

JÉSSICA CRISTINA MARQUES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
CIRCUITO DUPLO COM ESTUDO DE CASO**

Goiânia

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese

2. Nome completo do autor

Jéssica Cristina Marques da Silva

3. Título do trabalho

“Avaliação da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo com Estudo de Caso”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 02/12/2020, às 19:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **JÉSSICA CRISTINA MARQUES DA SILVA, Discente**, em 03/12/2020, às 08:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1723125** e o código CRC **BDB0E76A**.

Referência: Processo nº 23070.045166/2020-89

SEI nº 1723125

JÉSSICA CRISTINA MARQUES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO
COM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC

Programa de Pós-Graduação

Orientadora: Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida

Goiânia

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Jéssica Cristina Marques da
Avaliação da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão de
Circuito Duplo com Estudo de Caso [manuscrito] / Jéssica Cristina
Marques da Silva. - 2020.
0 81 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,
algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Linhas de transmissão de circuito duplo. 2. Linhas de
transmissão de circuito simples. 3. Proteção de distância. 4. Acoplamento
mútuo de sequência zero. I. Almeida, Maria Leonor Silva de, orient.
II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **12/2020** da sessão de Defesa de Dissertação da aluna **Jéssica Cristina Marques da Silva**, que confere o título de Mestra em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **trinta dias do mês de outubro de dois mil e vinte**, a partir das **14h00min**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Avaliação da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo com Estudo de Caso**”. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Maria Leonor Silva de Almeida (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Igor Kopcak (EMC/UFG)**, membro titular interno; Professor Doutor **Felipe Vigolvino Lopes - Membro externo (FEELT/UnB)**, cujas participações ocorreram através de **videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Maria Leonor Silva de Almeida**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **trinta dias do mês de outubro de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 30/10/2020, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Vigolvino Lopes, Usuário Externo**, em 30/10/2020, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 30/10/2020, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JÉSSICA CRISTINA MARQUES DA SILVA, Discente**, em 31/10/2020, às 00:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1642130** e o código CRC **DD232A2C**.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Jovair e Nilva, e ao meu amor, Victor.*

*A educação, se bem compreendida,
é a chave do progresso moral.
Allan Kardec.*

Agradecimentos

O mestrado foi um grande desafio pra mim e concluir essa etapa sozinha não seria possível. Portanto, por meio desta dissertação venho agradecer a todos que estiveram ao meu lado para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo amor de sempre. Em especial, agradeço aos meus pais, Jovair e Nilva, por acreditarem em mim e pelo cuidado comigo. Vocês me mostram o quão eu sou forte e que posso crescer. Agradeço à minha irmãzinha, Jakeliny, pelo apoio e admiração. Agradeço também aos meus avós, pelo incentivo, amor e orgulho declarado por mim.

Agradeço ao meu amor, Victor, por me mostrar tantas coisas da vida e me encorajar todos os dias a ser uma pessoa melhor.

Aos amigos que me acompanham de perto a minha caminhada, meus sinceros agradecimentos. Em especial, agradeço à Renata pela cumplicidade e carinho, e ao Khristian por toda ajuda ao longo do mestrado.

Agradeço à minha orientadora, Maria Leonor, por toda dedicação, apoio, paciência e prestatividade. Sou grata a você por sempre acreditar em mim.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), agradeço por proporcionarem o ambiente necessário para a realização deste trabalho e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro desta pesquisa.

Por fim, agradeço a Deus pela oportunidade da vida e por ser força em mim para seguir em frente, mesmo diante as dificuldades.

Resumo

Aproximadamente 20% das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional brasileiro são de circuito duplo, sendo o tipo de configuração mais utilizada após as linhas de transmissão de circuito simples. Por esse motivo, destaca-se a importância de estudos relacionados a esse tipo de arranjo de linhas de transmissão. Quando duas linhas de transmissão estão próximas, por exemplo uma linha de transmissão de circuito duplo, observa-se um acoplamento mútuo de sequência zero entre elas. Esse acoplamento mútuo de sequência zero interfere no cálculo da impedância determinada pelo relé de distância, no caso de curtos-circuitos que envolvam o terra, em função da corrente de sequência zero na linha paralela e da presença de impedância mútua de sequência zero. Considerando a proteção de distância aplicada a linhas de transmissão de circuito duplo, apresenta-se nesta dissertação uma avaliação comparativa entre as proteções de distância tradicional e compensada, a qual considera a influência da condição operativa do circuito paralelo à linha protegida. No mais, as proteções de distância são avaliadas por meio de comparadores de fase, tal que nos resultados é analisada a atuação das unidades de impedância. Para tanto, dois sistemas de sub-transmissão de 138 kV, implementados com base em dados reais, foram modelados no *software Alternative Transient Program* (ATP) e submetidos a diferentes curtos-circuitos monofásicos, variando-se o valor da resistência de falta, o carregamento do sistema, a força das fontes, a linha em falta e o local de aplicação do curto-circuito em cada linha. Dos resultados obtidos, verifica-se que a correção do acoplamento mútuo de sequência zero pode melhorar ou piorar o desempenho da proteção de distância em relação a função 21 tradicional, a depender da força das fontes e da localização de falta. Assim, ressalta-se que para os casos analisados a correção do acoplamento mútuo de sequência zero não apresentou melhorias significativas no desempenho da proteção de distância.

Palavras-chave: Linhas de transmissão de circuito duplo; linhas de transmissão de circuito simples; proteção de distância; acoplamento mútuo de sequência zero.

Abstract

Approximately 20% of the transmission lines of the Brazilian national interconnected system are double circuit, being the most used configuration type after single circuit transmission lines. For this reason, the importance of studying double circuit transmission lines is highlighted. When two transmission lines are close, such as a double circuit transmission line, a mutual zero sequence coupling is observed between them. This mutual zero sequence coupling interferes in the impedance calculated by the distance protection, in the case of short circuits involving the ground, due to the zero sequence current in the healthy parallel line and the presence of zero sequence mutual impedance. Considering the distance protection applied to double circuit transmission lines, this dissertation presents a comparative assessment between traditional and compensated distance protections, which considers the influence of the operating condition of the parallel circuit on the protected line. In addition, the distance protections are assessed using phase comparators, such that in the results the impedance units operation is analyzed. For this purpose, a 138 kV real transmission system is modeled in the Alternative Transient Program (ATP) software and subjected to single phase-to-ground fault, varying the fault resistance value, the system loading, the power of the sources, the fault line and the fault location in each line. From the results obtained, it is verified that the correction of the mutual zero sequence coupling can improve or worsen the performance of the distance protection in relation to the function 21 traditional, which depends on power of the sources and the fault location. Thus, it is emphasized that for the cases analysed the correction of the mutual zero sequence coupling does not significantly improved the performance of the distance protection.

Keywords: Double circuit transmission lines; single circuit transmission lines; distance protection; mutual zero sequence coupling.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Mapa de Transmissão do SIN - Horizonte 2024.	23
Figura 1.2 – Causas de desligamentos no SIN.	23
Figura 2.1 – Diagrama $R-X$	29
Figura 2.2 – Diagrama $R-X$ para uma falta resistiva.	29
Figura 2.3 – Exemplo de característica de operação para um relé de distância. . . .	30
Figura 2.4 – Principais características de operação da proteção de distância: (a) Impedância; (b) MHO; (c) Reatância; (d) Quadrilateral.	31
Figura 2.5 – Trajetória da impedância vista pelo relé de distância para a característica: (a) MHO; (b) Quadrilateral.	32
Figura 2.6 – Zonas de proteção do relé de distância.	33
Figura 2.7 – Diagrama $R-X$ das zonas de proteção do relé de distância.	34
Figura 2.8 – Característica MHO polarizada para: (a) Falta na direção direta; (b) Falta na direção reversa.	38
Figura 3.1 – Transposição de linhas duplas.	43
Figura 3.2 – Linhas de transmissão mutuamente acopladas.	44
Figura 3.3 – Modelagem da impedância mútua de sequência zero: (a) Impedância de acoplamento de sequência zero; (b) Tensão induzida de sequência zero. . . .	44
Figura 3.4 – LTCD com barramentos em comum.	45
Figura 3.5 – LTCD em curto-circuito monofásico na fase a	46
Figura 5.1 – Modelo no <i>software</i> ATP do sistema real simplificado para análise de sensibilidade paramétrica.	59
Figura 5.2 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	62
Figura 5.3 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	62
Figura 5.4 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	63
Figura 5.5 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	63
Figura 5.6 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	64
Figura 5.7 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	64
Figura 5.8 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C2$, $C4$, $C6$ e $C8$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	65

Figura 5.9 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos <i>C2</i> , <i>C4</i> , <i>C6</i> e <i>C8</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	66
Figura 5.10 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos <i>C10</i> , <i>C12</i> , <i>C14</i> e <i>C16</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	67
Figura 5.11 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos <i>C10</i> , <i>C12</i> , <i>C14</i> e <i>C16</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	67
Figura 5.12 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos <i>C18</i> , <i>C20</i> , <i>C22</i> e <i>C24</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	68
Figura 5.13 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos <i>C18</i> , <i>C20</i> , <i>C22</i> e <i>C24</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	68
Figura 5.14 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos <i>C25</i> , <i>C26</i> , <i>C27</i> e <i>C28</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	69
Figura 5.15 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos <i>C25</i> , <i>C26</i> , <i>C27</i> e <i>C28</i> , conforme: (a) F21T; (b) F21C.	70
Figura 5.16 – Modelo no <i>software</i> ATP do estudo de caso para análise transitória de curto-circuito.	70
Figura 5.17 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 1, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	72
Figura 5.18 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 2, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	73
Figura 5.19 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 3, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	73
Figura 5.20 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 4, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	73
Figura 5.21 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 5, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	74
Figura 5.22 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 6, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	75
Figura 5.23 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 7, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	75
Figura 5.24 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 8, conforme: (a) F21T; (b) F21C.	76

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Desligamentos forçados analisados de 01/07/2016 a 30/06/2017.	22
Tabela 1.2 – Número de linhas de transmissão por tipo de circuito e tensão - ONS. .	24
Tabela 2.1 – Entradas para as unidades de impedância FT e FF da função 21 em LTCS.	35
Tabela 2.2 – Operação para cada tipo de falta considerando as unidades do relé. . .	36
Tabela 3.1 – Entradas para as unidades de impedância FT e FF da função 21 em LTCD.	47
Tabela 5.1 – Parâmetros reais da LTCD dos sistemas analisados.	60
Tabela 5.2 – Resumo dos casos de curto-circuito franco monofásico na fase a , aplica- dos em $L1$, variando-se a localização de falta.	61
Tabela 5.3 – Resumo dos casos de curto-circuito franco monofásico na fase a , aplica- dos em $L2$, variando-se a localização de falta.	61
Tabela 5.4 – Resumo dos casos de curto-circuito monofásico na fase a com R_f igual a $20\ \Omega$, aplicados em $L1$, variando-se a localização de falta.	69
Tabela 5.5 – Comprimentos dos trechos entre os terminais na LTCD do estudo de caso.	71
Tabela 5.6 – Resumo dos casos de curto-circuito monofásico na fase a para análise transitória.	72

Lista de abreviaturas e siglas

SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
LTCS	Linha de Transmissão de Circuito Simples
LTCD	Linha de Transmissão de Circuito Duplo
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
SBSE	Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
<i>SIR</i>	<i>System Impedance Ratio</i>
FT	Fase-Terra
FF	Fase-Fase
ABC	Curtos-circuitos envolvendo as fases A, B e C
AB	Curtos-circuitos envolvendo as fases A e B
BC	Curtos-circuitos envolvendo as fases B e C
CA	Curtos-circuitos envolvendo as fases C e A
ABT	Curtos-circuitos envolvendo as fases A, B e o terra
BCT	Curtos-circuitos envolvendo as fases B, C e o terra
CAT	Curtos-circuitos envolvendo as fases C, A e o terra
AT	Curtos-circuitos envolvendo a fase A e o terra
BT	Curtos-circuitos envolvendo a fase B e o terra
CT	Curtos-circuitos envolvendo a fase C e o terra
CC	Corrente Contínua

EMTDC	<i>Electromagnetic Transients Including DC</i>
PSCAD	<i>Power System CAD</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
WAMS	<i>Wide Area Monitoring System</i>
F21T	Função 21 Tradicional
F21C	Função 21 Compensada
$L1$	Linha protegida da LTCD
$L2$	Linha paralela à $L1$ da LTCD
D, E, F, G e H	Cidades alimentadas pela LTCD em estudo
TC1	Transformador de Corrente de $L1$
TC2	Transformador de Corrente de $L2$
TPC1	Transformador de Potencial da barra <i>Local</i>
LO	Limiar de Operação
SU	Subalcance
SO	Sobrealcance

Lista de símbolos

Z_R	Impedância calculada pelo relé de distância
V_R	Tensão medida pelo TP
I_R	Corrente medida pelo TC
x_R	Parte real de Z_R
r_R	Parte imaginária de Z_R
θ_R	Ângulo de Z_R
Z_{1L}	Impedância de sequência positiva da linha
R_f	Resistência de falta
Z_{AB}, Z_{BC} e Z_{CA}	Unidades de impedância FF , entre as fases a , b e c , da função 21
$\hat{V}_a$	Fasor tensão da fase A
$\hat{V}_b$	Fasor tensão da fase B
$\hat{V}_c$	Fasor tensão da fase C
$\hat{I}_a$	Fasor corrente da fase A
$\hat{I}_b$	Fasor corrente da fase B
$\hat{I}_c$	Fasor corrente da fase C
$\hat{I}_0$	Fasor corrente de sequência zero
k_0	Fator de correção da corrente de sequência zero
Z_0	Impedância de sequência zero da linha
Z_1	Impedância de sequência positiva da linha
$\hat{V}_{pol}$	Fasor tensão de polarização
$\hat{V}_{op}$	Fasor tensão de operação
$\hat{V}_C$	Fasor tensão
$\hat{I}_C$	Fasor corrente

h	Porcentagem a ser protegida da linha
θ_{1L}	Ângulo de Z_{1L}
τ	Ângulo de projeto da característica MHO
ϕ	Diferença das fases dos fasores $\hat{V}_{op}$ e $\hat{V}_{pol}$
$\hat{V}_1$	Fasor tensão de sequência positiva no instante da falta
$\hat{V}_{1m}$	Fasor tensão polarizada por memória de tensão de sequência positiva
$\hat{V}_{pre}$	Fasor tensão de pré-falta
k_p	Fator de esquecimento
Z_{fonte}	Impedância da fonte equivalente a montante do relé
Z_{aa}, Z_{bb} e Z_{cc}	Impedâncias próprias de uma LTCS
Z_{ab}, Z_{ac} e Z_{bc}	Impedâncias mútuas de uma LTCS
Z_{abc}	Matriz de impedâncias em componentes das fases "abc" de uma LTCS
$Z_{aa'}, Z_{bb'}$ e $Z_{c'c}$	Impedâncias mútuas entre as fases das linhas do circuito duplo
$Z_{ab'}, Z_{b'c}$ e $Z_{c'a}$	Impedâncias mútuas entre as fases das linhas do circuito duplo
$Z_{a'b}, Z_{bc'}$ e $Z_{ca'}$	Impedâncias mútuas entre as fases das linhas do circuito duplo
$Z_{a'b'}, Z_{b'c'}$ e $Z_{c'a'}$	Impedâncias mútuas da linha paralela da LTCD
$Z_{a'a'}, Z_{b'b'}$ e $Z_{c'c'}$	Impedâncias próprias da linha paralela da LTCD
Z'_{abc}	Matriz de impedâncias em componentes das fases "abc" e "a'b'c'" de uma LTCD
A	Matriz identidade para LTCS
$\hat{I}_1$	Fasor corrente de sequência positiva
$\hat{I}_2$	Fasor corrente de sequência negativa
V''_{abc}	Matriz de tensões no domínio das fases para LTCD
Z''_{abc}	Matriz de impedâncias no domínio das fases para LTCD
I''_{abc}	Matriz de correntes no domínio das fases para LTCD
V''_{abc}	Matriz de tensões no domínio das fases para LTCD

A''	Matriz identidade para LTCD
Z''_{012}	Matriz de impedâncias no domínio das sequências para LTCD
V''_{012}	Matriz de tensões no domínio das sequências para LTCD
n	Número de linhas
Z_{0M}	Impedância de acoplamento mútuo de sequência zero dos circuitos da LTCD
$\hat{V}_{0M}$	Fasor tensão de acoplamento mútuo de sequência zero da LTCD
$\hat{V}'_a$	Fasor tensão na fase defeituosa A
$\hat{I}_{0P}$	Fasor corrente de sequência zero do circuito paralelo da LTCD
m	Porcentagem de impedância de sequência positiva da linha envolvida no curto-circuito
Z_{Rele}	Impedância calculada pelo relé de distância
k_{0M}	Fator de compensação de mútua de sequência zero
Z_S	Impedância própria da linha
Z_P	Impedância mútua entre duas fases de um mesmo circuito trifásico
Z_m	Impedância mútua entre duas fases de diferentes circuitos trifásicos
Z_G	Impedância de parâmetro terra da linha
Z_L	Impedância de parâmetro da LTCD
Z_{IL}	Impedância de parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos
R_G	Resistência de parâmetro terra da linha
R_L	Resistência de parâmetro da LTCD
R_{IL}	Resistência de parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos
X_G	Indutância de parâmetro terra da linha
X_L	Indutância de parâmetro da LTCD
X_{IL}	Indutância de parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos

Y_G	Susceptância de parâmetro terra da linha
Y_L	Susceptância de parâmetro da LTCD
Y_{IL}	Susceptância de parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos
δ_{interm}	Ângulo de carregamento no terminal <i>Intermediário</i>
δ_{rem}	Ângulo de carregamento no terminal <i>Remoto</i>
$\delta_{cidades}$	Ângulo de carregamento das cidades/cargas
SIR_L	SIR do terminal <i>Local</i>
SIR_R	SIR do terminal <i>Remoto</i>
Z_{ATco}, Z_{BTco} e Z_{CTco}	Unidades de impedância FT , nas fases a , b e c , da F21C
Z_{ATtr}, Z_{BTtr} e Z_{CTtr}	Unidades de impedância FT , nas fases a , b e c , da F21T

Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Motivação	24
1.2	Objetivos e Contribuições desta Dissertação	25
1.3	Organização do texto	26
2	FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	27
2.1	Impedância Calculada pelo Relé	28
2.2	Características de Operação	30
2.3	Trajetória da Impedância Vista pelo Relé	32
2.4	Zonas de Proteção de Distância	32
2.5	Unidades de Impedância	34
2.6	Relé de Distância Visto como um Comparador	36
2.7	Fatores que Afetam a Proteção de Distância	39
3	PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA APLICADA A LTCD	40
3.1	Modelagem Matemática da LTCD	41
3.2	Parâmetros do Relé de Distância em LTCD	45
3.3	Modelagem da LTCD no <i>software</i> ATP	48
4	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	50
4.1	Proteção de Distância Compensada	50
4.2	Diferentes Métodos de Proteção de Distância Compensada	54
4.3	Síntese da Revisão Bibliográfica e Relação com o Tema do Estudo Realizado	56
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
5.1	Análise de Sensibilidade Paramétrica	59
5.1.1	Curtos-circuitos aplicados em $L1$	61
5.1.2	Curtos-circuitos aplicados em $L2$	65
5.1.3	Curtos-circuitos com R_f	68
5.2	Análise Transitória de Curto-circuito	70
5.2.1	Curtos-circuitos aplicados em $L1$	72
5.2.2	Curtos-circuitos aplicados em $L2$	74
5.3	Análise Geral dos Resultados	76
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	78

REFERÊNCIAS 80

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é definido como o conjunto de instalações e de equipamentos, que possibilita o suprimento de energia elétrica nas regiões do país, interligados eletricamente, conforme regulamentação aplicável (ANEEL, 2014). Por meio da interconexão dos sistemas elétricos, a energia pode ser transferida entre subsistemas. Essa integração entre os diferentes recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado, com segurança e economicidade (ONS, c).

Dos elementos integrantes das instalações elétricas do SIN, as linhas de transmissão estão mais expostas a efeitos climáticos e ambientais, tornando-as mais suscetíveis a falhas. Essas falhas causam desligamentos, conforme ilustrado na Tabela 1.1, na qual apresentam-se os desligamentos forçados no período de 1º de julho de 2016 a 30 de junho de 2017. Dessa tabela, verifica-se que ocorreram 3.768 desligamentos forçados em equipamentos das subestações e nas linhas de transmissão, sendo da rede básica e complementar do SIN. De acordo com ANEEL (2010) a rede básica é composta por instalações de transmissão do SIN e a rede complementar é o conjunto de instalações não integrantes da rede básica, porém tem influência significativa na operação daquela rede, conforme ONS (2002). Fundamentando-se nesses dados, nota-se que 75,6% dos desligamentos ocorreram em linhas, dos quais 95,5% dos casos foram na rede básica (ANEEL, 2018).

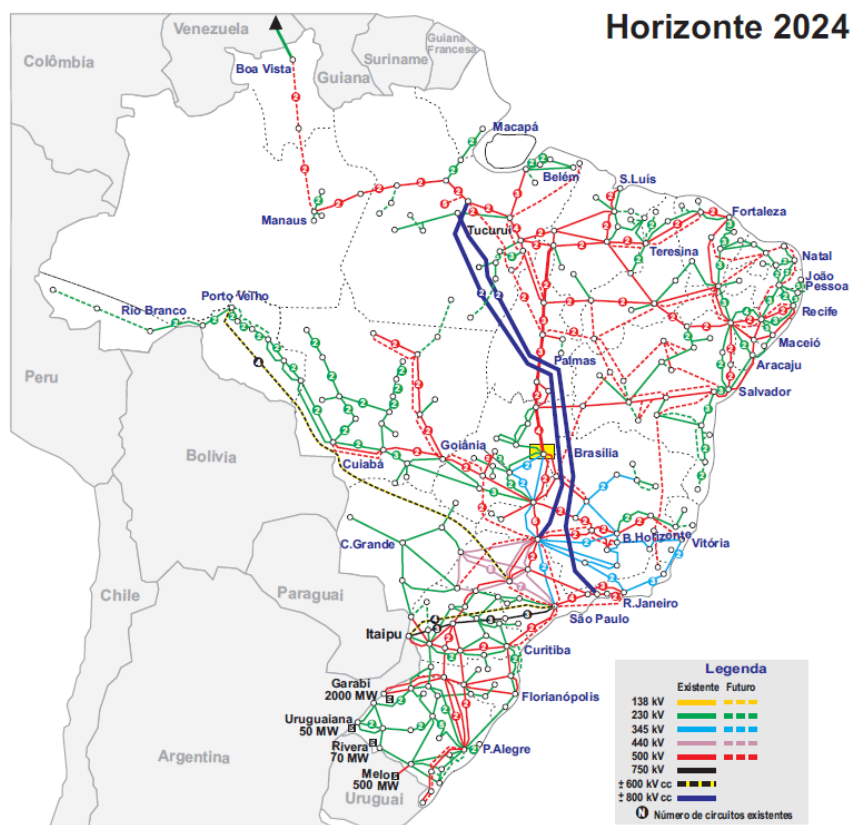
Tabela 1.1 – Desligamentos forçados analisados de 01/07/2016 a 30/06/2017.

Rede	Equipamento	Desligamento	Porcentagem (%)
Básica	Linha de transmissão	2.719	72,16
	Subestação	851	22,58
Complementar	Linha de transmissão	129	3,42
	Subestação	69	1,84
Total		3.768	100

Fonte: (ANEEL, 2018).

Verifica-se que o número de desligamentos forçados em linhas de transmissão é superior aos desligamentos em outros componentes do SIN. Isso ocorre, principalmente, pela grande extensão das linhas de transmissão. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), são 141.756 km de extensão de linhas da rede básica de transmissão (ONS, a). Nota-se pela Figura 1.1, na qual apresenta-se o mapa de transmissão do SIN com horizonte para 2024, a grande extensão e complexidade do sistema de transmissão do Brasil.

