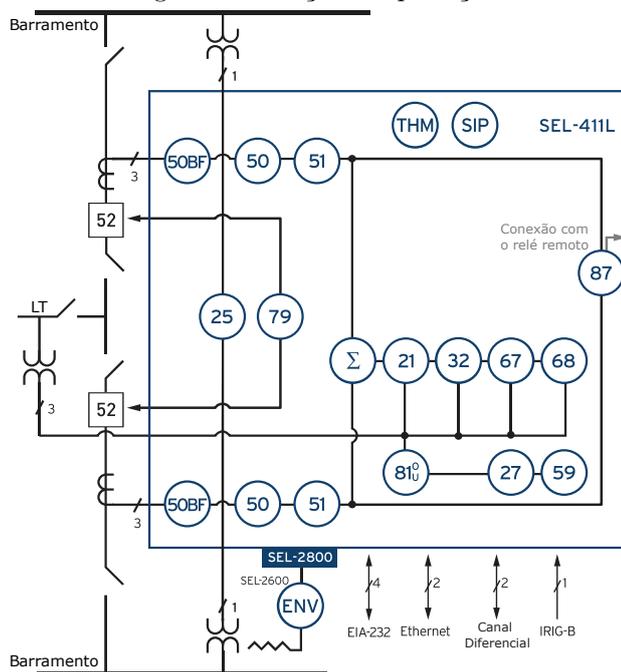
Com o intuito de se avaliar o desempenho das proteções diferencial transversal e de distância experimentalmente, um procedimento de simulação em massa foi implementado considerando-se um relé de proteção comercial SEL-411L, da fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL).

Para se avaliar a proteção de distância, foi utilizada a própria função nativa do relé de proteção. Contudo, como a proteção diferencial transversal não se encontra disponível comercialmente, este trabalho aborda o resultado de sua implementação. Para tal, o algoritmo foi implementado diretamente na interface de programação do relé de proteção.

4.3.1 Relé SEL-411L

O SEL-411L é um relé de linhas de transmissão que conta com as funções diferencial longitudinal, distância e proteção de corrente, além de recursos de aberturas monopolar e tripolar, monitoramento e lógica de falha de disjuntores, religamento com conferência de sincronismo e lógicas de proteção para linhas com compensação série. O relé conta com medição e registro de dados, os quais incluem a captura de sinais em alta resolução (SEL, 2019). A Figura 4.4 apresenta uma visão geral das funções de proteção disponíveis no equipamento.

Figura 4.4. Visão geral das funções de proteção do relé SEL-411L.



Fonte: SEL (2019).

4.3.1.1 SELOGIC Control Equation Programming

Os relés da série SEL-400, da qual o dispositivo SEL-411L faz parte, contam com uma interface de desenvolvimento de funções de proteção e automação personalizadas, com fun-

cionalidades independentes entre si. Contudo, estas duas áreas podem interagir e realizar o intercâmbio de informações, por meio de variáveis de armazenamento separadas para cada área, o que torna sua aplicação ideal para gerenciamento de subestações (SEL, 2019).

A estrutura *SELOGIC Control Equation* é dividida em três áreas principais. A primeira é responsável por personalizar a operação da proteção por meio de ajustes e por uma área de programação de forma livre. A segunda é responsável pela interface de programação de área livre voltada para automação, enquanto a terceira área é responsável pela programação de saídas do relé (SEL, 2019).

As variáveis lógicas e analógicas estão disponíveis na interface de programação de forma livre, denominada *Free-Form SELOGIC control equation programming area*, tanto para as áreas de proteção e automação. A interface de programação de proteção, utilizada neste trabalho, tem acesso às palavras binárias do relé, as quais informam o estado de atuação do dispositivo, bem como as demais variáveis analógicas e lógicas do relé, das quais se incluem as próprias variáveis de saída dos algoritmos personalizados de proteção e automação. O relé conta com seis grupos de ajustes que podem ser ativados com seu algoritmo personalizado independente. (SEL, 2019).

A interface de programação de forma livre de proteção também tem como característica principal operar no mesmo intervalo de processamento dos algoritmos de proteção nativos, além do fato de também utilizar os fasores estimados pelo relé de proteção, os quais são utilizados pelas funções nativas do equipamento. Além do mais, a interface de programação conta com um conjunto de cronômetros, contadores e variáveis analógicas e lógicas (SEL, 2019).

4.3.2 Metodologia de Testes

Como meio de avaliar o desempenho experimentalmente, foram realizadas análises de curto-circuito no sistema real modelado, apresentado na Subseção 4.1.2. O algoritmo da proteção diferencial transversal foi implementado diretamente no relé de proteção SEL-411L, por meio da interface *Free-Form SELOGIC control equation programming area* citada anteriormente.

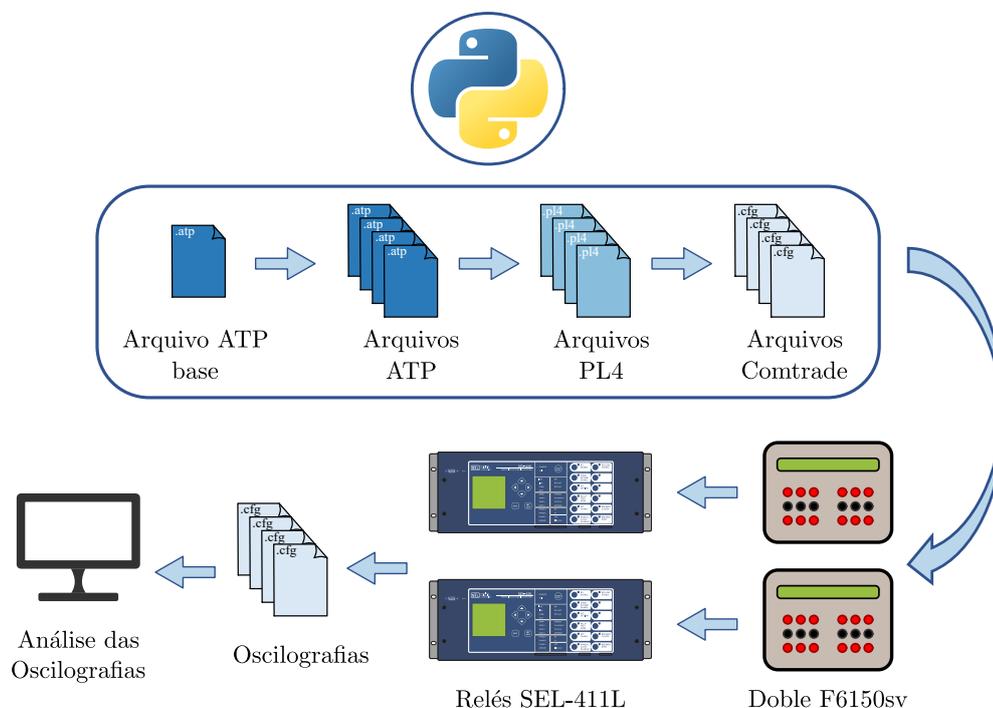
A função de distância, nativa do relé de proteção, foi parametrizada para cobrir 80% do circuito em análise em primeira zona e 100% do circuito em análise acrescido de 20% do circuito paralelo em segunda zona. Como a característica mho não possui uma alta cobertura para resis-

tência de falta, e faltas que envolvam ao terra podem ter resistências de falta elevadas, o uso do elemento quadrilateral é recomendado para elementos de terra. Contudo, geralmente elementos de fase detectam faltas em condições nas quais somente a resistência do arco elétrico entre os condutores está presente. Por isto, o uso da característica quadrilateral em elementos de fase geralmente não é exigido (CALERO *et al.*, 2009). Portanto, foram utilizadas as características mho e quadrilateral para os elementos de terra, e somente a mho para elementos de fase.

Os ajustes da proteção diferencial transversal foram baseados na análise de diversos cenários de forças de fontes, analisando o caso mais crítico de falta externa, semelhante à abordagem realizada na Seção 4.2.

A metodologia de testes, apresentada na Figura 4.5, consistiu na geração de uma base de casos de curto-circuito a partir de um arquivo ATP base, por meio de rotinas desenvolvidas em *Python*. O arquivo ATP base foi modificado para cada cenário de curto-circuito e automaticamente executado no *software* ATP. As oscilografias geradas pelo ATP no formato PL4 foram então convertidas para o formato COMTRADE ASCII 1999 (IEEE, 1999) com os sinais de interesse.

Figura 4.5. Metodologia de testes.



Fonte: Compilação do autor³.

³Elementos extraídos de SEL (2019) e <https://www.python.org/community/logos/>. Acesso em 27/10/2020.

A base de cenários de curto-circuito foi então reproduzida por equipamentos de testes de relés de proteção, modelo Doble F6150sv. Estes dispositivos foram então conectados aos relés de proteção SEL-411L. As atuações das funções de proteção foram obtidas por meio dos registros gerados pelos relés de proteção.

As análises realizadas nesta metodologia de testes consistiram nas avaliações das atuações e também do tempo de atuação de cada função de proteção. Cabe citar que para a proteção diferencial transversal, foi considerada uma janela de contagem de aproximadamente meio ciclo, de tal forma que o elemento declara falta após a detecção consecutiva das condições dadas em (3.14) dentro da janela citada.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados para a avaliação de desempenho das proteções diferencial transversal e de distância. A metodologia de análise se inicia com a apresentação dos resultados provenientes das simulações computacionais, realizadas no sistema teste apresentado no capítulo anterior. Esta metodologia engloba análises de regime transitório de curto-circuito e análises de sensibilidade paramétrica, descritas no capítulo anterior.

Por fim, são apresentados os resultados provenientes dos procedimentos experimentais de teste nos relés SEL-411L, por meio do sistema real apresentado no capítulo anterior. Nesta metodologia de avaliação, são realizadas análises de regime transitório de curto-circuito e análises em massa das atuações da proteção de distância e diferencial transversal, com o intuito de se obter um panorama geral a respeito do desempenho dos dois elementos de proteção.

5.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

O procedimento de análise das simulações computacionais se inicia com uma análise de regime transitório de curto-circuito, e em seguida são apresentados os resultados das análises de sensibilidade paramétrica das proteções.

5.1.1 Análise de regime transitório de curto-circuito

Para esta modalidade de análise, foi simulado um caso de curto-circuito, com o intuito de se observar os comportamentos das unidades de impedância e dos comparadores mho polarizados por memória de tensão de sequência positiva, no quesito da proteção de distância. Já para a proteção diferencial transversal, são analisadas as trajetórias no plano alfa de cada elemento da linha de transmissão de circuito duplo. O caso analisado é apresentado a seguir.

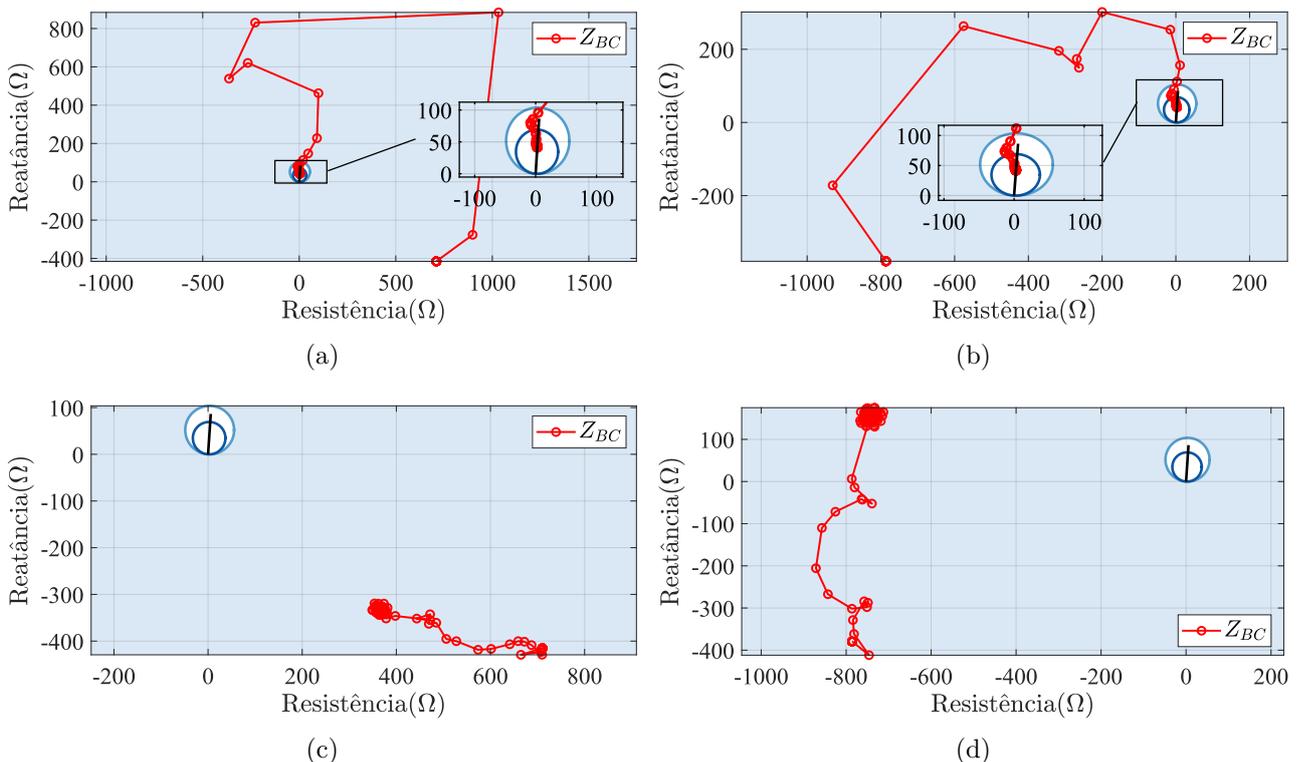
5.1.1.1 Caso 1 - Análise de um curto-circuito bifásico BC para terra aplicado em 50% do circuito 1

Este caso de análise transitória apresenta o comportamento das proteções de distância e diferencial transversal para um curto-circuito bifásico BC para terra franco, aplicado em 50% do circuito 1, considerando-se a defasagem angular entre as barras local e remota $\delta = 5^\circ$, SIR local (SIR_L) de 0,4 e remoto (SIR_R) de 0,3.

A Figura 5.1 apresenta as representações das unidades de impedância Z_{BC} no diagrama de impedâncias. A partir dos resultados encontrados, é possível ver por meio das unidades dos elementos local e remoto do circuito 1, apresentadas nas Figuras 5.1(a) e 5.1(b), que as impedâncias atingiram a primeira zona da característica mho autopolarizada, partindo da região característica da condição de carregamento para a região de regime permanente de falta.

Por meio da análise das unidades Z_{BC} dos elementos do circuito 2, apresentadas nas Figuras 5.1(c) e 5.1(d), é possível ver que as impedâncias se mantiveram em regiões externas às características mho autopolarizadas para os circuitos correspondentes, visto que a falta aplicada é externa para estes dois elementos.

Figura 5.1. Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



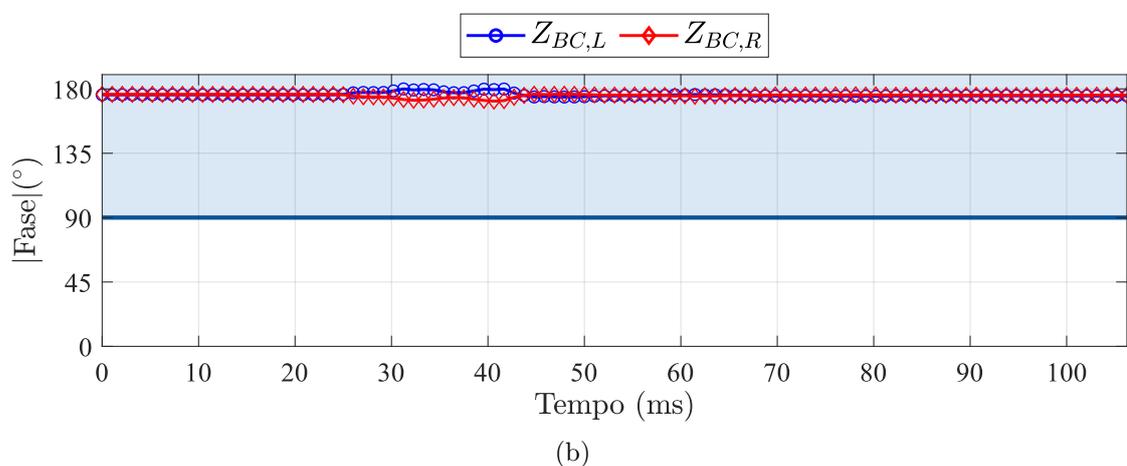
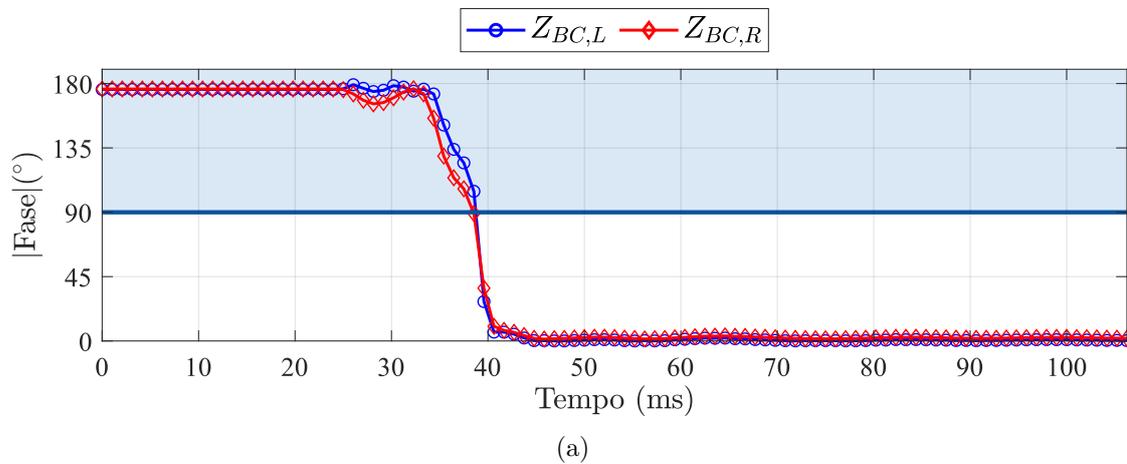
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.2 apresenta o comportamento dos comparadores de fase da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva, referentes às unidades Z_{BC} . Por meio da análise das unidades Z_{BC} dos elementos local ($Z_{BC,L}$) e remoto ($Z_{BC,R}$) do circuito 1, apresentado na Figura 5.2(a), é possível ver que ambas as unidades foram capazes de identificar a falta bifásica, visto que as saídas de ambos os comparadores retornaram fases com módulos inferiores a 90° .

Por meio da análise dos comparadores das unidades Z_{BC} do circuito 2, apresentados na Figura 5.2(b), é possível ver que as unidades Z_{BC} local e remota de tal circuito não detectaram a falta bifásica, visto que para os elementos do circuito 2, uma falta no circuito 1 é interpretada como uma falta externa.

Portanto, a proteção de distância foi capaz de promover uma atuação segura para o caso analisado, visto que somente os elementos do circuito 1 detectaram a falta aplicada.

