



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
CONSIDERANDO O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO**

Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

Brasília, julho de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
CONSIDERANDO O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO**

Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. UnB/ ENE

Orientador

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. UnB/ ENE

Examinador interno

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc. UFCG

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, MÁRCIO A. O.

MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO [Distrito Federal] 2019.

xvi, 69 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2019).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Religamento Automático

2. Proteção de Distância

3. Chaveamento Controlado

4. Linha de Transmissão

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, MÁRCIO A. O. (2019). *MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

TÍTULO: MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

Aos meus pais Terezinha e Wanderlan.

Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

Agradecimentos

Aos meus pais Terezinha e Wanderlan, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, que permitiram que fosse realizado esse trabalho.

Aos meus irmãos Tanyele e João Lucas, agradeço de coração pelo apoio e torcida.

Meu eterno agradecimento a todos os meus amigos, que deram uma contribuição valiosa para a minha jornada acadêmica. Obrigado pelos conselhos, palavras de apoio e risadas.

Sou grato a todos os professores que contribuíram com a minha trajetória acadêmica, especialmente ao Kleber M. e Silva, responsável pela orientação do meu projeto.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Márcio Aparecido Oliveira Rodrigues

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se a modelagem e a simulação da proteção de distância com o religamento automático em linhas de transmissão, para os casos de faltas monofásicas e trifásicas. Para isto, foram utilizados algoritmos de detecção do tipo de falta e um método de chaveamento controlado que estima os instantes ótimos para a realização de manobras de religamento que reduz os efeitos negativos causados por sobretensões de manobra. Desta forma, é esperado aliar as propriedades da proteção de distância com o religamento automático, visto que esse tipo de proteção permite uma rápida detecção da falta, e além disso, é possível realizar a classificação da falta se aplicado métodos adicionais, de modo que, é possível extinguir a falta de forma rápida e seletiva, aumentando as chances de um religamento bem-sucedido. Para isto, foi utilizado o software ATP (Alternative Transients Program) usando a linguagem MODELS, que possibilita o estudo dos efeitos de transitórios eletromagnéticos no sistema de potência. Além disso, foi realizada uma revisão dos conceitos teóricos fundamentais da proteção de distância e do religamento automático monopolar e tripolar. Também é efetuada uma explanação dos elementos constitutivos do relé modelado, descrevendo, em linhas gerais, os algoritmos utilizados. Por fim, são apresentados os resultados obtidos, que consistem na apresentação e análise do comportamento do sistema elétrico e do desempenho do rele de distância em diversos tipos de falta.

ABSTRACT

The present work presents the modeling and simulation of the distance relay with the auto-reclosing in transmission lines, in the case of single-phase and three-phase faults. For this, fault-type detection algorithms and a controlled switching method were used which estimate the optimum instants for performing reclosing maneuvers that reduces the negative effects caused by overvoltages. In this way, it is expected to combine the properties of the distance relay with auto-reclosing, since this type of protection allows rapid detection of the fault, and in addition, it is possible to perform fault classification if additional methods are applied, it is possible to extinguish the fault quickly and selectively, increasing the chances of a successful reclosing. For this, the ATP (Alternative Transients Program) software was used with MODELS language, which allows the study of the effects of electromagnetic transients in the power system. In addition, a review is made of the fundamental theoretical concepts of distance relaying and monopolar and tripolar auto-reclosing. An explanation of the constituent elements of the modeled relay is also made, describing in general the algorithms used. Finally, the results obtained are presented, which consist of the presentation and analysis of the behavior of the electric system and the performance of distance relay in different types of fault.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	JUSTIFICATIVA	2
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	3
2.1	ZONAS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	3
2.2	CARACTERÍSTICA MHO	4
2.2.1	COMPARADOR DE FASE E MAGNITUDE	5
2.2.2	POLARIZAÇÕES DO COMPARADOR MHO	6
2.3	IMPEDÂNCIAS DE FALTA	7
2.3.1	FALTA MONOFÁSICA	8
2.3.2	FALTA BIFÁSICA	9
2.3.3	FALTA TRIFÁSICA	10
2.3.4	UNIDADES DE IMPEDÂNCIA DO RELÉ	11
2.4	TÉCNICA DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS	11
2.5	ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO	14
2.5.1	ESQUEMA DE DISPARO DIRETO POR SUBALCANCE	15
2.5.2	ESQUEMA DE DISPARO PERMISSIVO POR SUBALCANCE	16
2.5.3	ESQUEMA DE DISPARO PERMISSIVO POR SOBREALCANCE	16
2.5.4	ESQUEMA DE BLOQUEIO POR COMPARAÇÃO DIRECIONAL	17
2.5.5	ESQUEMA DE DESBLOQUEIO POR COMPARAÇÃO DIRECIONAL	18
3	FUNDAMENTOS DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO	19
3.1	TEMPO MORTO	19
3.1.1	ESTABILIDADE DO SISTEMA E SINCRONISMO	19
3.1.2	PARÂMETROS DO DISJUNTOR	21
3.1.3	TEMPO DE RECUPERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ISOLANTES DO AR	21
3.2	TEMPO DE RECUPERAÇÃO	22
3.3	TENTATIVAS DE RELIGAMENTO	22
3.4	RELIGAMENTO MONOPOLAR	23
3.5	CHAVEAMENTO CONTROLADO	23
3.5.1	ABERTURA CONTROLADA	24
3.5.2	FECHAMENTO CONTROLADO	24

3.5.3	MÉTODO DE CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LTs	26
4	MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO NO ATP	31
4.1	MODELAGEM DO RELÉ DE DISTÂNCIA COM O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO NO ATP	31
4.2	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	34
4.3	FILTRAGEM DOS SINAIS	35
4.4	ESTIMAÇÃO DE FASORES	36
4.5	CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS	38
4.6	COMPARADOR	39
4.7	SELEÇÃO DE FASE	39
4.8	LÓGICA DO RELÉ	41
4.9	RELIGAMENTO AUTOMÁTICO	41
4.9.1	ESTIMAÇÃO DOS SINAIS	41
4.9.2	DETERMINAÇÃO DOS INSTANTES ÓTIMOS	42
4.10	CANAL DE COMUNICAÇÃO	44
4.11	DISJUNTOR	45
5	AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM O CHAVEAMENTO CONTROLADO NO ATP	46
5.1	SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO	46
5.2	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO APÓS A ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO	47
5.2.1	CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO	47
5.2.2	CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	49
5.2.3	ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE DISPARO PERMISSIVO POR SOBREALCANÇE	50
5.3	AVALIAÇÃO DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO COM O CHAVEAMENTO CONTROLADO	52
5.3.1	RELIGAMENTO AUTOMÁTICO MONOFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPENSADA	53
5.3.2	RELIGAMENTO AUTOMÁTICO TRIFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO SEM COMPENSAÇÃO	57
5.3.3	RELIGAMENTO AUTOMÁTICO TRIFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPENSADA	59
6	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

2.1	Zonas de proteção de distância.	3
2.2	Diagrama R-X da característica Mho com duas zonas de proteção.	4
2.3	Límiar de operação dos comparadores a) Fase; b) Magnitude.	6
2.4	Circuito das componentes simétricas para uma falta monofásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).	9
2.5	Circuito das componentes simétricas para uma falta bifásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).	9
2.6	Circuito das componentes simétricas para uma falta trifásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).	11
2.7	Alcances da primeira e segunda zona de proteção de dois relés localizados nos terminais R e S (SILVA, 2006).	14
2.8	Lógica do Esquema de Disparo Direto por Subalcance.	15
2.9	Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Subalcance.	16
2.10	Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Sobrealcance.	17
2.11	Lógica do Esquema de Bloqueio por Comparação Direcional.	18
3.1	Sistema com falta mantida em h% da LT.	20
3.2	Curvas potência-ângulo supondo durante a falta.	21
3.3	Temporização do fechamento controlado. (Modificado de (GOLDSWORTHY et al., 2008)).	25
3.4	Sinal de tensão de uma LT sem compensação antes e após o disparo dos disjuntores.	26
3.5	Batimento em uma LT com 80% de grau de compensação (a) Tensões no lado da barra, g(t), e da linha, y(t); (b) Tensão nos terminais do disjuntor.	29
3.6	Batimento em uma LT com 30% de grau de compensação (a) Tensões no lado da barra, g(t), e da linha, y(t); (b) Tensão nos terminais do disjuntor.	29
4.1	Diagrama de blocos do processo da Proteção de Distância	32
4.2	Diagrama de blocos do processo do Religamento Automático.	33
4.3	Diagrama de blocos do Modelo de Relé de Distância, com o religamento.	34
4.4	Circuito equivalente do TC (SILVA, 2006)	34
4.5	Circuito equivalente do TPC (SILVA, 2006).	35
4.6	Filtro Butterworth: (a) Resposta em frequência; (b) Exemplo de filtragem de um sinal de tensão (SILVA, 2006).	36
4.7	Resposta do filtro cosseno modificado: (a) Magnitude; (b) Fase.	37
4.8	Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Sobrealcance com Seleção de Fase.	41
4.9	Estimação dos sinais de referência em instantes futuros (DANTAS, 2007).	42
4.10	Interpolação do sinal de referência	43

5.1	Sistema elétrico simulado no ATP.	46
5.2	Impedância vista pela unidade Z_{AT} para uma falta na Fase A: (a) Relé R1 (b) Relé R2.	47
5.3	Resposta do comparador de fase de primeira e segunda zona do relé R1 para uma falta na Fase A.	48
5.4	Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta na Fase A: (a) Tensão (b) Corrente.	48
5.5	Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta na Fase A: (a) Tensão (b) Corrente.	48
5.6	Impedâncias detectadas pelo Relé R1 para uma falta trifásica: (a) Unidades monofásicas (b) Unidades bifásicas.	49
5.7	Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta trifásica: (a) Tensão (b) Corrente. ...	50
5.8	Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta trifásica: (a) Tensão (b) Corrente. ...	50
5.9	Impedância vista pela unidade Z_{AB} para uma falta bifásica: (a) Relé R1 (b) Relé R2.	51
5.10	Resposta do comparador de fase de primeira e segunda zona para uma falta bifásica: (a) Relé R1; (b) Relé R1.	51
5.11	Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta bifásica: (a) Tensão (b) Corrente. ...	52
5.12	Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta bifásica: (a) Tensão (b) Corrente. ...	52
5.13	Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.	53
5.14	Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%.	54
5.15	Correntes do secundário do TC1 para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%.	54
5.16	Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 50%: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.	55
5.17	Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 50%.	55
5.18	Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.	56
5.19	Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TPC2 de Barra; (b) TPC2 de Linha.	56
5.20	Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção.	57
5.21	Correntes do secundário dos TCs para uma falta trifásica em uma LT sem compensação: (a) TC1; (b) TC2.	58
5.22	Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT sem compensação: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) Tensão de Linha da Fase A; (c) Tensão de Linha da Fase B; (d) Tensão de Linha da Fase C.	58
5.23	Correntes do secundário do TC1 para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%.	59

5.24	Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.	60
5.25	Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.	60
5.26	Correntes do secundário dos TCs para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% com teleproteção: (a) TC1; (b) TC2.....	61
5.27	Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% atuando com teleproteção: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.	62
5.28	Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% atuando com teleproteção: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.	62
5.29	Correntes do secundário dos TCs para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TC1; (b) TC2.....	64
5.30	Sinais de tensão para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% atuando com teleproteção: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.	64
5.31	Sinais de tensão para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% atuando com teleproteção: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.	65

LISTA DE TABELAS

2.1	Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta.	11
3.1	Valores de tempo mínimo para a dispersão do ar ionizado (Modificado de (AREVA, 2011)).....	22
5.1	Dados das fontes.....	46
5.2	Parâmetros da LT.	46
5.3	Intantes do processo de abertura e religamento de uma LT compensada em 20% em uma falta trifásica.	60
5.4	Intantes do processo de abertura e religamento do Terminal 1 da LT compensada em 80%, com falta trifásica.	63
5.5	Intantes do processo de abertura e religamento do Terminal 2 da LT compensada em 80%, com falta trifásica.	63
5.6	Intantes do processo de abertura e religamento do Terminal 1 da LT compensada em 40%, com falta bifásica.....	65
5.7	Intantes do processo de abertura e religamento do Terminal 2 da LT compensada em 80%, com falta bifásica.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Programs.</i>
FP	Fator de Potência.
LT	Linha de Transmissão.
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente.
RTP	Relação de Transformação do Transformador de Potencial.
TC	Transformador de Corrente.
TP	Transformador de Potencial.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O sistema de proteção que possui esquemas de religamento automático, possui maior capacidade de suprir as cargas, aumentando a sua disponibilidade e segurança. Dessa forma, ao detectar uma falta na linha de transmissão (LT), o sistema de proteção atua eliminando o distúrbio e após um tempo, a linha pode ser religada, nos casos em que a falta é temporária. Com isto, o sistema de proteção oferece um meio econômico para a manutenção da continuidade do sistema elétrico.

Além disso, realizar o religamento automático de LTs é uma operação que deve ser realizada cuidadosamente, pois ao realizar a abertura dos disjuntores, deve-se manter a linha desligada por tempo suficiente para que o ar recupere as suas características dielétricas impedindo que ao realizar o religamento, ocorra a reignição ou evolução para outro tipo de falta. Em vista disso, a linha também não deve permanecer desligada por muito tempo, isso porque pode ocasionar na perda do sincronismo (GE Power Management, 2002). Esse intervalo também é chamado de “tempo morto”. Além disso, a proteção de distância pode ser utilizada para viabilizar acelerar o desempenho dos relés durante essas manobras.

O religamento mais comum a ser utilizado é o tripolar, de modo que, ao detectar a falta, a proteção atua desligando as três fases, independentemente do tipo de falta. Religamentos monopolares também podem ser utilizados, mas é necessário um sistema capaz de classificar o tipo de falta, para não realizar atuações indevidas.

O controle dos instantes das manobras de chaveamento dos disjuntores tanto na operação de abertura quanto na de fechamento requer certo cuidado, pois a depender do instante em que ocorrer, as sobretensões podem ter um grau elevado, diminuindo a qualidade energia, causando elevado estresse nos disjuntores entre outros, de forma que o religamento se torna prejudicial ao sistema (DANTAS, 2007). Técnicas de chaveamento podem ser utilizadas para otimizar esses instantes, aumentando as chances de um religamento bem-sucedido. Por fim, a utilização de esquemas de teleproteção é importante para acelerar a atuação dos disjuntores na extinção de uma falta, de forma que o religamento possa ser realizado no menor tempo possível.

A seguir, serão tratados com mais detalhes os conceitos da proteção de distância e do religamento automático.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse projeto de pesquisa é avaliar a proteção de distância de LTs com o religamento automático, a partir de simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando-se

programas do tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Programs*). Como objetivos específicos, têm-se:

- Modelar e simular a proteção de distância a partir de programas do tipo EMTP;
- Modelar e simular o religamento automático monofásico e trifásico, baseado em um método de chaveamento controlado a partir de programas do tipo EMTP;
- Avaliar o desempenho do comparador de fase aliado a um método de seleção de fases;
- Avaliar o desempenho do religamento automático em conjunto com os esquemas de teleproteção;
- Avaliar o desempenho do método de chaveamento automático para religamentos monofásicos e trifásicos aliado a proteção de distância.

1.3 JUSTIFICATIVA

A justificativa do presente projeto de pesquisa está na necessidade de unir conhecimentos fundamentais a respeito do religamento de LTs em conjunto com a atuação da proteção, em particular da proteção de distância, tendo em vista que esse é o tipo de proteção mais empregado atualmente em linhas de transmissão. Dessa forma, ao utilizar a proteção de distância, é possível extinguir a falta no menor tempo possível, de modo que os efeitos da falta na LT são diminuídos, aumentando as chances de um religamento bem-sucedido.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica da proteção de distância de linhas de transmissão, sendo abordados conceitos essenciais para a modelagem da proteção de distância descrita nesse projeto de pesquisa.

No capítulo 3, é apresentada a fundamentação teórica do religamento automático de linhas de transmissão, os quais foram utilizados na modelagem, descrita nesse projeto de pesquisa.

No capítulo 4, é discutido a implementação dos modelos da proteção de distância com o religamento automático no ATP, descrevendo-se os módulos constitutivos da proteção do religamento descrevendo o que foi escrito em forma de código no programa.

No capítulo 5, são apresentados os resultados do sistema modelado quando submetido a diversas situações.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões acerca do estudo sobre a proteção de distância com o religamento automático em LTs.

2 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

O relé é um dispositivo que pode receber como entradas os sinais de tensão e corrente referentes ao sistema e utiliza desses sinais para detectar as condições indesejáveis, tomando as decisões de atuação ou não atuação da proteção de modo a eliminar o defeito.

Um relé que utiliza da proteção de distância faz a detecção de distúrbios ao longo da linha realizando comparações entre a impedância medida com a pré-determinada, determinando a localização da falta na linha e mandando um sinal de “trip” para os disjuntores caso a falta seja detectada em sua zona de atuação.

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais da proteção de distância de LTs, os quais foram utilizados para a modelagem de relés no presente trabalho.

2.1 ZONAS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

As zonas de proteção têm grande importância para a proteção de distância, pois elas definem a maneira que o relé deve atuar a depender a impedância medida, além de impedir atuações instantâneas para faltas que ocorram em linhas adjacentes ou para faltas mais distantes do relé porém dentro da LT, como observado na Figura 2.1. Portanto, se ocorrer uma falta na LT entre os relés R_A e R_B é esperado que eles atuem primeiro, extinguindo o curto-circuito. Caso os relés de outras linhas atuem antes, o sistema perde a confiabilidade e a seletividade, pois a coordenação entre os relés estabelecida não foi realizada corretamente.

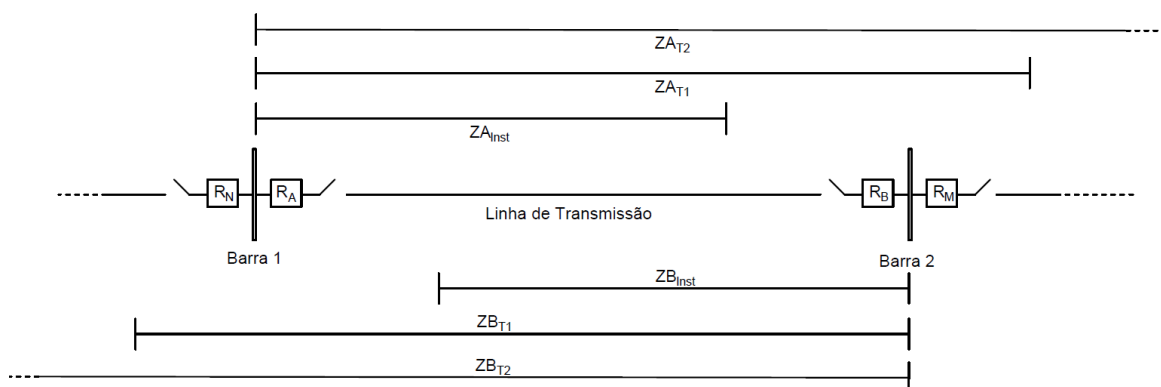


Figura 2.1: Zonas de proteção de distância.

A duração de uma falta no sistema depende do tempo de detecção da falta pelo relé, somado ao tempo de atuação do disjuntor e dependendo de qual zona a falta foi detectada esse intervalo de atuação pode ser ainda maior, isso porque um sistema pode ter várias zonas que podem atuar

instantaneamente ou após um intervalo de tempo.

A zona instantânea (Z_I) é a primeira zona de atuação do relé. Assim, se a impedância aparente medida estiver dentro do alcance dessa zona, o relé manda o sinal de *trip* ao disjuntor no mesmo instante. Normalmente, essa zona não possui cobertura em toda a LT, correspondendo a um total de 80 a 85% do seu comprimento. Isso é feito, para evitar os erros de medições que possam a vir ocorrer, como para as situações de sobrealcance em que o relé atua para faltas além da sua zona (AREVA, 2011).

As zonas temporizadas (Z_T) são aquelas que atuam somente após um intervalo de tempo. A zona secundária, por exemplo, possui alcance de pelo menos 120% da LT a ser protegida como tempos de operação de 200 a 500 ms (AREVA, 2011). Dessa forma, toda a linha passa a ser protegida, garantindo a operação quando a falta não é detectada na zona instantânea. Zonas complementares podem ser utilizadas, seja para utilização como proteção de retaguarda a outros relés ou para a detecção de faltas reversas.

2.2 CARACTERÍSTICA MHO

As impedâncias medidas são obtidas a partir dos sinais de tensão e corrente obtidos do sistema, visto que $Z = \frac{V}{I}$. Para realizar a comparação, é mais conveniente representar as impedâncias no diagrama R-X, devido ao seu caráter polar. Dessa forma, é possível plotar a impedância da LT, estabelecer critérios de atuação e por fim, detectar a possível presença de faltas.

A característica Mho é bastante utilizada na proteção de distância, isso devido ao seu caráter direcional (BLACKBURN; DOMIN, 2006). Além disso, é possível associar várias características com as zonas de proteção da LT, variando o seu raio ou a sua direção. A Figura 2.2, apresenta essa característica no plano R-X.

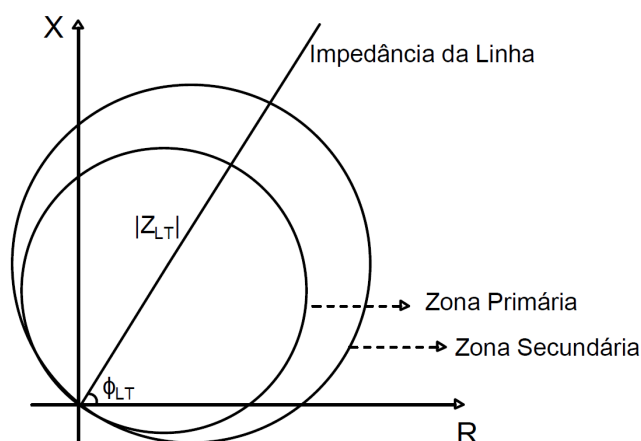


Figura 2.2: Diagrama R-X da característica Mho com duas zonas de proteção.

Para determinar a existência ou não da falta, algum parâmetro de referência deve ser utili-

zado para realizar a comparação. Portanto, como a impedância é um número complexo, essa comparação pode ser dada em fase ou em amplitude.

2.2.1 COMPARADOR DE FASE E MAGNITUDE

Na comparação por fase, são utilizadas as fases de dois sinais. Portanto, caso o módulo da diferença entre as fases desses sinais seja menor que um intervalo fixo, o relé deve atuar. A expressão (2.1) mostra essa relação:

$$-90^\circ \leq \text{Arg}(S_1) - \text{Arg}(S_2) \leq 90^\circ \quad (2.1)$$

Em que os sinais S_1 e S_2 estão em função das tensões e correntes vistas pelo relé. Essas expressões possuem a seguinte forma (ELMORE, 2003):

$$S_1 = -\bar{V}_r + Z_A \bar{I}_r \quad (2.2)$$

$$S_2 = \bar{V}_r \quad (2.3)$$

Em que Z_A é a impedância correspondente a porcentagem do comprimento da LT a ser protegida, fator determinado pelas zonas de proteção.

Dividindo as equações (2.2) e (2.3) por \bar{I}_r , tem-se que:

$$Z_1 = -Z_r + Z_A \quad (2.4)$$

$$Z_2 = Z_r \quad (2.5)$$

As fases dos sinais podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Arg}(S_1) &= \arctan \left[\frac{\text{im}(S_1)}{\text{re}(S_1)} \right] \\ \text{Arg}(S_2) &= \arctan \left[\frac{\text{im}(S_2)}{\text{re}(S_2)} \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Já na comparação por magnitude, são utilizadas as magnitudes de dois sinais. Portanto, caso o módulo da diferença entre as magnitudes desses sinais seja menor que um intervalo fixo, o relé deve atuar. A expressão (2.7) mostra essa relação:

$$|S_O| \geq |S_R| \quad (2.7)$$

Assim como na comparação por fase, os sinais S_O e S_R são definidos como (PEREZ, 2006):

$$S_O = \frac{Z_A \bar{I}_r}{2} \quad (2.8)$$

$$S_R = -\bar{V}_r + \frac{Z_A \bar{I}_r}{2} \quad (2.9)$$

Dividindo as equações (2.8) e (2.9) por \bar{I}_r , tem-se que:

$$Z_O = \frac{Z_A}{2} \quad (2.10)$$

$$Z_R = -\bar{Z}_r + \frac{Z_A}{2} \quad (2.11)$$

Na Figura 2.3 é mostrado o diagrama R-X dos comparadores operando no seu limiar de operação para uma zona primária, ou seja, se o vetor da impedância resultante das medições dos sinais de tensão e corrente Z_r for maior do que o alcance, o relé não atua, o que é o mesmo que realizar as comparações apresentadas em (2.1) e (2.7).