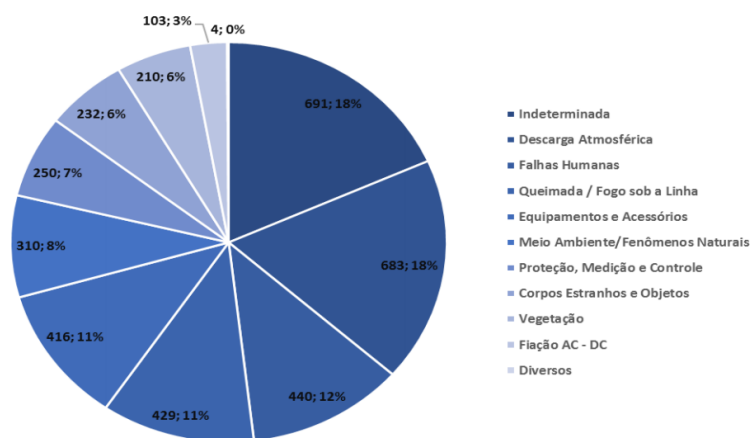
Figura 1.1 – Mapa de Transmissão do SIN - Horizonte 2024.



Fonte:(ONS, b).

Nesse contexto, as causas dos desligamentos forçados são exibidas na Figura 1.2. De acordo com os dados, a maior causa dos desligamentos é indeterminada, totalizando 18%, seguidos de descargas atmosféricas (também 18%) e falhas humanas (12%) (ANEEL, 2018).

Figura 1.2 – Causas de desligamentos no SIN.



Fonte: (ANEEL, 2018).

De acordo com a Tabela 1.2, as linhas de transmissão no Brasil são compostas por circuitos simples, duplo, triplo e quádruplo (ONS, d). Com base nos dados dessa tabela, verifica-se que o número total de linhas é de 2.609. Dessas, 511 das linhas são de circuito duplo, totalizando aproximadamente 20% das linhas do SIN, sendo o tipo de configuração mais utilizada após a Linha de Transmissão de Circuito Simples (LTCS). Dessa forma, ressalta-se a importância de estudar Linha de Transmissão de Circuito Duplo (LTCD), também aqui denominado de linhas de transmissão em paralelo, as quais são bastante utilizadas e possuem maior complexidade de implementação e operação da proteção.

Tabela 1.2 – Número de linhas de transmissão por tipo de circuito e tensão - ONS.

Tensão (kV)	Número de Circuitos			
	Simples	Duplo	Triplo	Quádruplo
138	1.195	265	17	8
230	519	150	31	2
345	60	30	5	1
440	39	0	0	0
500	240	10	10	4
765	0	3	3	0
Total em números	2.053	458	66	15
Total em porcentagem	79,2%	17,7%	2,5%	0,6%

Fonte: (ONS, d).

O uso de LTCD é justificável, pois seu emprego aumenta a capacidade de transmissão de energia elétrica, sem a necessidade de novas faixas de servidão ou torres de transmissão, tornando-se mais vantajoso financeiramente (WANG et al., 2005). Apesar das vantagens associadas à utilização de linhas de circuito duplo, elas possuem acoplamento mútuo entre os dois circuitos e falhas de *cross-country*¹ (XU et al., 2011). Esses efeitos na LTCD podem atrapalhar a atuação do relé de distância, atuando incorretamente ou não atuando quando necessário (PRITCHARD et al., 2016). Assim, o emprego das LTCD apresenta também desafios relacionados ao sistema de proteção utilizado nelas. Destaca-se o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero entre os circuitos da LTCD no cálculo da impedância para curtos-circuitos que envolvam o terra, podendo afetar o desempenho do relé de distância (APOSTOLOV et al., 2007).

1.1 Motivação

Por ser uma das proteções mais implementadas em linhas de transmissão, optou-se pela investigação da proteção de distância – numeração 21 de acordo com a norma *American National Standards Institute* (ANSI) – para as análises do presente trabalho.

¹ Curtos-circuitos entre fases de diferentes circuitos trifásicos.

Assim, considerou-se o estudo da proteção de distância em LTCD para investigar a interferência do efeito de acoplamento mútuo de sequência zero entre os circuitos trifásicos desta linha. A proteção 21 permite manipulações para a consideração do acoplamento mútuo entre os circuitos. Dentre as soluções existentes, este trabalho estuda a implementação que será denominada como proteção de distância compensada, a qual compensa o efeito de acoplamento mútuo entre os circuitos da LTCD conforme Mascher (2010) e Santos (2008). Com isso, almeja-se realizar uma avaliação comparativa entre o desempenho da proteção de distância compensada e da proteção de distância tradicional quando ambas são aplicadas na LTCD. Deseja-se, portanto, verificar a eficácia da correção do acoplamento mútuo defendida por alguns autores.

1.2 Objetivos e Contribuições desta Dissertação

O objetivo principal desta dissertação é a avaliação comparativa de uma proteção de distância tradicional, utilizada em LTCS, com uma proteção de distância compensada, utilizada em LTCD. A proteção compensada difere da proteção tradicional por considerar o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos da LTCD, por meio da utilização da corrente de sequência zero do circuito paralelo. Além disso, as proteções de distância tradicional e compensada são avaliadas por meio de comparadores de fase, tal que nos resultados são consideradas as atuações das unidades de impedância para a análise transitória de curto-circuito e análise de sensibilidade paramétrica.

Nota-se pela Tabela 1.2 que a maioria das LTCD são com tensões de nível mais baixo, em relação as demais topologias. Assim, dois sistemas de 138 kV foram avaliados: primeiramente foram realizadas análises transitórias em um sistema real com cargas conectadas ao longo da linha, além de Equivalentes de Thévenin em suas extremidades. Posteriormente, foram executadas análises da sensibilidade paramétrica em um sistema de 138 kV simplificado, contendo apenas Equivalentes de Thévenin em suas extremidades. Ambos os sistemas foram modelados no *software Alternative Transients Program* (ATP). Os sistemas foram submetidos a curtos-circuitos monofásicos, variando-se o valor da resistência de falta, o carregamento do sistema, a força das fontes, a linha em falta e o local de aplicação do curto-circuito em cada linha.

Nesse contexto, são definidos como objetivos específicos:

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos da proteção de distância aplicada a LTCD;
- Avaliar e esclarecer os problemas da aplicação da proteção de distância em LTCD;
- Modelar, no *software* ATP, sistemas elétricos de alta tensão com LTCD;

- Simular curtos-circuitos monofásico ao longo da LTCD, variando-se o valor da resistência de falta, o carregamento do sistema, a força das fontes, a linha em falta e o local de aplicação do curto-circuito em cada linha;
- Verificar e comparar a atuação das proteções de distância, tradicional e compensada, para cada caso de curto-circuito aplicado; e
- Apresentar as conclusões a respeito dos resultados obtidos com as simulações computacionais.

Além disso, as principais contribuições desta dissertação correspondem às avaliações comparativas e detalhadas do desempenho das proteções de distância tradicional e compensada, implementadas para um sistema real com LTCD. No que diz respeito à divulgação dos estudos realizados no mestrado, o seguinte artigo foi publicado:

- *Análise da Proteção de Distância Aplicada a Linhas de Transmissão em Paralelo*, aprovado e publicado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) de 2020.

1.3 Organização do texto

Esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, abordam-se os conceitos de proteção da distância aplicada a LTCS;
- Já no Capítulo 3, apresentam-se os conceitos de proteção da distância aplicada a LTCD;
- O levantamento do estado da arte, sobre a proteção de distância em LTCD, é descrito no Capítulo 4;
- No Capítulo 5, apresentam-se os dois sistemas analisados neste trabalho. Neste capítulo, também são apresentados os resultados e as análises das simulações transitórias de curto-circuito e de sensibilidade paramétrica;
- Por fim, as conclusões das análises são descritas no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Sistemas Elétricos de Potência são projetados para fornecer energia elétrica aos consumidores conectados. Porém, essa condição nominal de operação pode ser comprometida, pois os sistemas elétricos estão expostos a diversos danos, decorrentes de descargas atmosféricas, falhas de operação, mau funcionamento de equipamentos, dentre outros, tal como exposto na Figura 1.2. Logo, é necessário um esquema de proteção para interromper o fornecimento de energia elétrica na ocorrência de condições anormais de operação, como os curtos-circuitos.

Assim, um sistema de proteção é composto basicamente por: relés, transformadores para instrumentos, disjuntores, circuitos de alimentação, circuitos de comando e sinalização. A função da proteção é detectar curtos-circuitos no sistema elétrico e desligar as partes afetadas rapidamente, a fim de proteger os equipamentos e evitar danos maiores (SILVA, 2009).

Os requisitos básicos de um sistema de proteção para sua correta operação são (ANDERSON, 1998):

- *Sensibilidade*: capacidade de identificar curtos-circuitos para as quais ele foi projetado;
- *Confiabilidade*: habilidade de atuar corretamente quando necessário ou de evitar operações desnecessárias;
- *Seletividade*: capacidade de fornecer a máxima continuidade de serviço com um mínimo de desconexões para isolar uma falta no sistema;
- *Coordenação*: capacidade de determinar os ajustes adequados para o sistema de proteção, a fim de obter-se seletividade em sua operação;
- *Velocidade*: característica de reduzir o tempo de duração da falta, com o objetivo de minimizar os danos no sistema protegido;
- *Segurança*: capacidade de um sistema ou dispositivo não operar indevidamente;
- *Economia*: característica de máxima proteção ao menor custo, considerando o aspecto custo versus benefício;
- *Simplicidade*: utilização mínima necessária de equipamentos e circuitos na execução da proteção; e

- *Mantenabilidade*: capacidade de permitir manutenção rápida e precisa, reduzindo os custos de manutenção e período de desligamento do sistema.

Tradicionalmente, utilizam-se em linhas de transmissão proteção direcional de sobrecorrente, de distância, direcional de comparação e diferencial (TZIOUVARAS et al., 2014). Dentre essas funções, a proteção de distância é bastante utilizada em linhas, sendo que ela tem esse nome por se basear na medição indireta da distância do trecho entre o relé e o local do curto-circuito, por meio da impedância de sequência positiva aparente desse trecho da linha (ZIEGLER, 2011).

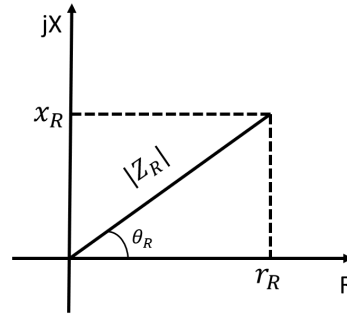
Neste Capítulo, são apresentados os conceitos gerais sobre a proteção de distância, os quais norteiam sua aplicação tanto em LTCS, quanto em LTCD.

2.1 Impedância Calculada pelo Relé

A proteção de distância, ou função 21, é empregada para detectar curtos-circuitos ou defeitos. Pela estimativa da distância em que se encontra a falta, dada por meio da impedância, admitância ou reatância calculada, a função 21 verifica se a impedância medida encontra-se dentro da zona de proteção e, caso esteja, o relé envia um comando de abertura aos disjuntores da linha. A impedância de falta calculada pelo relé de distância, entre o ponto que o relé está instalado até o final da linha ou ponto de falta, é obtida por meio da razão entre as medições de tensão e corrente junto ao ponto de instalação do relé. Os valores de tensão e de corrente são medidos, respectivamente, por Transformador de Potencial (TP) e Transformador de Corrente (TC), geralmente instalados nas extremidades da linha a ser protegida (GONÇALVES, 2007).

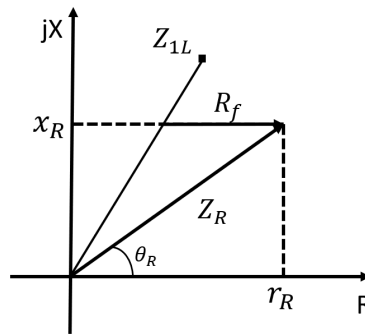
Com isso, a impedância calculada pelo relé é representada em um plano complexo, denominado diagrama R - X , por meio do qual é possível analisar e visualizar a característica de operação e a atuação do relé 21 (REIS, 2015). Nesse diagrama, o eixo das abscissas corresponde à resistência R e o eixo das ordenadas à reatância X , conforme apresentado na Figura 2.1. Nesta figura ilustra-se a impedância calculada pelo relé Z_R , cujas partes real e imaginária são, respectivamente, $r_R = |Z_R| \cos \theta_R$ e $x_R = |Z_R| \sin \theta_R$, sendo θ_R o ângulo da impedância aparente vista pelo relé. O relé deve operar se Z_R estiver dentro de sua característica de operação, que consiste em uma figura geométrica no plano R - X (SILVA, 2009).

Ilustra-se na Figura 2.2 a aplicação do diagrama R - X , no qual Z_{1L} é a impedância de sequência positiva da linha, em condições normais de operação, e Z_R é a impedância calculada pelo relé em condições anormais, como durante um curto-circuito. Então, dada a ocorrência de uma falta franca, a função 21 deixa de medir a impedância total da linha somada a impedância equivalente do sistema a jusante do terminal remoto, e passa

Figura 2.1 – Diagrama R - X .

Fonte: Autor.

a calcular Z_R , que teria o mesmo ângulo que Z_{1L} , porém com módulo menor. Assim, a depender da redução do módulo de Z_R e dos ajustes pré-adotados, a função 21 iria atuar. Entretanto, devido a presença de resistência de falta (indicado por R_f), ocorre um deslocamento de Z_R no eixo R , o que altera o valor da impedância calculado pelo relé 21 (SILVA, 2018). Inclusive, quanto maior for o valor de R_f , maior é a alteração em Z_R .

Figura 2.2 – Diagrama R - X para uma falta resistiva.

Fonte: Adaptado de (GONÇALVES, 2007).

Além da resistência de falta, diversos fatores influenciam no cálculo da impedância pelo relé 21, dentre eles: o fluxo de carga; o *System Impedance Ratio* (SIR), o qual é um bom indicador da força da fonte; a presença de fontes intermediárias que geram correntes de *infeed*¹ e *outfeed*²; a existência de acoplamento mútuo entre circuitos vizinhos; dentre outros (REIS, 2015). Assim, o cálculo da impedância pelo relé de distância não pode ser resumido apenas à razão entre tensão e corrente medidos por TP e TC (ROBERTS et al., 1993).

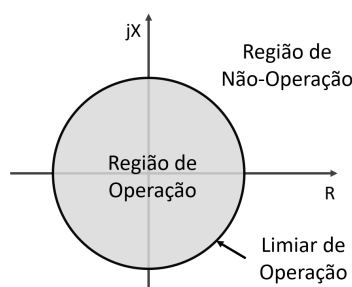
¹ Pontos intermediários de injeção de corrente, como por exemplo fonte de geração intermediária.

² Pontos intermediários de drenagem de corrente, como por exemplo cargas.

2.2 Características de Operação

Como descrito anteriormente, a proteção de distância não pode se resumir à razão entre tensão e corrente medidas ($Z_R = \hat{V}_R / \hat{I}_R$). Dessa forma, a função 21 calcula a impedância de sequência positiva entre o ponto de instalação do relé e a falta e analisa se essa impedância medida está localizada dentro da área definida pela característica de operação. Apresenta-se na Figura 2.3 um exemplo de característica de operação de uma proteção de distância, ilustrando a região de operação, a região de não-operação e o limiar de operação. Se a impedância calculada estiver dentro da característica de operação, o relé atua (GONÇALVES, 2007).

Figura 2.3 – Exemplo de característica de operação para um relé de distância.



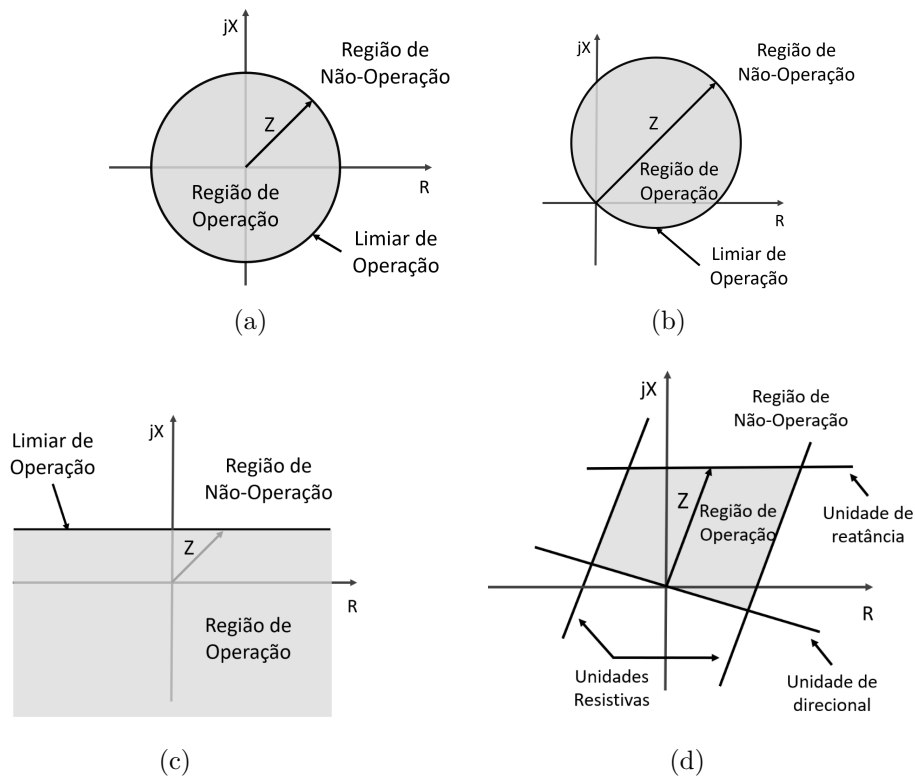
Fonte: Autor.

Além da característica ilustrada na Figura 2.3, diversas figuras geométricas são utilizadas no plano R - X para representar características de operação da função de distância. A escolha da forma geométrica depende de um estudo do comportamento do sistema a ser protegido e das características disponíveis nos relés. Algumas das características possíveis são apresentadas na Figura 2.4.

O relé de distância tipo impedância é apresentado na Figura 2.4 (a). Ele é não direcional, pois opera nas duas direções em relação a barra onde se encontra instalado, sendo mais utilizado como um detector de falhas (GONÇALVES, 2007). A característica desse relé é circular centrada na origem do diagrama R - X . A região de operação do relé de impedância é delimitada por um círculo de raio igual ao módulo da impedância da linha em condições normais de operação $|Z_{1L}|$, sendo esse módulo igual ao ajuste do relé. Contudo, a operação do relé eletromecânico de distância do tipo impedância ocorre quando o torque produzido pela corrente de curto-circuito é superior aos torques de ajuste. Da mesma forma, a impedância vista pelo relé deve ser menor que a impedância de ajuste para o relé operar, tal que a impedância medida fique dentro da região de operação (KINDERMANN, 2005).

Outro tipo de relé de distância é o de admitância, também conhecido como relé MHO, ilustrado na Figura 2.4 (b). Nesse caso, a região de operação é representada por um círculo com extremidade passando pela origem e diâmetro igual $|Z_{1L}|$. Esse tipo de

Figura 2.4 – Principais características de operação da proteção de distância: (a) Impedância; (b) MHO; (c) Reatância; (d) Quadrilateral.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2009).

relé é semelhante ao relé tipo impedância, porém ele possui a vantagem de ser direcional, tornando-se bastante utilizado em sistemas em anel (KINDERMANN, 2005). O relé tipo MHO é geralmente utilizado em linhas longas, pois são menos sensíveis às oscilações indesejáveis de potência (FILHO; MAMEDE, 2000).

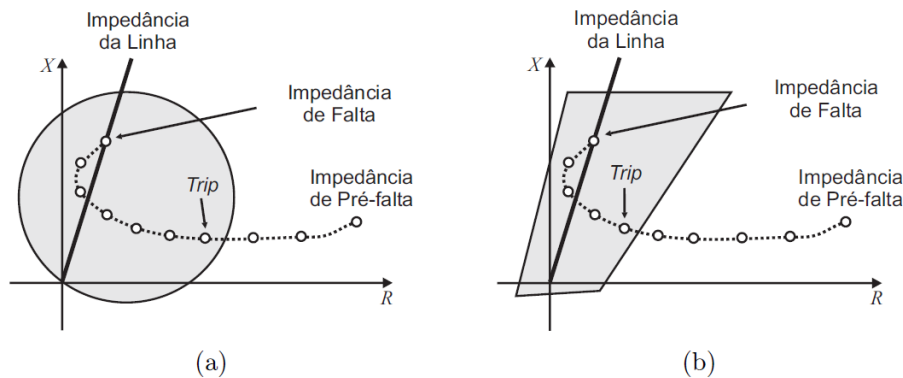
O relé de distância tipo reatância é apresentado na Figura 2.4 (c). Esse tipo de relé, tem característica linear, opera somente com sensibilidade em relação a reatância do sistema. Assim, caso a reatância seja menor que a reatância ajustada no relé, a proteção atua. No mais, esse relé opera de maneira correta e é mais robusto (GONÇALVES, 2007).

Por fim, apresenta-se na Figura 2.4 (d) o relé tipo quadrilateral, o qual é composto por quatro linhas retas, sendo duas unidades direcionais e duas unidades resistivas (REIS, 2015). Esse relé combina as vantagens do relé de reatância com características direcionais e resistivas. Esse tipo de característica apresenta facilidades na seleção de ajustes para os casos de curto-circuito com alta resistência de falta. Com isso, o resistivo não é limitado pelo círculo da característica MHO, por exemplo (HOLBACH et al., 2008).

2.3 Trajetória da Impedância Vista pelo Relé

Para estudar a trajetória da impedância vista pelo relé, é necessário entender que essa impedância terá sua trajetória alterada em função da ocorrência do curto-circuito interno ao elemento protegido. Desse modo, em condições normais de operação do sistema – antes da ocorrência da falta – é definido o regime permanente de pré-falta, no qual a impedância medida pelo relé depende apenas do fluxo de potência, ativa e reativa, na linha protegida. Na ocorrência de um curto-circuito na linha protegida, a impedância calculada Z_R se desloca do seu valor inicial de pré-falta para dentro da região de operação do relé, por meio da sequência de valores calculados, conforme trajetória ilustrada na Figura 2.5 (SILVA, 2009).

Figura 2.5 – Trajetória da impedância vista pelo relé de distância para a característica: (a) MHO; (b) Quadrilateral.



Fonte: (SILVA, 2009).

Na ocorrência de curto-circuito na linha protegida, a impedância Z_R na posição de pré-falta desloca-se para dentro da característica de operação do relé, como apresentado na Figura 2.5. Assim, um comando de abertura, denominado também de *trip*, pode ser enviado aos disjuntores da linha. O período necessário para que a impedância Z_R , em condição de pré-falta, se desloque para dentro da característica de operação do relé é denominado tempo de detecção de falta. Esse período de detecção de falta corresponde à velocidade de atuação do relé e depende, dentre vários fatores, do algoritmo de estimação de fasores utilizado (SILVA, 2009).

2.4 Zonas de Proteção de Distância

As zonas de atuação têm como função cobrir uma seção da linha de transmissão e proteger remotamente linhas adjacentes. Essas zonas são definidas a depender da instalação dos transformadores de instrumento, TP e TC. De acordo com sua aplicação, o relé de distância possui três ou mais zonas de atuação. Essas zonas têm diferentes alcances, de

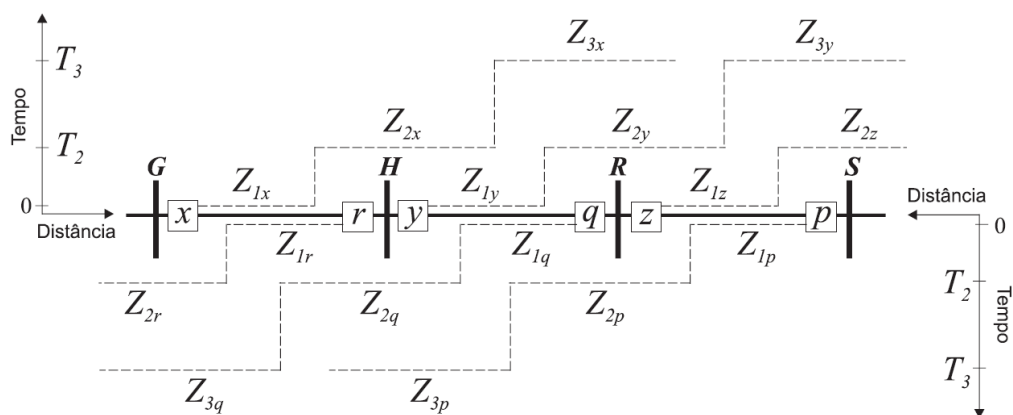
acordo com a porcentagem do comprimento da linha e diferentes tempos de atrasos para atuação. Ademais, uma ou mais zonas adicionais podem ser utilizadas na direção da linha e na direção oposta para proteger a barra a montante (ZIEGLER, 2011).

