

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

NELSON GIOVANNY ROMERO TAQUIRE

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO EFICIENTE PARA A LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS POR RELÉ DIFERENCIAL NUMÉRICO PARA PROTEÇÃO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR
TIRISTORES (TCSC).**

Ilha Solteira

2016

NELSON GIOVANNY ROMERO TAQUIRE

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO EFICIENTE PARA A
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR RELÉ DIFERENCIAL NUMÉRICO
PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM
COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTORES (TCSC).**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica

Área de Conhecimento: Automação

Orientador: Jose Roberto Sanches
Mantovani

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T175p Taquire, Nelson Giovanni Romero.
Proposta de um algoritmo eficiente para a localização de faltas por relé diferencial numérico para proteção de linhas de transmissão com compensação série controlada por tiristores (TCSC) / Nelson Giovanni Romero Taquire. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
93 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Jose Roberto Sanches Mantovani

Co-orientador: Jonatas Boas Leite

Inclui bibliografia

1. Linhas de transmissão. 2. Proteção diferencial. 3. Localizador de faltas.
4. Compensação série controlada por tiristores (TCSC).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

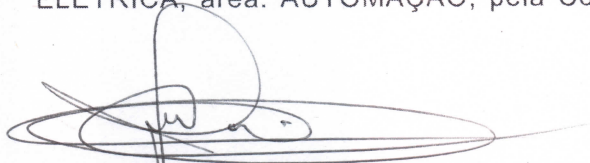
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Proposta de um algoritmo eficiente para a localização de faltas por relé diferencial numérico para proteção de linhas de transmissão com compensação série controlada por tiristores (TCSC)

AUTOR: NELSON GIOVANNY ROMERO TAQUIRE

ORIENTADOR: JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

CO-ORIENTADOR: JONATAS BOAS LEITE

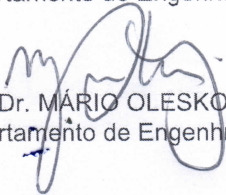
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Fabio Bertequini Leão

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MÁRIO OLESKOVICZ
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Ilha Solteira, 21 de março de 2016

DEDICO

A Augusto Taquire Rodriguez

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e minha família e amigos pelo constante apoio e compreensão. A meus tios Ruben e Lucila. Aos colegas de trabalho e amigos, Jônatas Boás Leite, Leonardo Henrique, Joel Melo, Renzo Vargas, Nicolas Cortez, César Augusto, Pedro Ayala, Jose Carlos Ugaz, Herbert Soto, Christian Villajuan, Fernando Cerna e entre outros por toda ajuda e conselhos tanto no trabalho como na vida. E a todos os outros colegas do LaPSEE. Ao professor Dr. José Roberto Sanches Mantovani pela orientação deste trabalho. A FEPISA e a CAPES pelo apoio financeiro.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim” Nikola Testa

Resumo

Neste trabalho propõe-se um método para a localização de faltas que, em conjunto com a lógica de um relé diferencial numérico, deve ser usado para proteção de linhas de transmissão com compensação série controlada por tiristores (TCSC). Este método visa solucionar o problema de localização de faltas melhorando a precisão dos algoritmos que utilizam medições de sinais de tensão e corrente numa terminação da linha de transmissão. O cálculo da distância entre a terminação da linha de transmissão e o ponto de incidência da falta é realizado utilizando dois procedimentos: um para faltas produzida no trecho entre a terminação local da linha de transmissão e o TCSC; e o outro para faltas no trecho entre o TCSC e a terminação remota. A detecção do trecho de incidência da falta é obtido usando as medições de escorregamento angular dos sinais de corrente em ambos os extremos da linha de transmissão e a medição da resistência de falta no extremo local, que é variável durante o intervalo de início até um ciclo depois da ocorrência da falta. A aplicação da lógica difusa na comparação destas medições permite detectar com precisão o trecho com falta. O método proposto foi testado usando um sistema teste da literatura onde múltiplos casos de faltas em diferentes pontos da linha de transmissão foram simulados. Os resultados mostram a capacidade do algoritmo em localizar precisamente a posição de ocorrência da falta.

Palavras-chaves: Linhas de transmissão. Proteção diferencial. Localizador de faltas. Compensação série controlada por tiristores (TCSC).

Abstract

This paper proposes a methodology for locating faults in transmission lines with thyristor-controlled series compensation (TCSC) that are protected by numerical differential relays. The proposed methodology aims to overcome problems of fault location improving the accuracy of algorithms that use voltage and current measurement signals from a transmission line termination. The calculation of the distance between the transmission line termination and the fault incidence point employs two procedures: one for faults in the transmission line section limited by the local termination and TCSC; and other for faults in the section limited by the TCSC and remote termination. The detection of the fault incidence section is achieved using measurements of angular deviation for both transmission line terminations and the measurement of fault resistance in the local termination, which varies during the interval from the beginning to one cycle after the fault occurrence. The use of fuzzy logic for comparing these measurements permits the accurate detection of the fault incidence section. The proposed method is tested using a test system from literature system where multiple fault cases in different positions of the transmission line are simulated. The results show the algorithm capability to locate accurately the position of fault occurrence.

Keywords: Transmission lines. Differential protection. Fault locator. Thyristor controlled series compensation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Funcionamento do TCSC.....	21
Figura 2	- Formas de onda das tensões e corrente nos ramos.....	22
Figura 3	- Impedância equivalente do TCSC vs. ângulo de disparo.....	23
Figura 4	- Compensação série na linha.....	24
Figura 5	- Modo de operação by-pass do TCSC.....	25
Figura 6	- Modo de operação de bloqueio do TCSC.....	25
Figura 7	- Modo de operação capacitiva do TCSC.....	26
Figura 8	- Modo de operação indutivo do TCSC.....	27
Figura 9	- Capacidade máxima de reatância do TCSC vs. corrente na linha de transmissão.....	29
Figura 10	- Sistema de proteção do TCSC.....	30
Figura 11	- Estratégia de controle constante de corrente.....	32
Figura 12	- Sistema de sincronismo PLL.....	33
Figura 13	- Gerações dos pulsos de disparos para os tiristores.....	33
Figura 14	- Características do relé MHO.....	36
Figura 15	- Zonas de proteção tradicionais dos relés de distância.....	37
Figura 16	- Relé diferencial de linha.....	38
Figura 17	- Zonas de operação do relé diferencial de linha.....	39
Figura 18	- Arquitetura do localizador de faltas.	42
Figura 19	- Resposta em frequência dos filtros passa-baixa.	43
Figura 20	- Sinal da Componente DC.	45
Figura 21	- Limites angulares dos tipos de falta usando, (a) sequência negativa vs sequência positiva e (b) sequência negativa vs sequência zero.....	49
Figura 22	- Incremento dos limites angulares para detectar o tipo de falta (a), sequência negativa vs sequência positiva e (b) sequência negativa vs sequência zero.....	50
Figura 23	- Limites angulares dos tipos de falta usando (a) sequência negativa vs sequência positiva faltas e (b) sequência negativa vs sequência zero.....	51
Figura 24	- Detecção da posição da falta com relação ao TCSC.....	52
Figura 25	- Comparação dos escorregamentos para faltas nos trechos FA e FB.....	53
Figura 26	- Escorregamento angular dos sinais de corrente para uma falta fase A-terra.	53
Figura 27	- Medição do escorregamento angular no estado transitório, (a) falta A-B-C-T com fluxo direto e (b) falta A-B-C-T com fluxo inverso.....	54
Figura 28	- Medição do escorregamento angular com fluxo inverso falta A-B-C-T, (a) medição do terminal local (b) medição do terminal remoto.....	55
Figura 29	- Diagrama esquemático da metodologia baseada em lógica difusa para obter a posição da falta com relação a posição relativa do TCSC.	55
Figura 30	- Escorregamento angular para diferentes resistências de falta.....	58
Figura 31	- Fuzzificação do escorregamento angular da corrente de falta.....	59

Figura 32	- Diagrama esquemático do localizador de faltas associado com o relé diferencial em linhas de transmissão com compensação série.....	60
Figura 33	- Circuito equivalente monofásico para uma falta produzida no trecho FA.....	61
Figura 34	- Circuito equivalente monofásico para uma falta produzida no trecho FB.....	62
Figura 35	- Rede de sequência positiva pré-falta.....	63
Figura 36	- Rede de sequência positiva incremental.....	64
Figura 37	- Rede de sequência negativa.....	64
Figura 38	- Rede de sequência zero.....	65
Figura 39	- Sistema teste de linha de transmissão com compensação série TCSC.....	68
Figura 40	- Resposta em frequência do módulo do filtro passa baixas projetado.	70
Figura 41	- Resposta em frequência da fase do filtro passa baixas projetado.....	70
Figura 42	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente de ambos terminais da linha de transmissão, terminal local (a), terminal remoto (b)	71
Figura 43	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente de ambos terminais da linha de transmissão: terminal local (a) e, terminal remoto (b)	72
Figura 44	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, terminal local (a) e, terminal remoto (b)	73
Figura 45	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, (a) terminal local e (b) terminal remoto.....	73
Figura 46	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, (a) terminal local e (b) terminal remoto.....	74
Figura 47	- Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, terminal local (a) e, terminal remoto (b)	75
Figura 48	- Escorregamento angular de uma fase medida no terminal local.....	76
Figura 49	- Escorregamento angular de uma fase medido no terminal local em um ciclo após a incidência da falta.....	76
Figura 50	- Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.....	83
Figura 51	- Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.....	84
Figura 52	- Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.....	85
Figura 53	- Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.....	86
Figura 54	- Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Relações angulares para classificar os diferentes tipos de faltas....	49
Tabela 2	- Relações angulares para classificar os diferentes tipos de faltas....	51
Tabela 3	- Medição do escorregamento angular segundo o tipo de falta e o sentido do fluxo.....	57
Tabela 4	- Coeficientes da tensão e corrente para todos os tipos de falta.....	66
Tabela 5	- Parâmetros do sistema teste.....	69
Tabela 6	- Resultados para faltas a montante do TCSC.....	77
Tabela 7	- Resultados para faltas a jusante do TCSC.....	78
Tabela 8	- Resultados para faltas a montante do TCSC.....	79
Tabela 9	- Resultados para faltas a jusante do TCSC.....	79
Tabela 10	- Resultados para faltas a montante do TCSC.....	80
Tabela 11	- Resultados para faltas a jusante do TCSC.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D	Analógico–Digital
ATP	Alternative Transients Program
DC	Corrente Direta
DFT	Transformada Discreta de Fourier
EAT	Extra Alta Tensão
EMTP	Electromagnetic Transients Program
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PI	Proporcional Integral
PLL	Phase-Locked Loop
PMUs	Phasor Measurement Units
MATLAB	MATrix LABoratory
MOV	Metal Oxide Varistor
RSS	Ressonância Sub Síncrona
SC	Series Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TCSC	Thyristor-Controlled Series Compensation
UPFC	Unified Power Flow Controller

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de disparo dos tiristores.
β	Ângulo de defasagem entre os sinais de entrada do comparador de fase.
ω	Frequência angular do sistema de potência.
ω_0	Frequência angular de ressonância.
ϖ	Parâmetro de desempenho do TCSC.
f_e	Frequência natural de oscilação de um sistema com compensação série.
f_0	Frequência do sistema de potência (frequência síncrona).
ΔI_A	Diferencial de corrente de linha.
R_F	Resistência de falta.
V_F	Tensão de falta.
T_s	Frequência de amostragem.
Z_{1L}	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
Z_{0L}	Impedância de sequência zero da linha de transmissão.
$I_{TCR(\alpha)}$	Corrente no reator controlado por tiristores.
V_{cap}	Tensão através do capacitor.
X_{TCR}	Reatância do reator controlado por tiristores.
X_C	Reatância do capacitor.
X_{TCSC}	Reatância equivalente do TCSC.
V_{REF}	Tensão de referência de ativação do varistor.
v_{MOV}	Tensão através do varistor.
I_{MOV}	Corrente no varistor.
τ	Constante de tempo de decaimento do sinal.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
1.1.1	Localização de faltas em linhas de transmissão com medição de um terminal.....	16
1.1.2	Localização de faltas em linhas de transmissão com medição de dois terminais.....	17
1.1.3	Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série fixa.....	17
1.1.4	Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série controlável.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.3	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO.....	19
2	A COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	21
2.1	COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTORES (TCSC).....	21
2.2	GRAU DE COMPENSAÇÃO.....	24
2.3	MODOS DE OPERAÇÃO.....	24
2.3.1	Modo <i>by-pass</i>.....	24
2.3.2	Modo de bloqueio.....	25
2.3.3	Modo capacitivo.....	26
2.3.4	Modo indutivo.....	26
2.4	DIMENSIONAMENTO DO TCSC.....	27
2.5	LIMITES DE OPERAÇÃO.....	28
2.6	SISTEMA DE PROTEÇÃO DO TCSC.....	29
2.6.1	Descarregador.....	30
2.6.2	Centelhador.....	30
2.6.3	Disjuntor <i>by-pass</i>.....	31
2.7	SISTEMA DE CONTROLE DO TCSC.....	31
2.7.1	Sistema de controle constante de corrente.....	31
2.7.1.1	<i>Circuito de sincronismo PLL.....</i>	32
2.7.1.2	<i>Geração dos pulsos de disparos.....</i>	33
3	LOCALIZADORES DE FALTAS.....	34
3.1	OBJETIVO E IMPORTÂNCIA DO LOCALIZADOR DE FALTAS.....	34
3.2	LOCALIZADOR DE FALTAS E OS RELÉS DE PROTEÇÃO.....	35
3.3	RELÉS DE PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	36
3.3.1	Relé de proteção de distância.....	36
3.3.2	Relé de proteção diferencial.....	37
3.4	TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	40
3.4.1	Técnica baseada na componente fundamental.....	40
3.4.2	Técnica baseada na teoria de ondas viajantes.....	40
3.4.3	Técnica baseada em componentes de altas frequências.....	41
4	ARQUITETURA DO LOCALIZADOR DE FALTAS.....	42
4.1	FILTRO ANALÓGICO.....	43
4.2	CONVERSÃO ANALÓGICA/DIGITAL (A/D)	44
4.3	FILTRO DA COMPONENTE DC.....	44
4.4	FILTRO DIGITAL.....	47

4.5	DETECTOR DO TIPO DE FALTA.....	48
4.6	DETECTOR DA POSIÇÃO DA FALTA RELATIVA AO TCSC.....	52
4.6.1	Tipo de falta.....	56
4.6.2	Sentido do fluxo de potência de pré-falta.....	56
4.6.3	Medição do escorregamento angular.....	57
4.6.4	Medição da resistência de falta.....	58
4.6.5	Fuzzificação.....	58
4.6.6	Ajustes.....	59
4.6.7	Comparação Fuzzy.....	59
4.6.8	Decisão.....	60
4.7	LOCALIZADOR DE FALTAS.....	60
4.7.1	Localização de faltas no trecho FA.....	61
4.7.2	Localização de faltas no trecho FB.....	62
5	TESTES E RESULTADOS.....	68
5.1	SISTEMA TESTE.....	68
5.2	DADOS DE PROJETO.....	69
5.2.1	Ajustes do escorregamento angular para faltas monofásicas.....	71
5.2.2	Ajustes do escorregamento angular para faltas bifásicas.....	72
5.2.3	Ajustes do escorregamento angular para faltas trifásicas.....	74
5.2.4	Ajustes do escorregamento angular para faltas no trecho FA ou FB.....	75
5.3	RESULTADOS DOS TESTES DO LOCALIZADOR DE FALTAS.....	77
5.3.1	Localizador de faltas com resistência de falta de 2,0 Ohms.....	77
5.3.2	Localizador de faltas com resistência de falta de 10 Ohms.....	78
5.3.3	Localizador de faltas com resistência de 50 Ohms.....	80
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	81
5.5	REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS TESTES NO PLANO R-X	82
5.5.1	Falta monofásica a 5km da linha de transmissão desde o terminal A com Rf de 2 Ohms.....	82
5.5.2	Falta monofásica a 5km da linha de transmissão desde o terminal A com RF de 50 Ohms.....	83
5.5.3	Falta trifásica a 25km da linha de transmissão desde o terminal A com Rf de 2 Ohms.....	84
5.5.4	Falta monofásica a 55km da linha de transmissão a partir do terminal A com Rf de 50 Ohms.....	85
5.5.5	Falta trifásica a 75km da linha de transmissão desde o terminal A com Rf de 50 Ohms.....	86
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	88
6.1	CONCLUSÕES.....	88
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Na incidência de uma falta numa linha de transmissão, é muito importante identificar a sua localização o mais rápido possível, para melhorar a confiabilidade do serviço de restauração da rede. Se o local de falta não pode ser identificado rapidamente, a linha permanece fora de serviço por períodos de tempo prolongados inclusive durante períodos de picos de carga, provocando graves perdas econômicas e colocando em dúvida a confiabilidade do serviço de transmissão. Estes aspectos reforçam a grande importância e a necessidade da localização da falta com precisão e rapidez, especialmente para linhas com compensação série controladas por tiristores TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensation*) que possuem centenas de quilômetros de extensão (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

As técnicas de localização de faltas, baseadas no princípio de medição da impedância, fazendo uso das tensões e corrente de frequência fundamental, são as mais utilizadas. Contudo, estas técnicas são extremamente prejudicadas para a aplicação em linhas com compensação série, devido a impedância do TCSC variar conforme os ângulos de disparos dos tiristores. Durante uma falta estes ângulos têm um comportamento dinâmico que depende da estratégia de controle adotada, fazendo operar o TCSC em seus diferentes modos.

As técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes para localização de faltas em linhas de transmissão usam princípios de ondas produzidas em um curto-circuito, que se propagam com velocidade próxima à velocidade da luz. Este método apresenta boa precisão para a localização de faltas em linha com TCSC, mas requer o emprego de dispositivos de medição com alta frequência de amostragem, e apresenta também dificuldades para localizar faltas com altas resistências de faltas ou faltas com o ângulo de incidência próximo do cruzamento do eixo zero (VÁZQUEZ; CASTRUITA, 2009).

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo para a localização de faltas que pode ser utilizado em relés de proteção diferencial numéricos, que são utilizados para a proteção de linhas de transmissão com compensação série. Este tipo de

algoritmo numérico é de grande interesse para as empresas concessionárias do sistema de transmissão, pois os custos de aquisição de equipamentos adicionais, como os registradores digitais de perturbações são significativamente reduzidos, e podem ser utilizados recursos já disponíveis como o canal de comunicação do relé diferencial do terminal local com o terminal remoto, e a sincronização do tempo baseada no GPS (*Global Positioning Systems*), para informar em tempo real ao centro de operação do local de onde ocorreu a falta, assim agilizando o trabalho da equipe de manutenção, e o retorno à operação da linha de transmissão defeituosa.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Na literatura diversos algoritmos numéricos são propostos para a proteção de linhas de transmissão, com rotinas específicas para a localização de faltas, que têm evoluído em função das características específicas e dos equipamentos instalados nas linhas de transmissão.

1.1.1 Localização de faltas em linhas de transmissão com medição de um terminal

Os relés de distância possuem, convencionalmente, algoritmos utilizados para calcular a distância da barra onde está instalado o relé até o ponto de falta, com uso da medição de tensão e corrente em um terminal. No entanto, um relé de distância não pode obter resultados precisos, já que os parâmetros de entrada são influenciados pelo fluxo de potência, resistência de falta e correntes fluindo pelas outras fases. Takagi et al. (1982), apresentam um método de cálculo da distância à falta baseado em equações trigonométricas hiperbólicas que expressam a queda de tensão no ponto de falta, e a corrente de falta em função da distância ao ponto de falta. Este método usa aproximações trigonométricas, sendo que os resultados apresentam erros em função das características das faltas e da distância à falta.

Wiszniewski (1983), apresenta um algoritmo simples para localização da barra de instalação do relé até a falta, que compensa o erro introduzido pela resistência de falta. Esta compensação baseia-se na estimativa do deslocamento angular da corrente de falta média em um terminal e a corrente que flui pela resistência da falta o que torna possível a localização do curto-circuito, mesmo que a resistência de falta seja relativamente alta.

1.1.2 Localização de faltas em linhas de transmissão com medição de dois terminais

Nestas propostas de trabalho, com o objetivo de obter uma maior precisão para localizar as faltas em linhas de transmissão, utilizam-se medições de tensão e corrente em ambos os terminais da linha de transmissão; estas medições podem ser feitas com ou sem sincronização.

Dalcastagnê et al. (2008), utilizam um algoritmo iterativo para a localização de faltas com medições de fasores de tensão e corrente, não sincronizados, medidos em ambos os terminais da linha de transmissão. Em cada iteração deste algoritmo, estima-se a magnitude da tensão em um ponto da linha de transmissão, com as medições dos fasores de tensão e corrente em ambos terminais, verificando-se que o ponto da linha de transmissão onde se encontra a falta, é o ponto onde as magnitudes das tensões estimadas são iguais ou estão muito próximas.

Izykowski, Rosolowski e Saha (2007), propõem a análise pós-falta dos dados de faltas registrados, em ambos os terminais da linha de transmissão depois da operação dos relés de proteção de distância também instalados em ambos os terminais. Estes dados são processados *off-line*, e o ângulo de sincronização é calculado mediante um processo iterativo. Posteriormente a distância até a falta é calculada com as medições sincronizadas de tensão e corrente em ambos os terminais da linha de transmissão.

1.1.3 Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série fixa

Com a utilização da compensação série em linhas de transmissão, foi necessário o desenvolvimento de algoritmos mais robustos para encontrar o ponto de falta. Saha et al. (1999), apresentam um algoritmo baseado na frequência fundamental, preciso e robusto, para a localização de falhas em linhas com compensação série. O algoritmo utiliza duas sub-rotinas de estimativa da distância da falta. Uma para faltas à montante, e outra para a jusante da compensação série, e um procedimento para a seleção dos resultados da sub-rotina válida. O erro máximo deste algoritmo proposto não excede 2% no cálculo da distância ao local da falta.

Mazniewski e Izykowski (2010), propõem um algoritmo para localizar faltas em linhas de transmissão com compensação série fixa. Este algoritmo é baseado no cálculo da impedância combinado com um algoritmo que detecta a posição da falta com respeito à compensação série. O algoritmo de detecção da posição da falta utiliza a medição do escorregamento angular dos sinais de corrente. Os resultados apresentados no artigo mostram que é possível compensar o impacto negativo da compensação série e o efeito da resistência de falta nas medições.

Saha, Rosolowski e Izykowski (2010) propõem um algoritmo para a localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série que utiliza a medição sincronizada dos

sinais de corrente feita pelos relés de proteção diferencial nos terminais da linha de transmissão, e a medição da tensão no terminal local. Dependendo da posição da falta, o algoritmo de localização utiliza uma sub-rotina de cálculo para localizar faltas produzidas a montante, e outra sub-rotina para localizar faltas a jusante da compensação série. Como resultado da utilização deste método a funcionalidade dos relés de proteção diferencial é aumentada de forma significativa, já que além de proteger a linha de transmissão, também localiza a falta.

1.1.4 Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série controlável

A compensação série controlável, de acordo com algum tipo de controle, pode ser usada com sucesso em sistemas de transmissão com vistas a controlar o fluxo de potência na rede, aliviar sobrecargas, e problemas de congestionamentos em linhas de transmissão.

Na condição de ângulo de disparos dinâmicos do dispositivo de compensação série, os localizadores de falta devem considerar a influência do controle dinâmico destes dispositivos, em condições de faltas. Para calcular o local da falta onde se originou a falta, em Yu et al. (2002), apresenta-se um algoritmo baseado nas PMUs (*Phasor Measurement Unit*), sincronizados de tensão e corrente em ambos terminais da linha com compensação série. O algoritmo de localização é composto por dois passos, onde o primeiro é a pré-localização da falta, e o segundo é a correção que é utilizada para calcular a queda de tensão e posteriormente a localização da falta.

Nobakhti e Akhbari (2014), propõem a utilização de medições de tensão e corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, usando uma modelagem do TCSC e da linha de transmissão no domínio do tempo. O algoritmo proposto consiste de duas sub-rotinas, uma para o cálculo do ponto de falta e a outra para indicar a posição da falta baseada no cálculo da resistência fictícia de falta média obtida no primeiro ciclo do início da falta. Os resultados confirmam a capacidade do indicador apontar a posição da falta e a precisão do algoritmo localizador de faltas.

Reyes-Archundia et al. (2015) propõem um método para a localização de faltas em linha com SSSC (Static Synchronous Series Compensator) baseado na aplicação da transformação modal dos sinais de tensão e corrente amostrados em alta frequência, e com ajuda da transformada wavelet são calculadas as ondas viajantes de tensão e corrente, evitando a interferência de baixa frequência gerada pelo sistema SSSC. Usando a teoria de reflexão de

ondas, são obtidas expressões simples para a detecção e localização das faltas. Os resultados mostram uma alta precisão com erro médio menor que 1%.

1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo de localização de faltas, para linhas de transmissão com compensação série TCSC, que possa ser inserido na função de registrador de perturbações do relé proteção diferencial de corrente, que compense os efeitos da resistência de falta, sentido do fluxo de potência pré-falta e principalmente a impedância variável do TCSC. Avaliar o desempenho deste localizador, comparado com os localizadores de faltas implementados nos relés de proteção de distância tradicionais, usados para proteção de linhas de transmissão.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Dentre as contribuições desta dissertação, destaca-se a proposta de um algoritmo localizador de faltas que funcione como uma função auxiliar do relé diferencial, com capacidade de contemplar as diferentes condições de faltas, tais como o sentido do fluxo de potência de pré-falta, que dificulta o correto funcionamento do detector do tipo de falta. Neste trabalho, adicionou-se ao algoritmo localizador de faltas, uma sub-rotina que detecta corretamente o tipo de falta para os dois sentidos do fluxo de potência de pré-falta. Também foi adicionado um algoritmo auxiliar baseado no escorregamento angular dos sinais de correntes, que detecta corretamente a posição da falta, nos diferentes cenários, como os diversos tipos de faltas, sentidos dos fluxos de potência de pré-falta e diferentes valores das resistências de faltas.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório sobre o problema de localização de faltas e revisão de alguns trabalhos da literatura utilizados durante o desenvolvimento desta dissertação, este trabalho é constituído por mais cinco capítulos. No capítulo 2 descrevem-se os princípios da compensação série, onde são apresentados e detalhados os modos de operação, dimensionamentos, o sistema de controle, disparo e proteções da compensação série controlada.

No capítulo 3 apresentam-se os aspectos teóricos das diferentes técnicas utilizadas para a localização de faltas em linhas de transmissão, usando as medições em um terminal e em ambos os terminais.

No capítulo 4, toda a estrutura do localizador de faltas proposto é apresentada assim como o as funções auxiliares, e funcionalidade de cada etapa do algoritmo.

No capítulo 5 apresentam-se os dados do sistema teste, parâmetros de projeto dos filtros utilizados e as análises dos resultados da metodologia proposta.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais deste trabalho, e as sugestões para os trabalhos futuros.