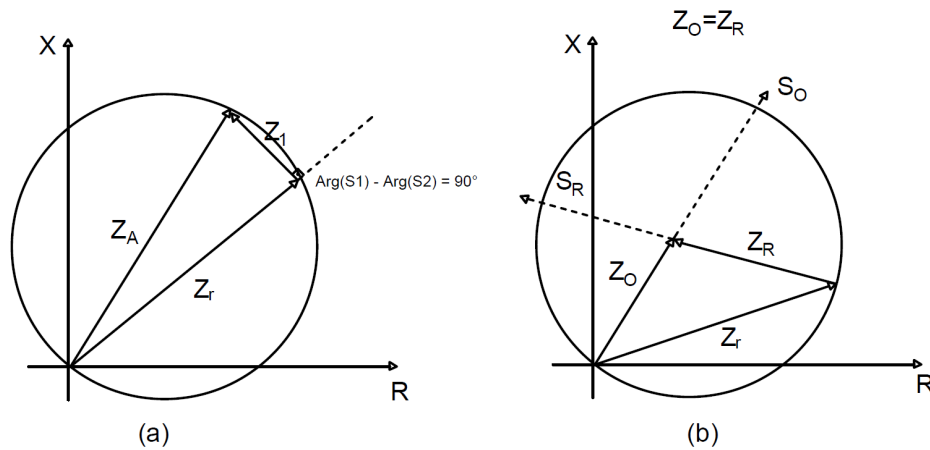


Figura 2.3: Limiar de operação dos comparadores a) Fase; b) Magnitude.

2.2.2 POLARIZAÇÕES DO COMPARADOR MHO

O comparador de fase, também pode ser denominado como autopolarizado, isso porque a tensão de referência utilizada para realizar a comparação é a própria tensão obtida pelo relé durante a falta, como observado na expressão (2.3).

Apesar de ser facilmente aplicável, essa técnica pode não ser confiável para os casos em que o curto-circuito ocorre muito perto do transformador de potencial (TP), isso porque a tensão V_r será muito baixa, ou seja, a impedância aparente vista pelo relé será aproximadamente nula, o que pode ocasionar falhas na atuação do relé (ZIEGLER, 2006). Soluções para esse problema serão abordadas abaixo.

2.2.2.1 POLARIZAÇÃO CRUZADA

Para este tipo de polarização é utilizada a tensão em quadratura de uma das fases sãs para suplementar a tensão da fase que está sob a condição de curto-circuito (ZIEGLER, 2006). Dessa forma, a imprecisão da medição encontrada nos casos em que somente é utilizado o comparador autopolarizado é eliminada. A expressão para esse tipo de polarização é apresentada abaixo:

$$S_2 = (1 - k_p)\bar{V}_r + k_p\left(\frac{j}{\sqrt{3}}\bar{V}_{sup}\right) \quad (2.12)$$

Em que, k_p é porcentagem da suplementação da tensão da fase sã.

Esse tipo de polarização apresenta uma complicação para os casos em que as falhas são trifásicas, isso porque não há fases sãs para suplementar as fases em falta (SILVA, 2006).

2.2.2.2 POLARIZAÇÃO POR MEMÓRIA DE TENSÃO

A polarização por memória de tensão pode ser utilizada para contornar o problema para os casos de faltas trifásicas. Nesse tipo de polarização, diferentemente da anterior, é utilizada as tensões de pré-falta das fases, de modo que, elas ficam armazenadas na memória do relé para suplementar as tensões de polarização nos casos de faltas próximas aos equipamentos de medição. A expressão para esse tipo de polarização é apresentada abaixo:

$$S_2 = (1 - k_p)\bar{V}_r + k_p\bar{V}_{pre} \quad (2.13)$$

Em que, V_{pre} é a tensão de pré-falta da fase.

Para os casos em que as frequências das fases possam variar durante a falta, é necessário ter certa cautela ao utilizar esse tipo de polarização (SCHWEITZER; ROBERTS, 2010).

2.3 IMPEDÂNCIAS DE FALTA

Em um sistema trifásico, pode ocorrer dez tipos distintos de faltas, sendo elas: uma trifásica, três bifásicas envolvendo contato com terra, três bifásicas e três monofásicas. Considerando os vários tipos de falta, é possível determinar os sinais de corrente e tensão de entrada para o relé.

Para que na proteção de distância a realização da detecção da falta, seja realizada corretamente, é necessário que as tensões de entrada nos relés sejam, independentemente do tipo de falta envolvida, a impedância de sequência positiva (HOROWITZ; PHADKE, 1995.). Portanto, é necessário obter algumas relações para cada tipo de falta, a fim de determinar as tensões corretamente.

2.3.1 FALTA MONOFÁSICA

Para a análise dos casos de faltas monofásicas é realizada a análise de um curto-circuito na fase A, os diagramas unifilares dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero são mostrados na Figura 2.4. Dessa figura, é possível obter a tensão na fase A no ponto de falta e ela é dada pela expressão:

$$\bar{E}_{af} = \bar{E}_{0f} + \bar{E}_{1f} + \bar{E}_{2f} \quad (2.14)$$

Portanto, as expressões para as componentes de sequência são dadas por:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{1f} &= \bar{E}_1 - Z_{1f}\bar{I}_1 \\ \bar{E}_{2f} &= \bar{E}_2 - Z_{1f}\bar{I}_2 \\ \bar{E}_{0f} &= \bar{E}_0 - Z_{0f}\bar{I}_0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Substituindo os termos de (2.15) em (2.14) e considerando que a tensão no ponto de falta é zero (HOROWITZ; PHADKE, 1995.), tem-se que:

$$\bar{E}_{af} = \bar{E}_a + Z_{1f}\bar{I}_a - (Z_{0f} - Z_{1f})\bar{I}_0 = 0 \quad (2.16)$$

onde $\bar{E}_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_1 + \bar{E}_2$

Dividindo-se toda a expressão (2.16) por Z_{1f} e então o isolando, tem-se que:

$$Z_{1f} = \frac{\bar{E}_a}{\bar{I}_a + \frac{Z_{0f}-Z_{1f}}{Z_{1f}}\bar{I}_0} = \frac{\bar{E}_a}{\bar{I}_a + \frac{Z_0-Z_1}{Z_1}\bar{I}_0} = \frac{\bar{E}_a}{\bar{I}_a + K_0 3\bar{I}_0} \quad (2.17)$$

em que K_0 é o fator de compensação da corrente de sequência zero, podendo ser calculado como:

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (2.18)$$

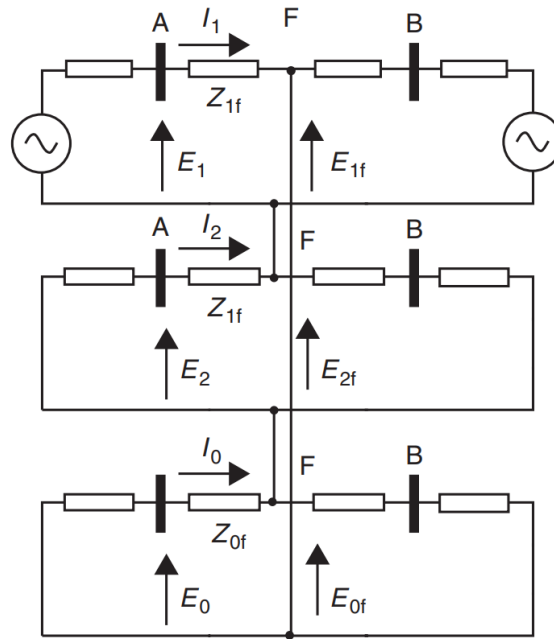


Figura 2.4: Circuito das componentes simétricas para uma falta monofásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).

2.3.2 FALTA BIFÁSICA

Para a análise dos casos de faltas bifásicas é realizada a análise de um curto-circuito entre às fases B e C na LT, os diagramas unifilares dos circuitos de sequência positiva e negativa são mostrados na Figura 2.5. Dessa figura, observa-se que as tensões das componentes de sequência positiva e negativa são iguais no ponto de falta, logo obtém-se a seguinte expressão:

$$\bar{E}_{1f} = \bar{E}_{2f} = \bar{E}_1 - Z_{1f}\bar{I}_1 = \bar{E}_2 - Z_{2f}\bar{I}_2 \quad (2.19)$$

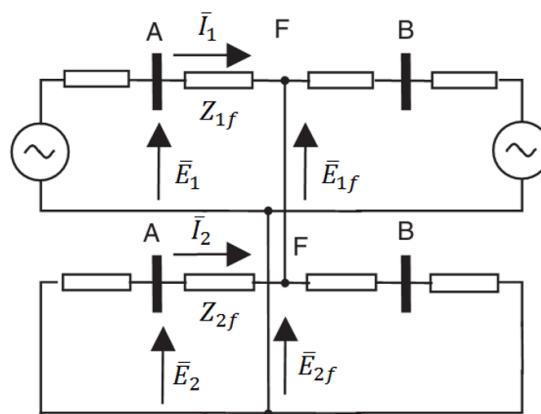


Figura 2.5: Circuito das componentes simétricas para uma falta bifásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).

Tomando as grandezas das componentes simétricas de cada fase envolvida na falta, tem-se

que:

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_b &= \bar{E}_0 + \alpha^2 \bar{E}_1 + \alpha \bar{E}_2 \\
 \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + \alpha^2 \bar{I}_1 + \alpha \bar{I}_2 \\
 \bar{E}_c &= \bar{E}_0 + \alpha \bar{E}_1 + \alpha^2 \bar{E}_2 \\
 \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + \alpha \bar{I}_1 + \alpha^2 \bar{I}_2
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Em que, $\alpha = 1/\sqrt{3}$. Pelas expressões obtidas em (2.20) e fazendo $\bar{E}_1 - \bar{E}_2$ e $\bar{I}_1 - \bar{I}_2$, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_1 - \bar{E}_2 &= \frac{\bar{E}_b - \bar{E}_c}{\alpha^2 - \alpha} \\
 \bar{I}_1 - \bar{I}_2 &= \frac{\bar{I}_b - \bar{I}_c}{\alpha^2 - \alpha}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Substituindo as expressões de (2.21) em (2.19) é obtido a impedância de sequência positiva, logo:

$$\frac{\bar{E}_1 - \bar{E}_2}{\bar{I}_1 - \bar{I}_2} = \frac{\bar{E}_b - \bar{E}_c}{\bar{I}_b - \bar{I}_c} = Z_{1f}
 \tag{2.22}$$

2.3.3 FALTA TRIFÁSICA

Para a análise dos casos de faltas trifásicas é considerado que a falta é simétrica e equilibrada, portanto no diagrama unifilar mostrado na Figura 2.6 é considerado apenas a componente de sequência positiva (HOROWITZ; PHADKE, 1995.). Portanto, para esse caso:

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_1 &= \bar{E}_a = Z_{1f} \bar{I}_f = Z_{1f} \bar{I}_a \\
 \bar{E}_2 &= \bar{E}_0 = 0 \\
 \bar{I}_2 &= \bar{I}_0 = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Logo, isolando Z_{1f} , tem-se que:

$$Z_{1f} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_f}
 \tag{2.24}$$

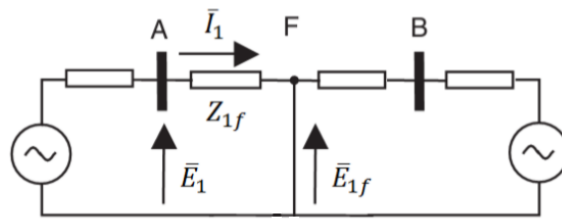


Figura 2.6: Circuito das componentes simétricas para uma falta trifásica (HOROWITZ; PHADKE, 1995.).

2.3.4 UNIDADES DE IMPEDÂNCIA DO RELÉ

Seguindo os procedimentos apresentados nessa seção, é possível obter as expressões das impedâncias de sequência positiva para todas as faltas monofásicas e bifásicas. Para realizar a detecção dos outros tipos de faltas, como as bifásicas que envolvem a terra e as trifásicas, é possível implementar uma lógica de atuação no relé que verifique quais unidades atuaram e então determinar a falta. A lógica da atuação é apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta.

Unidades do relé	Tipo de Falta									
	ABC	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT
ZAT	X	X						X		
ZBT	X		X						X	
ZCT	X			X						X
ZAB	X				X			X		
ZBC	X					X			X	
ZCA	X						X			X

2.4 TÉCNICA DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

Como visto anteriormente, é possível aplicar uma lógica no relé capaz de identificar o tipo de falta, utilizando as unidades de impedância, mas para realizar o religamento automático é necessário que a identificação da falta seja precisa, de modo a aumentar a confiabilidade da manobra. Portanto, será utilizado neste trabalho o algoritmo apresentado em (ADU, 2006), pois esse método é capaz de identificar a falta independentemente do comprimento da LT, ou seja, até que os efeitos dos distúrbio sejam irrisórios.

No método, é utilizado as fases entre as componentes de sequência positiva e negativa dos sinais de corrente. Além disso, utiliza-se a magnitude relativa da sequência negativa e zero para diferenciar as faltas que envolvem a terra das que não envolvem. Além disso, outra vantagem desse método em relação a outros é ser capaz de identificar a falha mesmo para os casos em que a impedância de falta é alta (ADU, 2006).

Esse tipo de algoritmo tem um importante papel para manter a estabilidade do sistema, isso

porque ele possibilita realizar o religamento monopolar de LTs. Visto que a técnica aumenta a confiabilidade do sistema durante a detecção da falta, tornando possível chavear somente a fase afetada pelo curto-circuito, mantendo as outras fases operando normalmente, de modo que, o religamento ocorrerá somente para uma fase, preservando a estabilidade do sistema.

O algoritmo explora a presença de corrente componente de sequência zero (\bar{I}_0) para detectar faltas que envolvem a terra. No entanto, é possível que um sistema desequilibrado produza alguma corrente \bar{I}_0 mesmo em condições de operação normal do sistema. O mesmo pode ocorrer para o caso de faltas assimétricas, de modo que somente a detecção da corrente de sequência negativa (\bar{I}_2) não é o suficiente para determinar a existência da falta (ADU, 2006).

Para evitar falsas detecções de faltas, é proposto que seja realizada uma normalização de \bar{I}_0 e de \bar{I}_2 com a componente de corrente de sequência positiva (\bar{I}_1). Além disso, essa normalização deve ser feita tanto para as componentes de sequência durante a pré-falta quanto para as componentes durante a falta. Essas expressões podem ser observadas nas expressões (2.25) e (2.26):

$$R_{0p} = \frac{\bar{I}_{0p}}{\bar{I}_{1p}} \quad R_{0f} = \frac{\bar{I}_{0f}}{\bar{I}_{1f}} \quad (2.25)$$

$$R_{2p} = \frac{\bar{I}_{2p}}{\bar{I}_{1p}} \quad R_{2f} = \frac{\bar{I}_{2f}}{\bar{I}_{1f}} \quad (2.26)$$

Onde \bar{I}_{0p} , \bar{I}_{1p} e \bar{I}_{2p} são respectivamente os fasores de corrente de sequência zero, positiva e negativa de pré-falta e \bar{I}_{0f} , \bar{I}_{1f} e \bar{I}_{2f} são os fasores de corrente de sequência durante a ocorrência da falta.

A partir de (2.25), pode-se concluir que se R_{0f} for maior do que R_{0p} , significa que a falta envolve a terra, caso contrário não envolve. O mesmo se aplica a (2.26), se R_{2f} for maior que R_{2p} , então a falta é assimétrica.

Como a defasagem das componentes de sequência varia de acordo com o tipo de falta, o método usa esse princípio para definir o tipo da falta. Para o caso das faltas monofásicas e assimétricas que não envolvem a terra é feito a comparação entre as fases das correntes de sequência positiva com a de sequência negativa. Para as faltas bifásicas que envolvem a terra efetua-se a comparação entre a corrente de sequência zero e negativa. A falta trifásica é identificada pela análise da defasagem da corrente das fases A, B e C com a corrente de sequência positiva para as fases A, B e C.

Para detectar uma falta AT, é preciso que:

$$0^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{a1f} - \underline{\bar{I}}_{a2f}| \leq 30^\circ \quad e \quad R_{0f} \geq R_{0p} \quad (2.27)$$

para uma falta BT:

$$0^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{b1f} - \underline{\bar{I}}_{b2f}| \leq 30^\circ \quad e \quad R_{0f} \geq R_{0p} \quad (2.28)$$

para uma falta CT:

$$0^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{c1f} - \underline{\bar{I}}_{c2f}| \leq 30^\circ \quad e \quad R_{0f} \geq R_{0p} \quad (2.29)$$

para uma falta AB:

$$40^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{a1f} - \underline{\bar{I}}_{a2f}| \leq 80^\circ, \quad R_{0p} \geq R_{0f} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p} \quad (2.30)$$

para uma falta BC:

$$40^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{b1f} - \underline{\bar{I}}_{b2f}| \leq 80^\circ, \quad R_{0p} \geq R_{0f} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p} \quad (2.31)$$

para uma falta CA:

$$40^\circ \leq |\underline{\bar{I}}_{c1f} - \underline{\bar{I}}_{c2f}| \leq 80^\circ, \quad R_{0p} \geq R_{0f} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p} \quad (2.32)$$

para uma falta ABT:

$$\begin{aligned} 100^\circ &\leq |\underline{\bar{I}}_{a2f} - \underline{\bar{I}}_{a0f}| \leq 120^\circ, \\ 0^\circ &\leq |\underline{\bar{I}}_{c2f} - \underline{\bar{I}}_{c0f}| \leq 20^\circ, \\ R_{0f} &\geq R_{0p} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p} \end{aligned} \quad (2.33)$$

para uma falta BCT:

$$\begin{aligned}
0^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{a2f}} - \sqrt{\bar{I}_{a0f}}| \leq 20^\circ, \\
100^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{b2f}} - \sqrt{\bar{I}_{b0f}}| \leq 120^\circ, \\
R_{0f} &\geq R_{0p} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p}
\end{aligned}
\tag{2.34}$$

para uma falta CAT:

$$\begin{aligned}
0^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{b2f}} - \sqrt{\bar{I}_{b0f}}| \leq 20^\circ, \\
100^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{c2f}} - \sqrt{\bar{I}_{c0f}}| \leq 120^\circ, \\
R_{0f} &\geq R_{0p} \quad e \quad R_{2f} \geq R_{2p}
\end{aligned}
\tag{2.35}$$

para uma falta ABC:

$$\begin{aligned}
0^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{af}} - \sqrt{\bar{I}_{a1f}}| \leq 20^\circ, \\
0^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{bf}} - \sqrt{\bar{I}_{b1f}}| \leq 20^\circ, \\
0^\circ &\leq |\sqrt{\bar{I}_{cf}} - \sqrt{\bar{I}_{c1f}}| \leq 20^\circ, \\
R_{0p} &\geq R_{0f} \quad e \quad R_{2p} \geq R_{2f}
\end{aligned}
\tag{2.36}$$

2.5 ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO

A utilização de zonas na proteção de distância, como mostrado na Figura 2.7, impede que os relés tenham os mesmos tempos de atuação em toda a LT para a extinção na falta. Isso ocorre, pois como destacado anteriormente, a cobertura da zona instantânea é propositalmente menor que o comprimento total da LT, de modo que, a extinção completa de curtos-circuitos que ocorrem nas suas extremidades somente acontece quando a unidade temporizada atua.

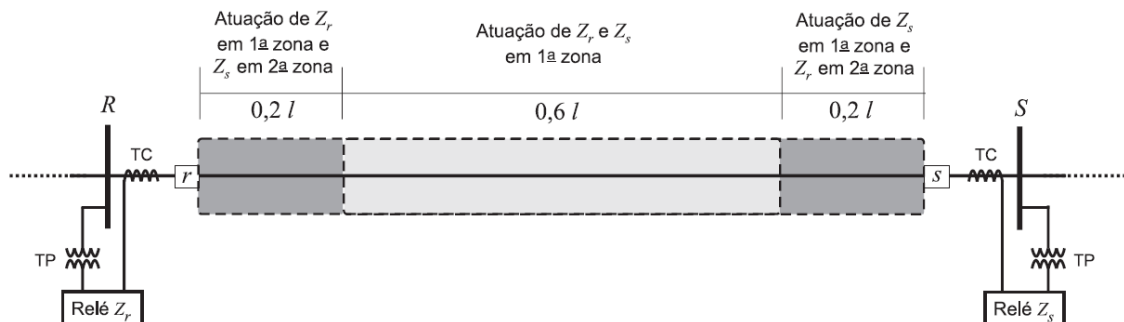


Figura 2.7: Alcances da primeira e segunda zona de proteção de dois relés localizados nos terminais R e S (SILVA, 2006).

Em esquemas de religamento automático, isso pode ser um problema, pois a LT só necessita permanecer desligada por um intervalo de tempo para que o ar recupere as suas características dielétricas, assegurando que o curto-circuito não seja reiniciado quando ocorrer o fechamento dos contatos dos disjuntores. Consequentemente, o atraso da segunda zona diminui as chances de um religamento seguro, pois esse intervalo seria reduzido no terminal em que a falha foi identificada na sua segunda zona.

Implementar um canal de comunicação capaz de conectar um relé de um terminal da LT com o outro, de modo a transmitir informações que permitam que a atuação da proteção seja mais rápida em todo o comprimento da linha. Com a proteção de distância é possível explorar diversos esquemas de comunicação que podem ser utilizados visando à necessidade do sistema. Os principais esquemas de comunicação utilizados, são apresentados a seguir.

2.5.1 ESQUEMA DE DISPARO DIRETO POR SUBALCANCE

A lógica do esquema de disparo direto por subalcance é mostrada no diagrama da Figura 2.8. Caso ocorra uma falta muito próxima a um barramento, como por exemplo o R, o relé detectaria o distúrbio em sua zona instantânea, faria a abertura do seu respectivo disjuntor, r , e enviaria um sinal de disparo para o relé remoto abrir o seu disjuntor, no caso o do barramento S. Portanto, o relé que detecta a falta em primeira zona manda abrir os disjuntores dos dois terminais da LT.

Esse esquema apresenta uma desvantagem, pois ele pode causar atuações indevidas dos relés devido a um falso disparo podendo ser ocasionado por uma falha no canal de comunicação ou por uma operação acidental (SILVA, 2006).

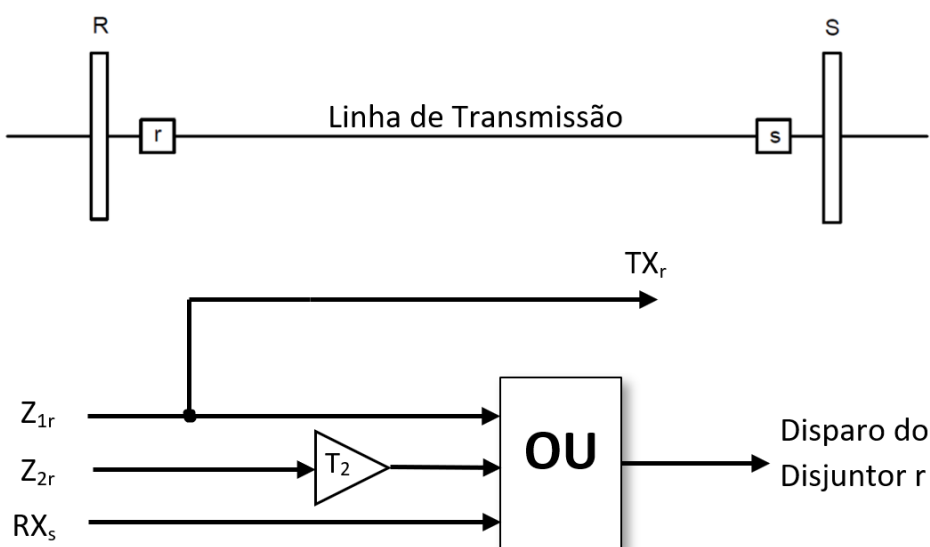


Figura 2.8: Lógica do Esquema de Disparo Direto por Subalcance.

2.5.2 ESQUEMA DE DISPARO PERMISSIVO POR SUBALCANCE

A lógica do esquema de disparo permissivo por subalcance é mostrada no diagrama da Figura 2.9. Considerando a mesma situação apresentada no esquema anterior, ao detectar a falta em sua zona instantânea, o relé do barramento R envia um sinal com caráter permissivo, e, ao receber esse sinal o relé remoto atuará somente se ele também detectar a falta em sua segunda zona. Dessa forma, é possível impedir disparos equivocados que possam vir a ocorrer caso o esquema anterior seja utilizado (SILVA, 2006).

