



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL INCREMENTAL DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO NO PLANO ALFA**

LETÍCIA ALMEIDA GAMA

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL INCREMENTAL DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO NO PLANO ALFA**

LETÍCIA ALMEIDA GAMA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



**KLEBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)**



**FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)**



**LEANDRO RAMOS DE ARAUJO, Dr., UFJF
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Brasília, 04 de Maio de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

GAMA, LETÍCIA ALMEIDA

Proteção Diferencial Incremental de Linhas de Transmissão no Plano Alfa. [Distrito Federal] 2017.

xvi, 70p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestra em Engenharia Elétrica, 2017).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial

2. Plano Alfa

3. Linha de Transmissão

4. ATP

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GAMA, L. A. (2017). Proteção Diferencial Incremental de Linhas de Transmissão no Plano Alfa, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM - 660/2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Letícia Almeida Gama

TÍTULO: Proteção Diferencial Incremental de Linhas de Transmissão no Plano Alfa.

GRAU: Mestra em Engenharia Elétrica

ANO: 2017

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



Letícia Almeida Gama

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Kleber Melo e Silva, por toda a orientação, dedicação e paciência durante o desenvolvimento desta dissertação. Também agradeço por ter se tornado uma inspiração profissional, pois devido ao seu prazer e sua competência em ensinar, a área acadêmica é agora muito bem vista e, por vezes, cobiçada por mim.

Agradeço ao Professor Felipe Vigolvinho Lopes pela parceria e por sua disposição e animação em ajudar sempre que fosse possível.

Agradeço a minha família, meus pais, Janio e Sonia, que sempre me incentivaram a estudar e buscar ser a minha melhor versão e minha irmã, Júlia, que é minha companheira e amiga para todas as horas. Vocês três são tudo para mim, e eu agradeço por todo amor e carinho de sempre mas principalmente pelo apoio neste últimos dois anos de mestrado longe de vocês.

Agradeço ao meu namorado Jhonatan pelo apoio e incentivo na minha decisão de fazer mestrado. Pelas horas gastas na madrugada para me ajudar sem nem hesitar, pelo ombro amigo de sempre e pelo amor e história que temos juntos.

Agradeço aos colegas que tive o prazer de conviver no Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos. Em especial, agradeço a Maria Leonor Silva e a Larissa Marques por terem me acolhido desde início e pela amizade linda e sincera que me ofereceram. Agradeço também as integrantes do Clube da Luluzinha do LAPSE, vocês são demais e todas farão muita falta no meu dia-a-dia.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a conclusão deste capítulo tão importante na minha vida.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise das trajetórias do elemento diferencial convencional no plano alfa, juntamente com a análise de um elemento diferencial incremental. A dedução analítica dos elementos de fase convencional e incremental, assim como a dedução dos elementos de sequência zero e negativa, é desenvolvida. Para avaliar o desempenho do algoritmo de proteção são realizadas análises transitórias, utilizadas para avaliar o comportamento da proteção principalmente durante a fase de transição entre a pré-falta e a falta, e análises de sensibilidade paramétrica, nas quais é possível avaliar a influência dos parâmetros do sistema elétrico durante o regime permanente de falta por meio das trajetórias no plano alfa. Estas análises foram realizadas por meio do *software Alternative Transients Program* (ATP) e considerando um sistema de uma linha de transmissão de 500 kV de 200 km de extensão. O sistema teste é simulado em várias condições de falta, para as quais, os parâmetros variam em uma ampla faixa de valores. Em geral são analisados os seguintes parâmetros: carregamento do sistema, força das fontes utilizando a variável *SIR*, resistência de falta, assim como a localização e os tipos de faltas. Os resultados obtidos evidenciam as vantagens do elemento incremental proposto, e confirmam o comportamento eficiente e apropriado exibido pelo algoritmo. Através destes resultados conclui-se que o algoritmo proposto pode se tornar uma alternativa segura para a proteção de linhas de transmissão.

Palavras-chave: proteção diferencial, proteção diferencial incremental, linhas de transmissão, plano alfa, ATP.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the trajectories of the conventional differential element on the alpha plane, along with the analysis of an incremental differential element. The analytical deduction of the conventional and incremental phase elements, as well as the deduction of the zero and negative sequence elements is developed. In order to evaluate the performance of the protection algorithm, it is performed transient analyzes, used to evaluate the protection behavior mostly through the transition between the pre fault and fault periods, and parametric sensitivity analyzes, in which it is possible to evaluate the influence of the electrical system parameters during the fault steady state through the trajectories in the alpha plane. These analyzes were carried out using the software Alternative Transients Program (ATP) and considering a 500 kV 200 km long transmission line system. The test system is simulated under several fault conditions in which, the parameters vary over a wide range of values. In general, system loading, source strength using the SIR variable, fault resistance, as well as location and types of faults were analyzed. The obtained results attest the advantages of the proposed incremental element, and confirm the efficient and appropriate behavior exhibited by the algorithm. Through these results it is concluded that the proposed algorithm can become a safe alternative for the protection of transmission lines.

Keywords: differential protection, incremental differential protection, transmission lines, alpha plane, ATP.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Glossário	x
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Organização do Texto	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	4
2.1 Proteção Diferencial de LTs	4
Capítulo 3 – Fundamentos da Proteção Diferencial de LTs	10
3.1 Proteção de Sistemas Elétricos	10
3.2 Proteção Diferencial de LTs	11
3.2.1 Elementos Diferenciais	13
3.2.2 Planos de Representação	13
3.2.3 Compensação da Corrente Capacitiva	15
3.3 Proteção Diferencial de LTs no Plano Alfa	17
3.3.1 Atraso no Canal de Comunicação	18
3.3.2 Saturação no TC	19
3.3.3 Curtos-circuitos com <i>Outfeed</i>	20
3.3.4 Característica de Restrição Modificada	20
3.4 Análise de Trajetórias no Plano Alfa	21
3.4.1 Expressões Analíticas das Contribuições de Corrente	23
3.4.2 Razões no Plano Alfa	28
3.4.2.1 Curto-circuito Monofásico AT	29
3.4.2.2 Curto-circuito Trifásico ABC	31
3.4.2.3 Curto-circuito Bifásico BC	33
3.4.2.4 Curto-circuito Bifásico Terra BCT	34
3.5 Proteção Diferencial Incremental de LTs no Plano Alfa	36
3.5.1 Elementos Diferenciais	36

3.6	Considerações Finais	37
Capítulo 4 – Algoritmo Proposto		38
4.1	Algoritmo Proposto	38
4.1.1	Sincronização dos Sinais	38
4.1.2	Normalização dos Sinais	39
4.1.3	Estimação Fasorial	40
4.1.4	Compensação da Corrente Capacitiva	40
4.1.5	Filtro Delta	41
4.1.6	Plano Alfa de Corrente Incremental	41
4.2	Trajétórias dos Elementos $\Delta 87L$	43
4.2.1	Curto-circuito Monofásico	45
4.2.2	Curto-circuito Trifásico	46
4.2.3	Curto-circuito Bifásico	47
4.2.4	Curto-circuito Bifásico Terra	48
4.3	Comparação de Coeficientes Finais	49
4.4	Considerações Finais	50
Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados		51
5.1	Sistema Teste	51
5.2	Análises Transitórias de Curto-Circuito - ATCs	53
5.2.1	ATC.1 - Curto-circuito Externo	53
5.2.2	ATC.2 - Curto-circuito Interno	54
5.2.3	ATC.3 - Curto-circuito Interno com <i>Outfeed</i>	54
5.2.4	ATC.4 - Curto-circuito Interno	58
5.3	Análises de Sensibilidade Paramétrica - ASPs	59
5.3.1	Variação do Carregamento	60
5.3.2	Variação da Resistência de Falta	62
5.3.3	Variação da Localização de Falta	63
5.3.4	Variação da Força das Fontes	64
Capítulo 6 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros		66
Referências Bibliográficas		68

LISTA DE FIGURAS

3.1	Planos Operacionais. (a) Plano Operacional Básico. (b) Plano Operacional com <i>Pick-up</i>	14
3.2	Representações do Plano- α . (a) Plano- α complexo. (b) Plano- α com região de restrição circular.	15
3.3	Representação simplificada da corrente capacitiva.	16
3.4	Regiões no Plano- α . (a) Localizações de curtos-circuitos. (b) Localizações considerando atraso de comunicação.	18
3.5	(a) Característica de restrição modificada. (b) Vantagem em tolerância à assimetria do canal. (c) Vantagem em tolerância ao <i>outfeed</i>	21
3.6	(a) Trajetória no Plano Operacional. (b) Trajetória no Plano Alfa.	22
3.7	Linha de Transmissão Curta.	23
3.8	Diagrama de Sequência da Linha de Transmissão Curta.	24
4.1	Diagrama de blocos do algoritmo proposto.	39
4.2	Trajetória percorrida por curtos-circuitos no plano- α	42
5.1	Modelo do sistema elétrico utilizado.	51
5.2	Caso 1 - Curto-circuito externo BCT (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	53
5.3	Caso 2 - Curto-circuito interno ABC (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	54
5.4	Caso 3 - Curto-circuito interno BT com <i>outfeed</i> (a) Módulo de $\hat{I}_{L\phi}$; (b) Módulo de $\hat{I}_{R\phi}$	55
5.5	Caso 3 - Curto-circuito interno BT com <i>outfeed</i> (a) Fase de $\hat{I}_{L\phi}$; (b) Fase de $\hat{I}_{R\phi}$	56
5.6	Caso 3 - Curto-circuito interno BT com <i>outfeed</i> (a) Módulo de $\Delta\hat{I}_{L\phi}$; (b) Módulo de $\Delta\hat{I}_{R\phi}$	56

5.7	Caso 3 - Curto-circuito interno BT com <i>outfeed</i> (a) Fase de $\Delta\hat{I}_{L\phi}$; (b) Fase de $\Delta\hat{I}_{R\phi}$	56
5.8	Caso 3 - Curto-circuito interno BT com <i>outfeed</i> (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . .	57
5.9	Caso 4 - Curto-circuito interno AT (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	58
5.10	Caso 1 - Curto-circuito AT com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	61
5.11	Caso 2 - Curto-circuito BC com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	61
5.12	Caso 3 - Curto-circuito ACT com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . . .	61
5.13	Caso 4 - Curto-circuito ABC com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . . .	62
5.14	Caso 5 - Curto-circuito AT com R_f variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . . .	63
5.15	Caso 6 - Curto-circuito AT com p variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.	64
5.16	Caso 7 - Curto-circuito BCT com p variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . . .	64
5.17	Caso 8 - Curto-circuito AT com SIR variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase. . .	65

LISTA DE TABELAS

1.1	Desligamentos forçados no SIN no ano de 2015 (ONS, 2015a; ONS, 2015b). . . .	2
3.1	Falta Trifásica ABC.	27
3.2	Falta Monofásica AT.	27
3.3	Falta Bifásica BC.	27
3.4	Falta Bifásica Terra BCT.	28
3.5	Símbolos das Correntes de Falta.	28
4.1	Falta Trifásica ABC.	43
4.2	Falta Monofásica AT.	44
4.3	Falta Bifásica BC.	44
4.4	Falta Bifásica Terra BCT.	44
4.5	Elementos diferenciais dos algoritmos 87L e $\Delta 87L$	50
5.1	Parâmetros da LT.	52
5.2	Parâmetros Avaliados	59

LISTA DE SÍMBOLOS

\hat{I}_L	Fasores de corrente medidos no terminal local.
\hat{I}_R	Fasores de corrente medidos no terminal remoto.
$\hat{I}_{F1,3\varphi}$	Fasor da corrente de curto trifásico de sequência positiva no local da falta.
$\hat{I}_{F1,1\varphi}$	Fasor da corrente de curto monofásico de sequência positiva no local da falta.
$\hat{I}_{F1,2\varphi}$	Fasor da corrente de curto bifásico de sequência positiva no local da falta.
$\hat{I}_{F1,2\varphi-T}$	Fasor da corrente de curto bifásico-terra de sequência positiva no local da falta.
\hat{I}_{op}	Fasor da corrente de operação.
\hat{I}_{res}	Fasor da corrente de restrição.
I_{pk}	Corrente de <i>pickup</i> , corrente mínima para atuação do relé diferencial.
87	Função diferencial.
87L	Proteção diferencial de linha de transmissão.
$\Delta 87L$	Proteção diferencial incremental de linha de transmissão.
87LA, B, C	Elementos das fase A, B e C da proteção diferencial de linhas.
87LQ, G	Elementos de sequência negativa e zero da proteção diferencial de linhas.
$\Delta 87LA, B, C$	Elementos das fase A, B e C da proteção diferencial incremental de linhas.
K	Ajuste de sensibilidade do relé percentual.
M	Vetor no plano alfa dado pelo quociente entre \hat{I}_R e \hat{I}_L .
M_{fase}	Quociente do plano- α das unidades de fase.
M_{seq}	Quociente do plano- α das unidades de sequência.

m	Parte real de M .
n	Parte imaginária de M .
θ	Ângulo do vetor M .
β	Ângulo de abertura da nova característica no plano alfa.
R	Raio da circunferência externa da nova característica no plano alfa.
\hat{I}_{LD}	Corrente de carga da linha de transmissão.
\hat{I}_{cap}	Corrente capacitiva da linha de transmissão.
a	Operador complexo $1\angle 120^\circ$.
C_0, C_1, C_2	Coefficiente de distribuição de corrente de sequência zero, positiva e negativa.
C_{seq}	Coefficiente de distribuição de corrente de sequência.
D	Coefficiente de divisão de corrente de do curto bifásico-terra.
E, F	Constantes complexas.
\hat{V}_F	Tensão no ponto da falta.
Z_0, Z_1, Z_2	Impedância de Thévenin dos circuitos de sequência zero, positiva e negativa, no local da falta.
Z_{LT}	Impedância série da linha de transmissão.
Y_C	Admitância em paralelo da linha de transmissão.
d	Percentual da linha onde em que ocorre a falta a partir do terminal local.
\hat{V}'_L, \hat{V}'_R	Tensão na barra do terminal local e remoto, respectivamente.
$\hat{I}_{Lcap}, \hat{I}_{Rcap}$	Parcela da corrente capacitiva vinda do terminal local e remoto respectivamente.
\bar{V}_{f1}	Fasor de tensão da fonte 1.
\bar{V}_{f2}	Fasor de tensão da fonte 2.
Z_{f1}	Impedância do equivalente de Thévenin da fonte 1.
Z_{f2}	Impedância do equivalente de Thévenin da fonte 2.

R_0	Resistência de sequência zero dos equivalentes de Thévenin.
X_0	Reatância de sequência zero dos equivalentes de Thévenin.
R_1	Resistência de sequência positiva dos equivalentes de Thévenin.
X_1	Reatância de sequência positiva dos equivalentes de Thévenin.
r_L	Resistência por quilometro das linhas de transmissão.
x_L	Reatância por quilometro das linhas de transmissão.
y_L	admitância por quilometro das linhas de transmissão.
i_{TC}^{prim}	Corrente no primário do transformador de corrente.
i_{TC}^{sec}	Corrente no secundário do transformador de corrente.
RTC	Relação de transformação do transformador de corrente.
r_{TA}	resistência do transformador auxiliar.
v_{out}	tensão de saída do transformador auxiliar.
$H(s)$	Função de transferência do filtro analógico.
f_1	Frequência de fundamental.
f_s	Frequência de amostragem.
f_N	Frequência de Nyquist.
T_{amos}	Taxa de amostragem.
T_s	Período de amostragem.
Y	Valor de pico aceito pelo conversor A/D.
Res	Resolução do conversor A/D.
Z_{10}	Valor quantizado.
RON	Função de arredondamento para o inteiro mais próximo.
X	Entrada do conversor A/D.
PF	Número em ponto flutuante.

$x(t)$	Sinal cujo fasor está sendo estimado.
Y_0	Componente DC da série de Fourier.
Y_{cn}	Coefficiente do cosseno da série de Fourier.
Y_{sn}	Coefficiente do seno da série de Fourier.
n	n-ésima harmônica do sinal.
T	Período do sinal $x(t)$.
A_n	Coefficientes da série compacta de Fourier.
ϕ_n	Fase dos termos da série compacta de Fourier.
X_n	Fasor obtido com os coefficients da série de Fourier.
Δt	Passo de amostragem do sinal.
t_k	k-ésimo múltiplo de Δt .
x_k	amostra de $x(t)$ no instante t_k .
h_{ck}	filtro cosseno.
h_{sk}	filtro seno.
C_1	Coefficiente do filtro cosseno modificado.
C_2	Coefficiente do filtro cosseno modificado.
w_k	k-ésimo elemento da janela de amostras para estimação.
$RTEF$	relação de transformação utilizada na estimação de fasores.
T_d	Atraso de comunicação.
t_d	Atraso estimado do canal de comunicação.
t_{falla}	Instante de aplicação das faltas.

GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EFD	<i>External Fault Detection</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
OPGW	<i>Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire</i>
RMS	<i>Root-Mean-Square</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Pode-se caracterizar o Sistema de Energia Elétrica (SEE) como um grupo de equipamentos operando de forma coordenada entre si, a fim de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores atendendo a determinados padrões de qualidade do serviço. Este último resulta em investimentos nos SEEs, a fim de contemplar o constante aumento da demanda por energia elétrica e, por conseguinte, aumento da complexidade operacional do sistema. Nesse sentido, faz-se necessário o uso de equipamentos cada vez mais eficientes e confiáveis, como por exemplo modernos sistemas de proteção, que garantam que faltas no sistema sejam extintas rápida e apropriadamente, mantendo a integridade dos equipamentos e a estabilidade do próprio SEE (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Os SEEs têm evoluído de pequenos sistemas isolados para sistemas de grande porte cuja operação é feita de forma interligada, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) que se estende por grande parte do território brasileiro. No SIN, a maior parte das unidades geradoras estão distantes dos grandes centros consumidores, de modo que se faz necessária a utilização de linhas de transmissão (LTs) longas. Sendo assim, as linhas exercem um papel importante principalmente quando se considera a operação interligada, dado que são as responsáveis por conectar os diferentes subsistemas, permitindo o intercâmbio de grandes blocos de energia.

Como afirmam Paithankar & Bhide (2007), as LTs são os componentes do SEE mais sujeitos às intempéries climáticas e ambientais, em maior parte por conta de suas grandes extensões e pelo fato de utilização majoritária de linhas aéreas. O número de curtos-circuitos em LTs é consideravelmente alto quando comparado ao número de ocorrências no restante dos equipamentos do SEE. De acordo com relatório anual emitido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o número de desligamentos forçados de LTs no SIN ocasionados no ano de 2015

Tabela 1.1. Desligamentos forçados no SIN no ano de 2015 (ONS, 2015a; ONS, 2015b).

Equipamento	Desligamento	Porcentagem (%)
Linhas de transmissão	3452	40,9
Transformadores	937	11,1
Barramentos	118	1,4
Banco de Capacitores	118	1,4
Reatores	53	0,6
Compensadores Estáticos	182	2,2
Compensadores Síncronos	53	0,6
Unidades Geradoras Hidráulicas	2524	29,9
Unidades Geradoras Térmicas	1013	12,0
Total	8450	100

foi de aproximadamente 41% (ONS, 2015a; ONS, 2015b). Nesse contexto, a utilização de novas filosofias de proteção aplicadas neste componente apresenta vasto campo de pesquisa.

1.2 MOTIVAÇÃO

Conforme já afirmado, as LTs são equipamentos muito propensos à ocorrência de faltas. Por conta disso, estas são muito estudadas e analisadas frente a diferentes filosofias de proteção. A proteção de distância tem sido comumente utilizada em sistemas de média-alta, alta e extra alta tensão, devido ao comprimento e configuração das LTs tornarem o princípio de proteção baseado na comparação de correntes mais oneroso, pois requer o uso de sistemas de comunicação mais sofisticados do que aqueles empregados para a função de proteção de distância (ZIGLER, 2006). Todavia, com os avanços tecnológicos na área da comunicação óptica em conjunto com a utilização de relés numéricos microprocessados, o uso da proteção diferencial como proteção unitária de LTs curtas ou longas tem se mostrado viável (ZIEGLER, 2012).