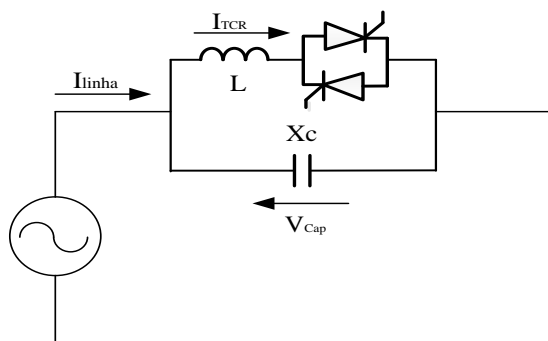
2 A COMPENSAÇÃO SÉRIE

A compensação série é a solução mais econômica para aumentar o fluxo de potência, e tem sido utilizado com sucesso em linhas de transmissão de EAT (Extra Alta Tensão) de longas distâncias para aumentar a transferência de potência. O uso de tiristores por fornecer controle variável da compensação série através de capacitores os torna atraentes no emprego em linhas longas com a grande vantagem que o problema da ressonância sub-síncrona é significativamente reduzido. A viabilidade de um controle rápido das chaves dos tiristores permite a melhora da estabilidade e amortecimento das oscilações de potência usando estratégias de controle adequadas (PADIYAR, 2007).

2.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTORES (TCSC)

O capacitor série controlado por tiristores é um capacitor fixo conectado em paralelo com um reator controlado por tiristores TCR (Thyristor Controlled Reactor), como ilustrado na Figura 1.

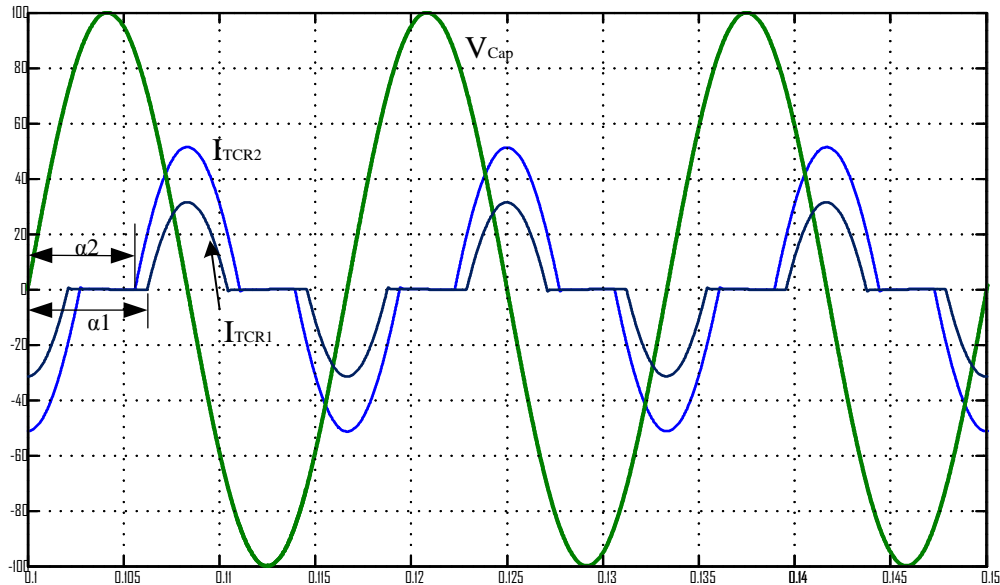
Figura 1 - Funcionamento do TCSC.



Fonte: Padiyar (2007).

Os chaveamentos dos tiristores são sincronizados em determinados ângulos de disparos que limitam a quantidade de corrente que passa pelo reator, sendo estas correntes diferentes para cada ângulo de disparo, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Formas de onda das tensões e corrente nos ramos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 2 verifica que as formas de onda não são senoidais, mas estas ondas podem ser descompostas mediante o uso de série de Fourier, em suas componentes harmônicas, e através da equação (1) obtém-se a componente fundamental da corrente no reator, em função do ângulo de disparo “ α ”(MONDAL; CHAKRABARTI; SENGUPTA, 2014).

$$I_{TCR(\alpha)} = \frac{V_{Cap}}{\omega L} \left(1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{\pi} \right) \quad (1)$$

Na equação (2) a corrente no indutor varia conforme o ângulo de disparo, a reatância do reator também varia conforme este ângulo (MATHUR; VARMA, 2002).

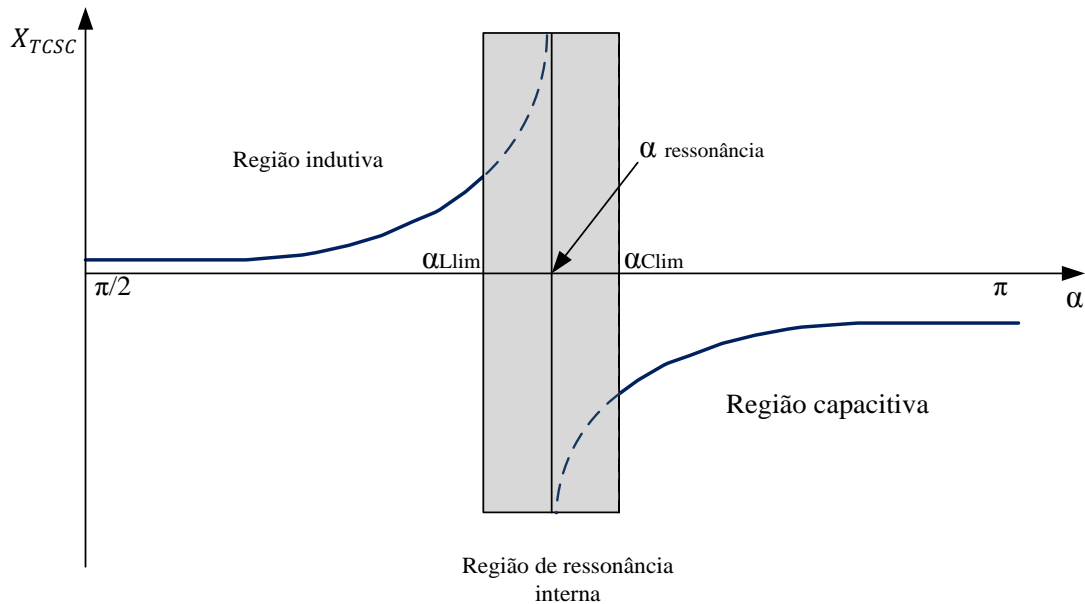
$$X_{TCR} = \frac{V_{Cap}}{I_{TCR(\alpha)}} \quad (2)$$

Finalmente em (3), tem-se o cálculo da impedância equivalente entre o capacitor fixo e o TCR (PADIYAR, 2007).

$$X_{TCSC} = \frac{X_C}{\left(1 - \frac{X_C}{X_{TCR}} \right)} \quad (3)$$

A impedância equivalente, dada pela equação (3), tem uma região que é muito grande, e esta região é chamada de região de ressonância interna, na qual os ângulos de disparos estão proibidos, como ilustrado na Figura 3, onde se observa o comportamento da impedância equivalente do “ X_{TCSC} ” em função da variação do ângulo de disparo “ α ”.

Figura 3 - Impedância equivalente do TCSC vs. ângulo de disparo.



Fonte: Padiyar (2007).

A equação (4) modela o comportamento da impedância equivalente segundo o ângulo de disparo (MATHUR; VARMA, 2002).

$$X_{TCSC}(\alpha) = -X_C + (X_C + X_{LC}) \left[\frac{2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin(2 \cdot (\pi - \alpha))}{\pi} \right] \dots$$

$$- 4 \frac{X_{LC}^2 \cdot \cos^2(\pi - \alpha)}{X_L} \left[\frac{\bar{\omega} \cdot \tan(\bar{\omega}) \cdot (\pi - \alpha) + \tan(\pi - \alpha)}{\pi} \right] \quad (4)$$

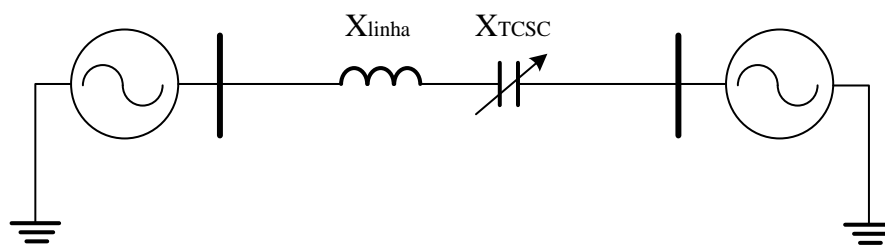
em que:

- X_C Reatância do banco de capacitores do TCSC;
- X_L Reatância do reator controlado por tiristores;
- X_{LC} Reatância equivalente resultante da associação em paralelo entre X_C e X_L ;
- $\bar{\omega}$ Parâmetro de desempenho do TCSC.

2.2 GRAU DE COMPENSAÇÃO

Um modelo simplificado de um sistema de transmissão com compensação série é apresentado na Figura 4. O grau de compensação é a porcentagem da reatância indutiva da linha que está sendo compensada com a impedância equivalente do TCSC, que no modo de operação normal possui reatância variável.

Figura 4 – Compensação série na linha.



Fonte: Borré (2013).

A porcentagem de compensação da linha é calculada através da relação de impedâncias dada pela equação (5) (BORRÉ, 2013).

$$k = \frac{X_{TCSC}(\alpha)}{X_{linha}} \quad (5)$$

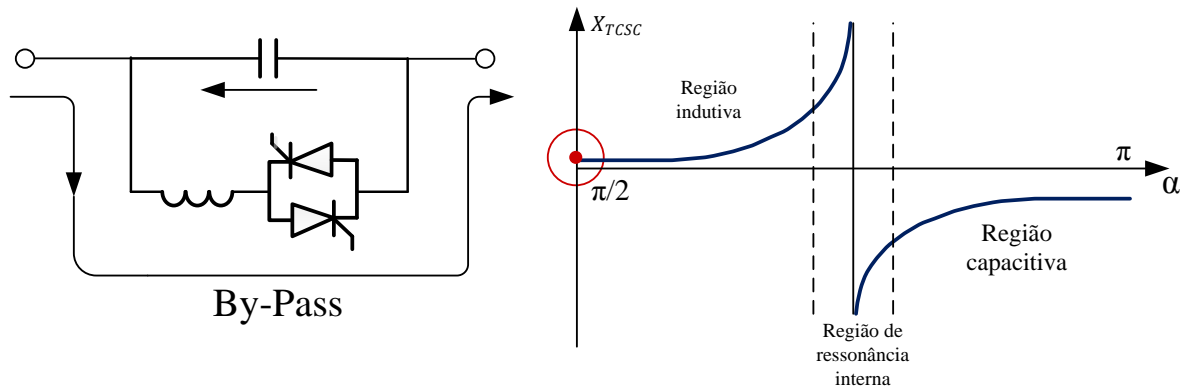
2.3 MODOS DE OPERAÇÃO

Segundo Yedidi e Johnson (2006) o TCSC pode operar, dependendo da condição de condução dos tiristores, em quatro modos diferentes.

2.3.1 Modo *by-pass*

Neste modo de operação, o ângulo de disparo dos tiristores é ajustado de tal forma que os mesmos conduzam continuamente (α é igual a 90°). O TCSC se comporta como uma ligação em paralelo de banco de capacitores. Este modo é utilizado em condições de falta para diminuir a corrente de falta, (GONÇALVES, 2007). Na Figura 6 ilustram-se os fluxos de corrente no TCSC e os pontos de operação.

Figura 5 – Modo de operação *by-pass* do TCSC.

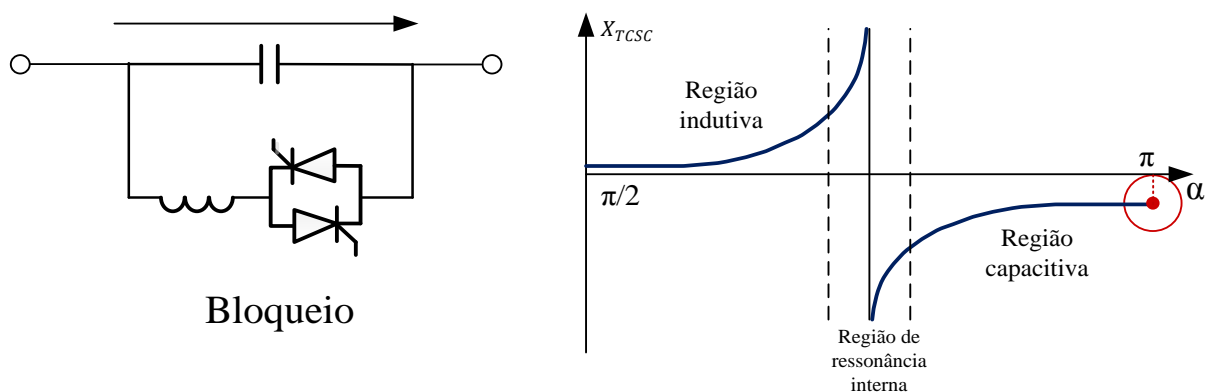


Fonte: Adaptado de Mathur e Varma (2002).

2.3.2 Modo de bloqueio

O sinal de disparo dos tiristores não é acionado neste modo, e os tiristores são mantidos em estado de não condução, a corrente de linha passa apenas através do banco de capacitores, e o TCSC opera como um banco fixo de capacitores Gonçalves (2007), e o ângulo de disparo, α é igual a 180° . Este modo é usado para a proteção dos tiristores ante um elevado fluxo de corrente como é ilustrado na Figura 6.

Figura 6– Modo de operação de bloqueio do TCSC.

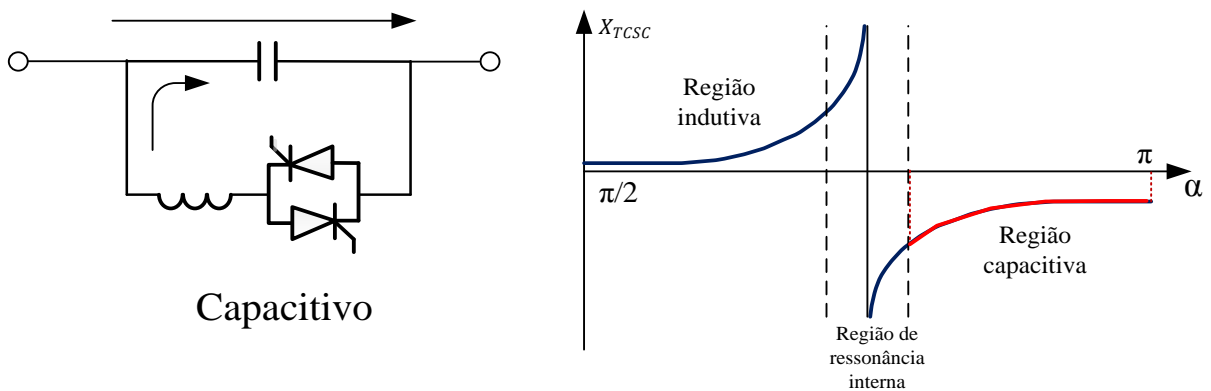


Fonte: Adaptado de Mathur e Varma (2002).

2.3.3 Modo capacitivo

Trata-se da faixa de operação capacitiva do TCSC, para a qual a corrente que flui pelo capacitor é aumentada em função dos pulsos de corrente no reator. Neste caso o TCSC funciona como um capacitor variável com ângulo de disparo α , variando de 180 graus até o limite entre região capacitiva e a região de ressonância, como é ilustrado na Figura 7.

Figura 7– Modo de operação capacitiva do TCSC.

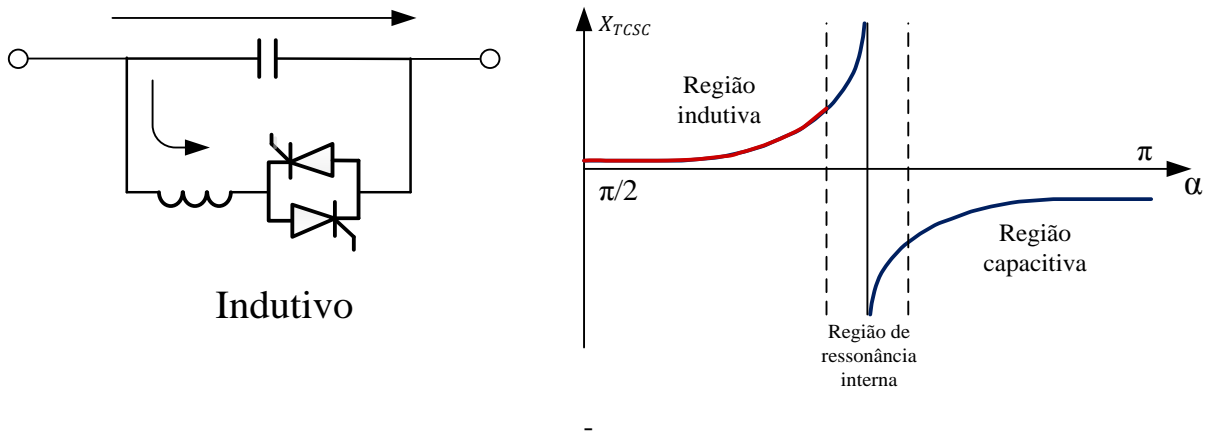


Fonte: Adaptado de Mathur e Varma (2002).

2.3.4 Modo indutivo

O TCSC neste caso funciona como um indutor variável. Este modo de operação não é comumente utilizado, mas é interessante para a análise do comportamento dinâmico durante as condições de faltas. Os ângulos de disparo α vão desde 90 graus até o limite entre a região indutiva e a região de ressonância, como é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Modo de operação indutivo do TCSC.



Fonte: Adaptado de Mathur e Varma (2002).

2.4 DIMENSIONAMENTO DO TCSC

O dimensionamento da compensação série deve ser feito através de estudos de regime permanente, em condições normais e de emergência, ressonância sub-síncrona, transitórios eletromecânicos e de sobretensões dinâmicas (CARDOSO JUNIOR; FIGUEIREDO, 1997).

Na expressão (5), devido o grau de compensação k , encontrar-se normalmente compreendido na faixa de 25 a 70% da reatância da linha de transmissão a ser compensada, os valores de compensação abaixo de 25% são economicamente inviáveis, enquanto que valores acima de 70% aumentam consideravelmente a probabilidade de ocorrência de fenômenos indesejáveis, como a ressonância sub-síncrona (RSS).

Para dimensionar o TCSC, primeiro determina-se o fator de desempenho do TCSC, $\bar{\omega}$, correspondente à razão da frequência de ressonância do TCSC com a frequência da rede pela equação (6). O controle deste parâmetro pode contribuir para a mitigação de harmônicos, custo do projeto e para a obtenção de um único ponto de ressonância. Os valores típicos para o referido parâmetro estão compreendidos entre 2,4 e 2,75. Se o valor do parâmetro $\bar{\omega}$ não estiver dentro da referida banda, há riscos de surgirem outros pontos de ressonância, o que reduz o universo da região de atuação do TCSC (TENÓRIO, 1995 citado por GONÇALVES, 2007).

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_o}{\omega} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (6)$$

ω_o Frequência de ressonância do TCSC.

ω Frequência do sistema elétrico.

Dependendo do valor de $\bar{\omega}$ projetado, deve-se determinar o ângulo de disparo que produz a ressonância de acordo com a equação (7), o qual deve ser evitado (PADIYAR, 2007).

$$\beta_{\infty} = \frac{\pi}{2\bar{\omega}} \quad (7)$$

O valor da reatância do capacitor fixo que deve ser utilizado no TCSC é apresentado pela equação (8) (PADIYAR, 2007).

$$X_C = m_o \cdot X_{Linha} \quad (8)$$

Em que “ m_o ” corresponde ao menor grau de compensação efetuado pelo TCSC, e isto significa que este valor de compensação mínima capacitiva para o modo de bloqueio usualmente é de 25%.

Uma vez conhecido o valor da reatância do capacitor fixo do TCSC, procede-se para determinar o valor da indutância do ramo do TCR mediante a expressão (9) (PADIYAR, 2007).

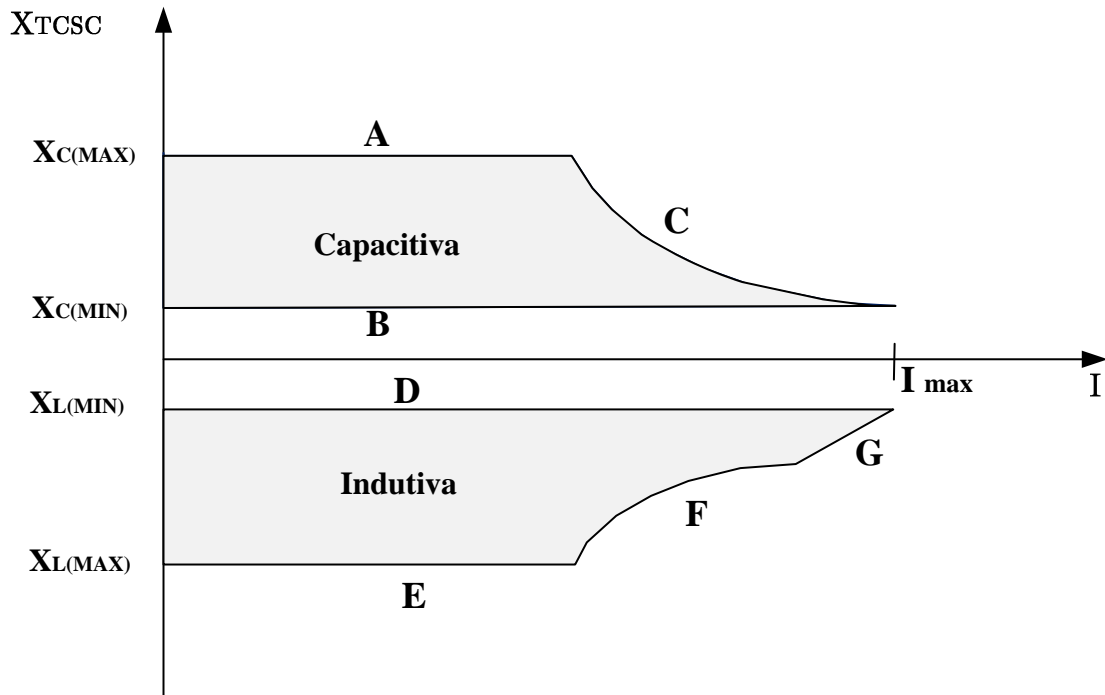
$$X_L = \frac{X_C}{\omega^2} \quad (9)$$

Com os valores das reatâncias do capacitor e indutor, tem-se dimensionado o TCSC que será instalado na linha.

2.5 LIMITES DE OPERAÇÃO

Na Figura 9 ilustra-se a curva de capacidade de reatância do TCSC em função da corrente que passa pela linha de transmissão, destacando todos os seus limites operativos (MATHUR; VARMA, 2002).

Figura 9 – Capacidade máxima de reatância do TCSC vs. corrente na linha de transmissão.



Fonte: Gonçalves (2007).

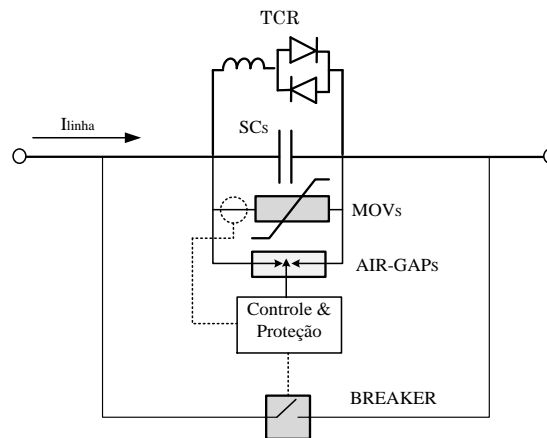
Os limites das regiões são definidos em (MATHUR; VARMA, 2002)

- A - Limite mínimo do ângulo de disparo na região de operação capacitiva;
- B - Tiristores bloqueados (indicando que toda corrente flui pelo capacitor);
- C - Limite de tensão máxima no capacitor;
- D - Tiristores em condução total;
- E - Limite máximo do ângulo de disparo na região de operação indutiva;
- F - Limite de aquecimento harmônico;
- G - Limite de corrente máxima no TCSC.

2.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO DO TCSC

O TCSC tem seu próprio sistema de proteção frente aos diversos fenômenos como sobretensões e sobrecorrentes como é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Sistema de proteção do TCSC.



Fonte: Adaptado de Maźniewski e Rosolowski (2009).

2.6.1 Descarregador

O descarregador MOV (*Metal Oxid Varistor*) é responsável da proteção do banco de capacitores em caso de faltas ou sobrecargas na linha de transmissão onde o mesmo se encontra instalado. Este componente de proteção é conectado em paralelo com os bancos de capacitores, possibilitando, dessa forma, o desvio da corrente de falta. Para condições normais de operação, a impedância do MOV é elevada, entretanto, à medida que a tensão sobre os capacitores se eleva, sua impedância é reduzida para propiciar um maior desvio de corrente. O MOV permite a reinserção imediata dos capacitores após a eliminação de uma falta, uma vez que não é necessário aguardar o tempo de desionização do ar que ocorre com os *gaps* (GONÇALVES, 2007).

2.6.2 Centelhador

No caso de um evento em que o nível protetivo do MOV seja ultrapassado, o MOV passa a ser protegido por um *gap*. A sua atuação é ultrarrápida, em torno de 5 ms. O esquema de *gap* pode ser de três tipos: *gap* simples (com ou sem resistor de reinserção), *gap* duplo ou *gap* com o MOV. O último tipo é o utilizado para a proteção dos capacitores do TCSC e funciona com o esquema chamado disparo forçado. Tal esquema faz com que o *gap* do TCSC funcione no modo de autoignição no caso de falha do MOV (GONÇALVES, 2007).

2.6.3 Disjuntor by-pass

O disjuntor é fechado em duas situações: na ocasião de uma falta, no caso em que há a superação da capacidade de absorção do MOV e a consequente atuação do *gap*. Neste caso o disjuntor é operado logo após a atuação do *gap*, normalmente em torno de 30 ms, para extinção do arco do *gap*. A outra situação que o disjuntor é fechado é através da operação manual para retirada de operação do TCSC (GONÇALVES, 2007).