As três zonas típicas de proteção de distância são ajustadas geralmente de acordo com os seguintes critérios (GONÇALVES, 2007):

- *Primeira zona:* a impedância de alcance da primeira zona de proteção corresponde a uma porcentagem de 80 a 85% da impedância total da linha protegida. A primeira zona não possui tempo de atraso intencional em sua operação, tal que o tempo de atuação corresponde apenas ao tempo de detecção da falta;
- *Segunda zona:* protege 100% da linha protegida pela primeira zona, acrescido em torno de 50% da menor linha adjacente do terminal remoto. O tempo de atraso da segunda zona varia de 250 a 400 ms. Assim, o tempo de atuação corresponde ao tempo de detecção da falta mais o atraso de 250 a 400 ms;
- *Terceira zona:* possui alcance de 100% da menor linha adjacente do terminal remoto da linha protegida, mais 20% da menor linha a sua jusante. O tempo de atraso intencional da terceira zona é na ordem de 800 ms. A principal função dessa zona é a proteção de retaguarda;

Apresentam-se as zonas de atuação da proteção de distância na Figura 2.6. Esse esquema evidencia os alcances e tempos de detecção de faltas das zonas.

Figura 2.6 – Zonas de proteção do relé de distância.



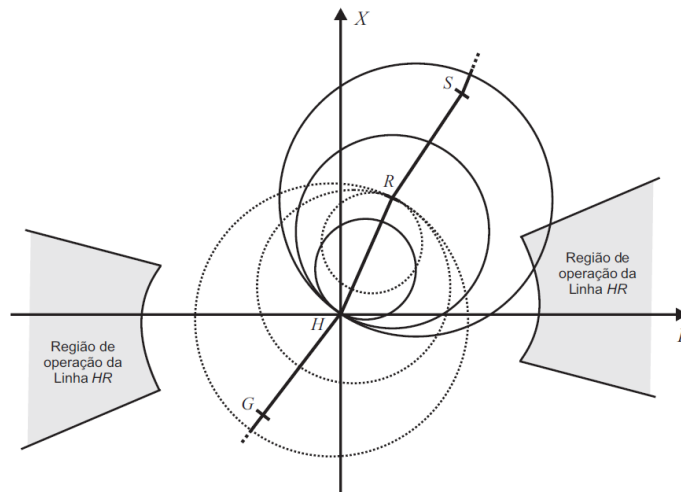
Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1998).

Para exemplificação, considerando a Figura 2.6, avalia-se uma falta aplicada na metade do trecho entre H e R, entre os disjuntores y e q. Nesse caso, o relé de distância instalado na barra H atuará com tempo de detecção nulo, dentro da primeira zona de

atuação (Z_{1y}). Para uma falta em 10% do início do trecho entre R e S , o mesmo relé instalado na barra H , associado ao disjuntor y , irá atuar em segunda zona (Z_{2y}) e com tempo de detecção T_2 . Finalmente, para uma falta na barra S , o relé instalado na barra H atuará em terceira zona (Z_{3y}) por meio do disjuntor y , com tempo de detecção T_3 . Ressalta-se que os tempos de detecção representados na Figura 2.6 não consideram o tempo de abertura dos disjuntores.

Apresentam-se, na Figura 2.7, as zonas de proteção dos relés localizados nos terminais da linha HR da Figura 2.6. Observa-se no diagrama R - X , da Figura 2.7, que o relé tem característica de operação MHO (ANDERSON, 1998). Logo, para faltas na linha HG , o relé 21 instalado na barra H , associado ao disjuntor y , identifica os curtos-circuitos como reversos, tal que a característica está no terceiro quadrante. Enquanto para faltas na linha HR , a proteção de distância associado ao disjuntor y detecta a falta como direta, por isso a característica está no primeiro quadrante.

Figura 2.7 – Diagrama R - X das zonas de proteção do relé de distância.



Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1998).

2.5 Unidades de Impedância

Por meio dos dados de corrente e tensão, obtidos pelos TC e TP, respectivamente, o relé de distância calcula as unidades de impedância, as quais são empregadas para a análise da atuação da proteção. Essas unidades atuam de acordo com o curto-circuito ocorrido e são calculadas utilizando grandezas Fase-Terra (FT) e Fase-Fase (FF) (CAMPOS et al., 2015).

Como a impedância de sequência positiva é a única observada em todos os tipos de curto-circuito, ela é utilizada no cálculo das unidades de impedância pelo relé de distância. Dessa forma, a impedância determinada por uma das unidades de medição deve ser a

impedância de sequência positiva entre o ponto onde está localizado o relé e o ponto de curto-circuito (COOK, 1985). No total, e considerando o sistema equilibrado em condições de pré-falta, são definidos dez tipos diferentes de curto-circuito, sendo eles (PAITHANKAR, 2017):

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

Um resumo dos sinais de entrada necessários para determinação das seis unidades de impedância do relé de distância – instalado próximo ao terminal local da linha – é apresentado na Tabela 2.1, sendo: Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT} as unidades de impedância FT; Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA} as unidades de impedância FF; $\hat{V}_a$, $\hat{V}_b$ e $\hat{V}_c$ os fasores de tensão de fase medidos pelos TP; $\hat{I}_a$, $\hat{I}_b$ e $\hat{I}_c$ os fasores de corrente de fase medidos pelos TC; $\hat{I}_0$ o fasor da corrente de sequência zero da linha; e k_0 o fator de compensação da corrente de sequência zero, o qual é determinado conforme expressão (2.1) (ZIEGLER, 2011).

Tabela 2.1 – Entradas para as unidades de impedância FT e FF da função 21 em LTCS.

Unidade de Impedância	Entrada de Tensão	Entrada de Corrente
Z_{AT}	$\hat{V}_a$	$\hat{I}_a + k_0 \hat{I}_0$
Z_{BT}	$\hat{V}_b$	$\hat{I}_b + k_0 \hat{I}_0$
Z_{CT}	$\hat{V}_c$	$\hat{I}_c + k_0 \hat{I}_0$
Z_{AB}	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
Z_{BC}	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
Z_{CA}	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2009).

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \quad (2.1)$$

Com base em (2.1), Z_{0L} é a impedância de sequência zero da linha e Z_{1L} é a impedância de sequência positiva da linha. O fator de correção k_0 é utilizado para compensar o acoplamento mútuo de sequência zero entre as fases de um mesmo circuito trifásico (ANDERSON, 1998). Esse acoplamento ocorre pelo fluxo magnético entre fases, podendo interferir na correta atuação da proteção de distância.

Na Tabela 2.2, apresenta-se um resumo das unidades de impedância do relé de distância que devem ser capazes de medir a impedância de sequência positiva do trecho

da linha, entre o relé e o local da falta, para cada tipo de curto-circuito (SILVA, 2009). Nota-se que cada curto-circuito deve ser identificado por pelo menos uma das unidades de impedância da função de distância.

Tabela 2.2 – Operação para cada tipo de falta considerando as unidades do relé.

Tipo de falta	Fases Envolvidas	Sigla	Z_{AT}	Z_{BT}	Z_{CT}	Z_{AB}	Z_{BC}	Z_{CA}
Monofásica	A	AT	✓	-	-	-	-	-
	B	BT	-	✓	-	-	-	-
	C	CT	-	-	✓	-	-	-
Bifásica	A e B	AB	-	-	-	✓	-	-
	B e C	BC	-	-	-	-	✓	-
	C e A	CA	-	-	-	-	-	✓
Bifásica-Terra	A e B	ABT	✓	✓	-	✓	-	-
	B e C	BCT	-	✓	✓	-	✓	-
	C e A	CAT	✓	-	✓	-	-	✓
Trifásica	A, B e C	ABC	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2009).

A Tabela 2.2 é utilizada no presente trabalho para analisar a correta atuação da proteção de distância implementada. Porém, na prática algoritmos de seleção de fases são implementados para que apenas uma das unidades de impedância seja habilitada e o relé entre em operação. Esse método é utilizado a fim de evitar atuações indevidas das unidades de impedância das fases não envolvidas na falta (STOKES-WALLER, 2000). Um exemplo de algoritmo de seleção de fase, seria: primeiro realiza a diferença angular entre as fases das correntes de sequência negativa e zero; e em seguida compara os módulos das impedâncias com as resistências calculadas por cada unidade do relé. Nesse caso, para cada tipo de curto-circuito são selecionadas unidades de impedâncias que são desbloqueadas a fim de proteger o sistema (KÜSEL, 2014). Ressalta-se que os resultados apresentados nesta dissertação não consideram o método de seleção de fases.

2.6 Relé de Distância Visto como um Comparador

Para a implementação da proteção de distância, as unidades de impedância podem ainda ser interpretadas por meio de comparadores de fase e de magnitude, os quais são bastante utilizados. O funcionamento desses comparadores é realizado por dois sinais, que são comparados e a partir da sua defasagem, ou da relação entre suas magnitudes, é possível distinguir entre uma situação normal de operação do sistema e a ocorrência de uma falta (PAITHANKAR, 2017).

A implementação do algoritmo do relé de distância a partir de comparadores, apresentada nesta seção, utiliza a característica MHO. Essa característica é bastante empregada em relés de distância pelas suas características de alcance finito, direcionalidade,

simplicidade (implementada por apenas um comparador), boa acomodação da resistência de falta e menor sensibilidade às oscilações de potência (ZIEGLER, 2011).

De acordo com Silva (2009), para que o relé de distância seja interpretado como um comparador de fase, avalia-se a defasagem entre os fasores de tensão de operação ($\hat{V}_{op}$) e tensão de polarização ($\hat{V}_{pol}$), os quais são descritos nas equações (2.2) e (2.3), respectivamente.

$$\hat{V}_{op}(k) = -\hat{V}_C(k) + \frac{hZ_{1L}}{\cos(\theta_{1L} - \tau)} \hat{I}_C(k), \quad (2.2)$$

$$\hat{V}_{pol}(k) = \hat{V}_C(k), \quad (2.3)$$

nas quais: $\hat{V}_C$ é o fasor tensão definido conforme Tabela 2.1; $\hat{I}_C$ é o fasor de corrente definido conforme Tabela 2.1; h é a porcentagem a ser protegida do comprimento total da linha; Z_{1L} é a impedância de sequência positiva da linha; θ_{1L} é o ângulo de Z_{1L} ; e τ é o ângulo de projeto da característica MHO, ou ângulo de torque máximo do relé.

Assim, o comparador de fase detecta uma falta interna a sua zona de proteção, caso seja satisfeita a condição descrita na equação (2.4), na qual ϕ é a diferença das fases dos fasores $\hat{V}_{op}$ e $\hat{V}_{pol}$.

$$-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (2.4)$$

Ressalta-se que em casos de curtos-circuitos próximos aos terminais da linha, conforme descrito por Ziegler (2011), as tensões das fases passam a ter valores próximos de zero, o que pode comprometer a correta atuação de proteções como a função 21, que dependem de referências confiáveis de tensão, tanto em módulo quanto em ângulo. Esse é o caso da proteção de distância, por meio de comparadores, a qual necessita de valores confiáveis de tensão, medidos pelo TP, para seu correto funcionamento. Com isso, a característica autopolarizada, que utiliza a própria tensão de entrada do relé como grandeza de polarização, pode apresentar falhas quando valores de tensão próximos de zero forem medidos. Para solucionar esse problema, utiliza-se a característica MHO polarizada, na qual calcula-se a tensão polarizada ao invés de empregar os valores medidos diretamente pelo TP (ZIEGLER, 2011).

Na característica MHO polarizada, a polarização por memória de tensão de sequência positiva é bastante utilizada, pois ela viabiliza o emprego das tensões de pré-falta ao invés das tensões nas fases defeituosas. Assim, a presente análise utiliza a memória de tensão de sequência positiva descrita por Silva e Almeida (2016), a qual possui um fator de esquecimento que é ajustado para que a memória seja mantida por alguns ciclos após a falta. Com essa implementação, o valor da tensão de sequência positiva memorizada no

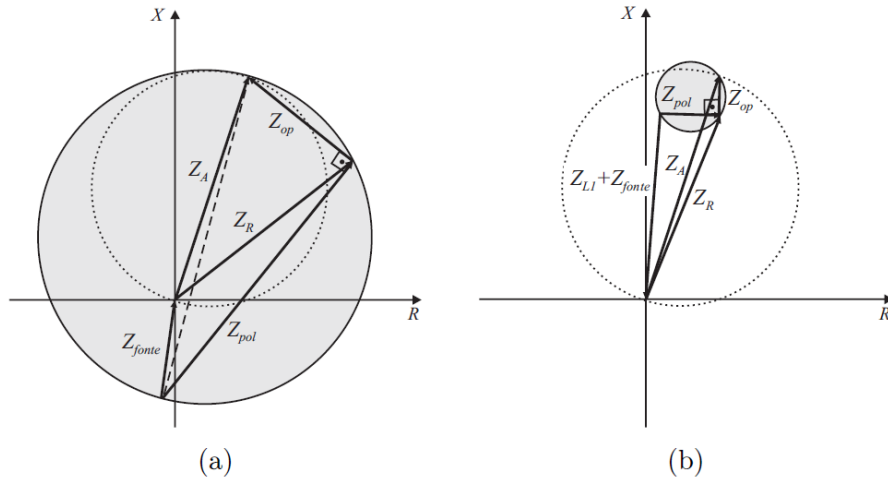
instante antes da falta ($\hat{V}_{pre}$) prevalece em detrimento da tensão de sequência positiva no instante da falta ($\hat{V}_1$). Além disso, o valor de $\hat{V}_1$ é calculado com base na tensão $\hat{V}_C$, definida conforme Tabela 2.1. Na equação (2.5), apresenta-se o cálculo da tensão memorizada, sendo: $\hat{V}_{1m}$ a tensão polarizada por memória de tensão de sequência positiva; $\hat{V}_{pre}$ a tensão de pré-falta; e k_p o fator de esquecimento.

$$\hat{V}_{1m} = (1 - k_p)\hat{V}_1 + k_p\hat{V}_{pre} \quad (2.5)$$

Ressalta-se que $\hat{V}_{1m}$ é determinado para a fase a e as tensões memorizadas nas demais fases são definidas com base na sequência de fases adotada. Além disso, essa polarização pode ser utilizada para qualquer tipo de curto-circuito, mas deve-se tomar precauções para sistemas em que a frequência varia durante a falta (ZIEGLER, 2011).

A utilização da memória de tensão causa uma expansão da característica MHO para faltas a frente do relé e uma contração da característica MHO na ocorrência de faltas reversas, como apresentado na Figura 2.8. Na Figura 2.8 a característica MHO polarizada é indicada com linha contínua, a característica MHO autopolarizada é representada com linha tracejada e Z_{fonte} é a impedância da fonte equivalente a montante do relé. A Figura 2.8 (a) ilustra a expansão da característica MHO durante a ocorrência de defeitos na própria linha protegida e a Figura 2.8 (b), por sua vez, apresenta a contração da característica na ocorrência de faltas reversas.

Figura 2.8 – Característica MHO polarizada para: (a) Falta na direção direta; (b) Falta na direção reversa.



Fonte: (SILVA, 2009).

2.7 Fatores que Afetam a Proteção de Distância

De acordo com Roberts et al. (1993), dentre os diferentes fatores que podem influenciar na correta medição da impedância de falta, a resistência de falta atua gerando um aumento da parte resistiva da impedância calculada pela função 21, podendo resultar em subalcance da proteção. Com isso, quanto maior o valor da resistência de falta, maior a probabilidade de erros da proteção do sistema (REIS, 2015). O valor exato da resistência de falta é difícil de ser determinado, devido à dependência de fatores ambientais, tais como: concentração de umidade no solo, regime de chuvas, velocidade e direção do vento, colisões de galhos nos condutores, dentre outros fatores. Além disso, na ocorrência de curto-circuito monofásico, a resistência de falta pode atingir valores muito elevados e causar erros na atuação do relé de distância (MASCHER, 2010).

A característica das fontes equivalentes conectadas à linha de transmissão também afeta o desempenho da proteção de distância. Essa influência pode ser avaliada pela força da fonte, sendo o *SIR* um bom indicador desse fenômeno, a qual é a razão entre a impedância da fonte e a impedância da linha. O *SIR* está relacionado à capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito que cada fonte, conectada a linha, é capaz de fornecer (THOMPSON; SOMANI, 2015).

Além do *SIR*, o fluxo de carga também pode afetar o desempenho da função 21, pois a componente resistiva, da resistência de falta, tem comportamento de grandeza complexa na presença do fluxo. Durante um curto-circuito monofásico com resistência de falta, o comportamento da componente resistiva adicionada a falta varia de acordo com o sentido do fluxo de carga presente na barra. Para fluxos importados, há uma adição de valor reativo e para fluxo exportado, há uma redução em valor reativo. Logo, para uma falta próxima à zona de atuação, pode ocorrer um subalcance para fluxo importado e um sobrealcance para fluxo exportado. Ressalta-se que, um relé de distância encontra-se sobre-alcançado quando o valor da impedância que ele mede é menor do que o seu valor real. Caso contrário, se o valor da impedância medida é maior do que o seu valor real, o relé encontra-se sub-alcançado (COOK, 1985).

Para os casos de linhas de circuito duplo, o efeito de acoplamento mútuo entre os circuitos em paralelo também causa erros no cálculo da impedância no relé de distância, assunto abordado no Capítulo 3. Assim, a proteção de distância deve ser implementada para cada caso específico, considerando os fatores que influenciam a correta medição da impedância.

3 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA APLICADA A LTCD

A construção de linhas de múltiplos circuitos possuem vantagens financeiras e ambientais em relação a múltiplas linhas separadas. Assim, LTCD, denominada nesta dissertação também de linhas em paralelo, são mais baratas para serem construídas, pois compartilham a mesma torre de transmissão e a mesma faixa de passagem. Portanto, há uma economia financeira na construção de novas torres e uma redução no impacto ambiental necessário para a criação de novas faixas de servidão (XU et al., 2011). A utilização de LTCD também é justificada por possuírem maior capacidade de transferência de energia, pois para um mesmo comprimento e nível de tensão dois circuitos trifásicos são empregados na transmissão da energia elétrica.

Apesar das vantagens sobre as LTCS, na ocorrência de anormalidades em LTCD, não havendo seletividade da proteção os dois circuitos trifásicos podem ser desligados. Consequentemente, haverá a interrupção no fornecimento de energia elétrica, o que pode causar maiores desligamentos no sistema elétrico de potência. Isso ocorre porque os dois circuitos trifásicos ficam inoperantes simultaneamente, e a potência que deixa de ser transmitida é muito maior do que seria enviada por uma única linha. Diante disso, é essencial a implementação em LTCD de um sistema de proteção para detectar rapidamente curtos-circuitos no sistema elétrico e isolar as partes afetadas, garantindo assim a integridade dos equipamentos elétricos e a continuidade no fornecimento de energia nas partes sãs do sistema (SILVA, 2009).

Para garantir a correta operação do sistema de proteção implementado em LTCD, é necessário contemplar o acoplamento mútuo de sequência zero também entre as fases de diferentes circuitos trifásicos. Essa indução mútua magnética ocorre em LTCD e também em LTCS próximas fisicamente, podendo ter níveis de tensão diferentes, a depender das características do sistema analisado (TZIOUVARAS et al., 2014). O acoplamento magnético pode comprometer a proteção de distância do sistema de transmissão, uma vez que a impedância calculada pela função 21 está sujeita aos efeitos das indutâncias mútuas (MASCHER, 2010).

Considerando a influência do acoplamento mútuo no desempenho da função 21, apresentam-se neste capítulo a modelagem matemática da LTCD, o conceito de acoplamento mútuo, a proteção de distância aplicada em LTCD e a modelagem de uma linha dupla no *software* ATP.

3.1 Modelagem Matemática da LTCD

Esta seção foi desenvolvida de acordo com o trabalho de Calero (2007) e Tziouvaras et al. (2014). As impedâncias de uma LTCS com fases a , b e c , podem ser descritas conforme (3.1), na qual: Z_{aa} , Z_{bb} e Z_{cc} são as impedâncias próprias e Z_{ab} , Z_{ac} e Z_{bc} são as impedâncias mútuas da linha. Essa matriz, denominada de matriz de impedância de fase, refere-se a um sistema de transmissão de circuito trifásico simples genérico.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

De forma análoga, qualquer circuito de LTCD pode ser representado pela matriz de impedâncias no domínio das fases descrita em (3.2), sendo as fases a , b e c de um circuito e as fases a' , b' e c' do circuito paralelo.

$$[Z_{abc''}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} & Z_{aa'} & Z_{ab'} & Z_{c'a} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{a'b} & Z_{bb'} & Z_{bc'} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} & Z_{ca'} & Z_{b'c} & Z_{cc'} \\ Z_{aa'} & Z_{a'b} & Z_{ca'} & Z_{a'a'} & Z_{a'b'} & Z_{c'a'} \\ Z_{ab'} & Z_{bb'} & Z_{b'c} & Z_{a'b'} & Z_{b'b'} & Z_{b'c'} \\ Z_{c'a} & Z_{bc'} & Z_{cc'} & Z_{c'a'} & Z_{b'c'} & Z_{c'c'} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Para a proteção, os dados no domínio das sequências são importantes para a detecção de falhas no sistema. Sendo assim, a relação de transformação entre as componentes no domínio das fases e as componentes no domínio das sequências é ilustrada por meio do equacionamento proposto em (3.3), utilizando o parâmetro de corrente como exemplo, no qual: $\hat{I}_1$ é a corrente de sequência positiva; $\hat{I}_2$ é a corrente de sequência negativa da linha; e $\hat{I}_0$ é a corrente de sequência zero. No mais, a matriz identidade $[A]$ de sequência abc é definida em (3.4), sendo que a é dado por (3.5).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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

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

Considerando a Lei de Ohm, em (3.6) apresenta-se a relação entre as matrizes de tensão $[V''_{abc}]$, impedância $[Z''_{abc}]$ e corrente $[I''_{abc}]$ no domínio das fases para um sistema de transmissão de circuito duplo, sendo ambos os circuitos trifásicos. Para obter os valores das impedâncias de uma LTCD no domínio das sequências, utiliza-se a matriz de transformação para linhas duplas $[A'']$, dada em (3.7).

$$\begin{bmatrix} V''_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z''_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I''_{abc} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} A'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

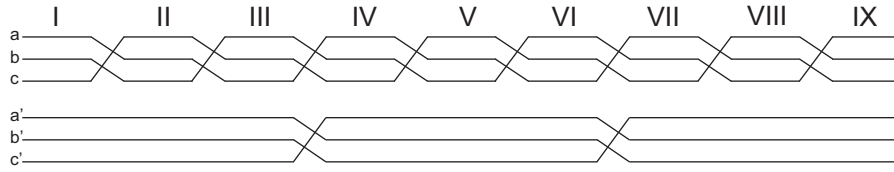
Com isso, substitui-se a matriz de tensão no domínio das fases para LTCD $[V''_{abc}]$ dada em (3.6) pelo produto da matriz de tensão no domínio das sequências para LTCD $[V''_{012}]$ e da matriz de transformação $[A'']$. De forma análoga, substituindo-se também a matriz de corrente no domínio das fases $[I''_{abc}]$, tem-se a expressão (3.8), sendo $[I''_{012}]$ a matriz de correntes no domínio das sequências para LTCD. Simplificando (3.8) é possível obter a relação da matriz impedância de LTCD entre domínio das fases e domínio das sequências, dada por (3.9).

$$\begin{bmatrix} A'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V''_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z''_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I''_{012} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} Z''_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z''_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'' \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Além disso, a transposição total de uma LTCD é obtida pelo arranjo físico alterado à mesma distância para 3^n vezes, sendo n o número de linhas. Assim, em uma LTCD o mínimo de transposições é $3^2 = 9$, o qual é ilustrado na Figura 3.1. Logo, a matriz de impedâncias no domínio das sequências $[Z''_{012}]$, apresentada anteriormente em (3.9), é definida pela soma das impedâncias do componente simétrico de cada segmento, sendo ela apresentada em (3.10).

Figura 3.1 – Transposição de linhas duplas.