À vista disso tem-se observado o crescente interesse das empresas do setor no emprego deste tipo de proteção, assim como o aumento no número de pesquisas sendo realizadas nesta área. Diante disso, o desenvolvimento e a constante busca por novos algoritmos que apresentem vantagens em relação aos tradicionalmente empregados, se faz justificada.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é analisar o uso de um algoritmo de proteção diferencial para LTs longas baseado em correntes incrementais. A fim de alcançar este objetivo, primeiramente o sistema teste avaliado será modelado através do *softwares* ATP e, o algoritmo de proteção diferencial incremental analisado será implementado através do *software* Matlab. Após isso, serão realizadas várias simulações, de caráter transitório e também análises de sensibilidade paramétrica, nas quais o sistema em análise será constantemente submetido a situações de operação adversas e condicionado a diferentes tipos de curtos-circuitos. A partir dos resultados obtidos, o desempenho do algoritmo proposto será analisado e suas vantagens e desvantagens serão descritas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este documento está estruturado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, o levantamento do estado da arte sobre a proteção diferencial de LTs com ênfase na aplicação do plano- α é apresentado;
- No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica da proteção diferencial para LTs, detalhando os dois planos de representação mais abordados, plano operacional e plano- α , assim como o comportamento dos elementos diferenciais.
- A descrição do algoritmo proposto e sua fundamentação teórica está disposta no Capítulo 4, no qual todas etapas são expostas detalhadamente.
- No Capítulo 5 são expostas as análises realizadas a partir dos resultados obtidos neste trabalho. Estas análises estão divididas em análises transitórias e análises de sensibilidade paramétrica.
- Por fim, no Capítulo 6 estão expostas as principais conclusões desta dissertação assim como propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos da proteção diferencial de LTs. Esta revisão é necessária e importante para contextualizar esta dissertação com relação a trabalhos recorrentes, assim como apresentar as ideias relevantes dos principais artigos encontrados sobre este tema. Através da Seção 2.1 pode-se observar uma evolução quando se refere ao plano de representação da proteção diferencial de LTs, o tradicional plano operacional é por vezes substituído pelo então não popular plano- α . Nesse sentido, diversos trabalhos são abordados e revisados afim de evidenciar a vantagem da utilização da proteção diferencial de LTs via plano- α .

2.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LTS

Devido ao uso de relés numéricos microprocessados em conjunto com modernos sistemas de comunicações ópticas, a proteção diferencial de corrente para LTs tem sido impulsionada e obteve grande destaque (ZIEGLER, 2012; FERRER; SCHWEITZER, 2010). Nesse contexto, muitos estudos foram elaborados e têm sido reportados com o objetivo de aprimorar o uso desta tecnologia e proporcionar a devida confiabilidade para a proteção diferencial. Um exemplo é o advento quanto ao plano de representação utilizado. A proteção diferencial tradicionalmente utiliza o plano operacional de correntes para analisar se as faltas ocorridas no sistema são internas ou externas à região protegida. Todavia, depois de muitos estudos e análises, o plano- α se mostrou mais atraente e desde então têm sido utilizado como plano de representação da proteção diferencial de LTs por alguns fabricantes. Nesse sentido, os trabalhos aqui expostos evidenciam o uso do plano- α .

Warrington (1962) introduziu o conceito de um plano complexo chamado de plano- α , o qual retrata a razão complexa de correntes presentes em ambos terminais de uma LT. Adicional-

mente, foi apresentado o termo plano- β para o plano inverso ao plano- α . Desde então, diversos trabalhos têm utilizado este conceito como ferramenta para análise da proteção diferencial.

Roberts *et al.* (2001) avaliam a segurança e confiança da proteção diferencial. Adicionalmente, neste artigo são apresentadas diferentes características diferenciais, assim como suas representações no plano- α . Faz-se uma análise comparativa dos tipos de características diferenciais, circulares ou não circulares, com base nas diferentes possibilidades de correntes de operação e restrição. Além disso, apresenta-se um novo elemento diferencial para proteção de LTs, com base na análise feita a partir das trajetórias percorridas no plano- α .

Em Tziouvaras *et al.* (2003) e Altuve *et al.* (2004) os autores reforçam o embasamento teórico da representação de diferentes condições do sistema de potência no plano- α . Os efeitos causados por assimetrias nos canais de comunicação, correntes de carregamentos da linha, não homogeneidade de impedâncias do sistema, correntes provenientes de transformadores de corrente (TCs) saturados e correntes de *outfeed* são estudados neste artigo. A partir destas análises uma nova característica diferencial é apresentada.

De maneira geral, Roberts *et al.* (2001), Tziouvaras *et al.* (2003) e Altuve *et al.* (2004) apresentam a proposta de uma proteção diferencial com característica circular modificada, constituída por três elementos de fase e dois elementos de sequência, zero e negativa. Retratam também a eficácia desta proteção frente a diferentes condições adversas do sistema, através de resultados que indicam alta confiabilidade, com tempos de atuação menores que um ciclo.

Benmouyal & Lee (2004) fazem uma breve revisão das características dos elementos diferenciais de fase e sequência no plano- α , justificando a necessidade do uso dos elementos de sequência e descrevem extensivamente os efeitos que a saturação de um TC traz a estes elementos. Através de um embasamento teórico realizado sobre o efeito da saturação de um TC em fasores computados digitalmente, os autores discorrem sobre o conceito da saturação e como esta condição pode afetar os cinco elementos diferenciais utilizados na proteção diferencial no plano- α . Os autores concluem que a saturação pode causar uma diminuição da magnitude do fasor dos elementos de fase de até 5% e um avanço de fase de até 120 graus. Já nos elementos de sequência a saturação causa uma rotação no fasor, podendo haver uma amplificação desta rotação fazendo com que ela seja maior que a própria rotação da saturação. Este fato pode fazer com que os elementos de sequência se tornem completamente instáveis e causem operações

indevidas quando submetidos a níveis moderados de saturação. Com base em testes desenvolvidos por Benmouyal & Lee (2004) o elemento de sequência zero possui uma tendência em ser mais instável que o elemento de sequência negativa. Porém, em função da possibilidade de ambos elementos de sequência perderem a estabilidade, os mesmos devem ser restringidos para casos nos quais hajam curtos-circuitos externos com saturação de TC. Os autores apresentam então um novo método de restrição utilizando harmônicas de segunda ordem e componente DC de decaimento exponencial.

Em Benmouyal (2005), o autor tem como objetivo revisar e estudar as diferentes situações e fatores que interferem nas trajetórias percorridas por faltas dentro do plano- α . Para isso, Benmouyal (2005) deduz os cálculos das razões das correntes para elementos de fase e de sequência considerando um curto-circuito monofásico na fase A. São feitas análises para casos de aberturas monopolares, aberturas tripolares, saturação de TC para curto-circuitos externos, variação de resistência de falta, variação do carregamento do sistema e compensação série. Neste artigo, é introduzida a ideia de se utilizar elementos diferenciais incrementais. O autor analisa ainda a remoção da corrente pré-falta para elementos de sequência e de fase. Para o primeiro caso, o autor analisa a situação de curto-circuitos ocorrendo durante uma abertura monopolar e conclui que sem a remoção da corrente pré-falta os elementos de sequência possuem sua atuação indevida. Desse modo, a utilização desta técnica é justificada. Quanto ao segundo caso, o autor conclui que esta remoção fornece aos elementos de fase a mesma sensibilidade existente nos elementos de sequência, porém o autor afirma que por motivos de simplicidade esta técnica não se faz necessária devido à existência dos elementos de sequência (sem remoção), os quais fornecerão a sensibilidade necessária.

Afim de dar continuidade as análises incrementais dos elementos de sequência, os autores Benmouyal & Mooney (2006) expõem um trabalho cujo objetivo principal é introduzir um esquema lógico completo que provê a manutenção da sensibilidade dos elementos de sequência sob todas condições de falta possíveis. Para isso, os autores primeiramente fazem uma breve revisão dos princípios básicos dos elementos diferenciais, revisam também a sensibilidade dos elementos de fase e de sequência e então entram no tópico de disparo monopolar e tripolar. As conclusões obtidas pelos autores são que, para casos em que o carregamento é baixo ou até não exista carregamento, os elementos de fase irão possuir praticamente a mesma sensibilidade que

os elementos de sequência independentemente do tipo de disparo (monopolar ou tripolar). Para casos em que o carregamento do sistema é moderado ou elevado, quando consideramos disparo tripolar os elementos de sequência são capazes de prover sensibilidade, com suas trajetórias presentes inteiramente no semi plano direito do plano alfa. Ainda considerando o carregamento do sistema como sendo moderado ou elevado, os elementos de sequência para disparos monopolares perdem sua sensibilidade e possuem comportamento semelhante aos elementos de fase na ocorrência de um curto-circuito durante uma condição de polo aberto. Por conta deste e de outros comportamentos instáveis apresentados pelos elementos de sequência, faz-se necessário subtrair a corrente de pré-falta das suas correntes de falta afim de recuperar sua sensibilidade e garantir correto funcionamento. Os filtros delta podem cumprir a tarefa de remover a corrente pré falta da corrente de falta. Os autores também propõem um novo filtro delta, capaz de prolongar quase que indefinitivamente a ação do filtro delta convencional.

Apresentando uma ampla revisão de soluções técnicas para a implantação e desenvolvimento da proteção diferencial de linha, Miller *et al.* (2010) abordam suas restrições e necessidades de adaptações para sua implantação. Os autores expõem então as adaptações necessárias para o emprego desta proteção diferencial em terminais com disjuntores duplos, LTs de múltiplos terminais, situações em que exista compensação de corrente capacitiva, LTs com transformadores diretamente conectados e na manipulação e sincronização de dados. Pode-se dizer que a maior contribuição deste artigo é o conceito de plano- α generalizado, método que calcula um equivalente de dois terminais para um caso geral de N terminais, e então aplica o princípio do plano- α nas duas correntes equivalentes calculadas.

No trabalho de Kasztenny *et al.* (2010), os autores demonstraram que a aplicação da proteção diferencial em LTs com transformadores (*tapped*) é viável sem que haja medição de correntes nos *taps* e portanto, se torna atraente economicamente. Para que a correta aplicação da função de proteção diferencial seja possível foram abordadas fontes diferenciais de erro como: desbalanço causado pela corrente de carga, faltas no lado de baixa do transformador (*tapped*), corrente *inrush* de magnetização e curtos-circuitos externos envolvendo a terra no sistema de alta tensão. O método apresentado utiliza a supervisão de distância para prevenir a atuação incorreta em curtos-circuitos no lado de baixa dos transformadores (*tapped*) e remoção de sequência zero para o tratamento de faltas externas no sistema de alta tensão.

SCHWEITZER III *et al.* (2011) apresentam um estudo dos limites de sensibilidade dos elementos essenciais na proteção de LTs. São discutidos os impactos de fatores como: desbalanço da linha, saturação de TCs, corrente de carregamento, resistência de falta, *trips* sequenciais e terminais fracos. Os autores revisam neste artigo um número de técnicas para obter uma proteção sensível e segura contra muitas fontes de erros. No que se refere à sensibilidade, técnicas de desenvolvimento de elementos e seus desafios são estudados para elementos de sobrecorrente e direcionais, elementos de distância e elementos diferenciais de linha. Também é feita uma breve discussão sobre a confiança além de sensibilidade da proteção durante oscilações de potência, descrevendo diversas maneiras de garantir estas duas características da proteção.

O trabalho de Xue *et al.* (2012a) representa um rico tutorial sobre o impacto causado pela corrente capacitiva em LTs longas e seus elementos de proteção. No que se refere aos elementos diferenciais, os autores afirmam que estes são os mais afetados visto que seu princípio de funcionamento é baseado na soma das correntes que entram na região protegida e, a corrente de carregamento nada mais é do que uma corrente desbalanceada entrando nesta região. Também concluem que os elementos de sequência não possuem confiabilidade garantida durante a energização da linha com fechamento de polos desiguais ou momentos em que exista um polo aberto e baixo carregamento do sistema. Além disso, este artigo também explora e avalia diversos esquemas para compensação de corrente capacitiva e relata quais são suas respectivas vantagens e desvantagens.

Xue *et al.* (2012b) têm como foco do trabalho examinar a confiança da proteção diferencial de linha quando submetida a um número de condições específicas e não usuais do sistema. Dentre as situações analisadas, incluem-se casos de linhas com compensação série, sistemas com baixa contribuição de uma das fontes, presença de um polo aberto, oscilações de potência, operação com frequência diferente da nominal e fontes com inversor. Após avaliações teóricas, testes e a investigação de métodos e lógicas para evitar a atuação indevida da proteção, os autores asseguram que qualquer preocupação com relação à confiança do algoritmo de proteção diferencial pode ser eliminada ao utilizar todos os elementos diferenciais, de fase e de sequência, na proteção ao mesmo tempo.

Kasztenny *et al.* (2013) exibem um tutorial sobre as características de operação dos elementos diferenciais utilizados na proteção de LTs. Os autores avaliam os desafios inerentes presentes

na implantação da proteção diferencial de linha e estudam detalhadamente as duas principais implementações, plano operacional e plano- α , destacando suas semelhanças, diferenças e vantagens. São realizadas discussões acerca do emprego da proteção diferencial em linhas com múltiplos terminais, ressaltando a utilização do plano- α generalizado, introduzido por Miller *et al.* (2010). Porém, o foco principal do artigo são as soluções para três desafios enfrentados pela proteção diferencial de LTS: segurança durante curtos-circuitos externos e saturação de TC, segurança em condições de erros de alinhamento de correntes, e a presença de corrente capacitiva na linha. Por meio de simulações em regime permanente e em regime transitório, os autores garantem que os algoritmos adaptativos inseridos na lógica de proteção são suficientes para garantir sua confiabilidade.

Com o intuito de difundir o conhecimento acerca da detecção de faltas no plano- α , Molas *et al.* (2013) expandem as deduções analíticas dos coeficientes no plano- α , inicialmente apresentadas por Benmouyal (2005), para os demais tipos de curtos-circuitos. Os autores evidenciam a dependência que os elementos de fase possuem com relação à corrente de carga do sistema. Tal dependência é inexistente para os elementos de sequência. Ademais, o efeito causado pela corrente capacitiva, presente em longas LTS, também é destacado. Os autores deixam claro que a retirada desta fonte de erro, bem como a retirada da corrente de pré-falta, dos elementos de fase faz com que estes operem de maneira mais adequada e algumas vezes, se assemelha ao comportamento observado pelos elementos de sequência.

Em Kasztenny *et al.* (2015) os princípios da proteção diferencial baseada no elemento de sequência negativa são explicados e esclarecidos para a aplicação em LTS e transformadores. Os autores reiteram que o motivo da excelente sensibilidade desses elementos se dá pelo fato destes não serem restringidos pela corrente de carga de sequência positiva. Porém, com relação à proteção de linhas, esta característica pode se tornar uma desvantagem durante curtos-circuitos externos balanceados. Por este fato, os autores reforçam a necessidade de se assegurar contra correntes de curto-circuito externos capazes de saturar TCs. Segundo os autores, a utilização de um detector de distúrbio externo ou de um esquema lógico que detecte a saturação do TC, e por consequência bloqueie a atuação dos elementos de sequência, já é suficiente para garantir a segurança do algoritmo.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LTS

3.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

O propósito de um sistema de proteção é detectar faltas ou condições anormais de operação do sistema elétrico e iniciar ações corretivas, isolando desta forma somente a região defeituosa de maneira rápida e adequada para que a integridade dos equipamentos elétricos e a estabilidade do sistema sejam preservadas (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Para desempenhar esta função, um sistema de proteção usualmente é composto por relés, transformadores para instrumento, disjuntores, equipamentos de teleproteção, circuitos de alimentação e circuitos de comando e sinalização.

Além disso, existem requisitos básicos os quais um sistema de proteção efetivo e bem dimensionado deve possuir, tais como (ANDERSON, 1999):

Sensibilidade: habilidade de identificação dos curtos-circuitos para os quais o sistema de proteção foi projetado;

Confiabilidade: consiste na habilidade de atuação correta quando necessário e, ao mesmo tempo, na habilidade de bloquear a atuação indevida;

Seletividade: capacidade de assegurar a desconexão exclusiva da porção do sistema elétrico em condição de falta;

Coordenação: consiste na determinação de ajustes adequados de um determinado sistema de proteção de modo que este opere de forma seletiva;

Velocidade: parâmetro que quantifica a agilidade de um sistema de proteção na eliminação das faltas;

Economia: otimização do custo-benefício associado a um sistema de proteção;

Simplicidade: habilidade de alcançar o objetivo de proteção utilizando o menor número de equipamentos possível;

Mantenabilidade: condição de manutenção rápida e precisa, reduzindo-se ao mínimo os custos de manutenção e a inoperabilidade do sistema.

3.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LTS

A função de proteção diferencial, código ANSI 87, tem como princípio de operação a comparação de correntes entrando e saindo de um determinado equipamento do Sistema de Energia Elétrica (SEE), ou seja, baseia-se na Primeira Lei de Kirchhoff de correntes (LKC). São exemplos de equipamentos protegidos pela função de proteção diferencial: transformadores, barramentos e LTS - código ANSI 87T, 87B e 87L respectivamente.

A região protegida é delimitada por transformadores de corrente (TCs), os quais possuem como função medir e reproduzir em seus enrolamentos secundários, correntes elétricas proporcionais àquelas presentes no circuito primário. Geralmente, os TCs são conectados às extremidades do elemento protegido de maneira que a corrente no terminal local \hat{I}_L corresponda a corrente entrando no elemento protegido e a corrente no terminal remoto \hat{I}_R a corrente saindo do elemento protegido. A função 87 é intrinsecamente segregada por fase, ou seja, cada fase do sistema apresenta um par de TCs responsáveis pela aquisição destas correntes. Dessa forma a detecção de faltas é feita independentemente em cada uma delas, possibilitando a abertura monopolar dos disjuntores, garantindo seletividade para o sistema de proteção.

Considerando corrente de operação I_{op} como sendo $|\hat{I}_L + \hat{I}_R|$ e corrente de restrição I_{res} como $|\hat{I}_L - \hat{I}_R|$, é fácil perceber que, em um sistema ideal, durante curtos-circuitos externos ou em condições normais de operação os fasores de corrente \hat{I}_L e \hat{I}_R apresentam o mesmo módulo porém sentidos opostos. Nestas condições, a corrente de operação é idealmente nula e a corrente de restrição é idealmente o dobro de $|\hat{I}_L|$. Desse modo, a condição de operação não é satisfeita e a função de proteção diferencial, em todas as fases, não deverá atuar.

Para curtos-circuitos internos os fasores de corrente \hat{I}_L e \hat{I}_R apresentam idealmente o mesmo módulo e o mesmo sentido. Nesta situação, a corrente de operação é idealmente o dobro de $|\hat{I}_L|$ e a corrente de restrição é idealmente zero. Desse modo, caso as condições de operação

descritas nas Equações (3.1) e (3.2) sejam satisfeitas (PAITHANKAR; BHIDE, 2007), a função de proteção diferencial deverá atuar.

$$I_{op} > SLP \cdot I_{res} \quad (3.1)$$

$$I_{op} > I_{pk} \quad (3.2)$$

em que SLP representa o principal ajuste da função de proteção diferencial, pois define a inclinação da curva que separa a região de restrição e de atuação no plano operacional. Já I_{pk} representa a corrente mínima de operação da função de proteção diferencial no plano operacional.

A aplicação pura deste conceito é pouco utilizada em função dos erros intrínsecos causados pelas não linearidades dos TCs e diferenças construtivas, as quais impedem que as correntes de entrada e de saída do elemento protegido sejam iguais. Como solução, é comum que o algoritmo da função de proteção diferencial seja corrigido por meio da normalização das correntes através do sistema por unidade (p.u.). Para tanto, o TAP e a corrente normalizada para cada terminal são determinados conforme descrito nas Equações (3.3) e (3.4).

$$TAP_T = \frac{I_{nom}^{max}}{RTCT} \quad (3.3)$$

$$\hat{I}_{norm,T} = \frac{\hat{I}_{sec,T}}{TAP_T} \quad (3.4)$$

nas quais T representa o terminal local ou o remoto; TAP_T o valor de normalização calculado no terminal T; I_{nom}^{max} correspondente à máxima corrente primária dos TCs da região protegida; $RTCT$ a relação de transformação do TC no terminal T; $\hat{I}_{norm,T}$ a corrente normalizada no terminal T e $\hat{I}_{sec,T}$ a corrente no secundário do TC do terminal T em Ampères.

Para a aplicação da proteção diferencial em LTs, existem diversos desafios técnicos, dentre os quais se destaca a dificuldade associada à manutenção de um canal de comunicação eficaz entre terminais de LTs longas. Por conta disso, a função de proteção de distância obteve maior aceitação no mercado até o momento em que este desafio técnico pôde ser superado, o que ocorreu por meio do advento de fibras OPGW (*Optical Fiber Composite Overhead Ground*

Wire) e relés microprocessados. Desde então, especialmente para empreendimentos novos, a função de proteção diferencial tem substituído a função de proteção de distância como função principal (ZIEGLER, 2012).