2.7 SISTEMA DE CONTROLE DO TCSC

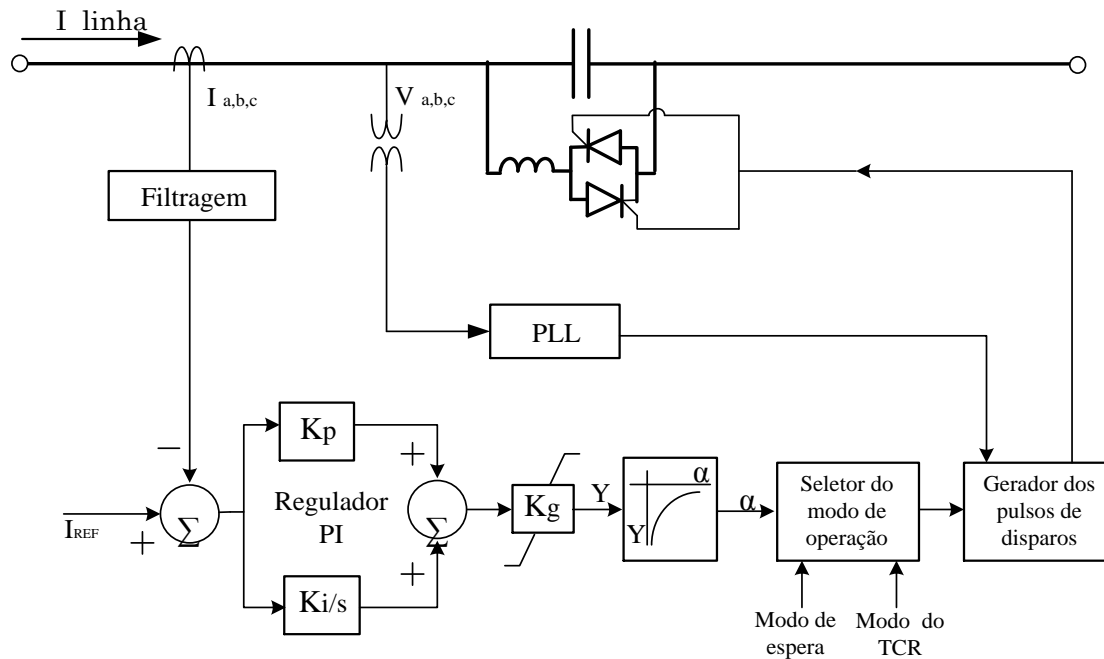
O sistema de controle do TCSC permite que parâmetros, como a corrente de linha, queda de tensão, fluxo de potência, entre outros sejam regulados, mediante o controle dos ângulos de disparo dos tiristores. Dependendo de qual parâmetro pretende-se controlar, elaboram-se as estratégias de controle entre as mais importantes tem-se o controle constante de corrente, controle constante de ângulo e controle constante de potência (MATHUR; VARMA, 2002).

Neste trabalho é adotada a estratégia de controle de corrente constante, por ser o mais utilizado em sistemas de transmissão com TCSC.

2.7.1 Sistema de controle constante de corrente

A estratégia de controle constante de corrente consiste em manter a corrente que vai passar pela linha de transmissão em um nível constante, para isto, especifica-se para o controlador um valor de corrente de referência, que é o nível que a corrente que está passando pela linha de transmissão deve atingir. O sistema de controle atua para manter esta corrente no nível desejado. Um modelo típico do diagrama deste controlador é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Estratégia de controle constante de corrente.

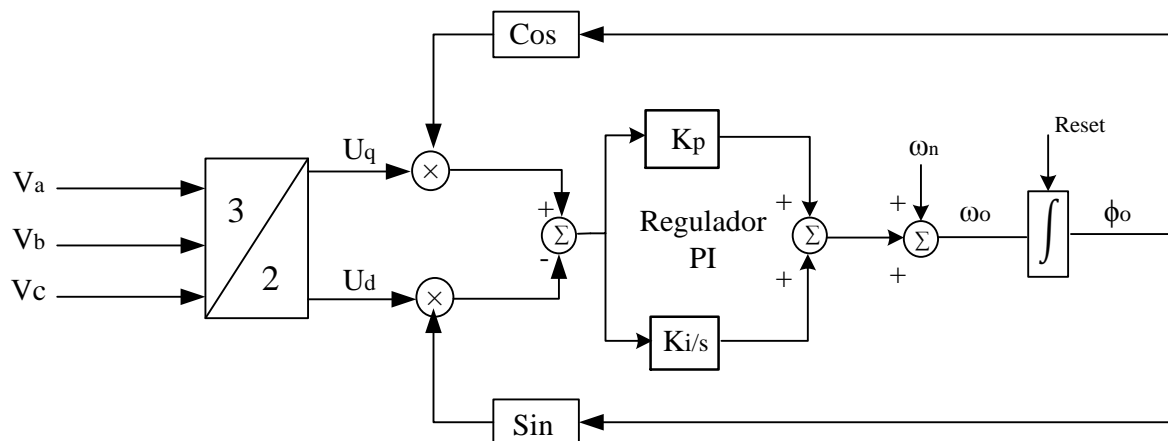


Fonte: Adaptado de Mathur e Varma (2002).

2.7.1.1 Circuito de sincronismo PLL

O circuito de sincronismo tem como objetivo sincronizar o sinal de disparos dos tiristores com o sinal do ângulo em função do tempo da tensão ou corrente, que são tomados como referência, para que a partir destes sinais de referência seja medido o ângulo de disparo desejado. No esquema ilustrado na Figura 11, o PLL recebe como sinais de entrada as tensões trifásicas, e como saída tem-se o ângulo de referência em função do tempo.

Figura 12 – Sistema de sincronismo PLL.

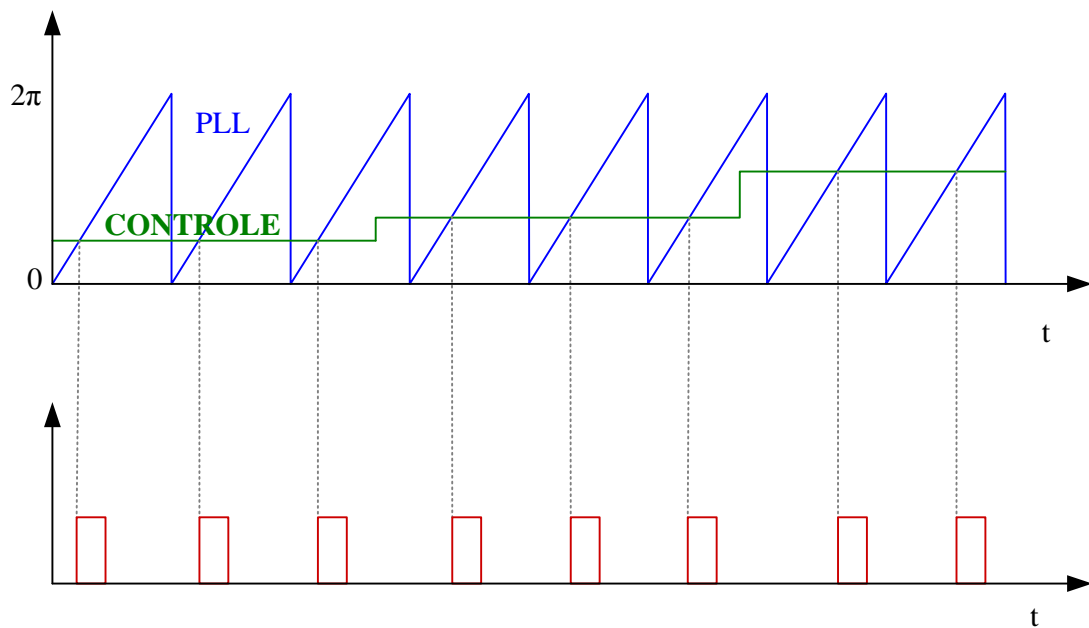


Fonte: Karimi-Ghatemani (2014).

2.9.1.2 Geração dos pulsos de disparos

A geração dos pulsos de disparos é sincronizada com os sinais que são recebidos do seletor de modos de operação do sistema de controle e o sinal do circuito de sincronismo PLL para gerar os pulsos de disparos dos tiristores em função do tempo, como é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Gerações dos pulsos de disparos para os tiristores.



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2007).

3 LOCALIZADORES DE FALTAS

As linhas de transmissão estão sujeitas aos diversos tipos de faltas que podem ser causados por tempestades, raios, neve, chuva de granizo e ruptura no isolamento, curtos-circuitos causados por aves e outros objetos externos. Na maioria dos casos as faltas elétricas manifestam-se em danos mecânicos, que devem ser reparados antes da linha retornar ao serviço. A restauração pode ser acelerada se a localização da falta é conhecida ou pode ser estimada com uma precisão razoável (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOŁOWSKI, 2009).

3.1 OBJETIVO E IMPORTÂNCIA DO LOCALIZADOR DE FALTAS

A localização de falta é um processo que visa encontrar o ponto da linha de transmissão onde ocorreu a falta com a maior precisão possível. O localizador de falta é um equipamento ou um algoritmo de proteção complementar dos relés de distância e diferencial, onde são aplicados algoritmos de localização de falta para estimar a distância das barras das subestações até o ponto em falta.

A função de localização das faltas que pode ser implantada nos seguintes equipamentos depende da metodologia implementada e dos recursos como *software* e *hardware* necessários (IZYKOWSKI, 2008):

- Relés de proteção baseados em microprocessadores;
- Registrador digital de perturbações;
- Detectores portáteis de defeito; e,
- Programas de análise pós-falta.

Na prática inclui-se a função de localização como uma função adicional de relés de proteção baseados em microprocessadores. Neste caso, em função da alta capacidade computacional, comunicação e sincronização com os terminais remotos dos relés de proteção modernos, os localizadores de faltas podem ser implantados com pouco ou quase nenhum custo

adicional. No caso dos registradores digitais de perturbações, eles permitem a fácil e não custosa incorporação da função de localização de faltas. Por sua vez, os detectores de defeito portáteis são utilizados no caso do uso de sofisticados algoritmos de localização de faltas sob a condição que um maior custo de implementação seja aceito. No entanto a outra possibilidade está relacionada com programas de análise pós-falta que tenha o algoritmo de localização de falta. Estes programas são usados principalmente para a verificação da operação dos relés de proteção (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009).

3.2 LOCALIZADOR DE FALTAS E OS RELÉS DE PROTEÇÃO

Os localizadores de falta e os relés de proteção estão diretamente relacionados. No entanto, existem algumas diferenças importantes entre eles. Estas diferenças podem ser consideradas em relação às seguintes características (SACHDEV 1997):

- Precisão na localização de faltas;
- Velocidade de processamento para a determinação da posição da falta;
- Velocidade de transmissão dos dados dos terminais remotos para iniciar o processamento do algoritmo de localização de faltas; e,
- Filtragem digital de sinais de entrada e complexidade dos cálculos.

Os localizadores da falta são utilizados para identificar a posição da falta com precisão e não apenas para indicar se a falta está dentro de uma zona de proteção onde ocorreu uma falta, como é no caso da maioria dos relés de proteção.

A medição e a decisão dos relés de proteção são realizadas em tempo real. A alta velocidade dos relés de proteção aparece como uma exigência crucial imposta para evitar a propagação dos efeitos da falta; a linha com falta tem que ser desconectada o mais rápido possível. Portanto, os algoritmos de medição de alta velocidade são aplicados em relés de proteção de última geração cujo tempo de resposta é da ordem de milissegundos. No caso dos localizadores de falta, em contraste, os cálculos não são realizados em tempo real, uma vez que, eles precisam de análise mais detalhadas dos cálculos, mediante algoritmos mais robustos, sendo que o tempo de localização da falta pode estar na ordem de segundos ou minutos.

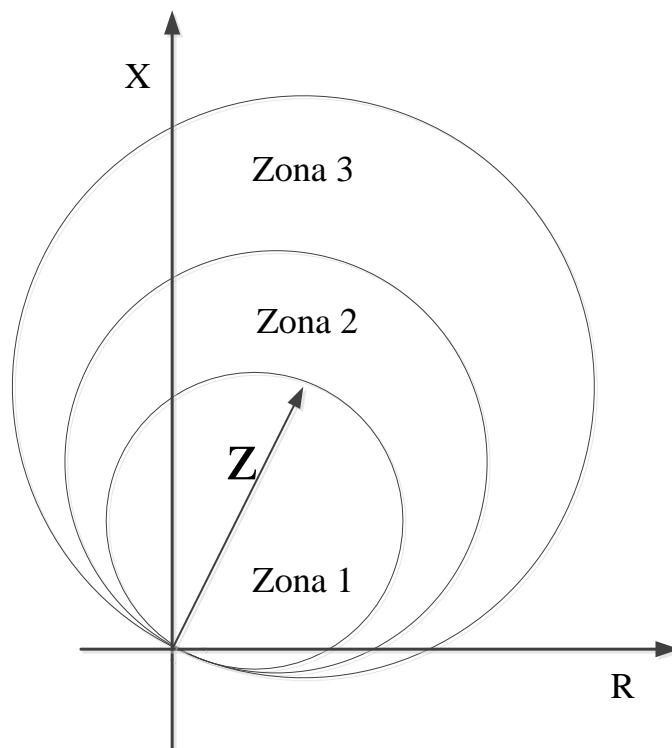
3.3 RELÉS DE PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os relés de proteção são empregados com a função de proteger as linhas de transmissão. Entre os mais usados, destacam-se os relés classificados como de distância (relé de impedância, relé de admitância ou MHO, relés de reatância) e os relés diferenciais.

3.3.1 Relé de proteção de distância

O relé de distância opera quando a impedância do circuito protegido atinge limites predefinidos conhecidos como zona de proteção, cuja forma depende do tipo de relé de distância, que pode ser sensibilizado pelos valores de impedância, admitância, reatância, etc. Neste trabalho utiliza-se para análise o relé de distância tipo MHO, com três zonas de proteção, como está ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Características do relé MHO.



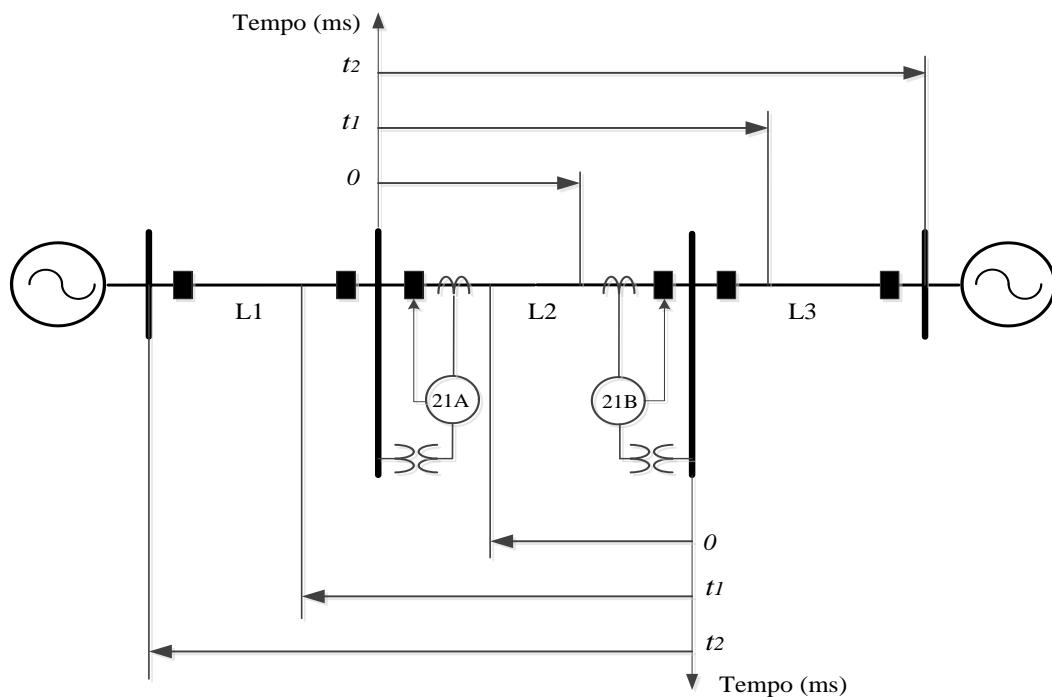
Fonte: adaptado de Alstom (2002).

O relé de distância tem duas funções fundamentais: proteger a linha de transmissão na incidência de faltas, de acordo com a temporização de suas zonas de proteção, sendo que para primeira zona, excetuando-se o tempo de resposta do relé, isto deve ser executado de maneira

instantânea; e, localizar o ponto onde ocorreu a falta, sendo que estas relações são válidas para resistência de faltas iguais a zero.

As zonas de proteção, e os tempos de atuação para as faltas produzidas em cada uma destas zonas dependem das condições e parâmetros estabelecidos pelo projeto de proteção. Normalmente a primeira zona será protegida até X% da linha, e o envio do sinal de *tripping* ao disjuntor é instantâneo. Já a segunda zona será protegida até 100% da linha principal mais Y% da linha adjacente com um retardo intencional de t_1 ms para o envio do sinal de *tripping*, e para terceira zona será protegida até 100% da linha principal mais 100% da linha adjacente com um retardo intencional de t_2 ms, Ordacgi Filho (2005) como está ilustrado no diagrama da Figura 15.

Figura 15 – Zonas de proteção tradicionais dos relés de distância.



Fonte: adaptado de Alstom (2002).

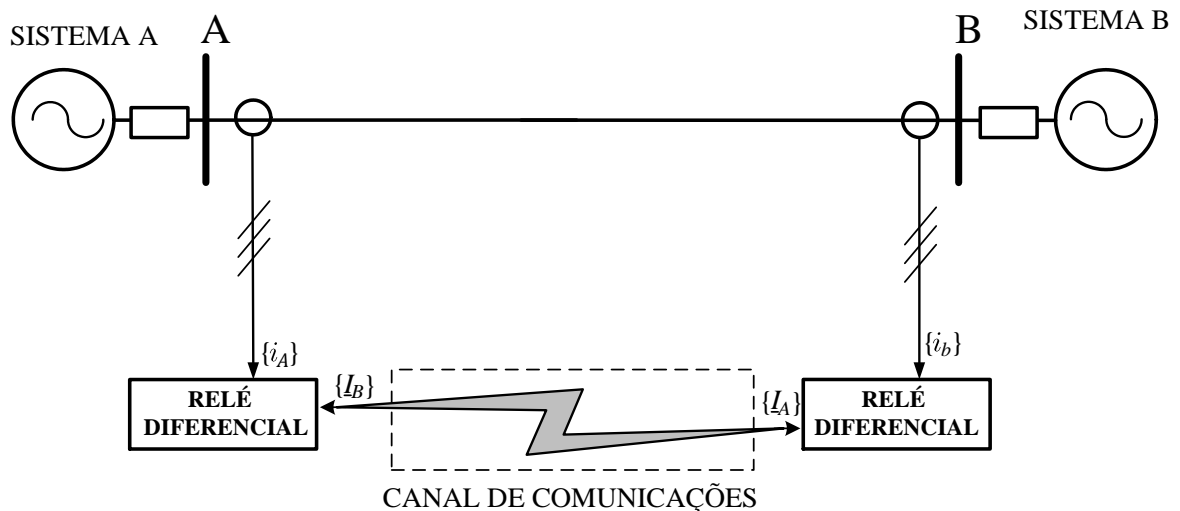
3.3.2 Relé de proteção diferencial

A proteção diferencial é 100% seletiva, portanto só responde a faltas dentro de sua zona protegida. O limite da zona protegida é definido exclusivamente pela posição dos transformadores de correntes, portanto não requer ajustes de tempo de atuação com outros dispositivos do sistema de proteção. Esta característica da proteção diferencial permite enviar o sinal de *tripping* sem retardo adicional, ideal para a proteção principal de elementos

importantes dos sistemas de potência como as linhas de transmissão, transformadores, barramentos e geradores, por exemplo (ZIEGLER, 2012).

Na Figura 16 é ilustrada a conexão dos transformadores de corrente e o canal de comunicações dos relés diferenciais usados para a proteção de linhas de transmissão.

Figura 16 – Relé diferencial de linha.



Fonte: Adaptado de .Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

A aplicação de proteção diferencial em linhas de transmissão, a princípio, é adequada, pois sua atuação não depende da resistência de falta, compensação série, alteração dos níveis de curto-circuito, inversão de corrente, e muitas outras questões relevantes para as técnicas de proteção com base nas medições de um único terminal da linha, como é o caso dos relés de distância (KASZTENNY et al., 2011).

As características de operação destes relés dependem das medições em ambos os terminais da linha. Conforme a relação (9), que representa o módulo da soma dos sinais de corrente dos terminais da linha de transmissão e a relação (10) que representa a soma dos módulos destes sinais (KASZTENNY et al., 2011).

$$I_{DIF} = |I_A + I_B| \quad (9)$$

$$I_{RST} = |I_A| + |I_B| \quad (10)$$

Os relés diferenciais operam quando o módulo da soma da corrente amostrada em ambos os terminais da linha de transmissão dada por (9) estiver acima de um valor constante de ativação, P , como mostra a relação (11).

$$I_{DIF} > P \quad (11)$$

Os relés diferenciais também operam quando a soma dos módulos das correntes de ambos os terminais I_{DIF} são certa porcentagem de I_{RST} , como mostra a equação (12).

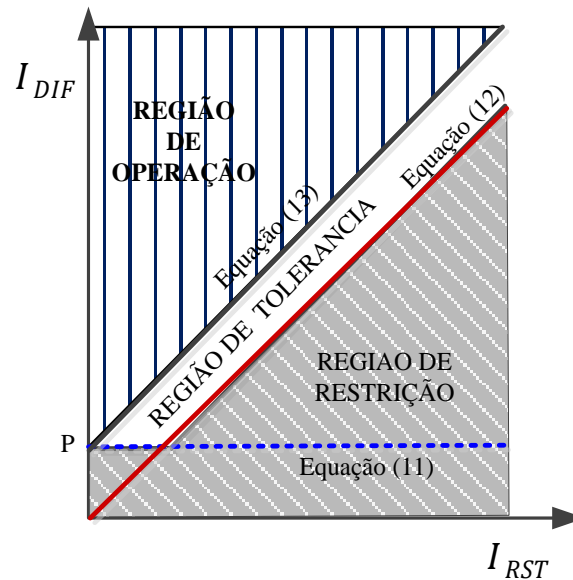
$$I_{DIF} > K \cdot I_{RST} \quad (12)$$

Baseado nas restrições (11) e (12), tem-se a relação (13), e que para acima destes valores o relé diferencial deve enviar o sinal de *tripping* ao disjuntor.

$$I_{DIF} > P + K \cdot I_{RST} \quad (13)$$

Seguindo as relações (11); (12) e (13) pode-se dividir as regiões de operação da curva característica do relé diferencial como se ilustra na Figura 17.

Figura 17 – Zonas de operação do relé diferencial de linha.



Fonte: Adaptado de Kasztenny et al. (2011).

3.4 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Os localizadores de falta são divididos, geralmente, pela técnica utilizada na localização das faltas entre as quais se destacam: técnica baseada na componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, técnica baseada no uso de ondas viajantes e a técnica baseada em componentes de altas frequências.

3.4.1 Técnica baseada na componente fundamental

A técnica baseada na componente fundamental é a técnica mais usada, porque apresenta numerosas vantagens em aplicações reais, fazendo uso das tensões e correntes de frequência fundamental de um, ou de ambos os terminais da linha de transmissão, juntamente com os seus parâmetros. Representa a forma mais simples para a determinação da localização da falta, considerando-se, principalmente, que a impedância calculada do segmento de linha em falta é uma média de distância entre o ponto sob falta e o terminal da linha que está sendo efetuada a medição. Os métodos que pertencem a esta categoria são simples e econômicos para a implementação (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009).

Em função dos sinais de entrada utilizados pelo localizador de faltas, estes métodos se aplicam nos dois terminais da linha para fazer a localização e a classificação do tipo de falta, tendo-se que considerar a disponibilidade das seguintes medições (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009):

- Medição de tensão e corrente em um terminal da linha de transmissão;
- Medição de tensão e corrente em ambos os terminais da linha de transmissão;
- Medições completas (tensão e corrente) em ambos os terminais da linha de transmissão;
- e,
- Medições incompletas (tensão ou corrente) em ambos os terminais da linha de transmissão.

3.4.2 Técnica baseada na teoria de ondas viajantes

A teoria de ondas viajantes vem sendo estudada para fins de detecção e localização de faltas ao longo da linha de transmissão. O princípio desta técnica é baseado na identificação sucessiva de frente de ondas de tensão que viajam a velocidades muito próximas à velocidade da luz, começam no ponto de falta, e viajam em ambos os sentidos, até chegarem aos

barramentos. Assim, uma parte desta é refletida e a outra é refratada. A parte refletida volta a passar pela linha até chegar ao outro barramento, este processo se repete sucessivamente até alcançar o estado estacionário. Nos terminais da linha de transmissão são instalados os detectores que medem o tempo em que chegam estas frentes de onda, e com estas informações pode-se calcular o ponto no qual ocorreu a falta.

Recentemente, as técnicas de ondas viajantes têm emergido como uma alternativa para a localização de faltas. Este aspecto é devido, principalmente, que os serviços públicos de eletricidade desejam que a localização das faltas seja mais rápida, mais precisa, e junto com as melhoras na aquisição de dados como a sincronização do tempo de GPS e os sistemas de comunicação é possível realizar esta tarefa.

3.4.3 Técnica baseada em componentes de altas frequências

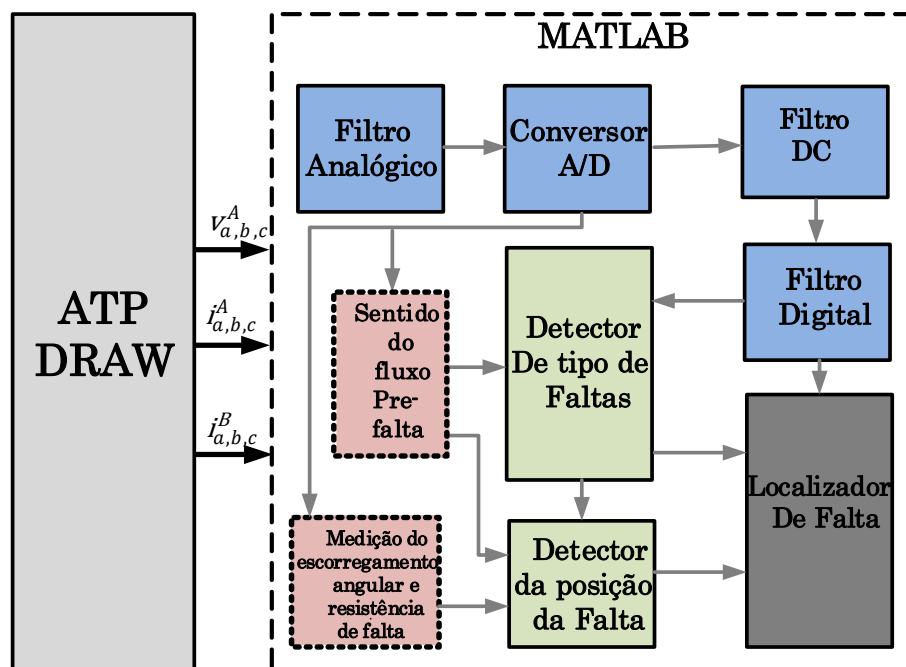
Os padrões de onda gerada pela falta, teoricamente, contêm informações sobre a localização do local da falta que podem ser usadas para localizar a falta com precisão. Entretanto, o método de localização de faltas baseado em ondas viajantes apresenta deficiências quando o ângulo do sinal da tensão no momento da falta é próximo de zero.