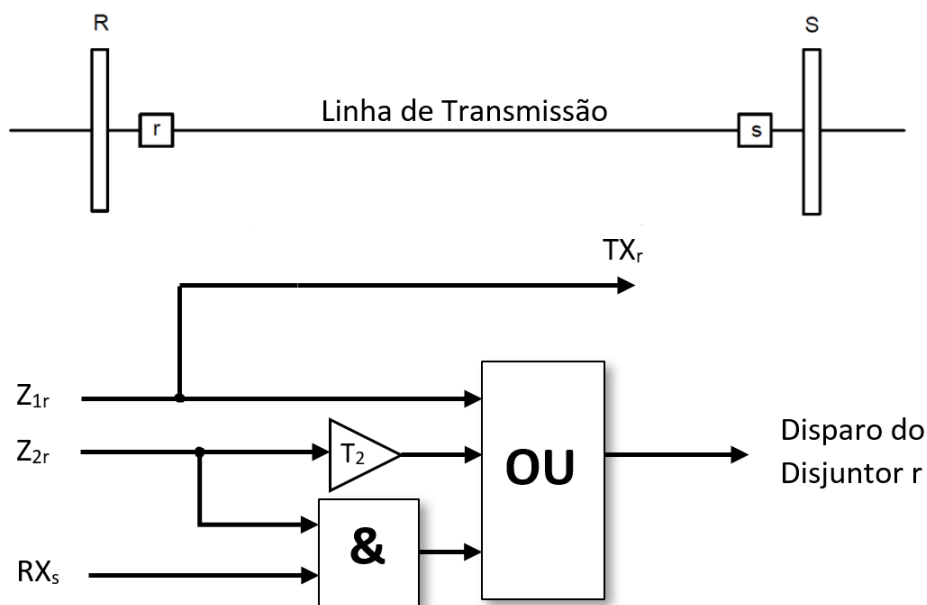


Figura 2.9: Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Subalcance.

2.5.3 ESQUEMA DE DISPARO PERMISSIVO POR SOBREALCANCE

A lógica do esquema de disparo permissivo por sobrealcance é mostrada no diagrama da Figura 2.10. Neste caso, o disparo permissivo parte da zona temporizada, ou seja, ao detectar a falta em sua segunda zona, o relé do barramento R envia um disparo ao relé remoto, caso ele também detecte a falta em sua segunda zona, ele comanda a abertura do disjuntor.

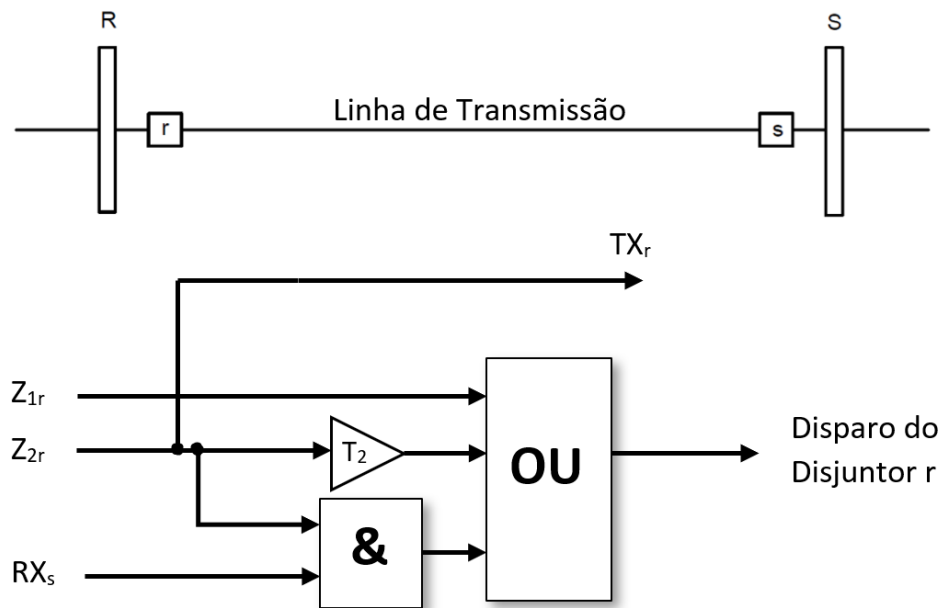


Figura 2.10: Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Sobrealcance.

Esse esquema é mais confiável que o de disparo permissivo por subalcance. Além disso, a utilização da atuação em segunda zona no esquema de comunicação é mais vantajoso no caso de ocorrência de faltas resistivas (SILVA, 2006).

2.5.4 ESQUEMA DE BLOQUEIO POR COMPARAÇÃO DIRECIONAL

O esquema de bloqueio por comparação direcional é mostrado no diagrama da Figura 2.11. Esse esquema tem por característica a aceleração que é feita da atuação da segunda zona, utilizando-se de um tempo de atraso T' , que é menor que o tempo de ajuste da segunda zona, extinguindo a faltam mais rapidamente. Para estimar T' (tempo de coordenação), deve-se levar em conta o tempo de transmissão de canal, o tempo de propagação do sinal e mais uma margem de segurança, normalmente ele é da ordem de um ciclo. Para esse esquema é necessário a utilização de pelo menos mais uma zona de proteção, que identificará a existência de faltas reversas. Dessa forma, um sinal de bloqueio é enviado caso uma falta reversa seja detectada na terceira zona, impedindo a atuação (SILVA, 2006).

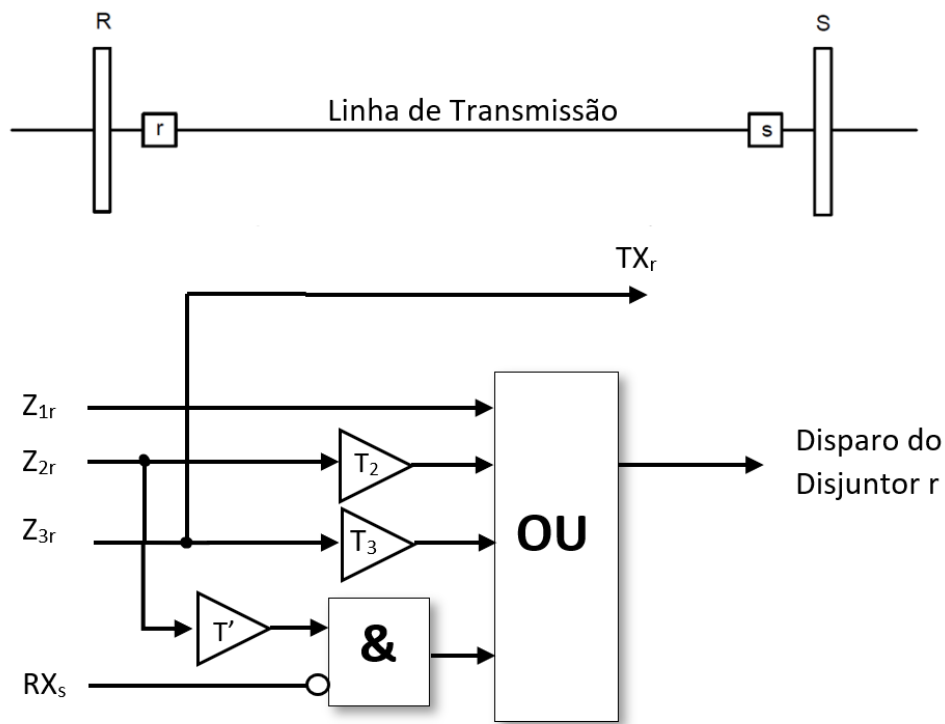


Figura 2.11: Lógica do Esquema de Bloqueio por Comparação Direcional.

2.5.5 ESQUEMA DE DESBLOQUEIO POR COMPARAÇÃO DIRECIONAL

No esquema de desbloqueio por comparação direcional, um sinal de bloqueio é enviado continuamente enquanto não é detectada nenhuma falta, impedindo a atuação do relé. Caso ocorra algum distúrbio, o sinal enviado passa a ser de desbloqueio, liberando a atuação do relé remoto, caso ele também enxergue a falta em sua segunda zona. Dessa forma é possível ter uma atuação mais rápida do sistema para extinguir a falta (SILVA, 2006).

Para utilizar esse esquema é necessário que o canal de transmissão permita uma transmissão ininterrupta do sinal. Esse esquema permite a confiabilidade de um esquema de bloqueio e a segurança de um esquema de disparo permissivo por sobrealcance.

3 FUNDAMENTOS DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

Por volta de 80 a 90% das faltas tem natureza transiente, o restante, de 10 a 20%, são faltas permanentes. Faltas transientes são normalmente causadas por descargas atmosféricas ou pelo contato temporário de corpos estranhos com a LT, de forma que a atuação da proteção quando detectado a falta é o suficiente para eliminar o curto-circuito (AREVA, 2011).

Em vista disso, poder realizar o religamento automático da LT acelerando a restauração do sistema após a extinção de uma falta, mantendo a estabilidade e prevenindo o sistema de maiores distúrbios. Além disso, o religamento da linha pode ser monopolar ou tripolar, uma vez que a causa da interrupção pode se dar em apenas uma das fases ou envolver as três fases.

3.1 TEMPO MORTO

Durante a realização de uma manobra de religamento deve-se levar em conta o tempo tempo morto, no qual a linha permanecerá desligada após a falta ser extinguida. Alguns dos principais fatores que afetam na escolha do tempo morto são (AREVA, 2011):

- Estabilidade do sistema e sincronismo;
- Parâmetros do disjuntor;
- Tempo de recuperação das características isolantes do ar;

Esses fatores são discutidos em detalhes abaixo.

3.1.1 ESTABILIDADE DO SISTEMA E SINCRONISMO

Realizar o religamento sem a perda de sincronismo após uma falta na LT requer que o tempo morto seja o mínimo admissível. Como comentado anteriormente, a escolha desse parâmetro pode ser equivalente ao tempo em que o ar leva para recuperar as suas características dielétricas após a abertura dos contatos dos disjuntores. Dessa forma, qualquer outro atraso que contribua para perturbação do sistema também deve ter a menor duração possível (AREVA, 2011).

Analisar a estabilidade transitória de um sistema sob a condição de curto-circuito, permite realizar uma boa escolha de tempo morto. Na Figura 3.1 é mostrado o sistema utilizado no trabalho, em que h, representa em porcentagem, o local da falta na linha.

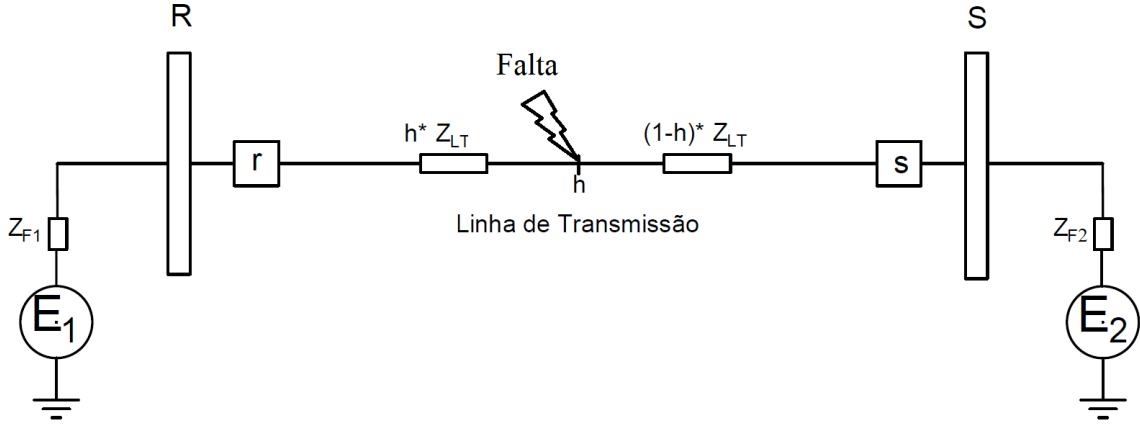


Figura 3.1: Sistema com falha mantida em $h\%$ da LT.

Para o sistema da Figura 3.1, o fluxo de potência é dado pela equação abaixo:

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (3.1)$$

Onde, P é a potência ativa transferida da fonte E_1 para E_2 , X é a reatância equivalente do sistema de transmissão, ou seja, é a soma das reatâncias das fontes com a reatância da LT (X_{LT} , X_{F1} e X_{F2}), δ é a defasagem entre as tensões das fontes E_1 e E_2 .

Nota-se pela expressão (3.1), que o ângulo δ está diretamente ligado ao fluxo de potência. Para um determinado fluxo de potência e assumindo que as tensões E_1 e E_2 são constantes, observa-se que quanto maior a reatância, maior o δ , tornando o sistema cada vez mais instável. Logo, independente da potência requerida pelo sistema, quanto menor a reatância entre os dois pontos da transferência, mais estável é o sistema (GE Power Management, 2002).

Utilizando-se do critério das áreas iguais para fazer uma análise mais aprofundada do comportamento da estabilidade do sistema, tem-se na figura 3.2 as curvas de potência-ângulo para as condições antes da falha (curva Pe, af), durante a falha (curva Pe, df) e após a falha (curva Pe, pf).

O ponto de operação inicial é o ponto a , em que o sistema está operando em suas condições normais e δ_1 é o ângulo inicial da tensão interna da máquina. Com a ocorrência da falha, a potência elétrica gerada passa instantaneamente a ser dada pelo valor correspondente ao ponto b , de modo que surge uma potência de aceleração inicial dada pelo segmento ab . Como resultado, o ângulo entre os sistemas aumenta passando pelo ponto c para o d , no qual nesse ponto a proteção atua, quebrando a conexão. O deslocamento de fase continua a aumentar a uma taxa dependente da inércia das duas fontes de energia. Para manter o sincronismo, o disjuntor deve ser religado em um tempo curto o suficiente para evitar que o ângulo de fase ultrapasse o ângulo crítico de abertura δ_{crit} . Portanto, δ_2 deve maior que δ_{crit} , de modo que a área $A2$ permaneça maior que a área $A1$, visto que essa é a condição para manutenção do sincronismo (GLOVER; OVERBYE; SARMA, 2015).

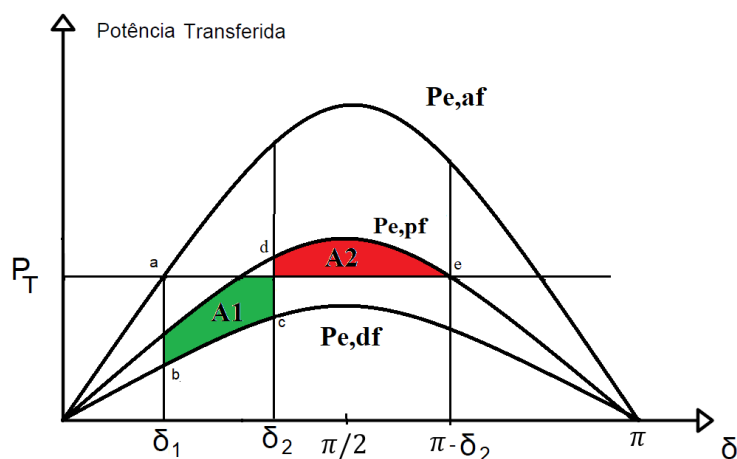


Figura 3.2: Curvas potência-ângulo supondo durante a falta.

A partir do ângulo crítico de abertura é possível determinar o tempo crítico de abertura da falta, que é o tempo máximo para atuação do religamento para que não ocorra a perda do sincronismo. Além disso, a velocidade com que o religamento deverá ser executado está diretamente ligada ao sistema de transmissão ser fraco ou forte. Se o sistema for fraco, a perda da transmissão pode rapidamente tornar o ângulo de fase maior que o ângulo crítico, impedindo que o religamento seja bem-sucedido, pois o sistema se tornou instável. Em um sistema relativamente forte, a taxa de mudança de ângulo de fase será lenta, de modo que o religamento automático possa ser aplicado com sucesso (GE Power Management, 2002).

3.1.2 PARÂMETROS DO DISJUNTOR

O atraso de tempo que o disjuntor leva para realizar uma manobra deve ser levado em consideração, pois para diminuir os efeitos dos distúrbios, os esquemas de proteção, normalmente, exigem que a abertura ou fechamento dos contatos ocorra em momentos específicos.

A abertura livre, do inglês *trip free* é uma função do circuito de controle do disjuntor que lhe permite realizar a manobra de abertura sem que tenha sido concluída a operação de fechamento (SAMPAIO, 2012). Esse mecanismo é muito importante para a situação em que a linha é religada e o curto-circuito persiste.

O tempo de fechamento é o intervalo de tempo entre a energização do mecanismo e o fechamento dos contatos. Esse tempo varia com as características construtivas do disjuntor.

3.1.3 TEMPO DE RECUPERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ISOLANTES DO AR

Para realizar uma manobra de religamento bem-sucedida, é necessário que a interrupção da falta pelo disjuntor seja seguida por um tempo de atraso suficiente para permitir que o ar ionizado se disperse. Esse tempo depende da tensão do sistema, do espaçamento dos condutores, da dura-

ção da falta, do motivo da falta, das condições climáticas. A tabela 3.1 mostra típicos valores de dispersão do ar ionizado para faltas trifásicas.

Tabela 3.1: Valores de tempo mínimo para a dispersão do ar ionizado (Modificado de (AREVA, 2011)).

Tensão da Linha (kV)	Tempo mínimo de dispersão do ar ionizado (Segundos)
66	0,2
110	0,28
132	0,3
220	0,35
275	0,38
400	0,45
525	0,55

3.2 TEMPO DE RECUPERAÇÃO

O tempo de recuperação é iniciado após a realização do religamento, esse tempo deve ser longo o suficiente para permitir que os relés de proteção detectem e operem quando a LT for religada a uma falta permanente.

A escolha da duração do tempo de recuperação varia, pois depende da frequência de ocorrência de faltas na região. Um tempo de recuperação muito longo pode ser problemático caso ocorra muitas faltas transitórias na região, isso porque após realizar o religamento, se ocorrer uma outra falta durante o período de recuperação, independente da anterior, o sistema identificará como uma reignição da falta e então irá efetuar a manobra de abertura e impedirá qualquer outra tentativa de religamento automático (AREVA, 2011).

Tempos de recuperação muito curtos também não são aconselháveis, isso porque se vários religamentos forem realizados em um curto espaço de tempo, o disjuntor estará submetido a um estresse muito alto, podendo diminuir a sua vida útil.

3.3 TENTATIVAS DE RELIGAMENTO

A quantidade de vezes que é possível realizar o religamento não é definida, mas dois fatores devem ser levados em consideração (AREVA, 2011), que são:

- Capacidade do disjuntor de realizar várias operações de abertura e fechamento em rápida sucessão e os efeitos na vida útil do equipamento. Esses fatores podem variar de acordo com o tipo de disjuntor e o nível da corrente do curto-circuito quando a falta foi extinta;
- Local em que passa a LT. Em casos em que há a ocorrência constante de faltas permanentes que poderiam ser queimadas durante 2 ou 3 disparos de religamento, extinguindo o curto, a utilização de um esquema com multidisparo pode ser justificado.

3.4 RELIGAMENTO MONOPOLAR

Um esquema com religamento monopolar automático é aquele que após detectar uma falta monofásica, irá desarmar somente os disjuntores correspondentes a fase com falta. Portanto, a função de religamento automático em um relé, possui três elementos separados, um para cada fase e cada polo do disjuntor deve ser dotado de seu próprio mecanismo de abertura e fechamento.

A operação de qualquer elemento envia um pulso de abertura e fechamento para o polo apropriado do disjuntor. Um religamento bem-sucedido resulta na reinicialização da lógica de religamento automático ao final do tempo de recuperação, deixando o relé pronto para atuar caso ocorra uma falta adicional. Se a falta persistir e o religamento não for bem-sucedido, é comum desarmar todos os três polos do disjuntor e bloquear outra tentativa de religamento, até que a causa do curto-circuito seja descoberta e resolvida.

As faltas monofásicas são as que mais ocorrem em LTs. Portanto, para o caso de um sistema de proteção capaz de somente realizar a abertura e o religamento trifásico, ao operar fará a abertura de todas as fases, independente da falta, de modo que a reatância equivalente aumentará como visto na expressão (3.1), que por sua vez, aumentará δ , e, conseqüentemente o sistema ficará mais instável. Já para o caso de um sistema de proteção seletivo, capaz de identificar o tipo da falta e realizar a abertura e religamento somente da fase com falta para o caso de um curto-circuito monofásico, ajudaria a manter a reatância baixa, aumentando a margem de estabilidade do sistema durante a execução do religamento.

A principal desvantagem do religamento monopolar automático, é o acoplamento capacitivo entre as fases sãs e a fase defeituosa que tende a manter por mais tempo o arco, o que torna necessário aumentar o intervalo de tempo morto mostrados Tabela 3.1. Este é um problema particular nas linhas de transmissão de longa distância. No entanto, quando a compensação shunt é aplicada, um reator neutro pode ser usado para equilibrar a capacitância entre fases do sistema e, assim, reduzir o tempo de arco (AREVA, 2011).

3.5 CHAVEAMENTO CONTROLADO

A abertura e o fechamento controlado de disjuntores de alta tensão oferecem uma alternativa aos métodos convencionais e vêm se tornando amplamente disponível para manobrar capacitores e reatores em derivação, transformadores e linhas de transmissão oferecendo vários benefícios técnicos e econômicos. Entre as vantagens do chaveamento controlado estão as reduções de altas correntes de energização em bancos de capacitores e transformadores, das sobretensões harmônicas temporárias, das falhas de equipamentos e da manutenção dos disjuntores (GOLDSWORTHY et al., 2008).

Uma manobra mal executada pode causar as sobretensões de manobra, que são tensões transitórias, que podem receber diferentes valores a depender do momento em que a manobra foi

realizada podendo ser capaz de quebrar a ruptura do isolamento do sistema, podendo gerar maiores distúrbios. A ocorrência de sobretensões de manobras pode-se dever a várias mudanças que podem ocorrer no sistema, por exemplo, a extinção de faltas e o religamento de linhas de transmissão (DANTAS, 2007). Portanto, os métodos de chaveamento controlado podem ser utilizados para reduzir esses efeitos.

O disjuntor tem um papel importante nessa operação, pois o instante escolhido para realizar a manobra pode reduzir drasticamente a sobretensão. Além disso, outro parâmetro que pode influenciar é o intervalo entre os instantes de fechamento do primeiro e do último pólo do disjuntor (CIGRE, 1999).

Os parâmetros da LT, como o comprimento, o grau de compensação em derivação e a presença de cargas residuais da linha também influenciam nas manobras de sobretensão. Ademais, o tipo da fonte (indutiva ou complexa), a potência de curto-circuito e a tensão de pré-manobra também afetam na amplitude das sobretensões (CIGRE, 1999).

3.5.1 ABERTURA CONTROLADA

A operação de abertura dos pólos de um disjuntor deve ser feita no instante em que a corrente que passa pelos seus contatos seja zero, de modo a reduzir os desgastes e falhas no disjuntor, além de minimizar os estresses e perturbações no sistema elétrico. A abertura controlada é utilizada para determinar o instante ótimo da abertura do disjuntor, levando em consideração o tempo de operação do disjuntor, ou seja, o intervalo de tempo entre a energização da bobina de abertura e a separação dos contatos (GOLDSWORTHY et al., 2008).

3.5.2 FECHAMENTO CONTROLADO

O fechamento controlado, refere-se ao controle do fechamento dos contatos de cada polo do disjuntor em relação ao sinal de tensão de referência. Quando é realizada uma abertura controlada, ao extinguir o arco elétrico surge uma tensão entre os terminais do disjuntor. Essa tensão é o sinal de referência utilizado para determinar os instantes ótimos para o fechamento dos contatos.

Efetuar a abertura da linha no instante em que a corrente é nula resulta em uma tensão máxima. Deste modo, a LT passa a ter uma “carga residual” distinta para cada uma das fases devido ao acoplamento eletromagnético entre estas, podendo chegar, na primeira fase a ser interrompida, uma tensão de até 1,3 p.u. (D’AJUZ et al., 1987). Para LT sem compensação, a carga residual pode permanecer na linha por um período longo, da ordem de 2 a 5 minutos, a depender dos equipamentos conectados a linha, o que para operações de religamento automático pode não ser interessante manter a LT desligada por tanto tempo. Há a possibilidade de utilizar equipamentos capazes de descarregar a LT ou então utilizar um método de fechamento controlado.

Ao realizar o religamento, não tomando conta do instante no qual é feito, o fechamento dos contatos do disjuntor pode ocorrer quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da

linha, podendo gerar sobretensões de até 4.0 p.u. (DANTAS, 2007).

A Figura 3.3 apresenta a sequência de tempos a serem considerados para um fechamento controlado de um disjuntor de uma carga indutiva, onde o instante ótimo de fechamento se dá no pico (GOLDSWORTHY et al., 2008).