3.2.1 Elementos Diferenciais

A atuação da função de proteção diferencial é determinada a partir do comportamento dos chamados elementos diferenciais. A função de proteção diferencial de LTs (código ANSI 87L) possui dois tipos de elementos diferenciais: fase e sequência. A corrente utilizada no cálculo da proteção diferencial definirá se o elemento diferencial será de fase ou de sequência. Existem portanto cinco elementos diferenciais, três elementos de fase representados por 87LA, 87LB, 87LC, para as fases A, B e C respectivamente, e dois elementos de sequência representados por 87LQ e 87LG, para as sequências negativa e zero respectivamente.

Geralmente, o emprego dos elementos de fase atendem a maior parte das condições de faltas presentes no sistema elétrico. Todavia, em determinadas condições nas quais curtos-circuitos geram variações pequenas nas correntes de fase, os elementos de fase não são sensibilizados. Nesse contexto, a presença dos elementos de sequência negativa e zero se mostra imprescindível para a correta atuação da proteção. Definidos de forma análoga aos elementos de fase porém utilizando as correntes locais e remotas de sequência negativa e zero, os elementos de sequência têm como função a detecção de faltas assimétricas.

3.2.2 Planos de Representação

Com relação a proteção diferencial de LTs, existem dois planos de representação que são usualmente utilizados: plano operacional e plano- α . Dadas as particularidades de cada plano, estes atuam de maneiras diferentes. Entretanto, de modo geral, o plano- α tem se mostrado vantajoso frente ao tradicional plano operacional.

O plano operacional é obtido a partir da plotagem de I_{op} em função de I_{res} no plano cartesiano, conforme ilustrado na Figura 3.1a. É possível notar que as retas que separam as regiões de atuação e restrição são definidas pelas condições descritas nas Equações (3.1) e (3.2).

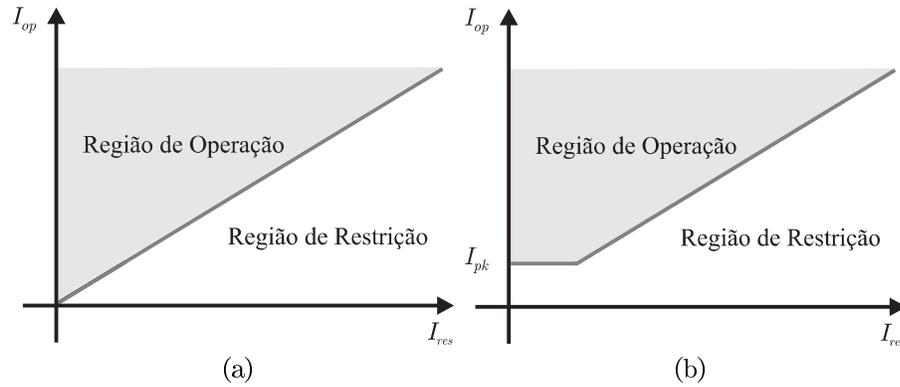


Figura 3.1. Planos Operacionais. (a) Plano Operacional Básico. (b) Plano Operacional com *Pick-up*.

Caso a combinação das correntes de operação e restrição se localize na região de atuação, o curto-circuito é visto como interno à linha de transmissão, caso contrário a falta será vista como externa ou será identificada a operação normal do sistema. Conforme afirmado anteriormente, com o intuito de assegurar a operação adequada da proteção, adota-se o uso do limiar de atuação conhecido como *pick-up* (I_{pk}), e o plano operacional segue conforme ilustrado na Figura 3.1b.

Alternativamente ao plano de representação I_{op} versus I_{res} , o chamado plano- α também permite a análise do desempenho da função de proteção diferencial. Trata-se de um plano complexo que relaciona a parte real e imaginária da razão da corrente do terminal remoto pela corrente do terminal local.

O plano- α foi originalmente proposto em Warrington (1962), afim de melhor representar a relação entre as grandezas fasoriais envolvidas na função diferencial. Sua definição está exposta nas Equações (3.5) e (3.6), e o plano- α pode ser visualizado na Figura 3.2a. Na Figura 3.2b está exposto o plano- α com região de restrição circular, resultado das correntes de operação e restrição utilizadas neste trabalho.

$$\frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_L} = m + jn = M = |M|e^{j\varphi} \quad (3.5)$$

$$|M| = \frac{|\hat{I}_R|}{|\hat{I}_L|} = \sqrt{m^2 + n^2} \quad \varphi = \arctan \frac{n}{m} \quad (3.6)$$

onde \hat{I}_L e \hat{I}_R são, respectivamente, as correntes medidas nos terminais local e remoto.

A razão entre as correntes dos terminais da LT é definida de forma genérica na Equação

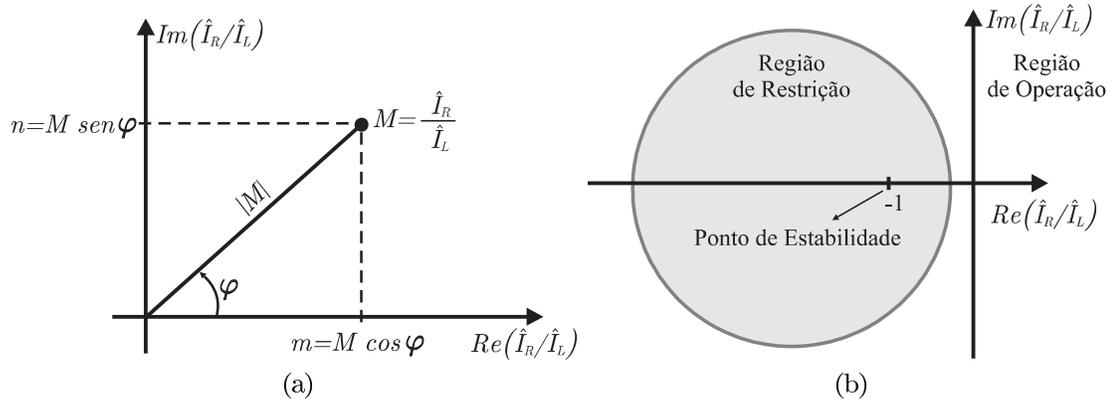


Figura 3.2. Representações do Plano- α . (a) Plano- α complexo. (b) Plano- α com região de restrição circular.

(3.7) por meio da variável $M\phi L$, em que ϕ representa as fases A, B e C, ou as sequências negativa e zero, Q e G.

$$M_{\phi L} = \frac{\hat{I}_{\phi R}}{\hat{I}_{\phi L}} \quad (3.7)$$

O inverso deste coeficiente é representado por meio do plano- β , cuja operação é equivalente a do plano- α , porém considerando o referencial oposto, conforme expresso na Equação (3.8). Sendo ϕ a representação das fases A, B e C, ou das sequências negativa e zero, Q e G.

$$M_{\phi R} = \frac{\hat{I}_{\phi L}}{\hat{I}_{\phi R}} \quad (3.8)$$

A corrente escolhida, fase ou sequência, ditará se trata-se de um elemento de fase ou sequência, conforme exposto na seção 3.2.1.

3.2.3 Compensação da Corrente Capacitiva

As linhas de transmissão possuem como uma característica marcante a presença de capacitâncias distribuídas ao longo de sua extensão. Estas capacitâncias drenam corrente capacitiva da linha e são responsáveis por atuações indevidas da proteção diferencial de LTS. Isto ocorre pois estas não são consideradas na formulação do algoritmo de proteção diferencial. Tratando de linhas curtas a presença de corrente capacitiva pode ser desconsiderada em função da sua pequena influência na eficiência da proteção diferencial. Todavia, conforme o comprimento e o

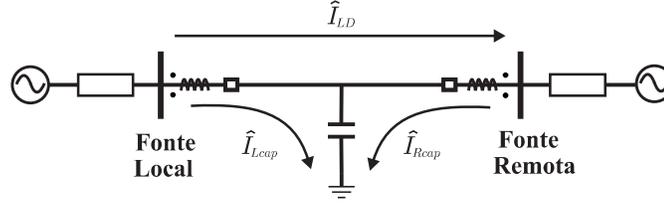


Figura 3.3. Representação simplificada da corrente capacitiva.

nível de tensão das LTs aumentam, a influência da corrente capacitiva na proteção diferencial também aumenta (BI *et al.*, 2005). Em função dos aspectos supracitados, a corrente capacitiva é tomada como uma corrente espúria, a qual pode causar atuações indevidas da proteção (KASZTENNY *et al.*, 2013).

Na Figura 3.3 pode ser observado um sistema elétrico simplificado de uma linha de transmissão longa. É importante citar que a representação de capacitores apresentada na figura é meramente ilustrativa pois a linha utilizada neste trabalho é modelada a parâmetros distribuídos. As correntes capacitivas provenientes dos terminais local e remoto assim como a corrente de carga do sistema estão representadas através de \hat{I}_{Lcap} , \hat{I}_{Rcap} e \hat{I}_{LD} , respectivamente. Supõem-se que \hat{I}_{Lcap} e \hat{I}_{Rcap} são iguais e por conta disso podem ser representados apenas por \hat{I}_{cap} . Ao considerar as correntes capacitivas no algoritmo de proteção diferencial, o cálculo do coeficiente $M_{\phi L}$ no plano- α segue o exposto na Equação (3.9).

$$M_{\phi L} = \frac{\hat{I}_{\phi R}}{\hat{I}_{\phi L}} = \frac{-\hat{I}_{LD} + \hat{I}_{cap}}{\hat{I}_{LD} + \hat{I}_{cap}} \quad (3.9)$$

Em condições normais de operação ou durante curtos-circuitos externos, $M_{\phi L}$ permanece em $(-1; 0)$, dentro da região de restrição, quando as correntes capacitivas não são consideradas. Porém, conforme os valores destas correntes aumentam e tornam-se predominantes frente à corrente de carga, como em condições de baixo carregamento do sistema, o coeficiente $M_{\phi L}$ tende ao ponto $(1; 0)$ caracterizando a região de operação indevidamente. Visto isso, conclui-se que a presença de correntes capacitivas nas LTs interfere de maneira negativa na segurança da proteção diferencial. Alguns autores propõem elevar o *pick-up* do algoritmo de proteção acima do valor calculado da corrente capacitiva da linha. Contudo, em determinados casos de operação tais como energização de linhas de transmissão, o aumento necessário no valor de *pick-up*, mesmo que temporariamente, é tão grande que poderia reduzir significativamente a

sensibilidade desta função de proteção. Portanto, afim de garantir máxima confiabilidade do sistema de proteção, a aplicação de um algoritmo de remoção da corrente capacitiva se mostra como a solução mais adequada (MILLER *et al.*, 2010).

Descreve-se a seguir o método de compensação da corrente capacitiva proposto por Miller *et al.* (2010). A corrente capacitiva em cada uma das fases, $\hat{I}_{\phi T cap}$, é determinada com base nas tensões em cada fase, $\hat{V}_{\phi T}$, e na matriz capacitância da linha, conforme Equação (3.10). Ressalta-se que para a utilização desta lógica de compensação da corrente capacitiva são necessárias as medições de tensão nos terminais. O índice ϕ representa as fases A, B ou C.

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{A,T cap} \\ \hat{I}_{B,T cap} \\ \hat{I}_{C,T cap} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} \end{bmatrix} \cdot jw \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_{A,T} \\ \hat{V}_{B,T} \\ \hat{V}_{C,T} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Desta forma, ao invés de empregar as correntes originais medidas em ambos os terminais da linha, $\hat{I}_{\phi T}$, a proteção utiliza a corrente corrigida, $\hat{I}_{\phi TX}$, definida na Equação (3.11), a qual possui menor influência da corrente capacitiva da linha de transmissão.

$$\hat{I}_{\phi TX} = \hat{I}_{\phi T} - \hat{I}_{\phi T cap} \quad (3.11)$$

3.3 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LTS NO PLANO ALFA

Tradicionalmente a proteção diferencial é implementada através de uma característica de restrição linear que compara a corrente de operação com a corrente de restrição e tem apenas uma configuração de sensibilidade, o *slope SLP*. Este método impõem limitações, como o compromisso entre segurança e confiabilidade para tratar de faltas resistivas, que são indesejáveis na proteção de LTS de alta tensão. Devido aos recursos de *software* e *hardware* de relés modernos, a detecção de faltas através do plano- α tem atraído a atenção dos fabricantes, uma vez que possui maior flexibilidade e, se ajustado de forma adequada considerando suas peculiaridades, pode proteger linhas de transmissão contra uma ampla variedade de condições de falta.

Em qualquer condição de funcionamento, o lugar geométrico das razões no plano- α indica o estado atual do sistema, permitindo assim a detecção de avarias. Uma análise completa destes locais e suas trajetórias com a variação dos parâmetros do sistema colabora na definição

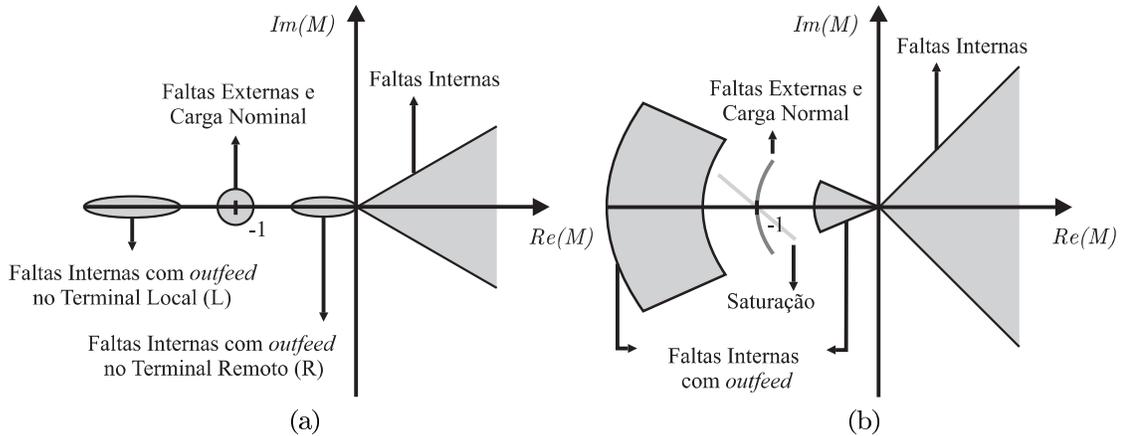


Figura 3.4. Regiões no Plano- α . (a) Localizações de curtos-circuitos. (b) Localizações considerando atraso de comunicação.

de uma característica de restrição mais sensível, segura e confiável. Uma das vantagens da utilização do plano- α é a possibilidade de determinar locais específicos da razão das correntes para diferentes situações que podem ocorrer. É possível observar a partir da Figura 3.4a que em uma análise aprofundada da proteção diferencial de corrente no plano- α é possível verificar regiões diretamente relacionadas com determinadas condições de funcionamento do sistema, o que não ocorre no plano operacional. Há regiões específicas para faltas internas, curtos-circuitos externos ou condições normais de carga, e também para faltas internas com *outfeed* em qualquer que seja o terminal. Situações como saturação de TC durante faltas externas e atraso de comunicação ocasionados por erros no processo de sincronização causam a rotação das regiões características em relação ao eixo real do plano complexo, tal como apresentado na Figura 3.4b (ROBERTS *et al.*, 2001).

3.3.1 Atraso no Canal de Comunicação

Como as LTs são elementos extensos, o envio de informações de um terminal ao outro não ocorre de forma instantânea. Desse modo, existe um atraso intrínseco entre os dados adquiridos em um relé e os dados que chegam ao mesmo provenientes do outro terminal. Este atraso de propagação no canal de comunicação deve ser adicionado no cálculo do tempo de atuação da proteção diferencial de linha de acordo com Ferrer & Schweitzer (2010). Se a proteção diferencial utilizar em sua lógica fasores obtidos em instantes distintos, haverá então uma defasagem entre

eles que pode induzir uma atuação incorreta da proteção. A título de exemplo, apenas 1 ms de diferença na obtenção de dois fasores, em sistemas operando a 60 Hz, equivale a uma defasagem angular de $21,6^\circ$ no plano- α . Como pode ser observado na Figura 3.4b, erros na sincronização dos sinais geram a rotação das regiões características em relação ao eixo das abscissas do plano complexo.

A solução deste problema se dá pela sincronização das amostras recebidas e enviadas nos relés, o que pode ser feito por meio do método *Ping-Pong* (MILLS, 1991) ou com o uso do GPS. O primeiro método possui a eficiência dependente da simetria do canal de comunicação, os quais devem possuir valores de atrasos iguais, como é o caso da comunicação ponto a ponto com fibra dedicada (MILLER *et al.*, 2010). Já com a utilização da referência de tempo proveniente do GPS esta dependência deixa de existir e a eficiência é garantida para canais simétricos e assimétricos. Em contra partida, como o GPS utiliza sinais de satélites e dispositivos adicionais, este método expõe o sistema de proteção à fontes de erros que estão fora do alcance dos engenheiros de proteção.

3.3.2 Saturação no TC

A saturação de TCs é uma problemática frequente em sistemas de proteção, uma vez que medições espúrias são geradas a partir desta condição. A presença de TCs saturados nos terminais de LTs protegidas faz com que durante um curto-circuito externo ocorra uma redução na magnitude e avanço na fase dos fasores de corrente daquele terminal. No plano- α , a referida alteração faz com que a razão entre as correntes local e remota se afaste do ponto de estabilidade do sistema $(-1; 0)$, podendo ocorrer atuações indevidas da proteção (BENMOUYAL; LEE, 2004). Caso o TC do terminal local sature, a razão $M_{\phi L}$ exibirá um aumento no módulo e redução na fase, situando-se no segundo quadrante conforme a reta de saturação observada na Figura 3.4b. Em contrapartida, caso o TC do terminal remoto venha a saturar, $M_{\phi L}$ terá um módulo menor e uma fase maior, direcionando-se para a extremidade oposta da reta de saturação.

É importante ressaltar que a reta de saturação utilizada para a analogia acima é apenas uma orientação geral do comportamento da proteção diferencial durante a saturação de um

TC, visto que este fenômeno é transitório e sua intensidade depende de diversos fatores.

3.3.3 Curtos-circuitos com *Outfeed*

Durante curtos-circuitos internos, as correntes medidas de ambos terminais da LT deveriam ter sinal positivo, ou seja, estar entrando na LT de modo que a razão $M_{\phi T}$ se desloque para o semi-plano direito do plano- α e a proteção atue. O fenômeno de *outfeed* é justamente o fato de uma destas correntes apresentar inversão de sentido, fazendo com que a razão $M_{\phi T}$ permaneça na região de restrição. Sua ocorrência ou não depende da contribuição de corrente de falta proveniente dos terminais da LT para o defeito, e está associado portanto ao carregamento, força das fontes do sistema, localização e resistência de falta.

Na ocorrência de *outfeed*, uma das correntes de contribuição de curto-circuito possui módulo muito pequeno, e dependendo do terminal em que ocorra, o módulo da razão $M_{\phi T}$ apresenta valor próximo a zero (*outfeed* no terminal remoto), ou um valor elevado (*outfeed* no terminal local). Conforme apresentado na Figura 3.4a, a região do plano- α que caracteriza este fenômeno pode ser no semi-eixo real próximo a zero ou tendendo à $-\infty$.

3.3.4 Característica de Restrição Modificada

Proposta inicialmente por Roberts *et al.* (2001) a característica de restrição modificada, ou característica arco-íris modificada, é uma característica de restrição da proteção diferencial de LTs fundamentada nas análises das condições supracitadas. Conforme ilustrado na Figura 3.5a esta característica é definida por dois parâmetros, o ângulo ψ e o raio R . Neste sentido, quando comparada com a característica de restrição do plano- α circular, fica evidente que o plano- α modificado confere maior controle sobre a forma da região de restrição.

O ângulo ψ proporciona a abertura necessária para adaptação aos piores casos de erros de comunicação visto que, segundo Tziouvaras *et al.* (2003), o valor de $\psi = 216^\circ$ é suficiente para acomodar grandes assimetrias do canal de comunicação (variações de 3 a 5 ms). Por sua vez, o ajuste do raio R fornece a área fundamental para englobar as mais variadas situações adversas do sistema.