A técnica baseada em componentes de alta frequência utiliza as informações dos sinais de tensão e corrente de altas frequências geradas ao produzir uma falta. Estes sinais têm informações do local da falta, nestes casos são imunes às oscilações de potência, cruzamento pelo eixo zero, entre outras. Uma desvantagem desta técnica é o custo na implementação, devido os equipamentos utilizados para a medição dos sinais de alta frequência (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009).

4 ARQUITETURA DO LOCALIZADOR DE FALTAS

O algoritmo de localização de faltas proposto e implementado neste trabalho tem a sua arquitetura ilustrada na Figura 18 que mostra o diagrama de blocos funcionais, as sequências e procedimentos adotados para calcular o ponto de defeito na linha de transmissão com compensação série. As faltas são simuladas na interface gráfica do ATP-EMTP, conhecida como ATPDraw, e, posteriormente, os dados de tensões e correntes gerados nas simulações são salvos com a extensão **mat*, que são carregados e analisados usando o algoritmo proposto no ambiente do software MATLAB. A seguir serão detalhadas as funções e as funcionalidades de cada parte do algoritmo.

Figura 18 - Arquitetura do localizador de faltas.

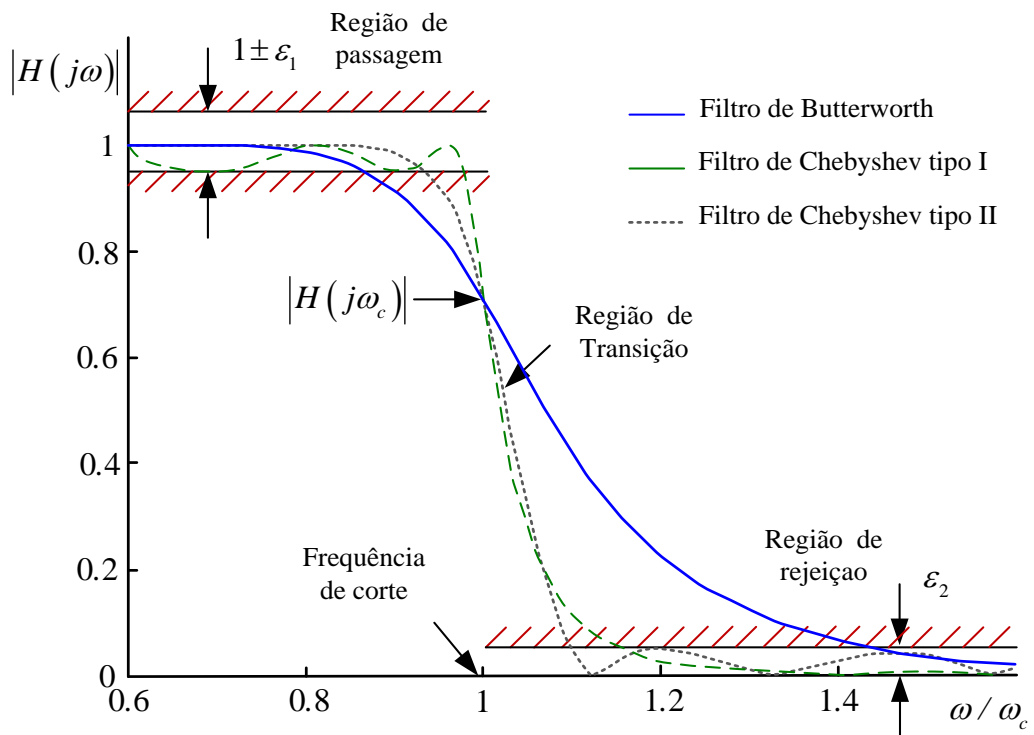


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 FILTRO ANALÓGICO

O filtro analógico, também conhecido como filtro *anti-aliasing*, tem como finalidades a filtragem das componentes de alta frequência que os sinais de tensão e corrente contêm quando ocorrem perturbações transitórias no sistema de transmissão, como um curto-circuito; e limitar a banda do sinal na saída do filtro, para assim evitar o fenômeno de *aliasing*, que pode ser entendido como um “falso sinal” ou “falsa informação”. Desta forma, estas funcionalidades são obtidas usando um filtro passa-baixa, que não deixa passar as altas frequências e a saída do filtro é um sinal de banda limitada. Dentre os diferentes tipos de filtros analógicos disponíveis, foi escolhido o filtro do tipo *Butterworth* de segunda ordem cuja resposta em frequência não produz ondulações na região de passagem e se aproxima de zero na região de rejeição como é ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Resposta em frequência dos filtros passa-baixa.



Fonte: Rebizant, Szafran e Wiszniewski (2011).

4.2 CONVERSÃO ANALÓGICA/DIGITAL (A/D)

Nesta etapa, os sinais de tensão e corrente após a saída do filtro analógico são convertidos em sinais discretos mediante uma amostragem do sinal analógico em cada intervalo de tempo constante, T_S , definido como período de amostragem. A taxa que estas amostras são coletadas é dada pela equação (14), chamada de frequência de amostragem.

$$F_S = \frac{1}{T_S} \quad (14)$$

A escolha da frequência de amostragem está sujeita a restrições como a frequência fundamental do sistema elétrico, f_0 , e a máxima frequência que o filtro analógico deixa passar. A equação (15) especifica que a frequência de amostragem tem que ser múltiplo da frequência fundamental, pois N é um número inteiro positivo.

$$N = \frac{F_S}{f_0} \quad (15)$$

Pelo teorema de amostragem (NYQUIST, 1928) para evitar o fenômeno de *aliasing* a frequência de amostragem tem que ser maior ou igual ao dobro da máxima frequência que o filtro analógico deixa passar (máxima frequência do sinal de banda limitada). O cumprimento destas duas restrições é obrigatório para especificar a frequência de amostragem.

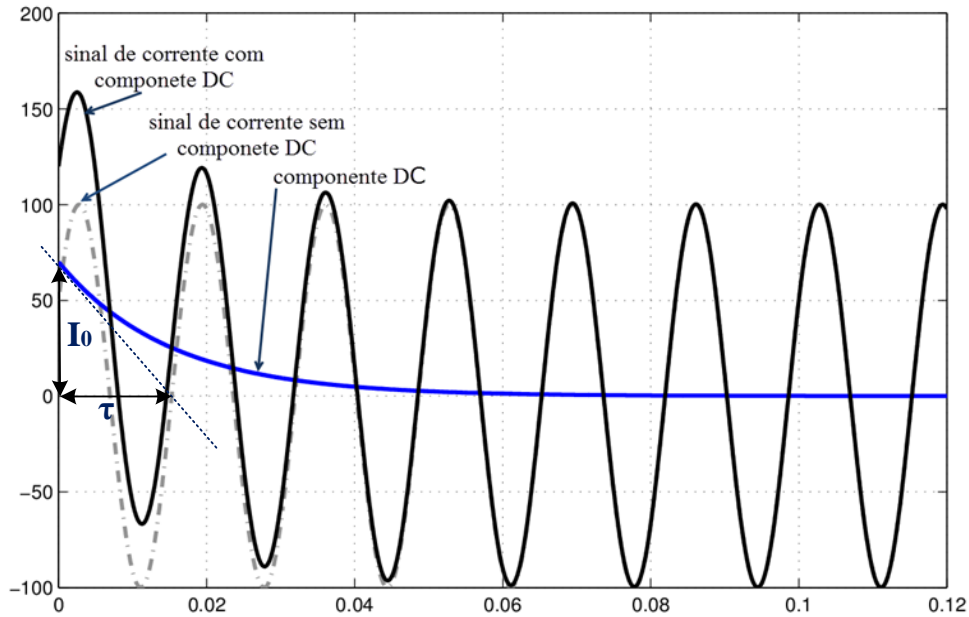
4.3 FILTRO DA COMPONENTE DC

A corrente de falta, além de componentes harmônicas de alta frequência, também possui uma componente DC na forma de uma onda exponencial decrescente que causa oscilações indesejáveis nas medições (CHO et al., 2009). Por isto, é necessária a filtragem prévia desta componente que pode ser representada matematicamente como uma função exponencial que decresce em função do tempo (16).

$$i_{dc}(t) = I_0 e^{-t/\tau} \quad (16)$$

Para eliminar esta componente, primeiro tem-se que estimar a função (16), cujos parâmetros são a máxima amplitude da componente DC, I_0 , e o tempo de decaimento da exponencial τ . Estes parâmetros são imprevisíveis já que dependem da resistência de falta e do ângulo de inserção da falta, sendo estes de natureza aleatória (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009), como se ilustra na Figura 20.

Figura 20 –. Sinal da Componente DC.



Fonte: He, Zeng e Zhang (2013).

Neste trabalho utilizou-se o algoritmo que estima e remove a componente exponencial DC mediante o cálculo prévio dos parâmetros I_0 e τ . Para iniciar estes cálculos parte-se da equação (17) que expressa, matematicamente, a composição da corrente de falta como um somatório da componente DC, componente fundamental e as componentes harmônicas (CHO et al., 2009).

$$i_f(t) = I_0 e^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^p I_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \theta_k) \quad (17)$$

Aplicando a integral definida em um intervalo de tempo T igual ao período da componente fundamental, em ambos os lados da expressão (17), obtém-se (18).

$$\int_{t-T}^t i_f(t) dt = \int_{t-T}^t \left[I_0 e^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^p I_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \theta_k) \right] dt \quad (18)$$

Como a integral da componente fundamental e suas harmônicas são iguais à zero em um período de integração T , a equação (18) é reduzida à equação (19), denominando-se de $Z(t)$ a integral definida da corrente de falta em um período T do lado esquerdo da equação (18).

$$Z(t) = -I_0 \cdot \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 - e^{\frac{T}{\tau}} \right) \quad (19)$$

Denomina-se $Z(t + \Delta t)$ a integral da corrente de falta com o mesmo período de integração, que vai de $(t + \Delta t - T)$ até $(t + \Delta t)$, onde Δt é um pequeno intervalo de tempo, que pode ser expresso em função de $Z(t)$, conforme escrito em (20).

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (20)$$

O objetivo é conhecer o tempo de decaimento τ . Para isso, aproxima-se a função exponencial, $e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$, através da série de Taylor apresentada em (21).

$$e^{-\Delta t/\tau} = 1 + \frac{(-\Delta t)}{\tau} + \frac{(-\Delta t)^2}{\tau^2} + \frac{(-\Delta t)^3}{\tau^3} + \dots = \frac{Z(t + \Delta t)}{Z(t)} \quad (21)$$

Considerando a série somente até o segundo termo, já que os termos $\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)^n$ são muito pequenos quando se aumenta o valor de n obtém-se (22).

$$e^{-\Delta t/\tau} = 1 + \frac{(-\Delta t)}{\tau} = \frac{Z(t + \Delta t)}{Z(t)} \quad (22)$$

Da equação (22) obtém-se o valor de τ de acordo com a equação (23)

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\left(1 - \frac{Z(t + \Delta t)}{Z(t)}\right)}{\Delta t} \quad (23)$$

Uma vez calculado o valor τ substitui-se na equação (21) esse valor para calcular a amplitude máxima da componente exponencial DC, para $t = T$.

$$I_0 = \frac{Z(T)}{\left(-\tau \cdot \left(e^{\frac{T}{\tau}} - 1\right)\right)} \quad (24)$$

Entretanto, somente calcular a máxima amplitude da componente DC no início da falta não é suficiente para remover a componente DC. Portanto necessita-se remover a magnitude da componente DC para todos os instantes posteriores à falta. O cálculo do valor da magnitude da componente DC para um instante Δt depois da falta é obtido multiplicando-se o valor de (25), amplitude da componente DC para $t = 0$, por $e^{-\Delta t/\tau}$ e obtém-se (26).

$$I_0 \cdot e^{-t/\tau} = \frac{Z(t)}{\left(\tau \cdot \left(e^{\frac{T}{\tau}} - 1\right)\right)} \quad (25)$$

$$I_0 \cdot e^{-(t+\Delta t)/\tau} = \frac{Z(t)}{\left(\tau \cdot \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1\right)\right)} \cdot e^{-\Delta t/\tau} \quad (26)$$

O processo se repete sucessivamente para todos os instantes de tempo depois da ocorrência da falta. Este algoritmo precisa de um ciclo da componente fundamental para estimar a componente DC, e uma vez estimada cada amostra procede-se para suprimir a componente DC do sinal da corrente de falta, que foi armazenado previamente a partir do instante que ocorreu a falta.

4.4 FILTRO DIGITAL

Removida a componente DC o sinal é filtrado mediante um filtro digital para obter somente a componente fundamental das grandezas aquisitionadas, porque os sistemas de proteção utilizam esta componente para detecção, identificação, localização e discriminação das faltas. Existem diversos algoritmos para a medição da componente fundamental, e um dos mais usados é a aplicação da DFT (Discrete Fourier Transform) a N amostras consecutivas do sinal, conforme a equação (27).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} e^{-j \cdot k \cdot n \cdot 2\pi/N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (27)$$

Posteriormente, substitui-se o valor de $k = 1$, para extrair a componente fundamental de (27), obtendo-se (28).

$$X[1] = x_{[0]} + x_{[1]} \cdot e^{-\frac{j \cdot 2\pi(1)}{N}} + x_{[2]} \cdot e^{-\frac{j \cdot 2\pi(2)}{N}} + \dots + x_{[N-1]} \cdot e^{-\frac{j \cdot 2\pi(N-1)}{N}} \quad (28)$$

Separando-se a parte real e a imaginária de (28), obtém-se (29) e (30).

$$\text{Re}(X[1]) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \cdot \cos\left(n \frac{2\pi}{N}\right) \quad (29)$$

$$\text{Im}(X[1]) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \cdot \sin\left(n \frac{2\pi}{N}\right) \quad (30)$$

A amplitude e a fase da componente são dadas por (31) e (32), respectivamente.

$$|X[1]| = \sqrt{\text{Im}(X[1])^2 + \text{Re}(X[1])^2} \quad (31)$$

$$\varphi[1] = \arctan\left(\frac{\text{Im}(X[1])}{\text{Re}(X[1])}\right) \quad (32)$$

4.5 DETECTOR DO TIPO DE FALTA

A detecção do tipo de falta é um dos pontos críticos para encontrar o local onde ocorreu a falta, e neste trabalho foi necessária a implementação de um algoritmo mais robusto, que detecte todos os tipos de faltas, já que os algoritmos tradicionais têm dificuldade para detectar alguns tipos de faltas quando as linhas possuem compensação série (TCSC). O algoritmo desenvolvido é baseado no algoritmo de Kasztenny, Mazereeuw e Campbell (2000), que consegue detectar corretamente as faltas fase-terra e fase-fase-terra, e no algoritmo de Das e Reddy (2005) que consegue detectar corretamente faltas fase-fase e faltas trifásicas. Nestes trabalhos os autores utilizam a comparação das relações angulares das componentes de sequência das correntes de faltas de cada fase para discriminar o tipo de falta, conforme as equações (33-38).

$$\text{ang_A} = |\arg(I_{a1f}) - \arg(I_{a2f})| \quad (33)$$

$$\text{ang_B} = |\arg(I_{b1f}) - \arg(I_{b2f})| \quad (34)$$

$$\text{ang_C} = |\arg(I_{c1f}) - \arg(I_{c2f})| \quad (35)$$

$$\text{ang_A0} = \arg(I_{a2f}) - \arg(I_{a0f}) \quad (36)$$

$$\text{ang_B0} = \arg(I_{b2f}) - \arg(I_{b0f}) \quad (37)$$

$$\text{ang_C0} = \arg(I_{c2f}) - \arg(I_{c0f}) \quad (38)$$

Onde:

$I_{a,b,c;if}$ *i-ésima* componente simétrica da corrente de falta da fase A, B, C;

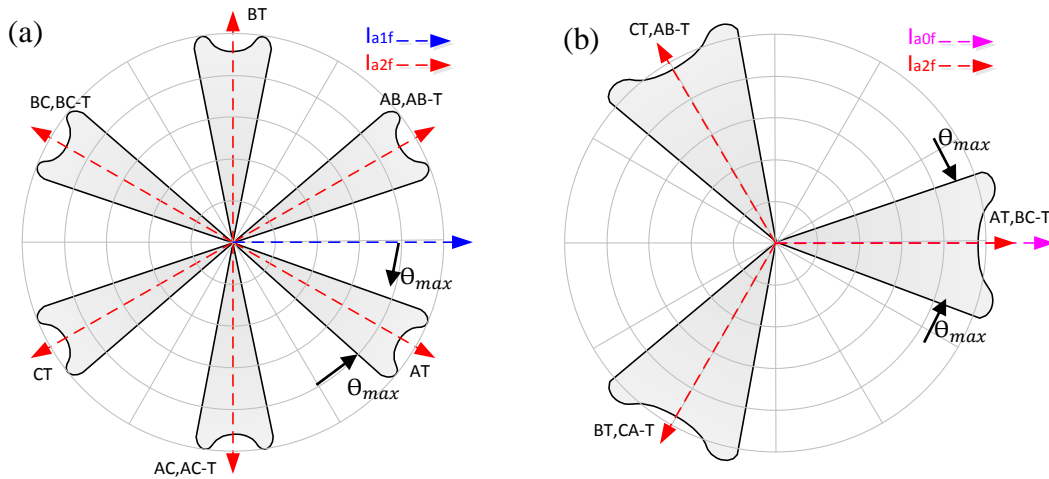
Esses algoritmos também utilizam as relações entre as magnitudes destas componentes conforme (39-40).

$$R_{0f} = \left| \frac{I_{a0f}}{I_{a1f}} \right| \quad (39)$$

$$R_{2f} = \left| \frac{I_{a2f}}{I_{a1f}} \right| \quad (40)$$

As regiões destas relações angulares para os diferentes tipos de faltas estão ilustradas na Figura 21, onde cada região pertence a um tipo de falta (KASZTENNY; MAZEREEUW; CAMPBELL, 2000).

Figura 21 - Limites angulares dos tipos de falta usando, (a) sequência negativa vs sequência positiva e (b) sequência negativa vs sequência zero.



Fonte: Adaptado de Kasztenny, Mazereeuw e Campbell (2000).

Os limites destas regiões, e as relações entre as magnitudes são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Relações angulares para classificar os diferentes tipos de faltas.

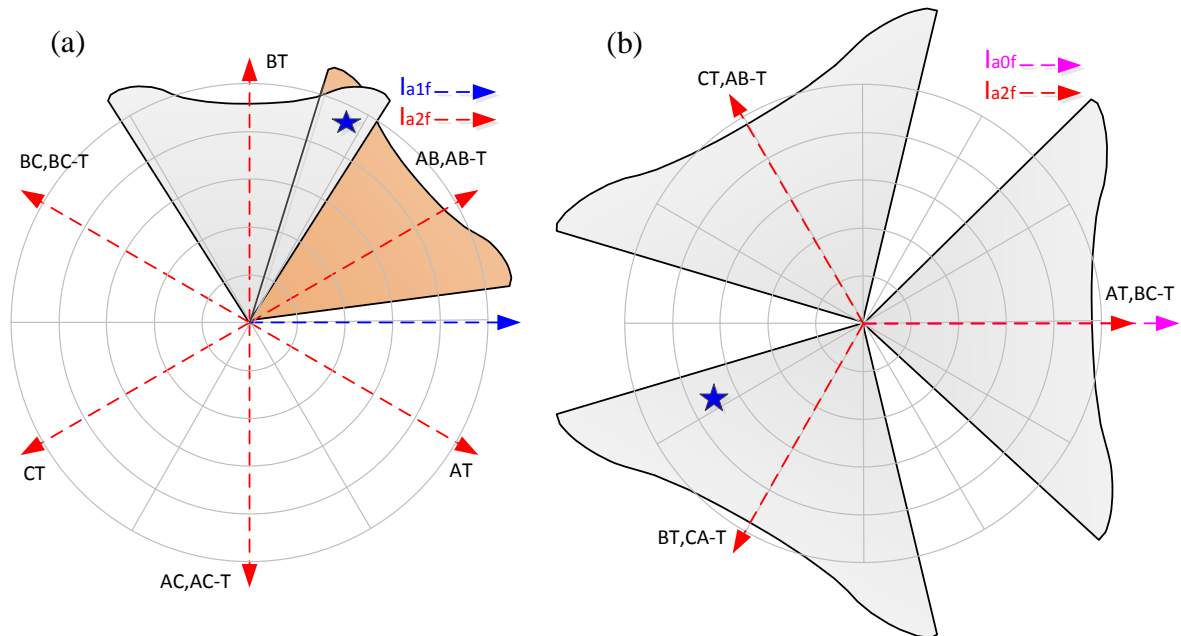
Tipo de falta	Ang_A	Ang_B	Ang_C	Ang_A0	Ang_B0	Ang_C0	R _{0f}	R _{2f}
A-T	[0 60]	[120 180]	[60 120]	[-60 60]	[60 180]	[180 300]	-	-
B-T	[60 120]	[0 60]	[120 180]	[180 300]	[-60 60]	[60 180]	-	-
C-T	[120 180]	[60 120]	[0 60]	[60 180]	[180 300]	[-60 60]	-	-
A-B	[0 60]	[60 120]	[120 180]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
B-C	[120 180]	[0 60]	[60 120]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
C-A	[60 120]	[120 180]	[0 60]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
A-B-T	[0 60]	[60 120]	[120 180]	[60 180]	[180 300]	[-60 60]	-	-
B-C-T	[120 180]	[0 60]	[60 120]	[-60 60]	[60 180]	[180 300]	-	-
C-A-T	[60 120]	[120 180]	[0 60]	[180 300]	[180 300]	[-60 60]	-	-
A-B-C-T	-	-	-	-	-	-	[0 0.22]	[0 0.22]

Fonte: Adaptado de Das e Reddy (2005).

Uma das vantagens de usar este algoritmo é que para faltas em que as relações angulares estejam nos limites ou próximas aos limites das regiões que diferenciam um tipo de falta do

outro, pode-se incrementar o ângulo das regiões, como mostra a Figura 22(a) e ainda assim pode-se identificar o tipo de falta como ilustrado na Figura 22(b).

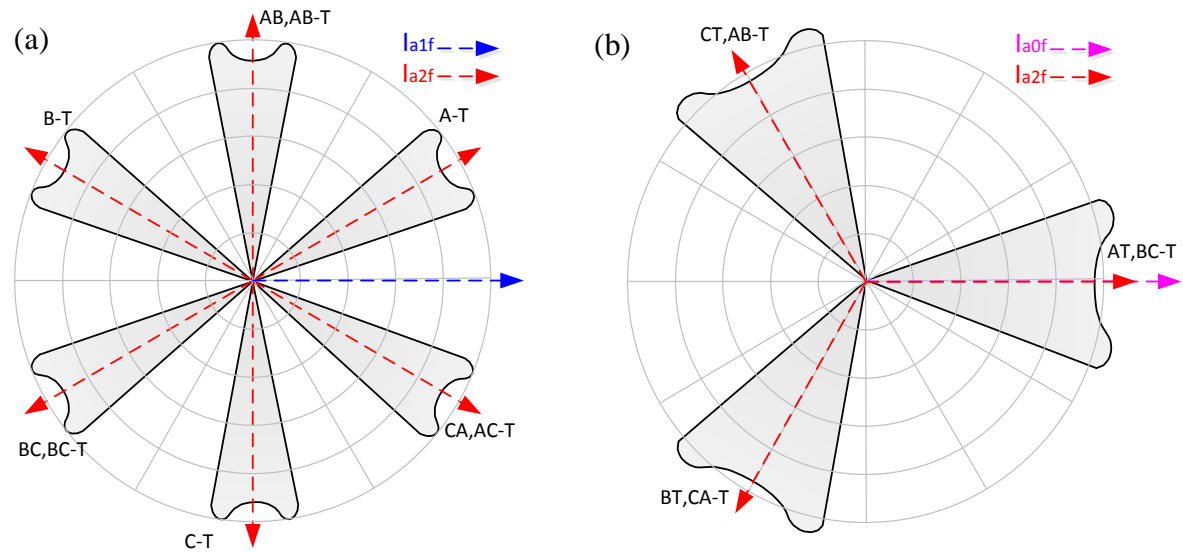
Figura 22 - Incremento dos limites angulares para detectar o tipo de falta (a), sequência negativa vs sequência positiva e (b) sequência negativa vs sequência zero.



Fonte: Adaptado de Kasztenny, Mazereeuw e Campbell (2000).

As relações angulares das componentes de sequência, mostradas na Figura 21 e na Tabela 1, são válidas quando o sentido do fluxo de potência pré-falta tem o mesmo sentido da corrente de falta. Para o caso em que o fluxo de potência pré-falta tenha o sentido inverso da corrente de falta, as relações angulares sofrem uma pequena mudança, fazendo uma rotação de 60 graus dos vetores no sentido anti-horário, como apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Limites angulares dos tipos de falta usando (a) sequência negativa vs sequência positiva faltas e (b) sequência negativa vs sequência zero.



Fonte: adaptado de Kasztenny, Mazereeuw e Campbell (2000).

Neste caso, os limites das relações angulares são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Relações angulares para classificar os diferentes tipos de faltas

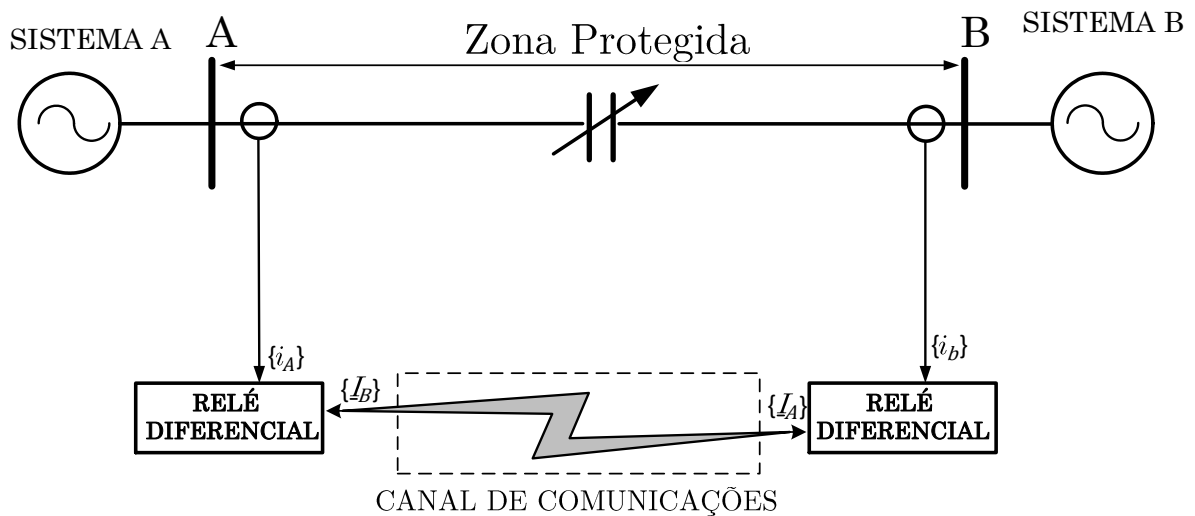
Tipo de falta	Ang_A	Ang_B	Ang_C	Ang_A0	Ang_B0	Ang_C0	R _{0f}	R _{2f}
A-T	[0 60]	[60 120]	[120 180]	[-60 60]	[60 180]	[180 300]	-	-
B-T	[120 180]	[0 60]	[60 120]	[180 300]	[-60 60]	[60 180]	-	-
C-T	[60 120]	[120 180]	[0 60]	[60 180]	[180 300]	[-60 60]	-	-
A-B	[60 120]	[0 60]	[120 180]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
B-C	[120 180]	[60 120]	[0 60]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
C-A	[0 60]	[120 180]	[60 120]	-	-	-	[0 0.22]	[0 1.20]
A-B-T	[60 120]	[0 60]	[120 180]	[60 180]	[180 300]	[-60 60]	-	-
B-C-T	[120 180]	[60 120]	[0 60]	[-60 60]	[60 180]	[180 300]	-	-
C-A-T	[0 60]	[120 180]	[60 120]	[180 300]	[180 300]	[-60 60]	-	-
A-B-C-T	-	-	-	-	-	-	[0 0.22]	[0 0.22]

Fonte: Adaptado de Das e Reddy (2005).