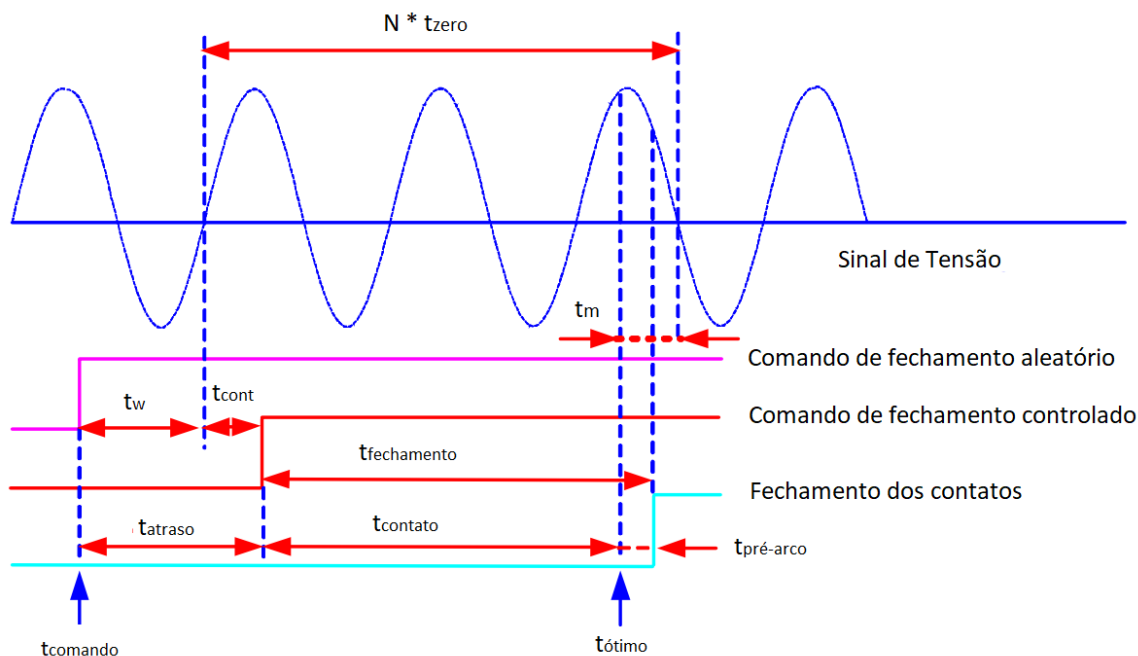


Figura 3.3: Temporização do fechamento controlado. (Modificado de (GOLDSWORTHY et al., 2008))

Pela figura 3.3, um comando é emitido no instante $t_{comando}$ para dar início ao processo de fechamento. Assim como no comando de abertura, o $t_{comando}$ é atrasado por um intervalo de tempo t_{atraso} , que é a soma do intervalo para sincronização com o instante ótimo pré-determinado, t_{cont} , com o intervalo de processamento interno do sistema de controle do chaveamento para determinação dos instantes ótimos, t_w . O intervalo de tempo t_m indica o momento em que ocorre o cruzamento no zero, a partir do final do $t_{contato}$.

O $t_{fechamento}$, é o intervalo de tempo entre a energização da bobina do disjuntor e o instante de fechamento mecânico dos seus contatos. O intervalo de tempo entre o instante em que o pré-arco é estabelecido e o instante em que ocorre o acoplamento físico dos contatos do disjuntor é denominado de tempo de pré-arco ($t_{pre-arco}$). O $t_{contato}$, representa o tempo para o fechamento dos contatos elétricos do disjuntor, ou seja, é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento e o instante em que a corrente começa a fluir. O t_{otimo} representa o instante em que os contatos se fecham eletricamente.

$$t_{cont} = Nt_{zero} - t_m - t_{contato} \quad (3.2)$$

3.5.3 MÉTODO DE CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LTs

O método descrito abaixo propõe a determinação de instantes ótimos para realizar o acoplamento dos contatos de cada polo do disjuntor (DANTAS, 2007). Dessa forma, as chances de um religamento automático ser bem-sucedido aumentam, pois o efeito das sobretensões causadas por essas manobras diminuem.

A seguir são descritas as estratégias de religamento tratadas no método, para os casos de linhas de transmissão não compensadas e com compensação em derivação.

3.5.3.1 ESTRATÉGIA DE FECHAMENTO CONTROLADO DE LTs SEM COMPENSAÇÃO

Idealmente, no caso de uma LT sem compensação apresenta um carregamento residual constante com a tensão da linha em torno de 1 p.u., desde que não tenha condutância para a terra, como pode ser visto na Figura 3.4. Na realidade, a condutância da LT faz com que o carregamento caia exponencialmente, mas com uma constante de tempo relativamente alta, devido à baixa condutância da linha para a terra. Assim, mesmo após o tempo morto, o carga residual ainda apresenta valores significativos (DANTAS, 2007).

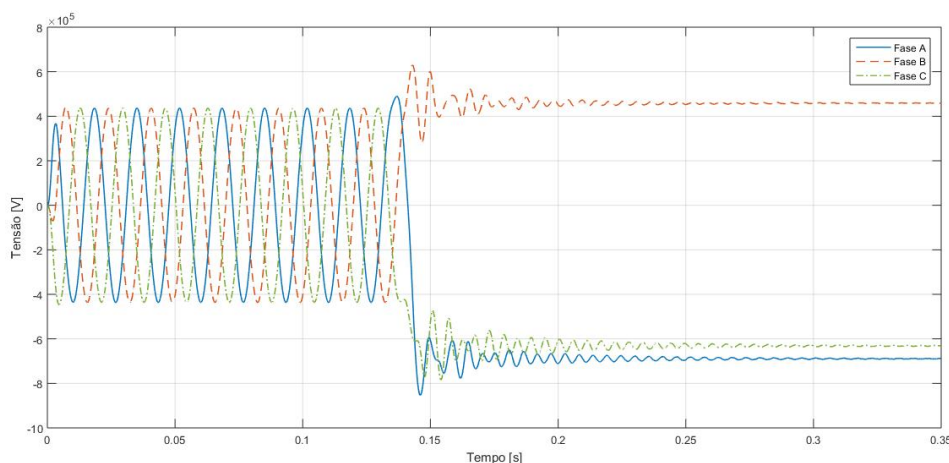


Figura 3.4: Sinal de tensão de uma LT sem compensação antes e após o disparo dos disjuntores.

No entanto, para esse caso, o procedimento para realizar o religamento consiste em analisar as tensões do lado da fonte e da LT separadamente, e assim, determinar o instante ótimo. Para isso, é necessário estimar o sinal da fonte, pois assim é possível reconstruir o sinal em instantes futuros. Após a abertura do disjuntor, os sinais de tensão da LT são praticamente constantes, logo, é necessário saber somente a polaridade da tensão. Portanto, o instante ótimo é determinado a partir da polaridade, pois ele pode se situar no pico positivo ou negativo do sinal de tensão do lado da fonte (DANTAS, 2007).

Para estimar o sinal da fonte, obtém-se dois zeros consecutivos para cada fase. Dessa forma, é possível obter a frequência do sinal, visto que subtração dos instantes entre os dois zeros é a

metade do período. Além disso, o pico do sinal é dado determinada detectando-se o valor de pico entre os dois zeros.

3.5.3.2 ESTRATÉGIA DE FECHAMENTO CONTROLADO DE LTs COM COMPENSAÇÃO

No caso de uma LT com compensação em derivação, ao realizar a abertura dos disjuntores, a carga residual passa a ter um comportamento oscilatório, com frequência menor do que a nominal do sistema. Isso é devido ao circuito gerado entre a capacitância e a indutância dos reatores (DANTAS, 2007). Essa frequência de oscilação é dada por:

$$f_l = f_{nom} \sqrt{k} \quad (3.3)$$

Onde k é dado por:

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (3.4)$$

Em que f_{nom} é a frequência nominal do sistema, k é o grau de compensação da linha, Q_l é potência reativa capacitiva da linha de transmissão e Q_r é a potência do reator.

Dessa forma, nos terminais do disjuntor aparece duas tensões com frequências e fases diferentes, produzindo um efeito chamando de batimento, no qual ocorre um interferência construtiva e destrutiva das duas ondas quando ficam em fase ou em oposição de fase. Para o caso de frequências muito próximas o sinal possui um formato mais definido, com um batimento mais lento, zerando para os casos em que as frequências e fases são iguais (HALLIDAY; WALKER; RESNICK, 2009).

Para entender melhor o efeito do batimento, considera-se dois sinais de frequências e fases diferentes. Na Figura 3.5(a) é mostrado esses dois sinais.

$$\begin{aligned} g(t) &= A(\cos \omega_1 t + \theta_1) \\ y(t) &= A(\cos \omega_2 t + \theta_2) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Fazendo a subtração dos dois sinais, obtém-se a expressão do sinal do batimento, mostrada em (3.6).

$$h(t) = g(t) - y(t) \quad (3.6)$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \quad (3.7)$$

Aplicando a propriedade trigonométrica (3.7) na expressão (3.6), tem-se que:

$$h(t) = -2A \cos \frac{1}{2}[(\omega_1 + \omega_2)t + (\theta_1 + \theta_2)] \cos \frac{1}{2}[(\omega_1 - \omega_2)t - (\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.8)$$

Fazendo,

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \\ \omega' &= \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \\ \theta' &= \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Substituindo as expressões (3.9) e (3.10) em (3.8), tem-se que:

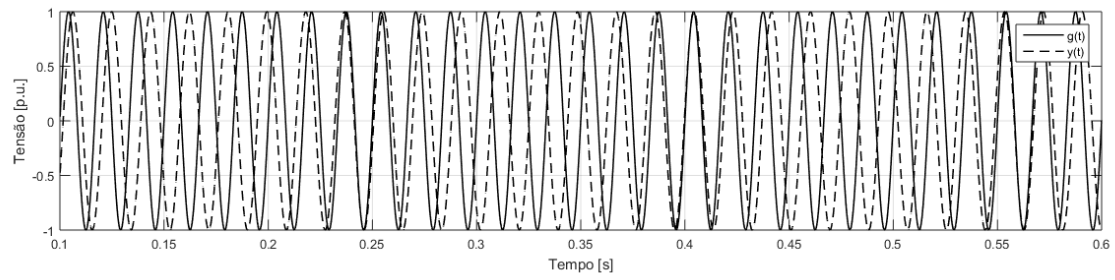
$$h(t) = -[2A \cos (\omega't + \theta')] \cos (\omega t + \theta) \quad (3.11)$$

Em que, o termo entre colchetes é o termo que define o batimento do sinal, variando a sua amplitude. Como definido em (HALLIDAY; WALKER; RESNICK, 2009), a frequência do batimento é dada por:

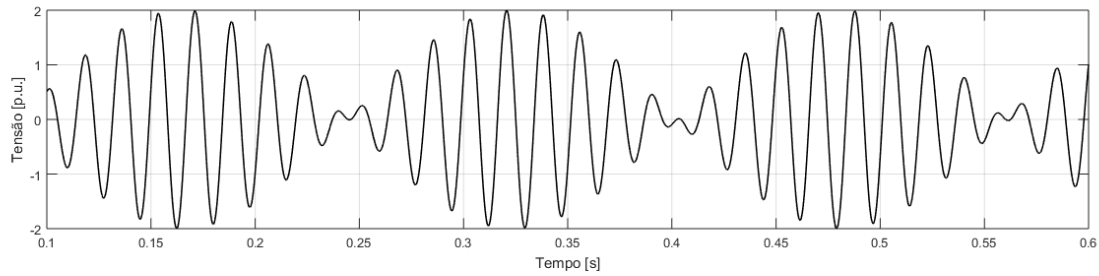
$$f_{bat} = |f_1 - f_2| \quad (3.12)$$

Onde, $\omega_1 = 2\pi f_1$ e $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Na Figura 3.5(b) é mostrado o efeito do batimento para uma LT com compensação de 80%, o que dá uma frequência de batimento de aproximadamente 6,34 Hz.



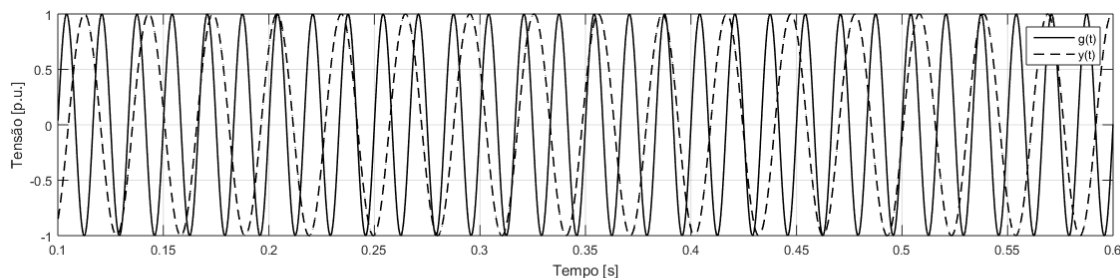
(a)



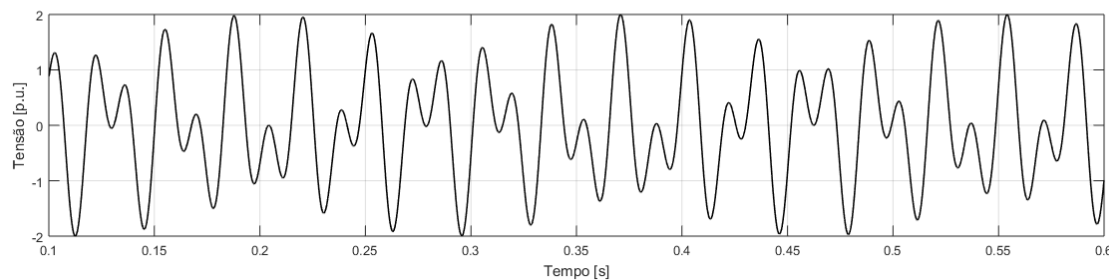
(b)

Figura 3.5: Batimento em uma LT com 80% de grau de compensação (a) Tensões no lado da barra, $g(t)$, e da linha, $y(t)$; (b) Tensão nos terminais do disjuntor.

Na Figura 3.6 é mostrado o mesmo caso, mas para uma compensação de 20% na linha e frequência de batimento de 27,13 Hz.



(a)



(b)

Figura 3.6: Batimento em uma LT com 30% de grau de compensação (a) Tensões no lado da barra, $g(t)$, e da linha, $y(t)$; (b) Tensão nos terminais do disjuntor.

Para esses casos em que a linha é compensada, o instante ótimo para o religamento ocorre

quando a onda está no momento de menor batimento da onda (DANTAS, 2007). Como visto na expressão (3.8), estimar o sinal de referência para determinar o instante ótimo para o religamento, pode ser uma tarefa complicada.

O método descrito em (DANTAS, 2007) consiste em analisar as tensões do lado da fonte e da LT separadamente. Quando separados, esses sinais tem um comportamento senoidal, logo, estimar esses sinais é mais simples do que o sinal de referência, principalmente para os casos em que o grau de compensação é baixo. Para obter a forma dos dois sinais, o mesmo procedimento descrito para uma linha sem compensação pode ser aplicado, de modo que, se torna possível determinar os instantes ótimos no futuro.

O método destaca duas condições que o instante ótimo deve atender para definir se região em questão é a de menor batimento do sinal de referência, que são:

- Os sinais do barramento e da linha devem se cruzar em um intervalo de tempo definido;
- A polaridade da derivada desses sinais deve ser a mesma.

Na Figura 3.5 é possível perceber que nos instantes 0,25 s, 0,41 s e 0,57 essas condições são atendidas, resultando no instante de menor batimento. O mesmo pode ser observado na Figura 3.6

3.5.3.3 ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO

O efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases nas linhas de transmissão pode ocasionar desvios significativos nos sinais de tensão utilizados para determinação dos instantes ótimos, aumentando a cada polo do disjuntor conectado, resultando em perda de eficiência na redução de sobretensões por meio do chaveamento controlado.

Para minimizar este efeito, os instantes ótimos para cada fase são determinados em conjunto e não individualmente. Ou seja, ao invés de considerar apenas o conjunto de instantes ótimos disponíveis mais próximos do comando para operação de chaveamento do disjuntor, o conjunto de instantes ótimos escolhidos para o chaveamento são aqueles cujo intervalo entre o instante de fechamento da primeira fase e o instante de fechamento da última fase é o menor possível (DANTAS, 2007).

4 MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO NO ATP

O software ATP (*Alternative Transiente Program*) é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica, que aplica o método baseado na utilização da matriz de admitância de barras. O ATPDraw é uma evolução, que atua como núcleo central de onde o usuário pode controlar o processamento de qualquer outro programa, inclusive o ATP propriamente dito.

Em complemento às funções do ATP e do ATPDraw, tem-se ainda uma série de programas que realizam análises gráficas das simulações efetuadas. Os programas que fazem esse tipo de análise são, o PCPLOT, o TPLOT e o PLOTXY. Dos programas citados, o PLOTXY é considerado a alternativa mais aceita pelos usuários devido à simplicidade de instalação e utilização.

Um dos motivos para se utilizar um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos é que apesar dos sistemas elétricos operarem em regime permanente a maior parte do tempo, eles devem ser projetados para suportar as piores solicitações a que podem ser submetidos. Estas solicitações extremas são normalmente produzidas durante situações transitórias dos sistemas. Conseqüentemente, o projeto de um sistema de potência é determinado mais pelas condições transitórias do que pelo seu comportamento em regime permanente (D'AJUZ et al., 1987).

No presente projeto de pesquisa, utilizou-se o software ATP para avaliar o desempenho da proteção de distância com o religamento automático, aplicando um método de chaveamento controlado para a diminuição das sobretensões resultantes das manobras.

4.1 MODELAGEM DO RELÉ DE DISTÂNCIA COM O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO NO ATP

Na Figura 4.1, apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do esquema utilizado na simulação de relés de distância no ATP.

Pelo diagrama, os equipamentos de medição recebem os sinais de tensão e corrente das fases do sistema. Os sinais obtidos pelos equipamentos são tratados, realizando uma filtragem analógica, a estimação dos fasores e por fim o cálculo das impedâncias.

A implementação de uma lógica no relé que relaciona o comparador de fase com o algoritmo de seleção de fases, permite a detecção da falta e por sua vez, a classificação. Com esses dados, é enviado um sinal de trip para os disjuntores, sendo ele monofásico para faltas monofásicas e trifásico para todos os outros tipos de falta.

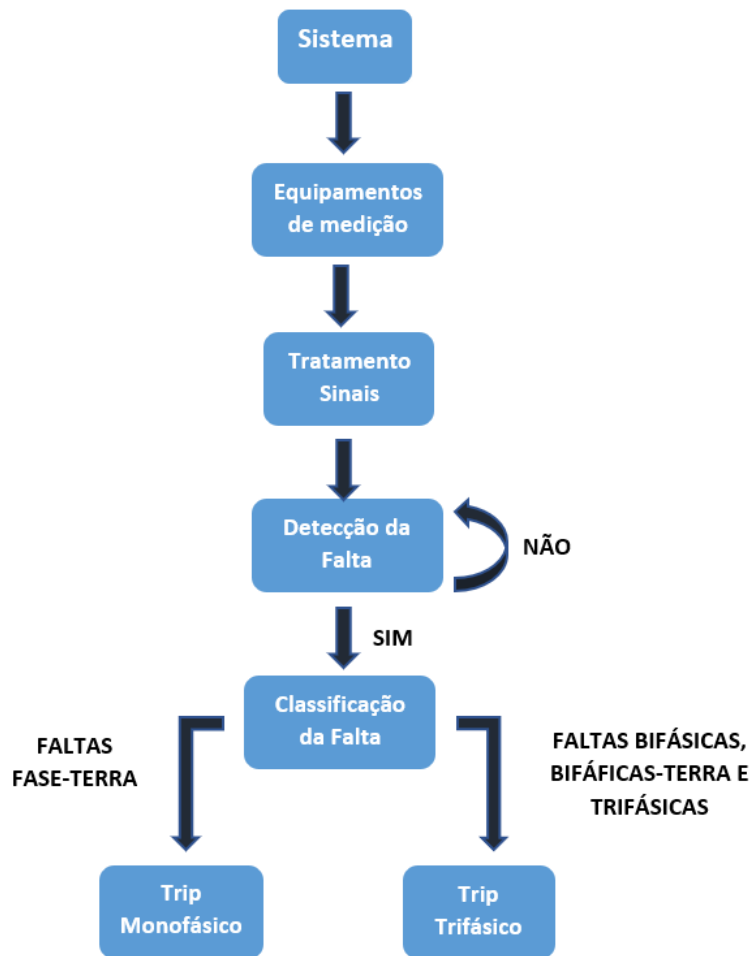


Figura 4.1: Diagrama de blocos do processo da Proteção de Distância

Na Figura 4.2, apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do esquema utilizado na simulação do religamento automático.

Nesse caso, os equipamentos de medição devem receber os sinais da tensão de linha e de barra. O tratamento dos sinais consiste em somente uma filtragem, para que possa ser realizada a estimação dos sinais de referência. Também é recebido os estados das chaves dos disjuntores, para que o sistema saiba se o religamento é monopolar ou tripolar. Desta forma, se já estiver passado o tempo morto, o sistema realiza o religamento no próximo instante ótimo, para diminuir as sobretensões. Por fim, é realizado o religamento a depender do tipo de falta que ocorreu no sistema.



Figura 4.2: Diagrama de blocos do processo do Religamento Automático

Na Figura 4.3, apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do esquema utilizado do relé de distância com o religamento automático, simulado no ATP. A seguir, são descritos cada um dos módulos utilizados nessa simulação.

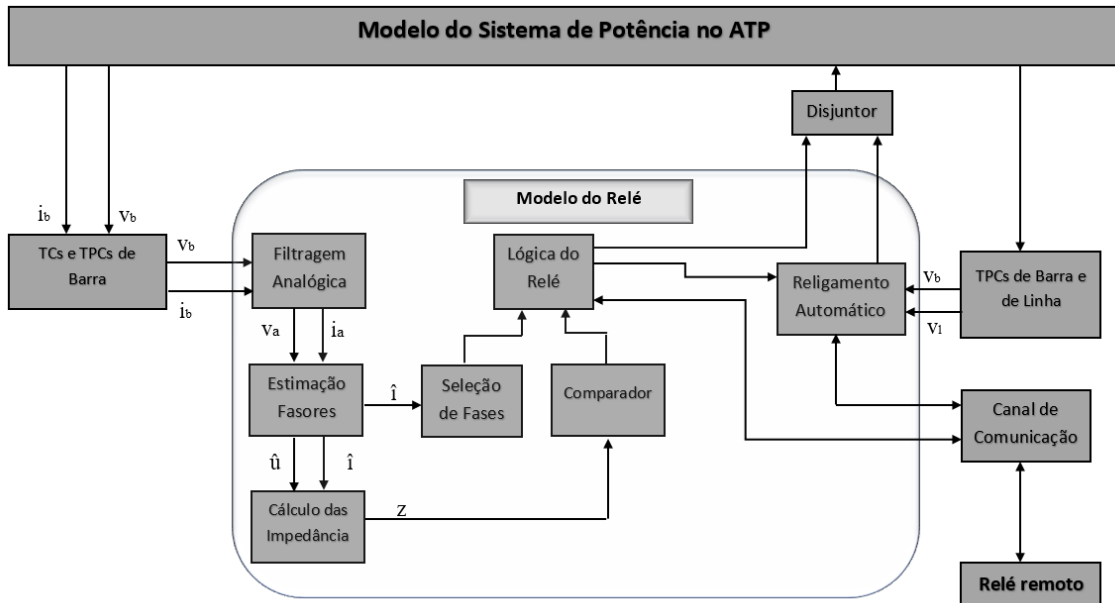


Figura 4.3: Diagrama de blocos do Modelo de Relé de Distância, com o religimento.

4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

O transformador de corrente (TC) transforma a corrente para níveis em que são utilizados no relé. O TC de potência modelado no ATP é do tipo C800 com relação de transformação de 2000-5A, permitindo uma carga máxima no secundário de até 8Ω , de modo a não ultrapassar a máxima tensão dada pela sua classe de exatidão.

O transformador de corrente (TC) é responsável por isolar os equipamentos de medição, controle e relés do circuito de alta tensão, fornecendo em seu secundário uma corrente proporcional à do primário com dimensões compatíveis aos níveis utilizados nos circuitos digitais do relé (KINDERMANN, 2006).

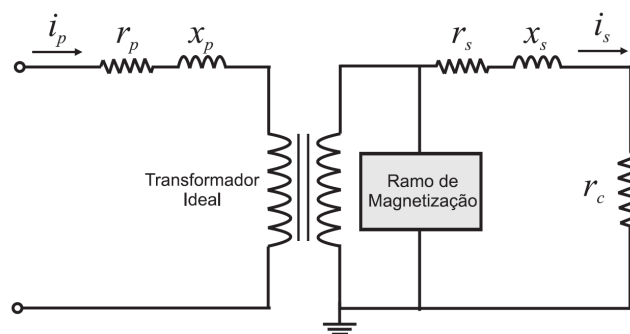


Figura 4.4: Circuito equivalente do TC (SILVA, 2006)

Da mesma forma, o transformador de potencial capacitivo (TPC) é responsável por adequar o

sinal de tensão. O TPC de potência modelado é para sistemas de até 500 kV.