Figura 5.2. Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



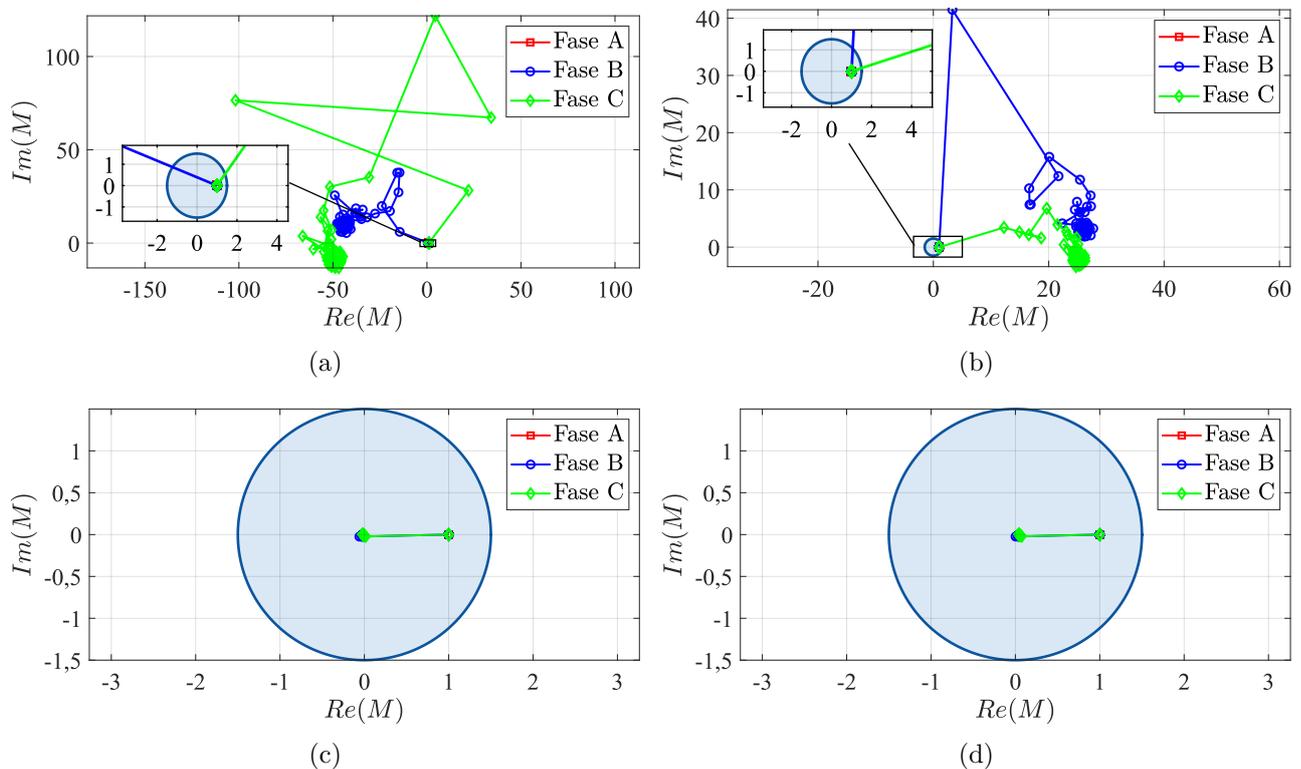
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.3 apresenta o comportamento da proteção diferencial transversal, por meio do plano alfa, para a falta bifásica aplicada. De acordo com os resultados obtidos, é possível ver que os elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.3(a) e 5.3(b) respectivamente, foram capazes de identificar a falta nas fases B e C, dado que seus respectivos coeficientes no plano alfa se deslocaram para regiões externas às características de restrição. Como a proteção diferencial transversal é segregada por fase, o elemento da fase A não detectou a falta aplicada, assim como esperado.

Por meio da análise dos elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.3(c) e 5.3(d), é possível ver que ambos os elementos não detectaram a falta no circuito 1, visto que os coeficientes no plano alfa permaneceram dentro de suas respectivas características de restrição. Com isto, a segurança e seletividade da proteção foram garantidas para este caso, dado que somente os elementos do circuito 1 atuaram para a falta aplicada.

Portanto, para este caso transitório, ambas as proteções de distância e diferencial transversal foram capazes de detectar o curto-circuito bifásico aplicado apenas para os elementos do circuito afetado, de tal forma que a segurança e a seletividade das proteções foram garantidas.

Figura 5.3. Análise de regime transitório de curto-circuito - Caso 1 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

5.1.2 Análises de Sensibilidade Paramétrica

As análises de sensibilidade paramétrica consistiram na análise das proteções em regime permanente de falta para variação de parâmetros de falta ou do sistema. Por conta disto, cinco casos desta modalidade de análise são apresentados neste trabalho, com o intuito de se observar o comportamento das proteções diferencial transversal e de distância.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos casos analisados, os quais contam com análises de variação da localização, resistência de falta, carregamento do sistema e força das fontes. A maioria dos casos analisados consiste em variações realizadas em curtos-circuitos monofásicos, visto que estes correspondem a 85% das ocorrências de curtos-circuitos em linhas de transmissão (PAITHANKAR; BHIDE, 2011).

O parâmetro m representa a localização da falta em relação ao terminal local, em porcentagem do comprimento da linha, enquanto R_f representa a resistência de falta. Já o parâmetro δ simboliza a defasagem angular entre as tensões nas barras local e remota. Por fim, os parâmetros SIR_L e SIR_R representam a relação SIR entre a impedância do equivalente de *Thévenin* e a impedância total da linha de transmissão de circuito duplo para os terminais local e remoto, respectivamente, assim como explicitado no capítulo anterior para o sistema teste.

Tabela 5.1. Casos simulados na análise de sensibilidade paramétrica.

Caso	Tipo de Falta	$m(\%)$	$R_f(\Omega)$	$\delta(\circ)$	SIR_L	SIR_R
1	ABC	Varia	0,0	5,0	0,4	0,3
2	AT	Varia	0,0	5,0	0,4	0,3
3	AT	50,0	Varia	5,0	0,4	0,3
4	AT	7,0	0,0	Varia	0,4	0,3
5	AT	Varia	0,0	5,0	0,4	Varia

Assim como na análise de regime transitório de curto-circuito, o desempenho da proteção de distância é avaliado por meio do diagrama de impedâncias e pelos comparadores de fase da característica $m\theta$ polarizada por memória de tensão de sequência positiva, enquanto que para a proteção diferencial transversal, é utilizada a representação no plano alfa.

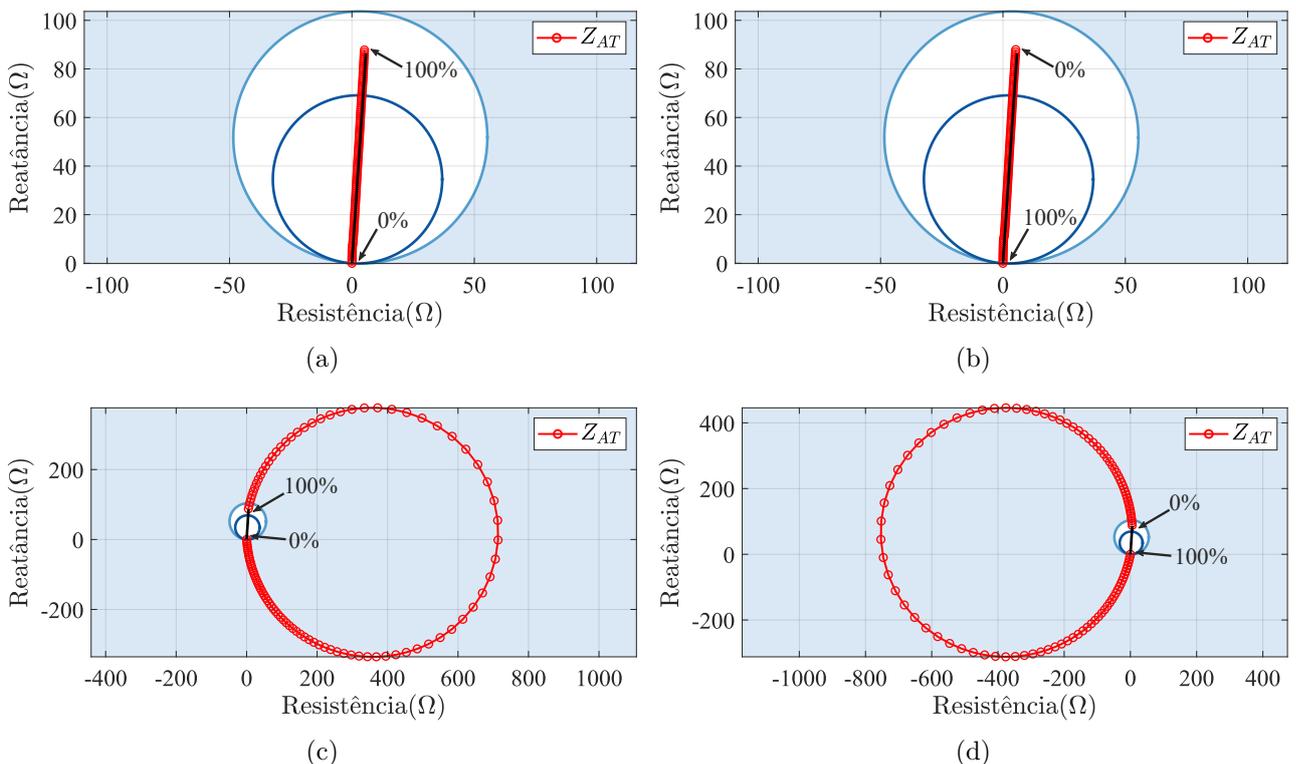
5.1.2.1 Caso 1 - Análise da variação da localização de falta para um curto-circuito trifásico franco aplicado no circuito 1

O primeiro caso de análise de sensibilidade paramétrica apresenta a variação da localização para um curto-circuito trifásico franco aplicado no circuito 1. Para isto, a localização da falta foi variada entre 0% e 100% do circuito 1, em passos de 1%.

A Figura 5.4 apresenta as representações no diagrama de impedâncias da unidade Z_{AT} , para cada um dos quatro elementos da linha de circuito duplo. Por meio da análise dos diagramas de impedâncias dos elementos do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.4(a) e 5.4(b), é possível ver que as impedâncias se mantiveram na reta característica da impedância do circuito em análise, o que é esperado, visto que para faltas trifásicas, a presença do acoplamento mútuo de sequência zero não afeta os elementos de impedância de terra.

Analisando-se os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.4(c) e 5.4(d), é possível ver que as impedâncias permanecem em regiões externas à primeira zona da característica mho autopolarizada.

Figura 5.4. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



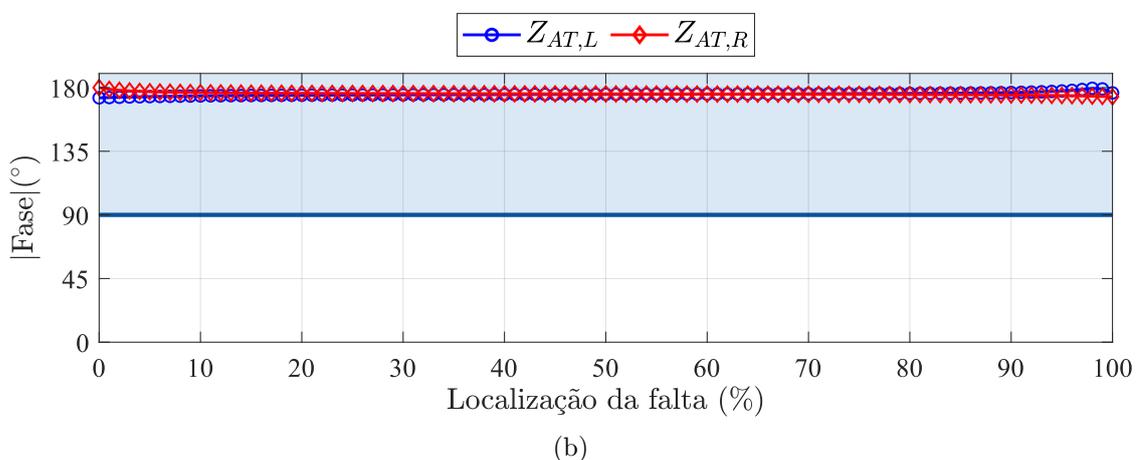
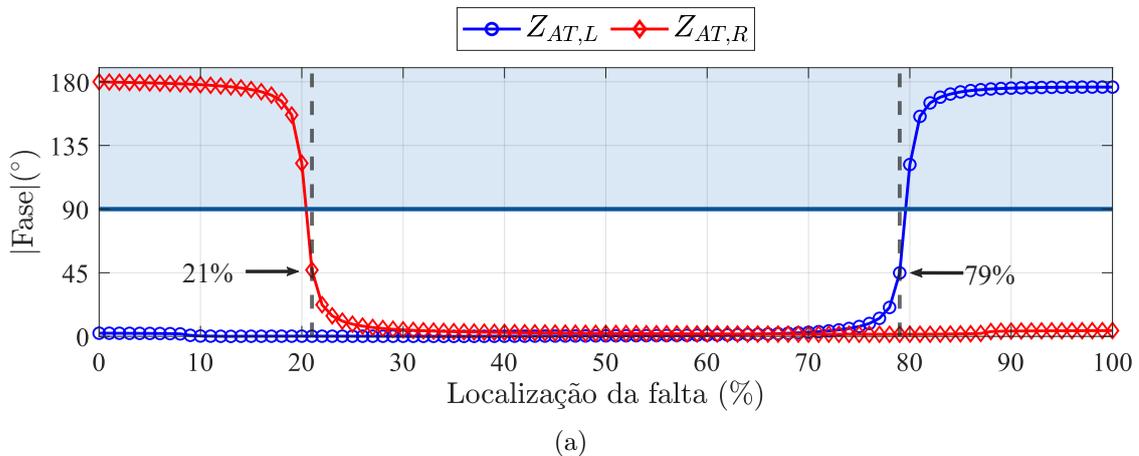
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.5 apresenta as respostas dos comparadores de fase das unidades Z_{AT} para os elementos local ($Z_{AT,L}$) e remoto ($Z_{AT,R}$). Por meio da análise dos elementos do circuito 1, apresentados na Figura 5.5(a), é possível ver que o elemento local deste circuito foi capaz de detectar as faltas aplicadas entre 0% e 79% do comprimento do circuito. Já o elemento remoto foi capaz de detectar faltas aplicadas entre 21% e 100%. Portanto, um subalcançe de apenas 1% foi verificado em cada terminal do circuito defeituoso e a falta trifásica foi detectada simultaneamente entre 21% e 79%, com cobertura em primeira zona simultânea de 58% do comprimento do circuito.

Já para os elementos do circuito 2, apresentados na Figura 5.5(b), é notado que nenhuma das faltas aplicadas foi detectada por meio dos comparadores, assim como esperado.

Portanto, através dos resultados encontrados, é visto que para o sistema apresentado, a proteção de distância foi capaz de atuar corretamente para os curtos-circuitos trifásicos aplicados.

Figura 5.5. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



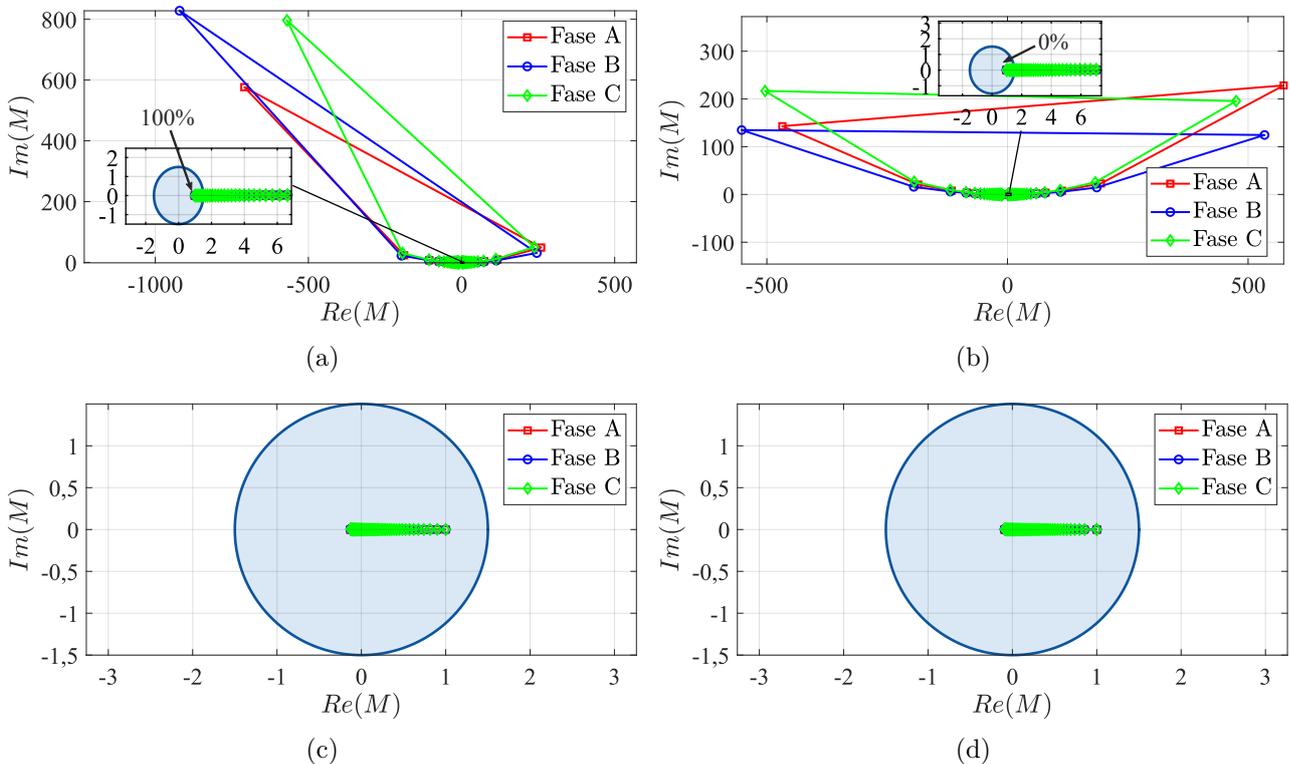
Fonte: Autoria Própria.

Por meio dos resultados obtidos para a proteção diferencial transversal, apresentados na Figura 5.6, foi observado que o elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.6(a), foi capaz de detectar faltas entre 0% e 95% do circuito em análise, enquanto o elemento remoto do mesmo circuito, apresentado na Figura 5.6(b), foi capaz de identificar faltas aplicadas entre 7% e 100%. Portanto, a falta trifásica foi detectada no circuito 1 entre 7% e 95%, o que resulta em uma cobertura em modo instantâneo de 88% no circuito 1.

Assim como esperado, os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.6(c) e 5.6(d), não detectaram a falta para nenhuma das localizações, visto que os coeficientes no plano alfa se mantiveram na região interna à característica de restrição.