4.6 DETECTOR DA POSIÇÃO DA FALTA RELATIVA AO TCSC

A detecção da posição da falta relativa ao TCSC é a característica chave do algoritmo usado para localizar as faltas, cuja função é discriminar o trecho da linha onde se produz a falta. Denomina-se FA ao trecho da linha entre o terminal local A até onde foi instalado o TCSC e FB ao trecho da linha entre TCSC e o terminal remoto B como é ilustrado na Figura 24.

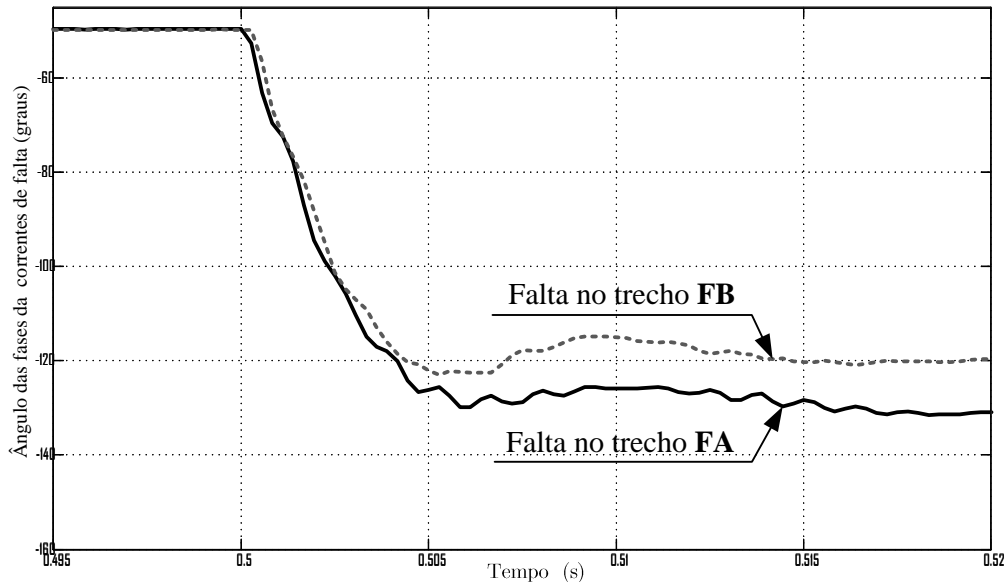
Figura 24 - Detecção da posição da falta com relação ao TCSC.



Fonte: Adaptado de .Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Para a detecção do trecho da linha onde ocorre a falta, considerou-se que os escorregamentos angulares das correntes de faltas apresentam uma diferença para faltas nos trechos da linha FA e FB. Esta diferença é devido a propriedade que quando a falta é produzida no trecho da linha FB, o capacitor do TCSC diminui a reatância indutiva da linha, consequentemente, o ângulo da impedância equivalente entre o ponto A e o ponto onde ocorreu a falta diminui, esta diminuição provoca uma redução do ângulo da corrente de falta. Para o caso de falta no trecho da linha FA, o capacitor não afeta a impedância equivalente entre o ponto A e o ponto de falta. Para ambos os casos os escorregamentos são ilustrados na Figura 25.

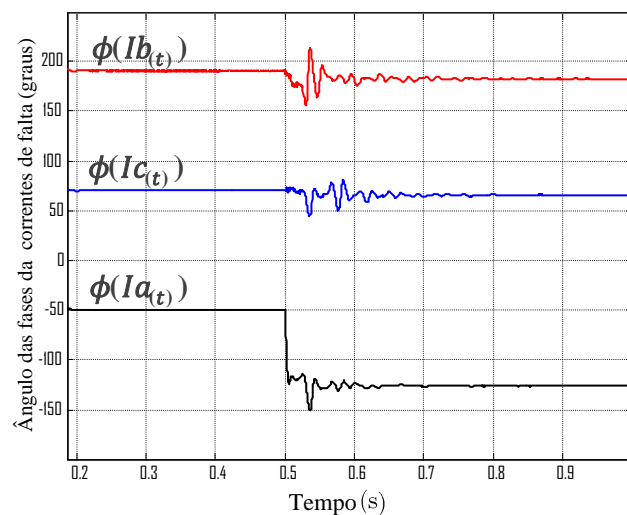
Figura 25 - Comparação dos escorregamentos para faltas nos trechos FA e FB.



Fonte: Adaptado de Maźniewski e Izykowski (2009).

O escorregamento ilustrado na Figura 25 não é o mesmo para as três fases, apenas as fases envolvidas na falta apresentam estas características. Para uma falta monofásica-terra do tipo fase A para terra, como ilustrado na Figura 26, observa-se que só o escorregamento da fase A apresenta a forma e o sentido do escorregamento ilustrado na Figura 25.

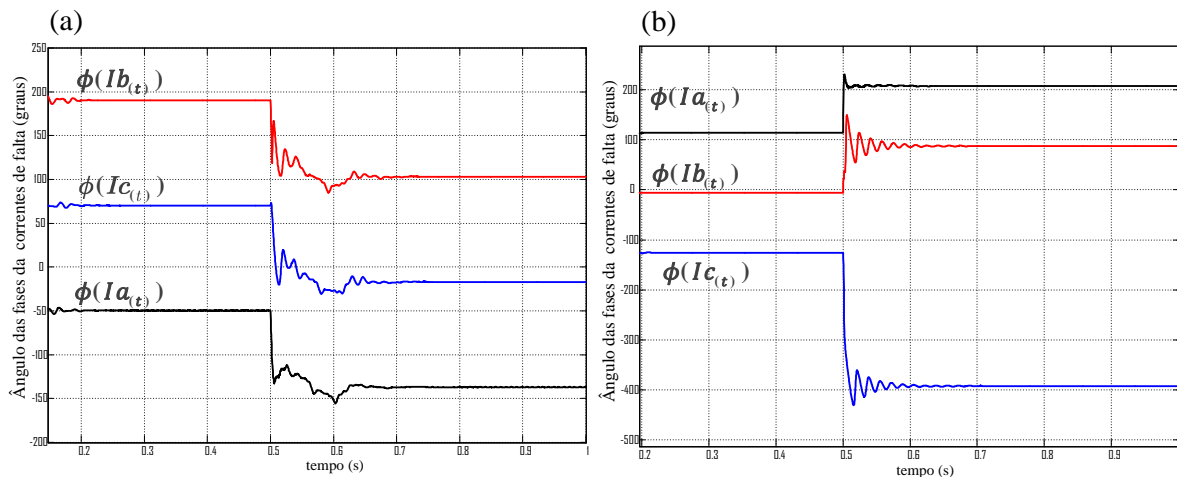
Figura 26 - Escorregamento angular dos sinais de corrente para uma falta fase A-terra.



Fonte: elaborado pelo autor.

Outro exemplo deste comportamento encontra-se ilustrado na Figura 27a onde, para uma falta fase A-B-terra só as duas fases envolvidas na falta, as fases A e B apresentam o escorregamento com as características da Figura 25. Estas características são apresentadas quando o sentido do fluxo de potência pré-falta e o sentido da corrente de falta têm o mesmo sentido (fluxo direto). O problema do comportamento do escorregamento angular de fase não é o mesmo quando o fluxo de potência pré-falta e a corrente de falta têm sentidos opostos (fluxo inverso). Por exemplo, para uma falta fases A-B-C-terra, as fases envolvidas na falta, A B e C mudam os sentidos de seus escorregamentos, sem seguir um padrão definido como ilustrado na Figura 27b.

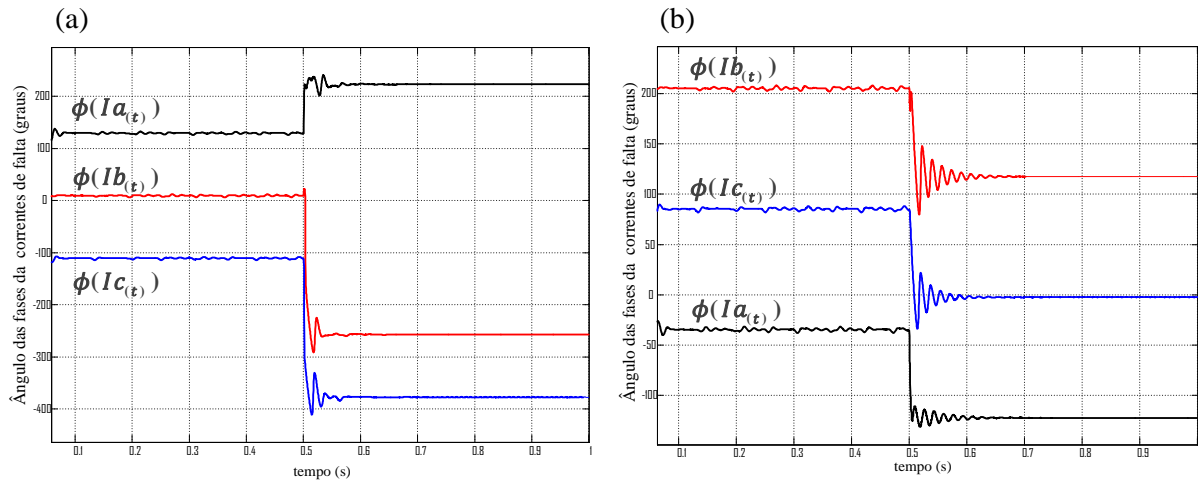
Figura 27 - Medição do escorregamento angular no estado transitório, (a) falta A-B-C-T com fluxo direto e (b) falta A-B-C-T com fluxo inverso.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como se observa na Figura 25, é necessário fazer a comparação entre os escorregamentos com o mesmo sentido, e com as mesmas características. Para resolver este problema no qual o sentido da corrente pré-falta e a corrente de falta são opostos, utilizou-se a medição do escorregamento angular do terminal remoto, no qual a medição para este caso, indica que a corrente pré-falta e a corrente de falta têm o mesmo sentido. A seguir, na Figura 28(b), comprova-se que os escorregamentos do terminal remoto seguem o padrão desejado em comparação com o escorregamento do terminal local, ilustrado na Figura 28(a).

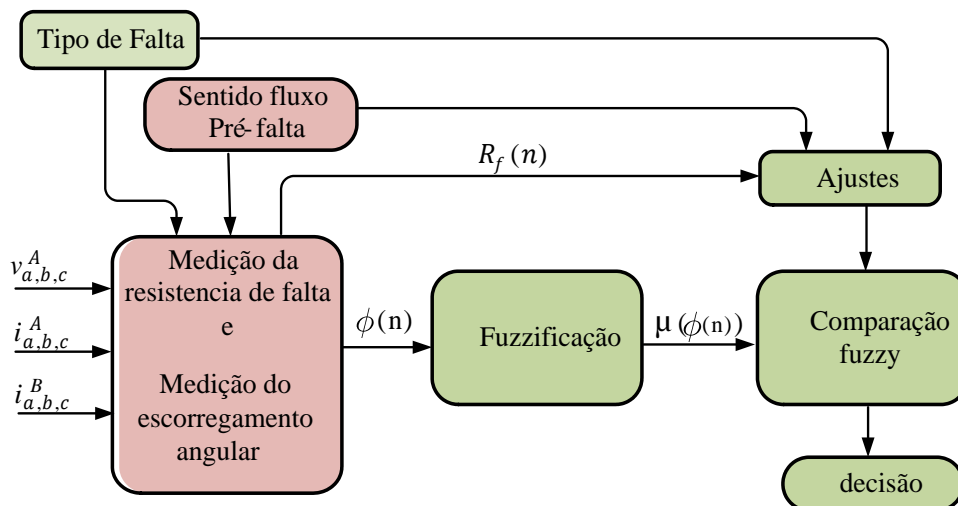
Figura 28 - Medição do escorregamento angular com fluxo inverso falta A-B-C-T, (a) medição do terminal local (b) medição do terminal remoto.



Fonte: elaborado pelo autor.

Considerando as restrições anteriormente discutidas sobre os escorregamentos angulares das correntes de falta, a estrutura para a detecção da posição da falta com relação a posição relativa do TCSC é ilustrada na Figura 29, que é baseada na aplicação de lógica difusa.

Figura 29 - Diagrama esquemático da metodologia baseada em lógica difusa para obter a posição da falta com relação a posição relativa do TCSC.



Fonte: Adaptado de Maźniewski e Izykowski (2009).

Esta estrutura deve fornecer como resultado a posição da falta com relação a posição relativa do TCSC na linha, que depende de seus parâmetros de entrada, seu funcionamento é detalhado nas subseções seguintes.

4.6.1 Tipo de falta

O tipo de falta foi desenvolvido no item 4.5 e serve como dado de entrada nesta estrutura baseada em lógica difusa, esta informação é principalmente para escolher qual das três fases é selecionada para entrar na etapa de *fuzzificação*.

4.6.2 Sentido do fluxo de potência de pré-falta

O sentido do fluxo de potência de pré-falta também é um dado de entrada nesta estrutura, esta informação serve principalmente para escolher qual dos terminais da linha serão utilizados para a medição do escorregamento, para passar à etapa de *fuzzificação*. Neste caso, não é necessária uma alta precisão no cálculo, e desta forma, utilizam-se para isto algoritmos de ortogonalização dos sinais de tensão e corrente com atrasos de uma amostra, descritos pelas equações (41 - 44), (REBIZANT; SZAFRAN; WISZNIEWSKI, 2011).

$$\text{Re}(v_{\text{fase}}(n)) = \frac{v_{\text{fase}}(n) + v_{\text{fase}}(n - 1)}{2 \cdot \cos(\omega T_S/2)} \quad (41)$$

$$\text{Im}(v_{\text{fase}}(n)) = \frac{-v_{\text{fase}}(n) + v_{\text{fase}}(n - 1)}{2 \cdot \sin(\omega T_S/2)} \quad (42)$$

$$\text{Re}(i_{\text{fase}}(n)) = \frac{i_{\text{fase}}(n) + i_{\text{fase}}(n - 1)}{2 \cdot \cos(\omega T_S/2)} \quad (43)$$

$$\text{Im}(i_{\text{fase}}(n)) = \frac{-i_{\text{fase}}(n) + i_{\text{fase}}(n - 1)}{2 \cdot \sin(\omega T_S/2)} \quad (44)$$

Finalmente em (45) utilizam-se as relações anteriormente descritas nas equações (41 - 44) para calcular o fluxo de potência que passa pela linha de transmissão.

$$P_e(n) = [\text{Re}(i_{\text{fase}}(n)) \cdot \text{Re}(v_{\text{fase}}(n)) + \text{Im}(i_{\text{fase}}(n)) \cdot \text{Im}(v_{\text{fase}}(n))] / 2 \quad (45)$$

Quando o fluxo de potência de pré-falta tem a mesma direção que a corrente de falta, o resultado da equação (45) é positivo. Para o fluxo de potência de pré-falta com sentido contrário ao da corrente de falta, o resultado de (45) é negativo.

4.6.3 Medição do escorregamento angular

A medição do escorregamento angular é efetuada para as três fases dos sinais de corrente, tanto para o terminal local como para o terminal remoto da linha de transmissão, mediante a seguinte relação.

$$\phi(n) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(i_{\text{fase}}(n))}{\text{Re}(i_{\text{fase}}(n))}\right) \quad (46)$$

Dependendo do tipo de falta e do sentido do fluxo de potência de pré-falta, escolhe-se segundo a Tabela 3 a corrente de fase que deve ser usada para passar pelo processo de *fuzzificação*.

Tabela 3 - Medição do escorregamento angular segundo o tipo de falta e o sentido do fluxo.

Tipo de Falta	Sentido do fluxo	
	Direto	Inverso
A – T	$\phi(Ia^A(n))$	$\phi(Ia^B(n))$
A – B		
A – B – T		
A – B – C – T		
B – T	$\phi(Ib^A(n))$	$\phi(Ib^B(n))$
B – C		
B – C – T		
C – T	$\phi(Ic^A(n))$	$\phi(Ic^B(n))$
C – A		
C – A – T		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

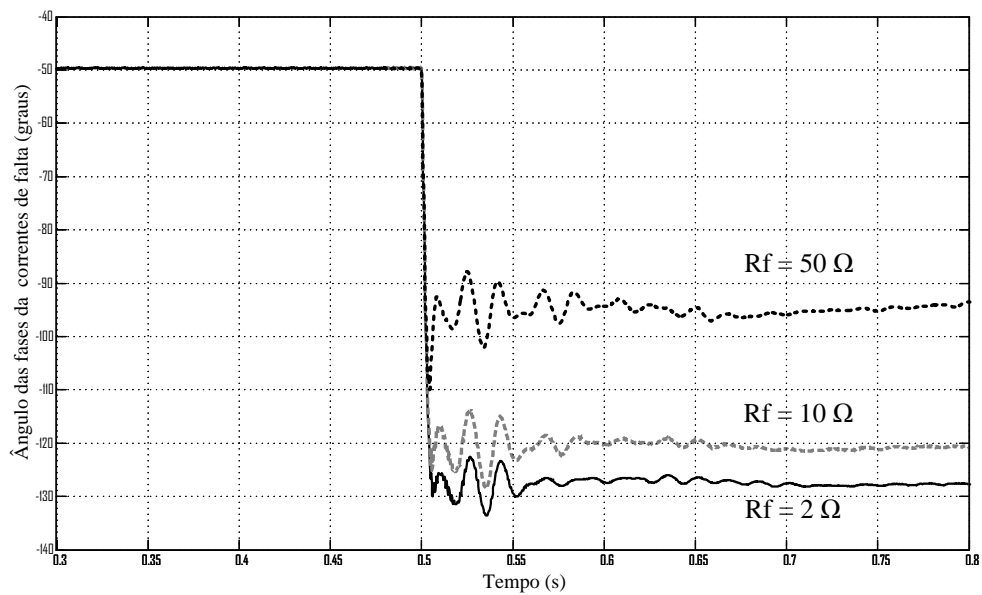
$\phi(Ia^A(n))$ Escorregamento da fase A medido no terminal A.

$\phi(Ia^B(n))$ Escorregamento da fase A medido no terminal B.

4.6.4 Medição da resistência de falta

A medição da resistência de falta é calculada basicamente para fazer pequenas correções nos ajustes da linha para o caso de faltas com alta resistência de falta, onde o escorregamento diminui com o aumento da resistência de falta, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Escorregamento angular para diferentes resistências de falta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

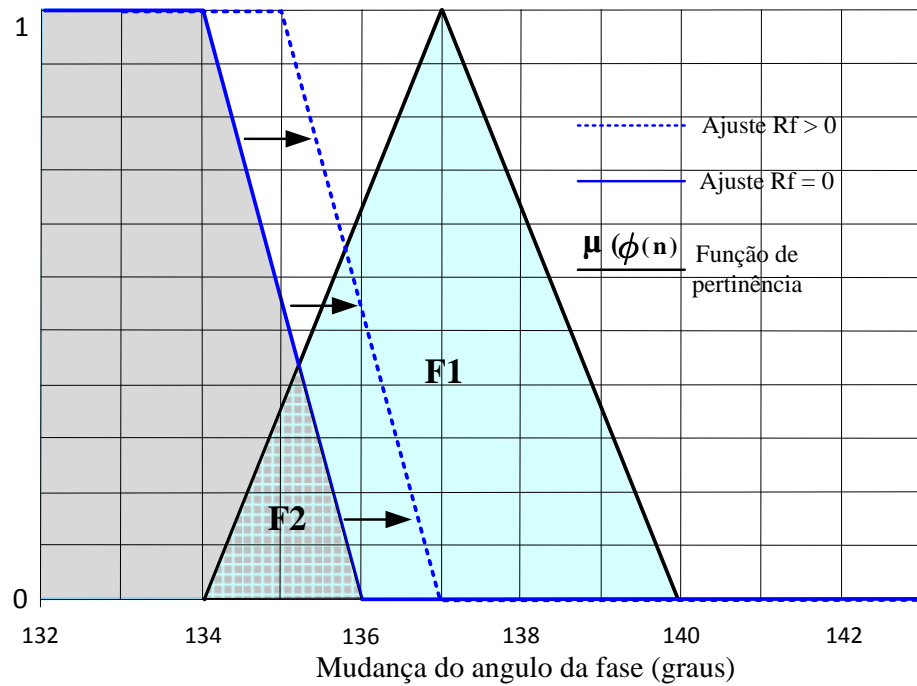
Esta correção depende diretamente da resistência de falta, que para este caso o cálculo é aproximado através da equação (47), devido que a resistência nas linhas de transmissão é pequena em comparação com as altas resistências de falta nos outros tipos de sistemas como por exemplo distribuição.

$$R_f(n) = \frac{\text{Re}(v_{\text{fase}}(n))}{\text{Re}(i_{\text{fase}}(n))} \quad (47)$$

4.6.5 Fuzzificação

No processo de *fuzzificação* efetuado, utiliza-se uma função de pertinência triangular, como ilustrada a Figura 31, onde os vértices do triângulo representam o mínimo, médio e máximo valor de 5 amostras consecutivas do escorregamento angular do sinal de corrente, que é selecionada segundo o tipo de falta e o sentido do fluxo de potência de pré-falta como é mostrado na Tabela 3.

Figura 31- Fuzzificação do escorregamento angular da corrente de falta.



Fonte: Adaptado de Maźniewski e Rosolowski (2009).

4.6.6 Ajustes

A linha de ajuste na Figura 31 depende do tipo de falta e do sentido do fluxo pré-falta. Elas são calibradas com diversas situações de faltas, onde esta linha de ajuste é escolhida de forma tal que possa discriminar as faltas produzidas no trecho da linha FA ou FB.

Para o caso de incremento da resistência de faltas, a linha de ajuste sofre uma pequena correção em tempo real, deslocando-se para a direita, proporcional ao o valor desta resistência de falta.

4.6.7 Comparação fuzzy

A comparação é feita usando a relação de áreas contidas embaixo da função de pertinência triangular F_2 e a área contida na interseção da linha de ajuste com a função de pertinência F_1 .

$$F = \frac{F_2}{F_1} \quad (48)$$

4.6.8 Decisão

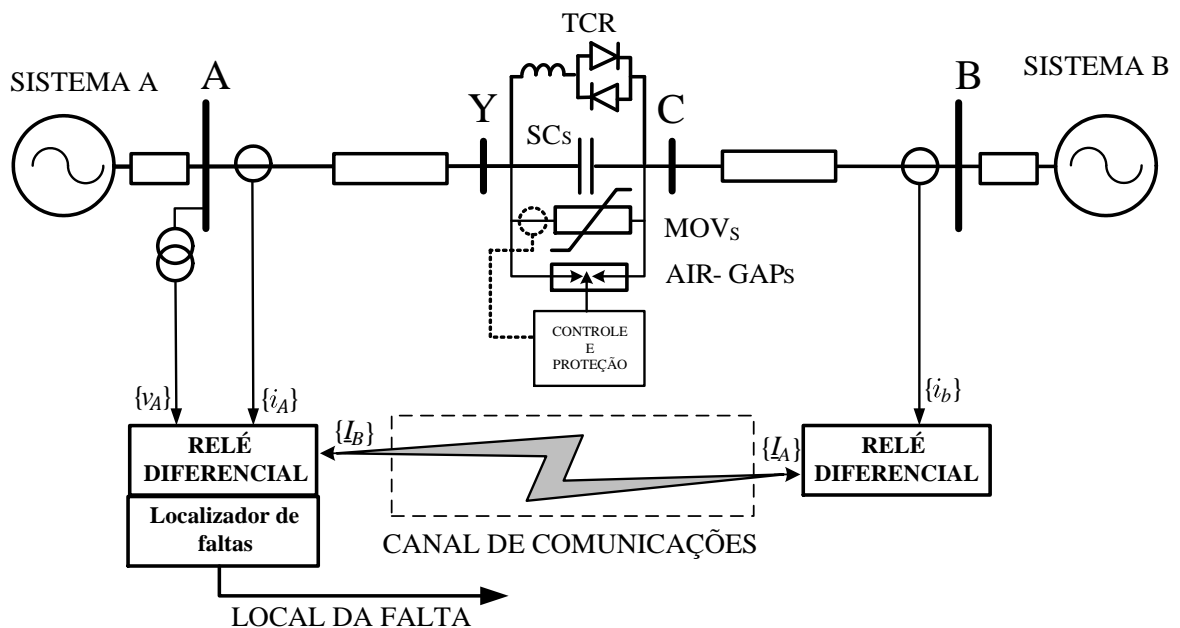
A decisão depende do valor da equação (48), quando um alto porcentagem da área do triângulo F1 ultrapassa a linha de ajuste ilustrado na Figura 31, então a falta foi produzida no trecho da linha FA, caso contrário a falta foi produzida no trecho FB.

4.7 LOCALIZADOR DE FALTAS

A localização da falta é a etapa final, que consiste no cálculo do ponto na linha onde ocorreu a falta, usando os dados previamente calculados, como o tipo de falta e o trecho da linha onde ocorreu a falta. O cálculo deste ponto é baseado no cálculo da impedância da linha no laço de falta, uma vez que a impedância da linha de transmissão é proporcional à distância. Este cálculo depende do trecho da linha em que incidiu a falta, sendo utilizados procedimentos de cálculo distintos para cada caso, uma para o trecho da linha FA e outro para FB.

A configuração do sistema com a compensação série e a instalação dos dispositivos de medição, utilizados para desenvolver o localizador de faltas, estão ilustrados na Figura 32.

Figura 32 - Diagrama esquemático do localizador de faltas associado com o relé diferencial em linhas de transmissão com compensação série.