A figura 4.5 apresenta o circuito equivalente do TPC modelado no ATP.

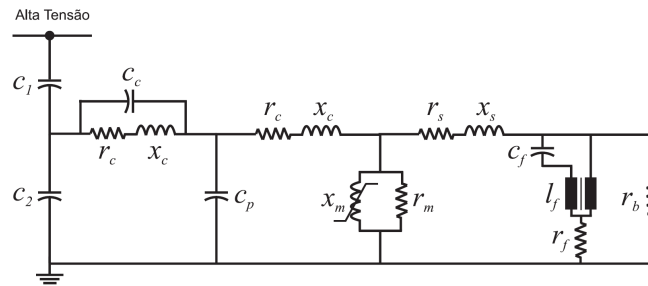


Figura 4.5: Circuito equivalente do TPC (SILVA, 2006)

Os modelos desses equipamentos no ATP são explicados em detalhe em (SILVA, 2006).

4.3 FILTRAGEM DOS SINAIS

Os sinais de tensão e corrente obtidos dos secundários dos TCs e TPCs devem ser passar por um filtro passa-baixa eliminando os transitórios de alta frequência, evitando-se a ocorrência do efeito de sobreposição de espectro (efeito de aliasing) durante o processo de amostragem dos sinais. A filtragem foi realizada por um filtro do tipo Butterworth de terceira ordem com uma frequência de corte de 187,89 Hz. Esse filtro elimina o efeito do aliasing e apresenta ganho unitário para a frequência fundamental, não causando mudanças na magnitude dos sinais filtrados, apenas provocando um atraso no sinal filtrado (SILVA, 2006).

A função de transferência desse filtro é dada por (4.1) e a sua resposta em frequência pode ser observada na figura 4.6(a).

$$H(s) = \frac{1,645 \cdot 10^9}{s^3 + 2361s^2 + 2,787 \cdot 10^6s + 1,645 \cdot 10^9} \quad (4.1)$$

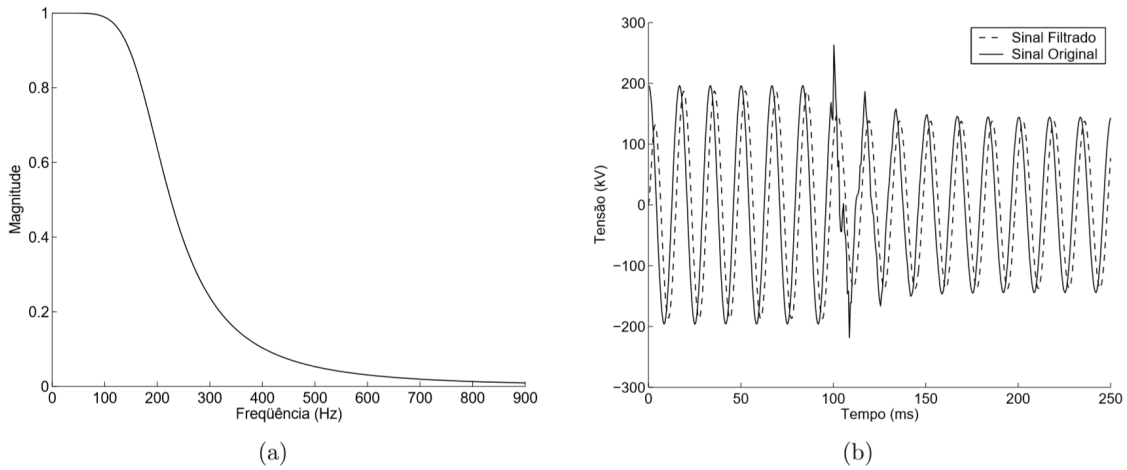


Figura 4.6: Filtro Butterworth: (a) Resposta em frequência; (b) Exemplo de filtragem de um sinal de tensão (SILVA, 2006).

Na figura 4.6(b) é mostrado um sinal de tensão antes e após passar pelo filtro. Percebe-se que o sinal sofre um atraso e uma pequena atenuação após passar pelo filtro.

4.4 ESTIMAÇÃO DE FASORES

O papel deste módulo é estimar os parâmetros dos fasores de tensão e corrente do sinal após ter sido feita a filtragem analógica. Para realizar isso, foi utilizado um algoritmo de estimação de fasores descrito em (HART; SMITH, 2000), que realiza um filtro que estima a magnitude e a fase dos sinais através do método do cosseno modificado.

Primeiramente, para realizar esse filtro é feito janelas de dados com 17 amostras do sinal obtido da filtragem analógica. A partir destas amostras calcula-se a componente cosseno do fasor referente à este conjunto de amostras:

$$C_1 = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \cos\left(2k \frac{\pi}{N}\right) \quad (4.2)$$

Onde N é o número de amostras por ciclo, $2 \frac{\pi}{N}$ é a defasagem entre uma amostra e outra. Além disso, a relação da componente cosseno não-ortogonal é dada por:

$$C_2 = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N s_k \cos\left[\left(k - 1\right) \frac{2\pi}{N}\right] \quad (4.3)$$

O fasor correspondente à amostra consiste em uma combinação linear das componentes C_1 e C_2 . A sua forma retangular é dada por:

$$\bar{S} = A + jB \quad (4.4)$$

em que,

$$A = C_1$$

$$B = \frac{C_1 \cos \delta - C_2}{\sin \theta} \quad (4.5)$$

Por fim, a magnitude e a fase do fasor podem ser calculadas, respectivamente, como:

$$|\bar{S}| = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (4.6)$$

A Figura 4.7 mostra, respectivamente, a magnitude e a fase do sinal de um corrente estimado pelo método de cosseno modificado, para uma situação antes de uma falta e durante a falta. Na figura, é possível perceber que o filtro cosseno modificado é praticamente imune a presença da componente DC nos sinais, componente essa, que aparece no sinal das fases envolvidas em uma falta.

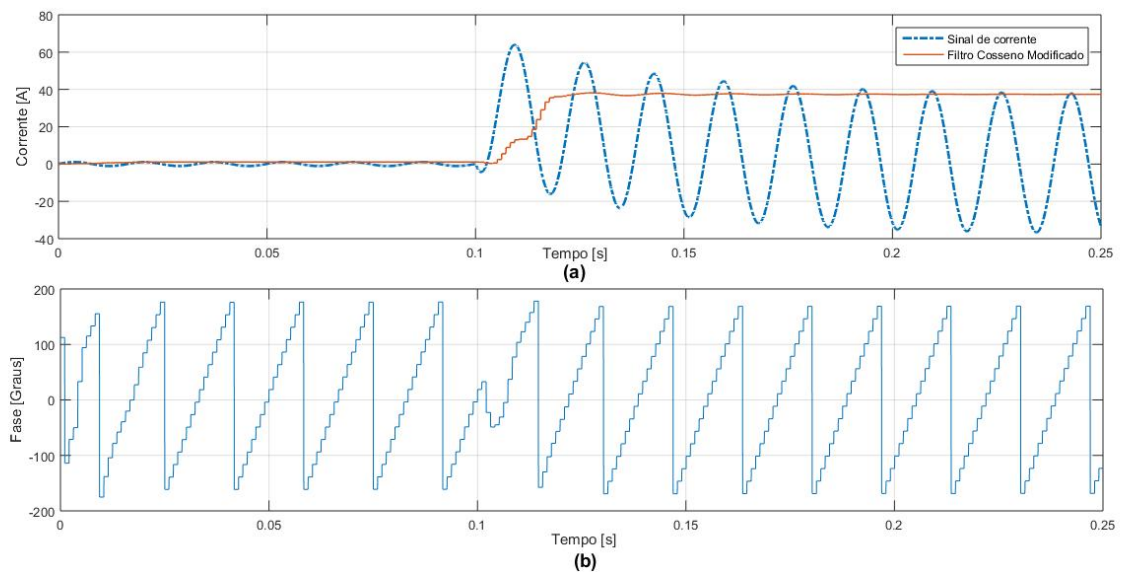


Figura 4.7: Resposta do filtro cosseno modificado: (a) Magnitude; (b) Fase.

4.5 CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS

Este módulo é responsável por calcular as seis unidades de impedância, sendo 3 para a terra (Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT}) e 3 de fase-fase (Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA}). Para obter essas impedâncias, foi efetuada a separação entre parte real e imaginária, pois os cálculos se tornam mais complexos no ATP se os valores estiverem em sua forma polar.

Inicialmente, é realizado o cálculo do fator de compensação (K_0), que pode ser dado por:

$$\begin{aligned} re(K_0) &= \frac{R_0R_1 + X_0X_1 - R_1^2 - X_1^2}{3(R_1^2 + X_1^2)} \\ im(K_0) &= \frac{X_0R_1 - R_0X_1}{3(R_1^2 + X_1^2)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

em que, R_0 , R_1 , X_0 e X_1 são os parâmetros resistivos e indutivos da LT.

A corrente residual pode ser obtida pela expressão (4.7):

$$\begin{aligned} re(\bar{I}_N) &= re(\bar{I}_a) + re(\bar{I}_b) + re(\bar{I}_c) \\ im(\bar{I}_N) &= im(\bar{I}_a) + im(\bar{I}_b) + im(\bar{I}_c) \end{aligned} \quad (4.8)$$

De modo que, a corrente residual compensada é da seguinte forma:

$$\begin{aligned} re(\bar{I}_{res}) &= re(K_0)re(\bar{I}_N) - im(K_0)im(\bar{I}_N) \\ im(\bar{I}_{res}) &= re(K_0)im(\bar{I}_N) - im(K_0)re(\bar{I}_N) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Pela soma da corrente da respectiva fase com a corrente residual compensada, obtido em (4.8), obtém-se a corrente compensada é dada por:

$$\begin{aligned} re(\bar{I}_{comp}) &= re(\bar{I}) + re(\bar{I}_{res}) \\ im(\bar{I}_{comp}) &= im(\bar{I}) + im(\bar{I}_{res}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Por fim, pelas expressões (2.22) e (2.17) é possível obter as expressões (4.11) e (4.12), que são, respectivamente, a forma retangular das unidades de terra e fase, onde m e n são as fases. As expressões para as outras unidades são análogas as apresentadas abaixo.

$$\begin{aligned}
re(Z_m) &= \frac{re(\bar{V}_m)re(\bar{I}_{m,comp}) + im(\bar{V}_m)im(\bar{I}_{m,comp})}{re(\bar{I}_{m,comp})^2 + im(\bar{I}_{m,comp})^2} \\
im(Z_m) &= \frac{im(\bar{V}_m)re(\bar{I}_{m,comp}) - re(\bar{V}_m)im(\bar{I}_{m,comp})}{re(\bar{I}_{m,comp})^2 + im(\bar{I}_{m,comp})^2}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned}
re(Z_{mn}) &= \frac{re(\bar{V}_{mn})re(\bar{I}_{mn}) + im(\bar{V}_{mn})im(\bar{I}_{mn})}{re(\bar{I}_{mn})^2 + im(\bar{I}_{mn})^2} \\
im(Z_{mn}) &= \frac{im(\bar{V}_{mn})re(\bar{I}_{mn}) - re(\bar{V}_{mn})im(\bar{I}_{mn})}{re(\bar{I}_{mn})^2 + im(\bar{I}_{mn})^2}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

4.6 COMPARADOR

O comparador implementado tem a característica mho autopolarizada com um comparador de fase, conforme descrito na Seção 2.6.2. As expressões dos sinais S_1 e S_2 são mostradas abaixo.

$$\begin{aligned}
re(S_1) &= -re(Z_m) + re(Z_A) \\
im(S_1) &= -im(Z_m) + im(Z_A)
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
re(S_2) &= re(Z_m) \\
im(S_2) &= im(Z_m)
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Para o caso de faltas próximas a origem, ou seja, quando a tensão medida pelo relé é inferior a 20% da tensão nominal, foi utilizada a polarização por memória de tensão. Portanto a expressão do sinal S_2 , passa ser dada por:

$$\begin{aligned}
re(S_2) &= re(\bar{Z}_{m,mem}) = (1 - k_p)re(\bar{Z}_m) + k_p re(\bar{Z}_{m,pre}) \\
im(S_2) &= im(\bar{Z}_{m,mem}) = (1 - k_p)im(\bar{Z}_m) + k_p im(\bar{Z}_{m,pre})
\end{aligned} \tag{4.15}$$

4.7 SELEÇÃO DE FASE

O módulo de seleção de fase é responsável por definir o tipo da falta, indicando em quais fases estão ocorrendo a falta e se há o envolvimento com a terra. Conforme descrito na Seção 2.7, o

método de classificação de faltas faz uso das componentes simétricas de corrente. Para obter as componentes, os cálculos das partes reais e imaginárias foram feitos separadamente.

A componente de sequência positiva é calculada por meio das expressões:

$$\begin{aligned}
re(\bar{I}_{1a}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_c) \\
re(\bar{I}_{1b}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_a) \\
re(\bar{I}_{1c}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_b) \\
im(\bar{I}_{1a}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_a) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_c) \\
im(\bar{I}_{1b}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_b) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_a) \\
im(\bar{I}_{1c}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_c) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_b)
\end{aligned} \tag{4.16}$$

A componente de sequência negativa é calculada por meio das expressões:

$$\begin{aligned}
re(\bar{I}_{2a}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_c) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_b) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_b) \\
re(\bar{I}_{2b}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_a) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_c) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_c) \\
re(\bar{I}_{2c}) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_b) - \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}re(\bar{I}_a) + \frac{\sqrt{3}}{6}im(\bar{I}_a) \\
im(\bar{I}_{2a}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_a) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_b) \\
im(\bar{I}_{2b}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_b) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_c) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_c) \\
im(\bar{I}_{2c}) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_c) + \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_b) - \frac{1}{6}im(\bar{I}_a) - \frac{\sqrt{3}}{6}re(\bar{I}_a)
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Por fim, a componente de sequência zero é calculada por meio das expressões:

$$\begin{aligned}
re(\bar{I}_0) &= \frac{1}{3}re(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \\
im(\bar{I}_0) &= \frac{1}{3}im(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c)
\end{aligned} \tag{4.18}$$

4.8 LÓGICA DO RELÉ

Esse módulo analisa os sinais de saída da seleção de fase, do comparador de fase e da teleproteção e implementa uma lógica de atuação.

O comando de disparo pode ser interno, ou seja, entre a lógica do comparador e da seleção de fase do relé, ou externo, por um relé remoto. A lógica do esquema utilizado é o de disparo permissivo por sobrealcance, descrito na Seção 2.5, com duas zonas de proteção. Além disso, no esquema é feita a inserção do módulo de seleção de fases, no qual, o comando de disparo interno do relé é dado somente se o comparador e a seleção de fase detectar a mesma falta. Na Figura 4.8 é mostrado o esquema de disparo com as modificações.

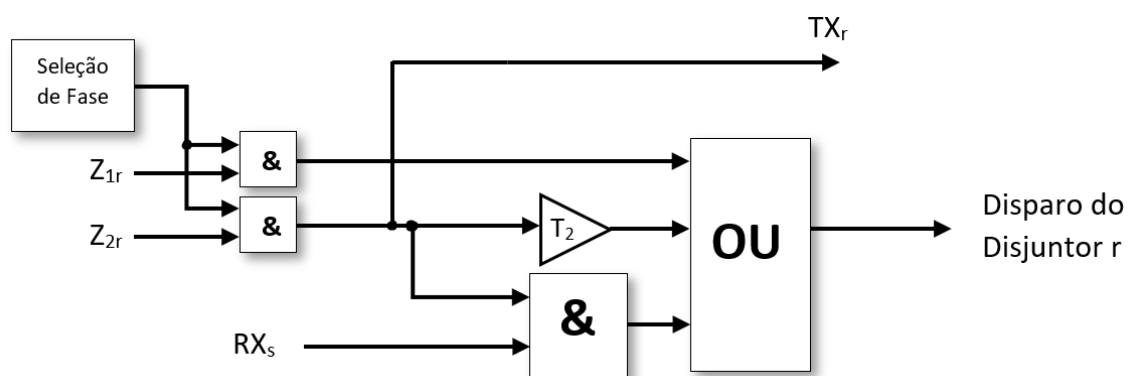


Figura 4.8: Lógica do Esquema de Disparo Permissivo por Sobrealcance com Seleção de Fase.

Para esse estudo, os disparos foram feitos individualmente para cada polo do disjuntor, dessa forma, para os casos em que falta fosse monofásica, somente a fase com falta receberia o comando de disparo. Para as faltas bifásicas e trifásicas o comando de disparo era enviado para as três fases.

4.9 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

Esse módulo consiste em definir instantes ótimos para a realização do religamento automático para os casos de uma LT não compensada e compensada. Para isso, é feita uma estimação dos sinais que serão utilizados para fazer o cálculo dos instantes. O método apresentado em (DANTAS, 2007) realiza esse processo, e ele será discutido abaixo.

4.9.1 ESTIMAÇÃO DOS SINAIS

O processo de estimação dos sinais consiste em obter a amplitude, o período e a fase do sinal de referência para reconstruí-lo para instantes futuros. O tempo de manobra do disjuntor também deve ser considerado na determinação do primeiro instante futuro (DANTAS, 2007).

Na Figura 4.9, são mostrados os instantes de interesse para a reconstrução do sinal em instan-

tes futuros. Os instantes em que o sinal passa pelo zero (t_{zero1} e t_{zero2}) são salvos até que o um comando no instante $t_{comando}$ ocorra. Portanto, considerando A como a amplitude do sinal e T_{sr} como meio período do mesmo, é possível reconstruir o sinal de referência (s_{ref}), de forma que ele é estimado após o intervalo $T_{operacao}$, que é o intervalo de tempo que o disjuntor leva para realizar a manobra. A expressão para o s_{ref} é dado por:

$$s_{ref}(t) = A \sin(\omega_{sr}(t + \Delta T)) \quad (4.19)$$

Onde,

$$\omega_{sr} = \frac{\pi}{T_{sr}} \quad (4.20)$$

e

$$\Delta T = T_{operacao} + (t_{comando} - t_{zero2}) \quad (4.21)$$

Utilizando as expressões acima, é possível estimar o primeiro instante futuro ($t_{estimado}$), ilustrado na Figura 4.9, como sendo o instante após $T_{operacao}$. Portanto, considerando que o instante ótimo para a efetivação da manobra de chaveamento seja na passagem por zero do sinal, o primeiro instante ótimo disponível para o chaveamento ocorre em t_{otimo1} (DANTAS, 2007).

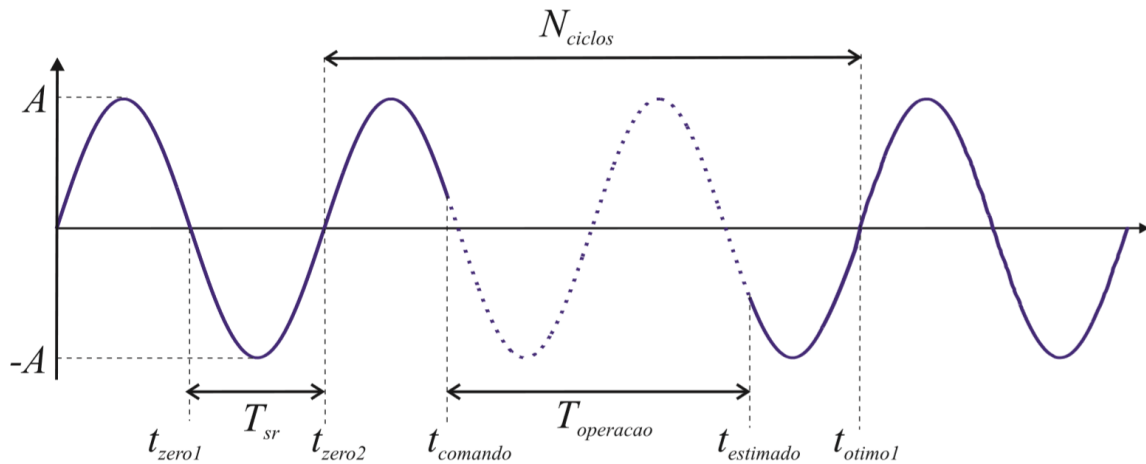


Figura 4.9: Estimação dos sinais de referência em instantes futuros (DANTAS, 2007)

4.9.2 DETERMINAÇÃO DOS INSTANTES ÓTIMOS

A partir dos sinais estimados é possível encontrar expressões que determinem todos os instantes ótimos. Dessa forma, a escolha do t_{otimo} passa a ser dada pelo tempo morto mínimo da LT.

De acordo com a Figura 4.9 e a Equação (4.21), tem-se que o número de ciclos (relativos a

meio período T_{sr} do sinal senoidal do lado da fonte) entre o último instante de passagem por zero do sinal e o primeiro instante ótimo a ser determinado é dado por:

$$N_{ciclos} = \text{int}_{sup}\left(\frac{\Delta T}{2T_{sr}}\right) \quad (4.22)$$

Portanto, a manobra de religamento de uma linha de transmissão sem compensação tem instantes ótimos nos picos positivos ou negativos do sinal de tensão do lado da fonte, a depender da polaridade da carga residual (DANTAS, 2007). Caso esta polaridade seja positiva, o instante ótimo procurado será dado por:

$$t_{otimo} = t_{zero2} + \left(N_{ciclos} + \frac{1}{4}\right)(2T_{sr}) \quad (4.23)$$

Caso contrário, ou seja, caso a polaridade da carga seja negativa, tem-se que o instante ótimo será:

$$t_{otimo} = t_{zero2} + \left(N_{ciclos} + \frac{3}{4}\right)(2T_{sr}) \quad (4.24)$$

Caso seja necessário realizar manobras depois do primeiro instante ótimo, pode-se estimar os próximos instantes visto que eles se repetem na ordem de $2T_{sr}$ segundos.

Para a manobra de religamento de uma linha de transmissão com compensação em derivação, o método apresentado em (DANTAS, 2007) propõe que os sinais de tensão do lado da fonte e do lado da linha devem ser estimados e reconstruídos através de uma interpolação linear, ou seja, os sinais são aproximados por segmentos de reta, como mostrado na Figura 4.10. Nesse projeto, foi utilizado um passo de cálculo de 1/960 segundos.

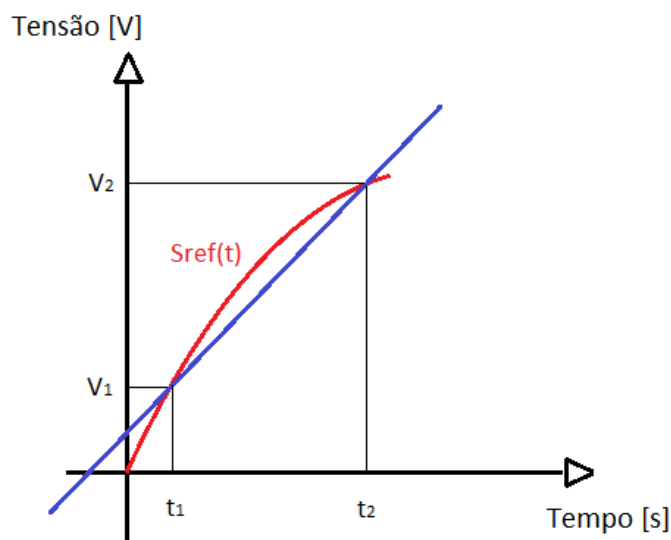


Figura 4.10: Interpolação do sinal de referência

Para encontrar os pontos de menor batimento do sinal de referência, as condições apresentadas na seção 3.5.3.2 devem ser atendidas para que o instante ótimo seja quando ocorre no período de menor pulsação do sinal de referência. Portanto, deve-se primeiro calcular a derivada de cada segmento de reta através da seguinte equação:

$$d = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (4.25)$$

Como os intervalos são aproximados por segmentos de reta, é possível utilizar a equação da reta, e obter os parâmetros da equação da seguinte forma:

$$\begin{aligned} a &= d \\ b &= v_1 - at_1 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Com os parâmetros, é possível determinar a equação da reta para os sinais do lado da linha e do lado da fonte e verificar se eles se interceptam intervalo definido por t_1 e t_2 .

$$\begin{aligned} y_l &= a_l x + b_l \\ y_f &= a_f x + b_f \end{aligned} \quad (4.27)$$

Em que l é o índice referente ao sinal da linha e f é o índice referente ao sinal da fonte.

Com as equações (4.27), determina-se o instante de cruzamento dessas retas, sendo dado por:

$$t_{\text{cruzamento}} = \frac{b_l - b_f}{a_f - a_l} \quad (4.28)$$

Em que, $t_1 \leq t_{\text{cruzamento}} \leq t_2$ para que os sinais tenham se interceptado dentro do intervalo definido por t_1 e t_2 .

Por fim, verifica-se a inclinação das equações de reta, se elas possuírem a mesma polaridade, significa que o instante de cruzamento ocorreu no período de menor pulsação.