Fonte: Autor.

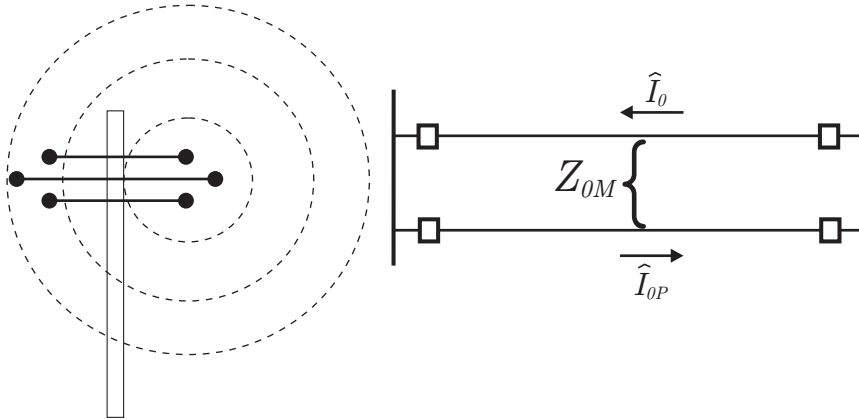
$$\begin{bmatrix} Z''_{012} \end{bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^9 [Z''_{012}]_i \right) \frac{1}{9} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 & Z_{0M} & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{0M} & 0 & 0 & Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Nota-se em (3.10) que as impedâncias na diagonal dessa matriz são as impedâncias próprias de sequência zero, positiva e negativa do arranjo do condutor, dada por: Z_0 que é a impedância de sequência zero de cada circuito; Z_1 a impedância de sequência positiva de cada circuito; e Z_2 a impedância de sequência negativa de cada circuito. As impedâncias fora da diagonal são as impedâncias mútuas, que em (3.10) são todas zero exceto a impedância de acoplamento mútuo de sequência zero dos circuitos Z_{0M} . Para fins práticos, em uma LTCD perfeitamente transposta Z_1 e Z_2 são iguais (KONISHI, 1972). Mesmo que o objetivo do arranjo de transposição seja eliminar termos mútuos da matriz de impedâncias, (3.10) indica que mesmo se o arranjo da linha fosse totalmente transposto o termo mútuo de sequência zero Z_{0M} não seria zerado.

Nesse contexto, ressalta-se que o acoplamento mútuo em LTCD, ou LTCS próximas fisicamente, ocorre pelo fluxo magnético entre os circuitos, ou linhas, desse sistema de transmissão. A Figura 3.2 ilustra de maneira simplificada o fenômeno de fluxo magnético que interliga os dois circuitos trifásicos de uma linha de duplo circuito. Essa relação de fluxo magnético depende da corrente total que flui em um circuito, vinculando ele ao circuito paralelo.

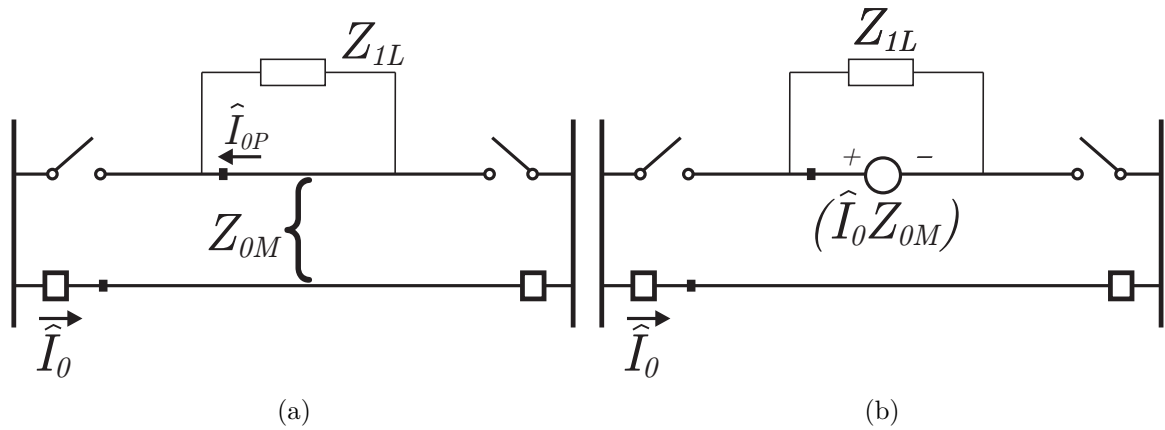
Em termos práticos, no sistema de transmissão, o acoplamento mútuo de sequência positiva e negativa são desprezados, pois o fluxo dessas sequências possui valor baixo ou próximo de zero. No entanto, as correntes de sequência zero que circulam em um dos circuitos geram fluxo de sequência zero significativo no circuito remanescente, mesmo com a transposição total da LTCD. Assim, a corrente de sequência zero que flui em um circuito induz uma tensão de sequência zero no outro circuito. Essa relação de tensão e corrente é representada pela impedância de acoplamento mútuo de sequência zero Z_{0M} na Figura 3.3.

Figura 3.2 – Linhas de transmissão mutuamente acopladas.



Fonte: Autor.

Figura 3.3 – Modelagem da impedância mútua de sequência zero: (a) Impedância de acoplamento de sequência zero; (b) Tensão induzida de sequência zero.



Fonte: Autor.

Na Figura 3.3 (a), ilustra-se a corrente de sequência zero de um circuito referencial $\hat{I}_0$, a corrente de sequência zero do circuito paralelo $\hat{I}_{0P}$, a impedância da linha Z_{1L} e a impedância mútua de sequência zero Z_{0M} . Nota-se na Figura 3.3 (b) uma tensão induzida na linha paralela, a qual é proporcional a impedância mútua de sequência zero Z_{0M} e a corrente de sequência zero do circuito referencial $\hat{I}_0$. Essa tensão mútua de sequência zero $\hat{V}_{0M}$, expressa em (3.11), representa o efeito do acoplamento mútuo de uma linha para a outra. Desse modo, essa tensão se sobrepõe sobre a tensão de interesse, podendo afetar no cálculo da impedância aparente por parte dos relés de distância.

$$\hat{V}_{0M} = \hat{I}_0 \cdot Z_{0M} \quad (3.11)$$

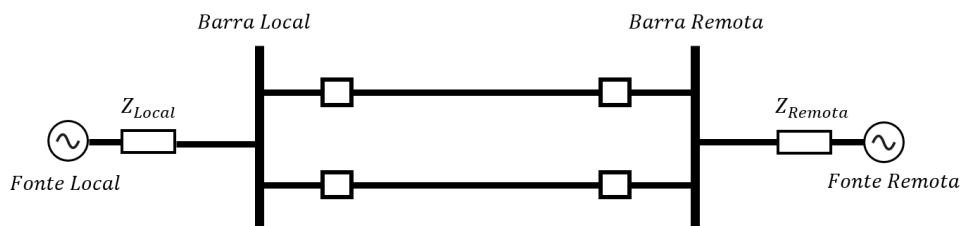
3.2 Parâmetros do Relé de Distância em LTCD

Com a interferência do acoplamento mútuo de sequência zero, a função 21 pode em uma extremidade da linha defeituosa ultrapassar o alcance e na outra extremidade operar abaixo do alcance, apresentando subalcance e sobrealcance, respectivamente. A detecção incorreta de falta pode induzir um falso *trip* na linha sã (MUKERJEE; ABDULLAH, 2008). Por esse motivo, o cálculo da impedância pelo relé em LTCD é diferente do cálculo para LTCS.

A fim de solucionar essa dificuldade nos relés de distância tradicionais, aplicados a LTCS, alguns autores têm proposto formas de calcular a impedância de falta pelo relé de distância em linhas em paralelo. Mascher (2010), Santos (2007), Eissa (2018) e Hu et al. (2002) sugerem uma proteção de distância compensada, na qual utiliza-se uma corrente compensada para mitigar o efeito do acoplamento mútuo entre as linhas. Essa corrente compensada considera as correntes de fase da linha defeituosa, a corrente de sequência zero da linha defeituosa e a corrente de sequência zero da linha sã.

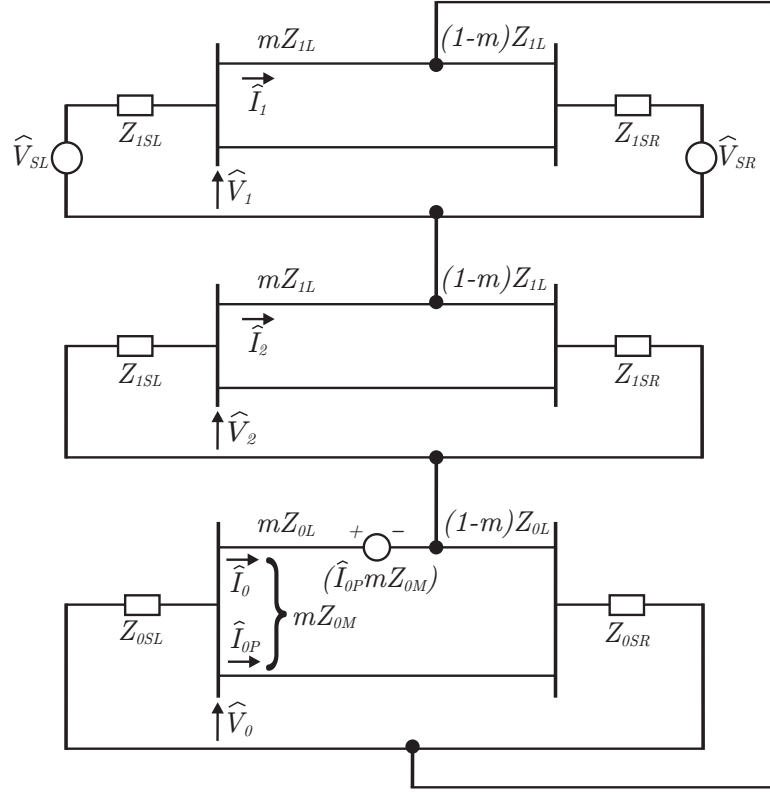
Uma LTCD com barramentos em comum, terminal *Local* e *Remoto*, é apresentada na Figura 3.4. Considera-se um curto-circuito nesta linha que envolva o terra, sendo que a tensão aplicada no circuito em falta inclui uma tensão induzida proporcional à corrente de sequência zero no circuito sadio. Assim, o relé de distância tradicional mede um valor de impedância irreal, pois ele não considera o efeito do acoplamento mútuo. Nesse contexto, apresenta-se na Figura 3.5 a topologia de uma linha de circuito duplo em curto-circuito monofásico na fase *a*.

Figura 3.4 – LTCD com barramentos em comum.



Fonte: Autor.

De acordo com a topologia da Figura 3.5, no qual os circuitos no domínio das seqüências estão conectados em série, tem-se o desenvolvimento matemático de (3.12), (3.13) e (3.14), com base na aplicação da lei de Kirchhoff das tensões. Fundamentado no Teorema de Fortescue, a soma das tensões $\hat{V}_1$, $\hat{V}_2$ e $\hat{V}_0$ é igual a tensão na fase *a*. Afirma-se também que a soma das correntes $\hat{I}_1$, $\hat{I}_2$ e $\hat{I}_0$ é igual a corrente na fase *a*. Logo, (3.13) pode

Figura 3.5 – LTCD em curto-circuito monofásico na fase a .

Fonte: Autor.

ser reescrita conforme (3.14), na qual $\hat{V}_a''$ é a tensão na fase defeituosa de uma LTCD.

$$[\hat{V}_1 - (mZ_{1L})\hat{I}_1] + [\hat{V}_2 - (mZ_{1L})\hat{I}_2] + [\hat{V}_0 - (mZ_{0L})\hat{I}_0 - (mZ_{0M})\hat{I}_{0P}] = 0 \quad (3.12)$$

$$\hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_0 = [(mZ_{1L})\hat{I}_1] + [(mZ_{1L})\hat{I}_2] + [(mZ_{0L})\hat{I}_0 + (mZ_{0M})\hat{I}_{0P}] \quad (3.13)$$

$$\hat{V}_a'' = mZ_{1L} \left[\hat{I}_a + \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \hat{I}_0 \right] + Z_{0M} \hat{I}_{0P} \quad (3.14)$$

Reescrevendo (3.14) somente em função de tensões, tem-se (3.15). Assim, $\hat{V}_a$ é a tensão que seria medida na fase a defeituosa, caso fosse uma LTCS, e $\hat{V}_{0M}$ é a tensão induzida de sequência zero na linha paralela, que é o produto da corrente de sequência zero da linha defeituosa ($\hat{I}_0$) vezes a impedância mútua de sequência zero (Z_{0M}), conforme (3.11).

$$\hat{V}_a'' = \hat{V}_a + \hat{V}_{0M} \quad (3.15)$$

A tensão induzida de sequência zero $\hat{V}_{0M}$ pode ser tanto positiva quanto negativa, a depender do sentido da corrente $\hat{I}_{0P}$ fluindo pela linha sã, o que resultará, respectivamente, em um acréscimo ou um decréscimo na tensão medida na linha defeituosa. Ademais, a contribuição para o curto-circuito, oriunda dos Equivalentes de Thévenin conectados às extremidades da LTCD, é o fator que predominantemente influencia no sentido da corrente na linha sã. Além disso, quanto maior for a diferença entre as impedâncias dos Equivalente de Thévenin, maior é a corrente de sequência zero na linha sã e, conseqüentemente, maior é a tensão induzida de sequência zero ($\hat{V}_{0M}$).

Por meio da expressão (3.14), obtém-se (3.16), a qual apresenta a impedância calculada pelo relé de distância para esse tipo de linha. Assim: $\hat{I}_{0P}$ é a corrente de sequência zero do circuito paralelo; m é a porcentagem da linha envolvida na falta, em relação a impedância de sequência positiva total da linha; e Z_{Rele} é a impedância calculada pela função 21 na ocorrência de curto-circuito monofásico na fase a (CALERO, 2007).

$$Z_{Rele} = mZ_{1L} = \frac{\hat{V}_a''}{\left[\hat{I}_a + \frac{Z_{0L}-Z_{1L}}{Z_{1L}} \hat{I}_0 + \frac{Z_{0M}}{Z_{1L}} \hat{I}_{0P} \right]} \quad (3.16)$$

Portanto, para o estudo de LTCD é necessário compensar a influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre as fases de um mesmo circuito e entre as fases de circuitos distintos. Nota-se em (3.16) essa compensação por meio da presença da corrente de sequência zero do circuito sadio $\hat{I}_{0P}$, tal que o acoplamento mútuo de sequência zero é contemplado no cálculo de Z_{Rele} para LTCD (BOZEK; IZYKOWSKI, 2008). Por isso, para assegurar a correta atuação da proteção de distância em LTCD deve-se considerar a corrente de sequência zero da linha protegida ($\hat{I}_0$), e também a corrente de sequência zero do circuito trifásico sem falta ($\hat{I}_{0P}$). Assim a impedância calculada pelo relé inclui a influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos das linhas paralelas.

Com base no cálculo da impedância vista pelo relé, indicado em (3.16), e considerando a teoria dos comparadores de fase, ilustra-se a Tabela 3.1. Essa tabela apresenta um resumo dos sinais de entrada das unidades de impedância da função 21 para LTCD, também denominado nesta dissertação de função 21 compensada.

Tabela 3.1 – Entradas para as unidades de impedância FT e FF da função 21 em LTCD.

Unidade de Impedância	Entrada de Tensão	Entrada de Corrente
Z_{AT}	$\hat{V}_a$	$\hat{I}_a + k_0 \hat{I}_0 + k_{0M} \hat{I}_{0P}$
Z_{BT}	$\hat{V}_b$	$\hat{I}_b + k_0 \hat{I}_0 + k_{0M} \hat{I}_{0P}$
Z_{CT}	$\hat{V}_c$	$\hat{I}_c + k_0 \hat{I}_0 + k_{0M} \hat{I}_{0P}$
Z_{AB}	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
Z_{BC}	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
Z_{CA}	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

A diferença da Tabela 3.1 de LTCD para a Tabela 2.1 de LTCS está na compensação mútua de sequência zero entre as linhas. Essa compensação é realizada por meio do índice k_{0M} , que corresponde ao fator de compensação mútua de sequência zero, definido em (3.17). Ao contrário da corrente, a tensão não precisa ser compensada por incluir os efeitos do acoplamento mútuo (APOSTOLOV et al., 2007). Ressalta-se que a proteção de distância com fator que compensa o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos trifásicos é implementada nesta dissertação.

$$k_{0M} = \frac{Z_{0M}}{Z_{1L}} \quad (3.17)$$

3.3 Modelagem da LTCD no *software* ATP

Para fins de simplificação, a matriz de impedâncias para LTCD $[Z''_{abc}]$, dada por (3.2), é resumida a (3.18). Com isso, Z_S é a impedância própria da linha, Z_P é a impedância mútua entre duas fases de um mesmo circuito trifásico e Z_m é a impedância mútua entre duas fases de diferentes circuitos trifásicos (NEVES, 2019).

$$\begin{bmatrix} Z''_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_S & Z_P & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_S & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_P & Z_S & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_S & Z_P & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_S & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_P & Z_S \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Nesse contexto, (3.19), (3.20) e (3.21) determinam a relação de Z_S , Z_P e Z_m , respectivamente, em relação as impedâncias de sequência da LTCD (SANTOS, 2007).

$$Z_S = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3} \quad (3.19)$$

$$Z_P = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \quad (3.20)$$

$$Z_m = \frac{Z_{0M}}{3} \quad (3.21)$$

Segundo (LEUVEN, 1987), com base em Z_S , Z_P e Z_m , calculam-se os dados para modelagem da LTCD no *software* ATP, quais sejam Z_G , Z_L e Z_{IL} , que são determinados por (3.22), (3.23) e (3.24), nessa ordem. Destaca-se que Z_G é o parâmetro terra da linha,

Z_L é o parâmetro da linha de circuito duplo e Z_{IL} é o parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos.

$$Z_G = Z_S + 2Z_m + 3Z_P \quad (3.22)$$

$$Z_L = Z_S - Z_m \quad (3.23)$$

$$Z_{IL} = Z_S + 2Z_m - 3Z_P \quad (3.24)$$

No presente trabalho, os valores de Z_0 , Z_1 e Z_{0M} da LTCD do sistema real analisado, foram empregados no equacionamento supramencionado, de forma a permitir a modelagem da LTCD no *software* ATP.

4 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

O acoplamento mútuo de sequência zero entre os condutores dos circuitos da LTCD compromete a correta atuação da proteção de distância. Sendo assim, soluções para corrigir esse problema são estudadas e propostas por diversos autores. A fim de situar a presente pesquisa perante os trabalhos já existentes sobre a proteção de distância aplicada em linhas de circuito duplo, realiza-se neste capítulo uma revisão do estado da arte sobre as referências correlacionadas a esse assunto. Para tanto, inicialmente descrevem-se as pesquisas referentes à proteção de distância compensada, a qual mitiga o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero, dos diferentes circuitos, por meio da utilização das correntes de sequência zero de ambos os circuitos trifásicos da LTCD. Posteriormente, são abordados os trabalhos sobre a proteção de distância, que compensa o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero por meio de diferentes métodos. Por fim, apresenta-se um resumo dos trabalhos listados, evidenciando as ideias mais relevantes que contribuíram para nortear o desenvolvimento da presente dissertação.

4.1 Proteção de Distância Compensada

A proteção de distância compensada realiza – além da compensação mútua entre as fases do mesmo circuito – a correção do efeito do acoplamento mútuo entre as fases de circuitos diferentes. Nesse sentido, para corrigir o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero, são utilizadas as tensões e as correntes do circuito protegido, bem como as correntes do circuito paralelo a linha protegida. A função 21 compensada aplicada a linhas de circuito duplo é a solução abordada pelos autores citados desta seção e também é a proteção utilizada nas simulações realizadas nesta dissertação.

Santos (2007) analisa o desempenho da proteção de distância aplicada em LTCD, a fim de analisar o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero. Para tanto, um sistema de transmissão em circuito duplo, com nível de tensão de 500 kV e extensão de 250 km, é implementado em ambiente *Matlab*. As simulações desse trabalho consistem em aplicar curtos-circuitos em diferentes posições da linha: próximo ao terminal local, em 50% da linha e próximo ao terminal remoto. Além de variar o local da falta, as análises alteram o carregamento da linha, a resistência de falta, o modo de operação (com os dois circuitos em paralelo e com um dos circuitos aterrado em ambas as extremidades) e, por fim, com e sem o fator de correção do efeito de acoplamento mútuo de sequência zero. Ressalta-se que o fator de correção é calculado com base nos valores de ambos os circuitos trifásicos da linha dupla, sendo este ajustado de forma adaptativa de acordo com o estado atual do sistema de potência. Os resultados das simulações são avaliados por meio da análise das trajetórias, no

plano $R-X$, da impedância calculada pelo relé. Notou-se, pelos resultados, que a proteção de distância com a correção do acoplamento mútuo minimiza o sobrealcançe e subalcançe no sistema de transmissão. Verifica-se ainda que, para curtos-circuitos monofásicos, a influência do acoplamento mútuo é considerável, evidenciando a importância de se realizar na proteção de distância a correção do efeito de acoplamento mútuo.

Mascher (2010) analisa o desempenho de três algoritmos de proteção de distância compensada, frente a faltas monofásicas, em uma LTCD real de 440 kV. As simulações são realizadas no *software* ATP, fornecendo assim sinais de tensão e de corrente para serem empregados em testes dos algoritmos implementados no *Matlab*. Os cenários de curtos-circuitos simulados foram obtidos variando-se o local da falta e o valor da resistência de falta. Ademais, a modelagem do sistema considerou o fluxo de potência, o índice SIR e o acoplamento mútuo de sequência zero entre as linhas. Para a implementação, aplicou-se o filtro cosseno de ciclo completo e a função 21 com característica quadrilateral para todos os algoritmos analisados. A dissertação considerou os três diferentes algoritmos: A , com fator de compensação mútua de sequência zero entre fases de um mesmo circuito (como a proteções em LTCS), cuja lógica é baseado nos relés eletromecânicos; B , implementado por relés numéricos de última geração (também como proteções em LTCS); e C , no qual a compensação mútua é realizada pela própria característica quadrilateral do relé numérico, com as zonas de proteção expandidas para que assim o deslocamento da impedância seja compensado (realiza a compensação por meio das zonas de proteção). O fator de correção utiliza dados de corrente da linha sã, para assim suprir o efeito de acoplamento mútuo entre os circuitos da LTCD, denominada proteção 21 compensada. Os resultados são expressos por curvas de atuação dos relés, ilustrando as trajetórias das impedâncias no diagrama $R-X$ para cada *loop* de falta. Pelos resultados, conclui-se que no geral: o algoritmo A tem resultados satisfatórios em relação à resistência de falta, porém não compensa completamente o efeito de acoplamento mútuo; o algoritmo B teve resultados de subalcançe, porém não atuou para variações de fluxo de carga e *infeed*; e o algoritmo C atua indevidamente para variações de fluxo de carga importado e força da fonte. O trabalho não apresenta qual o melhor algoritmo, mas aborda a vulnerabilidade da proteção de distância frente a faltas monofásicas em linhas de circuito duplo, mesmo quando há compensação do acoplamento mútuo de sequência zero.

O comportamento do relé de distância aplicado a LTCD também é estudado por Sanaye-Pasand e Seyedi (2003). As simulações apresentadas no artigo são realizadas no *software* *Electromagnetic Transients including DC* (EMTDC) e *Power System CAD* (PSCAD). Por meio de um sistema de LTCD de 230 kV, faltas monofásicas são aplicadas ao longo da linha e proteções de distância tradicional e compensada são analisadas. O fator de correção do acoplamento mútuo considera além dos dados da linha protegida, a corrente da linha paralela. Com isso, a força das fontes, *Local* e *Remota*, e a localização da falta são variadas, sendo que a aplicação dos curtos-circuitos foram em 75%, 78% e 85%

da linha, assim o último caso considera uma falta externa, por estar fora da 1ª zona de atuação da função 21. Além disso, os autores realizam um desenvolvimento matemático para o cálculo da impedância medida pela função 21 e comparam os valores teóricos com os resultados simulados. Fundamentados nos resultados das simulações, aplicando a função 21 tradicional, a proteção: não atuou para casos de falta interna; atuou com subbalcance e sobrealcance para algumas faltas internas; e atua para casos de curto-circuito externo. Porém, a função 21 compensada atua corretamente para os casos em que a resistência de falta é menor ou igual a 14Ω . O estudo apresenta de forma sistemática a comparação entre a proteção de distância tradicional e compensada, abordando a importância da proteção de distância que prevê o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero entre os circuitos da LTCD.