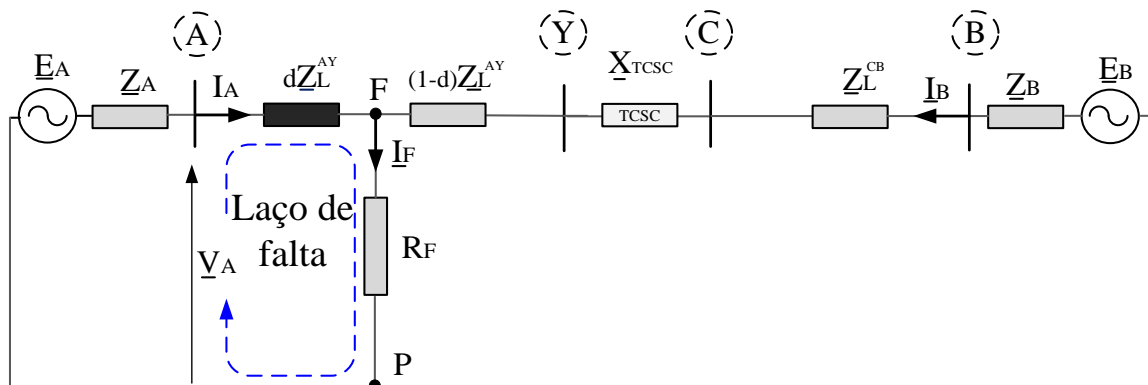


Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

4.7.1 Localização de faltas no trecho FA

A localização de faltas para trechos da linha de transmissão localizados à montante do dispositivo FACT consiste em encontrar a impedância da linha compreendida no laço de falta, ou seja, impedância entre a barra A e o ponto F onde se produz a falta, como ilustrado na Figura 33, é mostrado na equação (29).

Figura 33 - Circuito equivalente monofásico para uma falta produzida no trecho FA.



Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

$$\underline{V}_A - d\underline{Z}_L^{AY} \cdot \underline{I}_A - R_f \cdot \underline{I}_F = 0 \quad (49)$$

Para efeitos práticos aproxima-se o cálculo da corrente total de falta, com a seguinte equação.

$$\underline{I}_F = \underline{I}_A + \underline{I}_B \quad (50)$$

onde:

d Distância por unidade à falta do trecho de linha AY, medida a partir do ponto A;

R_f Resistência de falta;

\underline{I}_A Corrente de falta no terminal A;

\underline{I}_B Corrente de falta no terminal B;

\underline{I}_F Corrente de falta total.

O cálculo da distância à falta para este caso é simples, através da equação (49) que fornece a queda de tensão no laço de falta. De (49) separam-se as partes real e imaginária com duas incógnitas, R_f e d . Desta forma distância d em por unidade, que vai da barra A até o ponto de incidência da falta no trecho de linha à montante do TCSC, pode ser encontrada resolvendo

este sistema de equações. Considerando que d é definida apenas para o trecho à montante do TCSC, instalado a uma distância por unidade p do comprimento da linha, utiliza-se (51) para obter a distância em por unidade da linha inteira AB para localizar o ponto de incidência da falta.

$$d_{FA} = d \cdot p \quad (51)$$

A equação (52) permite analisar o comportamento da impedância da linha no laço de falta no plano de impedâncias R-X.

$$\underline{Z}_{Adap} = d_{FA} \cdot \underline{Z}_{L1} \quad (52)$$

onde:

\underline{Z}_{L1} Impedância de sequência positiva da linha de transmissão;

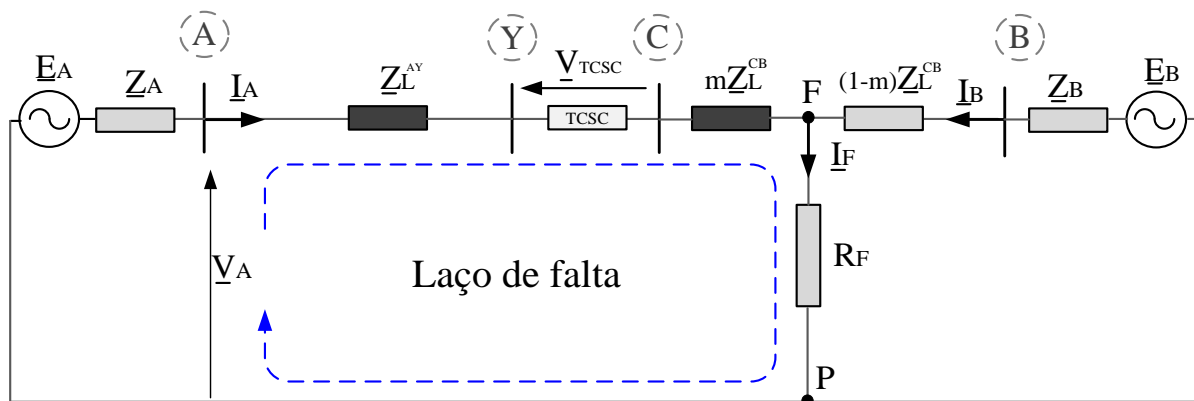
d_{FA} Distância por unidade ao ponto de falta.

4.7.2 Localização de faltas no trecho FB

Para a localização de faltas no trecho FB o cálculo da impedância da linha no laço de falta é mais complexo que no caso anterior, porque no laço de falta encontra-se o TCSC, cuja impedância varia com o ângulo de disparo dos tiristores e a variação destes ângulos depende da estratégia de controle utilizada.

Uma alternativa recomendável é calcular a queda de tensão no TCSC, já que esta queda de tensão depende das quedas de tensão no laço de falta, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Circuito equivalente monofásico para uma falta produzida no trecho FB.



Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

Esta queda de tensão é representada matematicamente de acordo com a equação (52).

$$\underline{V}_A - \underline{Z}_L^{AY} \cdot \underline{I}_A - m \underline{Z}_{L1}^{CB} \cdot \underline{I}_A - \underline{V}_{TCSC} - R_f \cdot \underline{I}_F = 0 \quad (53)$$

onde:

m . Distância em por unidade para a falta na linha CB medida a partir do ponto C;

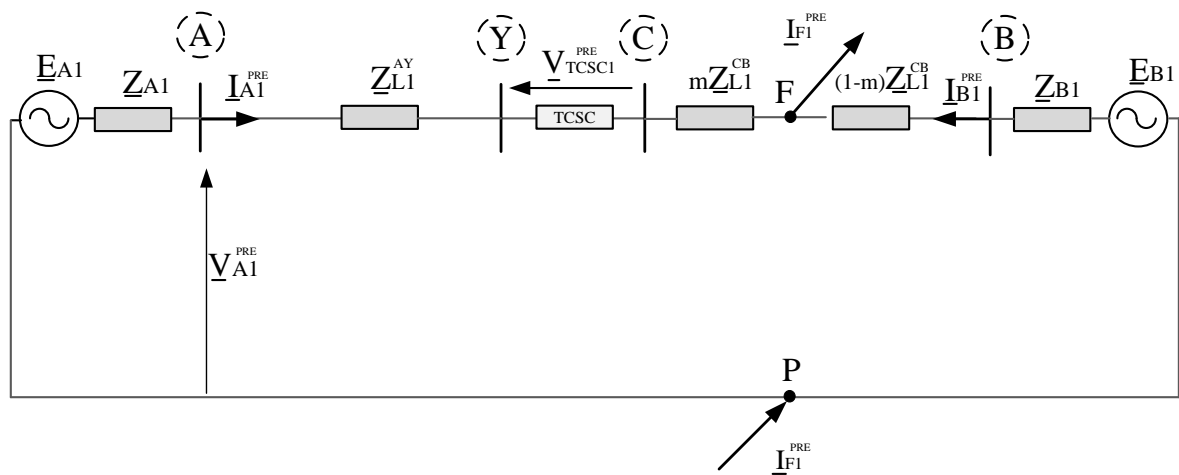
V_{TCSC} Queda de tensão no TCSC;

R_f Resistência de falta;

I_F Corrente de falta total.

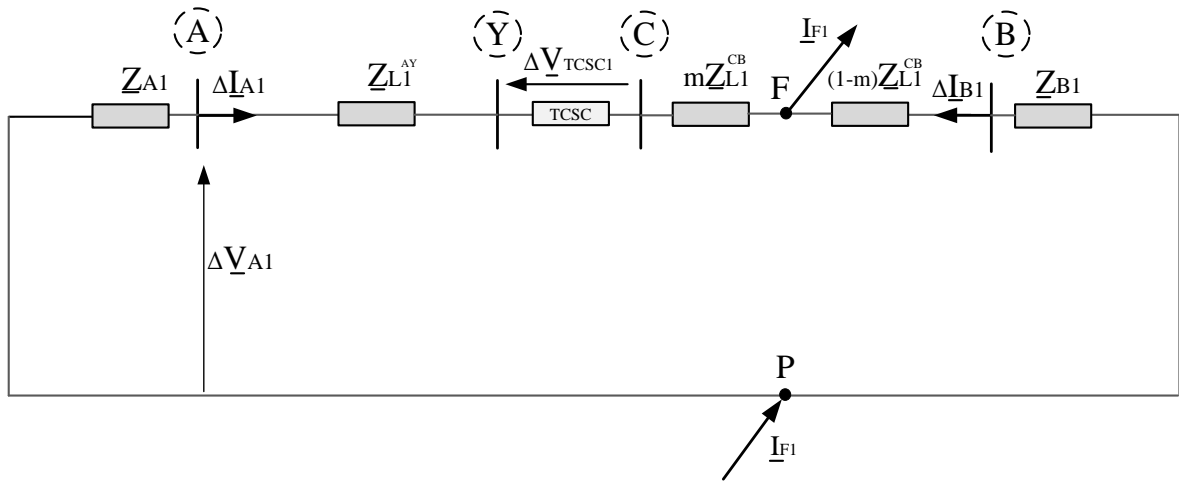
A equação (53) pode ser descomposta em duas partes, real e imaginária, com incógnitas, que são m e R_f reais, e a queda de tensão \underline{V}_{TCSC} que é uma variável complexa. Para resolver esta equação uma alternativa é encontrar uma relação da queda de tensão em função das incógnitas m e/ou R_f , e desta forma, as equações passariam a ter só duas incógnitas. Para adotar este procedimento, o circuito da Figura 34 é transformado em suas redes de sequência, como ilustrado nas Figuras 35-38.

Figura 35 - Rede de sequência positiva pré-falta.



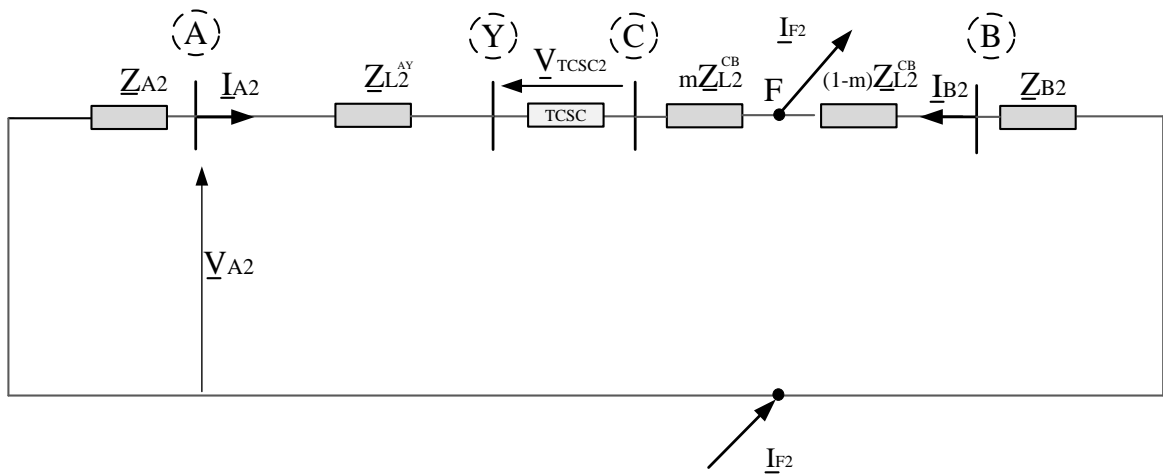
Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

Figura 36 - Rede de seqüência positiva incremental.



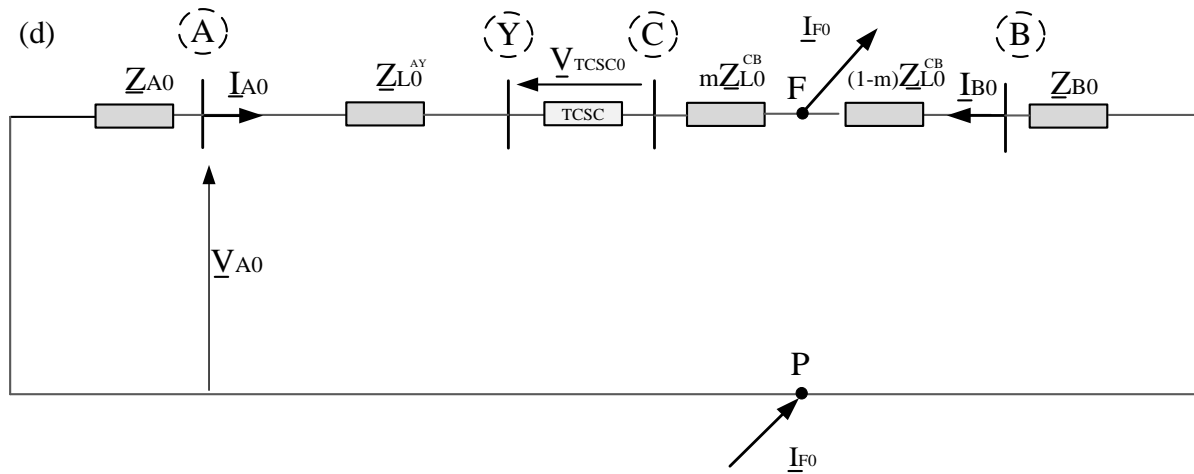
Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

Figura 37 - Rede de seqüência negativa.



Fonte: Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

Figura 38 - Rede de seqüência zero.



Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

As primeiras duas redes são a decomposição da rede de seqüência positiva no estado pré-falta e sob falta conforme apresentado em Takagi et al. (1982). Considerando-se as redes de seqüência ilustradas nas Figuras 35-38, obtêm-se as seguintes relações ao igualar as quedas de tensão no lado direito e esquerdo dos pontos F-P nas redes de seqüência:

$$\underline{V}_{TCSC1}^{pre} = \underline{V}_{A1}^{pre} - \underline{I}_{A1}^{pre} \cdot (\underline{Z}_{L1}^{AY} + \underline{Z}_{L1}^{CB} + \underline{Z}_{SB1}) - \underline{E}_{B1} \quad (54)$$

$$\Delta \underline{V}_{TCSC1} = \Delta \underline{V}_{A1} - m(\Delta \underline{I}_{A1} + \Delta \underline{I}_{B1}) \underline{Z}_{L1}^{CB} + \Delta \underline{I}_{B1} (\underline{Z}_{L1}^{CB} + \underline{Z}_{SB1}) - \Delta \underline{I}_{A1} (\underline{Z}_{L1}^{AY}) \quad (55)$$

$$\underline{V}_{TCSC2} = \underline{V}_{A2} - m(\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2}) \underline{Z}_{L1}^{CB} + \underline{I}_{B2} (\underline{Z}_{L1}^{CB} + \underline{Z}_{SB1}) - \underline{I}_{A2} (\underline{Z}_{L1}^{AY}) \quad (56)$$

$$\underline{V}_{TCSC0} = \underline{V}_{A0} - m(\underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0}) \underline{Z}_{L0}^{CB} + \underline{I}_{B0} (\underline{Z}_{L0}^{CB} + \underline{Z}_{SB0}) - \underline{I}_{A0} (\underline{Z}_{L0}^{AY}) \quad (57)$$

Com estas relações coloca-se a queda de tensão em função de m de forma que o número de incógnitas da equação (53) é reduzido a duas incógnitas com auxílio de (58).

$$\underline{V}_{TCSC} = \underline{V}_{TCSC1} + \underline{V}_{TCSC2} + \underline{V}_{TCSC0} \quad (58)$$

Com a finalidade de ter uma equação geral válida para todos os tipos de faltas no sistema trifásico, apresenta-se na equação (59) o modelo geral do laço de falta, com auxílio das constantes descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes da tensão e corrente para todos os tipos de falta.

<i>Tipo de falta</i>	\underline{a}_1	\underline{a}_2	\underline{a}_0
A – T	1	1	1
B – T	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	1
C – T	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	1
A – B	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
B – C	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0
C – A	$-1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
A – B – T	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
B – C – T	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$	0
C – A – T	$-1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
A – B – C – T	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0

Fonte: Adaptado de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009).

$$\underline{V}_{A-p}^A - \underline{Z}_{L1}^{AY} \cdot \underline{I}_{A-p}^A - m \underline{Z}_{L1}^{CB} \cdot \underline{I}_{A-p}^A - \underline{V}_{TCSC}^A - R_F \underline{I}_F^A = 0 \quad (59)$$

onde:

$$\underline{V}_{Ap}^A = \underline{a}_1 \cdot \underline{V}_{AA1} + \underline{a}_2 \cdot \underline{V}_{AA2} + \underline{a}_0 \cdot \underline{V}_{AA0} \quad (60)$$

$$\underline{I}_{A-p}^A = \underline{a}_1 \cdot \underline{I}_{AA1} + \underline{a}_2 \cdot \underline{I}_{AA2} + \underline{a}_0 \cdot \underline{k}_0^{CB} \cdot \underline{I}_{AA0} \quad (61)$$

$$\underline{V}_{TCSC}^A = \underline{a}_1 \cdot \underline{V}_{TCSC.A1} + \underline{a}_2 \cdot \underline{V}_{TCSC.A2} + \underline{a}_0 \cdot \underline{V}_{TCSC.A0} \quad (62)$$

$$\underline{I}_F^A = \underline{I}_{F1}^A + \underline{I}_{F2}^A + \underline{I}_{F0}^A \quad (63)$$

$$\underline{I}_{F1}^A = \Delta \underline{I}_{A1} + \Delta \underline{I}_{B1} \quad (64)$$

$$\underline{I}_{F2}^A = \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} \quad (65)$$

$$\underline{I}_{F0}^A = \underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} \quad (66)$$

\underline{V}_{AAi} i -ésima componente simétrica da tensão da fase A medida na barra A;

$\underline{V}_{TCSC.Ai}$ i -ésima componente simétrica da queda de tensão do TCSC da fase A;

\underline{I}_{AAi} i -ésima componente simétrica da corrente da fase A medida na barra A;

\underline{I}_{BAi} i -ésima componente simétrica da corrente da fase A medida na barra B.

$$\underline{k}_0^{CB} = \frac{\underline{Z}_{L0}^{CB}}{\underline{Z}_{L1}^{CB}} \quad (67)$$

$$\underline{Z}_{A-p}^{CB} = \frac{V_{A-p}^A}{I_{A-p}^A} \quad (68)$$

A relação (68) é usada por localizadores de falta dos relés de proteção de distância, usado para calcular a impedância do circuito protegido, que é proporcional à distância na qual se produz a falta, quando a resistência de falta é muito pequena.

Uma vez resolvida a equação geral do laço de falta encontra-se a distância por unidade da barra C ao ponto de incidência da falta, m . Com a equação (69) encontra-se a distância da barra A até o ponto de incidência da falta.

$$d_{FB} = m(1 - p) + p \quad (69)$$

Com a relação (70) pode-se analisar o comportamento no plano de impedâncias R-X em comparação com um localizador de faltas simples, como os instalados nos relés de distância.

$$\underline{Z}_{Adap} = d_{FB} \cdot \underline{Z}_{L1} \quad (70)$$

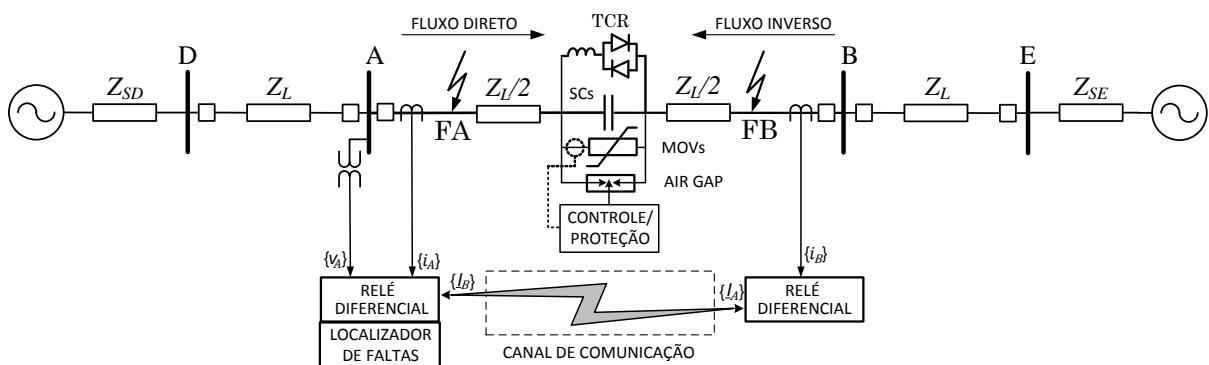
5 TESTES E RESULTADOS

O algoritmo de localização de faltas para relés diferenciais foi implementado no *software* MATLAB e as simulações computacionais foram realizadas usando um sistema teste da literatura (MAŻNIEWSKI IZYKOWSKI, 2009). O ambiente escolhido para as simulações foi o ATP–EMTP, que é um *software* livre e tem aceitação mundial. Através do ATP modelam-se o sistema de potência com a maioria dos sistemas de controles existentes. Este *software* tem uma interface gráfica que é o ATPDraw, na qual foram simulados o sistema elétrico de potência e os circuitos de controle relativos do TCSC.

5.1 SISTEMA TESTE

O sistema teste utilizado é o mesmo usado em muitos trabalhos de proteção de linhas de transmissão com compensação série com TCSC (Sidhu; Khederzadeh , 2005) como ilustra a Figura 39, cujos dados são mostrados na Tabela 5.

Figura 39 – Sistema teste de linha de transmissão com compensação série TCSC.



Fonte: Adaptado de Sidhu e Khederzadeh (2005).

Tabela 5 – Parâmetros do sistema teste.

Sistema equivalente do terminal D ($\varphi=0^\circ$)	\underline{Z}_{1SD}	$1,43 + j16,21 \ \Omega$
	\underline{Z}_{0SD}	$3,068 + j28,746 \ \Omega$
Sistema equivalente do terminal E ($\varphi=-15^\circ$)	\underline{Z}_{1SE}	$1,43 + j16,21 \ \Omega$
	\underline{Z}_{0SE}	$3,068 + j28,746 \ \Omega$
Linhas AB, DA e BE	\underline{Z}'_{1L}	$0,0185 + j0,3766 \ \Omega/\text{km}$
	\underline{Z}'_{0L}	$0,3618 + j1,2277 \ \Omega/\text{km}$
	\underline{C}'_{1L}	$0,22789 \ \text{M}\Omega\text{km}$
	\underline{C}'_{0L}	$0,34513 \ \text{M}\Omega\text{km}$
Compensação série	X_C	$0,25X_{1L}$
	Posição do TCSC	$0,5 \text{ p.u}$
	Indutância do TCR	9 mH
Características do MOV: $I_{MOV} = P \left(\frac{V_{MOV}}{V_{REF}} \right)^q$	P	10 kA
	V_{REF}	338 kV
	q	24
Comprimento de cada linha		100 km
Tensão do sistema		500 kV

Fonte: Adaptado de Sidhu e Khederzadeh (2005).

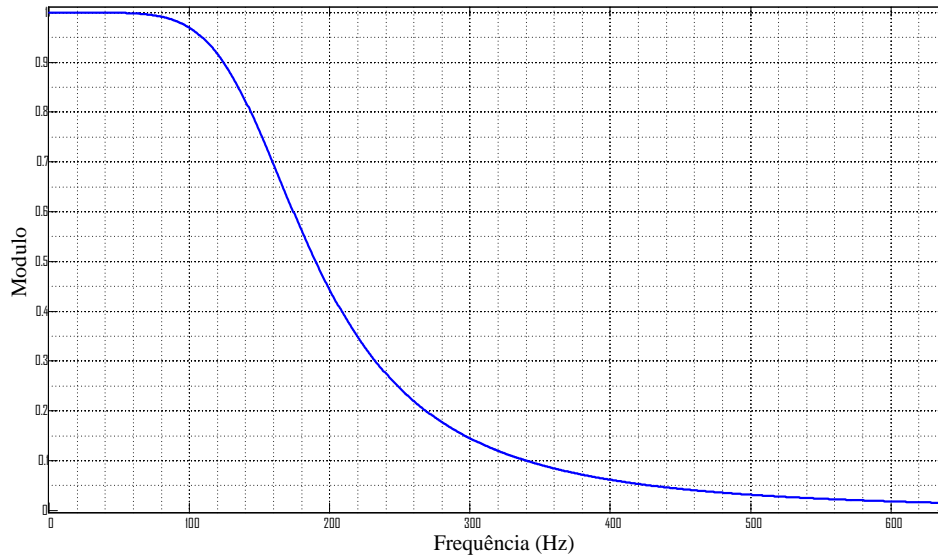
5.2 DADOS DE PROJETO

O filtro analógico passa baixas é projetado considerando, os seguintes parâmetros:

- Frequência de passagem 80 Hz;
- Frequência de rejeição 500 Hz;
- Máximo *ripple* na faixa de passagem 3 dB;
- Máximo *ripple* na faixa de rejeição 28 dB.
- Frequência de amostragem 3600 Hertz

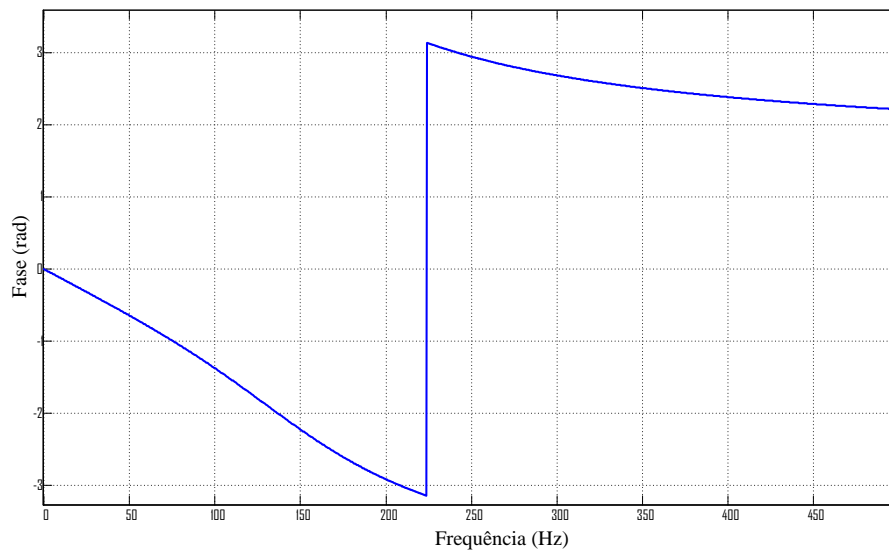
As respostas em frequência do módulo e da fase estão ilustradas na Figura 40 e 41, respectivamente.