4.10 CANAL DE COMUNICAÇÃO

O canal de comunicação é meio pelo qual os relés se comunicam enviando os sinais de disparo ou bloqueio a depender do esquema utilizado. Portanto, o módulo do canal de transmissão recebe os sinais de disparo dos relés e na saída é enviado o mesmo sinal com um atraso que depende do tipo do canal de comunicação. Além disso, cada relé envia três sinais lógicos referentes aos disparos de cada fase.

Na MODELS o canal foi modelado de forma a inserir um atraso de 20 ms na transmissão de um sinal de um relé para o outro (ANDERSON, 1999).

4.11 DISJUNTOR

O modelo do disjuntor na MODELS é responsável pela coordenação do comando de abertura e fechamento das chaves no modelo do sistema de potência no ATP. O intervalo de tempo utilizado para a realização de uma manobra foi de 33,33 ms, que é referente a dois ciclos.

O disjuntor foi posicionado logo após o barramento, a jusante do ponto de instalação dos TPCs de barra, e a montante dos TPCs de linha, de forma a não interromper a aquisição de dados do relé após a abertura da linha.

5 AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA COM O CHAVEAMENTO CONTROLADO NO ATP

5.1 SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

O sistema elétrico analisado é mostrado na Figura 5.1. Este sistema consiste em duas fontes trifásicas conectadas por meio de uma LT perfeitamente transposta com seus parâmetros distribuídos e independentes da frequência com 200 km de comprimento. Os relés dispõem de dois TCs e quatro TPCs, sendo dois de barra e dois de linha, pois para realizar o religamento é necessário saber o perfil da tensão da barra e da linha durante o tempo morto.

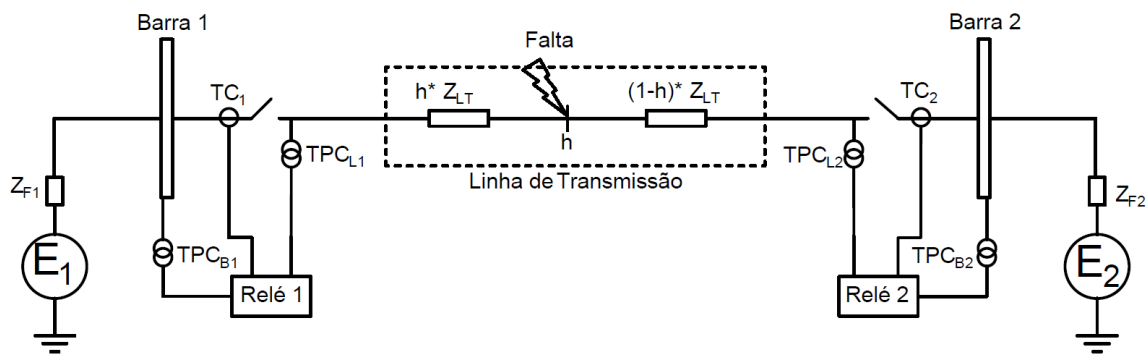


Figura 5.1: Sistema elétrico simulado no ATP.

Abaixo, estão os dados nominais das fontes e da LT:

Tabela 5.1: Dados das fontes.

	Tensão (kV)	Fase (graus)	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte A	500	0	49,3	133,9	1,86	26,7
Fonte B	495	-5	39,44	107,12	1,49	21,36

Tabela 5.2: Parâmetros da LT.

Sequência	$R(\Omega/km)$	$X(\Omega/km)$	$\omega C(\mu\Omega/km)$
Positiva	0,0186	0,237	6,124
Zero	0,493	1,339	2,89

5.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO APÓS A ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

Nesta seção, será feita uma avaliação da atuação do sistema de proteção para situações de falta monofásica, bifásica e trifásica. Além disso, será observado a atuação do relé em segunda zona e a sua atuação com o esquema de disparo por sobrealcançe.

5.2.1 CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO

Para a análise da proteção atuando em uma falta monofásica, um curto-circuito foi aplicado na fase A para a terra no instante de 98,736 ms com ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1\text{ m}\Omega$, localizado à 60 km da Barra 1.

Para esse caso, os dois relés enxergam a falta na sua zona de atuação instantânea (Figura 5.2), abrindo os pólos dos disjuntores no instante de 157,9 ms. Para tanto, o algoritmo de seleção de fases, detecta a falta AT 24 ms após o início da falta, enquanto que o comparador de fase, detecta 16 ms após o início da falta, como visto na Figura 5.3. Portanto, o sistema leva 24 ms para detectar e enviar o sinal de abertura ao disjuntor, mas a falta somente é extinta após 57,9 ms devido ao atraso na atuação dos disjuntores.

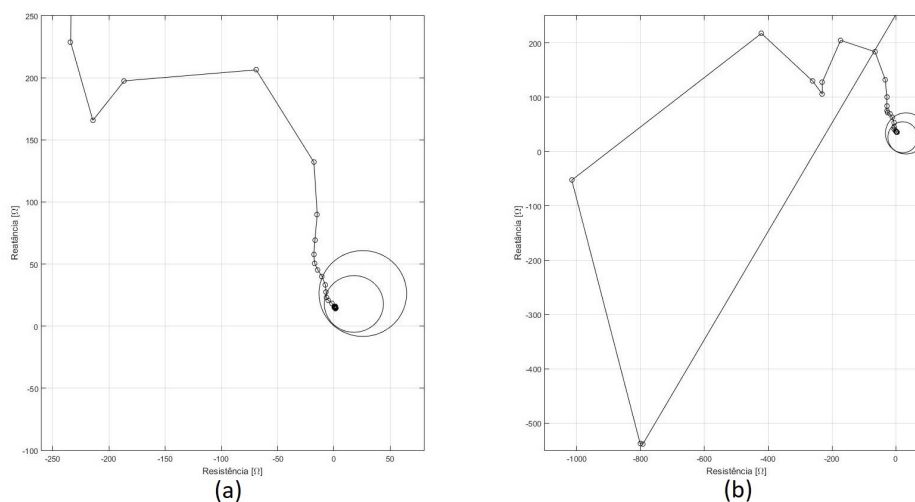


Figura 5.2: Impedância vista pela unidade Z_{AT} para uma falta na Fase A: (a) Relé R1 (b) Relé R2.

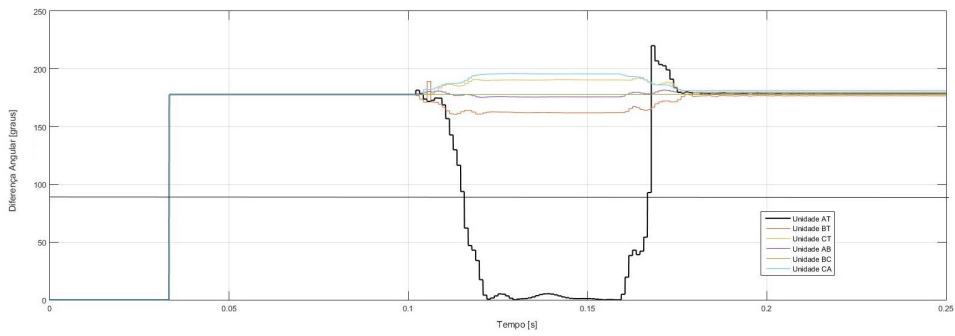


Figura 5.3: Resposta do comparador de fase de primeira e segunda zona do relé R1 para uma falta na Fase A.

Pelas Figuras 5.4 e 5.5, observa-se que a maior contribuição no curto-circuito vem da Barra 1. Além disso, o sistema de proteção atuou somente no loop com falta, essa seletividade será importante quando utilizado o religamento automático monofásico.

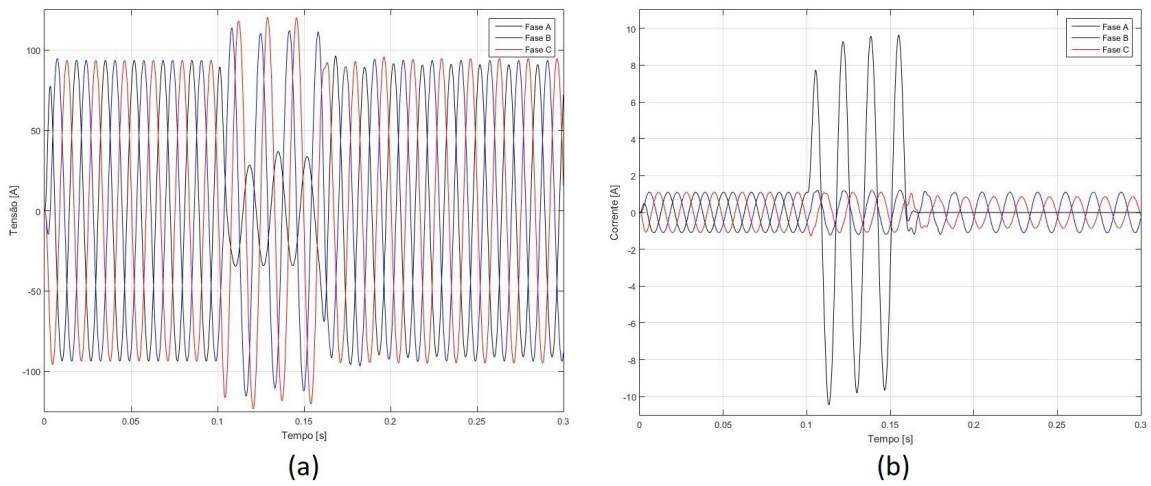


Figura 5.4: Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta na Fase A: (a) Tensão (b) Corrente.

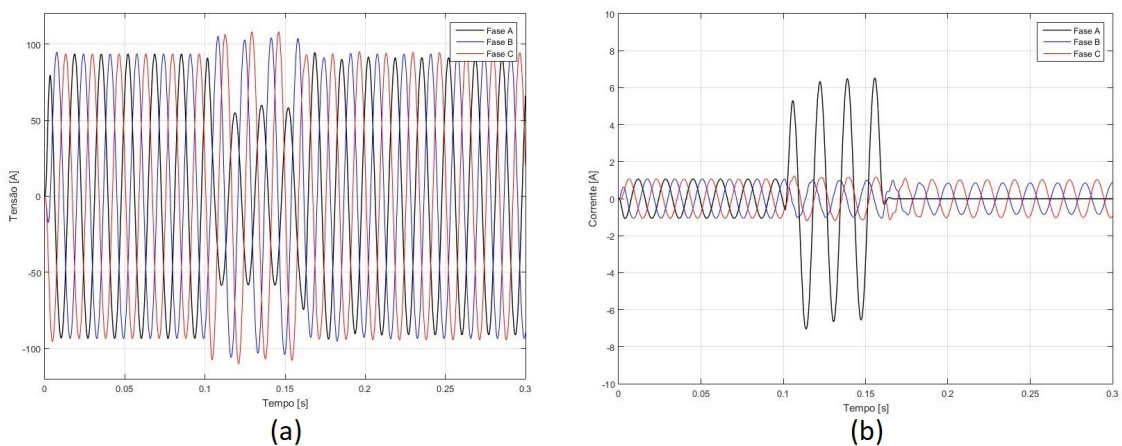


Figura 5.5: Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta na Fase A: (a) Tensão (b) Corrente.

5.2.2 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Analisando a atuação da proteção o caso de uma falta trifásica, um curto-circuito trifásico foi aplicado no instante 100 ms com ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1\text{ m}\Omega$, localizado à 60 km da Barra 2. Como no caso anterior, os dois relés também enxergam a falta na sua zona de atuação instantânea (Figura 5.6), abrindo o pólo do disjuntor da fase B no instante 147,7 ms, na fase A aos 150,8 ms e na fase C aos 151,1 ms. As atuações do disjuntor 2 foram aos 152,3 ms na Fase C, 156,4 na Fase A e 157,9 na fase C. Para tanto, o algoritmo de seleção de fases, detectou a falta trifásica 11,3 ms após o início da falta, enquanto que o comparador de fase, detecta 12,1 ms após o início da falta. Portanto, o sistema leva 12,1 ms para detectar e enviar o sinal de abertura ao disjuntor, mas a falta somente é extinta após 39,9 ms devido ao atraso na atuação dos disjuntores.

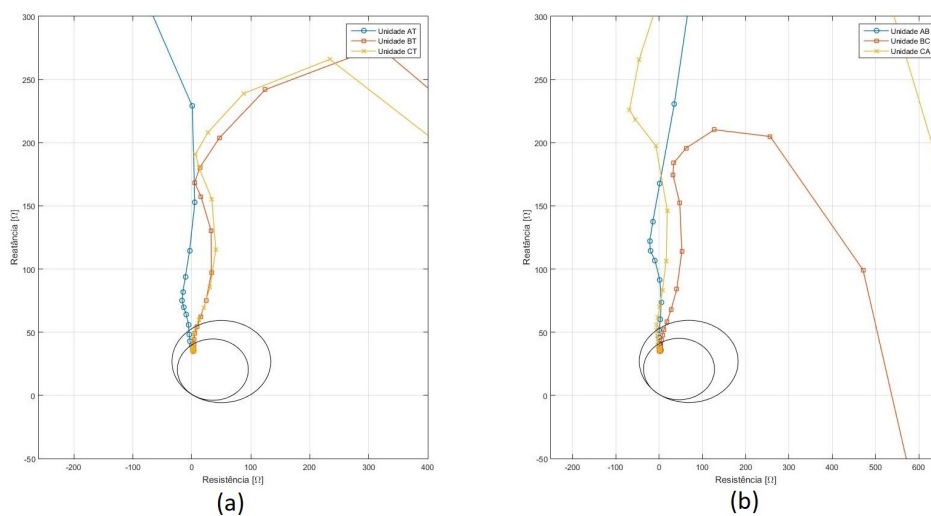


Figura 5.6: Impedâncias detectadas pelo Relé R1 para uma falta trifásica: (a) Unidades monofásicas (b) Unidades bifásicas.

Pelas Figuras 5.8 e 5.7, observa-se que a maior contribuição no curto-circuito vem da Fonte 2. Além disso, como a falta é trifásica o sistema de proteção atuou para todas as fases.

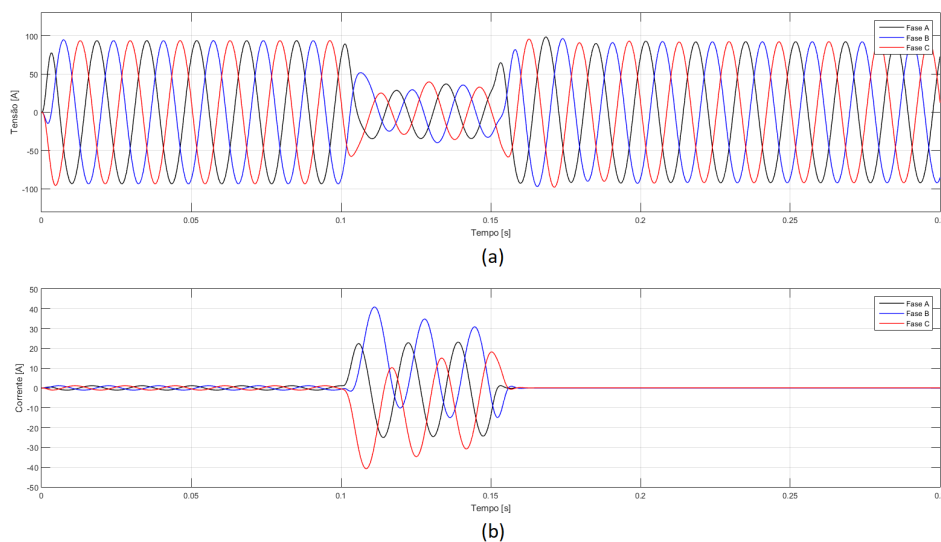


Figura 5.7: Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta trifásica: (a) Tensão (b) Corrente.

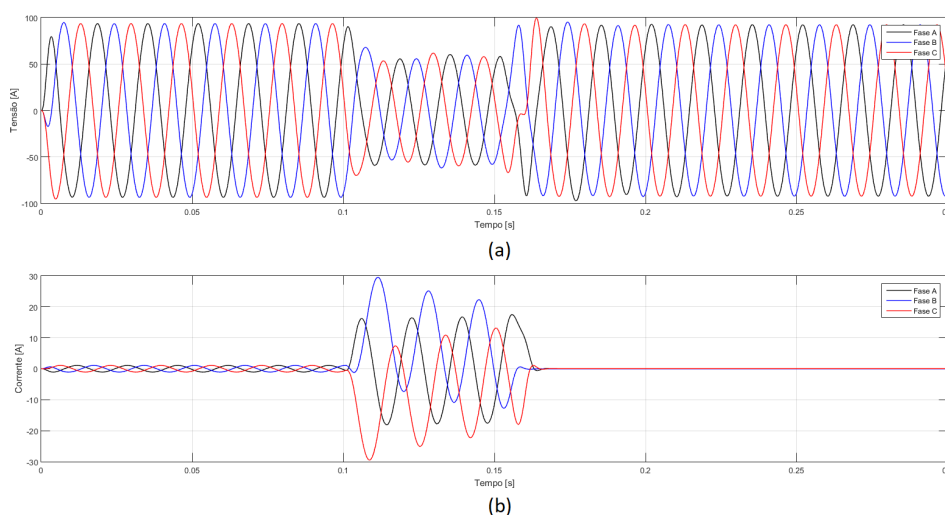


Figura 5.8: Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta trifásica: (a) Tensão (b) Corrente.

5.2.3 ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE DISPARO PERMISSIVO POR SOBREALCANCE

Para a análise da efetividade de um esquema de teleproteção por disparo ou bloqueio. Para isso, um curto-circuito bifásico sem envolvimento com terra (AB) foi aplicado à 2 km da Barra 1 no instante de 100 ms com ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1 \text{ m}\Omega$.

Desta forma, o relé da Barra 1 enxerga a falta em sua zona de atuação instantânea, abrindo o pólo do disjuntor da Fase A 73,2 ms após o início da falta, 73,8 ms na fase B e 77,5 ms na Fase C. Como o relé remoto enxerga na sua zona temporizada, o Relé 1 envia um disparo permissivo ao Relé 2, que chega com um atraso de 20 ms devido ao canal de transmissão. Dessa forma, o

disjuntor da Barra 2 é desarmado, aproximadamente, 20 ms depois do disjuntor da Barra 1. A Figura 5.9 mostra em quais zonas o curto-circuito foi detectado e Figura 5.10 mostra a atuação do comparador de fase, que detectou a falta 11,5 ms após o início da falta, enquanto que a seleção de fase detectou falta no instante 10,8 após o início da falta.

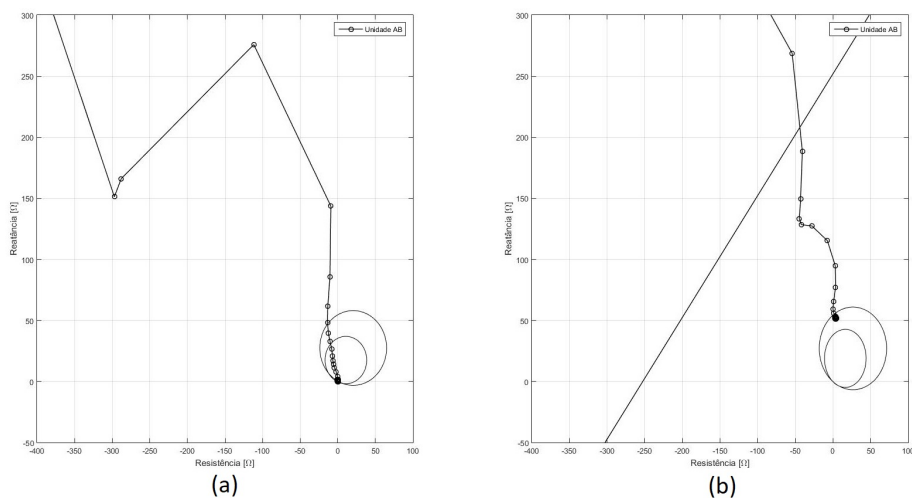


Figura 5.9: Impedância vista pela unidade Z_{AB} para uma falta bifásica: (a) Relé R1 (b) Relé R2.

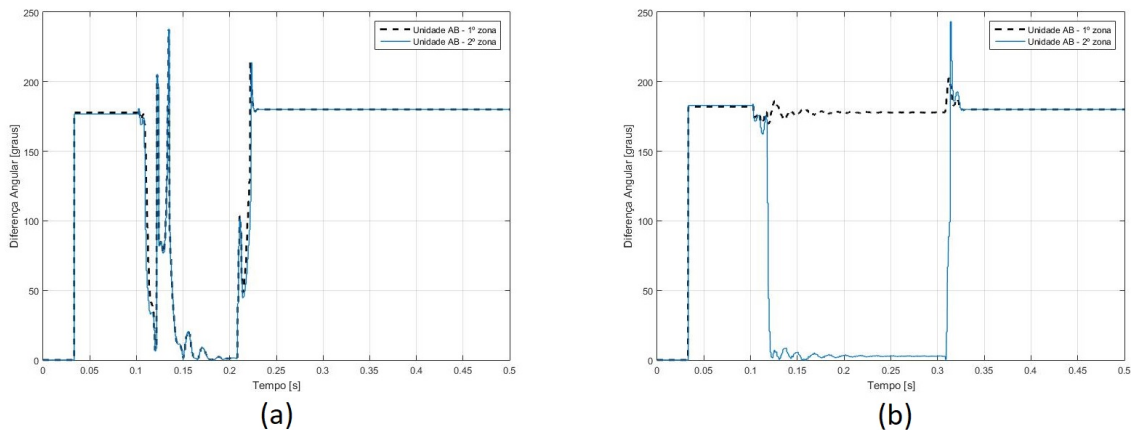


Figura 5.10: Resposta do comparador de fase de primeira e segunda zona para uma falta bifásica: (a) Relé R1; (b) Relé R2.

As Figuras 5.11 e 5.12, mostram que a maior contribuição no curto-circuito vem da Fonte 1. Além disso, como a falta é bifásica o sistema de proteção comandou a abertura de todos os pólos do disjuntor.

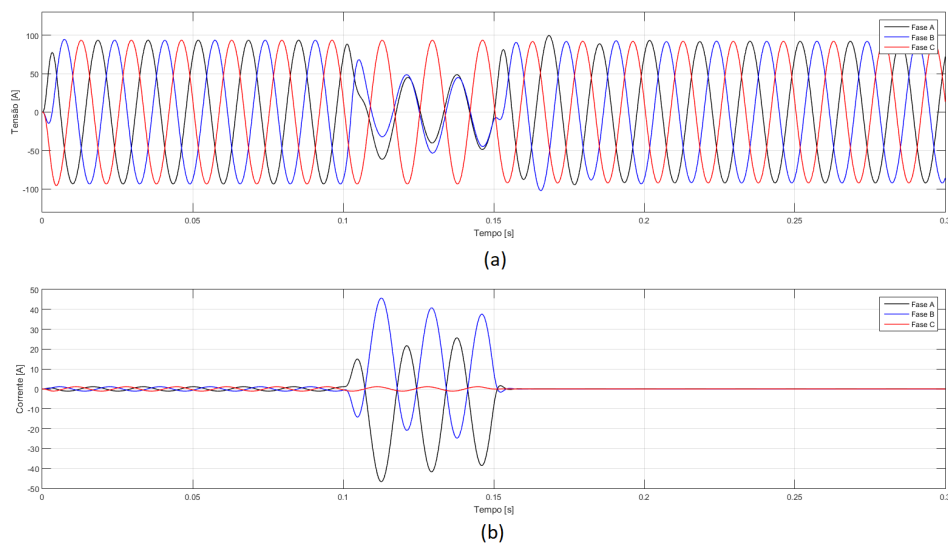


Figura 5.11: Sinais nos terminais do Relé R1 para uma falta bifásica: (a) Tensão (b) Corrente.

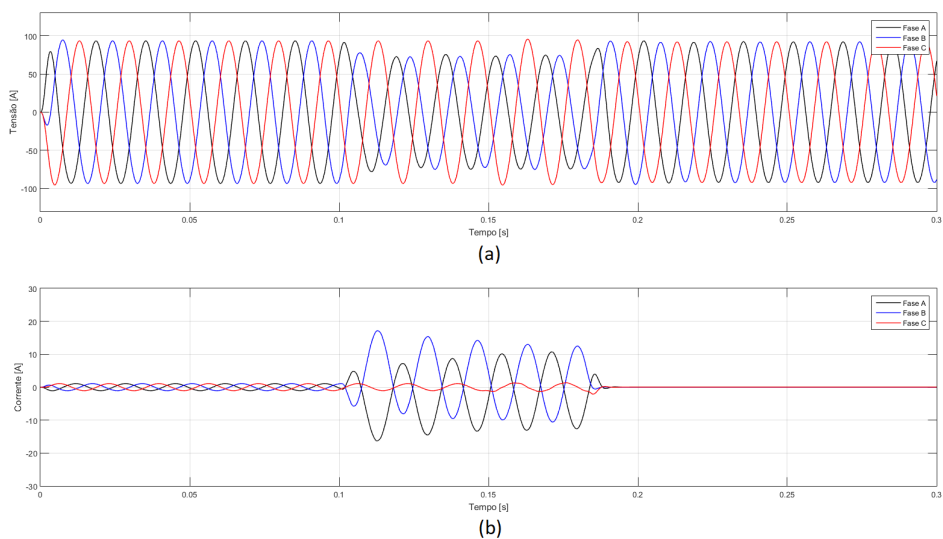


Figura 5.12: Sinais nos terminais do Relé R2 para uma falta bifásica: (a) Tensão (b) Corrente.