Em Santos (2008), estuda-se o desempenho de seletividade do relé de distância em LTCD. Simulações numéricas são realizadas no *software* ATP, considerando vários tipos de curtos-circuitos, FF e FT em sete localizações distintas da linha de 220 kV e 55 km de comprimento. O fator que compensa o acoplamento mútuo das LTCD, o qual considera também informações de corrente da linha paralela a linha protegida, é utilizado na análise para eliminar o efeito de subbalcance para curtos-circuitos que envolvem o terra no final da linha. Porém, o autor propõe o aumento do alcance da reatância da Zona 1 para os casos da proteção de distância compensada, a fim de melhorar os resultados.

Pritchard et al. (2016) pesquisam o impacto do acoplamento mútuo em LTCD, quando implementado o fator de compensação de acoplamento mútuo, o qual considera também a corrente de sequência zero da linha sã. Além disso, os autores apresentam várias topologias e estados operacionais de linhas em paralelo. Os fenômenos analisados são o efeito do acoplamento mútuo e as faltas *cross-country*. O estudo propõe um *software* para investigar o impacto do acoplamento mútuo nos diferentes cenários de curto-circuito, com uma simulação de rede transitória. Assim, análises de curtos-circuitos pelo *software* proposto podem variar o local da falta, a topologia do sistema, o estado de operação e as alimentações nos terminais da linha. O estudo afirma ser necessário testar os dispositivos de proteção, considerando diferentes topologias e cenários de curtos-circuitos reais para incluir a variação dos efeitos do acoplamento mútuo.

No trabalho de Xu et al. (2016) é apresentado um algoritmo de proteção de distância em 1ª zona para faltas monofásicas em LTCD. Esse algoritmo considera o fator que compensa o acoplamento mútuo de sequência zero entre os circuitos paralelos (por meio de dados locais apenas da linha protegida), porém não realiza conexão cruzada para medir os dados de corrente da linha paralela. O cálculo da corrente de sequência zero da linha paralela é obtido pela corrente de sequência zero do circuito protegido, sem a necessidade de conexão cruzada. Os *softwares* PSCAD e *Matlab* são utilizados para modelagem e simulação de uma LTCD de 500 kV com 400 km de extensão, sendo que a 1ª

zona alcança 85% da linha. Pelos resultados, o algoritmo proposto corrige o subbalcance e sobrebalcance que acontece com os algoritmos tradicionais, além de minimizar gastos (por calcular o fator de compensação apenas com os dados da linha protegida) e erros por não utilizar a conexão cruzada.

Em Hu et al. (2002), os autores também propõem um esquema de proteção de distância adaptável para ser utilizado em linhas em paralelo. Esse ajuste adaptável é feito de acordo com a disponibilidade de sinais de entrada do relé, isto para obter um desempenho adequado, mesmo com a influência do efeito de acoplamento mútuo. Assim, o relé de distância utiliza além dos dados da linha protegida, a corrente de sequência zero da linha paralela para corrigir esse acoplamento e evitar operações falsas em linhas saudáveis. Caso não seja possível verificar a corrente de sequência zero da linha paralela, o esquema se adapta e utiliza os fatores de compensação de corrente de sequência zero apropriados no cálculo da impedância. Além do mais, o método não utiliza sinal remoto e fornece um esquema de *fallback* embutido, que garante a operação confiável em todas as condições de operação. O esquema é simulado no *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) e comparado com o relé de distância convencional. Pela análise, o uso da corrente de sequência zero da linha paralela para compensar o efeito de acoplamento mútuo é pouco aplicável, pois pode causar falha de atuação para curtos-circuitos próximos aos terminais da linha paralela. Sendo assim, para alguns casos o fator de compensação mútua é desativado nesse método e o relé adapta sua operação aos melhores sinais e às condições de falta.

Um relé de distância adaptável, que não necessita de sinais remotos para LTCD, é proposto por Srivani et al. (2009). Esse relé tem característica quadrilateral com direcionalidade, protege três zonas e se adapta de acordo com a disponibilidade dos sinais tensão e corrente. O fator de correção do acoplamento mútuo utiliza também dados da linha paralela, caso os dados de corrente da linha paralela não estejam disponíveis um fator de compensação padrão é utilizado. Esse relé adaptativo proposto é testado para faltas à terra em dois cenários: quando uma linha está desligada e aterrada nos dois lados; e quando as duas linhas paralelas estão em operação. Por meio de estado estacionário e teste dinâmico, os resultados expressam a funcionalidade desse método.

Uma revisão bibliográfica sobre proteção de distância em LTCD é apresentada em Calero (2007), Apostolov et al. (2007) e Tziouvaras et al. (2014). Em Calero (2007), os principais assuntos são as proteções de distância e direcional, além da localização de faltas. Realiza-se nesse artigo o desenvolvimento matemático para calcular a impedância medida pelo relé de distância em LTCD, ressaltando o impacto da impedância mútua de sequência zero entre os circuitos, existente mesmo em condições normais de operação e com transposição completa da linha. Algumas situações são simuladas e métodos são propostos, como um algoritmo para localização de faltas e uma unidade terra da proteção de distância.

Conclui-se que, por meio da compensação mútua de sequência zero (por meio de dados da linha protegida e da linha paralela) é possível a correta atuação da função 21, não ocorrendo subbalcance ou sobrealcance. Destaca-se ainda que, para utilizar dados de correntes da linha sã, é necessário fiação extra e lógica adicional na proteção da linha, condição solucionada pelo esquema proposto no artigo, o qual tem disparo de alta velocidade.

O trabalho de Apostolov et al. (2007) aborda a teoria do efeito de acoplamento mútuo de sequência zero em diferentes condições de operação da linha de circuito duplo e os curtos-circuitos entre fases de diferentes circuitos da LTCD, denominadas de falhas *cross-country*. Além disso, o trabalho trata da interferência do efeito de acoplamento mútuo no desempenho do relé de sobrecorrente de aterramento e do relé de distância, evidenciando que esse efeito não interfere no desempenho do relé diferencial. Por fim, esquemas adaptativos são propostos para melhorar o desempenho da função 21 aplicada a LTCD.

Tziouvaras et al. (2014) abordam principalmente os seguintes assuntos: modelagem matemática de linhas acopladas mutuamente; proteção de sobrecorrente direcional de aterramento para várias topologias; proteção de distância aplicada a LTCD e o fator que corrige o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero; e LTCD operadas como circuito único. Os autores concluem que os métodos de compensação de acoplamento mútuo (o qual consideram dados da linha protegida e da linha paralela) na proteção de distância não oferecem soluções completas, por isso, no artigo é recomendado o uso de elementos de distância fase (21) e terra (21N) em linhas acopladas mutuamente.

Nota-se que esses trabalhos consideram o fator de correção do efeito de acoplamento mútuo de sequência zero com um valor padrão ou manipulando dados de tensão e corrente da linha protegida e dados de corrente da linha paralela. Além disso, essa correção do acoplamento mútuo apresenta desempenho satisfatório para alguns casos, no entanto para outros a compensação ocasionou erros na proteção de distância ou apresentou resultado indiferente em relação a proteção tradicional.

4.2 Diferentes Métodos de Proteção de Distância Compensada

Nesta seção são abordados trabalhos também referentes à função 21 aplicada a LTCD, porém com métodos diferentes da função 21 compensada descritos na seção anterior, os quais dependem da corrente de sequência zero da linha paralela para efetuar a compensação do acoplamento mútuo.

Eissa e Masoud (2001) propõem um método de proteção de distância para LTCD, o qual consiste em dois relés, cada um localizado em uma extremidade linha, sendo que cada relé é alimentado por sinais de tensão e corrente da linha em falta e sinais de corrente da linha sã. A técnica é baseada na comparação da impedância medida das fases,

considerando diferentes aspectos da falta, como: local de aplicação, valor da resistência de falta e fases envolvidas. Um algoritmo de Fourier de ciclo completo é utilizado para calcular a impedância de falta. O sistema analisado tem nível de tensão de 400 kV e 300 km de comprimento, sendo modelado no *software* ATP. O método propõe principalmente soluções para casos com: altas resistências de falta, efeito de acoplamento mútuo, e faltas entre fases de circuitos diferentes (*cross-country*). Porém, esse esquema apresenta problemas quando a corrente da linha paralela muda de direção e quando a resistência de falta tem valores elevados.

Eissa (2018) propõe um sistema de monitoramento aplicado para proteção de LTCS e LTCD. A medição é realizada de forma fasorial por meio de *Phasor Measurement Unit* (PMU), o qual é implantado em uma rede elétrica real. Além do PMU, o sistema de monitoramento de área *Wide Area Monitoring System* (WAMS) também foi utilizado. Esse sistema de monitoramento é descrito por equações diferenciais da operação dinâmica das linhas na ocorrência de curtos-circuitos. Como resposta, são obtidas curvas próximas ou não do ponto de equilíbrio, indicando defeito da LTCD. A simulação é realizada em ambiente *Matlab* por meio do *Simulink*, sendo que o método apresenta atuação correta. Para aplicação desse método, é necessário o uso de dezesseis relés modernos e cinco apenas PMUs, podendo esse número ser reduzido de acordo com análises para cada caso.

Um método de otimização para compensar a influência da impedância mútua de sequência zero em LTCD é proposto por Dai et al. (2019). Além disso, informações da subestação são utilizadas na implementação de um outro método, denominado de ajuste auto adaptável do coeficiente de compensação da sequência zero. Um sistema, de 500 kV e 100 km de extensão, é modelado com base no modelo de Bergeron, sendo que são aplicados curtos-circuitos monofásicos próximo ao terminal remoto dessa linha. Nota-se, pelos resultados das simulações, que o método auto-adaptável tem melhor desempenho quando comparado com o método de otimização, no que diz respeito a localização de faltas, e nos demais casos analisados.

Em Unde e Damhare (2016), é proposto um método para estimar os parâmetros de sequência zero, positiva e negativa de LTCD, para facilitar a aplicação do relé de distância em linhas de circuito duplo. Além disso, o trabalho propõe um novo método para estimar a impedância mútua de sequência zero durante faltas à terra fora das linhas paralelas. Ressalta-se que todos os métodos abordados nesse artigo são baseados em PMU. Nas simulações, o sistema analisado é modelado no *software* ATP, considerando as LT em paralelo mutuamente acopladas para a implementação, sendo elas representadas pelo modelo de Clarke, a parâmetros distribuídos. Os dados de entrada do relé de distância foram obtidos por medições fasoriais em ambas as extremidades das linhas e manipulados em algoritmo no *Matlab*. Com isso, o objetivo de melhorar a precisão do relé de distância para faltas à terra é atingido, pois o algoritmo proposto calcula a impedância por meio da

compensação de sequência zero automática e da compensação mútua da sequência zero. Os autores ainda afirmam que os resultados expressam parâmetros próximos aos valores reais.

Chauhan e Dahiya (2018) implementam um esquema que identifica faltas em LTCD utilizando PMU, por meio das magnitudes da tensão e corrente de sequência positiva da linha. O esquema utiliza esses dados, pois a sequência positiva está presente em todos os tipos de curtos-circuitos. A proteção identifica a falta quando a corrente de sequência positiva medida é maior que o valor em condições normais de operação. Além do mais, para identificar qual fase dos circuitos está em falta, o desvio percentual máximo na tensão de sequência positiva é usado no método. O esquema é implementado em LTCS e estendido às LTCD, sendo que o método atua corretamente para as simulações realizadas.

Por fim, Honorato et al. (2020) avaliam dois tipos de proteção de distância aplicadas em LTCD: a função 21 fasorial tradicional e a função 21 no domínio do tempo. Para avaliar o desempenho dessas duas proteções utiliza-se uma linha real de 500 kV e 300 km, modelada no *software* ATP. Ressalta-se que as proteções analisadas não consideram a compensação de acoplamento mútuo de sequência zero. Diferente da proteção de distância abordada nos outros trabalhos, nesse artigo utilizam-se valores incrementais, na proteção de distância no domínio do tempo, para analisar a variação de tensão no ponto de alcance, estimando se a falta está dentro ou fora da zona protegida. A implementação da proteção de distância no domínio do tempo tem respostas distintas à implementação tradicional, no que diz respeito a influência de acoplamento mútuo. Porém, a função 21 no domínio do tempo, para os casos simulados, detecta o curto-circuito mais rápido comparado a função 21 fasorial.

4.3 Síntese da Revisão Bibliográfica e Relação com o Tema do Estudo Realizado

O estudo dos trabalhos anteriormente mencionados foi de extrema importância para o desenvolvimento e embasamento teórico desta dissertação. Os trabalhos de Calero (2007), Apostolov et al. (2007), Tziouvaras et al. (2014) e Pritchard et al. (2016) são destacados pela revisão teórica sobre o tema de proteção em LTCD, além de abordarem diferentes métodos para proteção desse tipo de linha. Ademais, as pesquisas expõem a complexidade de implementar, coordenada e seletivamente, a proteção de distância em LTCD.

A proteção de distância com fator que compensa o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero entre os diferentes circuitos trifásicos, denominada aqui de função 21 compensada, é apresentada em Sanaye-Pasand e Seyedi (2003), Santos (2007), Santos (2008) e Mascher (2010). Esses trabalhos têm em comum a correta atuação da função

21 compensada frente a faltas monofásicas em linhas de circuito duplo, demonstrando ser um método confiável para a implementação nesta dissertação. Porém, a proteção de distância compensada, mesmo com fator de compensação mútua, pode apresentar falhas de operação, como expresso por Hu et al. (2002), Tziouvaras et al. (2014) e Eissa e Masoud (2001). Por isso, os autores Hu et al. (2002), Srivani et al. (2009) e Xu et al. (2016) propõem, em seus artigos, uma adaptação para corrigir problemas da função 21 compensada, correspondentes a proteções de distância com compensação adaptável. Assim, a função 21 compensada para esses casos não utiliza diretamente os dados de corrente da linha paralela, os quais são necessários para o cálculo do fator que compensa o efeito de acoplamento mútuo. Nas proteções de distância com compensação adaptável, o fator é obtido por meio dos dados de corrente da linha protegida ou por um valor padrão adotado. A função 21 compensada adaptável é uma alternativa de melhoria da função 21 compensada, mas pode calcular de forma errônea os dados da linha paralela ou adotar um fator padrão que não é adequado para um determinado caso. Sendo assim, a proteção adaptativa pode ser confiável a depender do sistema e condições analisadas.

Além dos métodos convencionais, as proteções de distância para LTCD utilizam PMU para aprimorar a atuação dos relés, como apresentado nas pesquisas de Eissa (2018), Unde e Dambhare (2016) e Chauhan e Dahiya (2018). Além do mais, em Honorato et al. (2020) tem-se a implementação da função 21 no domínio do tempo e em Dai et al. (2019) apresenta-se um método que melhora o desempenho da função 21 compensada utilizando dados da subestação. Esse conjunto de trabalhos apresentam estudos relacionados à proteção de distância em LTCD. Cada sistema deve ser analisado antes de escolher qual método mais eficiente para compensar o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero.

Por meio das pesquisas apresentadas neste capítulo, apresenta-se nesta dissertação a avaliação da proteção de distância compensada aplicada a dois sistemas de 138 kV de LTCD reais, utilizando dados do terminal local de ambas as linhas. Curtos-circuitos monofásicos são aplicados em diferentes localizações da linha para verificar se a função 21, de fato compensa o efeito de acoplamento mútuo de sequência zero no sistema analisado. Dos trabalhos estudados, nenhum deles analisa sistemas de transmissão com o nível de tensão de 138kV, com isso o objetivo desta dissertação é analisar se o comportamento verificado nesses trabalhos se repete em linhas com nível de tensão mais baixo.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como já discutido, a proteção de distância tradicional é referente à aplicação em LTCS (a qual compensa o acoplamento mútuo entre as fases de um mesmo circuito trifásico) e a proteção de distância compensada é referente à aplicação em LTCD (a qual compensa o acoplamento mútuo entre as fases de um mesmo circuito e entre fases dos circuitos trifásicos da LTCD). Com o intuito de realizar uma avaliação comparativa entre a Função 21 Tradicional (F21T) e a Função 21 Compensada (F21C), diversas simulações foram realizadas em dois sistemas de transmissão implementados no software ATP, considerando dados de um sistema real. Nesse contexto, este capítulo apresenta, primeiramente, análises da sensibilidade paramétrica em um sistema de 138 kV com uma LTCD de barramentos em comum. Posteriormente, um sistema real composto por cargas e uma fonte de geração conectados ao longo das linhas, além dos Equivalentes de Thévenin em suas extremidades, é analisado transitoriamente. Por fim, são discutidas as análises dos resultados obtidos.

Para as análises que seguem, considera-se que as funções F21T e F21C foram aplicadas para proteção de $L1$ da LTCD, nas análises de sensibilidade paramétrica e nas simulações transitórias de curto-circuito. Dessa forma, e conforme ilustrado na Figura 5.1 e na Figura 5.16, TPC1 mede as tensões na barra local, TC1 mede as correntes por fase em $L1$ próximo ao terminal *Local* e TC2 mede as correntes por fase em $L2$ também próximo ao terminal *Local*. Assim, ambas as funções 21 atuam em 1ª zona, sendo ajustadas para alcançar faltas em até 85 % da linha, e curtos-circuitos são aplicados em $L1$ e $L2$.

Nas análises, consideraram-se curtos-circuitos monofásicos (na fase a), assim as faltas bifásicas-terra não foram avaliadas para fins de simplificação. Destaca-se que em curtos-circuitos que não envolvem o terra, não há circulação de corrente de sequência zero, responsável pelo efeito de acoplamento mútuo de sequência zero presente em LTCD. Por esse motivo, faltas trifásicas e bifásicas sem terra não são analisadas nesta dissertação, pois a formulação matemática das F21T e F21C é igual, tornando-se desnecessária a avaliação comparativa dessas proteções.

Vale justificar que, para a implementação da proteção de distância nos sistemas analisados (manipulados em algoritmo no *Matlab*), utilizou-se a característica MHO polarizada por meio dos comparadores de fase (calculados com base nas unidades de impedância FT e FF), sendo a polarização realizada por memória de tensão de sequência positiva. Para a lógica da proteção de distância tradicional (ou F21T), foram utilizados os sinais de tensão do TPC1 e os sinais de corrente por fase do TC1, oriundos de $L1$. Além dessas medições, para implementação da proteção de distância compensada (ou F21C)

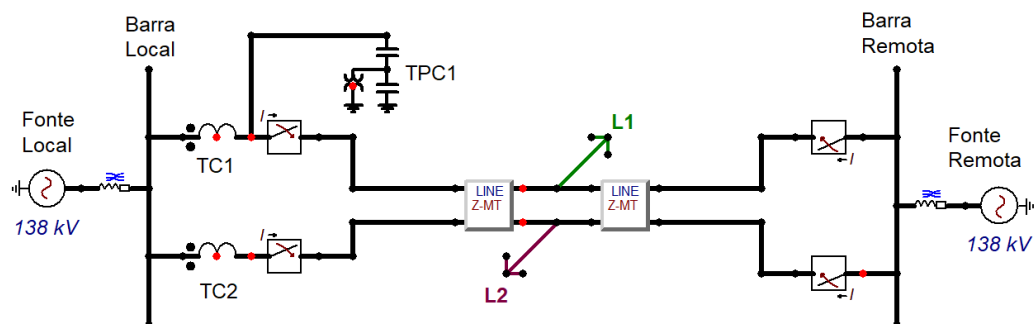
foram efetuadas as medições de correntes por fase do TC2, de $L2$. Mesmo com a medição de correntes por TC2, ressalta-se que a F21C está aplicada em $L1$ (assim como a F21T) e utiliza dados de corrente da linha paralela $L2$. Com base nas medições das correntes por fase, calcularam-se os valores decorrentes de sequência zero nos dois circuitos trifásicos.

Destaca-se que ainda, de acordo com Stokes-Waller (2000), é necessário utilizar um algoritmo de seleção de fases, para identificar a fase defeituosa e somente habilitar a operação da unidade de impedância correspondente a essa fase. Dessa forma, são apresentados neste trabalho apenas as unidades da fase a , tanto da F21T quanto da F21C.

5.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica

A análise de sensibilidade paramétrica possibilita resultados mais abrangentes, desse modo considera-se o regime permanente de falta para verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito. Assim, apresenta-se na Figura 5.1 um sistema real simplificado simulado para análise de sensibilidade paramétrica, o qual é composto por fontes de tensão de 138 kV (60 HZ), implementadas como Equivalentes de Thevénin, e denominadas como terminais *Local* e *Remoto*. Além do mais, os terminais *Local* e *Remoto* são conectados por uma LTCD de 126 km de comprimento, a qual é composta por $L1$ e $L2$. Ressalta-se que a LTCD foi modelada por meio do equacionamento desenvolvido no Capítulo 3 e dos dados da linha dupla.

Figura 5.1 – Modelo no *software* ATP do sistema real simplificado para análise de sensibilidade paramétrica.



Fonte: Autor.

Os dados obtidos dos sistemas reais foram: resistência elétrica, reatância indutiva, susceptância capacitiva, resistência elétrica mútua e reatância indutiva mútua, tanto de sequência positiva quanto de sequência zero. Por meio desses dados do sistema avaliado e das Equações (3.19), (3.20) e (3.21), obteve-se Z_S , Z_P e Z_m , sendo: Z_S a impedância própria da linha; Z_P a impedância mútua entre duas fases de um mesmo circuito trifásico; e Z_m a impedância mútua entre duas fases de diferentes circuitos trifásicos. Com isso, e

pelas Equações (3.22), (3.23) e (3.24), obtiveram-se Z_G , Z_L e Z_{IL} , os quais são descritos na Tabela 5.1, sendo: Z_G o parâmetro terra da linha; Z_L o parâmetro da linha de circuito duplo; e Z_{IL} o parâmetro da linha associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos.

Tabela 5.1 – Parâmetros reais da LTCD dos sistemas analisados.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Resistência	R_G	$4,390 \cdot 10^{-4} \Omega/km$
	R_L	$6,765 \cdot 10^{-5} \Omega/km$
	R_{IL}	$6,765 \cdot 10^{-5} \Omega/km$
Indutância	X_G	$1,447 \cdot 10^{-3} \Omega/km$
	X_L	$2,496 \cdot 10^{-5} \Omega/km$
	X_{IL}	$1,877 \cdot 10^{-4} \Omega/km$
Susceptância	Y_G	$317,013 S/km$
	Y_L	$234,997 S/km$
	Y_{IL}	$186,696 S/km$

Com base nos valores de Z_G , Z_L e Z_{IL} , modelou-se no *software* ATP o trecho da LTCD dos sistemas reais analisados. Nessa modelagem, ambos os circuitos trifásicos foram representados como um único circuito duplo com transposição individual por fase, de acordo com o modelo a parâmetros distribuídos, o qual considera o acoplamento mútuo entre as linhas (LEUVEN, 1987).

Ressalta-se que derivações ou cargas conectadas à LTCD são fatores que podem influenciar no desempenho da função 21, uma vez que eles resultam em erros no cálculo da impedância medida. Assim, o sistema da Figura 5.1 foi escolhido para avaliação em massa justamente por ser simplificado e não possuir esses fatores de interferência.

No mais, os resultados da análise de sensibilidade paramétrica são expressos por gráficos indicando a região de operação e de restrição. Nesses gráficos, o eixo y contém o ângulo de atuação do relé e o eixo x apresenta a variação da aplicação das faltas ao longo da linha, denominada localização de falta. Além disso, em cada gráfico são expressos quatro curvas de diferentes casos, sendo estes gráficos analisados para a atuação da F21T e da F21C. Destaca-se que as simulações a seguir consideram faltas na linha protegida ($L1$) e na linha paralela ($L2$) para analisar o impacto da F21T e da F21C, as quais protegem $L1$.