Figura 40 - Resposta em frequência do módulo do filtro passa baixas projetado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Resposta em frequência da fase do filtro passa baixas projetado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 TESTES

Neste trabalho, a sub-rotina que detecta posição da falta com relação à compensação série, foi simulada considerando diferentes tipos de falta em diversos pontos da linha transmissão, sentido do fluxo de potência de pré-falta bidirecional e 3 valores diferentes de resistência de falta. Desta forma, este aspecto torna este trabalho mais abrangente que o trabalho

de Maźniewski e Izykowski (2009), que considera apenas para faltas bifásicas e faltas trifásicas com baixas resistências de faltas, e o fluxo de potência de pré-falta em um só sentido.

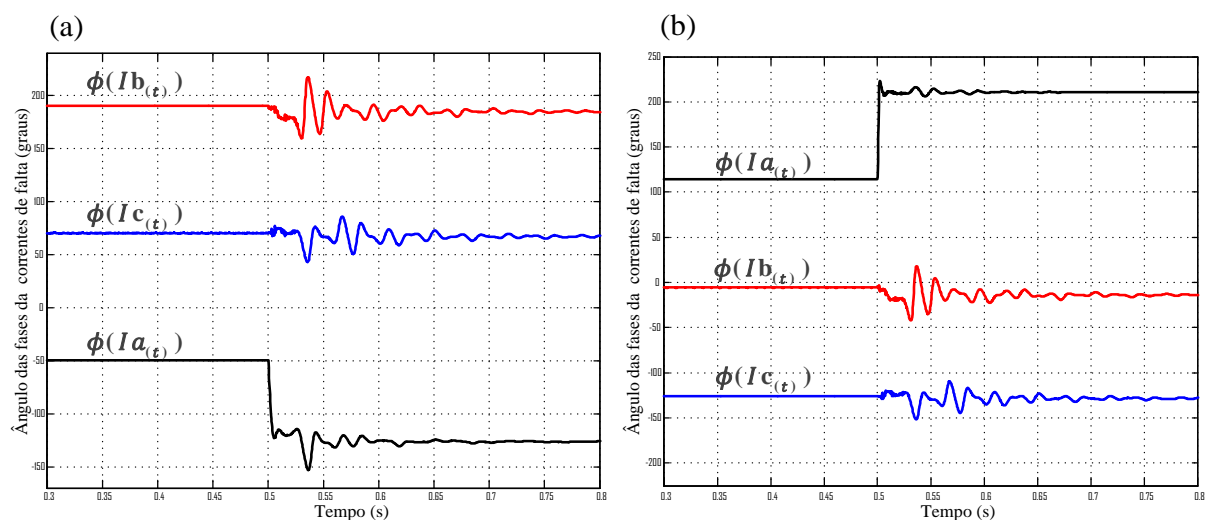
A sub-rotina utilizada para detectar a posição das faltas com relação à compensação série necessitou de diversos testes para estabelecer a linha de ajuste, que discrimina se a falta foi produzida à montante ou à jusante da compensação série, que dependem principalmente do tipo de falta e do sentido do fluxo de potência de pré-falta.

5.3.1 Ajustes do escorregamento angular para faltas monofásicas

Para as faltas monofásicas foram simuladas 18 faltas ao 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% da linha de transmissão, para os 3 tipos, fase A-T, fase B-T e fase C-T, com resistência de falta de 2, 10, 50 ohms e considerando ambos sentidos do fluxo de potência de pré-falta. Realizou-se um total de 324 simulações.

Na Figura 42 ilustra-se o comportamento típico do escorregamento angular dos sinais de corrente para as 3 fases, quando se produz uma falta monofásica, Fase A-terra, onde a potência pré-falta flui do terminal local até o terminal remoto.

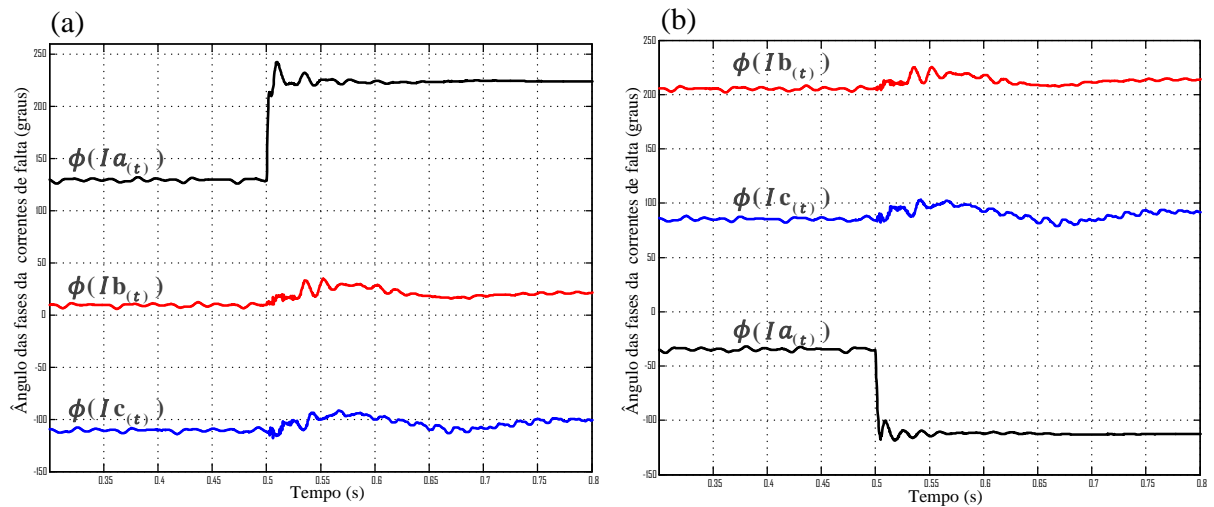
Figura 42 – Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente de ambos terminais da linha de transmissão, terminal local (a), terminal remoto (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 43 ilustra-se o escorregamento angular dos sinais da corrente trifásica para quando a potência pré-falta flui do terminal remoto ao terminal local.

Figura 43 - Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente de ambos terminais da linha de transmissão: terminal local (a) e, terminal remoto (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

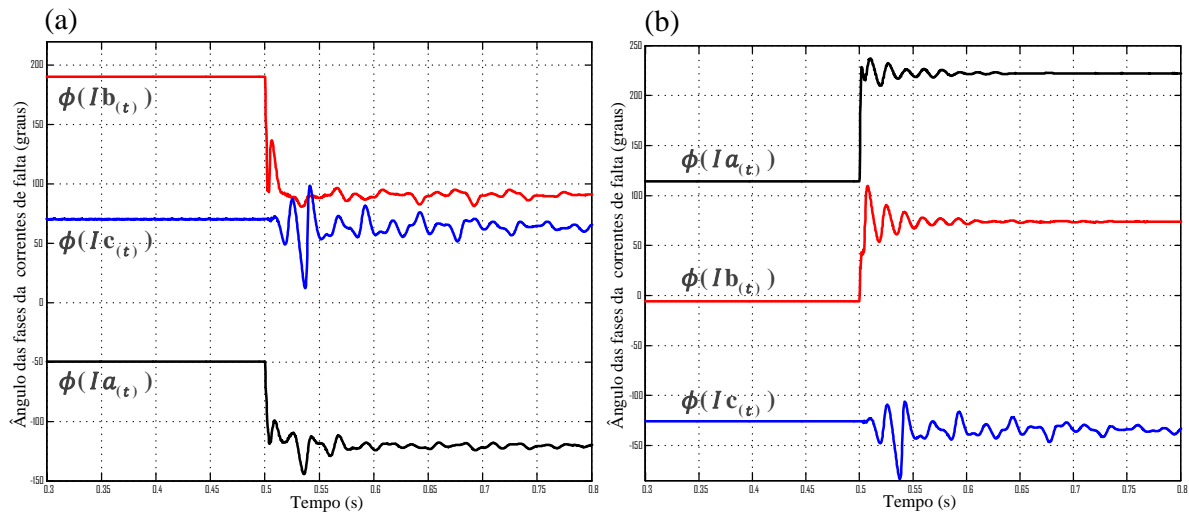
A subrotina implementada a partir da metodologia proposta consegue detectar corretamente a posição da falta com relação à compensação série, porque seleciona corretamente o sinal que entra na etapa de *fuzzificação* dos 12 possíveis escorregamentos dos sinais apresentados na Figura 42 e 43, em que é escolhido o sinal que apresenta um escorregamento angular negativo.

5.3.2 Ajustes do escorregamento angular para faltas bifásicas

Para as faltas bifásicas foram simuladas 18 faltas ao 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% da linha de transmissão, para os três tipos, faltas fase A-B, fase B-C, fase C-A, fase A-B-T, fase B-C-T, fase C-A-T, com resistência de falta de 2, 10, 50 ohms, e considerando ambos os sentidos do fluxo de potência de pré-falta. Efetuou-se um total de 648 simulações.

Na Figura 44 ilustra-se o comportamento típico do escorregamento angular dos sinais de corrente para as 3 fases, quando se produz uma falta bifásica, Fase A- B, onde a potência pré-falta flui do terminal local ao terminal remoto.

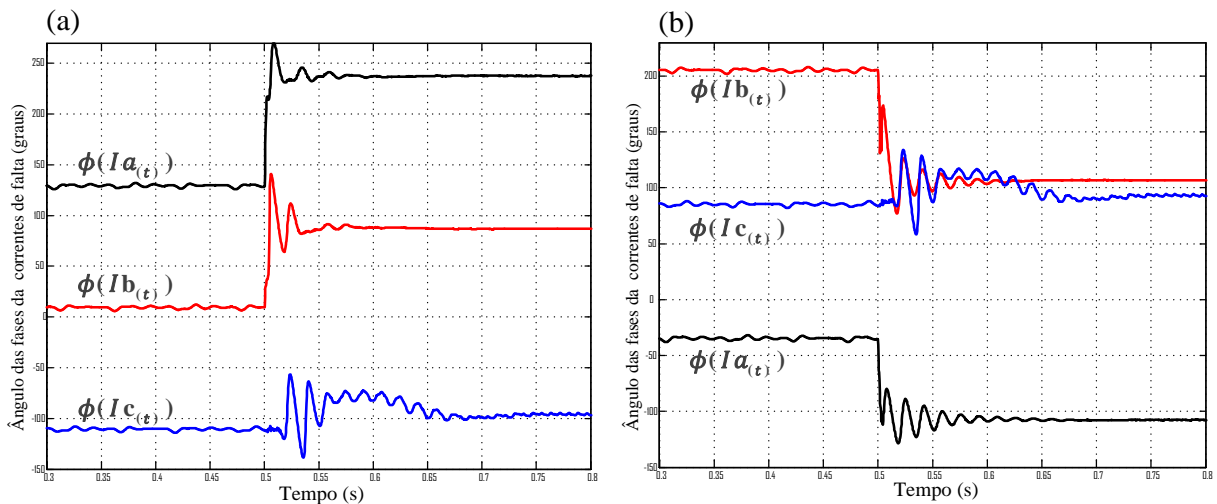
Figura 44 - Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, terminal local (a) e, terminal remoto (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 45 ilustra-se o escorregamento angular dos sinais da corrente trifásica para quando a potência de pré-falta flui do terminal remoto ao terminal local.

Figura 45 - Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, (a) terminal local e (b) terminal remoto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A sub-rotina apresentada consegue detectar corretamente a posição da falta com relação a compensação série, para faltas bifásicas, porque seleciona corretamente o sinal que entra na etapa de *fuzzificação* dos 12 possíveis escorregamentos dos sinais apresentados na Figura 44 e 45. Seleciona-se o sinal que apresenta um escorregamento angular negativo, neste caso existem

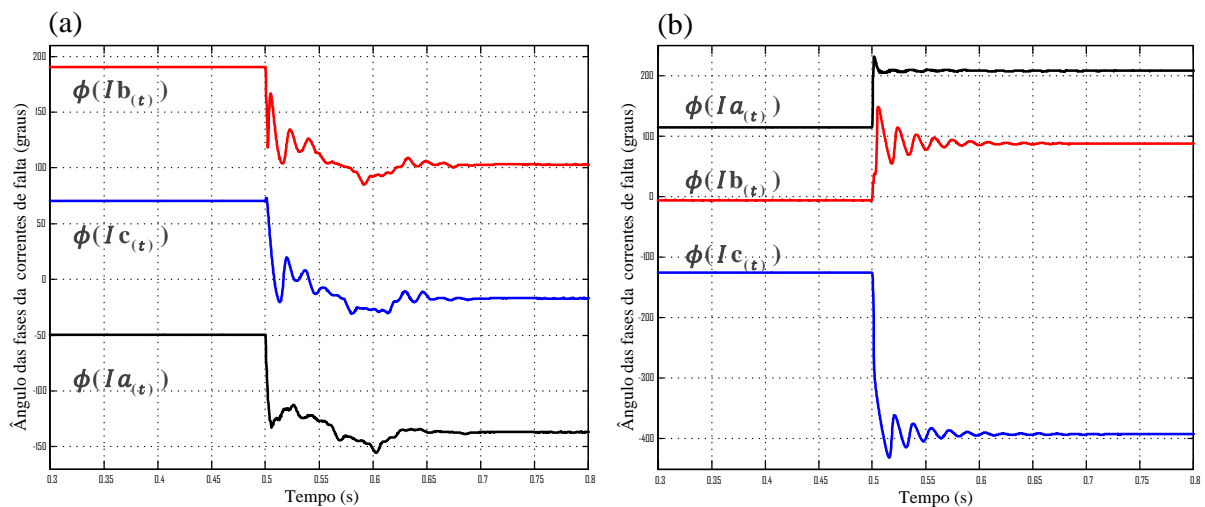
dois sinais de escorregamentos que apresentam esta característica. Na Tabela 3 mostra-se o escorregamento escolhido nestes casos.

5.3.3 Ajustes do escorregamento angular para faltas trifásicas

Para as faltas trifásicas foram simuladas 18 faltas ao 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% da linha de transmissão, com resistência de falta de 2, 10, 50 ohms, e considerando ambos sentidos do fluxo de potência de pré-falta. Foi realizado um total de 108 simulações.

Na Figura 46 ilustra-se o comportamento típico do escorregamento angular dos sinais de corrente para as 3 fases, quando se simula uma falta trifásica, Fase A- B-C-T, onde a potência pré-falta flui do terminal local ao terminal remoto.

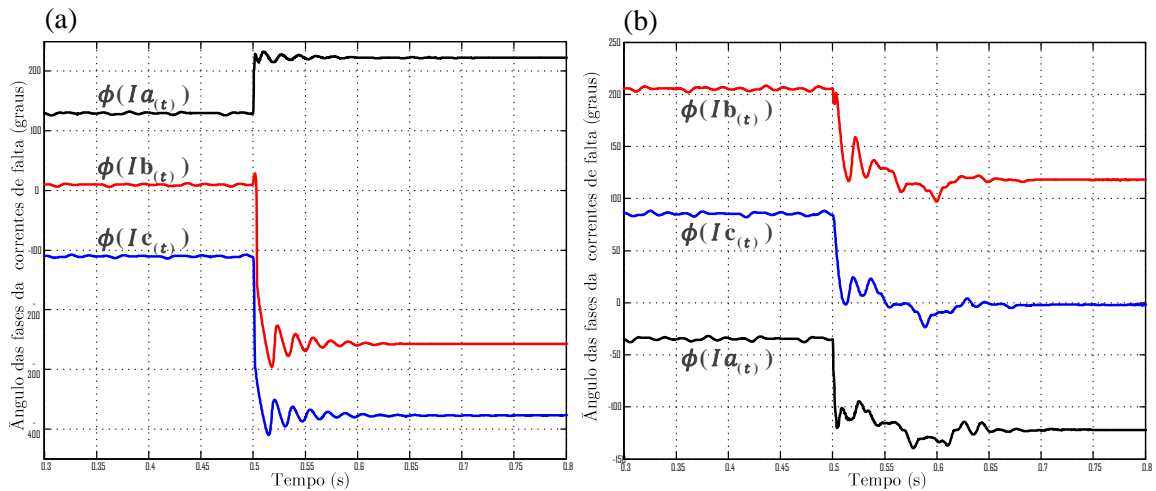
Figura 46 - Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, terminal local (a) e, terminal remoto (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 47 ilustra-se o escorregamento angular dos sinais da corrente trifásica, quando a potência de pré-falta flui do terminal remoto ao terminal local.

Figura 47 - Escorregamento angular das três fases dos sinais de corrente em ambos os terminais da linha de transmissão, terminal local (a) e, terminal remoto (b).



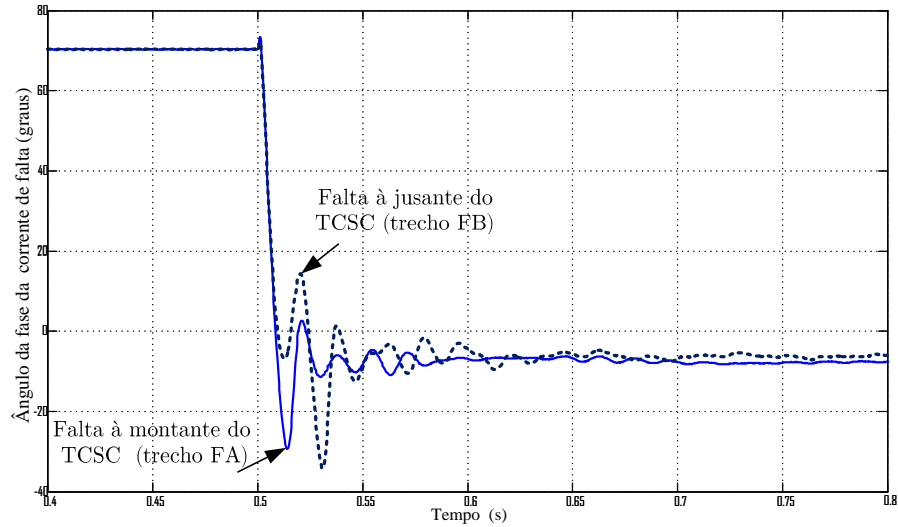
Fonte: Elaborado pelo autor.

A sub-rotina apresentada consegue detectar corretamente a posição da falta com relação a compensação série, para faltas trifásicas, porque seleciona corretamente o sinal que entra na etapa de *fuzzificação* dos 12 possíveis escorregamentos dos sinais apresentados nas Figuras 46 e 47. Seleciona-se o sinal que apresenta um escorregamento angular negativo, neste caso existem três sinais de escorregamentos que apresentam esta característica. Na Tabela 3 mostra-se o escorregamento escolhido nestes casos.

5.3.4 Ajustes do escorregamento angular para faltas no trecho FA ou FB

Os ajustes do escorregamento angular para as faltas a montante e a jusante da compensação série TCSC são feitos para diferenciar a posição da falta, a montante ou a jusante, avaliando um intervalo de tempo, que varia do início da falta até um ciclo depois, uma vez que para os instantes de tempo posteriores não se consegue identificar o padrão que discrimina a posição da falta, como se ilustra na Figura 48.

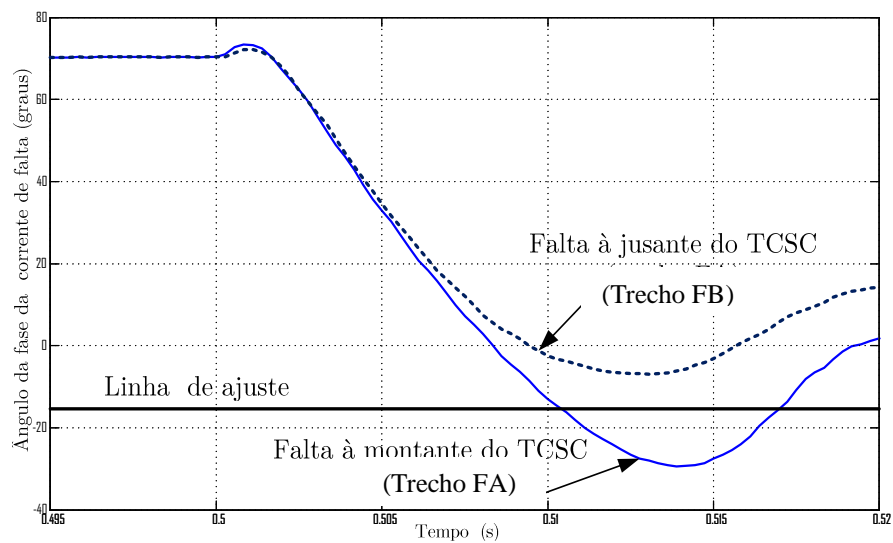
Figura 48 - Escorregamento angular de uma fase medida no terminal local.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 49 ilustra-se uma ampliação da figura 48, que é o intervalo onde é aplicada a técnica de detecção da posição da falta para linha com TCSC instalado. Nesta figura observa-se claramente que se pode discriminar a posição de faltas no intervalo de tempo entre o instante em que se produz a falta, e um ciclo depois (16,66 ms). As linhas pontilhadas representam o escorregamento para falta a jusante do TCSC e a contínua para faltas a montante.

Figura 49 - Escorregamento angular de uma fase medido no terminal local em um ciclo após a incidência da falta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 RESULTADOS DOS TESTES DO LOCALIZADOR DE FALTAS

O localizador foi testado para diversos cenários, variando-se o tipo de falta, sentido do fluxo de potência pré-falta, resistência de falta, e em diferentes pontos da linha de transmissão tanto para a montante como para a jusante do TCSC. A seguir apresentam-se os resultados obtidos para estes cenários.

5.4.1 Localizador de faltas com resistência de falta de 2,0 Ohms

Para os testes neste cenário foram simulados 10 tipos de falta, para ambos os sentidos do fluxo de potência pré-falta em distintos pontos da linha de transmissão, como apresentado na Tabela 6, que mostra os resultados obtidos, para faltas aplicadas entre o terminal A e o TCSC, quando a resistência de falta é de 2 Ohms, tomando como referência o terminal local A, onde a porcentagem de erro é calculada com a seguinte equação.

$$\% \text{ erro} = \left| \frac{\text{distância à falta} - \text{distância calculada}}{\text{comprimento da linha de transmissão}} \right| \times 100\% \quad (71)$$

Tabela 6 – Resultados para faltas a montante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	5	4,58	0,42
A-T, B-T, C-T	25	25,67	0,67
	45	45,75	0,75
Bifásica	5	5,23	0,23
	A-B, B-C, C-A	25	26,10
		45	45,76
Bifásica-Terra	5	5,84	0,84
	A-B-T, B-C-T, C-A-T	25	26,41
		45	45,69
Trifásica-Terra	5	5,92	0,92
	A-B-C-T	25	26,17
		45	45,95

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 7, mostram-se as médias das distâncias obtidas pelo localizador de faltas, para faltas produzidas a jusante do TCSC, com a mesma resistência de falta de 2 Ohms.

Tabela 7 – Resultados para faltas a jusante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	55	50,03	4,97
A-T, B-T, C-T	75	65,35	9,65
	95	83,87	11,13
Bifásica	55	59,87	4,87
A-B, B-C, C-A	75	62,42	12,58
	95	83,74	11,26
Bifásica-Terra	55	56,01	1,01
A-B-T, B-C-T, C-A-T	75	63,06	11,94
	95	77,61	17,37
Trifásica-Terra	55	51,76	3,24
A-B-C-T	75	65,16	9,84
	95	79,95	15,05

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.4.2 Localizador de faltas com resistência de falta de 10 Ohms

As condições de testes são as mesmas do caso anterior, porém foi considerada uma resistência de falta relativamente alta, de 10 Ohms para todas as faltas, cujos resultados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados para faltas a montante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	5	5,23	0,23
A-T, B-T, C-T	25	26,49	1,49
	45	45,16	0,16
Bifásica	5	4,81	0,19
A-B, B-C, C-A	25	25,39	0,39
	45	46,63	1,63
Bifásica-Terra	5	6,48	1,48
A-B-T, B-C-T, C-A-T	25	25,35	0,35
	45	47,98	2,98
Trifásica-Terra	5	7,16	2,16
A-B-C-T	25	26,42	1,42
	45	44,02	0,98

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 9, mostra a média das distâncias calculadas pelo localizador de faltas, para faltas produzidas a jusante do TCSC, com resistência de falta de 10 Ohms.

Tabela 9 – Resultados para faltas a jusante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	55	47,01	7,99
A-T, B-T, C-T	75	58,15	16,85
	95	82,52	12,48
Bifásica	55	62,44	7,44
A-B, B-C, C-A	75	72,06	2,94
	95	78,5	16,50
Bifásica-Terra	55	64,87	9,87
A-B-T, B-C-T, C-A-T	75	77,70	2,3
	95	84,05	10,95
Trifásica-Terra	55	58,99	3,99
A-B-C-T	75	70,07	4,93
	95	78,42	16,58

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.4.3 Localizador de faltas com resistência de 50 Ohms

O localizador de faltas, finalmente foi testado para faltas com resistência de faltas de 50 Ohms, que tem uma baixa probabilidade de ocorrer para determinados tipos de faltas, como as faltas bifásicas. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados para faltas a montante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	5	4,98	0,02
A-T, B-T, C-T	25	25,17	0,17
	45	44,03	0,97
Bifásica	5	6,44	1,44
A-B, B-C, C-A	25	25,59	0,59
	45	47,31	2,31
Bifásica-Terra	5	7,81	2,81
A-B-T, B-C-T, C-A-T	25	30,67	5,67
	45	49,78	4,78
Trifásica-Terra	5	9,59	4,59
A-B-C-T	25	36,99	11,99
	45	66,18	21,18

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 11, mostram-se as médias das distâncias calculadas pelo localizador de faltas, para faltas produzidas a jusante do TCSC, com uma resistência de falta de 50 Ohms.

Tabela 11 – Resultados para faltas a jusante do TCSC.

Tipo de falta	Distância à falta em (km)	Distância média calculada em (km)	% de erro
Monofásica	55	64,06	9,06
	75	89,67	14,67
	95	103,10	8,10
Bifásica	55	63,15	8,15
	75	81,7	6,70
	95	102,75	7,75
Bifásica-Terra	55	60,15	5,15
	75	84,42	9,42
	95	102,8	7,80
Trifásica-Terra	55	84,25	29,25
	75	93,67	18,67
	95	104,6	9,60

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos ajustes do escorregamento angular efetuado para diferentes tipos de faltas, considerando ambos os sentidos do fluxo de potência de pré-falta e as faltas ocorrendo com diversos valores resistência de falta, a sub-rotina de detecção da posição da falta com relação a compensação série, conseguiu discriminar com maior facilidade as faltas com baixa resistência de falta.