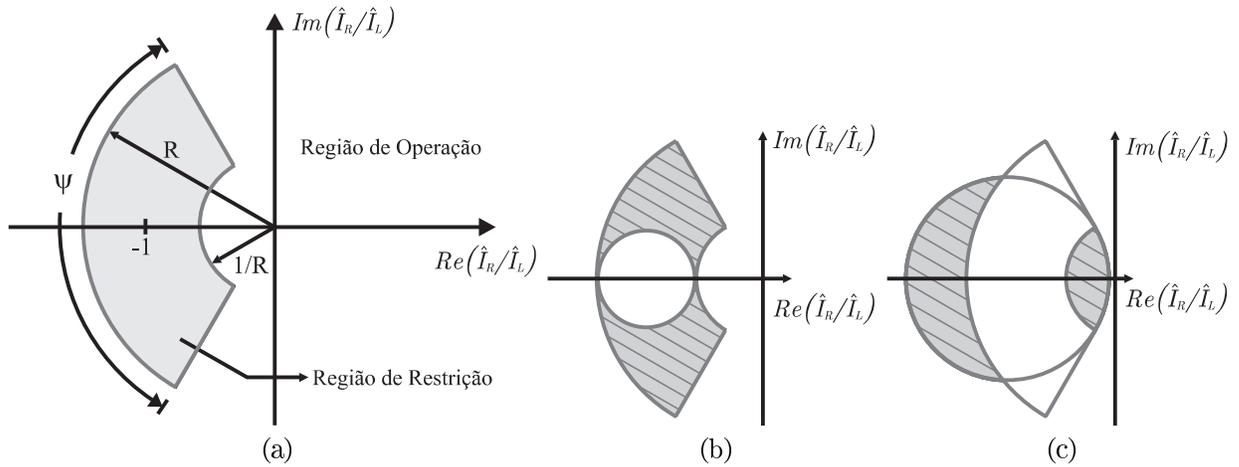


Figura 3.5. (a) Característica de restrição modificada. (b) Vantagem em tolerância à assimetria do canal. (c) Vantagem em tolerância ao *outfeed*.

Com o propósito de destacar as vantagens da característica de restrição modificada frente à característica circular, a Figura 3.5b apresenta ambas as características ajustadas para o mesmo nível de tolerância de faltas com *outfeed*. Visto isso, é possível notar que a característica de restrição circular possui baixa tolerância para assimetrias no canal de comunicação, e portanto a região hachurada representa a primeira vantagem da nova característica. Ao aumentar o *slope* da característica circular para que ela seja capaz de acomodar um maior nível de assimetria, percebe-se a partir da Figura 3.5c que sua sensibilidade para curtos-circuitos internos com *outfeed* diminui. Em contra partida, a sensibilidade da característica modificada para faltas com *outfeed* não é afetada (TZIOUVARAS *et al.*, 2003).

Do ponto de vista de saturação de TCs, afim de evitar operações incorretas da proteção diferencial, algumas medidas podem ser tomadas. Uma medida muito adotada é o bloqueio da operação da proteção nas situações em que curtos-circuitos externos ou saturação de TCs forem detectados. Outra medida, proposta por Roberts *et al.* (2001), trata da alteração do raio R ou do ângulo ψ como meio para garantir a segurança da proteção, de modo a suportar casos extremos de saturação através da característica de restrição modificada.

3.4 ANÁLISE DE TRAJETÓRIAS NO PLANO ALFA

Na Figura 3.6 estão expostas as trajetórias usualmente seguidas pelos elementos diferenciais nos dois planos de representação aqui estudados. Analisando a Figura 3.6a observa-se que na

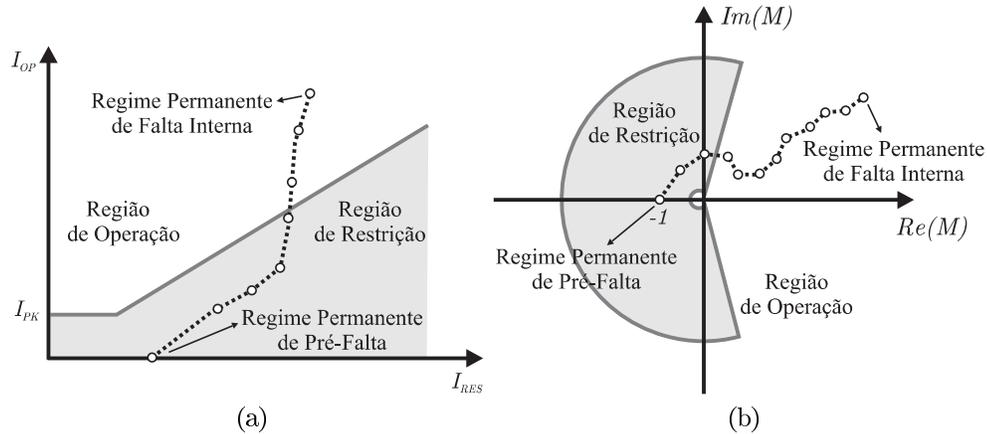


Figura 3.6. (a) Trajetória no Plano Operacional. (b) Trajetória no Plano Alfa.

condição de regime permanente de pré-falta, a corrente de operação é aproximadamente igual a zero e, portanto, o elemento diferencial permanece contido na região de restrição. Na ocorrência de um curto-circuito externo, I_{op} ainda é aproximadamente nulo, enquanto I_{res} é idealmente o dobro de $|\hat{I}_L|$, fazendo com que o elemento diferencial se desloque, porém não o suficiente para deixar a região de restrição, conseqüentemente, a proteção não atua. Dada a ocorrência de um curto-circuito interno, a corrente de operação aumenta, fazendo com que o elemento diferencial se desloque para a região de atuação o que causa a operação da função de proteção.

De forma complementar, a Figura 3.6b retrata a característica circular modificada do plano- α (ROBERTS *et al.*, 2001). O ponto de estabilidade é de $(-1; 0)$ e a característica de restrição é definida como a área interna da circunferência modificada, ao passo que a área externa corresponde à região de operação. A medida que a falta interna ocorre, $M_{\phi T}$ se desloca para a região de operação. Para faltas externas, $M_{\phi T}$ pode deixar o ponto de estabilidade, mas deve continuar contido da região de restrição.

Com o intuito de aprimorar a compreensão da proteção diferencial de LTs baseada no plano- α , pode-se analisar a sensibilidade dos seus elementos diferenciais investigando as trajetórias dos coeficientes $M_{\phi T}$ no plano- α para diversas condições de operação do sistema. Esta ideia foi introduzida no trabalho produzido por Benmouyal (2005), no qual as trajetórias percorridas por $M_{\phi T}$ frente a curtos-circuitos internos e externos foram analisadas. Além disso, foi estudada a influência que fatores como carregamento da LT, força das fontes, resistência de falta e natureza das correntes (fase ou sequência) exercem sobre estas trajetórias. Mesmo realizando diversos tipos de análises no comportamento das trajetórias diferenciais, Benmouyal (2005) deduziu

apenas as equações dos elementos diferenciais para curtos-circuitos monofásicos. Diante disto, Molas *et al.* (2013) complementou o trabalho de Benmouyal (2005) demonstrando como seria o comportamento do coeficiente $M_{\phi T}$ no plano- α para os demais curtos-circuitos.

Na sequência serão apresentados de forma resumida os aspectos relevantes do trabalho de Molas *et al.* (2013), levando em consideração a dedução analítica das contribuições de corrente vindas cada terminal. A partir destas, serão expostos os coeficientes do plano- α para diferentes tipos de faltas.

3.4.1 Expressões Analíticas das Contribuições de Corrente

Para fins de estudo, a linha de transmissão curta ilustrada na Figura 3.7 será utilizada na dedução analítica das contribuições de corrente de cada terminal desta. Os equivalentes de Thévenin e respectivas impedâncias Z_L e Z_R , assim como a impedância série da linha Z_{LT} também estão indicadas na Figura 3.7. As correntes que entram na linha provenientes de ambas as fontes consistem em duas parcelas: a corrente de carga e a corrente de contribuição de falta. Como afirma o teorema da superposição, estas componentes podem ser calculadas separadamente resolvendo o sistema da LT, antes e durante a falta.

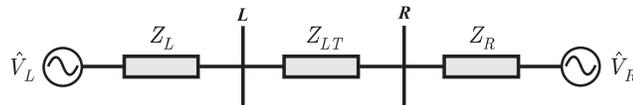


Figura 3.7. Linha de Transmissão Curta.

A partir do sistema supracitado, os circuitos de sequência podem ser obtidos como função da localização do defeito, tal como indicado na Figura 3.8. O parâmetro d nesta Figura representa o percentual da linha em que as faltas são aplicadas, a partir do terminal local (L). Além disso, esta Figura apresenta o subscrito j que pode representar a sequência positiva, negativa ou zero, uma vez que exceto pela ausência das fontes nas sequências negativa e zero, o restante do circuito é idêntico ao apresentado. Durante o decorrer deste trabalho os índices 0, 1 e 2 representarão as sequências zero, positiva e negativa, respectivamente.

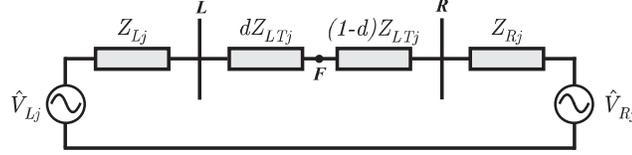


Figura 3.8. Diagrama de Sequência da Linha de Transmissão Curta.

Durante o regime permanente, a solução do circuito de seqüência apresentado produz a corrente de carga \hat{I}_{LDj} , que é calculada usando a Equação (3.12). Os elementos Z_{jM} e Z_{jN} estão descritos nas Equações (3.13) e (3.14), respectivamente. É importante notar que a corrente de carga \hat{I}_{LDj} só será diferente de zero quando $j = 1$, porque como citado para os subscritos restantes, não existem fontes nos demais circuitos equivalentes de seqüência. Desse modo, pode se referir à corrente de carga de seqüência positiva, \hat{I}_{LD1} , simplesmente como \hat{I}_{LD} .

$$\hat{I}_{LDj} = \frac{\hat{V}_{Lj} - \hat{V}_{Rj}}{Z_{jM} + Z_{jN}} \quad (3.12)$$

$$Z_{jM} = Z_{Lj} + d \cdot Z_{LTj} \quad (3.13)$$

$$Z_{jN} = Z_{Rj} + (1 - d) \cdot Z_{LTj} \quad (3.14)$$

A fim de determinar as correntes de falta, os equivalentes de Thévenin dos circuitos de seqüência são necessários, ou seja, sua tensão de pré-falta no ponto **F** e suas impedâncias equivalentes Z_0 , Z_1 e Z_2 . O primeiro pode ser obtido através da Equação (3.15), e os últimos a partir da Equação (3.16), considerando j como 1, 2 ou 0, dependendo da seqüência desejada.

$$\hat{V}_F = \hat{V}_L - Z_{1M} \cdot \hat{I}_{LD} \quad (3.15)$$

$$Z_j = \frac{Z_{jM} \cdot Z_{jN}}{Z_{jM} + Z_{jN}} \quad (3.16)$$

Com base no tipo de falta, os circuitos equivalentes de seqüência são conectados afim de se obter as correntes de falta \hat{I}_{F1} , \hat{I}_{F2} e \hat{I}_{F0} no local escolhido. Os fatores de distribuição de corrente descritos na Equação (3.17), são utilizados para calcular as contribuições provenientes das fontes para o curto-circuito, chamadas de contribuições puras de falta, expressas nas Equações (3.18) e (3.19).

$$\bar{C}_j = \frac{Z_{jN}}{Z_{jM} + Z_{jN}} \quad (3.17)$$

$$\hat{I}_{jL} = \bar{C}_j \cdot \hat{I}_{Fj} \quad (3.18)$$

$$\hat{I}_{jR} = (1 - \bar{C}_j) \cdot \hat{I}_{Fj} \quad (3.19)$$

Para o caso da sequência positiva, a contribuição total de corrente proveniente de cada terminal é a soma destes valores a \hat{I}_{LD} . A conversão das contribuições de corrente no domínio de sequência para o domínio de fase é realizada através da matriz de transformação de *Fortescue* conforme Equação (3.20).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Ressalta-se que as equações das correntes no domínio de sequência variam dependendo do tipo de curto-circuito considerado. Nas Equações (3.21) à (3.32) os valores das correntes de falta para os curtos-circuitos trifásicos, monofásicos, bifásicos e bifásicos terra são apresentados.

As correntes de falta trifásicas são dadas conforme as Equações (3.21), (3.22) e (3.23).

$$\hat{I}_{F1,3\varphi} = \frac{\hat{V}_F}{Z_1 + R_F} \quad (3.21)$$

$$\hat{I}_{F2,3\varphi} = 0 \quad (3.22)$$

$$\hat{I}_{F0,3\varphi} = 0 \quad (3.23)$$

As Equações (3.24), (3.25), (3.26) representam as correntes de falta para um curto-circuito monofásico.

$$\hat{I}_{F1,1\varphi} = \frac{\hat{V}_F}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_F} \quad (3.24)$$

$$\hat{I}_{F2,1\varphi} = \hat{I}_{F1,1\varphi} \quad (3.25)$$

$$\hat{I}_{F0,1\varphi} = \hat{I}_{F1,1\varphi} \quad (3.26)$$

Considerando um curto-circuito bifásico, suas correntes de falta são obtidas de acordo com as Equações (3.27), (3.28) e (3.29).

$$\hat{I}_{F1,2\varphi} = \frac{\hat{V}_F}{Z_1 + Z_2 + R_F} \quad (3.27)$$

$$\hat{I}_{F2,2\varphi} = -\hat{I}_{F1,2\varphi} \quad (3.28)$$

$$\hat{I}_{F0,2\varphi} = 0 \quad (3.29)$$

Correntes de falta provenientes de um curto-circuito bifásico terra são calculadas segundo descrito nas Equações (3.30), (3.31) e (3.32).

$$\hat{I}_{F1,2\varphi T} = \frac{\hat{V}_F}{Z_1 + R_F + (Z_2 + R_F)D} \quad (3.30)$$

$$\hat{I}_{F2,2\varphi T} = -\hat{I}_{F1,2\varphi T}D \quad (3.31)$$

$$\hat{I}_{F0,2\varphi T} = -\hat{I}_{F1,2\varphi T}(1 - D) \quad (3.32)$$

O termo D é definido como:

$$D = \frac{(Z_0 + R_F + 3R_G)}{Z_0 + Z_2 + 3R_G + 2R_F} \quad (3.33)$$

Considerando as diferentes correntes de falta para todos tipos de curto-circuito, as correntes de contribuição medidas pelos relés no domínio de fase são apresentadas nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Tabela 3.1. Falta Trifásica ABC.

Corrente no Relé Local
$\hat{I}_{AL} = C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} + \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BL} = a^2 C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} + a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CL} = a C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} + a \hat{I}_{LD}$
Corrente no Relé Remoto
$\hat{I}_{AR} = (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} - \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BR} = a^2(1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} - a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CR} = a(1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi} - a \hat{I}_{LD}$

Tabela 3.2. Falta Monofásica AT.

Corrente no Relé Local
$\hat{I}_{AL} = (C_0 + C_1 + C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} + \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BL} = (C_0 + a^2 C_1 + a C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} + a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CL} = (C_0 + a C_1 + a^2 C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} + a \hat{I}_{LD}$
Corrente no Relé Remoto
$\hat{I}_{AR} = (3 - C_0 - C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} - \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BR} = [1 - C_0 + a^2(1 - C_1) + a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} - a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CR} = [1 - C_0 + a(1 - C_1) + a^2(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi} - a \hat{I}_{LD}$

Tabela 3.3. Falta Bifásica BC.

Corrente no Relé Local
$\hat{I}_{AL} = (C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} + \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BL} = (a^2 C_1 - a C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} + a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CL} = (a C_1 - a^2 C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} + a \hat{I}_{LD}$
Corrente no Relé Remoto
$\hat{I}_{AR} = (C_2 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} - \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{BR} = [a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} - a^2 \hat{I}_{LD}$ $\hat{I}_{CR} = [a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} - a \hat{I}_{LD}$

Tabela 3.4. Falta Bifásica Terra BCT.

Corrente no Relé Local	
$\hat{I}_{AL} = [-C_0(1 - D) + C_1 - C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} + \hat{I}_{LD}$	
$\hat{I}_{BL} = [-C_0(1 - D) + a^2C_1 - aC_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} + a^2\hat{I}_{LD}$	
$\hat{I}_{CL} = [-C_0(1 - D) + aC_1 - a^2C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} + a\hat{I}_{LD}$	
Corrente no Relé Remoto	
$\hat{I}_{AR} = [-(1 - C_0)(1 - D) + (1 - C_1) - (1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} - \hat{I}_{LD}$	
$\hat{I}_{BR} = [-(1 - C_0)(1 - D) + a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} - a^2\hat{I}_{LD}$	
$\hat{I}_{CR} = [-(1 - C_0)(1 - D) + a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T} - a\hat{I}_{LD}$	

A Tabela 3.5 contém os símbolos utilizados para representar as correntes de falta no local da falta.

Tabela 3.5. Símbolos das Correntes de Falta.

Falta	Símbolo
Trifásica	$\hat{I}_{F1,3\varphi}$
Monofásica	$\hat{I}_{F1,1\varphi}$
Bifásica	$\hat{I}_{F1,2\varphi}$
Bifásica Terra	$\hat{I}_{F1,2\varphi T}$

3.4.2 Razões no Plano Alfa

A fim de avaliar as trajetórias no plano- α , as razões entre as correntes a partir de ambos os terminais devem ser calculadas considerando os quatro tipos de curtos-circuitos. Isto será feito para as correntes de cada fase (87LA, 87LB, 87LC) e para as correntes de sequência negativa e zero (87LQ e 87LG).

É importante mencionar que, ao considerar o modelo π exato para simular a LT longa, a presença da corrente capacitiva não pode ser negligenciada. Entende-se que durante o regime permanente, a corrente capacitiva é interpretada como uma falsa corrente diferencial e pode fazer com que os elementos de fase operem indevidamente, enquanto que em condições reais de falta a presença da corrente capacitiva pode mudar as trajetórias previstas no plano- α . Ao utilizar um método de compensação da corrente capacitiva na LT longa, espera-se obter

um comportamento semelhante ao de uma linha de transmissão curta. Por consequência, as deduções originadas nesta seção a partir do modelo de linha curta podem ser utilizadas na análise de LTs longas apresentada neste documento.

3.4.2.1 Curto-circuito Monofásico AT

A seguir serão apresentadas as equações e deduções necessárias para se encontrar os elementos diferenciais correspondentes a um curto-circuito monofásico na fase A.

- Fase A

O elemento diferencial M_{AL} é a razão entre as correntes \hat{I}_{AR} e \hat{I}_{AL} conforme descrito na Equação (3.34).

$$M_{AL} = \frac{\hat{I}_{AR}}{\hat{I}_{AL}} \quad (3.34)$$

Substituindo as correntes de contribuição provenientes dos relés local e remoto por aquelas indicadas na Tabela 3.2, obtém-se o exposto na Equação (3.35).

$$M_{AL} = \frac{(3 - C_0 - C_1 - C_2)\hat{I}_{F1} - \hat{I}_{LD}}{(C_0 + C_1 + C_2)\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD}} \quad (3.35)$$

Por meio de manipulações matemáticas, a Equação (3.35) pode ser reescrita na Equação (3.36).

$$M_{AL} = \frac{3}{(C_0 + C_1 + C_2) + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.36)$$

- Fase B

Da mesma forma que é realizado para a fase A, o elemento diferencial para a fase B, M_{BL} , é calculado através das Equações (3.37), (3.38) e (3.39).

$$M_{BL} = \frac{\hat{I}_{BR}}{\hat{I}_{BL}} \quad (3.37)$$

$$M_{BL} = \frac{[1 - C_0 + a^2(1 - C_1) + a(1 - C_2)]\hat{I}_{F1} - a^2\hat{I}_{LD}}{(C_0 + a^2C_1 + aC_2)\hat{I}_{F1} + a^2\hat{I}_{LD}} \quad (3.38)$$

$$M_{BL} = -1 \quad (3.39)$$

- Fase C

De maneira análoga às demais fases, as Equações (3.40), (3.41) e (3.42) são utilizadas para calcular o elemento diferencial M_{CL} .

$$M_{CL} = \frac{\hat{I}_{CR}}{\hat{I}_{CL}} \quad (3.40)$$

$$M_{CL} = \frac{[1 - C_0 + a(1 - C_1) + a^2(1 - C_2)]\hat{I}_{F1} - a\hat{I}_{LD}}{(C_0 + aC_1 + a^2C_2)\hat{I}_{F1} + a\hat{I}_{LD}} \quad (3.41)$$

$$M_{CL} = -1 \quad (3.42)$$

- Sequência Negativa

O elemento diferencial de sequência negativo M_{QL} é calculado por meio da razão entre as correntes medidas no terminal remoto e local, conforme descrito na Equação (3.43).

$$M_{QL} = \frac{\hat{I}_{QR}}{\hat{I}_{QL}} \quad (3.43)$$

De acordo com as Equações (3.18) e (3.19), e respeitando o apresentado na Equação (3.25), as correntes medidas nos terminais podem ser substituídas conforme Equação (3.44).

$$M_{QL} = \frac{(1 - C_2)\hat{I}_{F1}}{C_2\hat{I}_{F1}} \quad (3.44)$$

Após simplificações matemáticas, a Equação (3.44) é devidamente reescrita pela Equação (3.45).

$$M_{QL} = \frac{1}{C_2} - 1 \quad (3.45)$$

- Sequência Zero

Da mesma maneira que para o elemento de sequência supracitado, o elemento diferencial de sequência zero, M_{GL} , é obtido através das Equações (3.46), (3.47) e (3.48). Ressalta-se que também devem ser consideradas as Equações (3.18) e (3.19), e respeitar o apresentado na Equação (3.26).

$$M_{GL} = \frac{\hat{I}_{GR}}{\hat{I}_{GL}} \quad (3.46)$$

$$M_{GL} = \frac{(1 - C_0)\hat{I}_{F1}}{C_0\hat{I}_{F1}} \quad (3.47)$$

$$M_{GL} = \frac{1}{C_0} - 1 \quad (3.48)$$

3.4.2.2 Curto-circuito Trifásico ABC

Nesta seção serão expostas as equações utilizadas para obter os valores dos elementos diferenciais correspondentes a um curto-circuito trifásico.