Nas análises da sensibilidade paramétrica, apenas o curto-circuito monofásico na fase a foi analisado, uma vez que faltas envolvendo apenas uma das fases e o terra são mais comuns de acontecerem no sistema elétrico. Desse modo, as simulações foram realizadas variando-se:

- A força das fontes dos terminais *Local* e *Remoto*, avaliados respectivamente pelos

indicadores SIR_L e SIR_R , sendo 1,0 para fonte fraca e 0,1 para fonte forte;

- O ângulo de carregamento do terminal *Remoto* (δ_{rem}), tal que determinou-se 0° para o terminal *Local*, e 10° , -10° e 30° para o terminal *Remoto*;
- A linha de transmissão a qual o curto-circuito foi aplicado, dada por $L1$ e $L2$; e
- A localização de falta nas linhas.

Diante disso, apresenta-se na Tabela 5.2 os casos de curtos-circuitos monofásicos na fase a aplicados em $L1$, variando-se as forças das fontes – SIR_L e SIR_R – e o carregamento do terminal *Remoto*. De forma análoga, apresenta-se na Tabela 5.3 os casos de curtos-circuitos monofásicos na fase a aplicados em $L2$, variando-se SIR_L , SIR_R e δ_{rem} . Para os casos da Tabela 5.2 e da Tabela 5.3, a resistência de falta (R_f) é igual a zero, caracterizando essas faltas como francas.

Tabela 5.2 – Resumo dos casos de curto-circuito franco monofásico na fase a , aplicados em $L1$, variando-se a localização de falta.

Caso	$C1$	$C3$	$C5$	$C7$	$C9$	$C11$	$C13$	$C15$	$C17$	$C19$	$C21$	$C23$
SIR_L	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1
SIR_R	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1
δ_{rem}	10°	10°	10°	10°	-10°	-10°	-10°	-10°	30°	30°	30°	30°

Tabela 5.3 – Resumo dos casos de curto-circuito franco monofásico na fase a , aplicados em $L2$, variando-se a localização de falta.

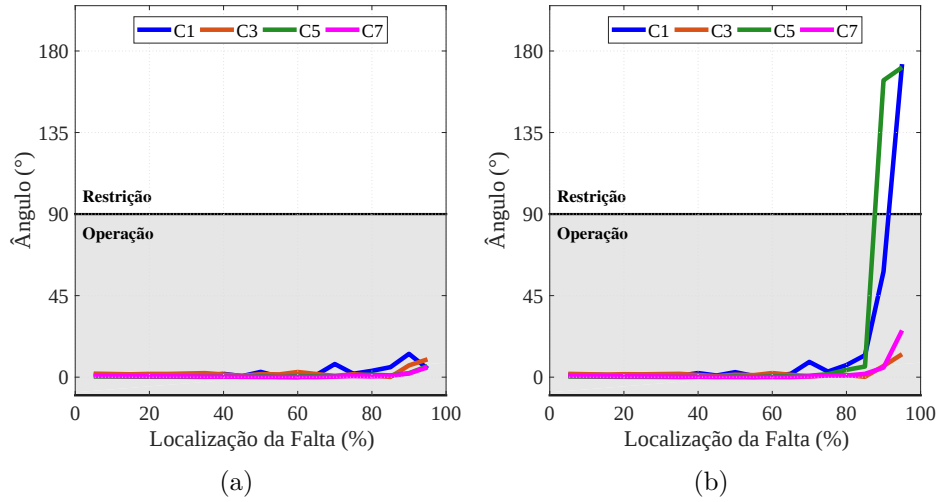
Caso	$C2$	$C4$	$C6$	$C8$	$C10$	$C12$	$C14$	$C16$	$C18$	$C20$	$C22$	$C24$
SIR_L	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1
SIR_R	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1
δ_{rem}	10°	10°	10°	10°	-10°	-10°	-10°	-10°	30°	30°	30°	30°

5.1.1 Curtos-circuitos aplicados em $L1$

Ilustra-se na Figura 5.2 os resultados do desempenho das funções F21T e F21C, na ocorrência de curtos-circuitos monofásicos francos na fase a , variando-se a localização da falta, para os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, conforme Tabela 5.2. Esses resultados são referentes às faltas em $L1$, com δ_{rem} igual 10° e atuação da proteção em 1ª zona, sendo alcance de 85% da linha.

Conforme os resultados da Figura 5.2 (a), a F21T atua para curtos-circuitos em 100% de $L1$, apresentando sobrealcance (quando a proteção atua além do ponto de alcance). De acordo com a Figura 5.2 (b), a F21C atua corretamente para os casos $C1$ e $C5$ (no

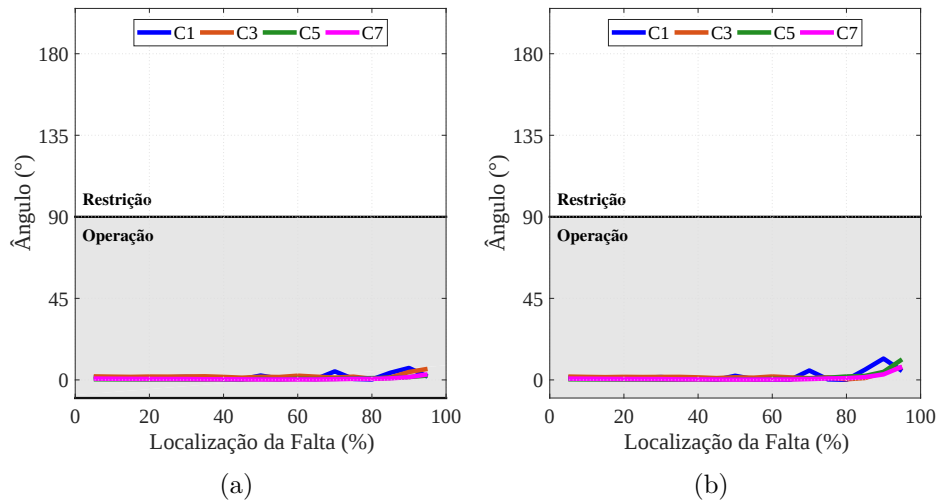
Figura 5.2 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



qual a força da fonte *Remota* é fraca, independente da força da fonte *Local*). No entanto, a F21C apresenta sobrealcance para os casos $C3$ e $C7$ (no qual a força da fonte *Remota* é forte, independente do parâmetro força da fonte *Local*).

Para a análise da atuação em 2ª zona dos casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, apresenta-se a Figura 5.3. Nota-se que, para todos os casos de atuação em 2ª zona as F21T e F21C atuam para 100% de $L1$. Assim, ambas as funções 21 protegem corretamente $L1$.

Figura 5.3 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



A fim de avaliar a influência do ângulo de carregamento, os casos $C1$, $C3$, $C5$ e $C7$ foram refeitos, mas considerando outros valores de ângulo de carregamento. Assim, quando considerado δ_{rem} igual -10° , os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$ foram gerados e quando considerado δ_{rem} igual 30° , os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$ foram simulados.

Apresentam-se na Figura 5.4 os resultados do desempenho das funções F21T e F21C, na ocorrência de curtos-circuitos monofásico francos na fase a , variando-se a localização da falta, para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, conforme Tabela 5.2. Esses casos são referentes às faltas em $L1$, com δ_{rem} igual -10° e atuação da proteção em 1ª zona. Assim, para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, os resultados da atuação em 2ª zona são expressos na Figura 5.5.

Figura 5.4 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

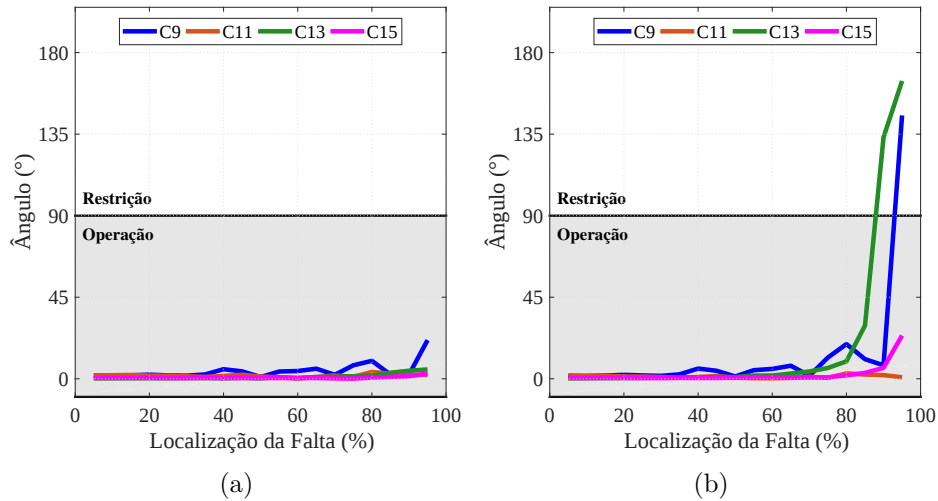
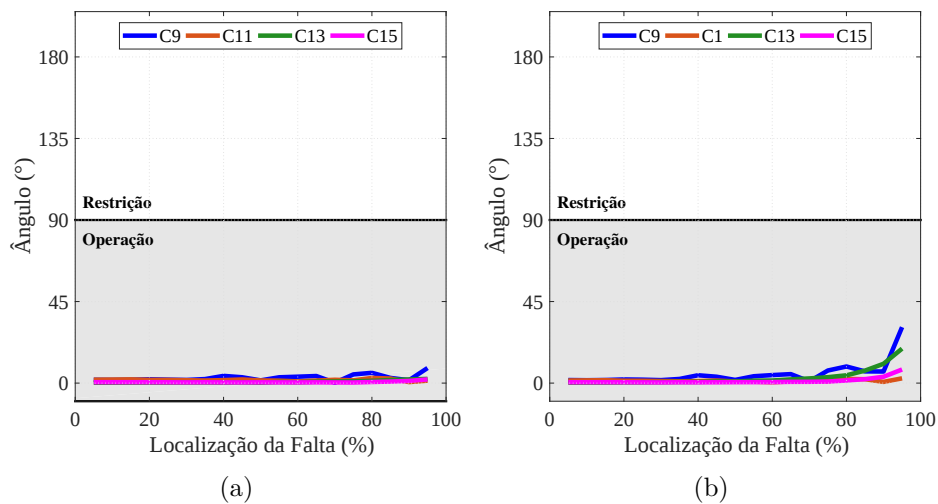


Figura 5.5 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C9$, $C11$, $C13$ e $C15$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Ilustra-se, na Figura 5.6, os resultados das F21T e F21C na ocorrência de curto-circuito monofásico na fase a para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, conforme Tabela 5.2. Esses casos são referentes às faltas em $L1$, com δ_{rem} igual 30° e atuação da proteção em 1ª zona. Além disso, para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, os resultados da atuação em 2ª zona são expressos na Figura 5.7.

Figura 5.6 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

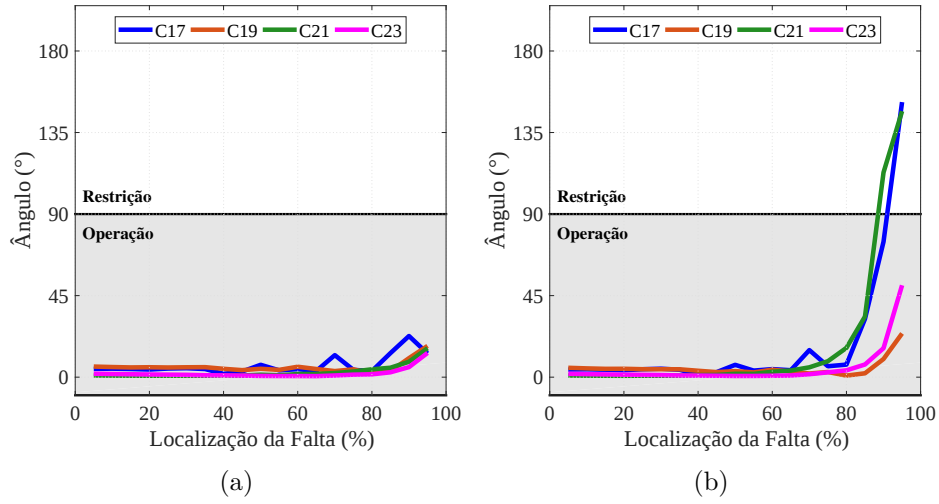
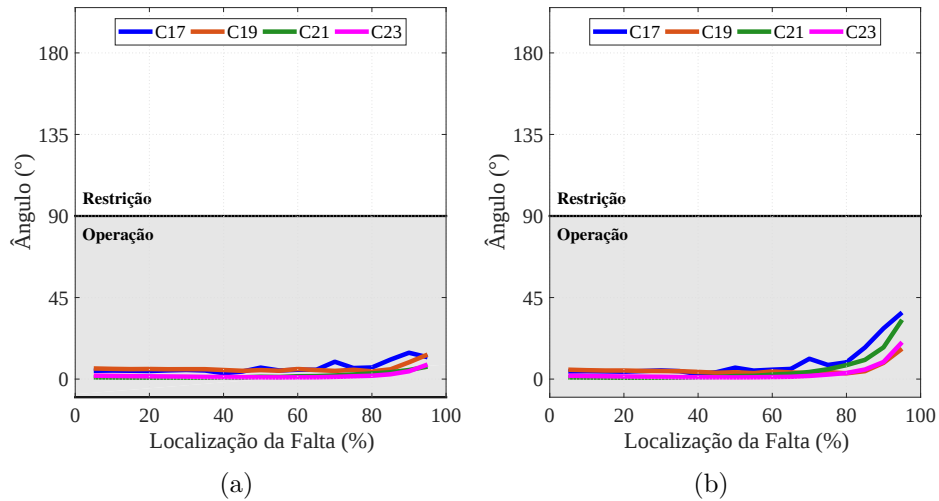


Figura 5.7 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C17$, $C19$, $C21$ e $C23$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



De forma simplificada, afirma-se que a variação do carregamento, mantendo as mesmas forças das fontes *Local* e *Remota*, também foi implementada nos seguintes trios de casos: $C3$, $C11$ e $C19$ – $C5$, $C13$ e $C21$ – $C7$, $C15$ e $C23$. De cada um desses trios, verificou-se que a atuação das F21T e F21C apresentou desempenho semelhante, sendo que os resultados da Figura 5.2, Figura 5.4 e Figura 5.6 são semelhantes, e os resultados da Figura 5.3, Figura 5.5 e Figura 5.7 também são semelhantes. Logo, afirma-se que a variação do carregamento não alterou os resultados obtidos das proteções de distância na ocorrência de curtos-circuitos em $L1$.

Além do mais, para os resultados de atuação em 1ª zona na ocorrência de faltas em $L1$, a F21T apresenta sobrealcance em todos os casos e a F21C apresenta sobrealcance apenas para os casos em que a fonte *Remota* é forte (independente da força da fonte

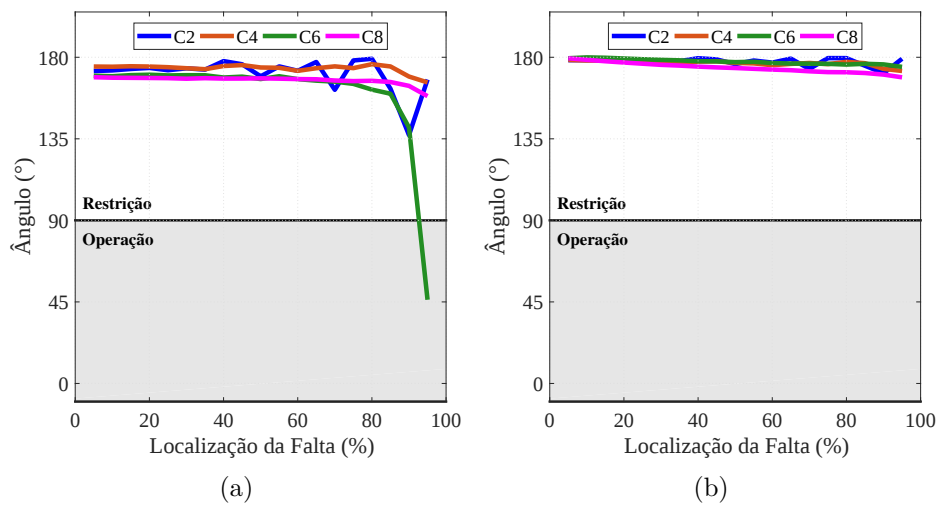
Local). Ressalta-se também que as F21C e F21T tem o mesmo comportamento para faltas avaliadas em 2ª zona, atuando corretamente. No geral, a F21C apresenta mais atuações corretas do que a F21T para os casos de faltas em *L1*.

5.1.2 Curtos-circuitos aplicados em *L2*

Nesta subseção, avalia-se o desempenho das F21T e F21C aplicadas para proteção de *L1*, quando ocorrem curtos-circuitos na linha paralela *L2*. Com isso, a proteção em 1ª zona de *L1* não deve atuar para casos de falta em *L2* e em 2ª zona de *L1* deve atuar para faltas entre 80% e 100% de *L2*, protegendo o trecho próximo ao terminal *Remoto*.

Apresentam-se na Figura 5.8 os resultados das atuações das F21T e F21C em 1ª zona, na ocorrência dos curtos-circuitos do tipo monofásico franco na fase *a* referentes aos casos *C2*, *C4*, *C6* e *C8*, conforme Tabela 5.3. Esses resultados são referentes às faltas na linha paralela *L2* e com δ_{rem} igual 10°.

Figura 5.8 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos *C2*, *C4*, *C6* e *C8*, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

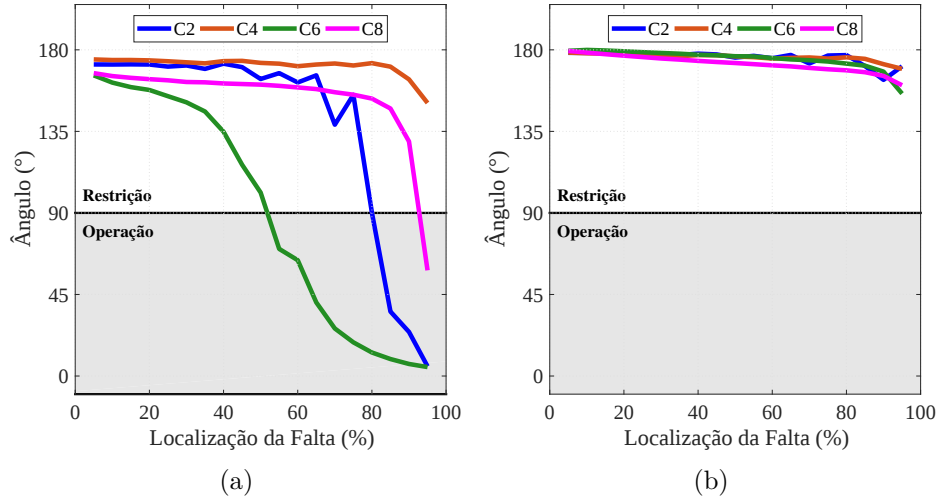


Pela Figura 5.8, nota-se que ambas as proteções não atuam, exceto a F21T para o caso *C6*. Nesse caso, a proteção tradicional atua a partir de aproximadamente 87% de *L2* (quando a força da fonte *Local* é forte e a força da fonte *Remota* é fraca), ocasionando sobrealcance.

Apresentam-se na Figura 5.9, as atuações das funções 21 em 2ª zona dos casos *C2*, *C4*, *C6* e *C8*. Dos resultados obtidos na Figura 5.9 (a), observa-se que a F21T atua a partir de: 50% da linha para o caso *C6*; 80% para o caso *C2*; e 92% para o caso *C8*, aproximadamente. Destaca-se que atuações da proteção de distância de *L1* em 2ª zona, para faltas na linha paralela *L2*, devem ocorrer entre 80% e 100% do trecho de *L2*, próximo ao terminal Remoto. Assim, o resultado mais próximo do esperado ocorre para o caso

$C2$. Logo, o resultado do caso $C6$ apresenta sobrealcance e os resultados de $C4$ e $C8$ apresentam subalcance (quando a proteção não atua para todo trecho ajustado).

Figura 5.9 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C2$, $C4$, $C6$ e $C8$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Para a atuação da F21C em 2ª zona, apresenta-se a Figura 5.9 (b). Destaca-se que para esse caso, a proteção deve proteger 100% de $L1$ e 30% da menor linha adjacente do terminal *Remoto* (no caso $L2$). No entanto, verifica-se que a proteção não atua para nenhum dos casos, resultando em subalcance da função. Assim, o desempenho da F21T em 2ª zona para faltas em $L2$ é superior ao desempenho da F21C.

A fim de avaliar a influência do ângulo de carregamento, os casos $C2$, $C4$, $C6$ e $C8$ foram refeitos, mas considerando outros valores de ângulo de carregamento. Assim, quando considerado δ_{rem} igual -10° , os casos $C10$, $C12$, $C14$ e $C16$ foram gerados e quando considerado δ_{rem} igual 30° , os casos $C18$, $C20$, $C22$ e $C24$ foram simulados.

Ilustram-se na Figura 5.10 os resultados das atuações das F21T e F21C em 1ª zona, na ocorrência de curtos-circuitos monofásico francos na fase a , referentes aos casos $C10$, $C12$, $C14$ e $C16$, conforme Tabela 5.3. Esses resultados correspondem a faltas na linha paralela $L2$, com δ_{rem} igual -10° . Nesse contexto, para a análise da atuação em 2ª zona dos casos $C10$, $C12$, $C14$ e $C16$, apresenta-se os resultados na Figura 5.11.

Assim, apresentam-se na Figura 5.12 os resultados das atuações das F21T e F21C em 1ª zona para os casos $C18$, $C20$, $C22$ e $C24$, conforme Tabela 5.3. Esses resultados são referentes às faltas na linha paralela $L2$, com δ_{rem} igual 30° . Com isso, para a análise da atuação em 2ª zona dos casos $C18$, $C20$, $C22$ e $C24$, apresenta-se os resultados na Figura 5.13.

De forma simplificada, afirma-se que a variação do carregamento, mantendo as mesmas forças das fontes *Local* e *Remota*, também foi implementada nos seguintes trios de casos: $C4$, $C12$ e $C20$ – $C6$, $C14$ e $C22$ – $C8$, $C16$ e $C24$. De cada um desses trios, verificou-

Figura 5.10 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C10$, $C12$, $C14$ e $C16$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

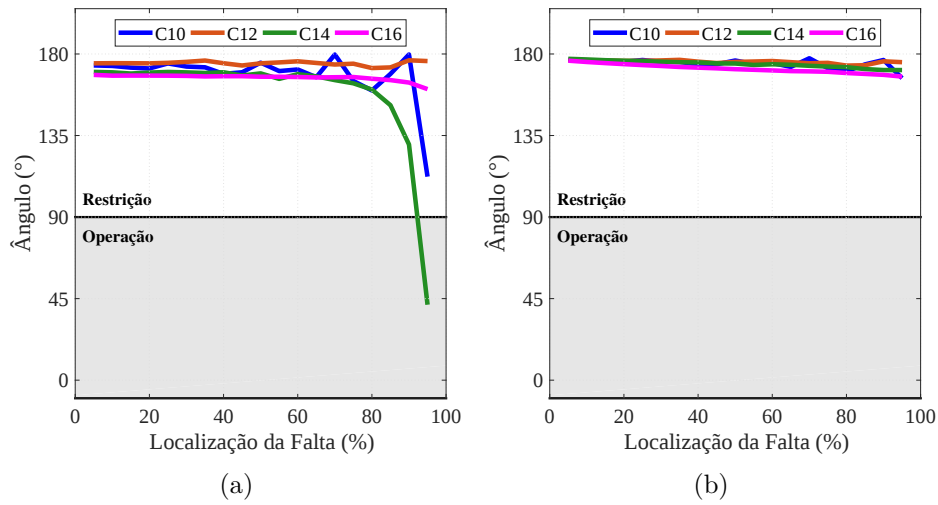
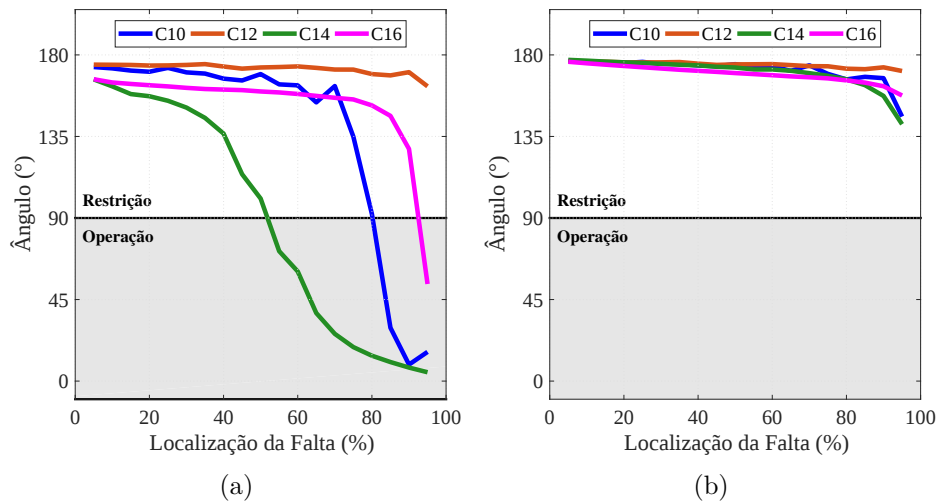


Figura 5.11 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C10$, $C12$, $C14$ e $C16$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



se novamente que a atuação das F21T e F21C apresentou desempenho semelhante, de forma análoga aos casos de faltas em $L1$. Com isso, os resultados da Figura 5.8, Figura 5.10 e Figura 5.12 são semelhantes, e os resultados da Figura 5.9, Figura 5.11 e Figura 5.13 também são semelhantes. Logo, afirma-se que a variação do carregamento não alterou os resultados obtidos para faltas em $L2$.