Portanto, realizando-se a comparação entre a cobertura da proteção de distância e da proteção diferencial transversal, foi possível ver que a última foi capaz de cobrir 30% a mais do circuito 1 em modo instantâneo em relação à proteção de distância. Isto se deve ao fato da primeira zona da proteção de distância ser projetada como uma zona de subalcance, de tal forma que ela é configurada para não cobrir uma porcentagem do comprimento do circuito protegido, como meio de evitar o sobrealcance da função.

Figura 5.6. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 1 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

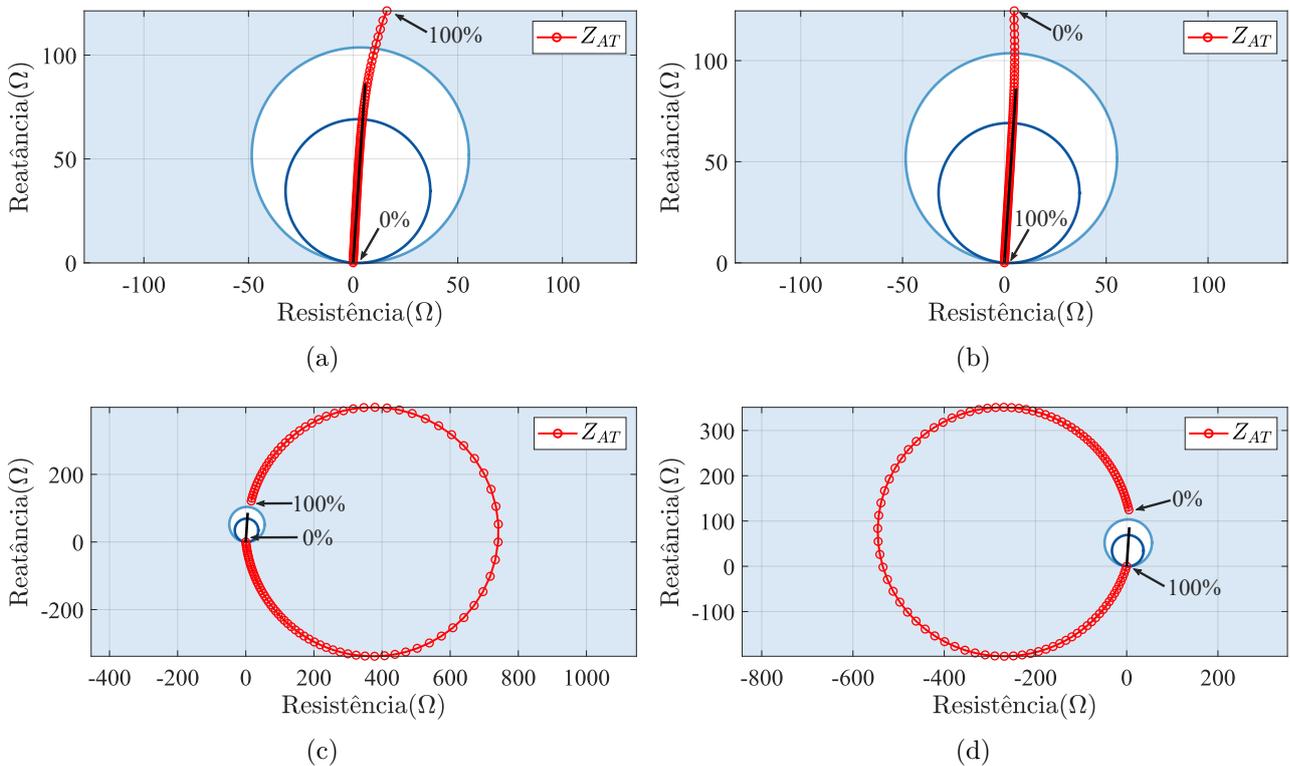
5.1.2.2 Caso 2 - Análise da variação da localização de falta para um curto-circuito monofásico franco aplicado no circuito 1

O segundo caso em análise consiste na variação da localização para um curto-circuito monofásico AT franco aplicado no circuito 1. Da mesma forma que no caso anterior, a localização da falta foi variada entre 0% e 100% do circuito 1, em passos de 1%.

Através do comportamento das impedâncias, apresentadas na Figura 5.7, é possível ver que, diferentemente do curto-circuito trifásico, a impedância medida se distanciou da reta característica da impedância do circuito para faltas mais distantes do elemento em análise, assim como apresentado nas Figuras 5.7(a) e 5.7(b). Este comportamento apresentado é influenciado pelo efeito do acoplamento de sequência zero, visto que os elementos de terra da proteção de distância são afetados por este fenômeno.

Por fim, analisando-se os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.7(c) e 5.7(d), é visto que as impedâncias permanecem em regiões externas à primeira zona da característica mho autopolarizada.

Figura 5.7. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



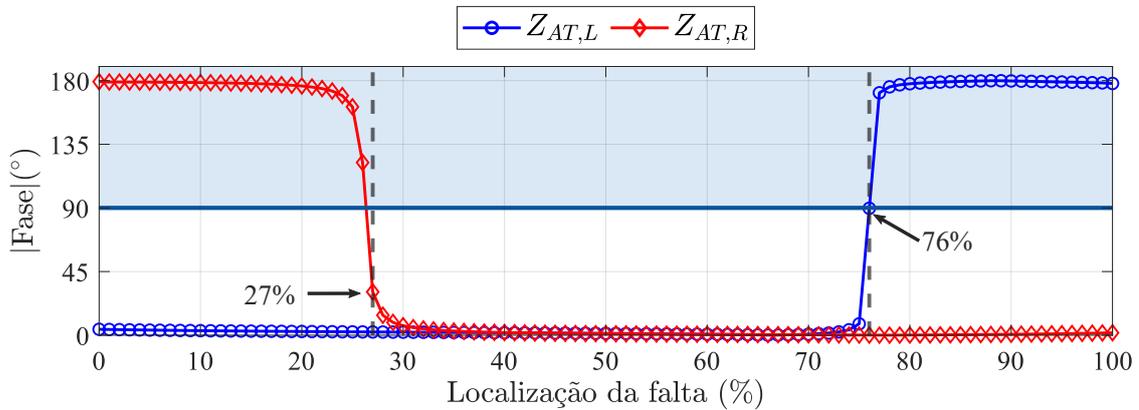
Fonte: Autoria Própria.

Contudo, como a impedância tende a obter valores de magnitude maiores em relação ao caso trifásico para o circuito defeituoso, um subbalcance na função de distância é esperado. Sendo assim, os comparadores dos elementos de distância são apresentados na Figura 5.8.

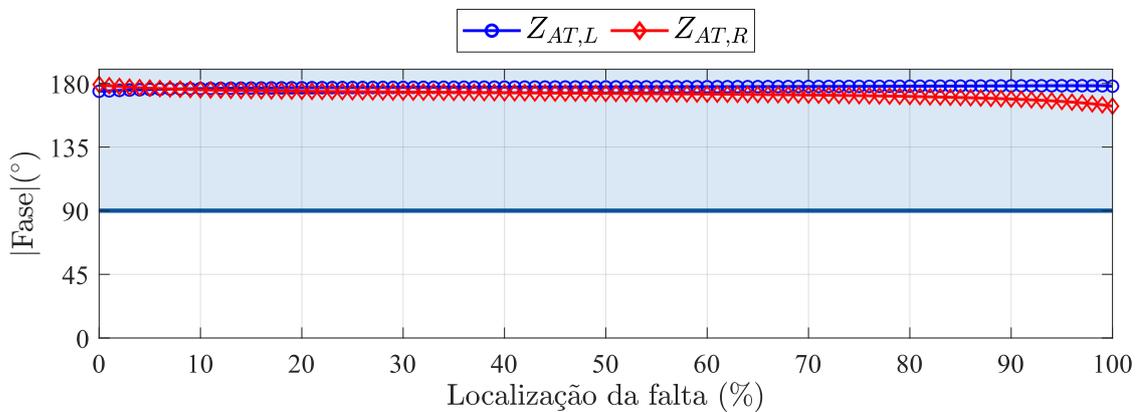
Analisando os comparadores das unidades Z_{AT} dos elementos do circuito 1, apresentados na Figura 5.8(a), foi visto que o elemento local de tal circuito foi capaz de identificar a falta monofásica para localizações entre 0% e 76%, enquanto o elemento remoto do mesmo circuito foi capaz de identificar a falta entre 27% e 100%. Portanto, a falta foi identificada simultaneamente em primeira zona no circuito 1 entre 27% e 76%, com cobertura de 49%, de tal forma que esta foi 9% inferior em relação ao caso trifásico apresentado no caso anterior.

Assim como esperado, os comparadores das unidades Z_{AT} dos elementos do circuito 2, apresentados na Figura 5.8(b), não identificaram a falta para nenhuma localização de falta simulada.

Figura 5.8. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



(a)



(b)

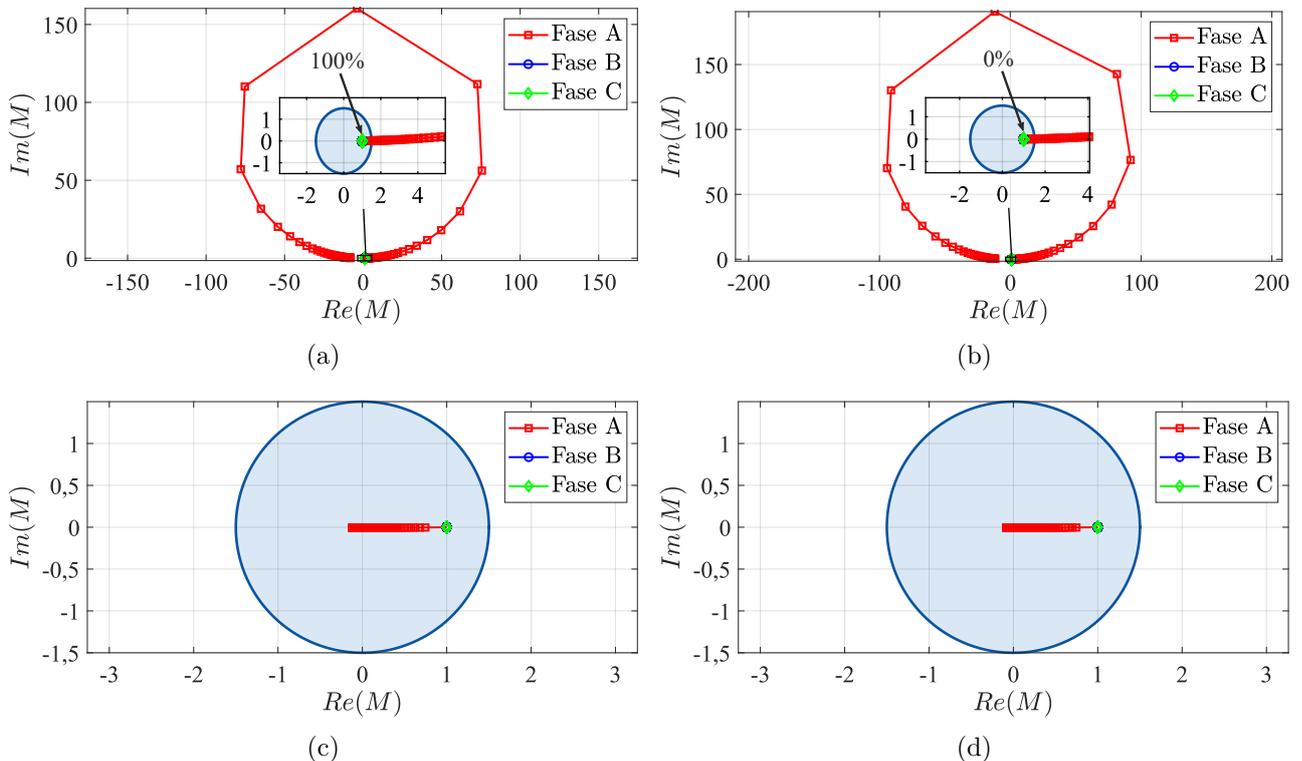
Fonte: Autoria Própria.

Por meio da análise da proteção diferencial transversal, apresentada na Figura 5.9, foi observado que o elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.9(a), foi capaz de identificar as faltas monofásicas aplicadas entre 0% e 95%, enquanto o elemento remoto do mesmo circuito, apresentado na Figura 5.9(b), foi capaz de identificar as faltas aplicadas entre 6% e 100%. Portanto, a falta monofásica foi detectada instantaneamente entre 6% e 95% do circuito 1, com cobertura em modo instantâneo de 89% do circuito 1. Assim como no caso anterior, os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.9(c) e 5.9(d), não detectaram falta para nenhuma das localizações de falta. Com isto, a seletividade de proteção foi garantida.

Comparando-se com o caso anterior, foi visto que a cobertura da proteção diferencial transversal foi semelhante para as faltas trifásica e monofásica, com o alcance 1% superior na última, diferentemente da proteção de distância, na qual houve uma redução na cobertura em primeira zona simultânea de 58% para 49%.

Comparando-se a cobertura da proteção de distância e da proteção diferencial transversal para as faltas monofásicas aplicadas, é visto que a última foi capaz de cobrir 40% a mais da linha em modo instantâneo em relação à proteção de distância.

Figura 5.9. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 2 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

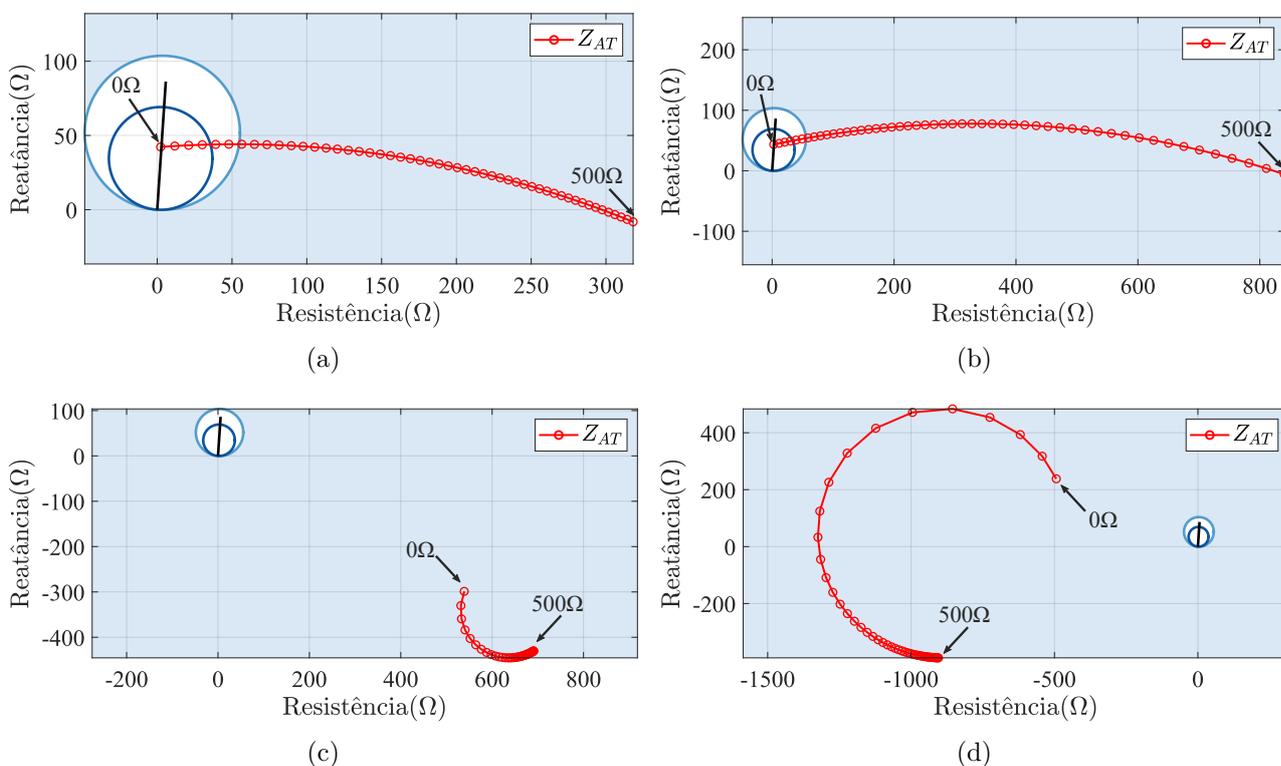
5.1.2.3 Caso 3 - Análise da variação da resistência de falta para um curto-circuito monofásico aplicado em 50% do circuito 1

O terceiro caso em análise consiste na variação da resistência de falta para um curto-circuito monofásico AT aplicado em 50% do circuito 1. Para isto, a resistência de falta foi variada entre 0Ω e 500Ω , em passos de 10Ω .

A Figura 5.10 apresenta o comportamento dos diagramas de impedâncias para as unidades Z_{AT} . Por meio das unidades local e remota do circuito 1, apresentadas nas Figuras 5.10(a) e 5.10(b) respectivamente, é possível ver que as impedâncias se distanciam da reta característica da impedância do circuito no ponto da localização da falta, a medida que a resistência de falta aumenta. Este comportamento é esperado, e é relatado na literatura como um deslocamento horizontal no diagrama de impedâncias.

Analisando-se o comportamento do diagrama de impedâncias para os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.10(c) e 5.10(d), é possível ver que ambos se mantiveram em regiões distantes às características mho autopolarizadas.

Figura 5.10. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



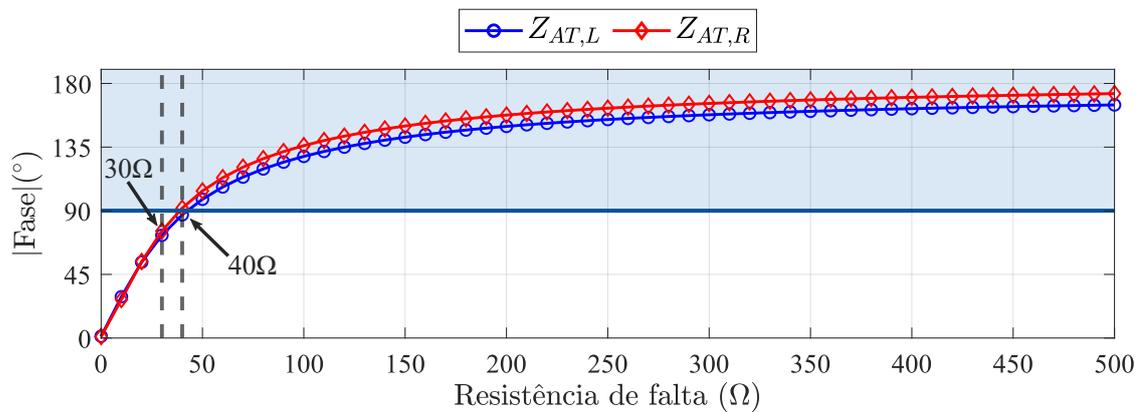
Fonte: Autoria Própria.

Através da análise dos comparadores de fase dos elementos do circuito 1, apresentados na Figura 5.11(a), é possível ver que o elemento local do referido circuito foi capaz de identificar a falta monofásica com resistências de falta entre 0Ω e 40Ω , enquanto o elemento remoto do mesmo circuito foi capaz de identificar a falta monofásica para resistências de falta entre 0Ω e 30Ω . Portanto, a falta foi identificada em primeira zona simultânea no circuito 1 para resistências de falta entre 0Ω e 30Ω .