5.3 AVALIAÇÃO DA ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO COM O CHAVEAMENTO CONTROLADO

Nesta seção, é feita a avaliação do religamento automático tripolar e monopolar, utilizando o método de chaveamento controlado em linhas de transmissão sem compensação e com compensação.

5.3.1 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO MONOFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPENSADA

Para a avaliar a eficiência da realização do religamento automático monofásico, utilizando o método de chaveamento controlado em linhas de transmissão compensadas, foram aplicadas faltas monofásicas na Fase A ao longo da LT, variando a sua compensação. Além disso, foi testado o religamento para os casos em que o relé opera na sua unidade temporizada e para os casos de sistemas de proteção com esquemas de teleproteção.

5.3.1.1 FALTA AT COM LT COMPENSADA EM 20%

Neste caso, um curto-circuito é aplicado na fase A, em 50% da LT com compensação em derivação de 20%. O curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1\text{ m}\Omega$. A falta é extinta 91 ms após o seu início. O tempo morto é da ordem de 450 ms, com base na Tabela ?? e a fase é religada no instante 635 ms.

Na Figura 5.13(a) é mostrado o perfil da tensão no secundário do TPC de barra e observa-se que o perfil da tensão tem poucas mudanças durante a manobra do religamento. Já a Figura 5.13(b) é mostrado o perfil da tensão no secundário do TPC de linha e nota-se a oscilação da tensão da LT enquanto desconectada, devido ao seu grau de compensação. A frequência da oscilação do sinal é de aproximadamente 26,83 Hz, que pode ser obtido na expressão 3.12 e a sobretensão máxima durante a manobra de religamento foi de 1,06 pu. Também pode-se observar nessa Figura que após a abertura dos disjuntores a tensão de linha ficou próxima de zero do instante 191 ms até aproximadamente, 208 ms. Isso ocorre, pois a falta tem caráter transitório e envolve o contato com a terra, ou seja, esse intervalo significa que o curto-circuito ainda está sendo extinto, o mesmo não ocorreria para faltas bifásicas que não envolvem a terra.

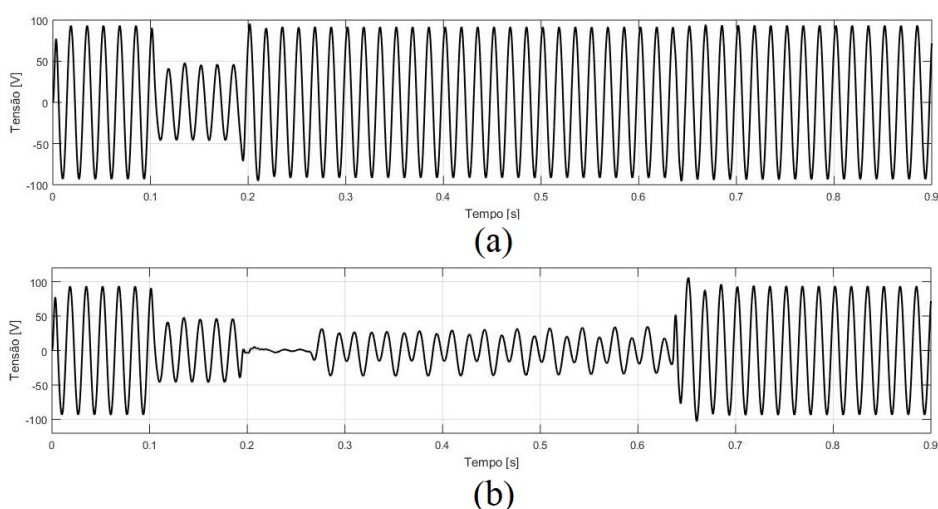


Figura 5.13: Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.

A Figura 5.14 apresenta o perfil da corrente dos secundários dos TCs e observa-se que as correntes se estabilizam após 100 ms da manobra de religamento. A Figura 5.15 apresenta o perfil da corrente das outras fases durante a realização do religamento, e observa-se que, após a manobra as correntes também se estabilizam, não evoluindo para outro curto-circuito.

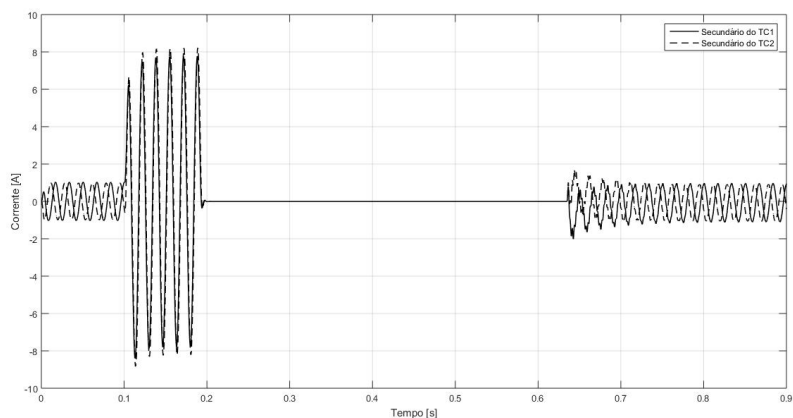


Figura 5.14: Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%.

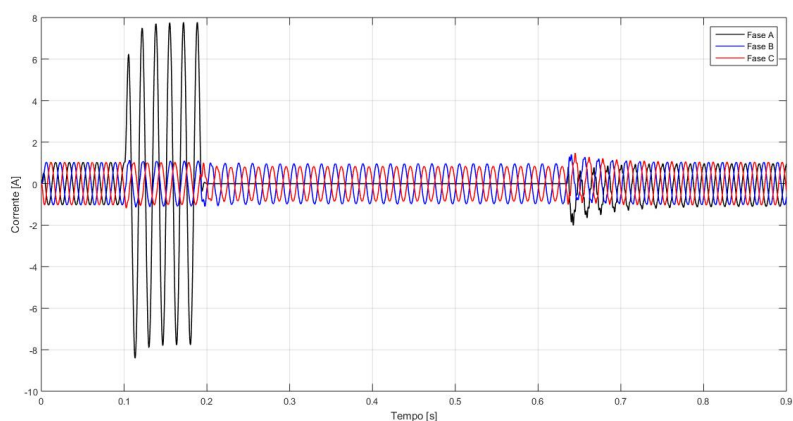


Figura 5.15: Correntes do secundário do TC1 para uma falta monofásica em uma LT compensada em 20%.

5.3.1.2 FALTA AT COM LT COMPENSADA EM 50%

Este caso apresenta os mesmos princípios que o caso anterior, variando apenas o grau da compensação da LT. Portanto, a falta é AT, em 50% da LT com compensação em derivação de 50%.

As Figuras 5.16(a) e 5.16(b) mostram o perfil da tensão nos secundários do TPCs de barra e linha, respectivamente. Neste caso, frequência da oscilação do sinal é de aproximadamente 42,42 Hz e nota-se que o sinal apresenta uma oscilação mais definida, quando comparada ao caso anterior. Além disso, a sobretensão máxima durante a manobra de religamento foi de 1,1 pu.

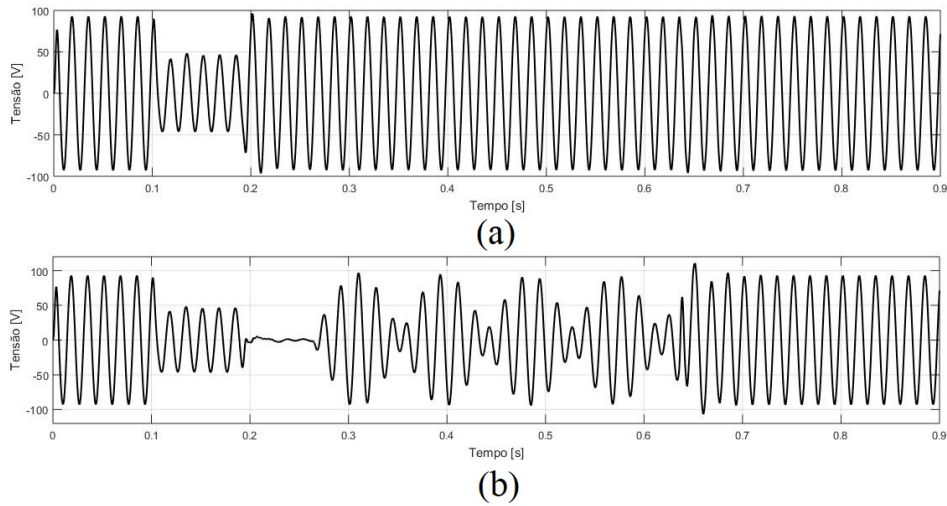


Figura 5.16: Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 50%: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.

A Figura 5.17 apresenta o perfil da corrente dos secundários dos TCs e observa-se que as correntes também se estabilizam após 100 ms da manobra de religamento.

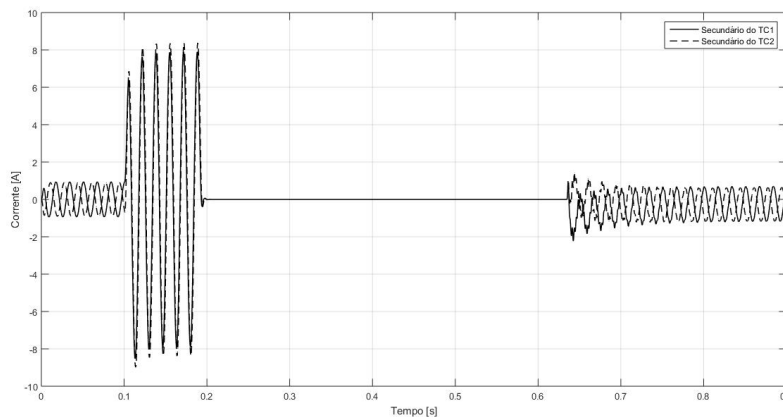


Figura 5.17: Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 50%.

5.3.1.3 ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO EM UMA FALTA AT COM LT COMPENSADA EM 40%

Neste caso, um curto-circuito é aplicado na fase A, em 85% da LT, ou seja, 30 km da Fonte 2. A compensação é de 40%. Assim como anteriormente, o curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1 \text{ m}\Omega$. O relé 1 identifica o curto na sua zona temporizada, portanto, foi utilizado o esquema de teleproteção de disparo permissivo por sobrealcançe, apresentado anteriormente.

As Figuras 5.18(a), 5.18(b), 5.19(a) e 5.19(b) mostram o perfil da tensão nos secundários dos

TPCs de barra e de linha dos terminais 1 e 2, respectivamente. Com a atuação da teleproteção, a manobra dos disjuntores ocorre em instantes muito próximos, do que se ocorresse nos casos da zona temporizada, ocasionando em uma sobretensão máxima de 1,09 pu., melhorando as condições para um religamento bem-sucedido.

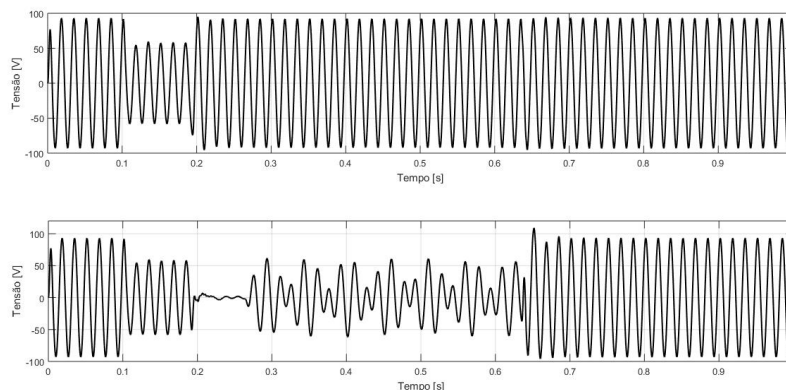


Figura 5.18: Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TPC1 de Barra; (b) TPC1 de Linha.

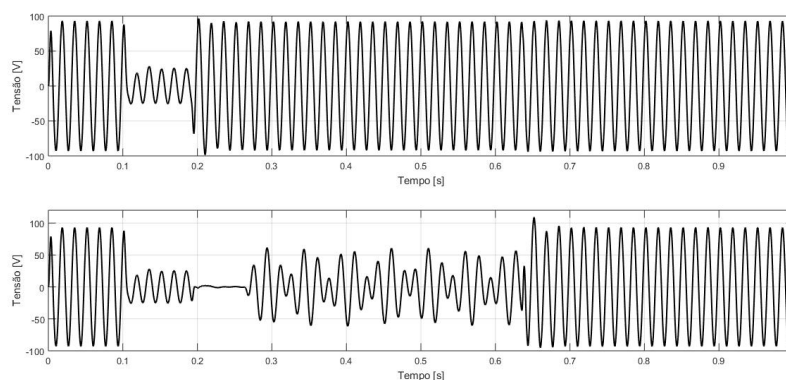


Figura 5.19: Tensão da fase A do secundário para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TPC2 de Barra; (b) TPC2 de Linha.

Além disso, a Figura 5.20 apresenta o perfil da corrente dos secundários dos TCs.

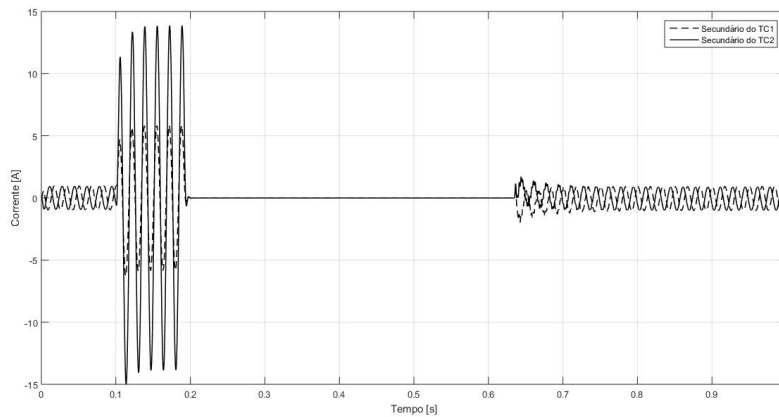
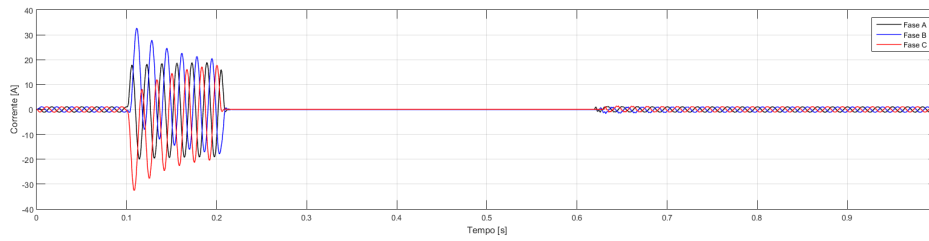


Figura 5.20: Correntes dos secundários dos TCs da Fase A para uma falta monofásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção.

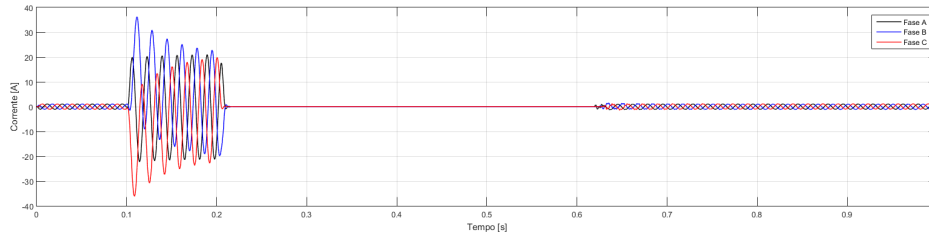
5.3.2 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO TRIFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO SEM COMPENSAÇÃO

Nesta seção será feita avaliação da eficiência da realização do religamento automático trifásico, utilizando o método de chaveamento controlado em linhas de transmissão sem compensação, a falta foi considerada sem o contato com a terra, para que o efeito do carregamento fosse observado. Neste caso, um curto-circuito trifásico é aplicado em 50% da LT sem compensação. O curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1 \text{ m}\Omega$.

A Figura 5.21 mostra o comportamento das correntes, quando realizado a abertura, aos 208 ms, e o religamento das fases, aos 619 ms e que elas se estabilizam 150 ms após o religamento da primeira fase.



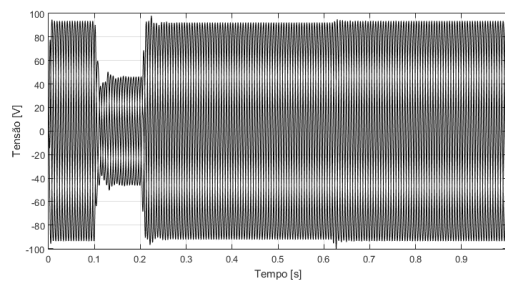
(a)



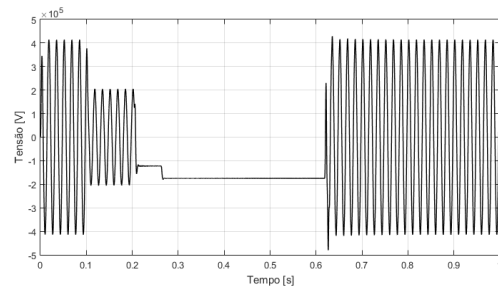
(b)

Figura 5.21: Correntes do secundário dos TCs para uma falta trifásica em uma LT sem compensação: (a) TC1; (b) TC2.

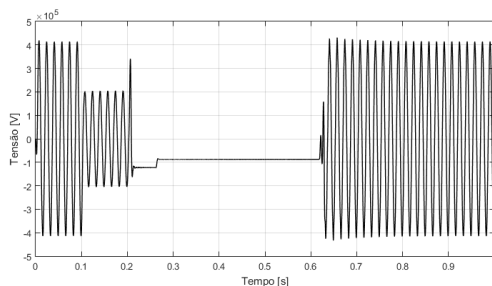
As Figuras 5.22(b), 5.22(c) e 5.22(d), são mostradas as tensões da linha do terminal 1, relativas as Fases A, B e C, respectivamente. Nessa Figura, observa-se o carregamento residual praticamente constante, durante o tempo morto e ao fazer o religamento, a sobretensão máxima apresentada foi de 1.16 p.u., referente a fase A. Nota-se que, durante o tempo morto ocorre uma mudança na tensão da linha nas três fases, e como explicado anteriormente, por se tratar de uma falta que envolve o contato com a terra, esse intervalo antes da mudança na tensão é referente a extinção do curto.



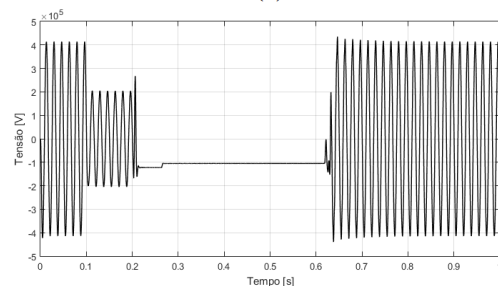
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.22: Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT sem compensação: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) Tensão de Linha da Fase A; (c) Tensão de Linha da Fase B; (d) Tensão de Linha da Fase C.

5.3.3 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO TRIFÁSICO COM A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPENSADA

Nesta seção será feita avaliação da eficiência da realização do religamento automático trifásico nos moldes da seção anterior, utilizando o método de chaveamento controlado em linhas de transmissão compensadas, aplicando faltas trifásicas ao longo da LT e variando a sua compensação. Também foi testado o religamento para os casos em que o relé opera na sua unidade temporizada, de modo que, são utilizados os esquemas de teleproteção.

5.3.3.1 FALTA ABC COM LT COMPENSADA EM 20%

Neste caso, um curto-circuito trifásico é aplicado em 50% da LT com compensação em derivação de 20%. O curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1 \text{ m}\Omega$.

A Figura 5.23 mostra o comportamento das correntes, quando realizado a abertura e o religamento das fases e que elas se estabilizam aos 218 ms após o religamento da primeira fase.

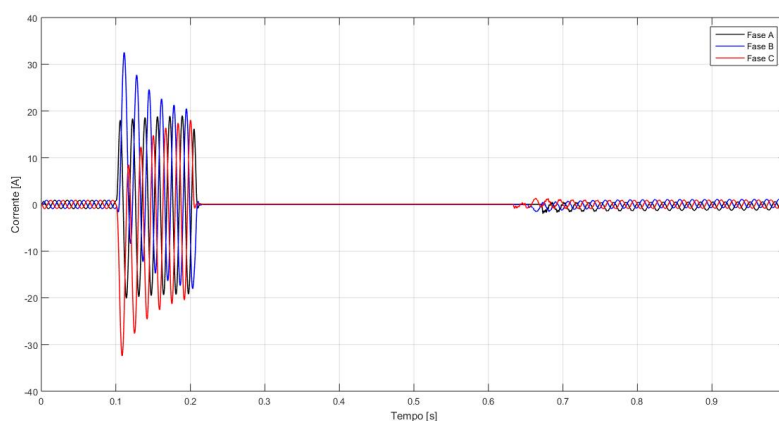


Figura 5.23: Correntes do secundário do TC1 para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%.

Na Figura 5.24(a) é mostrado as tensões de barra do secundário do TPC1 e observa-se que o perfil da tensão praticamente não muda durante a manobra do religamento. Já as Figuras 5.24(b), 5.24(c) e 5.24(d), são mostradas as tensões de linha relativas as Fases A, B e C, respectivamente. Nota-se que cada fase oscila de forma diferente, com frequência de 26,83 Hz.

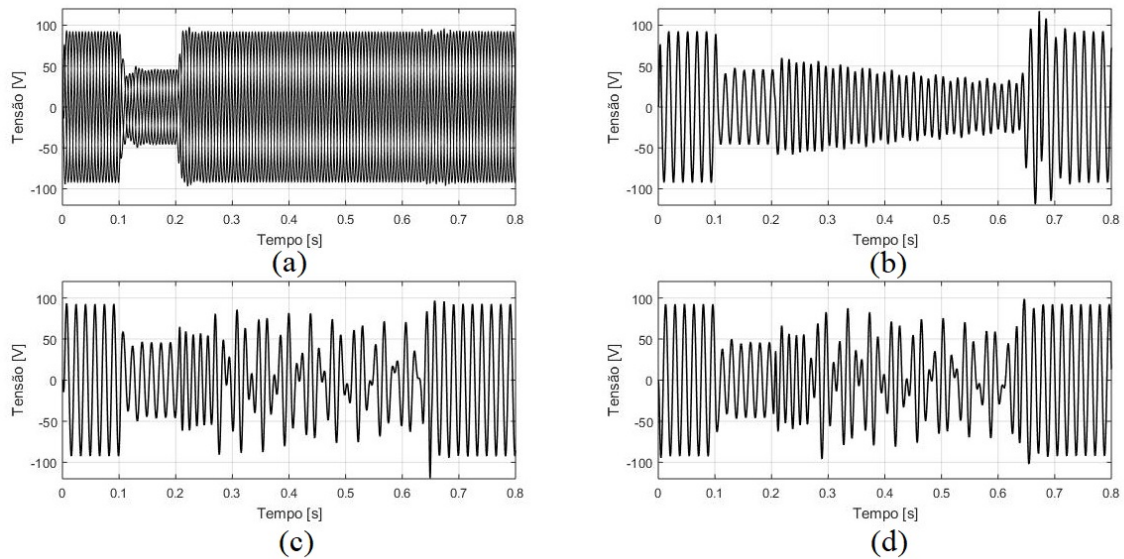


Figura 5.24: Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.