Diante dos resultados apresentados nesta seção, nota-se que nas atuações em 1ª zona ambas as proteções atuam corretamente, exceto a F21T quando a força da fonte *Local* é forte e a força da fonte *Remota* é fraca (ocasionando sobrealcance). Além disso, para as atuações em 2ª zona, a F21T atua para a maioria dos casos e a F21C não atua para nenhum dos casos. Conclui-se que para faltas em $L2$, a F21C apresenta melhor desempenho para atuações em 1ª zona e a F21T apresenta desempenho superior à F21C para atuações

Figura 5.12 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos $C18$, $C20$, $C22$ e $C24$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

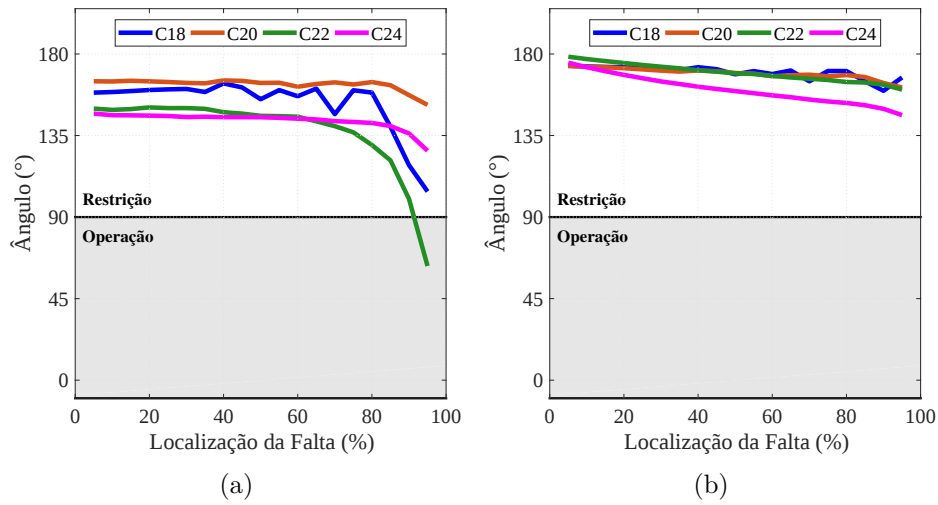
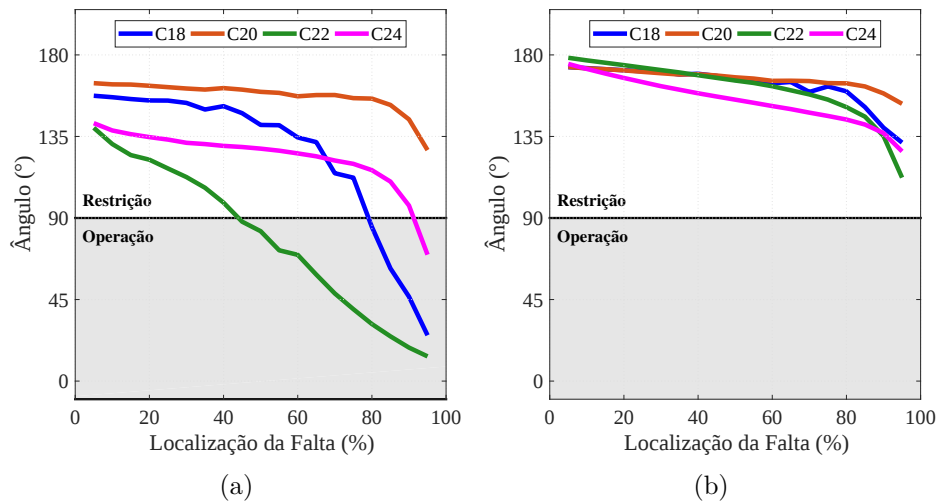


Figura 5.13 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos $C18$, $C20$, $C22$ e $C24$, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



em 2ª zona. Desses resultados, observa-se então que, apesar da proteção de distância compensada propor a correção do acoplamento mútuo de sequência zero para um melhor desempenho da proteção de distância, essa compensação não é benéfica para todos os casos analisados.

5.1.3 Curtos-circuitos com R_f

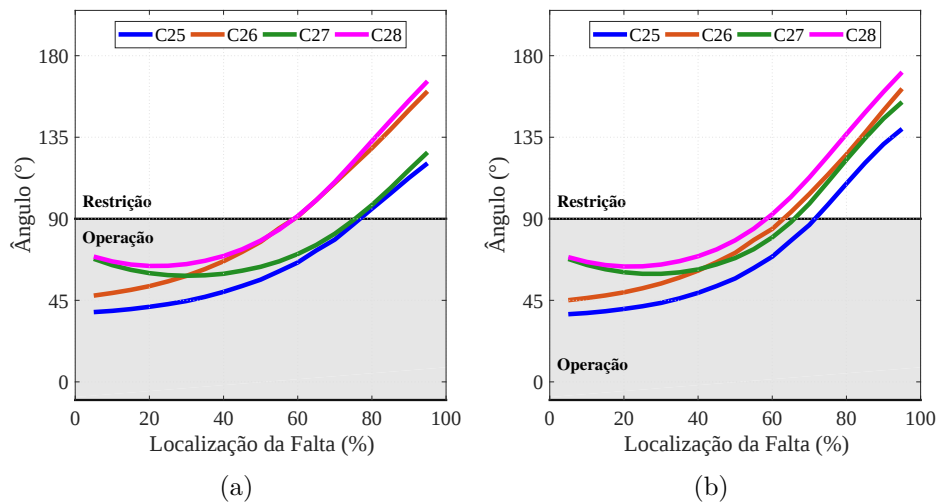
Para analisar a atuação da F21T e da F21C com a variação da resistência de falta, considerou-se os casos $C25$, $C26$, $C27$ e $C28$, cujas características são descritas na Tabela 5.4. Esses casos correspondem a curtos-circuito monofásicos na fase a com R_f igual a 20Ω e δ_{rem} igual a 10° , variando-se a localização da falta em $L1$ e a força das fontes, avaliadas por meio do indicador SIR .

Tabela 5.4 – Resumo dos casos de curto-circuito monofásico na fase *a* com R_f igual a $20\ \Omega$, aplicados em *L1*, variando-se a localização de falta.

Caso	<i>C25</i>	<i>C26</i>	<i>C27</i>	<i>C28</i>
SIR_L	1,0	1,0	0,1	0,1
SIR_R	1,0	0,1	1,0	0,1
δ_{rem}	10°	10°	10°	10°

No intuito de avaliar a atuação da proteção em 1ª zona para faltas na linha protegida *L1*, avaliam-se os gráficos da Figura 5.14, os quais correspondem aos resultados das atuações das F21T e F21C para os casos *C25*, *C26*, *C27* e *C28*. De acordo com os resultados da Figura 5.14 (a), a F21T protege *L1* em até: 75% para os casos *C25* e *C27*; e 60% para os casos *C26* e *C28*, aproximadamente.

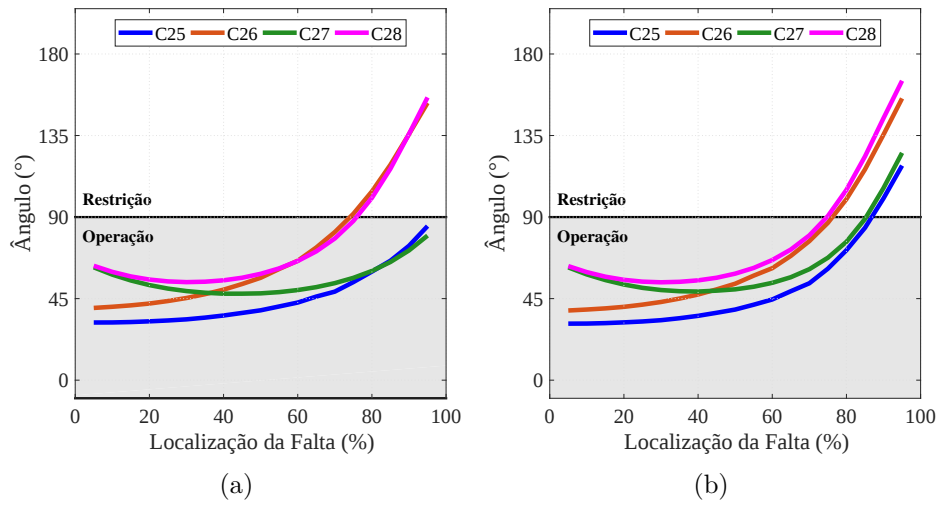
Figura 5.14 – Resultados da atuação em 1ª zona para os casos *C25*, *C26*, *C27* e *C28*, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Conforme ilustrado na Figura 5.14 (b), a F21C protege *L1* em até: 70% para o caso *C25*; 65% para o caso *C26*; 68% para o caso *C27*; e 59% para o caso *C28*, aproximadamente. Observa-se desses resultados que os curtos-circuitos com R_f diferente de zero resultam em desempenhos semelhantes na atuação em 1ª zona da F21T e da F21C: em todos os casos nota-se subalcance. Ademais, ressalta-se que para os casos em que a fonte *Remota* é fraca, há um subalcance menor do que para os casos em que a fonte *Remota* é forte.

Para a análise da atuação em 2ª zona dos casos *C25*, *C26*, *C27* e *C28*, apresenta-se a Figura 5.15. Como essas faltas são aplicadas em *L1*, para todos esses casos, a atuação em 2ª zona deve proteger todo o trecho de *L1*. Como ilustrado na Figura 5.15 (a), nota-se que apenas a F21T para os casos *C25* e *C27* (quando a força da fonte *Remota* é fraca) protege todo o trecho. No mais, a F21T protege *L1* em até: 75% para os casos *C26* e *C28*, aproximadamente. Conforme ilustrado na Figura 5.15 (b), a F21C protege *L1* em até: 67% para os casos *C26* e *C28*; e 85% para os casos *C25* e *C27*, aproximadamente.

Figura 5.15 – Resultados da atuação em 2ª zona para os casos C25, C26, C27 e C28, conforme: (a) F21T; (b) F21C.

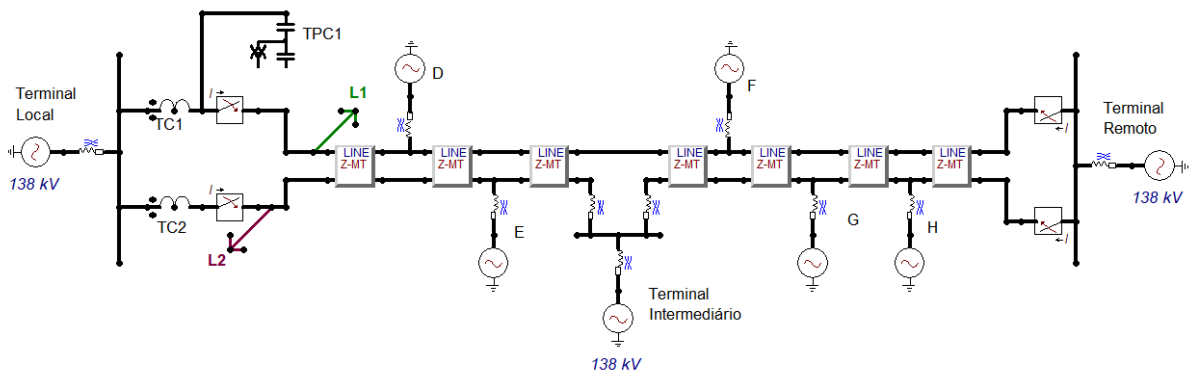


Com isso, observa-se que na ocorrência de curtos-circuitos em $L1$ com R_f diferente de zero, os resultados de atuações em 2ª zona apresentam subbalcance em todos os casos para F21C e subbalcance em apenas dois casos para F21T. Assim, com o aumento da R_f e na ocorrência de curtos-circuitos em $L1$, a F21T apresenta melhor desempenho em comparação a F21C.

5.2 Análise Transitória de Curto-circuito

Nesta seção, avalia-se um estudo de caso com um sistema elétrico real ramificado, ilustrado na Figura 5.16. Esse sistema real ramificado foi modelado por meio do *software* ATP e considerando os dados da Tabela 5.1.

Figura 5.16 – Modelo no *software* ATP do estudo de caso para análise transitória de curto-circuito.



Fonte: Autor.

Além disso, esse sistema é composto por três fontes de tensão de 138 kV (60 Hz), implementadas como Equivalentes de Thevénin, e denominadas por terminais *Local*, *Remoto* e *Intermediário*. Os terminais *Local* e *Remoto* são conectados por duas linhas em paralelo de 126 km de comprimento, denominadas de *L1* e *L2*. O terminal *Intermediário* localiza-se entre os terminais *Local* e *Remoto*, conectado à linha *L2*. Além do terminal *Intermediário*, conectado às linhas *L1* e *L2* existem derivações em paralelo correspondentes às cidades, as quais são alimentadas por esse sistema de sub-transmissão, sendo elas os terminais *D*, *E*, *F*, *G* e *H*.

Destaca-se que essas cidades podem ser conectadas em ambas as LTCD, mas não podem ser alimentadas pelos dois circuitos simultaneamente. Esse esquema de ligação proporciona maior confiabilidade ao sistema, pois permite que todas as cidades continuem sendo alimentadas, mesmo quando ocorrer falta em uma das linhas. Sendo assim, atualmente as cidades *D* e *F* estão conectadas à *L1* e as cidades *E*, *G* e *H* estão conectadas à *L2*. Além disso, o sistema da Figura 5.16 pode ter interferências das cargas que esse sistema alimenta e da fonte de geração (*infeed* e *outfeed*), denominada como terminal *Intermediário*.

A Tabela 5.5 apresenta o comprimento dos trechos da LTCD em relação às cargas ao longo da linha. Ressalta-se que os blocos da LTCD para esse estudo de caso foram modelados no *software* ATP em trechos, respeitando os comprimentos reais entre as cidades. Além disso, os dados utilizados na modelagem do sistema real da Figura 5.16 no *software* ATP são iguais aos dados do sistema da Figura 5.1.

Tabela 5.5 – Comprimentos dos trechos entre os terminais na LTCD do estudo de caso.

Trecho Entre	Distância [km]
Terminal <i>Local</i> e <i>D</i>	17,470
Terminal <i>D</i> e <i>E</i>	8,118
Terminal <i>E</i> e <i>Intermediário</i>	13,360
Terminal <i>Intermediário</i> e <i>F</i>	21,934
Terminal <i>F</i> e <i>G</i>	18,318
Terminal <i>G</i> e <i>H</i>	4,975
Terminal <i>H</i> e <i>Remoto</i>	42,110

Para avaliar transitoriamente esse sistema real ramificado, considerou-se o carregamento do terminal *Local* δ_{local} igual a 0° , dos terminais *Intermediário* δ_{interm} e *Remoto* δ_{rem} igual a 10° , por último o carregamento das cidades $\delta_{cidades}$ dos terminais *D*, *F*, *E*, *G* e *H* igual a -15° . No mais, a força das fontes *Local* e *Remota*, avaliadas por meio dos indicadores SIR_L e SIR_R respectivamente, foi fixada em 0,1 significando que ambas as fontes são fortes.

Apresenta-se na Tabela 5.6 um resumo das simulações transitórias de curto-circuito monofásico na fase *a*, aplicados na LTCD do sistema em estudo. Nota-se que os casos 1, 2,

3 e 4 são para curtos-circuitos em $L1$ e os casos 5, 6, 7 e 8 são para curtos-circuitos em $L2$. Além disso, variou-se a R_f em $0\ \Omega$ e $15\ \Omega$.

Tabela 5.6 – Resumo dos casos de curto-circuito monofásico na fase a para análise transitória.

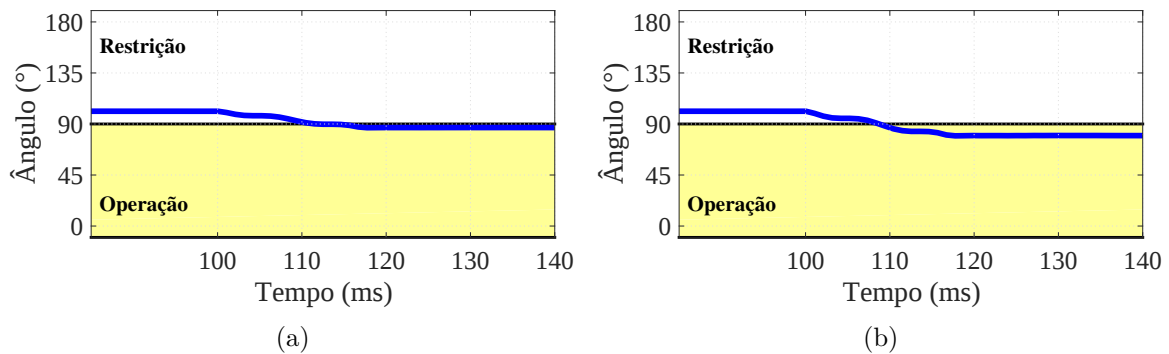
Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
LT em falta	$L1$	$L1$	$L1$	$L1$	$L2$	$L2$	$L2$	$L2$
Localização da falta	17%	17%	45%	45%	17%	17%	45%	45%
R_f	$0\ \Omega$	$15\ \Omega$	$0\ \Omega$	$15\ \Omega$	$0\ \Omega$	$15\ \Omega$	$0\ \Omega$	$15\ \Omega$

5.2.1 Curtos-circuitos aplicados em $L1$

As análises dos casos de 1 a 4, da Tabela 5.6, são apresentadas nesta subseção. Destaca-se que para esses casos, as proteções de distância em 1ª zona de $L1$ foram projetadas para atuar instantaneamente.

Apresentam-se, na Figura 5.17, os resultados referentes ao caso 1, no qual é aplicado um curto-circuito monofásico franco na fase a em aproximadamente 17% de $L1$, em relação ao terminal *Local*.

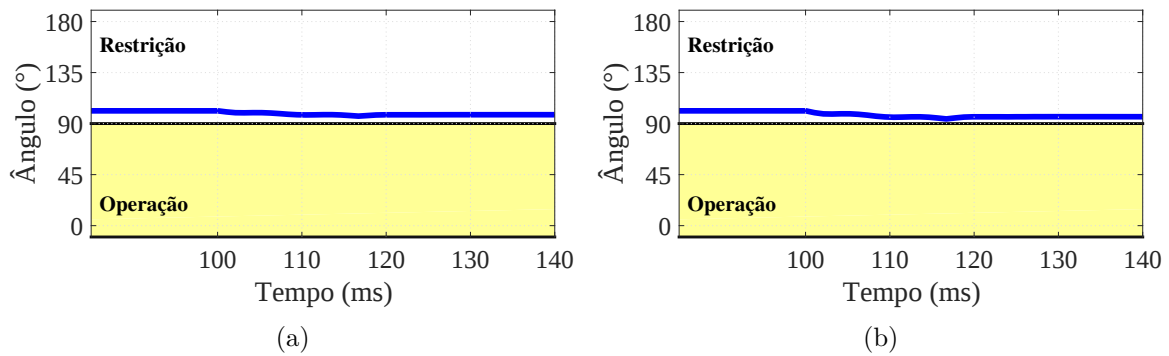
Figura 5.17 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 1, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Nota-se desses resultados, que somente a fase defeituosa atuou, tanto para a F21T quanto para a F21C. Ressalta-se que a unidade de impedância FT da F21T atuou no Limiar de Operação (LO) da região de operação desse relé, com isso o relé pode não detectar a falta.

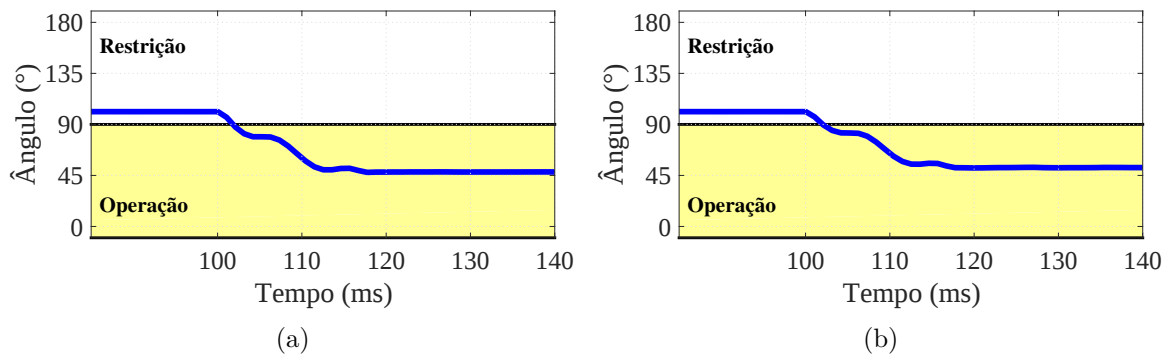
Os resultados relativos ao caso 2, referente a um curto-circuito monofásico na fase a em aproximadamente 17% de $L1$, com R_f igual a $15\ \Omega$, são expressos na Figura 5.18. Observa-se que as unidades de impedância FT das F21T e F21C não detectam a falta. Assim, o aumento da resistência de falta pode comprometer a correta atuação da proteção de distância, tradicional e compensada.

Figura 5.18 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 2, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



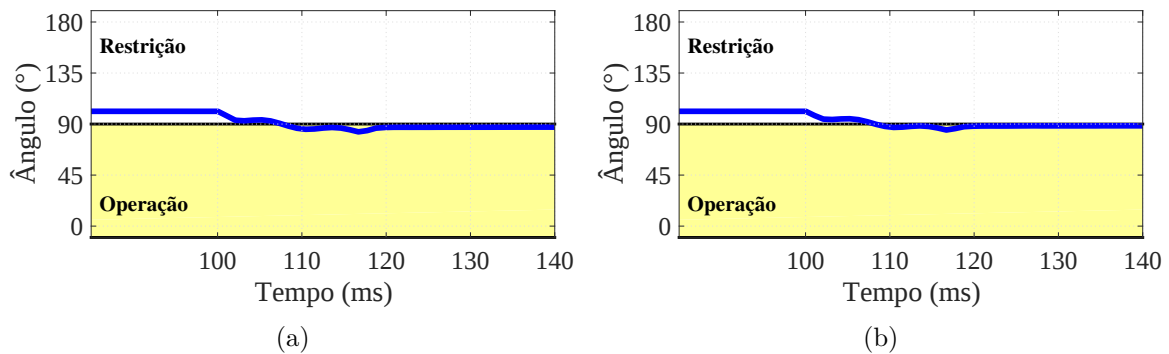
Assim, apresentam-se na Figura 5.19 os resultados referentes ao caso 3, o qual corresponde a um curto-circuito monofásico franco na fase *a* em aproximadamente 45% de *L1*. Nota-se que as unidades de impedância FT das F21T e F21C são sensibilizadas e operam com tempo de detecção de falta aproximadamente igual zero.