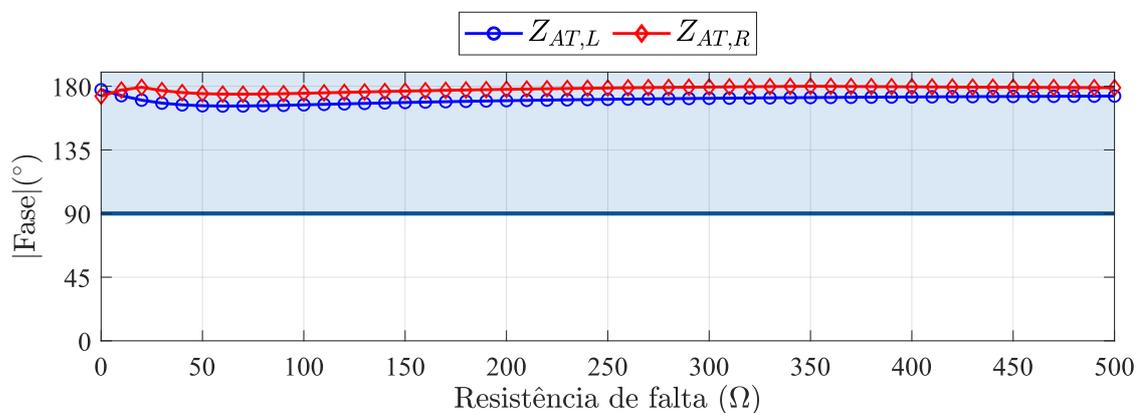
Assim como esperado, os elementos do circuito 2, apresentados na Figura 5.11(b), não detectaram a falta para nenhuma resistência de falta simulada.

Contudo, é de conhecimento que relés de proteção de distância podem contar com outras características de operação, como a quadrilateral, a qual possui como principal característica a maior cobertura para faltas com resistência de falta. No entanto, nesta análise contou-se apenas com o comportamento da característica mho polarizada.

Figura 5.11. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



(a)



(b)

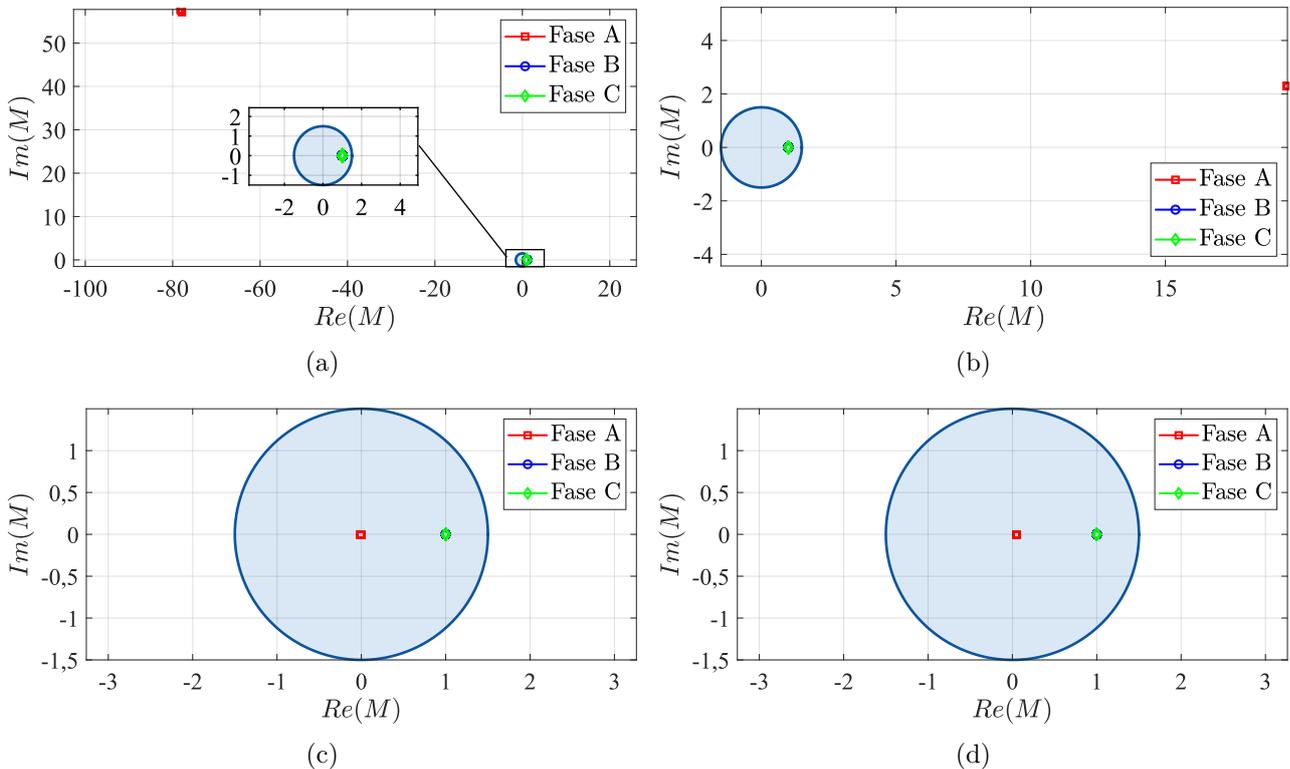
Fonte: Autoria Própria.

Através da análise do comportamento da proteção diferencial transversal, apresentado na Figura 5.12, é possível ver que ambos os elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas 5.12(a) e 5.12(b), foram capazes de detectar as faltas para todas as resistências de falta simuladas, enquanto que os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.12(c) e 5.12(d), não detectaram a falta para nenhum valor de resistência de falta.

Outra característica observada nos coeficientes do plano alfa mostrados na Figura 5.12 é que estes coeficientes se mantiveram concentrados em uma região específica do plano alfa, devido ao uso do método das correntes sobrepostas.

Portanto, é possível ver que a proteção diferencial transversal obteve um desempenho superior em relação à cobertura a resistências de falta, quando comparada com a característica mho polarizada da proteção de distância. Ainda mais, mesmo com a atuação em conjunto da característica mho com a característica quadrilateral, cujo esquema é geralmente utilizado na proteção de distância para se aumentar a cobertura de resistência de falta, ainda sim a proteção diferencial transversal pode obter desempenhos superiores, devido a sua alta sensibilidade para faltas resistivas, graças ao uso do método das correntes sobrepostas.

Figura 5.12. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 3 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

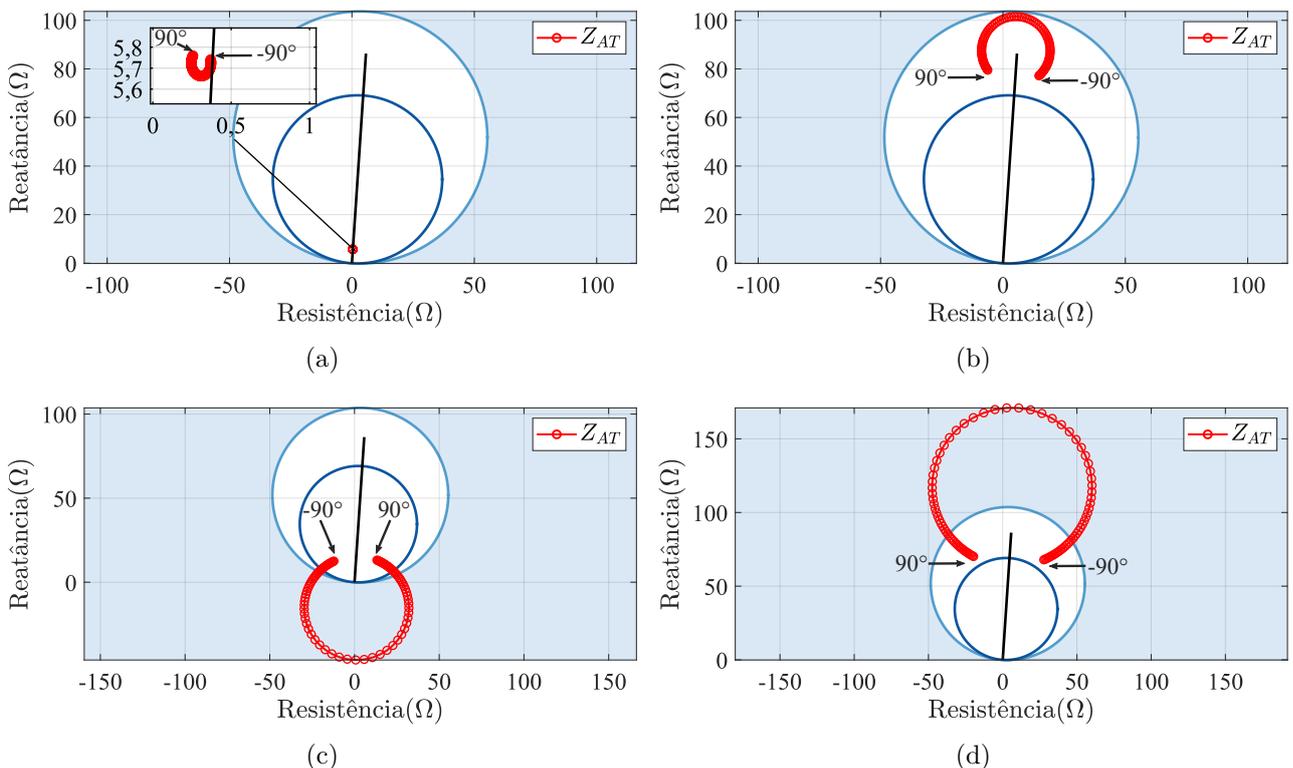
5.1.2.4 Caso 4 - Análise da variação do carregamento para curto-circuito monofásico aplicado em 7% do circuito 1

O quarto caso em análise consiste na variação do carregamento do sistema para um curto-circuito monofásico AT franco aplicado em 7% do circuito 1. Para isto, a defasagem angular entre os terminais local e remoto do sistema foi variada entre -90° e 90° , em passos de 2° .

Através do comportamento dos diagramas de impedâncias das unidades Z_{AT} , apresentadas na Figura 5.13, é possível ver que o elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.13(a), se manteve próximo da reta característica da impedância do circuito em análise, diferentemente do elemento remoto do mesmo circuito, apresentado na Figura 5.13(b), o qual houve uma ligeira alteração, porém este se manteve na segunda zona da característica mho autopolarizada.

Contudo, o comportamento mais divergente é relacionado aos elementos do circuito 2. Analisando-se o elemento local, apresentado na Figura 5.13(c), é possível ver que a impedância se localiza dentro da primeira zona da característica mho autopolarizada para determinados valores de defasagem angular. Já para o elemento remoto do mesmo circuito, apresentado na Figura 5.13(d), é visto que a impedância tende a se aproximar de tal característica.

Figura 5.13. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



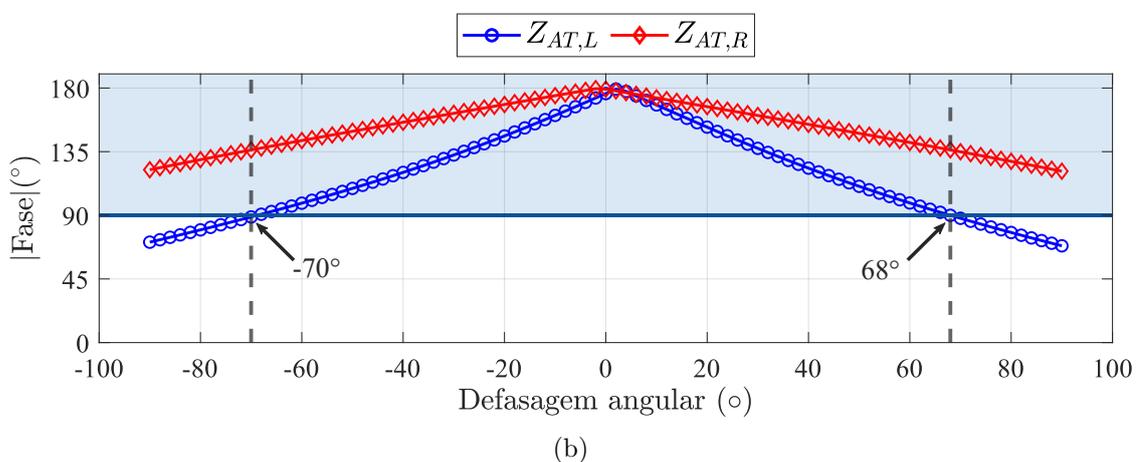
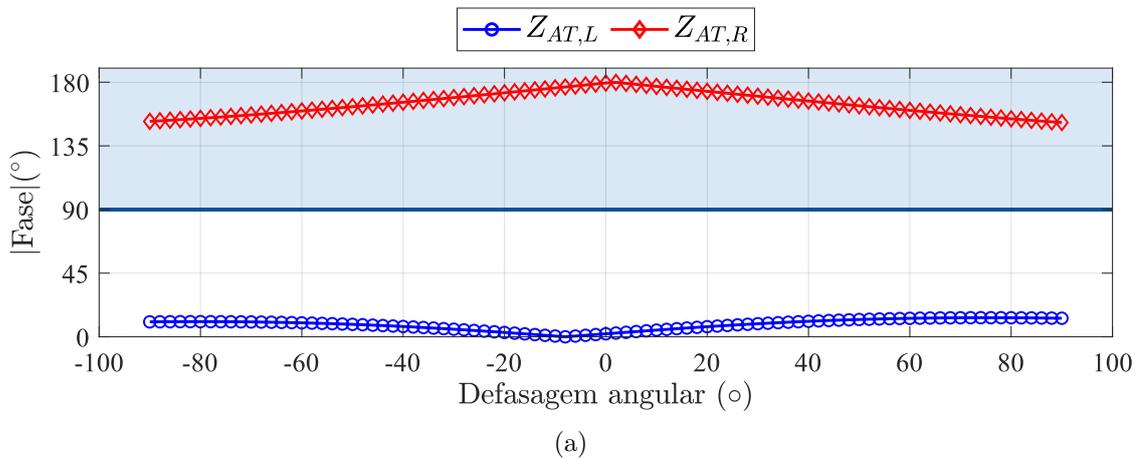
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.14 apresenta os resultados dos comparadores de fase para o caso analisado. Por meio da análise dos elementos do circuito 1, apresentados nas Figura 5.14(a), é possível ver que o elemento local de tal circuito foi capaz de identificar a falta para todas as defasagens angulares simuladas. Já o elemento remoto não detectou a falta para nenhum valor de defasagem angular.

Contudo, por meio da análise dos elementos do circuito 2, apresentados na Figura 5.14(b), é possível ver que o elemento local do circuito 2 detectou a falta monofásica para defasagens angulares entre -90° e -70° e também entre 68° e 90° . Portanto, para estas defasagens angulares apresentadas, a segurança do elemento local do circuito 2 não foi garantida.

Porém, mesmo sabendo que defasagens angulares na prática não atinjam valores tão elevados, visto que estas atingem valores limites próximos de 30° a 35° , estudos acerca das condições limites da proteção de distância, assim como o caso atual analisado, são justificáveis (GLOVER *et al.*, 2012).

Figura 5.14. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



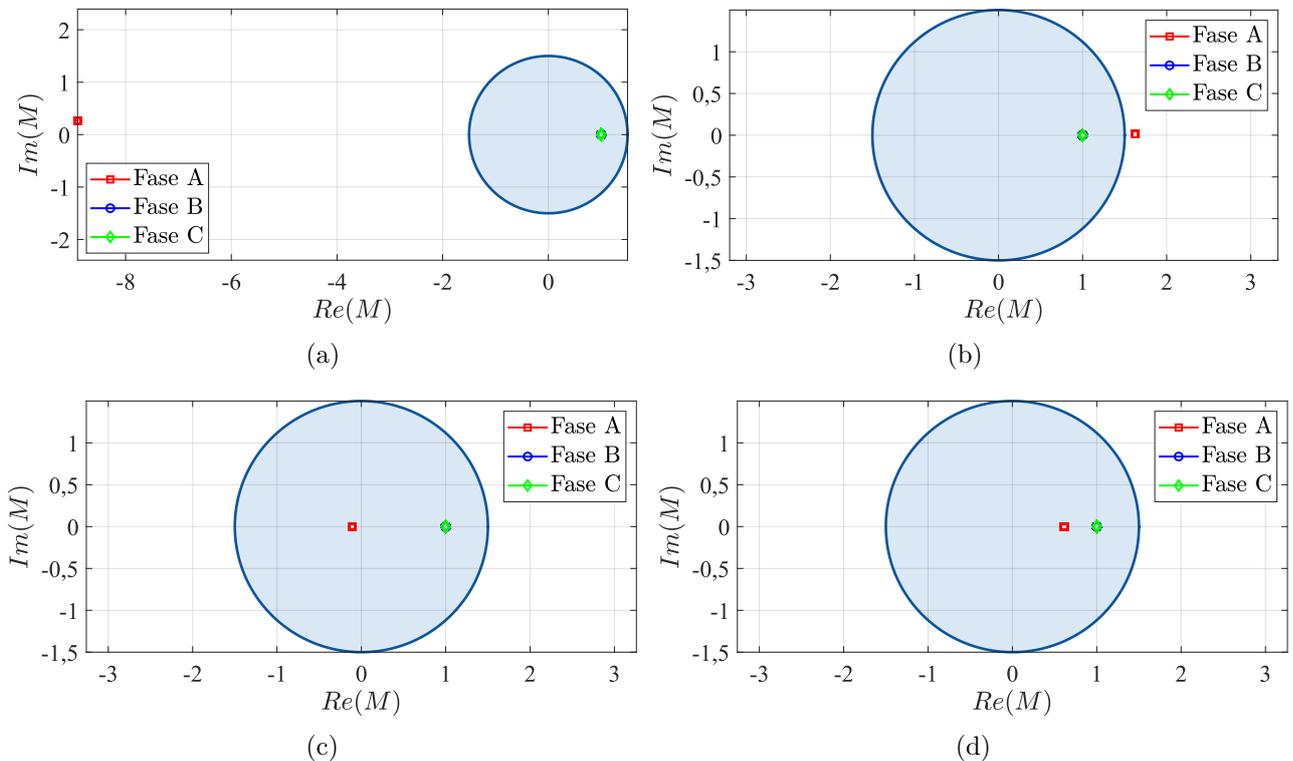
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.15 apresenta os resultados da proteção diferencial transversal para o caso estudado. Por meio da análise dos elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.15(a) e 5.15(b), é possível ver que ambos os elementos foram capazes de detectar as faltas aplicadas. Já os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.15(c) e 5.15(d), não detectaram as faltas aplicadas, assim como esperado.

Por meio do comportamento dos coeficientes no plano alfa, é possível ver que em todos os elementos avaliados, os coeficientes permaneceram na mesma região para todos os casos simulados. Isto se deve ao uso do método das correntes sobrepostas, o qual elimina a corrente de carga das correntes totais lidas. Com isto, somente a contribuição de falta pura é observada, a qual é dependente da localização da falta, além dos parâmetros da linha de transmissão e de falta.