A fim de tornar a leitura mais fácil, e devido ao comportamento semelhante à Seção 3.4.2.1, as deduções daqui em diante serão apresentadas de maneira direta.

- Fase A

$$M_{AL} = \frac{\hat{I}_{AR}}{\hat{I}_{AL}} \quad (3.49)$$

$$M_{AL} = \frac{(1 - C_1)\hat{I}_{F1} - \hat{I}_{LD}}{C_1\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD}} \quad (3.50)$$

$$M_{AL} = \frac{1}{C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.51)$$

- Fase B

$$M_{BL} = \frac{\hat{I}_{BR}}{\hat{I}_{BL}} \quad (3.52)$$

$$M_{BL} = \frac{a^2(1 - C_1)\hat{I}_{F1} - a^2\hat{I}_{LD}}{a^2C_1\hat{I}_{F1} + a^2\hat{I}_{LD}} \quad (3.53)$$

$$M_{BL} = \frac{1}{C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.54)$$

- **Fase C**

$$M_{CL} = \frac{\hat{I}_{CR}}{\hat{I}_{CL}} \quad (3.55)$$

$$M_{CL} = \frac{a(1 - C_1)\hat{I}_{F1} - a\hat{I}_{LD}}{aC_1\hat{I}_{F1} + a\hat{I}_{LD}} \quad (3.56)$$

$$M_{CL} = \frac{1}{C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.57)$$

- **Sequência Negativa**

$$M_{QL} = -1 \quad (3.58)$$

A razão é setada para -1 pois não existe elemento de sequência negativa, em função da simetria do curto-circuito.

- **Sequência Zero**

$$M_{GL} = -1 \quad (3.59)$$

A razão é setada para -1 porque não existe elemento de sequência zero neste caso. Isso se diz pelo fato do curto-circuito não envolver a terra.

3.4.2.3 Curto-circuito Bifásico BC

Considerando um curto-circuito bifásico, os cálculos exigidos para se adquirir todos os elementos diferenciais, correspondentes a este tipo de falta, estão dispostos nas equações a seguir.

- Fase A

$$M_{AL} = \frac{\hat{I}_{AR}}{\hat{I}_{AL}} \quad (3.60)$$

$$M_{AL} = -\frac{(C_1 - C_2)\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD}}{(C_1 - C_2)\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD}} \quad (3.61)$$

$$M_{AL} = -1 \quad (3.62)$$

- Fase B

$$M_{BL} = \frac{\hat{I}_{BR}}{\hat{I}_{BL}} \quad (3.63)$$

$$M_{BL} = \frac{[a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)]\hat{I}_{F1} - a^2\hat{I}_{LD}}{(a^2C_1 - aC_2)\hat{I}_{F1} + a^2\hat{I}_{LD}} \quad (3.64)$$

$$M_{BL} = \frac{1 - a^2}{C_1 - a^2C_2 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.65)$$

- Fase C

$$M_{CL} = \frac{\hat{I}_{CR}}{\hat{I}_{CL}} \quad (3.66)$$

$$M_{CL} = \frac{[a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)]\hat{I}_{F1} - a\hat{I}_{LD}}{(aC_1 - a^2C_2)\hat{I}_{F1} + a\hat{I}_{LD}} \quad (3.67)$$

$$M_{CL} = \frac{1 - a}{C_1 - aC_2 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.68)$$

- Sequência Negativa

$$M_{QL} = \frac{\hat{I}_{QR}}{\hat{I}_{QL}} \quad (3.69)$$

$$M_{QL} = \frac{-(1 - C_2)\hat{I}_{F1}}{-C_2\hat{I}_{F1}} \quad (3.70)$$

$$M_{QL} = \frac{1}{C_2} - 1 \quad (3.71)$$

- Sequência Zero

$$M_{GL} = -1 \quad (3.72)$$

A razão é setada para -1 porque não existe elemento de sequência zero neste caso. Isso se diz pelo fato do curto-circuito não envolver a terra.

3.4.2.4 Curto-circuito Bifásico Terra BCT

São descritas aqui as equações necessárias para a obtenção dos elementos diferenciais associados a um curto-circuito bifásico com o envolvimento da terra.

- Fase A

$$M_{AL} = \frac{\hat{I}_{AR}}{\hat{I}_{AL}} \quad (3.73)$$

$$M_{AL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + (1 - C_1) - (1 - C_2)D]\hat{I}_{F1} - \hat{I}_{LD}}{[-C_0(1 - D) + C_1 - C_2 D]\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD}} \quad (3.74)$$

$$M_{AL} = -1 \quad (3.75)$$

- Fase B

$$M_{BL} = \frac{\hat{I}_{BR}}{\hat{I}_{BL}} \quad (3.76)$$

$$M_{BL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)D]\hat{I}_{F1} - a^2\hat{I}_{LD}}{[-C_0(1 - D) + a^2C_1 - aC_2D]\hat{I}_{F1} + a^2\hat{I}_{LD}} \quad (3.77)$$

$$M_{BL} = \frac{1 - a(1 - D) - a^2D}{C_1 - aC_0(1 - D) - a^2C_2D + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.78)$$

- Fase C

$$M_{CL} = \frac{\hat{I}_{CR}}{\hat{I}_{CL}} \quad (3.79)$$

$$M_{CL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)D]\hat{I}_{F1} - a\hat{I}_{LD}}{[-C_0(1 - D) + aC_1 - a^2C_2D]\hat{I}_{F1} + a\hat{I}_{LD}} \quad (3.80)$$

$$M_{CL} = \frac{1 - a^2(1 - D) - aD}{C_1 - a^2C_0(1 - D) - aC_2D + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1}}} - 1 \quad (3.81)$$

- Sequência Negativa

$$M_{QL} = \frac{\hat{I}_{QR}}{\hat{I}_{QL}} \quad (3.82)$$

$$M_{QL} = \frac{-(1 - C_2)\hat{I}_{F1}D}{-C_2\hat{I}_{F1}D} \quad (3.83)$$

$$M_{QL} = \frac{1}{C_2} - 1 \quad (3.84)$$

- Sequência Zero

$$M_{GL} = \frac{\hat{I}_{GR}}{\hat{I}_{GL}} \quad (3.85)$$

$$M_{GL} = \frac{-(1 - C_0)\hat{I}_{F1}(1 - D)}{-C_0\hat{I}_{F1}(1 - D)} \quad (3.86)$$

$$M_{GL} = \frac{1}{C_0} - 1 \quad (3.87)$$

Em função dos resultados obtidos, é possível notar que as razões das fases afetadas são representadas por uma função dos coeficientes de distribuição de corrente, a corrente de carga e a corrente de falta, que por sua vez depende da resistência de falta R_f . Por outro lado as fases não afetadas têm uma proporção constante de -1 , o que caracteriza a condição normal de carga do sistema.

O elemento 87LQ está presente em todas as faltas assimétricas, enquanto o elemento 87LG aparece durante faltas envolvendo a terra. Estes elementos têm razões constantes que dependem apenas dos parâmetros C_0 ou C_2 . Portanto, esses elementos são independentes da corrente de falta e por consequência possuem sensibilidade teórica infinita para faltas resistivas (BENMOUYAL, 2005).

3.5 PROTEÇÃO DIFERENCIAL INCREMENTAL DE LTS NO PLANO ALFA

A chamada proteção diferencial incremental se baseia na proteção diferencial tradicional, porém considerando a remoção da corrente de carga do sistema antes do cálculo do coeficiente $M_{\phi T}$ do plano- α . A corrente de carga é a corrente que existe no sistema antes da ocorrência de qualquer falta, ou seja, corrente pré-falta.

3.5.1 Elementos Diferenciais

A diferença básica entre os elementos diferenciais incrementais dos elementos diferenciais tradicionais é a inexistência dos elementos de sequência, associada ao modo como são calculados os elementos de fase incrementais.

- Elemento Diferencial Convencional (EDC)

Ao considerar EDCs, existem cinco elementos diferenciais que podem existir: três elementos de fase (87LA, 87LB e 87LC) e dois elementos da sequência (87LQ e 87LG). O valor destes elementos é definido pela Equação (3.88), onde ϕ pode representar fases A, B e C, ou sequências negativa e zero, Q e G. Além disso, k representa o k -ésimo instante de amostragem.

$$M_{\phi L}(k) = \frac{\hat{I}_{\phi R}(k)}{\hat{I}_{\phi L}(k)} \quad (3.88)$$

- Elemento Diferencial Incremental (EDI)

Enquanto que, com a utilização de EDIs só existem três elementos de fase ($\Delta 87LA$, $\Delta 87LB$ e $\Delta 87LC$), os quais as razões são retratadas a partir da Equação (3.89). Como pode ser visto, o elemento incremental é a subtração de $\hat{I}_{\phi pre}$, a corrente de pré-falta, do valor da corrente de falta no instante k , $\hat{I}_{\phi}(k)$.

$$M_{\Delta\phi L}(k) = \frac{\hat{I}_{\phi R}(k) - \hat{I}_{\phi Rpre}}{\hat{I}_{\phi L}(k) - \hat{I}_{\phi Lpre}} = \frac{\Delta\hat{I}_{\phi R}(k)}{\Delta\hat{I}_{\phi L}(k)} \quad (3.89)$$

na qual ϕ pode ser as fases A, B ou C.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou conceitos importantes da proteção diferencial de LTs especificadamente com relação ao plano operacional e ao plano- α . Foram expostos os desafios que devem ser vencidos afim de se ter um algoritmo de proteção confiável, são eles: curto-circuito com *outfeed*, saturação de TC e desalinhamento de amostras no canal de comunicação. Também foram descritas as trajetórias percorridas pelos elementos diferenciais convencionais no plano alfa, e a ideia da proteção diferencial incremental foi introduzida.

Nesse contexto, este capítulo foi necessário e de grande importância para elucidar as principais características e condições operacionais da LT, assim como as soluções usualmente empregadas em cada caso. Tais aspectos serão utilizados para a elaboração do algoritmos proposto no presente trabalho, que será apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

ALGORITMO PROPOSTO

Neste capítulo serão detalhados todos os passos seguidos para a obtenção do algoritmo proposto nesta dissertação. Posteriormente serão apresentadas as deduções analíticas para as trajetórias percorridas pelos elementos diferenciais incrementais.

4.1 ALGORITMO PROPOSTO

A partir do diagrama apresentado na Figura 4.1 é possível observar por meio de blocos, todos os aspectos abordados na simulação do algoritmo avaliado, denominado de função $\Delta 87L\phi$. O índice T corresponde aos terminais L ou R, terminais local ou remoto, e ϕ representa as fases A, B ou C.

4.1.1 Sincronização dos Sinais

Conforme descrito na Seção 3.3.1, a necessidade do uso de métodos de sincronização existe devido a assimetria dos relógios dos circuitos de aquisição dos relés e das longas distâncias entre os terminais das LTs. Nesse contexto, no bloco denominado “Sincronização dos Sinais” é utilizado um método de sincronização de sinais que, segundo Mills (1991), pode ser o *Ping-Pong* ou o GPS. Portanto, as entradas deste bloco $i_{\phi Ls}$, $v_{\phi Ls}$, $i_{\phi Rd}$ e $v_{\phi Rd}$ correspondem aos sinais de corrente e tensão de ambos os terminais, considerando que os sinais do terminal remoto podem estar ou não desalinhados. Já as saídas $i_{\phi Rs}$ e $v_{\phi Rs}$ do terminal remoto representam sinais sincronizados com $i_{\phi Ls}$ e $v_{\phi Ls}$ do terminal local. É importante citar que neste trabalho os algoritmos de sincronização de sinais não foram implementados, de modo que foi sempre considerado uma sincronização correta dos sinais. Contudo, foram feitas algumas simulações supondo erros de sincronização de um conjunto de amostras e, com base nos resultados obtidos, o algoritmo proposto se mostrou robusto pois atuou da mesma maneira do que quando o

desalinhamento de amostras era desconsiderado.

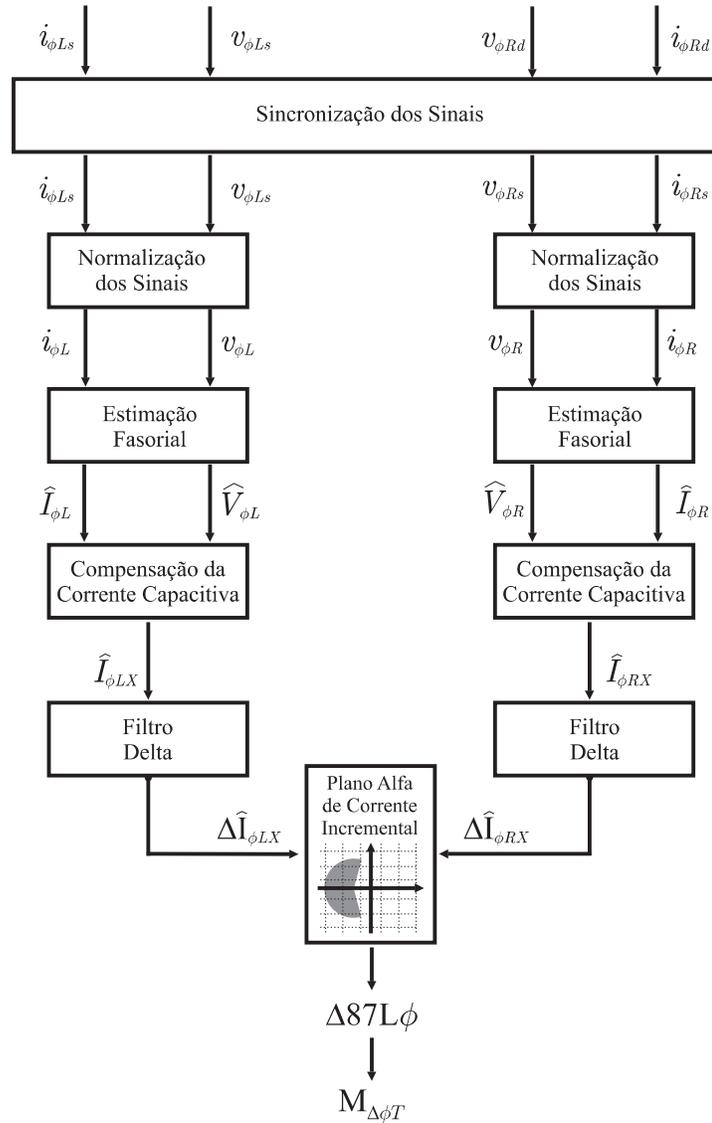


Figura 4.1. Diagrama de blocos do algoritmo proposto.

4.1.2 Normalização dos Sinais

O bloco “Normalização dos Sinais” utiliza, em ambos terminais da LT, as variáveis TAP_I e TAP_V , definidas de acordo com as Equações (4.1) e (4.2), para estabelecer os valores base de corrente e tensão, respectivamente. O intuito deste bloco é normalizar os sinais de corrente pela sua corrente nominal, calculada através da corrente secundária máxima dos TCs, enquanto os sinais de tensão são normalizados pela tensão nominal da linha. Como pode ser observado

nas Equações (4.3) e (4.4), as entradas $i_{\phi Ts}$ e $v_{\phi Ts}$ são manipuladas afim de determinar suas respectivas grandezas normalizadas, $i_{\phi T}$ e $v_{\phi T}$.

$$TAP_I = \frac{I_{max}^{sec} RTC_{max}}{RTC} \quad (4.1)$$

$$TAP_V = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3} RTP} \quad (4.2)$$

$$i_{\phi T} = \frac{i_{\phi Ts}(k)}{TAP_I} \quad (4.3)$$

$$v_{\phi T} = \frac{v_{\phi Ts}(k)}{TAP_V} \quad (4.4)$$

nas quais V_{nom} é a tensão nominal de linha, RTC_{max} é a máxima relação de transformação do TC e RTP é a relação de transformação do transformador de potencial capacitivo (TPC). I_{max}^{sec} é a máxima corrente secundária encontrada nos TCs do sistema, e k refere-se ao k -ésimo instante de amostragem. Os símbolos ϕ e T representam as fases A, B, C e os terminais da LT, respectivamente.

4.1.3 Estimação Fasorial

Em “Estimação Fasorial”, os sinais de entrada $i_{\phi T}$ e $v_{\phi T}$ são amostrados a uma taxa de M amostras por ciclo. Diferentes algoritmos de estimação de fasores podem ser empregados mitigando as influências da componente de decaimento exponencial ou de outras formas de distorções na forma de onda. Neste trabalho, o algoritmo Filtro Cosseno Modificado será utilizado, pois este elimina a componente de decaimento exponencial da maneira mais eficaz dentre os demais algoritmos de estimação fasorial (HART *et al.*, 2000).

4.1.4 Compensação da Corrente Capacitiva

A metodologia descrita em Miller *et al.* (2010) é empregada no bloco “Compensação da Corrente Capacitiva” para realizar tal compensação da LT. Neste método a corrente capacitiva

em cada uma das fases é calculada e em seguida subtraída da corrente inicialmente medida no terminal. Este processo está devidamente exposto na Seção 3.2.3.

Conforme a Figura 4.1, as entradas desse bloco $\hat{I}_{\phi T}$ e $\hat{V}_{\phi T}$ são as correntes e tensões medidas no terminal da LT, e sua saída $\hat{I}_{\phi TX}$ corresponde as correntes parcialmente compensadas. Ressalta-se que a partir deste bloco a necessidade de valores de tensão deixa de existir. Isto ocorre pois os fasores de tensão somente foram estimados devido ao seu uso no processo de compensação de corrente capacitiva.

4.1.5 Filtro Delta

Com o uso do bloco “Filtro Delta”, é possível diminuir os efeitos da corrente de pré-falta, ou seja, a influência das condições de carregamento, por meio do emprego das correntes incrementais $\Delta\hat{I}_{\phi TX}$.

Tendo como entrada correntes parcialmente compensadas, neste bloco as correntes de saída são definidas como sendo a corrente no instante $(k-N)$, corrente de pré-falta, subtraída da corrente no instante k , conforme Equação (4.5).

$$\Delta\hat{I}_{\phi TX}(k) = \hat{I}_{\phi TX}(k) - \hat{I}_{\phi TX}(k - N) \quad (4.5)$$

4.1.6 Plano Alfa de Corrente Incremental

Todos os blocos descritos anteriormente são essenciais para a manipulação e adequação dos sinais de corrente dos terminais local e remoto da LT protegida. No entanto, o bloco “Plano Alfa de Corrente Incremental” figura como o módulo principal, uma vez que nele são comparadas as correntes incrementais de cada fase de ambos os terminais, resultando na atuação ou não da proteção diferencial de potência proposta. Neste bloco, as entradas $\Delta\hat{I}_{\phi LX}$ e $\Delta\hat{I}_{\phi RX}$ são utilizadas para determinação de sua saída, chamada de $\Delta 87L\phi$, a qual é uma variável de *trip* que indica ou não o envio do comando de abertura para os disjuntores de forma segregada por fase ϕ . Destaca-se que a variável $\Delta 87L\phi$ é normalmente inativa em condições normais de operação.