Figura 5.19 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 3, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Os resultados relativos ao caso 4, referente a um curto-circuito monofásico na fase *a* com R_f igual a $15\ \Omega$ em aproximadamente 45% de *L1*, são expressos na Figura 5.20.

Figura 5.20 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 4, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Nota-se desses resultados que as unidades de impedância FT da F21T e da F21C são sensibilizadas, porém as curvas estão próximas ao LO, podendo as proteções não detectarem a falta na prática (isso por conta do aumento da R_f).

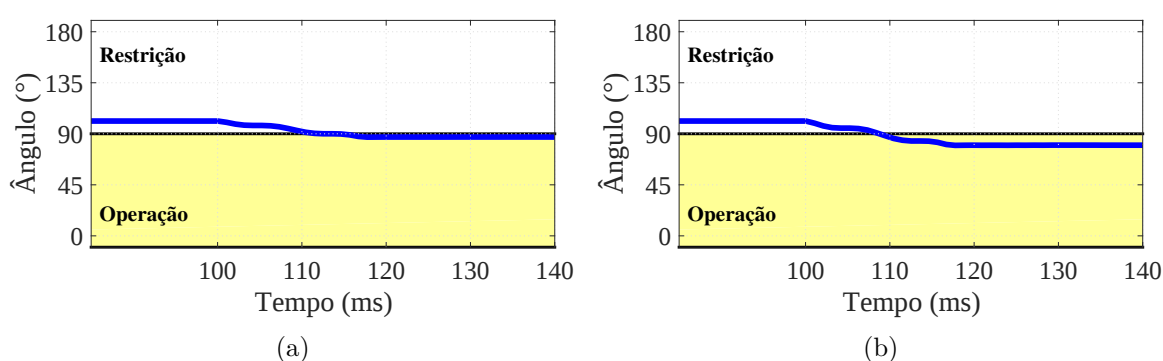
Observa-se, pelos resultados obtidos nos casos 1 a 4, que para faltas monofásicas na fase a aplicadas na linha protegida $L1$, a F21T e a F21C tendem a atuar de forma semelhante. Logo, pode-se concluir que para faltas na linha protegida desse sistema de LTCD real com ramificações, o parâmetro de compensação do acoplamento mútuo de sequência zero não apresenta benefícios relevantes em relação à proteção tradicional.

5.2.2 Curtos-circuitos aplicados em $L2$

Os resultados dos casos de 5 a 8 da Tabela 5.6 são apresentados nesta subseção. O intuito desses casos é analisar a atuação das F21C e F21T de $L1$ na ocorrência de faltas em $L2$. Com isso, curtos-circuitos em $L2$ não devem sensibilizar as proteções de $L1$ em 1ª zona.

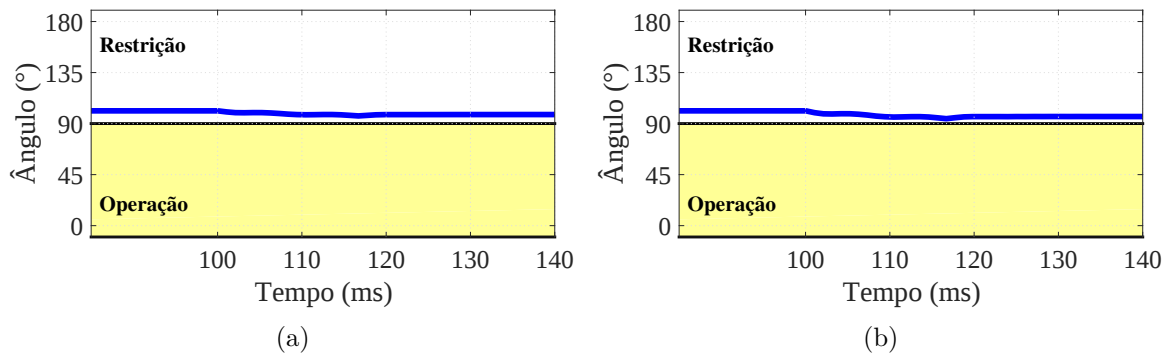
Apresentam-se, na Figura 5.21, os resultados referentes ao caso 5, o qual corresponde a um curto-circuito monofásico franco na fase a , em aproximadamente 17% de $L2$. Nota-se desses resultados, que as unidades de impedância FT da F21T e da F21C atuaram instantaneamente, sendo que F21T ficou no LO. Para esse caso, ambas as proteções atuaram de maneira indevida, pois na ocorrência de faltas em $L2$ a proteção em 1ª zona de $L1$ não deve atuar, assim as proteções apresentaram sobrealcance.

Figura 5.21 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 5, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



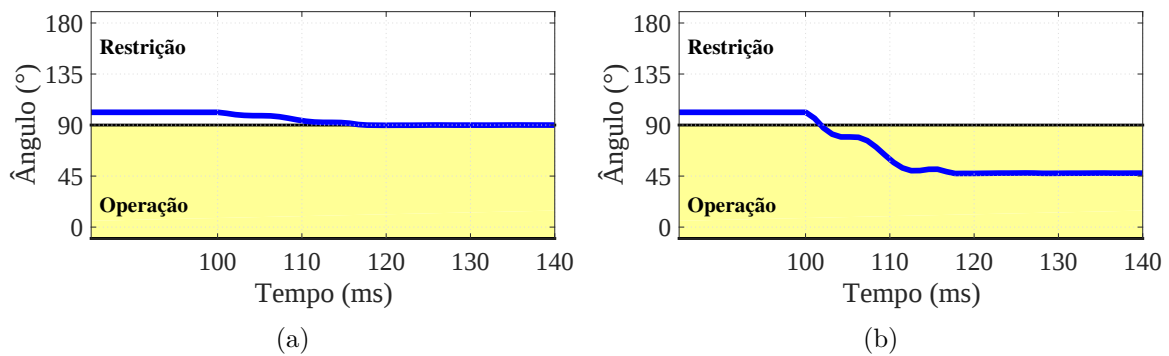
Os resultados relativo ao caso 6, referente a um curto-circuito monofásico na fase a em aproximadamente 17% de $L2$, com R_f igual a 15Ω , são expressos na Figura 5.22. Observa-se que, nenhuma unidade de impedância detecta a falta. Uma justificativa para as proteções não atuarem para esse caso é o fato de que com o aumento da R_f a corrente de falta diminui, não sensibilizando a proteção. Conforme visto na análise de sensibilidade paramétrica, normalmente faltas com R_f não melhoram o desempenho das proteções de distância, mesmo que nesse caso tenha obtido resultado correto.

Figura 5.22 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 6, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Na Figura 5.23 apresenta-se os resultados referentes ao caso 7, o qual corresponde a um curto-circuito monofásico franco na fase *a* em aproximadamente 45% de $L2$. Nota-se que a F21T fica no LO, podendo o relé detectar ou não o curto-circuito. No entanto, a F21C opera com tempo de detecção de falta aproximadamente igual a zero. Assim, a F21T de $L1$ pode atuar ou não e a F21C de $L1$ atua, ambas quando não deveriam. Nesse caso as proteções apresentam sobrealcance.

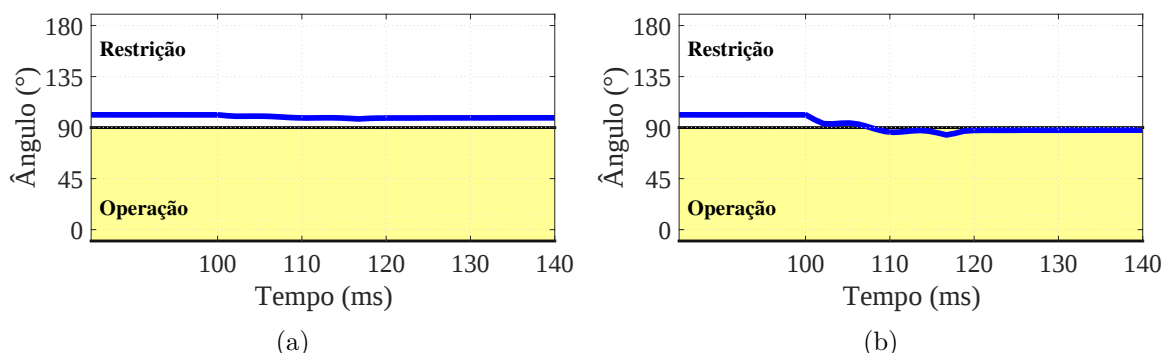
Figura 5.23 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 7, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



Os resultados referentes ao caso 8 correspondem a um curto-circuito monofásico na fase *a* em aproximadamente 45% de $L2$, com R_f igual a $15\ \Omega$. Esses resultados são expressos na Figura 5.24. Observa-se desses resultados que nenhuma unidade de impedância da F21T atua para esse caso. No entanto, a unidade de impedância FT da F21C atua para esse caso, porém muito próximo ao LO do relé de distância, podendo não ser sensibilizada na prática. Assim, conclui-se que a F21C pode apresentar sobrealcance.

Com base nos resultados obtidos dos casos 5 a 8, nota-se que curtos-circuitos FT na linha paralela $L2$ afetam significativamente a proteção de distância de $L1$. Ressalta-se que nenhuma função 21 deveria ter atuado, no entanto a F21C atua ou encontra-se próxima ao LO para a maioria dos casos. Assim, a correção do acoplamento mútuo de sequência zero (aplicada na F21C) para esses casos comprometeu o correto funcionamento da proteção

Figura 5.24 – Atuação da unidade de impedância FT para o caso 8, conforme: (a) F21T; (b) F21C.



de distância em $L1$ na ocorrência de faltas monofásicas em $L2$. Conforme alguns autores apresentam, como em Hu et al. (2002), Tziouvaras et al. (2014) e Eissa e Masoud (2001), o fator de correção de acoplamento mútuo pode comprometer a atuação da função 21 para determinados casos. Além do acoplamento mútuo de sequência zero, outros fatores do sistema analisado podem ter influenciado nos resultados da proteção de distância, como o aumento da resistência de falta, a localização da aplicação do curto-circuito em relação ao terminal *Local*, as ramificações do sistema (fonte de geração e cargas), dentre outros fatores.

Ressalta-se que, para faltas na linha protegida $L1$ da LTCD real em estudo, ambas as proteções de distância tendem a não detectarem a falta com o aumento da R_f , como já dito anteriormente por conta da corrente de falta diminuir com o aumento da R_f , resultando em não atuação da proteção. Apesar da semelhança dos resultados entre as proteções, para faltas em $L1$ a F21C apresenta um desempenho superior, pois a F21T atua no LO para os casos 1 e 4, enquanto a F21C atua no LO apenas para o caso 4. Além disso, na ocorrência de faltas em $L2$ da LTCD, as proteções de distância de $L1$ detectam o curto-circuito em 1ª zona, o qual não deveria atuar. Com isso, a F21T apresenta um desempenho superior, pois essa proteção não atua ou permanece no LO, enquanto a F21C atua para a maioria dos casos de faltas em $L2$.

5.3 Análise Geral dos Resultados

Esta seção tem por objetivo apresentar uma síntese dos resultados obtidos e das avaliações realizadas. Conforme identificado anteriormente, verificou-se que as atuações das proteções não se alteram com a variação do carregamento do terminal *Remoto* δ_{rem} . Nesse contexto, considera-se inicialmente os resultados das análises de sensibilidade paramétrica, avaliando as funções 21 para os casos de faltas em $L1$. Ressalta-se também que a 1ª zona das F21C e F21T atuam com sobrealcance na ocorrência de curto-circuito em $L1$, exceto a F21C que atua corretamente para os casos em que a fonte *Remota* é fraca. Para as

atuações em 2ª zona na ocorrência de curtos-circuitos em $L1$, ambas as proteções atuam corretamente para 100% da linha. Assim, para faltas em $L1$, a 1ª zona da F21C tem um número maior de atuações corretas da proteção do que a F21T.

Considerando os resultados das análises de sensibilidade paramétrica para os casos de faltas em $L2$, nota-se que a 1ª zona das proteções não atuam para faltas em $L2$, exceto a F21T que apresenta sobrealcance para o caso C6 (quando a fonte *Local* é forte e a fonte *Remota* é fraca). Nesse caso, para análise em 1ª zona de casos com faltas em $L2$, a F21C apresenta melhor desempenho. Além disso, para os casos de faltas em $L2$, a F21C não atua em 2ª zona para faltas na linha paralela, resultando em subalcance da proteção. Apesar de resultar dois casos com subalcance e um caso com sobrealcance, a F21T atua para faltas em alguns trechos de $L2$. Com isso, para curtos-circuitos em $L2$, a 2ª zona da F21T apresenta melhor desempenho.

Por fim, para os casos de curtos-circuitos com R_f , os resultados em 1ª zona apresentam subalcance, sendo aqueles com menor subalcance os que a força da fonte *Remota* é fraca. Os resultados em 2ª zona das funções 21 também apresentam subalcance, exceto a F21T para os casos em que a fonte *Remota* é fraca. No geral, a F21T apresenta melhor desempenho em comparação a F21C para os casos analisados com resistência de falta.

Além disso, observa-se pelas análises transitórias de curto-circuito, para o estudo de caso real, que as F21T e F21C apresentam resultados semelhantes. Todavia, na ocorrência de faltas em $L1$ no estudo de caso real, a F21C apresenta melhor performance e para faltas em $L2$ a F21T apresenta um desempenho superior em relação a F21C.

Conclui-se que a compensação mútua de sequência zero, apesar de ser proposta na literatura para melhorar o desempenho da função 21 em LTCD, pode não ser vantajosa para alguns casos de curto-circuito, a depender das condições operativas do sistema e das circunstâncias de falta. Alguns autores, como em Hu et al. (2002), Tziouvaras et al. (2014) e Eissa e Masoud (2001), explicam que o fator de correção de acoplamento mútuo pode comprometer a atuação da função 21 para determinados casos.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação dois sistemas de sub-transmissão, baseados em dados reais – compostos por uma LTCD de 138 kV – foram modelados no *software* ATP. Na modelagem desses sistemas, considerou-se o acoplamento mútuo de sequência zero entre os circuitos trifásicos. Esse acoplamento interfere no cálculo da impedância determinada pelo relé de distância, no caso de curtos-circuitos que envolvam o terra, em função da circulação de corrente de sequência zero na linha paralela e da impedância mútua de sequência zero (presente também em condições normais de operação).

As simulações basearam-se na aplicação de curtos-circuitos monofásicos na fase *a* em *L1* e *L2* dos sistemas analisados, variando-se o valor da resistência de falta, o carregamento do sistema, a força das fontes, a linha em falta e o local de aplicação do curto-circuito em cada linha. Além disso, as proteções de distância da LTCD foram definidas como tradicional e compensada, respectivamente F21T e F21C, as quais protegem *L1* do sistema analisado. Uma avaliação comparativa foi realizada entre a F21T (com dados de tensões e correntes de fase de *L1* apenas) e a F21C (com dados de tensões e correntes de fase de *L1*, acrescidos de correntes de fase de *L2*).

Os resultados das proteções de distância foram analisados pela atuação dos comparadores de fase polarizados. Essas atuações foram avaliadas por meio de análises de sensibilidade paramétrica e análises transitórias de curto-circuito (para um estudo de caso).

Em análises de sensibilidade paramétrica, na ocorrência de curtos-circuitos em *L1*, as F21C e F21T em 1ª zona atuam com sobrealcançe, exceto a F21C para os casos em que a fonte *Remota* é fraca. Para as atuações em 2ª zona com *L1* em falta, ambas as proteções atuam corretamente para 100% da linha. Além disso, para os casos de faltas em *L2*, a 1ª zona das funções 21 não atuam, exceto a F21T que apresenta sobrealcançe em um dos casos. Considerando ainda faltas em *L2*, a 2ª zona da F21C não atua para faltas na linha paralela, resultando em subalcançe da proteção. Apesar de resultar dois casos com subalcançe e um caso com sobrealcançe, a F21T atua para faltas em alguns trechos de *L2*. Com isso, para faltas em *L1* F21C apresenta melhor desempenho em 1ª zona e ambas as funções atuam corretamente em 2ª zona. Para faltas em *L2*, a F21C apresenta melhor desempenho em 1ª zona e a F21T apresenta melhor desempenho em 2ª zona. Ao considerar resistência de falta nos casos analisados, a F21T apresentou uma sutil melhoria em relação ao desempenho da F21C. Ressalta-se que, o carregamento do terminal *Remoto* não interfere nos resultados das análises de sensibilidade paramétrica.

Considerou-se um estudo de caso real para as análises transitórias de curto-circuito, sendo esse sistema composto por ramificações ao longo da LTCD (cidades) e um terminal *Intermediário* conectado em uma das linhas. Dessa análise, observa-se que as F21T e F21C apresentam resultados semelhantes. Todavia, na ocorrência de faltas em $L1$ no estudo de caso real, a F21C apresenta melhor performance e para faltas em $L2$ a F21T apresenta um desempenho superior em relação a F21C.

Conclui-se, com base nos resultados obtidos, que a F21C corrige o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero podendo melhorar ou piorar o desempenho em relação a F21T, a depender da força das fontes e da localização de falta. Assim, ressalta-se que para os casos analisados, a correção do acoplamento mútuo de sequência zero não apresentou melhorias significativas no desempenho da proteção de distância. Além do efeito do acoplamento mútuo, o fato do sistema ser baseado em dados reais pode também ter afetado os resultados.

Como sugestão de trabalhos futuros:

- Repetir as análises para outra LTCD;
- Analisar o fluxo de potência na ocorrência de faltas na LTCD;
- Analisar coordenação e seletividade entre as proteções dos circuitos da LTCD; e
- Testar outras metodologias de compensação do acoplamento mútuo de sequência zero.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa ANEEL N414*. Brasília, Brasil, 2010. Citado na página 22.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa ANEEL N622*. Brasília, Brasil, 2014. Citado na página 22.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise - Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Brasília, Brasil, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ANDERSON, P. M. *Power system protection*. [S.l.]: Wiley, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 27, 33, 34 e 35.
- APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D.; SAMBASIVAN, S.; RICHARDS, S. Protection of double circuit transmission lines. In: IEEE. *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2007. p. 85–101. Citado 5 vezes nas páginas 24, 48, 53, 54 e 56.
- BOZEK, M.; IZYKOWSKI, J. Adaptive distance protection of double-circuit lines based on differential equation fault loop model. p. 1–5, 2008. Citado na página 47.
- CALERO, F. Mutual impedance in parallel lines – protective relaying and fault location considerations. p. 1–15, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 41, 47, 53 e 56.
- CAMPOS, A. K. X. S.; JÚNIOR, D. F.; NASCIMENTO, J. P.; NEVES, W. L. A. Influência dos erros transitórios apresentados pelos tc e tpc na atuação de um relé de distância. In: *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica-CBQEE*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 34.
- CHAUHAN, S.; DAHIYA, R. Fault identification of double circuit transmission lines using phasor measurement unit. In: IEEE. *2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- COOK, V. *Analysis of distance protection: Research studies press ltd*. 1985. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 39.
- DAI, F.; WANG, X.; YANG, G. A performance optimization method of ground distance protection for double-circuit transmission lines on the same tower based on substation information. In: IEEE. *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.], 2019. p. 1–9. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 57.
- EISSA, M. M. A new wide-area protection scheme for single-and double-circuit lines using 3-d-phase surface. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 6, p. 2613–2623, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 45, 55 e 57.
- EISSA, M. M.; MASOUD, M. A novel digital distance relaying technique for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 380–384, 2001. Citado 4 vezes nas páginas 54, 57, 76 e 77.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado na página 31.

GONÇALVES, D. N. *Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31 e 33.

HOLBACH, J.; VADLAMANI, V.; LU, Y. Issues and solutions in setting a quadrilateral distance characteristic. In: IEEE. *2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2008. p. 89–104. Citado na página 31.

HONORATO, T. R.; SERPA, V. R.; RIBEIRO, J. P. G.; CUSTODIO, E. A.; SILVA, K. M.; LOPES, F. V. Impact of double circuit lines operated in parallel on distance protection. IET, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.

HU, Y.; NOVOSEL, D.; SAHA, M. M.; LEITLOFF, V. An adaptive scheme for parallel-line distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 105–110, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 45, 53, 57, 76 e 77.

KINDERMANN, G. *Proteção de sistemas elétricos de potência*, vol. 1. *Florianópolis: UFSC, 2005a. 283p*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

KONISHI, T. Comportamento dos relés de distância em linha de circuito duplo. In: GRUPO DE ESTUDOS DE SISTEMA DE POTÊNCIA DA CESP. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. [S.l.], 1972. Citado na página 43.

KÜSEL, B. F. *Proteção de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda*. 2014. Citado na página 36.

LEUVEN, E. C. *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. [S.l.]: EMTP, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 60.

MASCHER, L. J. D. *Análise do desempenho de algoritmos de proteção de distância frente às faltas monofásicas abordagem tendo em vista uma proteção adaptativa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 25, 39, 40, 45, 51 e 56.

MUKERJEE, R. N.; ABDULLAH, M. F. B. Under-reach correction in twin circuits without residual current input from the parallel line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1359–1365, 2008. Citado na página 45.

NEVES, E. T. *Proteção diferencial longitudinal e transversal de linhas de transmissão de circuito duplo: 'modelagem e simulação do plano alfa'*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2019. Citado na página 48.

ONS. *Extensão da rede básica de transmissão*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado na página 22.

ONS. *Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2024*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado na página 23.

ONS. *O sistema interligado nacional*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado na página 22.

ONS. *SINDAT - Horizonte 2023*. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado na página 24.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA. *Submódulo 23.2 - Critérios para a Definição das Redes do Sistema Elétrico Interligado*. [S.l.], 2002. Citado na página 22.

PAITHANKAR, Y. G. *Transmission network protection: theory and practice*. [S.l.]: Routledge, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

PRITCHARD, C.; HENSLER, T.; CORONEL, J.; GACHUZ, D. Test and analysis of protection behavior on parallel lines with mutual coupling. p. 1–5, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 24, 52 e 56.

REIS, G. R. Z. *Análise do comportamento das unidades quadrilaterais polarizadas de relé de distância frente a curtos-circuitos em linhas de transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 31 e 39.

ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; III, E. O. S. $Z = V/I$ does not make a distance relay. In: *20th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 19–21. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

SANAYE-PASAND, M.; SEYEDI, H. Simulation, analysis and setting of distance relays on double circuit transmission lines. p. 177–183, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 56.

SANTOS, A. dos. Impact of double circuit lines operated in parallel on distance protection. 2008. Citado 3 vezes nas páginas 25, 52 e 56.

SANTOS, V. A. *Proteção de distância aplicada a linhas de transmissão em circuito duplo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 45, 48, 50 e 56.

SILVA, K. M. *Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2009. Citado 9 vezes nas páginas 27, 28, 31, 32, 35, 36, 37, 38 e 40.

SILVA, K. M.; ALMEIDA, M. L. S. Filtro de memória de tensão de sequência positiva para uso em relés numéricos microprocessados. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Natal, Brasil, p. 46, 2016. Citado na página 37.

SILVA, S. P. O. Influência da corrente capacitiva de linhas de transmissão no desempenho da função de proteção de distância. 2018. Citado na página 29.

SRIVANI, S. G.; PANDURANGA, V. K.; ATLA, C. R. Development of three zone quadrilateral adaptive distance relay for the protection of parallel transmission line. In: IEEE. *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology*. [S.l.], 2009. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 57.

STOKES-WALLER, E. Distance protection: Pushing the envelope. In: SOUTHERN AFRICAN POWER SYSTEM PROTECTION CONFERENCE. [S.l.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 59.

- THOMPSON, M. J.; SOMANI, A. A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length. In: IEEE. *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2015. p. 833–841. Citado na página 39.
- 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 9 vezes nas páginas 28, 40, 41, 53, 54, 56, 57, 76 e 77.
- UNDE, S. V.; DAMBHARE, S. S. Double circuit transmission line parameter estimation using PMU. p. 1–4, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 57.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D. Cross differential protection of double lines based on supper-imposed current. In: IET. *CIREN 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. [S.l.], 2005. p. 1–4. Citado na página 24.
- XU, Z. Y.; LI, W.; BI, T. S.; XU, G.; YANG, Q. X. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country nonearthened faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2486–2494, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 40.
- XU, Z. Y.; ZHANG, X.; HE, J.; WEN, A.; LIU, Y. Q. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for single-phase to ground faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 80, p. 374–381, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 57.
- ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 28, 33, 35, 37 e 38.