Comparando o desempenho da proteção diferencial transversal com a proteção de distância, foi possível ver que a primeira foi capaz de promover uma proteção segura para todas as defasagens angulares simuladas, diferentemente da proteção de distância, a qual operou para o circuito são durante condições de carregamento elevado.

Figura 5.15. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 4 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



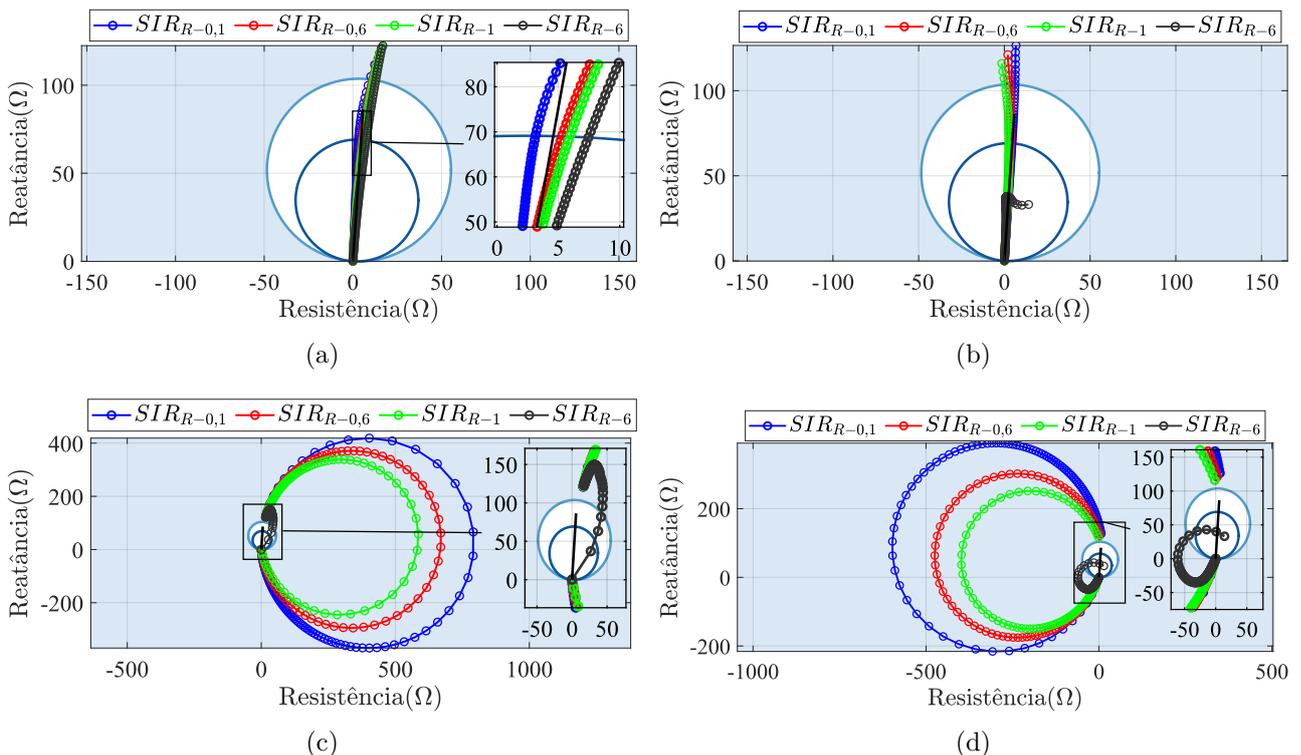
Fonte: Autoria Própria.

5.1.2.5 Caso 5 - Análise da variação da força da fonte remota para curtos-circuitos monofásicos aplicados no circuito 1

O quinto caso em análise apresenta o efeito da variação da força da fonte no desempenho das proteções analisadas. Para isto, o SIR do terminal remoto foi variado nos valores $SIR_R = [0, 1; 0, 6; 1; 6]$. Para compreender o efeito nas proteções, uma variação cruzada da localização para um curto-circuito monofásico AT franco também foi realizada para cada SIR_R , variando-se a localização de falta entre 0% e 100% do comprimento do circuito, em passos de 1%.

A Figura 5.16 apresenta o diagrama de impedâncias das unidades Z_{AT} dos quatro elementos da linha de circuito duplo, para cada valor de SIR_R simulado. Por meio da análise do elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.16(a), é possível ver a diferença entre as trajetórias das impedâncias para cada SIR_R . Analisando-se o elemento remoto do mesmo circuito, apresentado na Figura 5.16(b), é possível ver que as impedâncias tendem a percorrer trajetórias com magnitudes diferentes, de tal forma que a magnitude destas trajetórias diminuem com o aumento do SIR_R , o que pode indicar um sobrealcance de tal elemento para valores maiores de SIR_R .

Figura 5.16. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção de distância - Diagrama de impedâncias: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

Analisando-se os elementos do circuito 2, é possível ver que um aumento no SIR_R provocou uma redução na magnitude das curvas de impedâncias para variação da localização, como é possível ver pelas Figuras 5.16(c) e 5.16(d). Contudo, para o valor de SIR_R igual a 6, foi observado que a impedância permaneceu dentro da primeira zona da característica mho autopolarizada para determinadas localizações de falta.

A Figura 5.17 apresenta os resultados dos comparadores da característica mho polarizada para as unidades Z_{AT} . Cada curva apresentada na Figura representa os resultados do comparador para faltas aplicadas entre 0% e 100% do circuito 1, para cada SIR_R simulado.

Por meio da análise dos elementos do circuito 1, apresentados na Figura 5.17(a), é possível ver que o aumento do SIR_R resultou na redução do alcance do terminal local, cujas curvas são representadas por linhas sólidas. Esta redução é notória dado que à medida que o parâmetro SIR_R foi elevado, cada curva cruzou o limiar de 90° em uma localização inferior. Já para o elemento remoto do mesmo circuito, cujas curvas são representadas por linhas tracejadas, o comportamento oposto foi observado, visto que à medida que o parâmetro SIR_R foi elevado, o alcance de tal elemento também foi elevado.

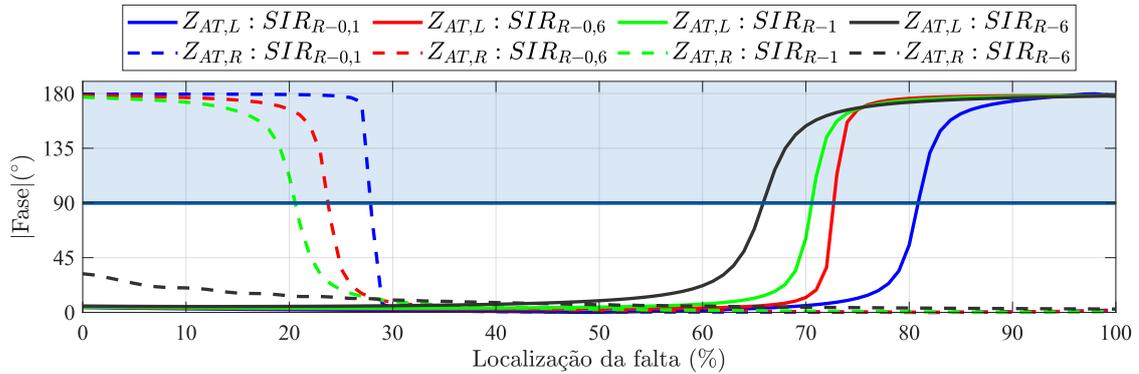
Já para os elementos do circuito 2, apresentados na Figura 5.17(b), é possível ver que houveram atuações errôneas em faltas localizadas próximas do terminal local, para o parâmetro $SIR_R=6$.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados das atuações em termos quantitativos. Por meio da tabela, é possível ver a redução da cobertura do elemento local do circuito 1 e o aumento na cobertura do elemento remoto do mesmo circuito.

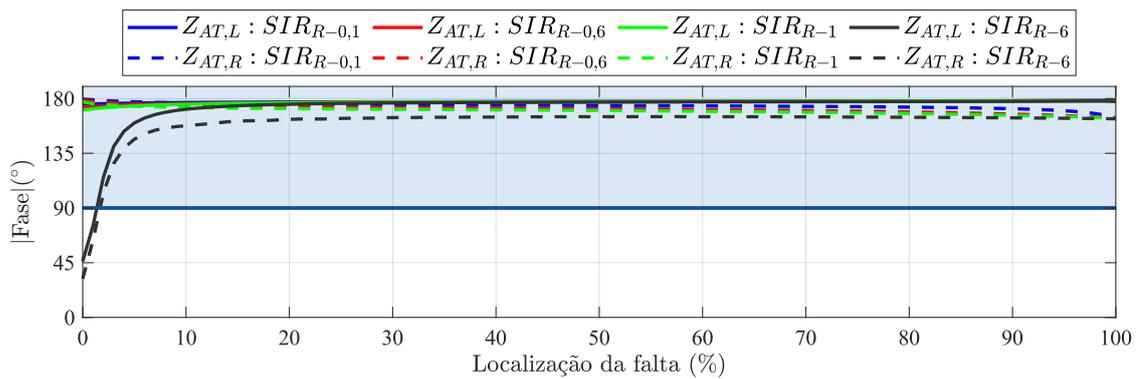
Considerando-se a cobertura no circuito 1, é visto que esta reduz de 52% para 48% para os valores de SIR_R entre 0,1 e 0,6. Este comportamento é devido à redução do alcance do elemento local ser maior em magnitude que o aumento do alcance no elemento remoto. Contudo, para valores de SIR_R maiores que 0,6, o fato do aumento no alcance do elemento remoto ser maior que a redução do alcance no elemento local ocasionou um aumento na cobertura em primeira zona simultânea. Ainda mais, para o valor de SIR_R de 6, o elemento remoto detectou a falta para todas as localizações de falta.

Analisando-se o comportamento dos elementos do circuito 2, é possível ver que para o parâmetro SIR_R igual a 6, ambos os elementos atuaram para faltas localizadas entre 0% e 1% do circuito 1, o que indica uma falha na atuação para o circuito 2.

Figura 5.17. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção de distância - Comparadores de fase: (a) Circuito 1 (b) Circuito 2.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5.2. Atuações dos elementos de distância.

SIR_R	Circuito	Atuações			Cobertura
		Local	Remoto	Total	
0,1	Circuito 1	0% – 80%	28% – 100%	28% – 80%	52%
	Circuito 2	–	–	–	–
0,6	Circuito 1	0% – 72%	24% – 100%	24% – 72%	48%
	Circuito 2	–	–	–	–
1	Circuito 1	0% – 70%	21% – 100%	21% – 70%	49%
	Circuito 2	–	–	–	–
6	Circuito 1	0% – 65%	0% – 100%	0% – 65%	65%
	Circuito 2	0% – 1%	0% – 1%	0% – 1%	1%

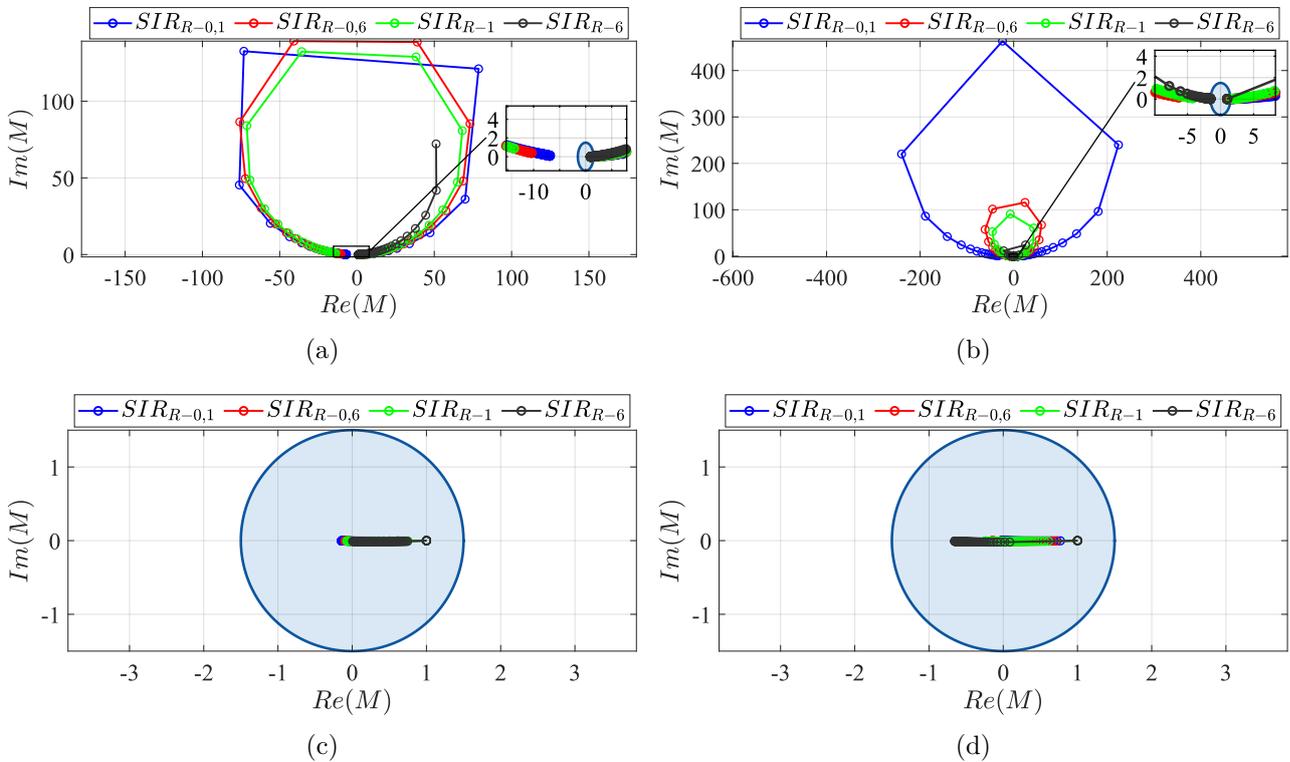
Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.18 apresenta o comportamento da proteção diferencial transversal no plano alfa dos elementos da fase A, para o caso analisado. Analisando-se as curvas de variação de localização para o elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.18(a), é possível ver que para os valores de SIR_R de 0,1 até 1, as curvas no plano alfa tiveram comportamentos semelhantes, se tornando mais diferente para o caso do SIR_R igual a 6.

Analisando-se agora o elemento remoto do circuito 1, apresentado na Figura 5.18(b), é possível ver que a família de curvas de variação de localização reduz sua magnitude com o aumento do SIR_R , visto que para este terminal, as correntes tenderam a ter amplitudes semelhantes com o aumento do SIR_R . Com isto, o coeficiente no plano alfa tende a reduzir sua magnitude, já que este representa a razão entre os fasores.

Analisando-se os elementos do circuito 2, apresentados nas Figuras 5.18(c) e 5.18(d), é possível ver que as faltas monofásicas não foram detectadas para nenhum dos valores de localização e SIR_R simulados.

Figura 5.18. Análise de sensibilidade paramétrica - Caso 5 - Proteção diferencial transversal - Plano alfa: (a) Circuito 1 - Local (b) Circuito 1 - Remoto (c) Circuito 2 - Local (d) Circuito 2 - Remoto.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados quantitativos das atuações de cada elemento da proteção diferencial transversal, bem como a cobertura resultante em cada circuito.

Analisando-se a cobertura do elemento local do circuito 1, é possível ver que o aumento do SIR_R fez com que a cobertura deste elemento fosse reduzida. Este é um comportamento esperado, visto que ao reduzir a força do elemento remoto por meio do aumento do SIR_R , a contribuição de falta do circuito 2 proveniente do terminal local aumenta. Com isto, a corrente de operação da proteção diferencial transversal tende a reduzir. Por conta disto, a cobertura do elemento local é reduzida com o aumento do SIR_R .

Já para o terminal remoto, a cobertura do elemento do circuito 1 se manteve aproximadamente constante para todos os valores de SIR_R simulados. Portanto, devido à redução das atuações do elemento local do circuito 1, a cobertura em modo instantâneo foi reduzida com o aumento do SIR_R , como é possível ver pela Tabela 5.3. Contudo, ainda sim a cobertura da proteção diferencial foi superior à cobertura da proteção de distância para todos os casos de SIR_R simulados, além do fato de garantir a seletividade da proteção, visto que nenhum elemento do circuito 2 detectou a falta.

Tabela 5.3. Atuações da proteção diferencial transversal.

SIR_R	Circuito	Atuações			Cobertura
		Local	Remoto	Total	
0,1	Circuito 1	0% – 98%	7% – 100%	7% – 98%	91%
	Circuito 2	–	–	–	–
0,6	Circuito 1	0% – 92%	5% – 100%	5% – 92%	87%
	Circuito 2	–	–	–	–
1	Circuito 1	0% – 89%	5% – 100%	5% – 89%	84%
	Circuito 2	–	–	–	–
6	Circuito 1	0% – 80%	6% – 100%	6% – 80%	74%
	Circuito 2	–	–	–	–

Fonte: Autoria própria.

5.2 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

As avaliações experimentais basearam-se em simulações realizadas nos relés SEL-411L, por meio do sistema real descrito na Seção 4.1.2, assim como relatado na seção 4.3. Como forma de avaliar o desempenho das proteções diferencial transversal e de distância, foram realizadas

três tipos de análises experimentais, as quais são resumidas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Casos experimentais simulados.

Caso	Tipo de Falta	$m(\%)$	$R_f(\Omega)$
1	BC	60%	0
2	AT	Varia	Varia
3	A ₁ T/C ₂ T	Varia	Varia

O primeiro caso de análise experimental consiste em um caso pontual de curto-circuito. Já os casos 2 e 3 são análises em massa das atuações das proteções.

As análises presentes nos casos 2 e 3 foram baseadas em abordagem estatísticas acerca das atuações das proteções diferencial transversal e de distância, para os cenários de falta simulados, em procedimento semelhante ao realizado por (HONORATO, 2020). Como forma de expor os resultados, foram apresentados gráficos de distribuição de probabilidade conjunta, em que é possível se analisar a distribuição de duas ou mais variáveis aleatórias que compõem o evento analisado, que para os casos avaliados são as atuações de cada elemento de proteção (ALPAYDIN, 2020).

Como meio de se estimar a densidade de probabilidade das variáveis utilizadas para as atuações, foram utilizados estimadores de densidade por kernel, conhecido do inglês como *Kernel Density Estimators*, os quais consistem em métodos não paramétricos de estimação da densidade de probabilidade de eventos aleatórios (ALPAYDIN, 2020).

Anexos aos gráficos são apresentadas as distribuições marginais individuais das variáveis em análise para cada elemento de proteção, com o intuito de se obter o comportamento individual da distribuição de cada variável analisada (ALPAYDIN, 2020).