O estado da variável $\Delta 87L\phi$ é definido de acordo com as razões complexas $M_{\Delta\phi L}$ e $M_{\Delta\phi R}$, correspondentes aos coeficientes do algoritmo proposto para os terminais local e remoto, respectivamente, e determinadas conforme as Equações (4.6) e (4.7).

$$M_{\Delta\phi L}(k) = \frac{\Delta \hat{I}_{\phi RX}(k)}{\Delta \hat{I}_{\phi LX}(k)}; \quad (4.6)$$

$$M_{\Delta\phi R}(k) = \frac{\Delta \hat{I}_{\phi LX}(k)}{\Delta \hat{I}_{\phi RX}(k)}; \quad (4.7)$$

Para garantir a segurança da proteção, se o módulo de $\Delta \hat{I}_{\phi LX}$ ou de $\Delta \hat{I}_{\phi RX}$ for maior que o valor de $\Delta \hat{I}_{min}$, os índices $M_{\phi LX}$ e $M_{\phi RX}$ são calculados conforme as Equações supramencionadas, respectivamente. Caso contrário, ambos os coeficientes são fixados no ponto $(-1; 0)$, com o intuito de evitar atuações incorretas da função $\Delta 87L\phi$ em decorrência de correntes incrementais espúrias. Ressalta-se que em regime permanente de operação, adotou-se $\Delta \hat{I}_{min}$ igual a 0,01 pu.

Os coeficientes $M_{\Delta\phi L}$ e $M_{\Delta\phi R}$ são interpretados com base na representação gráfica do plano- α de correntes incrementais, no qual os eixos das abscissas e ordenadas correspondem, respectivamente, às partes real e imaginária dos índices da função $\Delta 87L\phi$ conforme ilustrado na Figura 4.2. Nota-se que o ponto de estabilidade desta característica, correspondente ao regime permanente de pré-falta, encontra-se em $(-1; 0)$, e sua região de restrição é definida pela característica circular modificada apresentada por Roberts *et al.* (2001). Também é importante citar que o intervalo de tempo, Δt , entre as amostras obtidas corresponde a 1,04 ms.

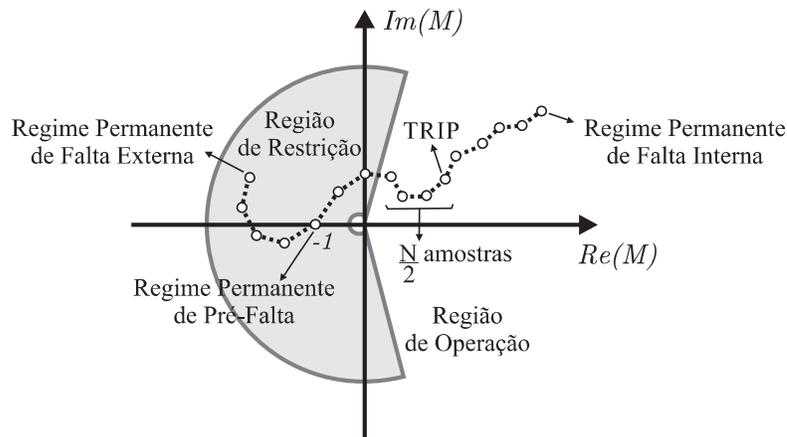


Figura 4.2. Trajetória percorrida por curtos-circuitos no plano- α .

A variável $\Delta 87L\phi$ é ativada se pelo menos um dos coeficientes do plano- α identificar o curto-circuito interno. A fim de prevenir eventuais operações indevidas durante o regime transitório de falta, o sinal de trip é enviado somente após a identificação de meio ciclo de amostras ($N/2$ amostras) consecutivas na região de operação. Desse modo, observa-se na Figura 4.2 que para um curto-circuito interno o coeficiente se desloca do ponto de estabilidade para a região de operação e somente após a identificação de quatro amostras consecutivas (caso hipotético em que $N=8$) nessa região o *trip* é enviado. Da Figura 4.2, nota-se também que para um curto-circuito externo à LT, o coeficiente se desloca de $(-1,0)$, mas permanece na região de restrição e, portanto, $\Delta 87L\phi$ mantém-se inativa.

4.2 TRAJETÓRIAS DOS ELEMENTOS $\Delta 87L$

É importante notar que para os elementos incrementais a corrente de carga é igual a zero, portanto estes se tornam independentes da corrente de falta. Em outras palavras, a remoção da corrente de carga torna os elementos incrementais tão sensíveis quanto os elementos convencionais de sequência. Os valores resultantes da passagem pelo “Filtro Delta” seguem nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.1. Falta Trifásica ABC.

Corrente Incremental no Relé Local
$\hat{I}_{AL} = C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$ $\hat{I}_{BL} = a^2 C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$ $\hat{I}_{CL} = a C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$
Corrente Incremental no Relé Remoto
$\hat{I}_{AR} = (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$ $\hat{I}_{BR} = a^2(1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$ $\hat{I}_{CR} = a(1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\varphi}$

Tabela 4.2. Falta Monofásica AT.

Corrente Incremental no Relé Local	
\hat{I}_{AL}	$= (C_0 + C_1 + C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$
\hat{I}_{BL}	$= (C_0 + a^2C_1 + aC_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$
\hat{I}_{CL}	$= (C_0 + aC_1 + a^2C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$
Corrente Incremental no Relé Remoto	
\hat{I}_{AR}	$= (3 - C_0 - C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$
\hat{I}_{BR}	$= [1 - C_0 + a^2(1 - C_1) + a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$
\hat{I}_{CR}	$= [1 - C_0 + a(1 - C_1) + a^2(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\varphi}$

Tabela 4.3. Falta Bifásica BC.

Corrente Incremental no Relé Local	
\hat{I}_{AL}	$= (C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$
\hat{I}_{BL}	$= (a^2C_1 - aC_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$
\hat{I}_{CL}	$= (aC_1 - a^2C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$
Corrente Incremental no Relé Remoto	
\hat{I}_{AR}	$= (C_2 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$
\hat{I}_{BR}	$= [a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$
\hat{I}_{CR}	$= [a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi}$

Tabela 4.4. Falta Bifásica Terra BCT.

Corrente Incremental no Relé Local	
\hat{I}_{AL}	$= [-C_0(1 - D) + C_1 - C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$
\hat{I}_{BL}	$= [-C_0(1 - D) + a^2C_1 - aC_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$
\hat{I}_{CL}	$= [-C_0(1 - D) + aC_1 - a^2C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$
Corrente Incremental no Relé Remoto	
\hat{I}_{AR}	$= [-(1 - C_0)(1 - D) + (1 - C_1) - (1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$
\hat{I}_{BR}	$= [-(1 - C_0)(1 - D) + a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$
\hat{I}_{CR}	$= [-(1 - C_0)(1 - D) + a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi T}$

Para que seja possível analisar as trajetórias percorridas pelos elementos diferenciais incrementais no plano- α , é necessário calcular as razões entre as correntes a partir de ambos os terminais. Isto será feito para cada fase ($\Delta 87LA$, $\Delta 87LB$, $\Delta 87LC$) conforme exposto a seguir.

4.2.1 Curto-circuito Monofásico

A seguir serão apresentadas as equações e deduções necessárias para se encontrar os elementos diferenciais correspondentes a um curto-circuito monofásico na fase A.

- Fase A

O elemento diferencial $M_{\Delta AL}$ é a razão entre as variações das correntes $\Delta \hat{I}_{AR}$ e $\Delta \hat{I}_{AL}$ conforme descrito na Equação (4.8).

$$M_{\Delta AL} = \frac{\Delta \hat{I}_{AR}}{\Delta \hat{I}_{AL}} \quad (4.8)$$

Substituindo as variações das correntes de contribuição provenientes dos relés local e remoto por aquelas indicadas na Tabela 4.2, obtém-se o exposto na Equação (4.9).

$$M_{\Delta AL} = \frac{(3 - C_0 - C_1 - C_2)\hat{I}_{F1}}{(C_0 + C_1 + C_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.9)$$

Por meio de manipulações matemáticas, a Equação (4.9) pode ser reescrita na Equação (4.10).

$$M_{\Delta AL} = \frac{3}{C_0 + C_1 + C_2} - 1 \quad (4.10)$$

- Fase B

Da mesma forma que é realizado para a fase A, o elemento diferencial incremental para a fase B, $M_{\Delta BL}$, é calculado através das Equações (4.11), (4.12) e (4.13).

$$M_{\Delta BL} = \frac{\Delta \hat{I}_{BR}}{\Delta \hat{I}_{BL}} \quad (4.11)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{[1 - C_0 + a^2(1 - C_1) + a(1 - C_2)]\hat{I}_{F1}}{(C_0 + a^2C_1 + aC_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.12)$$

$$M_{\Delta BL} = -1 \quad (4.13)$$

- Fase C

De maneira análoga às demais fases, as Equações (4.14), (4.15) e (4.16) são utilizadas para calcular o elemento diferencial incremental $M_{\Delta CL}$.

$$M_{\Delta CL} = \frac{\Delta \hat{I}_{CR}}{\Delta \hat{I}_{CL}} \quad (4.14)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{[1 - C_0 + a(1 - C_1) + a^2(1 - C_2)]\hat{I}_{F1}}{(C_0 + a C_1 + a^2 C_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.15)$$

$$M_{\Delta CL} = -1 \quad (4.16)$$

4.2.2 Curto-circuito Trifásico

Nesta seção serão expostas as equações utilizadas para obter os valores dos elementos diferenciais incrementais correspondentes a um curto-circuito trifásico.

A fim de tornar a leitura mais fácil, e devido ao comportamento semelhante à Seção 4.2.1, as deduções daqui em diante serão apresentadas de maneira direta.

- Fase A

$$M_{\Delta AL} = \frac{\Delta \hat{I}_{AR}}{\Delta \hat{I}_{AL}} \quad (4.17)$$

$$M_{\Delta AL} = \frac{(1 - C_1)\hat{I}_{F1}}{C_1 \hat{I}_{F1}} \quad (4.18)$$

$$M_{\Delta AL} = \frac{1}{C_1} - 1 \quad (4.19)$$

- Fase B

$$M_{\Delta BL} = \frac{\Delta \hat{I}_{BR}}{\Delta \hat{I}_{BL}} \quad (4.20)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{a^2(1 - C_1)\hat{I}_{F1}}{a^2 C_1 \hat{I}_{F1}} \quad (4.21)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{1}{C_1} - 1 \quad (4.22)$$

- Fase C

$$M_{\Delta CL} = \frac{\Delta \hat{I}_{CR}}{\Delta \hat{I}_{CL}} \quad (4.23)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{a(1 - C_1)\hat{I}_{F1}}{a C_1 \hat{I}_{F1}} \quad (4.24)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{1}{C_1} - 1 \quad (4.25)$$

4.2.3 Curto-circuito Bifásico

Considerando um curto-circuito bifásico, os cálculos exigidos para se adquirir todos os elementos diferenciais incrementais, correspondentes a este tipo de falta, estão dispostos nas equações a seguir.

- Fase A

$$M_{\Delta AL} = \frac{\Delta \hat{I}_{AR}}{\Delta \hat{I}_{AL}} \quad (4.26)$$

$$M_{\Delta AL} = \frac{(C_2 - C_1)\hat{I}_{F1}}{(C_1 - C_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.27)$$

$$M_{\Delta AL} = -1 \quad (4.28)$$

- Fase B

$$M_{\Delta BL} = \frac{\Delta \hat{I}_{BR}}{\Delta \hat{I}_{BL}} \quad (4.29)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{[a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)]\hat{I}_{F1}}{(a^2C_1 - aC_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.30)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{1 - a^2}{C_1 - a^2C_2} - 1 \quad (4.31)$$

- Fase C

$$M_{\Delta CL} = \frac{\Delta \hat{I}_{CR}}{\Delta \hat{I}_{CL}} \quad (4.32)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{[a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)]\hat{I}_{F1}}{(aC_1 - a^2C_2)\hat{I}_{F1}} \quad (4.33)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{1 - a}{C_1 - aC_2} - 1 \quad (4.34)$$

4.2.4 Curto-circuito Bifásico Terra

São descritas aqui as equações necessárias para a obtenção dos elementos diferenciais incrementais associados a um curto-circuito bifásico com o envolvimento da terra.

- Fase A

$$M_{\Delta AL} = \frac{\Delta \hat{I}_{AR}}{\Delta \hat{I}_{AL}} \quad (4.35)$$

$$M_{\Delta AL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + (1 - C_1) - (1 - C_2)D]\hat{I}_{F1}}{[-C_0(1 - D) + C_1 - C_2D]\hat{I}_{F1}} \quad (4.36)$$

$$M_{\Delta AL} = -1 \quad (4.37)$$

- Fase B

$$M_{\Delta BL} = \frac{\Delta \hat{I}_{BR}}{\Delta \hat{I}_{BL}} \quad (4.38)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + a^2(1 - C_1) - a(1 - C_2)D]\hat{I}_{F1}}{[-C_0(1 - D) + a^2C_1 - aC_2D]\hat{I}_{F1}} \quad (4.39)$$

$$M_{\Delta BL} = \frac{1 - a(1 - D) - a^2D}{C_1 - aC_0(1 - D) - a^2C_2D} - 1 \quad (4.40)$$

- Fase C

$$M_{\Delta CL} = \frac{\Delta \hat{I}_{CR}}{\Delta \hat{I}_{CL}} \quad (4.41)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{[-(1 - C_0)(1 - D) + a(1 - C_1) - a^2(1 - C_2)D]\hat{I}_{F1}}{[-C_0(1 - D) + aC_1 - a^2C_2D]\hat{I}_{F1}} \quad (4.42)$$

$$M_{\Delta CL} = \frac{1 - a^2(1 - D) - aD}{C_1 - a^2C_0(1 - D) - aC_2D} - 1 \quad (4.43)$$

4.3 COMPARAÇÃO DE COEFICIENTES FINAIS

A comparação dos coeficientes finais dos elementos diferenciais incrementais de fase com os elementos diferenciais convencionais de fase e de sequência está ilustrada na Tabela 4.5. É possível notar que para o algoritmo proposto, independente do tipo de curto-circuito avaliado, os elementos diferenciais das fases afetadas são representados por uma função dos coeficientes de distribuição de corrente, que por sua vez dependem da localização da falta e das impedâncias dos equivalentes de Thévenin, mas não dependem do valor da resistência da falta e nem do carregamento do sistema como é o caso dos elementos diferenciais convencionais de fase. Nesse sentido, pode-se dizer que, assim como os elementos diferenciais convencionais de sequência negativa e zero, os elementos diferenciais incrementais também possuem a chamada sensibilidade teórica infinita. Por outro lado as fases não afetadas têm uma proporção constante de -1 , o que caracteriza a condição normal de carga do sistema.

Tabela 4.5. Elementos diferenciais dos algoritmos 87L e $\Delta 87L$.

Elemento	Tipo de curto-circuito avaliado			
	AT	BC	BCT	ABC
M_{AL}	$\frac{3}{(C_0+C_1+C_2)+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,1\varphi}}}-1$	-1	-1	$\frac{1}{C_1+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,3\varphi}}}-1$
M_{BL}	-1	$\frac{1-a^2}{C_1-a^2C_2+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,2\varphi}}}-1$	$\frac{1-a(1-D)-a^2D}{C_1-aC_0(1-D)-a^2C_2D+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,2\varphi T}}}-1$	$\frac{1}{C_1+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,3\varphi}}}-1$
M_{CL}	-1	$\frac{1-a}{C_1-aC_2+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,2\varphi}}}-1$	$\frac{1-a^2(1-D)-aD}{C_1-a^2C_0(1-D)-aC_2D+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,2\varphi T}}}-1$	$\frac{1}{C_1+\frac{\hat{I}_{LD}}{I_{F1,3\varphi}}}-1$
M_{QL}	$\frac{1}{C_2}-1$	$\frac{1}{C_2}-1$	$\frac{1}{C_2}-1$	-1
M_{GL}	$\frac{1}{C_0}-1$	-1	$\frac{1}{C_0}-1$	-1
$M_{\Delta AL}$	$\frac{3}{(C_0+C_1+C_2)}-1$	-1	-1	$\frac{1}{C_1}-1$
$M_{\Delta BL}$	-1	$\frac{1-a^2}{C_1-a^2C_2}-1$	$\frac{1-a(1-D)-a^2D}{C_1-aC_0(1-D)-a^2C_2D}-1$	$\frac{1}{C_1}-1$
$M_{\Delta CL}$	-1	$\frac{1-a}{C_1-aC_2}-1$	$\frac{1-a^2(1-D)-aD}{C_1-a^2C_0(1-D)-aC_2D}-1$	$\frac{1}{C_1}-1$

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo o algoritmo de proteção proposto foi apresentado detalhadamente, e a partir de um diagrama de blocos foi possível perceber como os sinais de entrada e saída são calculados e operados afim de gerarem os elementos diferenciais incrementais, responsáveis pela atuação ou não da função de proteção. Além disso, foram expostas as deduções analíticas das trajetórias percorridas por cada elemento diferencial incremental. Por fim os coeficientes finais de ambos algoritmos de proteção foram expostos em uma tabela e comparados.

Com base no algoritmo proposto, o próximo capítulo apresentará os resultados obtidos para o sistema teste quando submetido a análises transitórias e variações paramétricas.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o propósito de avaliar o comportamento do algoritmo de proteção diferencial incremental, o software ATP foi utilizado para modelar e submeter o sistema teste, apresentado na Seção 5.1, às mais diversas condições de operação. As análises dos resultados obtidos a partir de simulações pontuais e de simulações de variações paramétricas serão detalhados nas Seções 5.2 e 5.3 deste capítulo, respectivamente. Ressalta-se que os resultados serão apresentados considerando a utilização da característica de restrição modificada do plano- α , mencionada na Seção 3.3.4.

5.1 SISTEMA TESTE

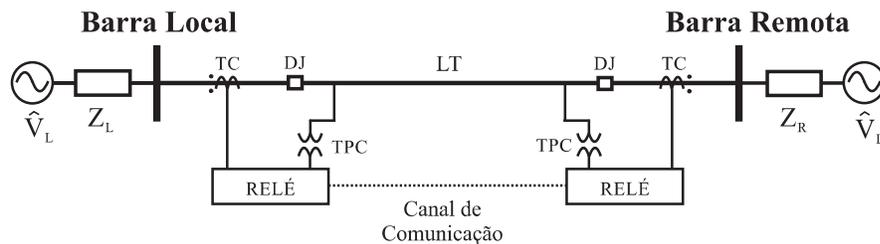


Figura 5.1. Modelo do sistema elétrico utilizado.

O sistema elétrico avaliado nesta dissertação está ilustrado na Figura 5.1. As fontes dos terminais local e remoto apresentadas, \hat{V}_L e \hat{V}_R , respectivamente, são ideais e possuem seus parâmetros definidos com base na razão entre as impedâncias das fontes e da linha, chamadas de SIR_L para o terminal local e SIR_R para o terminal remoto, vide Equações (5.1) e (5.2). A LT utilizada como sistema teste é de 500 kV, 200 km e foi modelada como perfeitamente transposta, a parâmetros distribuídos e constantes na frequência (LEUVEN, 1987). Os TCs são do tipo C800 2000-5 A, com modelagem e parâmetros descritos por IEEE PSRC (2004), e são os mesmos em ambos os terminais. Os modelos dos TPCs utilizados são apresentados por

Pajuelo *et al.* (2008). Os parâmetros considerados para esta LT estão expressos na Tabela 5.1. É importante citar que o subíndice ϕ presente nas Equações (5.1) e (5.2) pode ser substituído pelos valores 0 ou 1, correspondentes às componentes de sequência zero e positiva respectivamente.

$$Z_{L\phi} = SIR_L \cdot Z_{LT\phi} \quad (5.1)$$

$$Z_{R\phi} = SIR_R \cdot Z_{LT\phi} \quad (5.2)$$

Tabela 5.1. Parâmetros da LT.

Sequência	Parâmetros	
	Z_{LT} [Ω/km]	Y_{LT} [$\mu\mathcal{S}/\text{km}$]
Zero	0,4930+j1,3390	j2,890
Positiva	0,0186+j0,2670	j6,124

Nas simulações realizadas, considerou-se no ATP um passo de integração correspondente a uma taxa de 1.600 amostras por ciclo. Os sinais de saída foram introduzidos a um Filtro *Butterworth* passa baixa *anti-aliasing* de terceira ordem, com frequência de corte de 180 Hz. Assim, os sinais de saída foram reamostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo ($M=16$), para que pudessem ser utilizados no algoritmo proposto.

No intuito de validar o correto funcionamento do algoritmo proposto, as condições de curto-circuito simuladas consideraram a influência de alguns parâmetros relacionados à falta: tipo de falta (monofásico, trifásico, bifásico e bifásico com envolvimento da terra), localização da falta (d), resistência de falta (R_f), força das fontes (simuladas por meio da variação de SIR_L e SIR_R) e ângulo de carregamento do sistema (δ).

Com relação aos resultados obtidos, estes são apresentados por meio de dois grupos de análises. Análises Transitórias de Curto-circuito (ATCs), nas quais são simulados casos pontuais considerando o intervalo desde o regime permanente de pré-falta até o regime permanente de falta, e Análises de Sensibilidade Paramétrica (ASPs), onde o regime permanente de falta é utilizado para verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito.