O localizador de falta apresenta uma alta precisão para faltas que ocorrem a montante do TCSC, porque nesta condição o comportamento dinâmico do TCSC em condições de faltas não interfere no cálculo da distância à falta. Por outro lado, para as faltas que ocorrem a jusante do TCSC a precisão do localizador é reduzida.

Para faltas trifásicas com resistência de falta mais elevadas, que tem uma probabilidade muito baixa de ocorrer, o localizador de faltas apresenta a maior perda precisão, já que nestes casos esta falta se comporta como uma conexão de uma carga resistiva balanceada ligada na linha de transmissão em um instante predeterminado.

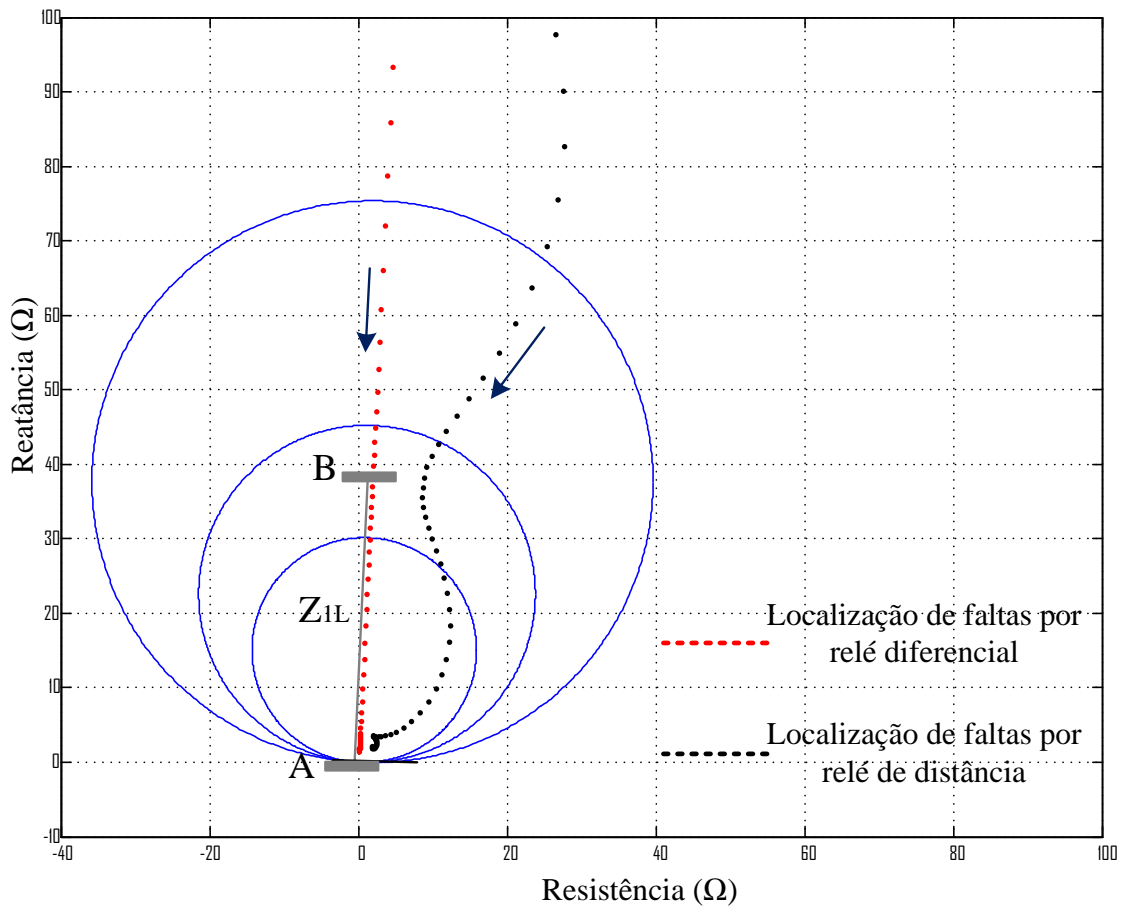
5.6 REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS TESTES NO PLANO R-X

Nesta seção ilustra-se a distância calculada pelo localizador de faltas no plano de impedância R-X, onde o caminho desde o início de detecção da falta até o tempo final utilizado pelo algoritmo, é representado por pontos vermelhos convergindo ao ponto da linha de transmissão onde ocorre a falta. Representa-se também através de pontos pretos, a trajetória referente ao desempenho de um relé de proteção de distância para localização da falta, instalado no mesmo ponto que o localizador de faltas.

5.6.1 Falta monofásica a 5km da linha de transmissão desde o terminal A com R_f de 2 Ohms

Na Figura 50, ilustra-se o comportamento de convergência do localizador de faltas para uma impedância equivalente a 5 km da linha de transmissão. O relé de distância consegue detectar a falta em sua primeira zona de proteção, devido à baixa resistência de falta e o fato da falta estar localizada a montante do TCSC.

Figura 50 – Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.

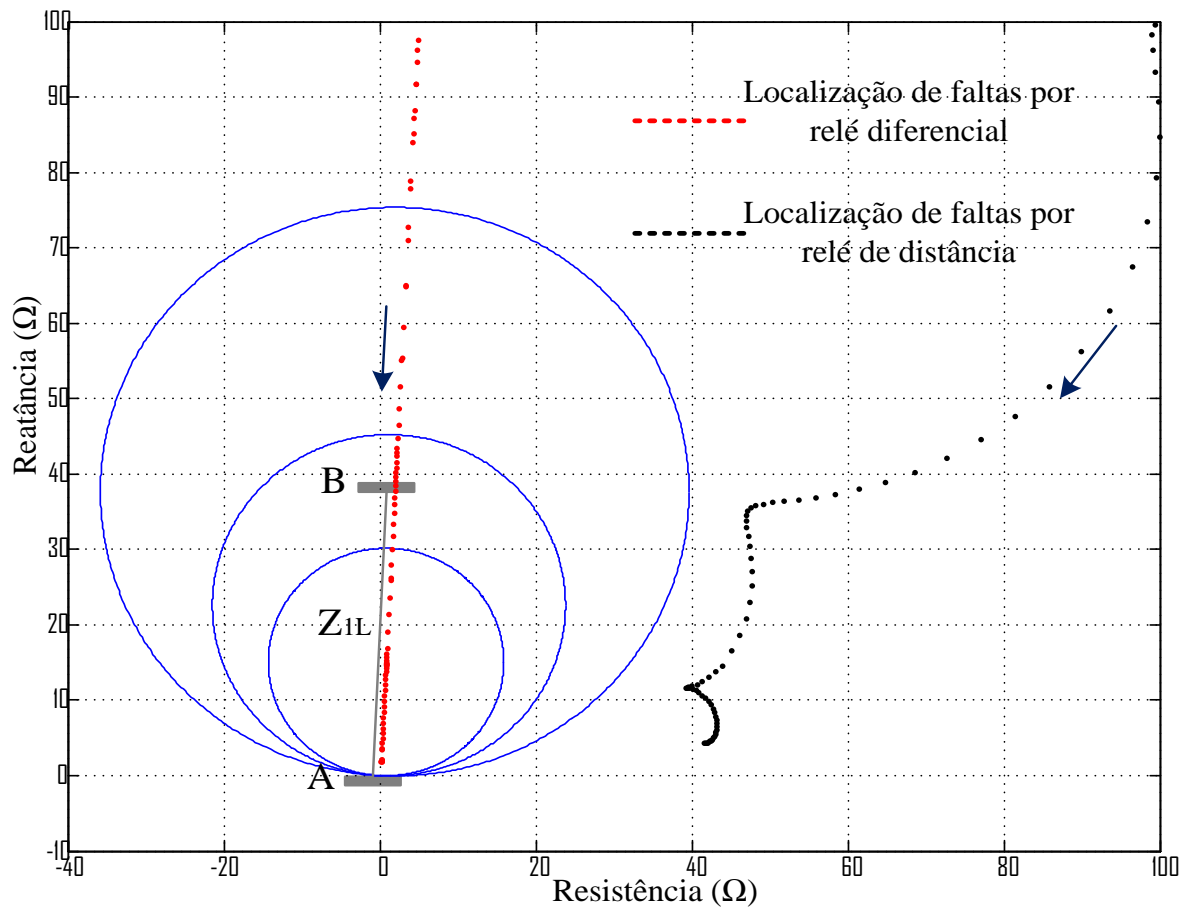


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6.2 Falta monofásica a 5km da linha de transmissão desde o terminal A com RF de 50 Ohms

Neste caso a falta ocorre no mesmo ponto da linha de transmissão do caso anterior, no entanto aumenta-se a resistência de falta para 50 Ohms. Neste cenário o relé de proteção de distância não consegue detectar a falta dentro de suas zonas de proteção, devido à alta resistência de falta como ilustrado na Figura 51.

Figura 51 - Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.

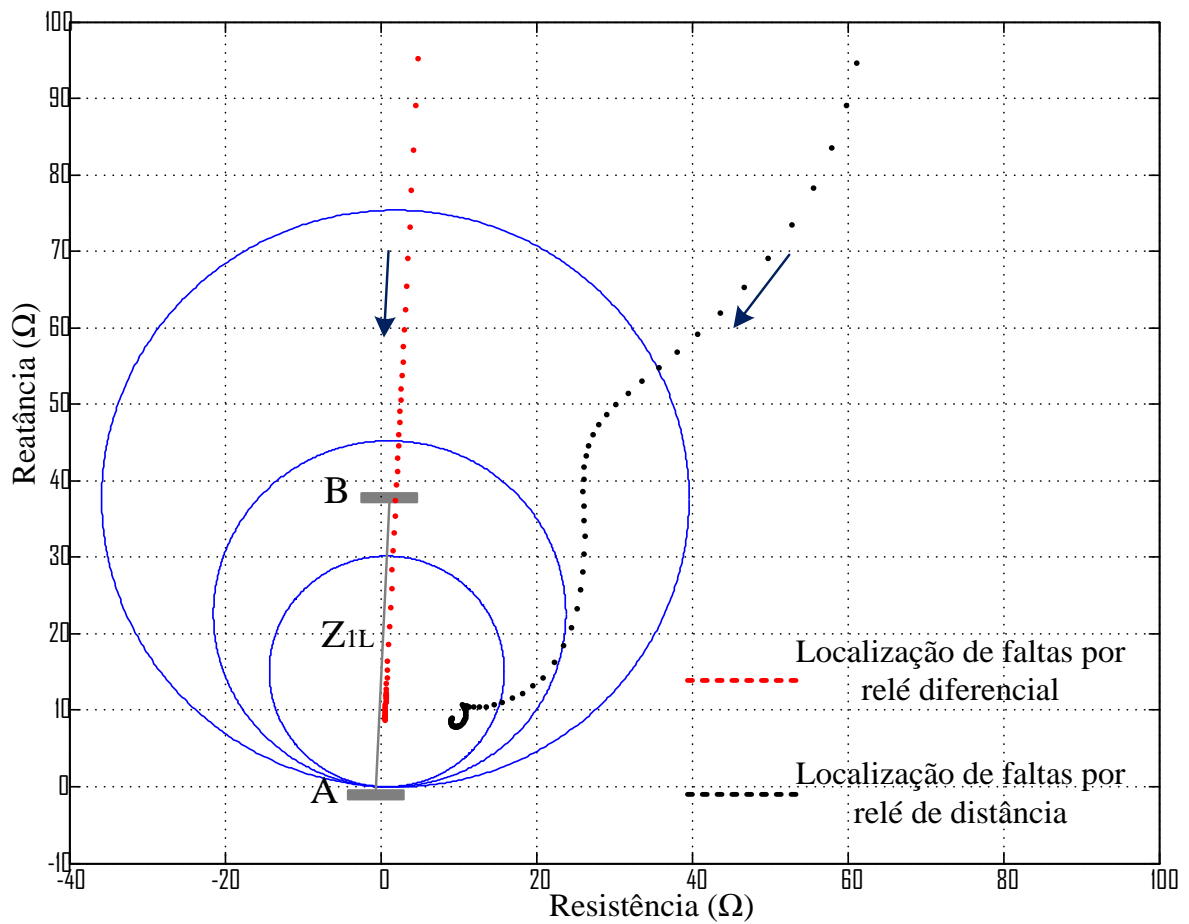


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6.3 Falta trifásica a 25km da linha de transmissão desde o terminal A com R_f de 2 Ohms.

Para este caso é simulada uma falta a 25 km da linha de transmissão, onde se observa que o relé de distância detecta a falta dentro de sua zona de proteção, como ilustrado na Figura 52. A trajetória do relé de distância é bem afastada da trajetória central de suas zonas de proteção devido ao aumento da distância à falta, mas no final atua dentro da zona de proteção correta.

Figura 52 - Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.

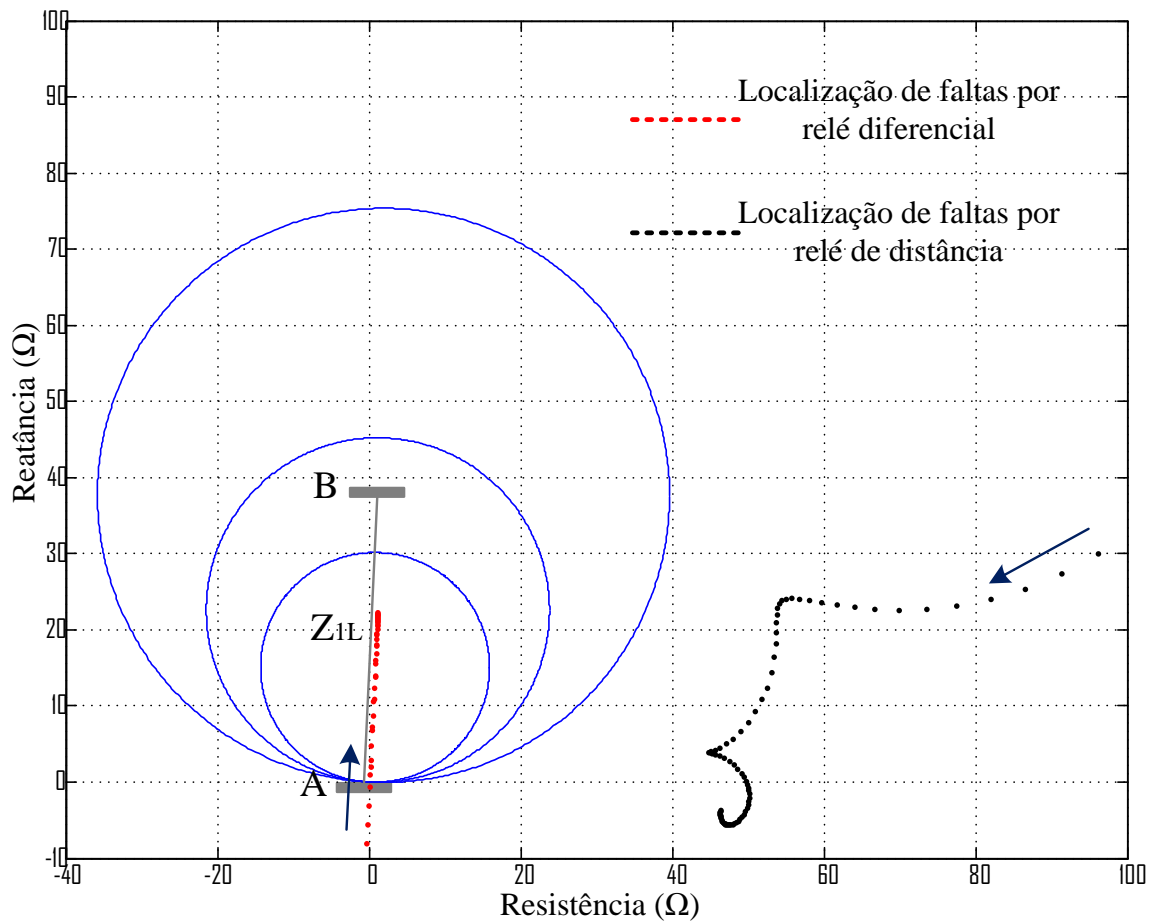


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6.4 Falta monofásica a 55km da linha de transmissão a partir do terminal A com R_f de 50 Ohms

Neste cenário é simulada uma falta a 55 km, poucos quilômetros à jusante do TCSC, que está instalado a 50 km da linha de transmissão. Verifica-se na Figura 53 que a reatância capacitiva do TCSC suprime a reatância indutiva da linha de transmissão, tendo como resultado final uma reatância equivalente capacitiva medida pelo relé de distância.

Figura 53 - Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.

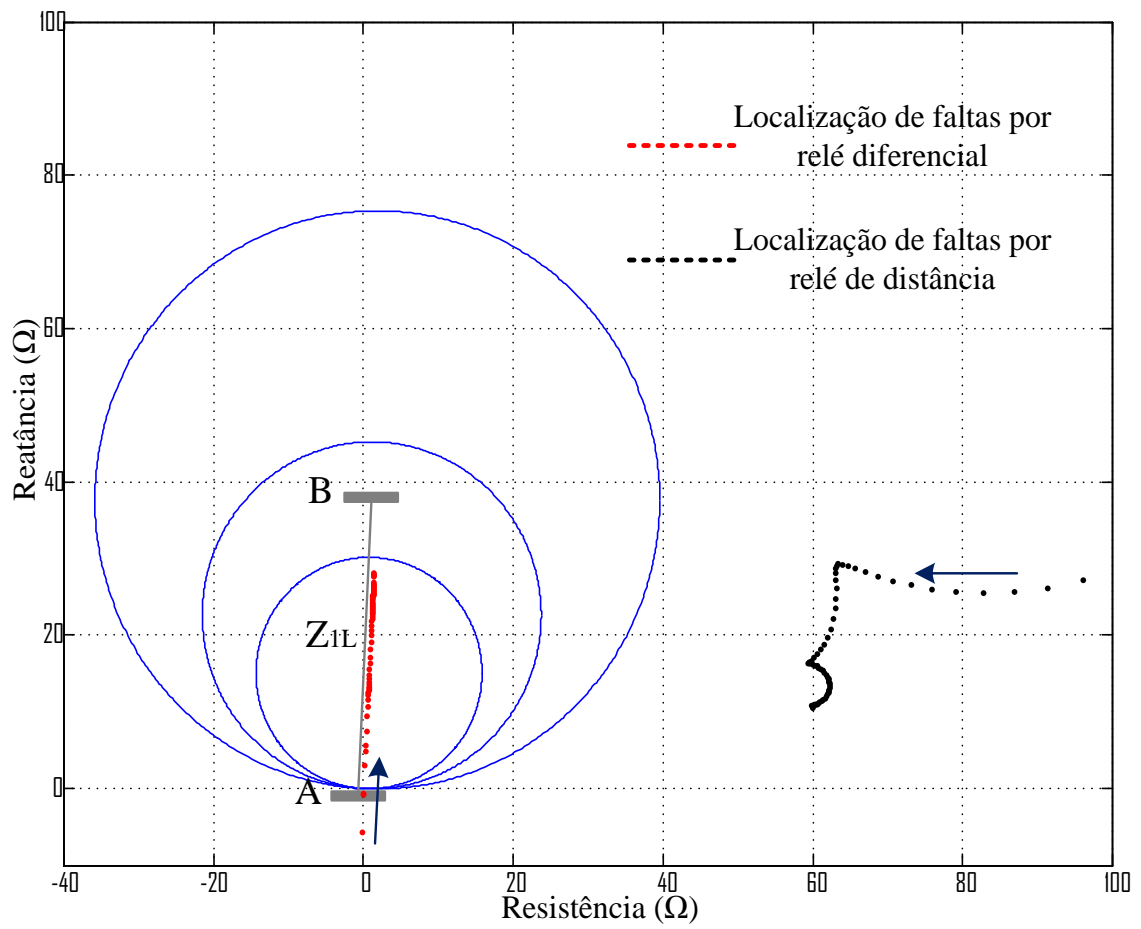


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6.5 Falta trifásica a 75km da linha de transmissão desde o terminal A com R_f de 50 Ohms

Neste último teste, simula-se uma falta a 75 km da linha, a jusante do TCSC. Considerando que o grau de compensação máximo é de 70 %, o que significa que o TCSC só pode compensar no máximo 70% da reatância da linha de transmissão. Em função desta restrição, a reatância indutiva equivalente dos 75 km da linha de transmissão, e os 70% de compensação de reatância capacitiva do TCSC não pode ser capacitiva, como ilustrado na Figura 54.

Figura 54 - Dinâmicas do localizador de faltas e do relé de proteção de distância no plano R-X.



Fonte: Elaborado pelo Autor

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A sub-rotina implementada para a detecção da posição da falta com relação a compensação série, baseada em lógica difusa, que utiliza a medição do escorregamento angular dos sinais de corrente em ambos terminais da linha de transmissão, é a característica chave para a implementação do algoritmo de localização de faltas. Uma vez que nos testes efetuados obteve-se a identificação e a localização das faltas com um grau de precisão aceitável, principalmente, para aqueles tipos de faltas com maior probabilidade de ocorrer no sistema de transmissão.

Esta proposta de algoritmo é direcionada, principalmente, para a incorporação da função de localização de faltas em relés de proteção diferencial de corrente, e assim aproveitar a infraestrutura de comunicação dos relés diferenciais, reduzindo significativamente os custos na aquisição de novos equipamentos que tem a mesma função, como o registrador digital de perturbações (RDPs) instalado em ambos terminais da linha de transmissão. Com a incorporação desta função, a funcionalidade do relé diferencial aumenta consideravelmente.

Os resultados das simulações via a interface gráfica do ATP-EMTP, o ATPDraw, mostram uma boa precisão da localização de faltas, para falta produzidas a montante do TCSC, e também uma boa precisão para faltas produzidas a jusante do TCSC. Nestas simulações foram consideradas as variações de diversos parâmetros, como tipos de faltas, resistências de faltas, localização da falta e sentido do fluxo de potência de pré-falta.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros propõe-se o desenvolvimento de algoritmos de localização de faltas para linhas de transmissão com circuitos duplos e linhas multi-terminais, onde em um de seus ramos instala-se o TCSC. Além disso, pode-se considerar outros dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmissions Systems*) instalados nas linhas de transmissão como SSSC (*Static Synchronous Series. Compensator*) UPFC (*Unified Power Flow Controller*), SVC (*Static VAR Compensator*).

REFERÊNCIAS

ALSTOM. **Network protection & automation guide**. [S.l: s.n.], 2002. 497 p.

BORRÉ, A. C. **Estudo de compensador série baseado em reatâncias controláveis**. [S.l.]: Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2013. 182 p.

CARDOSO JUNIOR, G.; FIGUEIREDO, E. F. A Experiência de furnas na utilização de capacitores série: Dimensionamento, Performance Operativa e Características Principais dos Bancos de 750 kV. **Eletroevolução**, França, v. 9, n. 7, p. 42–46, 1997.

CHO, Y. S. et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 73–78, 2009.

DALCASTAGNÊ, A. L. et al. An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 2318–2329, 2008.

DAS, B.; REDDY, J. V. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2 I, p. 609–616, 2005.

GONÇALVES, D. DO N. **Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com TCSC**. [S.l.]: Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2007. 150 p.

HE, J.; ZENG, R.; ZHANG, B. **Methodology and technology for power system grounding**. Fusionopolis: John Wiley & Sons, 2013. 557 p.

IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E.; SAHA, M. M. Postfault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 74–81, 2007.

JAN IŻYKOWSKI. **Fault location on power transmission lines**. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008. 221 p.

KARIMI-GHATEMANI, M. **Enhanced phase-locked loop structures for power and energy applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. v. 53. 203 p.

KASZTENNY, B. et al. Tutorial on operating characteristics of microprocessor-based multiterminal line current differential relays. WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 38., 2011, Spokane. **Anais...** Spokane: Schweitzer Engineering Laboratories, 2011. p. 1-30

KASZTENNY, B.; MAZEREEUW, J.; CAMPBELL, B. **Phase selection for single-pole tripping :weak infeed conditions and cross-country faults**. In: WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 27., 2000, Ontario. **Annual...** Ontario: Spokane, 2000. p.1-19

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems**. New York: Wiley - IEEE , 2002. 477 p.

MAZNIEWSKI, P.; IZYKOWSKI, J. ATP-EMTP investigation of adaptive distance protection for transmissions lines with series compensation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM: MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS- **MEPS**, 10., 2010, Wroclaw. **Proceedings...** Wroclaw: [s.n], 2010. p. 1-6

MAZNIEWSKI, P.; IZYKOWSKI, J. **Detection of fault position with respect to the compensating bank in series compensated line by measurement of phase shift for distance relay input currents**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 8., 2009, Karpacz. **Anais...**Karpacz: Cottbus, 2009. p. 300-303

MONDAL, D.; CHAKRABARTI, A.; SENGUPTA, A. **Power system small signal stability analysis and control**. [S.l.]: Academic , 2014. 317 p.

NOBAKHTI, S. M.; AKHBARI, M. A new algorithm for fault location in series compensated transmission lines with TCSC. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London,v. 57, n. 8, p. 79–89, 2014.

NYQUIST, H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, Toronto, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.

ORDACGI FILHO, J. M. **Proteção de linhas de transmissão**. [S.l.: s.n.,200-].

PADIYAR, K. R. **FACTS controllers in power transmission and distribution**. New Delhi: New Age International, 2007. 532 p.

REYES-ARCHUNDIA, E. et al. Fault detection and localization in transmission lines with a static synchronous series compensator. **Advances in Electrical and Computer Engineering**, Suceava, v. 15, n. 3, p 17-22, 2015.

SACHDEV M. S. **Advancement in microprocessor based protection and communication**. Piscataway: IEEE Tutorial Course, 1997. 127 p.

SAHA, M. M. et al. A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 789–795, 1999.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault location on power networks**. New York: Springer-Verlag London, 2009. 425 p.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Fault location on series-compensated transmission line using measurements of current differential protective relays. In: MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS, 10., 2010, Wroclaw. **Anais...**Wroclaw: [s.n.], 2010. p.1-6

SIDHU, T. S.; KHEDERZADEH, M. TCSC impact on communication-aided distance-protection schemes and its mitigation. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 152, n. 5, p. 714–728, 2005.

TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, 1982.

VÁZQUEZ, M. E.; CASTRUITA, Á. J. Protección de distancia basada en el reconocimiento de patrones de onda viajera. **Ciencia UANL**, Nuevo Leon, v. 12, n. 2, p. 150–157, 2009.

WALDEMAR, R.; JANUSZ, S.; WISZNIEWSKI, A. **Digital signal processing in power system protection and control**. New York: Springer-Verlag London, 2011. v. 53

WISZNIEWSKI, A. Accurate fault impedance locating algorithm. **IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 130, n. 6, p. 311, 1983.

YEDIDI, V. K.; JOHNSON, B. K. Design of TCSC for classroom and research applications on an analog model power system. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 9., 2006, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IEEE, 2006. p. 1–8.

YU, C. S. et al. A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 17, n. 1, p. 33–46, 2002.

ZIEGLER, G. **Numerical differential protection principles and applications**. 2. ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2012. 279 p.