5.2.1 Caso 1 - Análise pontual de curto-circuito bifásico aplicado em 60% do circuito 1

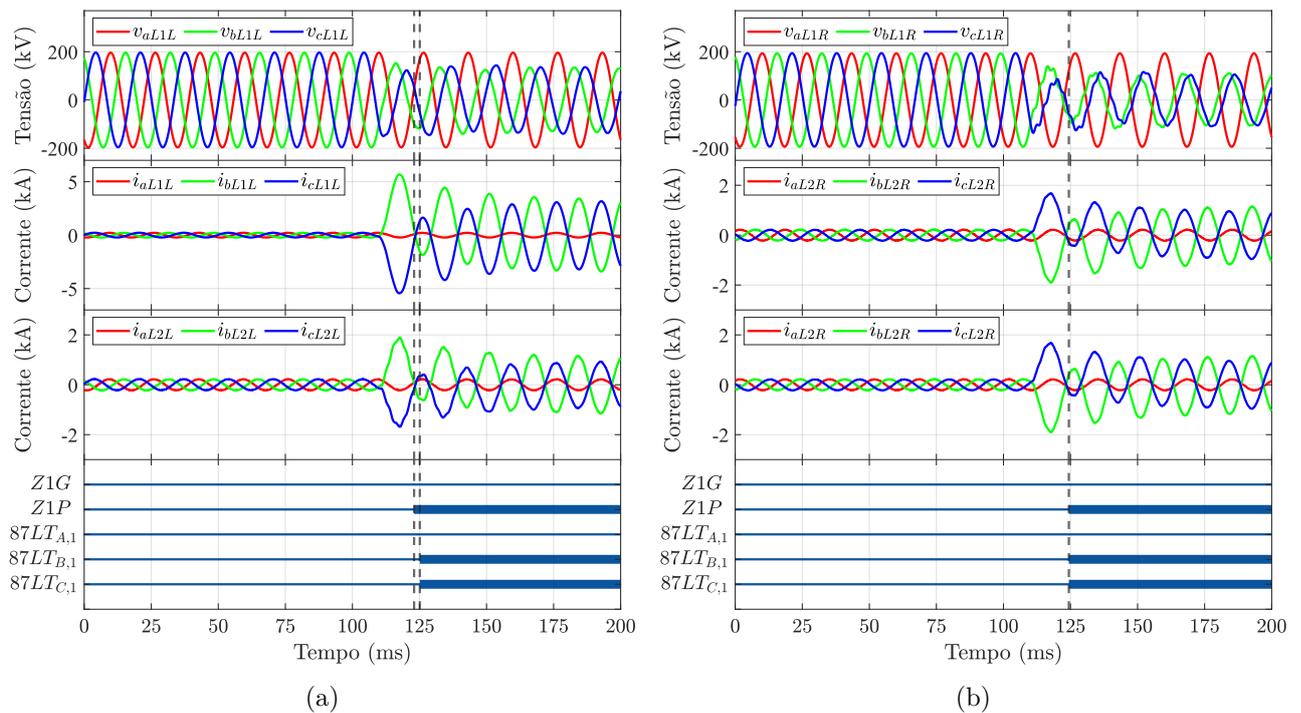
O primeiro caso experimental em análise consiste na análise pontual da atuação das proteções diferencial transversal e de distância. Este caso consiste na análise de um curto-circuito bifásico BC franco aplicado em 60% do circuito 1.

Os resultados encontrados são apresentados na Figura 5.19. O sinal $Z1G$ representa a variável lógica de atuação das unidades de terra do relé de proteção, enquanto $Z1P$ representa a variável lógica de atuação das unidades de fase (SEL, 2019). Já os sinais $87LT_{A,1}$, $87LT_{B,1}$ e $87LT_{C,1}$ representam as variáveis lógicas de atuação da proteção diferencial transversal para as fases A, B e C do circuito 1.

Através da análise dos elementos locais e remotos, apresentados na Figura 5.19(a) e 5.19(b), é possível ver que tanto as unidades de fase da proteção de distância quanto os elementos das fases B e C da proteção diferencial transversal foram capazes de atuar corretamente para os dois terminais. O tempo de atuação do elemento de distância do terminal local foi de aproximadamente 13 ms, enquanto para proteção diferencial transversal foi de aproximadamente 15 ms. Portanto, a proteção de distância obteve uma atuação mais rápida para o terminal local.

Já para o terminal remoto, foi visto que as proteções de distância e diferencial transversal atuaram no mesmo instante, com tempo de atuação aproximado de 14 ms. Os tempos de atuação encontrados para ambos os terminais são esperados, visto que estes estão próximos dos tempos de atuação típicos das proteções fasoriais, os quais geralmente oscilam entre 1 ciclo e 1,5 ciclo (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Figura 5.19. Avaliação Experimental - Caso 1 - Oscilografia: (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

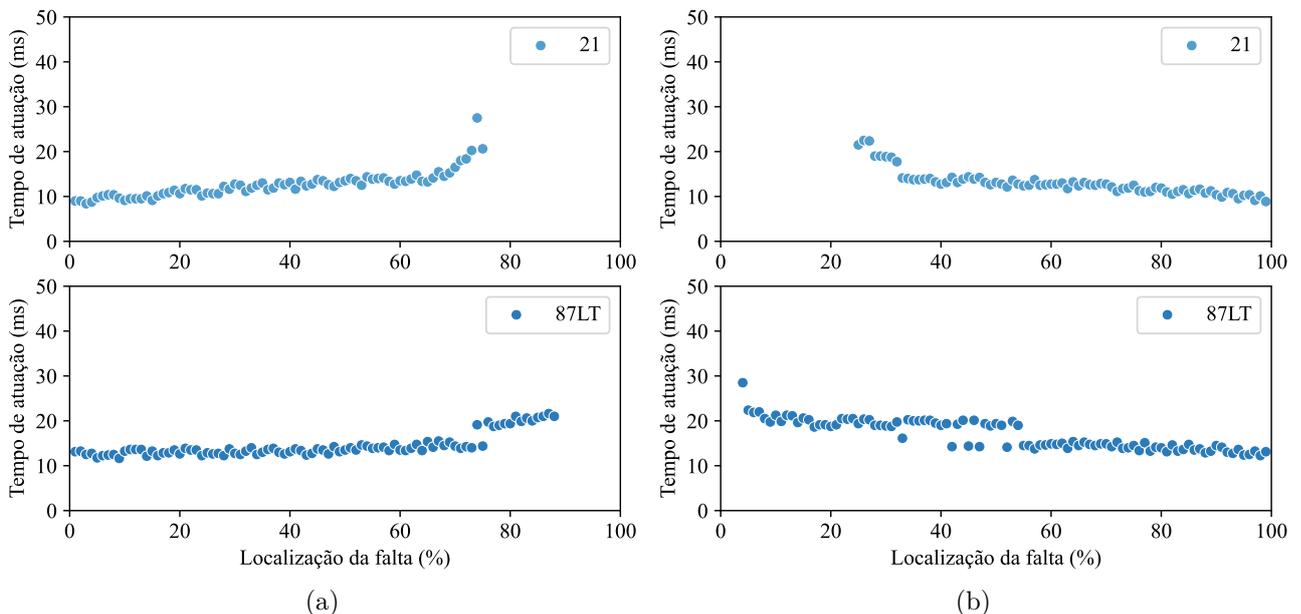
5.2.2 Caso 2 - Análise em massa do tempo de atuação para curtos-circuitos monofásicos aplicados no circuito 1

O segundo caso da análise experimental consiste da variação da localização e resistência de falta para um curto-circuito monofásico aplicado no circuito 1. Para isto, a localização foi variada entre 1% e 99% do circuito 1, em passos de 1%, e para cada localização de falta, foram simuladas faltas com resistência de falta entre 0 Ω e 200 Ω , em passos de 20 Ω , totalizando 1089 cenários de falta.

Na Figura 5.20 é apresentado o gráfico de tempo de atuação em função da localização de falta para o caso base de curto-circuito franco. De acordo com os resultados apresentados, foi constatado que para o caso franco, o elemento local do circuito 1 da proteção de distância detectou a falta aplicada entre 1% e 75%, enquanto o elemento remoto do mesmo circuito foi capaz de detectar a falta entre 25% e 99%. Portanto, a proteção de distância foi capaz de identificar a falta entre 25% e 75%, com cobertura em primeira zona simultânea de 50%.

Já para a proteção diferencial transversal, o elemento local do circuito 1 atuou entre 1% e 88% enquanto o elemento remoto do mesmo circuito atuou entre 4% e 99%. Portanto, a proteção diferencial transversal foi capaz de identificar a falta entre 4% e 88%, com cobertura em modo instantâneo de 84%.

Figura 5.20. Avaliação Experimental - Caso 2 - Tempo de atuação em função da localização da falta - Curto-circuito monofásico AT franco: (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.21 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta, considerando-se a localização da falta e o tempo de atuação para as 557 atuações do elemento local e 474 atuações do elemento remoto, reportadas da proteção de distância. Anexos aos gráficos, são apresentadas as distribuições marginais individuais da localização de falta e do tempo de atuação.

Já a Figura 5.22 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta para a resistência de falta e tempo de atuação, considerando-se o mesmo espaço amostral de atuações utilizados na Figura 5.21, porém com foco no comportamento da proteção de distância em relação à resistência de falta. Como o espaço amostral utilizado é o mesmo, as distribuições marginais individuais do tempo de atuação apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.22 para o mesmo terminal em análise são as mesmas.

Analisando-se o gráfico da distribuição de probabilidade conjunta para o localização de falta, é possível ver que para o elemento de distância local do circuito 1, apresentado na Figura 5.21(a), a distribuição das atuações se mantiveram próximas de 80% do circuito em análise, em concordância com o caso base apresentado na Figura 5.20, com uma densidade de atuações maior para faltas próximas do elemento em análise, o que leva a concluir que o elemento de distância consegue detectar mais faltas resistivas mais próximas de seu terminal. Comportamento semelhante é visualizado no elemento de distância remoto do circuito 1, apresentado na Figura 5.21(b).

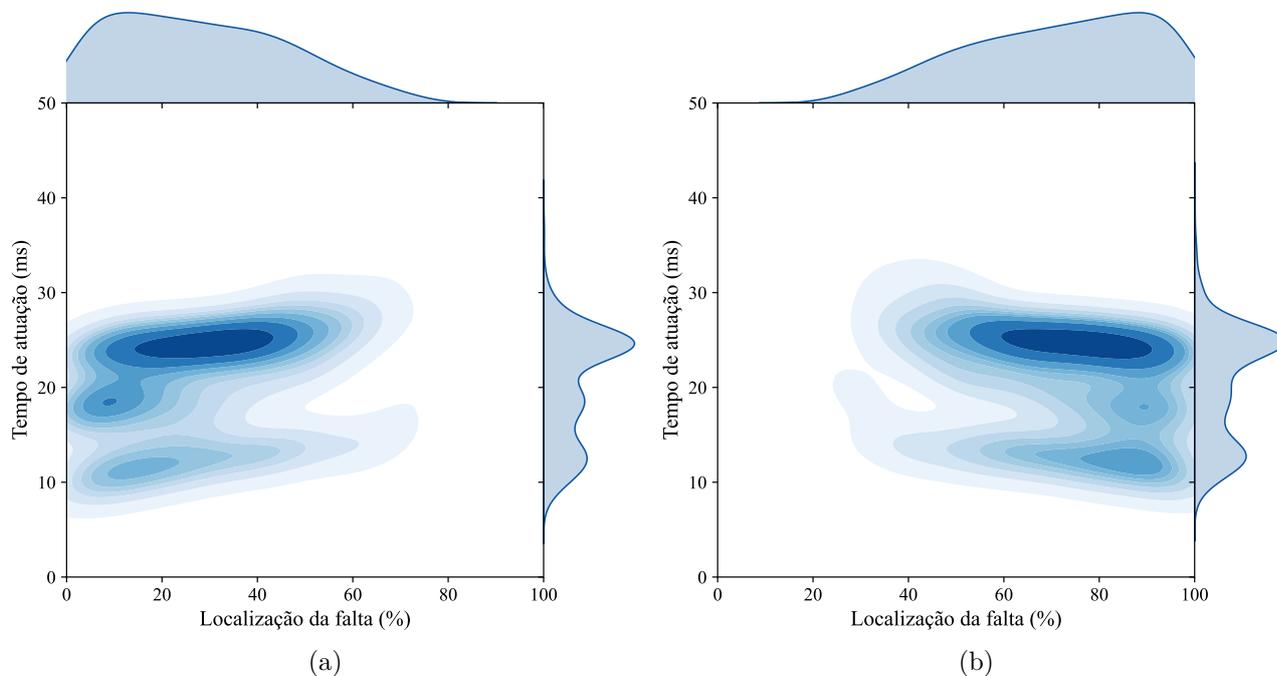
Por meio da análise da distribuição marginal do tempo de atuação de cada terminal, é possível ver que este esteve mais concentrado na faixa entre 20 e 30 ms. Esta margem de tempo de atuação é esperada, visto que proteções fasoriais geralmente atuam entre 1 ciclo e 1,5 ciclo (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Contudo, também há a presença de atuações na ordem dos 10 ms, visto que o relé consegue promover atuações em menos de um ciclo (SEL, 2019).

Analisando-se o mesmo espaço amostral das atuações da proteção de distância, porém considerando o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta da resistência de falta e do tempo de atuação, apresentado na Figura 5.22, é possível ver por meio da distribuição marginal da resistência de falta que as atuações estiveram mais concentradas em faltas com resistências de falta menores.

Por meio do gráfico da distribuição conjunta, ainda é possível ver que o tempo de atuação para faltas com baixa resistência foram inferiores aos tempos de atuação para faltas com re-

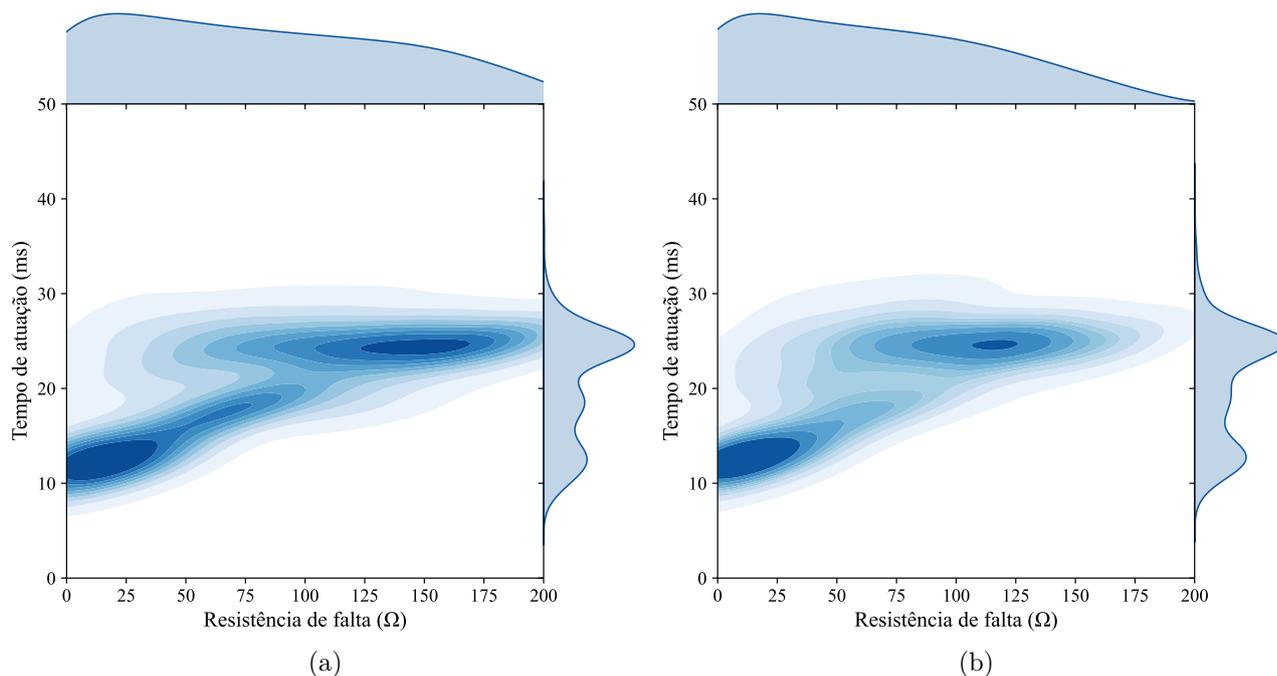
sistência de falta mais elevadas, tanto para o elemento local quanto para o elemento remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.22(a) e 5.22(b). Portanto, é possível ver que este parâmetro exerceu mais influência no tempo de atuação em relação à localização de falta.

Figura 5.21. Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.22. Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.23 apresenta a distribuição de probabilidade conjunta da localização e do tempo de atuação para a proteção diferencial transversal, na qual foram reportadas 895 atuações para o elemento local e 863 para o elemento remoto, ambas referentes ao circuito 1.

Considerando-se a distribuição marginal das atuações em função da localização de falta para os elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.23(a) e 5.23(b) respectivamente, é possível ver que a proteção diferencial transversal obteve uma distribuição de atuação mais ampla em relação à localização de falta, quando comparada à proteção de distância apresentada na Figura 5.21, já que a última esteve concentrada em uma região inferior a uma distância de 80% do comprimento do circuito em relação a cada terminal.

Além do mais, ainda é possível concluir que a distribuição de localização manteve um padrão mais constante ao longo do comprimento do circuito, de tal forma que a cobertura em relação à resistência de falta para cada localização foi semelhante. Este comportamento diferencia-se do apresentado pela proteção de distância na Figura 5.21, visto que esta foi capaz de detectar mais faltas resistivas próximas do terminal em análise.

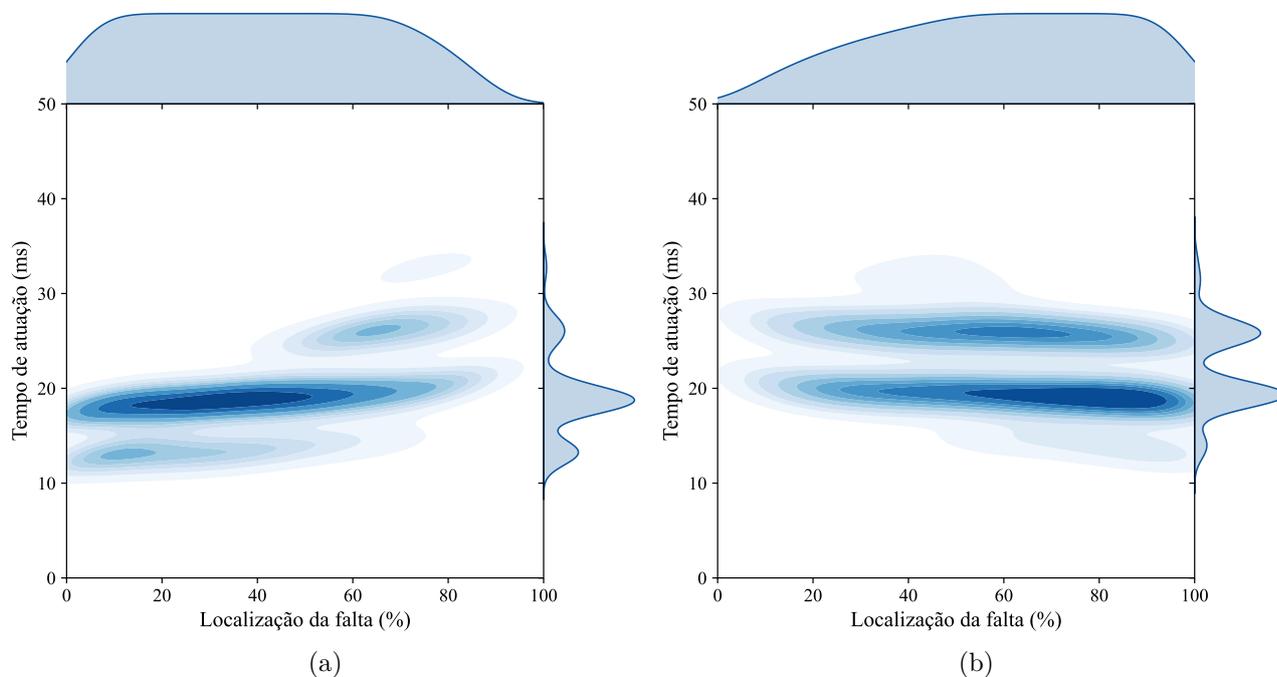
Analisando-se o tempo de atuação dos dois elementos do circuito 1, é possível ver que estes estiveram mais concentrados na faixa dos 20 ms, sendo que para o elemento local a proporção das atuações próxima dos 12 ms foi superior à encontrada para o elemento remoto do mesmo circuito, o que pode estar relacionado com a maior contribuição de falta advinda do terminal local.