5.2 ANÁLISES TRANSITÓRIAS DE CURTO-CIRCUITO - ATCS

Os resultados obtidos por meio das simulações evidenciadas nesta seção permitem observar o comportamento transitório dos elementos diferenciais no plano- α diante de casos específicos de curtos-circuitos. Nesta seção também são expostos os tempos em que o *trip* é enviado, e portanto é importante mencionar que o instante de *trip* aqui considerado é o momento em que $M/2$ amostras consecutivas são encontradas na região de operação, conforme evidenciado na Seção 4.1.6. Nesse sentido, visto que $M=16$, o sinal de *trip* é enviado após 8 amostras consecutivas estarem presentes na região de operação.

5.2.1 ATC.1 - Curto-circuito Externo

Considera-se um curto-circuito externo bifásico terra nas fases B e C em 80 ms, com um carregamento elevado de $\delta = +60^\circ$, resistência de falta nula $R_f = 0 \Omega$ e operando com fontes fracas ($SIR_L = SIR_R = 1, 0$). Esta ATC tem como intuito testar a segurança do algoritmo de proteção, o qual deve deixar de atuar em situações em que esta atuação não seja necessária. Observando as Figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c é fácil notar que ambos os algoritmos de proteção (convencional e incremental) no plano- α não atuam para esta situação. O que significa que estes operaram da maneira correta e esperada.

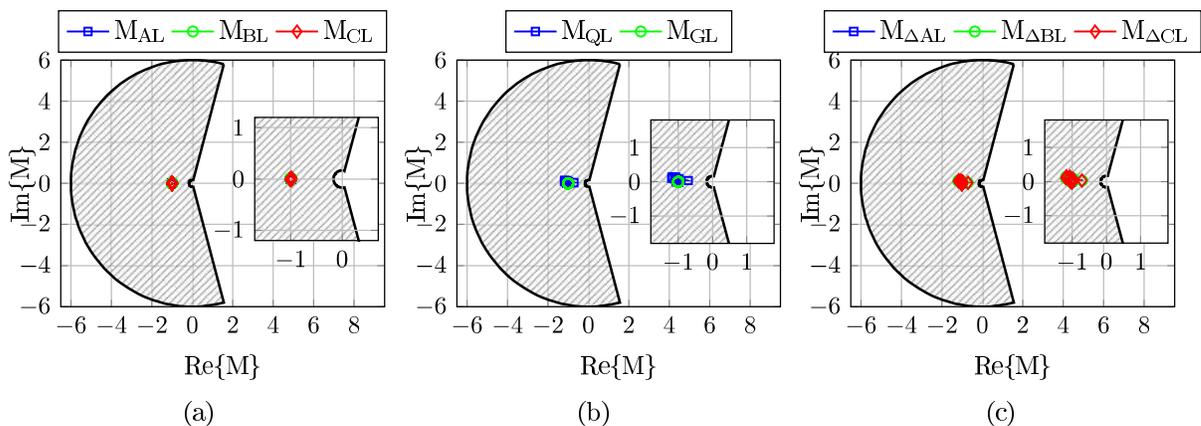


Figura 5.2. Caso 1 - Curto-circuito externo BCT (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.2.2 ATC.2 - Curto-circuito Interno

No segundo caso de análise transitória, aplica-se um curto-circuito interno trifásico ABC em 80 ms, em 50 % da LT e com resistência de falta nula $R_f = 0 \Omega$. Esta falta ocorre no sistema quando o mesmo está sob um carregamento moderado de $\delta = -5^\circ$ e operando com as fontes fortes ($SIR_L = SIR_R = 0,1$).

Ao analisar a Figura 5.3a percebe-se que o algoritmo de proteção diferencial convencional possui atuação correta, porém esta atuação só ocorre após o elemento permanecer dentro da região de restrição durante algum tempo, cerca de 6 amostras no caso da fase C. Nesse sentido, para os EDCs o *trip* ocorre em 91,70 ms para as fases A e B, e em 96,90 ms para a fase C. Observa-se a partir da Figura 5.3b que o elemento convencional de sequência garante operação correta e possui rapidez em sua atuação, enviando o sinal de *trip* em 89,60 ms. Já com a Figura 5.3c é fácil perceber que o algoritmo proposto garante o correto funcionamento além de também possuir atuação rápida. O *trip* para este caso é gerado em 88,60 ms.

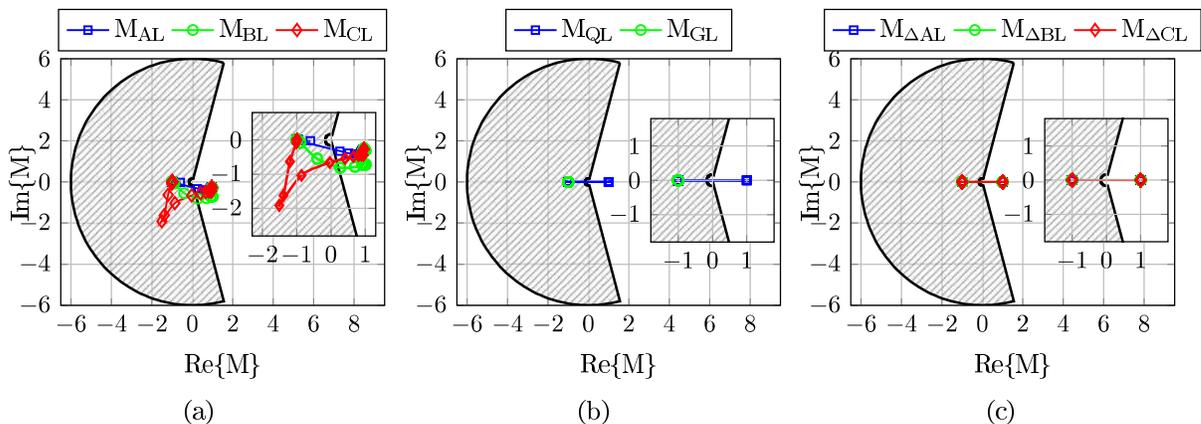


Figura 5.3. Caso 2 - Curto-circuito interno ABC (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.2.3 ATC.3 - Curto-circuito Interno com *Outfeed*

A análise transitória 3 tem o intuito de avaliar a operação da proteção diferencial na situação de curto-circuito interno com *outfeed*. A situação aqui analisada diz respeito a um curto-circuito interno monofásicos na fase B aplicado em 50 % da LT, no qual o sistema opera com as fontes fortes ($SIR_L = 0,1$ e $SIR_R = 0,1$), carregamento elevado com $\delta = +60^\circ$ e resistência de falta

alta $R_f = 100 \Omega$.

Para que seja possível analisar a inversão de corrente ocasionada pelo *outfeed*, as Figuras 5.4a, 5.4b, 5.5a e 5.5b expressam os módulos e as fases das correntes nos terminais local e remoto, respectivamente. É possível constatar das Figuras 5.4a e 5.4b, que as correntes nas fases A e C permanecem inalteradas após o curto-circuito. Já na fase B, o módulo diminui no terminal local e aumenta no terminal remoto. Constata-se também que como o curto-circuito ocorreu exatamente na metade da LT, o esperado era que as correntes local e remota da fase defeituosa aumentassem igualmente. Porém, observa-se que no terminal local a amplitude da corrente diminui. Ademais, com base no ilustrado nas Figuras 5.4a e 5.4b nota-se que os ângulos das correntes dos terminais local e remoto permanecem praticamente inalterados em todas as fases, incluindo a fase defeituosa. Nesse sentido, o efeito do *outfeed* é comprovado com base no comportamento expresso pelos módulos e ângulos das correntes em ambos os terminais na fase defeituosa, pois estes implicam em um curto-circuito externo.

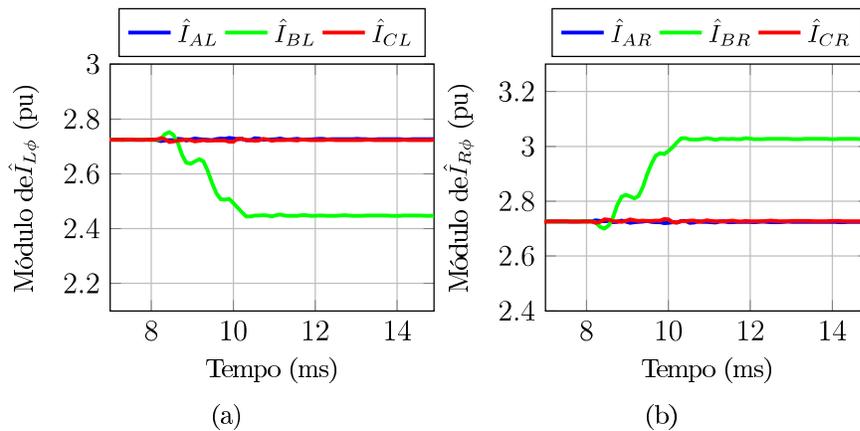


Figura 5.4. Caso 3 - Curto-circuito interno BT com *outfeed* (a) Módulo de $\hat{I}_{L\phi}$; (b) Módulo de $\hat{I}_{R\phi}$.

De maneira análoga, as Figuras 5.6a, 5.6b, 5.7a e 5.7b expressam os módulos e as fases das correntes incrementais nos terminais local e remoto, respectivamente. Analisando as Figuras 5.6a e 5.6b, percebe-se que em regime permanente de falta os módulos das correntes de ambos terminais aumentam para a fase defeituosa, e as demais fases permanecem inalteradas e praticamente constantes em zero. Analisando também as Figuras 5.7a e 5.7b, as quais representam os ângulos das correntes dos terminais local e remoto respectivamente, verifica-se que para a fase B ambos possuem sinais iguais, situação que caracteriza uma curto-circuito interno. Ressalta-se que para as fases não envolvidas no curto-circuito os ângulos permanecem inalterados. É

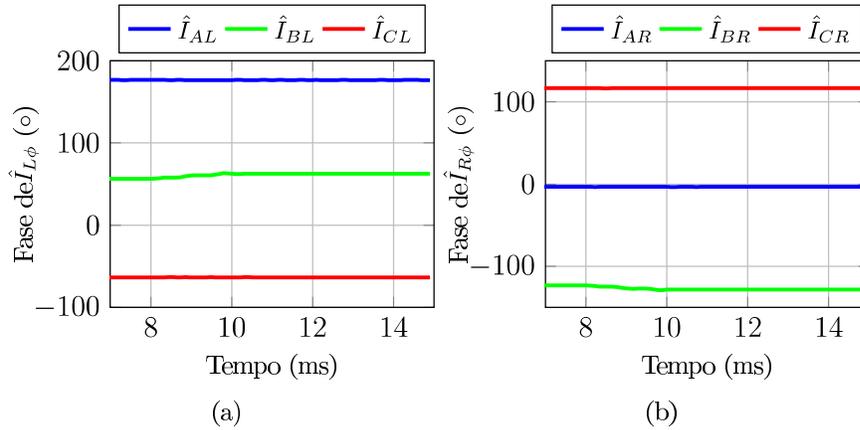


Figura 5.5. Caso 3 - Curto-circuito interno BT com *outfeed* (a) Fase de $\hat{I}_{L\phi}$; (b) Fase de $\hat{I}_{R\phi}$.

importante citar também que a correta operação do algoritmo proposto para esta ATC se dá devido ao emprego de grandezas incrementais, as quais são capazes de mitigar a interferência das condições de carregamento do sistema.

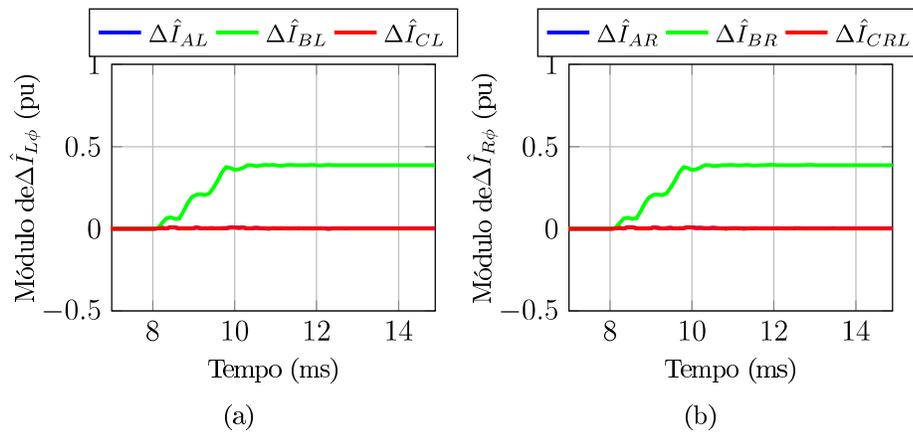


Figura 5.6. Caso 3 - Curto-circuito interno BT com *outfeed* (a) Módulo de $\Delta\hat{I}_{L\phi}$; (b) Módulo de $\Delta\hat{I}_{R\phi}$.

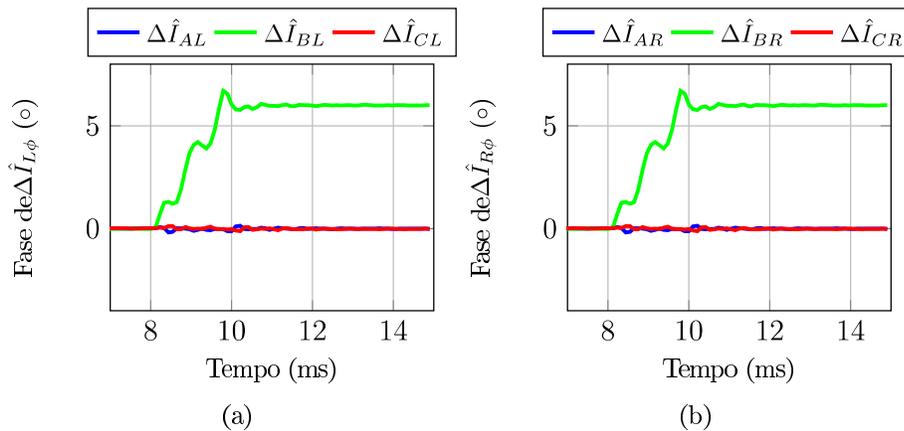


Figura 5.7. Caso 3 - Curto-circuito interno BT com *outfeed* (a) Fase de $\Delta\hat{I}_{L\phi}$; (b) Fase de $\Delta\hat{I}_{R\phi}$.

É possível observar na Figura 5.8a que a inversão de corrente, causada pelas condições em que o sistema se encontra no momento do curto-circuito, faz com que o elemento diferencial M_{BL} não seja sensibilizado. Ou seja, o algoritmo de proteção convencional entende que uma falta externa está ocorrendo, e portanto a atuação não deve existir. Novamente, nota-se a partir da Figura 5.8a que os elementos diferenciais convencionais de sequências são os responsáveis por garantir a confiança do algoritmo de proteção. Ambos EDCs de sequência atuam corretamente para esta situação. Analisando a Figura 5.8c fica evidente a robustez do algoritmo de proteção diferencial incremental. O elemento da fase defeituosa se desloca do ponto de estabilidade para a região de operação, o que faz com que exista um *trip* monopolar na fase B. O *trip* do elemento incremental é primeiramente identificado na amostra 80 que corresponde a 82,30 ms, porém o *trip* é efetivamente enviado somente na amostra 87, a qual corresponde a 89,60 ms. Por outro lado, o *trip* do elemento de fase convencional não ocorre visto que devido ao *outfeed*, o algoritmo identifica um curto-circuito externo. Porém, o *trip* dos elementos diferenciais convencionais de sequência ocorre em 90,70 ms, ou seja, apenas uma amostra a mais que o elemento incremental da fase B. Apesar dos EDCs de sequência possuírem atuação tão rápida quanto o EDI, estes não são capazes de detectar a fase em que o curto-circuito ocorreu sem o uso de algoritmos complementares de seleção de fase, os quais podem fazer com que o *trip* demore a ser gerado. Diferentemente do algoritmo de proteção diferencial incremental, que seleciona a fase defeituosa de maneira implícita.

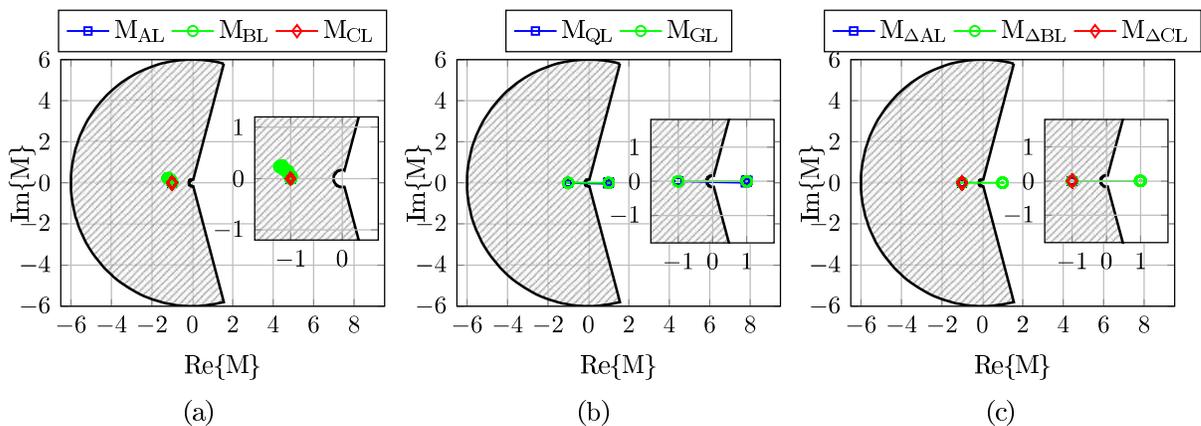


Figura 5.8. Caso 3 - Curto-circuito interno BT com *outfeed* (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.2.4 ATC.4 - Curto-circuito Interno

Aplica-se um curto-circuito interno monofásico na fase A, em 50 % da LT e considerando uma resistência de falta nula $R_f = 0\Omega$. Com o sistema operando com um carregamento moderado de $\delta = +30^\circ$ e fontes fortes ($SIR_L = SIR_R = 0,1$).

A Figura 5.9a retrata que os elementos diferenciais convencionais de fase não envolvidos com a falta permanecem no ponto de estabilidade de acordo com o esperado. Já o elemento diferencial convencional correspondente à fase defeituosa, M_{AL} , o qual deveria se deslocar até a região de operação, permaneceu restrungido e não gerou o *trip* monopolar na fase A conforme aguardado. Já que se trata de uma falta desequilibrada com envolvimento da terra, ambos os elementos diferenciais de sequência são ativados e portanto o algoritmo de proteção diferencial convencional de sequência consegue garantir o correto funcionamento e envio do *trip* como pode ser observado pela Figura 5.9b. Todavia, o sinal de *trip*, enviado em 90,70 ms, não especifica qual é a fase defeituosa, comprometendo dessa maneira a seletividade da proteção. Com relação ao algoritmo proposto neste trabalho, este obteve correto funcionamento novamente. De acordo com o observado na Figura 5.9c, somente o elemento diferencial incremental da fase defeituosa se deslocou do ponto de estabilidade para a região de operação. Assim, o elemento $M_{\Delta AL}$ foi ativado e gerou um sinal de *trip* monopolar na fase A em 88,60 ms. Os EDIs da fase B e C permaneceram no ponto de estabilidade durante toda a simulação.

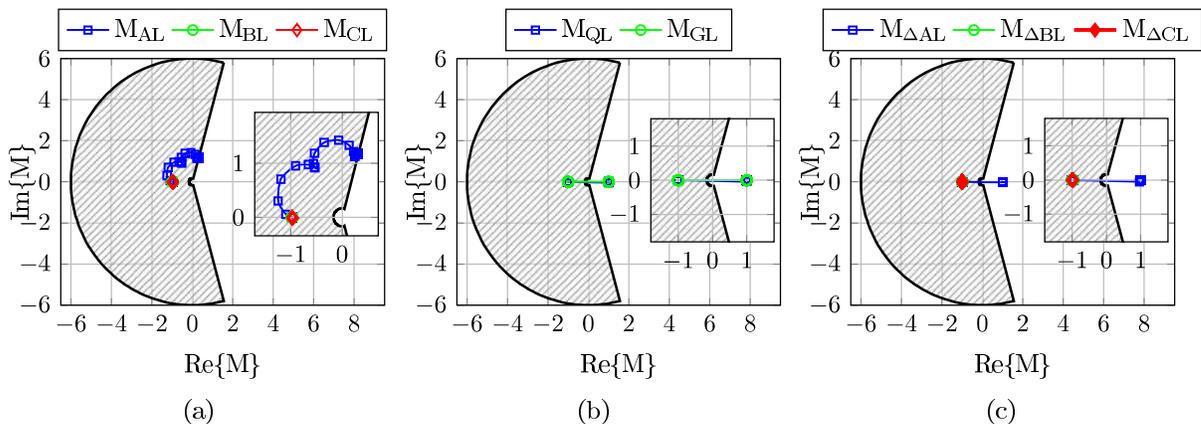


Figura 5.9. Caso 4 - Curto-circuito interno AT (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

Tabela 5.2. Parâmetros Avaliados

Variáveis de Simulação	Valores Adotados
Resistência de Falta (R_f)	Fase-Fase: 0, 5,...,195, 200. (Ω)
	Fase-Terra: 0, 10,...,90, 1000. (Ω)
Localização da Falta (d)	5, 10,...,90, 95. (% da linha)
Carregamento do Sistema (δ)	-90, -85,...,+85, +90. ($^\circ$)
Força da Fonte (SIR)	0,1; 0,2;...;1,9 e 2; 2,5;...; 10.