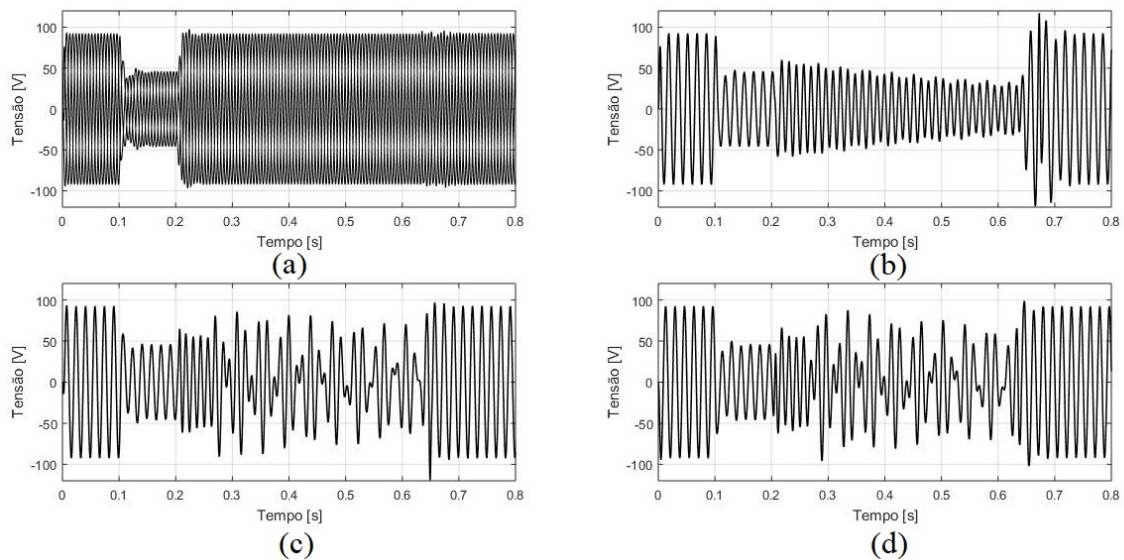


Figura 5.25: Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 20%: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.

Na Tabela 5.3, são mostrados os instantes de início da falta, extinção, tempo morto, religamento e os valores máximos da sobretensão da manobra de religamento referentes a cada fase.

Tabela 5.3: Instantes do processo de abertura e religamento de uma LT compensada em 20% em uma falta trifásica.

	Falta (ms)	Extinção (ms)	Tempo morto (ms)	Religamento (ms)	Sobretensão Máxima (p.u.)
Fase A	100	207,2	463,8	671	1,19
Fase B	100	206,2	437,8	644	1,19
Fase C	100	202,7	429,8	632,5	1,02

Observa-se na 5.3, que o valor de sobretensão apresentado na Fase C é menor do que as outras, e isso é esperado, pois essa foi a primeira fase em que foi realizada a manobra, e, isso afeta o comportamento das outras fases alterando o instante ótimo de religamento, se o intervalo entre o religamento das fases for grande, a manobra pode ocorrer em um instante que cause sobretensões da ordem de 3 a 4 p. u. e por isso as fases devem ser religadas no menor intervalo possível.

5.3.3.2 ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO EM UMA FALTA TRIFÁSICA COM A LT COMPENSADA EM 80%

Da mesma forma que no caso do religamento monofásico, foi utilizado o esquema de teleproteção de disparo permissivo por sobrealcance quando um dos relés enxergou a falta em sua zona temporizada. Neste caso, um curto-circuito trifásico é aplicado em 5% da LT com compensação em derivação de 80%. O curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de $1\text{ m}\Omega$.

Nas Figuras 5.27(a) e 5.28(a), é mostrado as tensões dos secundários dos TCs de barra do Terminal 1 e 2 respectivamente, e nota-se que as tensões praticamente não mudam quando realizada a manobra de religamento.

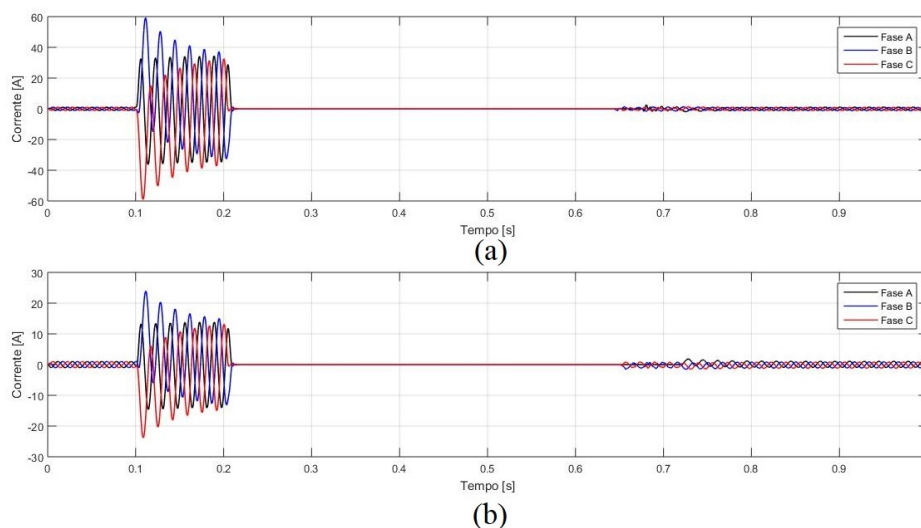


Figura 5.26: Correntes do secundário dos TCs para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% com teleproteção: (a) TC1; (b) TC2.

As Figuras 5.27(b), 5.27(c) e 5.27(d), são mostradas as tensões do TPC de linha do Terminal 1, relativas as Fases A, B e C, respectivamente. O mesmo pode ser dito para as Figuras 5.28(b), 5.28(c) e 5.28(d), que são referentes as tensões do TPC de linha do Terminal 2, relativas as Fases A, B e C, respectivamente

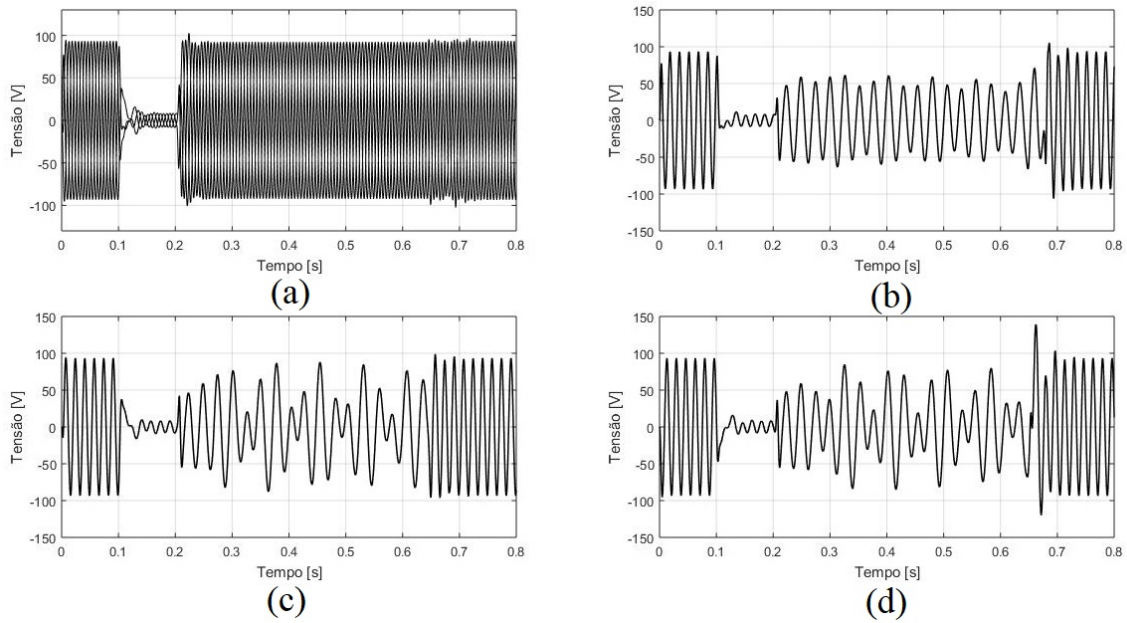


Figura 5.27: Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% atuando com teleproteção: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.

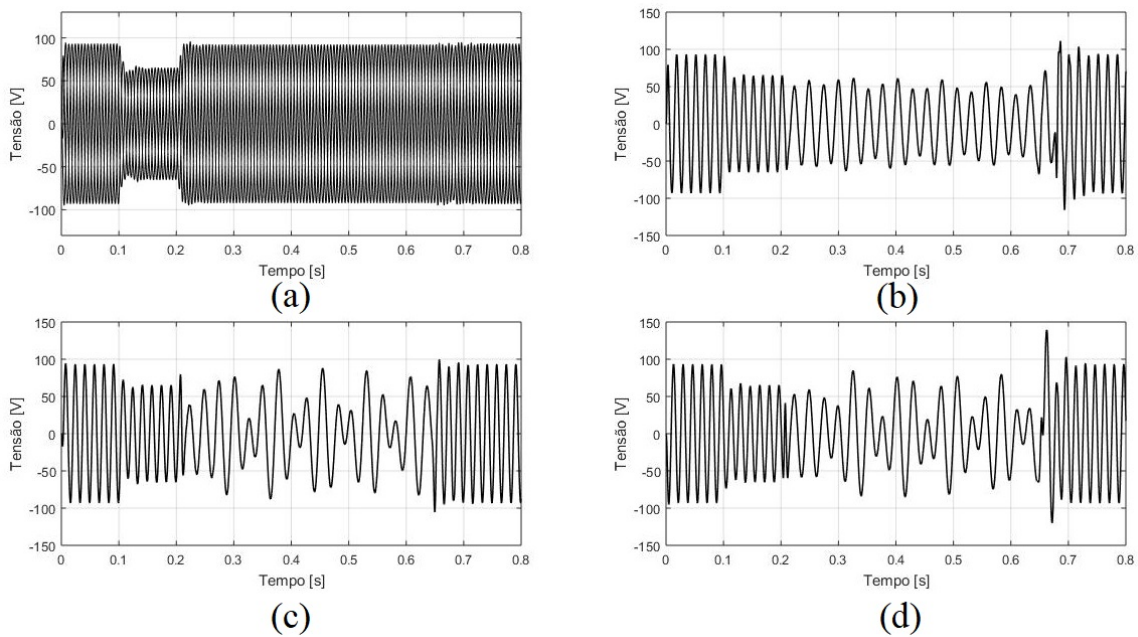


Figura 5.28: Sinais de tensão para uma falta trifásica em uma LT compensada em 80% atuando com teleproteção: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5, são mostrados os instantes de início da falta, extinção, tempo morto, religamento e os valores de pico da sobretensão referentes a cada fase para os dois terminais.

Tabela 5.4: Instantes do processo de abertura e religamento do Terminal 1 da LT compensada em 80%, com falta trifásica.

	Falta (ms)	Extinção (ms)	Tempo morto (ms)	Religamento (ms)	Sobretensão Máxima (p.u.)
Fase A	100	206,6	469,4	676	1,11
Fase B	100	206,6	438,5	645,1	1,0
Fase C	100	202,5	446,7	649,2	1,39

Tabela 5.5: Instantes do processo de abertura e religamento do Terminal 2 da LT compensada em 80%, com falta trifásica.

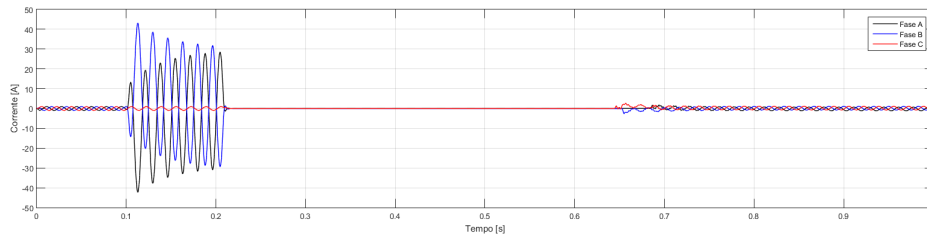
	Falta (ms)	Extinção (ms)	Tempo morto (ms)	Religamento (ms)	Sobretensão Máxima (p.u.)
Fase A	100	208,7	510,5	719	1,05
Fase B	100	208,5	443,8	652,3	0,99
Fase C	100	204,6	446,5	651,1	1,39

A manobra de religamento utilizando o esquema de teleproteção, diminui bastante as sobretensões vistas para as fases B e C, com máximos de 1 p.u. e 1,39 p.u., respectivamente.

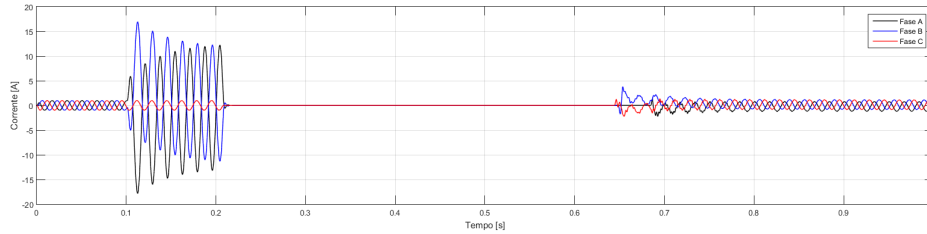
5.3.3.3 ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO EM UMA FALTA BIFÁSICA COM A LT COMPENSADA EM 40%

Neste caso, um curto-circuito bifásico é aplicado em 10% da LT com compensação em derivação de 40%. O curto-circuito ocorreu no instante 100 ms, ângulo de incidência de 90° (referência na tensão na fase A) e resistência de falta de 1 mΩ. Neste caso, o relé da Barra 2 enxerga a falta em sua zona temporizada, logo, o esquema de teleproteção envia o sinal permissivo, acelerando a atuação.

Nas Figuras 5.30(a) e 5.31(a), é mostrado as tensões dos secundários dos TCs de barra do Terminal 1 e 2 respectivamente, e nota-se que as tensões praticamente não mudam quando realizada a manobra de religamento.



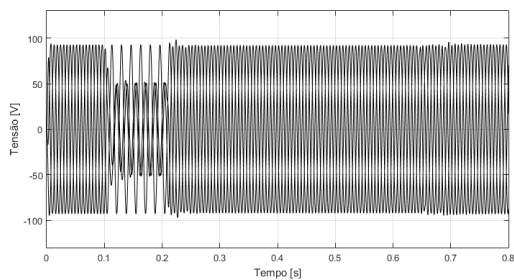
(a)



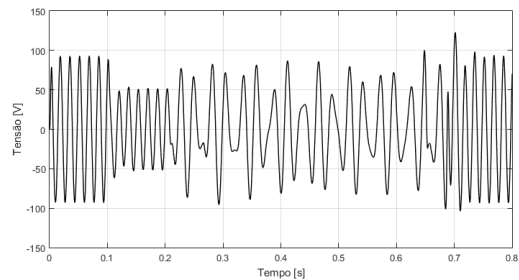
(b)

Figura 5.29: Correntes do secundário dos TCs para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% com teleproteção: (a) TC1; (b) TC2.

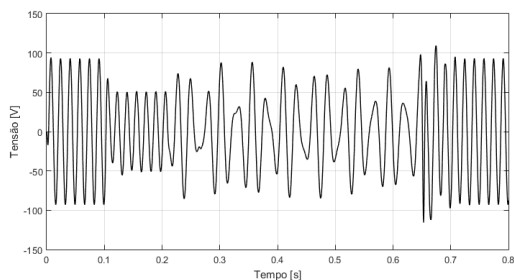
As Figuras 5.30(b), 5.30(c) e 5.30(d), são mostradas as tensões do TPC de linha do Terminal 1, relativas as Fases A, B e C, respectivamente. O mesmo pode ser dito para as Figuras 5.31(b), 5.31(c) e 5.31(d), que são referentes as tensões do TPC de linha do Terminal 2, relativas as Fases A, B e C, respectivamente



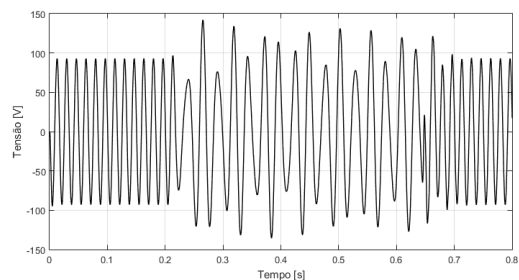
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.30: Sinais de tensão para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% atuando com teleproteção: (a) TPC1 de Barra das três fases; (b) TPC1 de Linha da Fase A; (c) TPC1 de Linha da Fase B; (d) TPC1 de Linha da Fase C.

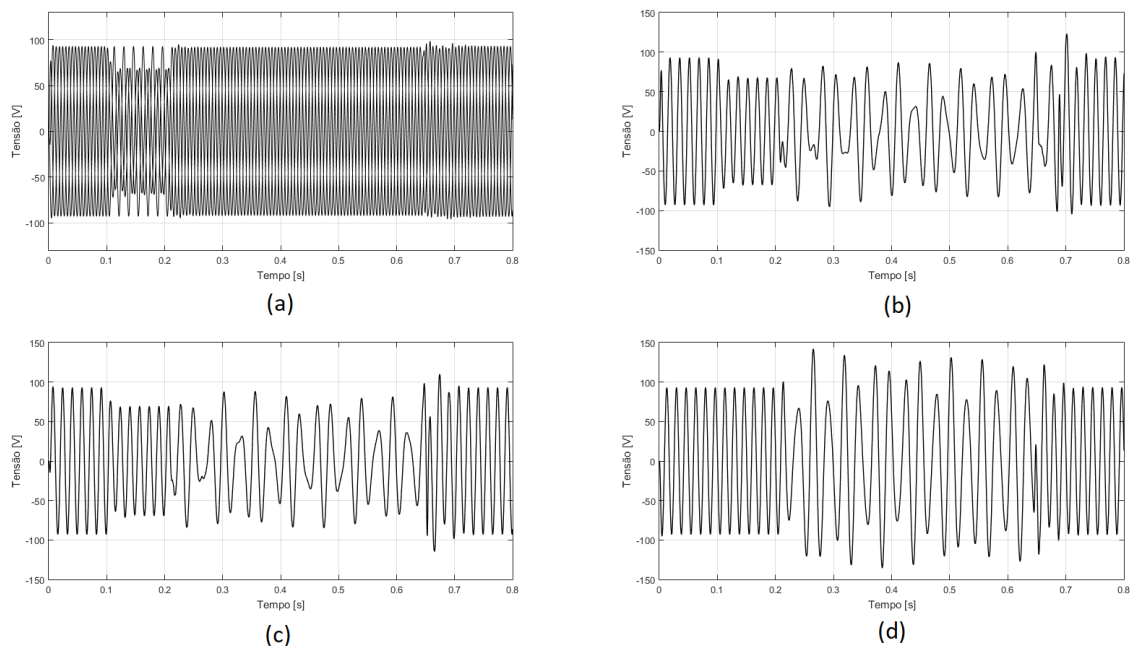


Figura 5.31: Sinais de tensão para uma falta bifásica em uma LT compensada em 40% atuando com teleproteção: (a) TPC2 de Barra das três fases; (b) TPC2 de Linha da Fase A; (c) TPC2 de Linha da Fase B; (d) TPC2 de Linha da Fase C.

Nas Tabelas 5.6 e 5.7, são mostrados os instantes de início da falta, extinção, tempo morto, religamento e os valores de pico da sobretensão referentes a cada fase para os dois terminais.

Tabela 5.6: Instantes do processo de abertura e religamento do Terminal 1 da LT compensada em 40%, com falta bifásica.

	Falta (ms)	Extinção (ms)	Tempo morto (ms)	Religamento (ms)	Sobretensão Máxima (p.u.)
Fase A	100	206,6	477,7	684,3	1,23
Fase B	100	206,7	445,6	652,3	1,15
Fase C	100	205,8	438,2	644	1,21

Tabela 5.7: Instantes do processo de abertura e religamento do Terminal 2 da LT compensada em 80%, com falta bifásica.

	Falta (ms)	Extinção (ms)	Tempo morto (ms)	Religamento (ms)	Sobretensão Máxima (p.u.)
Fase A	100	206,8	497,3	704,1	1,23
Fase B	100	206,9	465,3	672,2	1,14
Fase C	100	211,2	460,3	671,5	1,22

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado interligou os fundamentos teóricos da proteção de distância com um método de chaveamento controlado para a realização do religamento automático monofásico e trifásico.

A linguagem MODELS do ATP foi uma ferramenta extremamente útil para a modelagem e avaliação da proteção de distância e do chaveamento controlado, devido a sua flexibilidade na realização de estudos de transitórios.

Foram mostrados os algoritmos implementados pelo relé de distância na proteção de linhas de transmissão, abordando temas relativos a processamento digital de sinais, estimação de fasores, cálculo de impedâncias, teleproteção, mostrando que a proteção de distância consiste em um tema complexo e abrangente, unificando diversas áreas da engenharia elétrica.

Para a realização das análises, foram modelados no ATP elementos como a estimação de fasores, o cálculo de impedâncias, os comparadores de fase, a seleção de fases, a teleproteção e o chaveamento controlado. Por fim, a análise consistiu em aplicar vários tipos de falta ao longo da LT, com e sem compensação em derivação, e verificar a eficiência da proteção com o religamento.

A utilização do comparador de fase com o algoritmo de seleção de fases se mostrou bastante eficiente para a realização dos religamentos, em especial para os monofásicos, pois aumentou a confiabilidade do sistema para identificar o tipo de falta e realizar as manobras necessárias.

A realização do religamento se mostrou bastante eficaz para situações em que os relés atuaram em suas unidades instantâneas, pois os dois relés atuavam com uma diferença de tempo pequena, aumentando a eficácia do método.

Para os casos em que os relés atuavam em suas zonas temporizadas, se mostrou necessário a utilização um esquema de teleproteção, pois ao religar um terminal com o outro já conectado causa distorções nos sinais de referência, alterando o instante ótimo de religamento diferente do estimado. Por isso, foi utilizado um esquema disparo permissivo por sobrealcance para diminuir a diferença entre os tempos de atuação dos disjuntores, e conseqüentemente, aumentando as chances de um religamento bem-sucedido.

Enfim, como abordado durante o trabalho, a utilização da proteção de distância com o método de chaveamento controlado para a realizar religamentos monofásicos e trifásicos, pode ser uma aplicação interessante para manter a estabilidade e o sincronismo do sistema a ser protegido. Isso é devido a velocidade de detecção e extinção da falta pela proteção de distância e também pela diminuição das sobretensões que ocorrem durante o religamento pelo método de chaveamento.

Como propostas para trabalhos futuros têm-se:

- Aplicar métodos de detecção da extinção do arco secundário nos casos de religamento mo-

nopolar, após a abertura da LT. Dessa forma, o religamento seria impedido para casos de faltas permanente ou então para os casos em que o tempo de recuperação das características isolantes do ar não foi suficiente, do modo que, o arco ainda não foi eliminado. Dessa forma, é garantido maior segurança para as manobras de religamento;

- Realizar a implementação de religamentos bifásicos, para faltas que envolvem ou não envolvem a terra, avaliando as dificuldades na sua realização e os efeitos na estabilidade e sincronismo do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. Power system relaying. *John Wiley & Sons, Ltd*, v. 2, 1995.
- SILVA, K. M. Avaliação da proteção de distância de linhas de transmissão a partir de simulações de transitórios eletromagnéticos. *Projeto de Pesquisa – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Paraíba, Brasil.*, 2006.
- GOLDSWORTHY, D.; ROSEBURG, T.; TZIOUVARAS, D.; POPE, J. Controlled switching of hvac circuit breakers: Application examples and benefits. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 20070912 TP6288.*, 2008.
- DANTAS, K. M. C. Chaveamento controlado de linhas de transmissão. *Campina Grande - Paraíba - Brasil.*, 2007.
- AREVA, T. D. Network protection and automation guide. *ALSTOM GRID*, v. 1ª Edição, 2011.
- GE Power Management. High voltage transmission line protection with single pole tripping and reclosing. 2002.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. Protective relaying principles and applications. *CRC Press Taylor & Francis Group*, 2006.
- ELMORE, W. A. Protective relaying: Theory and applications. *New York, USA: Marcel Dekker Inc.*, v. 2, 2003.
- PEREZ, S. G. A. Modeling relays for power system protection studies. *University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada*, 2006.
- ZIEGLER, G. Numerical distance protection: Principles and applications. *Berlin, Germany:Siemens*, v. 2, 2006.
- SCHWEITZER, E. O.; ROBERTS, J. Distance relay element design. *Pullman, Washington. Disponível em: < www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2400 >.*, 2010.
- ADU, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. *Disponível em: < ieeexplore.ieee.org/iel5/61/22006/01022787.pdf>*, 2006.
- GLOVER, J. D.; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. Power system analysis & design. *Sixth Edition - Cengage Learning*, 2015.
- SAMPAIO, A. L. P. Consolidação de material didático para a disciplina de equipamentos elétricos – disjuntores. *Rio de Janeiro, RJ - Brasil.*, 2012.
- CIGRE, W. G. 13.07. controlled switching of hvac circuit breakers: Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers - 1st part. *ELECTRA. New York, NY - USA: Wiley-Interscience.*, 1999.
- D’AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO P. C. V. AND VAISMAN, R.; FRONTIN, S. d. O. Transitórios elétricos e coordenação de isolamentos - aplicação em sistemas de potência de alta-tensão. *Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF*, 1987.
- HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK, R. Fundamentos de física 2 - gravitação, ondas, termodinâmica. *8 ed.*, 2009.

KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. *Florianópolis: Edição do autor*, 2006.

HART, G.; SMITH, A. Modified cosine filters. *U.S. Patent 6 154 687, Nov. 28., 2000.*

ANDERSON, P. M. Power system protection. *Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering*, 1999.