Já a figura 5.24 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta para a resistência da falta e o tempo de atuação para as atuações dos elementos local e remoto do circuito 1, para os mesmos espaços amostrais de atuações apresentados na Figura 5.23. Considerando-se a distribuição marginal das atuações da resistência de falta para os elementos local e remoto, apresentados nas Figuras 5.24(a) e 5.24(b), é possível ver que a distribuição das atuações se manteve aproximadamente constante para os dois elementos, diferentemente da proteção de distância, apresentada na Figura 5.22, a qual tende a ter um maior decréscimo na distribuição de atuações com o aumento da resistência de falta, como observado na Figura 5.22 para a curva de distribuição marginal para resistência de falta.

Portanto, por meio dos resultados obtidos, é possível ver que além de proporcionar uma maior quantidade de atuações para os cenários de falta simulados, a proteção diferencial trans-

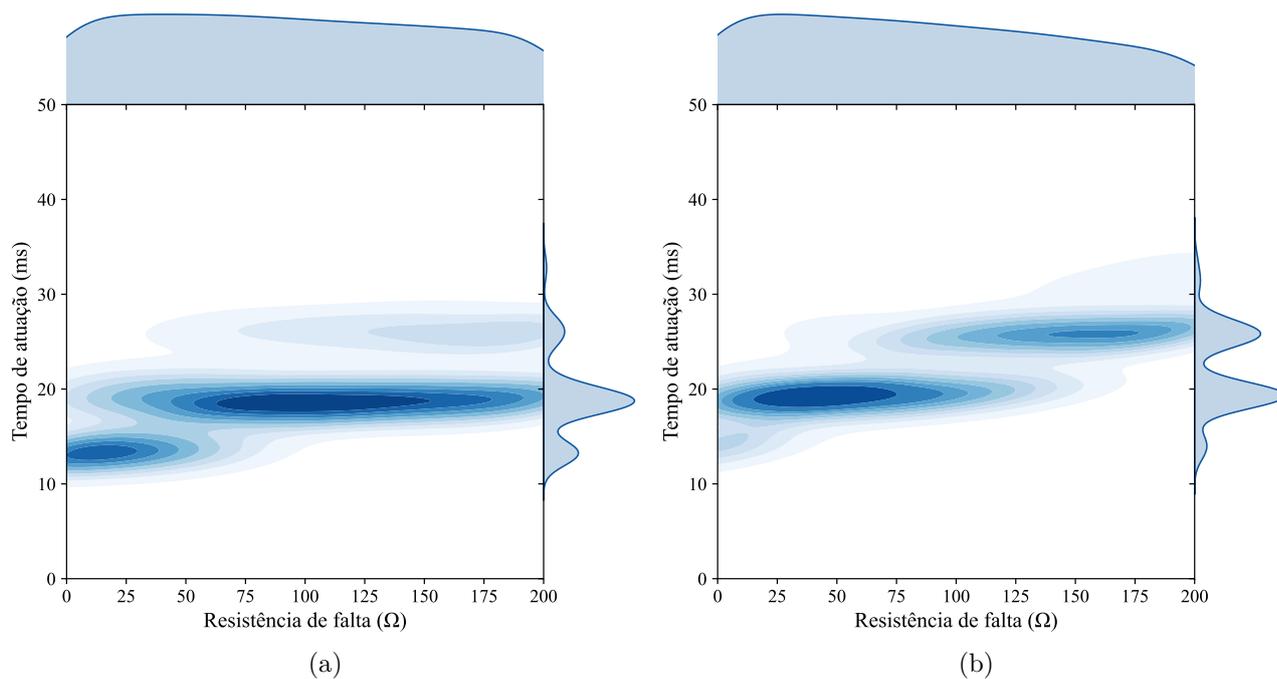
versal foi capaz de promover um comportamento mais constante em relação à resistência de falta para cada localização.

Figura 5.23. Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.24. Avaliação Experimental - Caso 2 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

5.2.3 Caso 3 - Análise em massa do tempo de atuação para curtos-circuitos *cross-country* aplicados na fase A do circuito 1 e fase C do circuito 2

O terceiro caso da análise experimental consiste na simulação em massa da variação da localização e resistência de falta para um curto-circuito *cross-country*, o qual consiste em dois curtos-circuitos monofásicos que ocorrem em localizações distintas. Para o caso analisado, cada curto-circuito monofásico ocorre em um circuito diferente. Esta modalidade de falta apresenta problemáticas na proteção de distância devido ao efeito do acoplamento mútuo entre os circuitos (COOK, 1977).

Para avaliar esta modalidade de falta, um curto-circuito monofásico franco na fase C foi aplicado em 7% do circuito 2, enquanto foram variadas as localizações e resistências de falta para um curto-circuito monofásico na fase A aplicado no circuito 1. Neste cenário, assim como no caso anterior, a localização de falta no circuito 1 foi variada entre 1% e 99%, em passos de 1%, e para cada localização de falta, foram simuladas faltas com resistência de falta entre 0 Ω e 200 Ω , em passos de 20 Ω , totalizando 1089 cenários de falta.

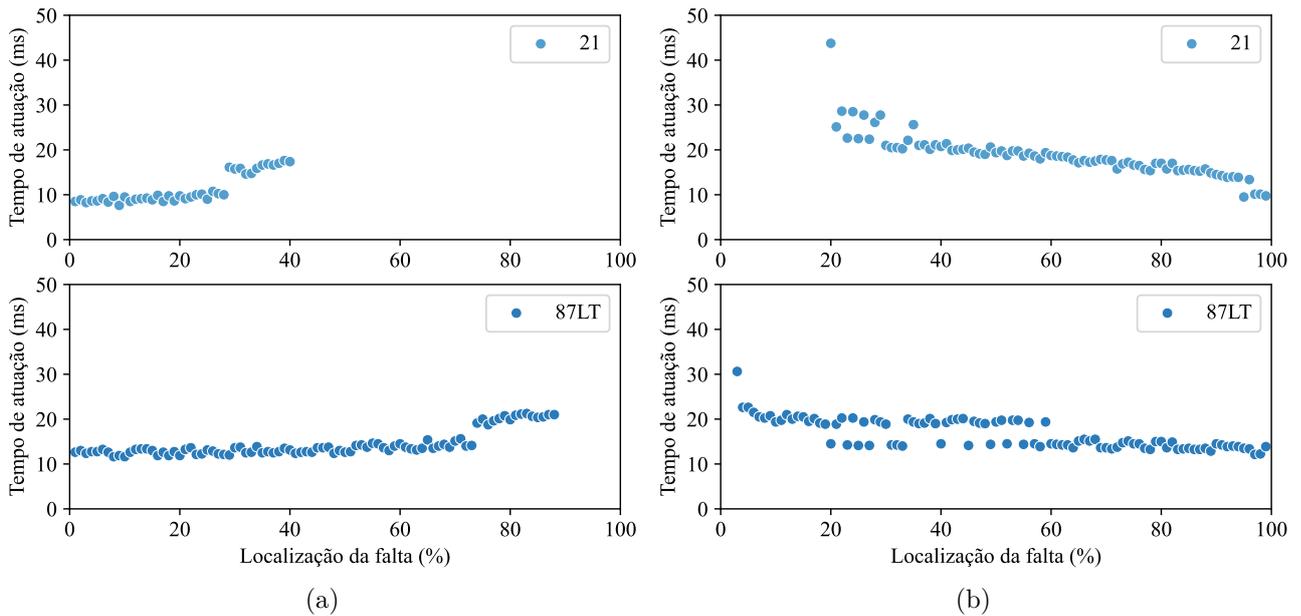
A Figura 5.25 apresenta o tempo de atuação em função da localização de falta para o caso base com resistência de falta nula, para as proteções de distância e diferencial transversal referentes ao circuito 1. Por meio dos resultados, é possível ver que o elemento de distância local do circuito 1 detectou faltas entre 1% e 40%, enquanto o elemento remoto foi capaz de detectar faltas entre 20% e 99%. Portanto, a falta monofásica franca na fase A foi detectada entre 20% e 40%, com cobertura em primeira zona simultânea de 20% do comprimento do circuito 1.

Portanto, a partir deste caso base, é possível ver que a proteção de distância sofreu um grande subalcançe em seu terminal local, o que reduziu drasticamente a cobertura em primeira zona simultânea.

Já a proteção diferencial transversal atuou entre 1% e 88% para o elemento local e 3% e 99% para o elemento remoto. Portanto, a falta monofásica na fase A foi detectada entre 3% e 88%, com cobertura em modo instantâneo de 85% do comprimento do circuito.

Por meio da análise da proteção diferencial transversal, é possível ver que a cobertura em modo instantâneo foi aproximadamente a mesma em relação à falta monofásica apresentada no caso anterior. Portanto, é possível ver que o desempenho da proteção diferencial transversal não foi afetado pela falta aplicada no circuito paralelo, diferentemente do encontrado pela proteção de distância para o terminal local.

Figura 5.25. Avaliação Experimental - Caso 3 - Tempo de atuação em função da localização da falta - Curto-circuito *cross-country* franco - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.26 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta, considerando-se a localização da falta e o tempo de atuação para as atuações do elemento de distância, no qual foram reportadas 55 atuações para o elemento local e 152 para o elemento remoto. Anexos aos gráficos, são apresentadas as distribuições marginais individuais da localização de falta e do tempo de atuação.

Por meio da análise do resultado obtido para o elemento local do circuito 1, apresentado na Figura 5.26(a), é possível ver por meio da distribuição marginal das atuações em função da localização de falta que as atuações se concentraram próximo dos 40%, em concordância com o caso base demonstrado anteriormente. Ainda mais, é possível ver também que as atuações mantiveram mais concentradas para localizações entre 0% e 20%, visto que para estas localizações, houveram mais detecções para os valores simulados de resistência de falta.

Por meio da análise das atuações do elemento de distância remoto do circuito 1, apresentado na Figura 5.26(b), é possível ver que o alcance obtido para este elemento foi maior que o obtido para o elemento local, com atuações próximas de 80% em relação ao terminal remoto, assim como no caso base. Além disto, as atuações apresentaram um comportamento mais distribuído ao longo do circuito em análise, diferentemente do elemento local, na qual as atuações estiveram mais concentradas para faltas mais próximas da localização do elemento.

Portanto, é possível ver nesta análise, em conjunto com os resultados apresentados no caso base, que a proteção de distância para o elemento local sofreu um considerável subalcance. Este comportamento é observado durante esta modalidade de faltas, assim como reportado por Cook (1977), visto que pode estar relacionado com o efeito do acoplamento mútuo entre circuitos, devido ao nível de correntes existentes no circuito paralelo. Além disto, a existência da falta no circuito 2 também pode comprometer os elementos de supervisão direcionais de terra aplicados na proteção de distância do relé, visto que a falta no circuito 2 é uma falta externa ao circuito 1, além de ser uma falta reversa para o elemento local do circuito 1.

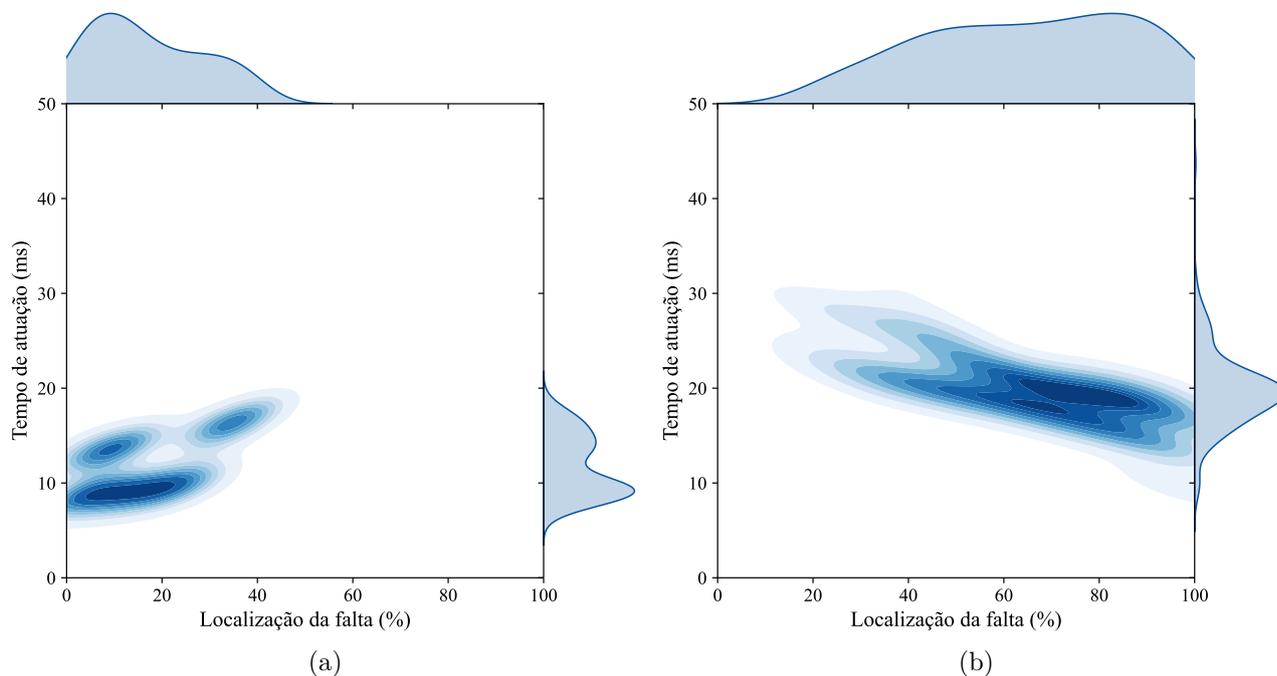
Já a Figura 5.27 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade conjunta para a resistência de falta e tempo de atuação, considerando-se o mesmo espaço amostral de atuações utilizados na Figura 5.26.

Por meio dos resultados obtidos, é possível ver que as atuações dos elemento local do circuito 1 estiveram mais concentradas para resistências de falta próximas de zero, de acordo com a Figura 5.26(a), enquanto que para o elemento remoto, apresentado na Figura 5.26(b), as atuações estiveram mais concentradas para as resistência de falta de 0 e 20 Ω .

Contudo, comparando-se com o curto-circuito monofásico analisado no caso anterior, cujo resultado foi apresentado na Figura 5.22, é possível ver que a cobertura para resistência de falta foi drasticamente reduzida para a falta *cross-country*, visto que para o caso anterior, foram reportadas coberturas para resistência de falta maiores que 100 Ω , o que não ocorreu para este caso.

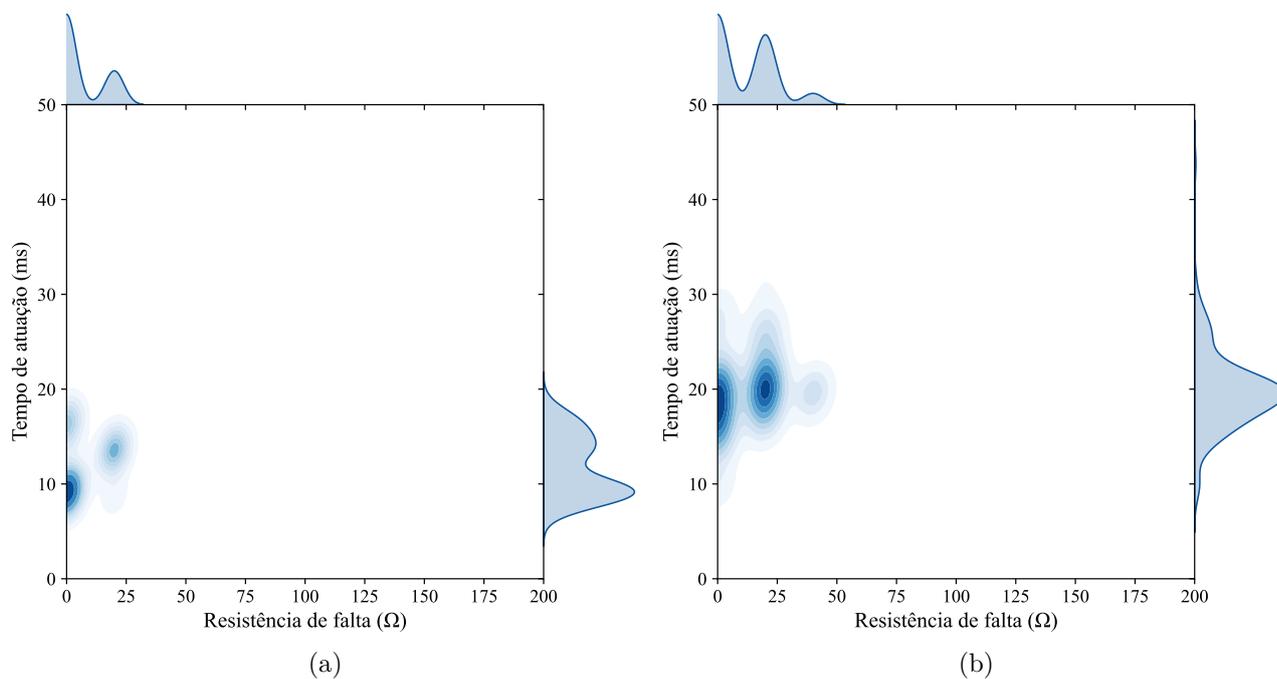
Portanto, é possível ver para este caso apresentado a redução do desempenho da proteção de distância, tanto em termos de cobertura em relação à localização da falta quanto em termos de cobertura em relação à resistência de falta, provenientes do efeito das correntes que fluem no circuito paralelo e as influências nos elementos de supervisão direcionais de terra.

Figura 5.26. Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.27. Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção de distância - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.28 apresenta a distribuição de probabilidade conjunta da localização e do tempo de atuação para a proteção diferencial transversal para a falta *cross-country aplicada*, na qual foram reportadas 892 atuações para o elemento local e 917 para o elemento remoto, ambas referentes ao circuito 1.

Por meio da análise da distribuição marginal das atuações em função da localização da falta para os elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.28(a) e 5.28(b) respectivamente, é possível ver que assim como no caso anterior da falta monofásica, a proteção diferencial transversal obteve uma distribuição de atuação mais ampla em relação a localização de falta, quando comparada à proteção de distância apresentada na Figura 5.26. Este comportamento é ainda mais evidente quando comparado com o terminal local, na qual a proteção de distância sofreu um considerável subalcançe. Analisando-se o tempo de atuação, é possível ver que as atuações estiveram mais concentradas por volta de 20 ms para ambos os terminais.

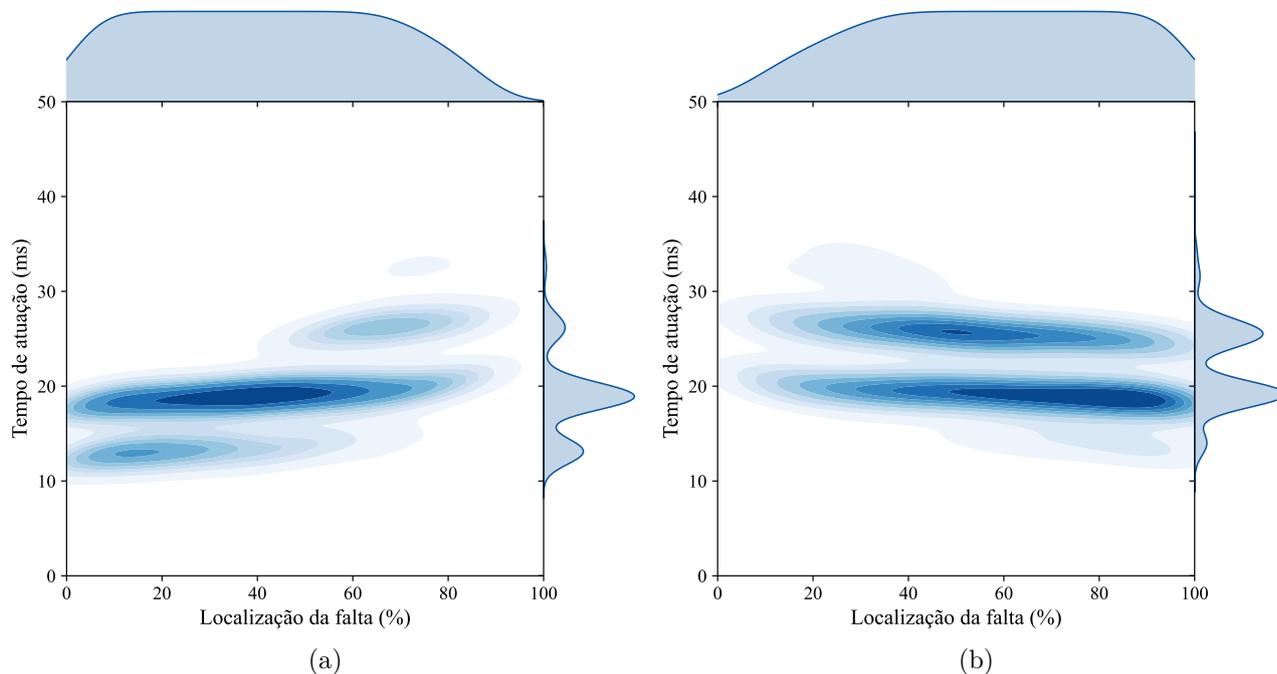
Através da análise da distribuição marginal das atuações em função da resistência de falta para os elementos local e remoto do circuito 1, apresentados nas Figuras 5.29(a) e 5.29(b) , é possível ver que a distribuição da cobertura em relação à resistência de falta se manteve aproximadamente constante, de tal forma que a proteção atuou para a maioria dos valores de resistência de falta.

Comparando-se o resultado da proteção diferencial transversal com a proteção de distância, é possível ver que o desempenho desta foi consideravelmente superior em relação à visualizada para proteção de distância, apresentada na Figura 5.27. Além, disto, analisando a quantidade de atuações totais, é possível que a proteção diferencial transversal conseguiu atuar em um número consideravelmente superior em relação à proteção de distância, em ambos os terminais.

Portanto, é possível ver o desempenho da proteção diferencial transversal na ocorrência de faltas *cross-country*. Como esta função é imune ao efeito do acoplamento de sequência zero, assim como a proteção diferencial longitudinal, era esperado que esta não fosse afetada durante a ocorrência desta modalidade de falta (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

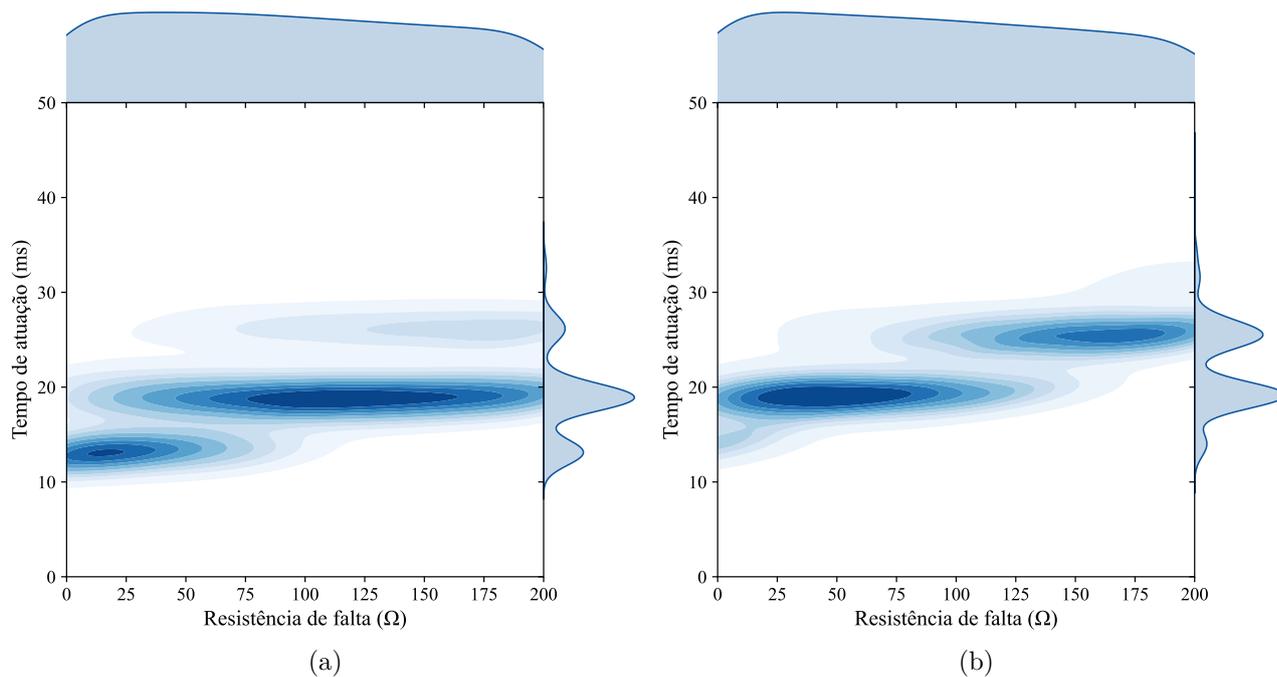
Portanto, este caso mostra uma das vantagens do uso da proteção diferencial transversal nos esquemas de proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, devido à sua alta cobertura em relação à localização como também em relação à resistência de falta, além de um desempenho superior à proteção de distância nestas modalidades de curto-circuito.

Figura 5.28. Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e localização da falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.29. Avaliação Experimental - Caso 3 - Distribuição de probabilidade conjunta - Tempo de atuação e resistência de falta - Proteção diferencial transversal - (a) Terminal local (b) Terminal remoto.



Fonte: Autoria Própria.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, foram apresentadas as avaliações de desempenho das proteções diferencial transversal e de distância, quando aplicadas às linhas de transmissão de circuito duplo. Para isto, sistemas modelados no *software* ATP foram utilizados para se realizar a análises das funções de proteção.

Inicialmente, no Capítulo 1, foi realizada uma contextualização a respeito da proteção de sistemas elétricos e da proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, bem como foram expostos os objetivos do trabalho e as publicações realizadas.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito das análises e dos desenvolvimentos envolvendo as funções diferencial transversal e de distância, além de proteções utilizadas em linhas de transmissão de circuito duplo.

No Capítulo 3, foi apresentada a fundamentação teórica a respeito de conceitos de proteção de sistemas elétricos e de alguns aspectos característicos das linhas de transmissão de circuito duplo, como suas diferentes configurações e o equacionamento do efeito do acoplamento mútuo. Além disto, foram introduzidos os conceitos básicos a respeito das proteções diferencial transversal e de distância, de tal maneira a proporcionar o referencial teórico necessário para a compreensão das análises realizadas posteriormente.

No Capítulo 4, foram apresentadas as metodologias e implementações realizadas com o intuito de se realizar a análise das funções de proteção avaliadas. Primeiramente, foi detalhada a metodologia de modelagem das linhas de circuito duplo utilizadas, com os modelos computacionais utilizados e os sistemas modelados. Logo após, foram detalhadas as metodologias de implementações computacionais e procedimentos experimentais, bem como os recursos utilizados nos relés de proteção.

No Capítulo 5, foram apresentadas as análises e os resultados provenientes das simulações

computacionais, através de análises de regime transitório de curto-circuito e de sensibilidade paramétrica, além de análises pontuais e em massa provenientes de procedimentos experimentais realizados nos relés SEL-411L.

A partir dos resultados analisados para as simulações computacionais, foi possível realizar a comparação entre o desempenho das proteções diferencial transversal e de distância, por meio da obtenção das atuações de cada elemento para cada cenário de falta simulado. As atuações da proteção de distância foram avaliadas por meio dos comparadores de fase da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva, além da apresentação do diagrama de impedâncias para compreensão do comportamento das impedâncias calculadas.

Já para a proteção diferencial transversal, foi possível ver o comportamento da proteção por meio da representação no plano alfa, com obtenção das coberturas em modo instantâneo para cada caso de análise de sensibilidade paramétrica. Por meio dos resultados, foi possível observar a diferença de desempenho entre as duas funções de proteção, além de suas limitações.

Através das avaliações experimentais, foi possível realizar a comparação do desempenho da proteção diferencial transversal aplicada diretamente no relé de proteção SEL-411L com a proteção de distância nativa do dispositivo, por meio de análises pontuais e análises em massa das atuações dos elementos de proteção em função de faltas bifásicas, monofásicas e *cross-country* aplicadas no sistema real modelado. Foi possível ver por meio da análise a diferença de desempenho entre as duas funções de proteção, além da distribuição do tempo de atuação para cada elemento.

Foi possível ver pelas análises em massa como estavam distribuídas as atuações dos dois elementos de proteção, e por meio da análise do curto-circuito *cross-country*, foi visto como o desempenho da proteção de distância foi prejudicado para esta modalidade de falta. Já para a proteção diferencial transversal, foi visto que o desempenho deste elemento de proteção foi superior à proteção de distância, atuando em grande parte dos cenários de faltas aplicadas.

Portanto, por meio das análises realizadas, é possível ver que a proteção diferencial transversal aparece como uma solução viável para complementar os esquemas de proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, visto que esta função de proteção é independente de canais de comunicação e possui um bom desempenho na detecção de faltas em tais linhas.

6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração os resultados obtidos nesta dissertação, metodologias e trabalhos futuros podem ser propostos. A seguir são apresentadas as sugestões de trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento da proteção diferencial transversal para linhas com níveis de tensão e/ou comprimentos distintos;
- Avaliar o desempenho da proteção diferencial transversal para linhas com TAPs de geração ou de carga;
- Promover o uso de técnicas de mapeamento de correntes, com o intuito de se generalizar o comportamento da proteção diferencial transversal para linhas com múltiplos circuitos;
- Avaliar o desempenho da proteção diferencial transversal por meio de registros reais;
- Elaborar novas características de restrição da proteção diferencial transversal no plano alfa, com o intuito de se melhorar o desempenho do elemento de proteção;
- Avaliar o desempenho da proteção diferencial transversal para linhas de circuito triplo, por meio da aplicação da função de proteção em apenas dois circuitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Citado na página 1.
- ALPAYDIN, E. *Introduction to machine learning*. [S.l.]: MIT press, 2020. Citado na página 67.
- ANDERSON, P. M. *Power system protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 29.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 1.
- APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D.; SAMBASIVAN, S.; RICHARDS, S. Protection of double circuit transmission lines. In: IEEE. *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2007. p. 85–101. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 12.
- BENMOUYAL, G. The trajectories of line current differential faults in the alpha plane. In: *proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 19.
- BO, Z. Q.; DONG, X. Z.; CAUNCE, B. R.; MILLAR, R. Adaptive noncommunication protection of double-circuit line systems. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 43–49, 2003. Citado na página 2.
- BORGES, M. F. Avaliação da proteção diferencial transversal aplicada às linhas de transmissão de circuito duplo. In: . [S.l.: s.n.], 2014. Citado 4 vezes nas páginas 10, 17, 18, and 19.
- CALERO, F. Mutual impedance in parallel lines—protective relaying and fault location considerations. *TP6283-01*, p. 1–15, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14, and 15.
- CALERO, F.; GUZMÁN, A.; BENMOUYAL, G. Adaptive phase and ground quadrilateral distance elements. In: *proceedings of the 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 43.
- CARPENTER, W. M. *et al.* Ieee guide for protective relay applications to transmission lines. *IEEE Std C*, v. 37, p. 113, 1999. Citado na página 37.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, Nokia Bell Labs, v. 5, n. 4, p. 539–554, 1926. Citado na página 14.
- Carvalho Jr, A. V. Interação transitória entre transformadores de potencial capacitivos e linhas de transmissão: Uma contribuição para minimizar falhas. 2008. Citado na página 38.
- COMMITTEE, I. P. S. R. *et al.* *Emtf reference models for transmission line relay testing*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 38.

- COOK, V. Distance protection performance during simultaneous faults. In: IET. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. [S.l.], 1977. v. 124, n. 2, p. 141–146. Citado 3 vezes nas páginas 13, 74, and 76.
- COOK, V. Analysis of distance protection: Research studies press ltd. 1985. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 27, 28, 29, and 30.
- EISSA, M.; MALIK, O. A new digital directional transverse differential current protection technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 1285–1291, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 10.
- FENTIE, D. D. Understanding the dynamic mho distance characteristic. In: IEEE. *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2016. p. 1–15. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33, and 34.
- FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. Curso básico sobre a utilização do atp. *CLAUE-Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP*, 1996. Citado na página 35.
- GERS, J. M.; HOLMES, E. J. *Protection of electricity distribution networks*. [S.l.]: IET, 2004. v. 47. Citado na página 1.
- GILANY, M.; MALIK, O.; HOPE, G. A digital protection technique for parallel transmission lines using a single relay at each end. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 118–125, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 10.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power system analysis & design, SI version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. Citado na página 60.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. *Modified cosine filters*. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,154,687. Citado na página 39.
- HONORATO, T. d. R. Sistema para automação de testes no relé sel-t400l. 2020. Citado na página 67.
- IEEE. Ieee standard common format for transient data exchange (comtrade) for power systems. *IEEE Std C37.111-1999*, p. 1–55, 1999. Citado na página 43.
- JONGEPIER, A.; SLUIS, L. Van der. Adaptive distance protection of a double-circuit line. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 9, n. 3, p. 1289–1297, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 10.
- LEUVEN, E. Center, atp-alternative transient program-rule book. *Herverlee, Belgium*, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 35 and 36.
- MASON, C. R. The art and science of protective relaying. *General Electric*, 1956. Citado na página 11.
- MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: IEEE. *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2010. p. 1–25. Citado na página 17.
- NEVES, E. T. Proteção diferencial longitudinal e transversal de linhas de transmissão de circuito duplo: modelagem e simulação do plano alfa. Universidade de Brasilia, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 20.

- NEVES, E. T.; SILVA, K. M. e. Parametric sensitivity analysis of longitudinal and transverse differential protections applied to double circuit transmission lines. In: IEEE. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 19.
- NUNES, J. X. M. Estudo dos impactos causados por sombreamento e análise da interferência eletromagnética em módulos fotovoltaicos instalados em torres de transmissão de energia elétrica. Florianópolis, SC, 2019. Citado na página 37.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Mapa Geoelétrico - Rede de Operação - Região Sul - Horizonte 2024*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Citado na página 37.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. *Fundamentals of power system protection*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2011. Citado 7 vezes nas páginas 1, 2, 22, 29, 31, 32, and 49.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 2, n. 4, p. 588–599, 2008. Citado na página 37.
- PHADKE, A.; JIHUANG, L. A new computer based integrated distance relay for parallel transmission lines. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 2, p. 445–452, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 10.
- PRADO, A. J. d. *et al.* Modelo de linha de transmissão de circuito duplo trifasico utilizando parametros dependentes da frecuencia. [sn], 2002. Citado na página 36.
- ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. The effect of multiprinciple line protection on dependability and security. In: *54th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 3–5. Citado na página 20.
- SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 1829–1840, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 2, 9, 10, 12, and 78.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection-can we break free of phasor limitations? In: *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 448–461. Citado 3 vezes nas páginas 18, 68, and 70.
- SEL. *SEL-411L - Advanced Line Differential Protection, Automation, and Control System*. [S.l.]: SEL, USA, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 41, 42, 43, 68, and 70.
- SILVA, K. M. Estimacão de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteo de distância de linhas de transmissão. Universidade Federal de Campina Grande, 2009. Citado 9 vezes nas páginas 11, 21, 22, 28, 29, 30, 31, 32, and 33.
- SILVA, K. M.; ALMEIDA, M. L. S. Positive sequence voltage memory filter for numerical digital relaying applications. *Electronics Letters*, IET, v. 51, n. 21, p. 1697–1699, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 38.
- SILVA, K. M.; ALMEIDA, M. L. S. Filtro de memória de tensão de seqncia positiva para uso em relés numéricos microprocessados. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Natal, Brasil*, p. 46, 2016. Citado na página 39.

- SPOOR, D.; ZHU, J. Intercircuit faults and distance relaying of dual-circuit lines. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1846–1852, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 13.
- TZIOUVARAS, D. A.; ALTUVE, H. J.; CALERO, F. Protecting mutually coupled transmission lines: Challenges and solutions. In: IEEE. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2014. p. 30–49. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 15, and 27.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A. Application of percentage cross differential relay in ehv double lines. In: IEEE. *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.], 2005. p. 1–6. Citado 6 vezes nas páginas 3, 8, 10, 16, 17, and 39.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D. Cross differential protection of double lines based on super-imposed current. In: IET. *CIREN 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. [S.l.], 2005. p. 1–4. Citado 7 vezes nas páginas 9, 10, 16, 17, 18, 19, and 39.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; THOLOMIER, D.; APOSTOLOV, A. Protection scheme of cross differential relay for double transmission lines. In: IEEE. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*. [S.l.], 2005. p. 2697–2701. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 10.
- WANG, Y.; XU, W. Algorithms and field experiences for estimating transmission line parameters based on fault record data. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 9, n. 13, p. 1773–1781, 2015. Citado na página 39.
- WARRINGTON, A. v. C. *Protective Relays: Their Theory and Practice Volume One*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 11.
- ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 29, 30, 31, and 33.