5.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA - ASPs

Nas ASPs, considera-se o regime permanente de falta para verificar o comportamento dos elementos diferenciais no plano- α , e através disso verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito. Os parâmetros avaliados na análise de sensibilidade paramétrica, seus intervalos e passos de variações estão apresentados na Tabela 5.2. Neste tipo de análise, apenas um parâmetro varia por vez, enquanto os outros são mantidos constantes, possibilitando conclusões mais abrangentes quanto à relação entre cada um dos parâmetro e a função de proteção avaliada.

Com relação aos valores estabelecidos para δ expostos na Tabela 5.2, ressalta-se que apesar de terem sido avaliados ângulos de carregamento no intervalo $-90^\circ < \delta < 90^\circ$, na prática tipicamente estes ângulos são limitados a $\pm 35^\circ$ (SAADAT, 2010). Ainda sobre o exposto na Tabela 5.2, é importante mencionar que a variação da força da fonte é realizada separadamente para cada uma das fontes, ou seja, enquanto o SIR de uma delas é variado, o da outra permanece constante. Além disso, considera-se um mesmo valor de carregamento do sistema durante a variação da força da fonte. Desse modo, as impedâncias equivalentes da fonte analisada são calculadas dependendo do valor do SIR e também do valor do carregamento a ser avaliado e, com base nesses parâmetros, as tensões na fonte analisada são determinadas. Já quanto a variação do carregamento através da variável δ , supõem-se que a barra local possui tensão igual a $1\angle 0^\circ$ pu e a barra remota com $1\angle \delta$ pu. É válido ressaltar que o valor atribuído a δ corresponde a defasagem angular entre as tensões nas barras, fato que é possível por meio do controle das tensões nas fontes local e remota em regime permanente.

5.3.1 Variação do Carregamento

Nos casos ASP.1, ASP.2, ASP.3 e ASP.4 avalia-se a influência do carregamento e do tipo de falta na correta operação da proteção diferencial. Portanto, para estas quatro situações o ângulo de carregamento varia no intervalo de $-90^\circ < \delta < 90^\circ$, ambas fontes dos terminais são consideradas fracas $SIR_L = 1,0$ e $SIR_R = 1,0$, os curtos-circuitos são realizados em 50 % da LT e a R_f é nula. As Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam o comportamento de ambos algoritmos.

Com base nos resultados apresentados através das Figuras 5.10a, 5.11a, 5.12a e 5.13a observa-se que os elementos diferenciais convencionais de fase possuem atuação correta nas fases sãs, as quais permanecem no ponto de estabilidade. Já considerando as fases envolvidas na falta, o algoritmo possui atuação restringida por uma faixa de valores de carregamento do sistema que variam de acordo com o curto-circuito que é aplicado. Considerando o caso ASP.1, a fase faltosa opera somente quando o carregamento do sistema está entre -10° e $+10^\circ$. Em ASP.2, verifica-se que os elementos da fase B e C possuem atuação correta apenas na faixa de valores de -20° a $+20^\circ$. Para ASP.3, o elemento de fase A só é ativado para valores de δ entre -20° e $+20^\circ$, enquanto que o da fase C para valores entre -25° e $+25^\circ$. Em ASP.4 é aplicado um curto-circuito trifásico na metade da LT. Verifica-se que os elementos de fase apresentam comportamento semelhante entre si, com atuação restrita a uma faixa de valores de carregamento do sistema de -25° a $+25^\circ$, neste caso igual entre todas as fases.

Ao analisar as Figuras 5.10b, 5.11b, 5.12b e 5.13b conclui-se que para ASP.1 e ASP.3 ambos elementos de sequência atuam corretamente efetuando a detecção do curto-circuito para qualquer valor de carregamento. Em ASP.2 o elemento de sequência negativa fica responsável por garantir a correta atuação da proteção, visto que a falta analisada neste caso não possui envolvimento da terra e então o elemento de sequência zero não é ativado. Já para ASP.4, como se trata de um curto-circuito simétrico, os elementos de sequência permanecem na região de restrição para todos os valores de carregamento.

Observando as Figuras 5.10c, 5.11c, 5.12c e 5.13c, conclui-se que o uso de elementos diferenciais incrementais provê um correto funcionamento da proteção e não exhibe alteração no comportamento dos elementos para diferentes tipos de faltas. EDIs tornam o algoritmo não

dependente do tipo de falta e minimamente influenciado pelas condições de carregamento.

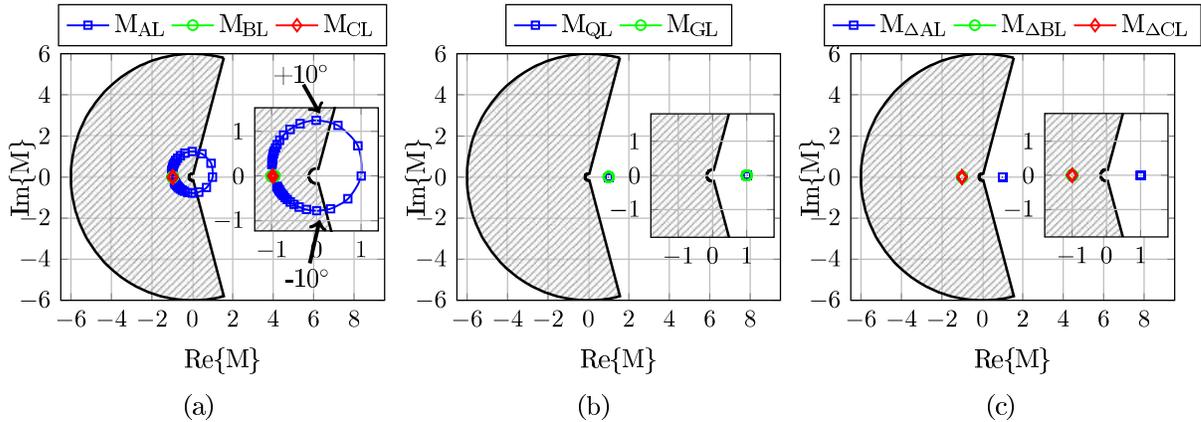


Figura 5.10. Caso 1 - Curto-circuito AT com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

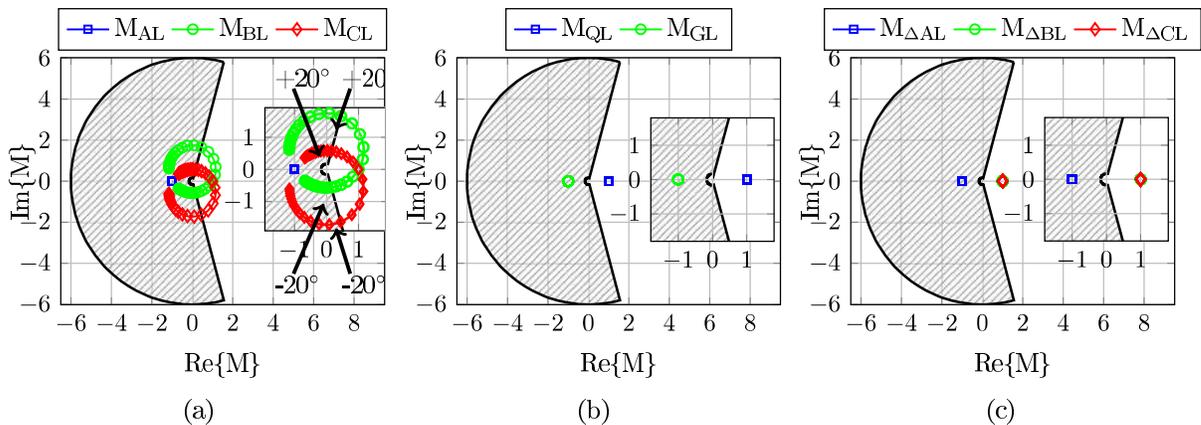


Figura 5.11. Caso 2 - Curto-circuito BC com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

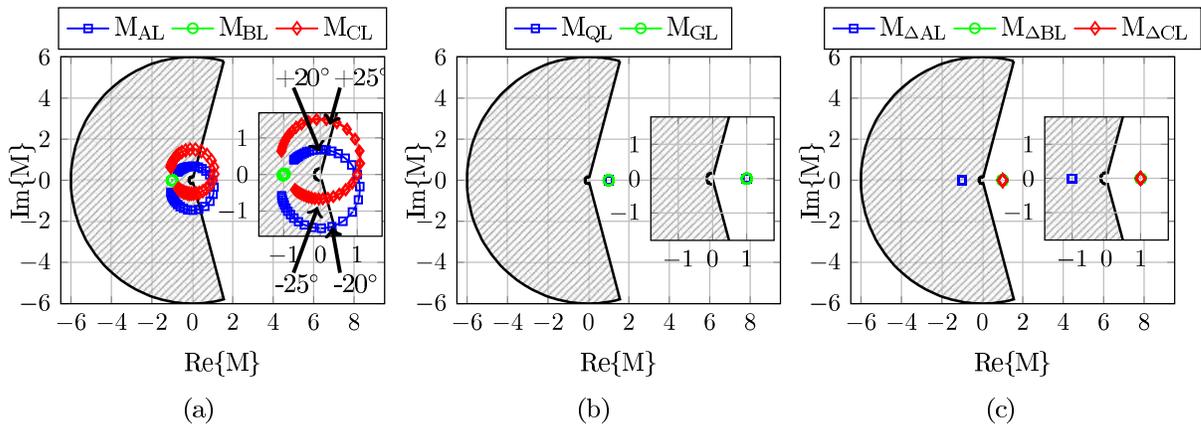


Figura 5.12. Caso 3 - Curto-circuito ACT com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

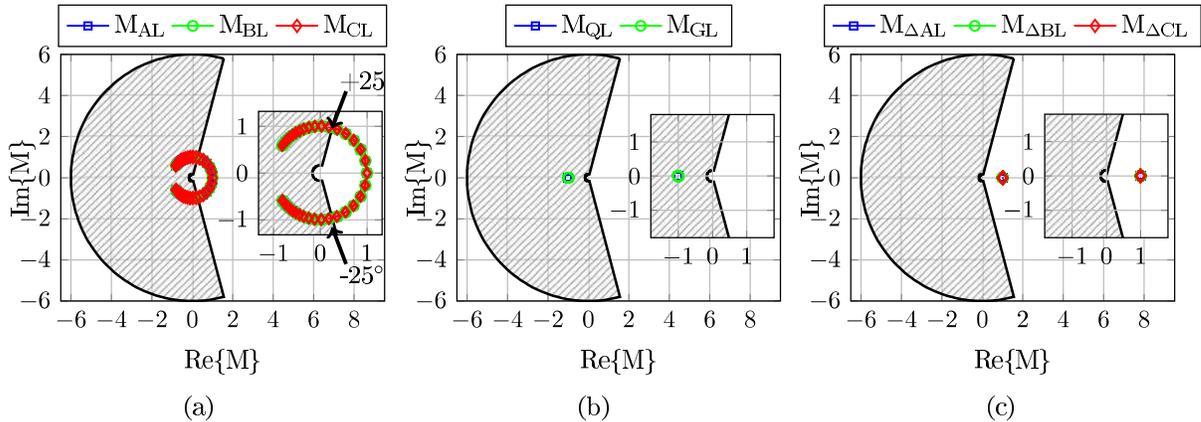


Figura 5.13. Caso 4- Curto-circuito ABC com δ variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.3.2 Variação da Resistência de Falta

Com ASP.5 a variação da resistência de falta é avaliada. Este parâmetro varia de 0 a 1000 Ω com uma taxa de 10 Ω . Nesta simulação o sistema teste opera com ambas as fontes dos terminais consideradas fortes ($SIR_L = SIR_R = 0,1$), o curto-circuito monofásico na fase A ocorre em 50 % da LT e o carregamento do sistema é baixo, com $\delta = -5^\circ$. A Figura 5.14 retrata o comportamento dos elementos diferenciais no plano- α para a ASP.5.

É possível notar a partir da Figura 5.14a a trajetória circular percorrida pelo elemento M_{AR} , a qual a partir de um certo valor de resistência de falta, deixa a região de operação e cai na característica de restrição. Pode ser dito que o elemento de fase se torna insensível para curtos-circuitos com resistências de falta maiores que 420 Ω . Também nota-se que M_{BR} e M_{CR} permanecem no ponto $(-1; 0)$ uma vez que estes não estão envolvidos na falta.

Os elementos M_{QR} e M_{GR} ilustrados na Figura 5.14b são capazes de detectar a falta para todas as situações simuladas. Visto que estes elementos dependem somente dos fatores de distribuição de corrente, sua posição no plano- α é constante com R_f .

Analisando os elementos diferenciais incrementais na Figura 5.14c as vantagens deste método são evidentes dado que os elementos de fase envolvidos no curto-circuito nunca perdem sua sensibilidade no caso da variação da resistência de falta. De fato, esta variação não afeta a localização dos elementos diferenciais incrementais no plano- α .

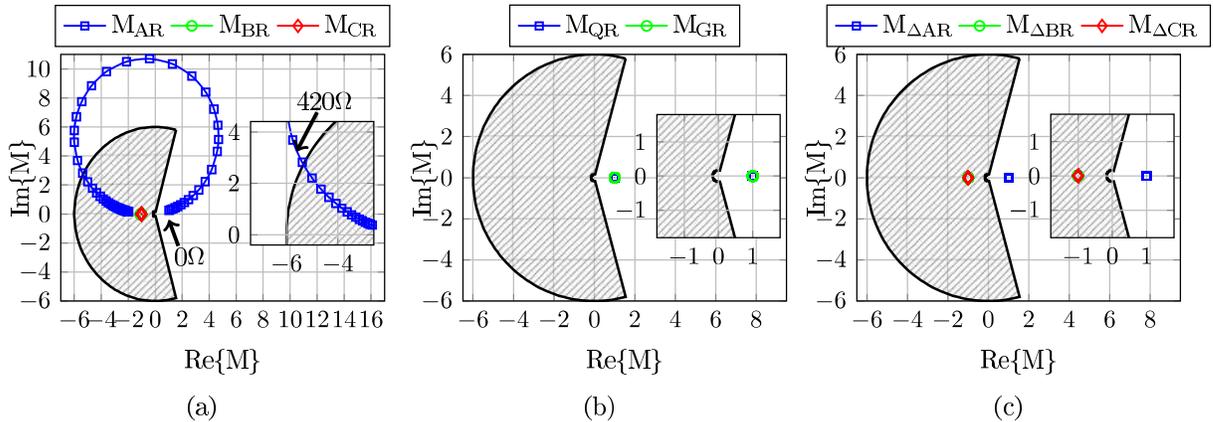


Figura 5.14. Caso 5 - Curto-circuito AT com R_f variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.3.3 Variação da Localização de Falta

Os casos ASP.6 e ASP.7 analisam a influência da localização da falta no desempenho do algoritmo proposto. Neste dois casos a localização do curto-circuito ocorrido na LT varia de 5 a 95 % com taxa de 5 %. O valor da resistência de falta utilizada é de $R_f = 10 \Omega$, ambas as fontes dos terminais são consideradas fortes ($SIR_L = SIR_R = 0,1$) e o carregamento do sistema é considerado baixo, com $\delta = -5^\circ$. Pode ser visto nas Figuras 5.15 e 5.16 que a magnitude de todos os elementos aumentam ou diminuem dependendo na localização do curto-circuito. Conforme a ocorrência da falta se aproxima do terminal remoto, maior é o valor da razão no plano- α . Este fato pode ser explicado através da equação das razões no plano- α . Portanto, quanto mais próximo ao terminal local é a ocorrência do curto-circuito, menores são os valores dos elementos diferenciais.

É observado das Figuras 5.15a e 5.16a, que as partes imaginária e real dos elementos diferenciais de fase são afetadas pela variação da localização. O mesmo pôde ser constatado para os elementos diferenciais de sequência, conforme visto nas Figuras 5.15b e 5.16b, mas nestes casos a parte imaginária da trajetória percorrida pelos elementos diferenciais não apresenta variação significativa. Analisando as Figuras 5.15c e 5.16c é notado, conforme esperado, o mesmo comportamento dos elementos diferenciais convencionais de sequência.

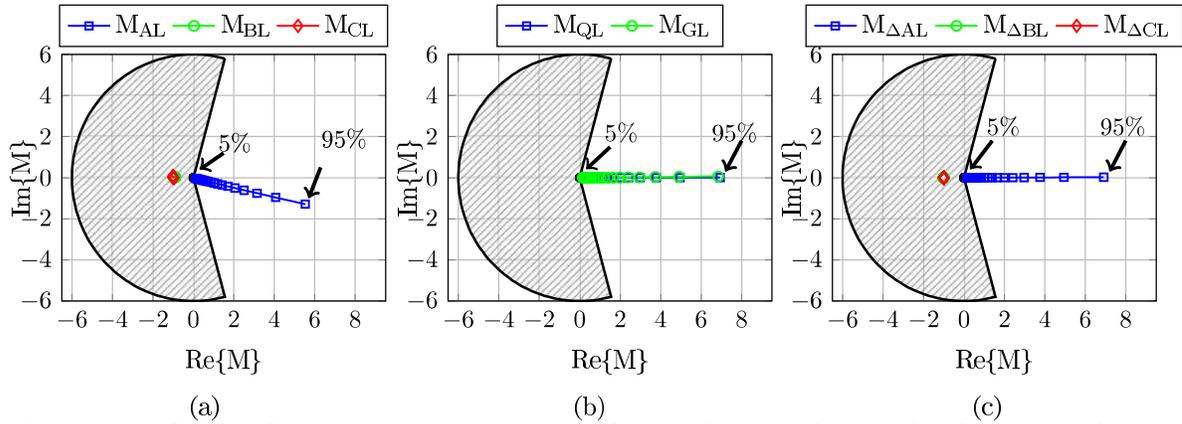


Figura 5.15. Caso 6 - Curto-circuito AT com p variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

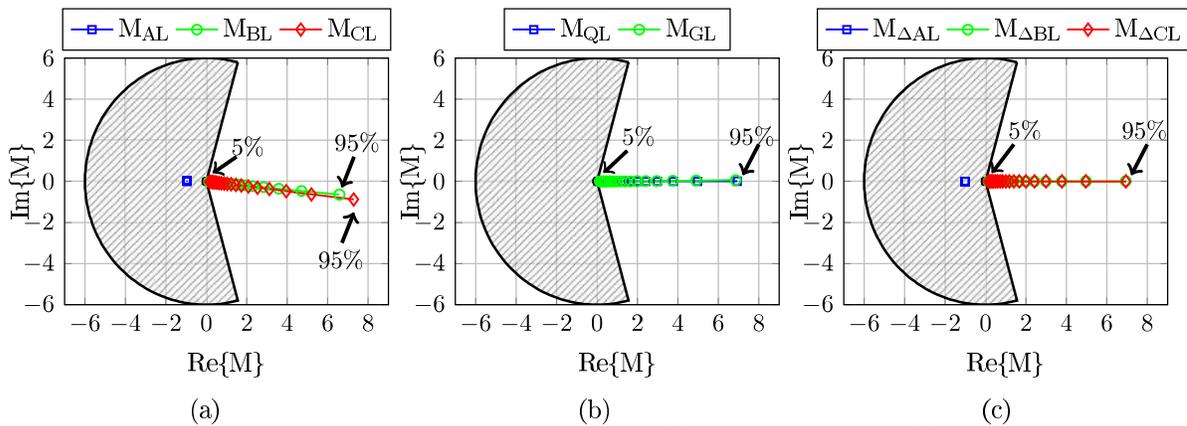


Figura 5.16. Caso 7 - Curto-circuito BCT com p variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

5.3.4 Variação da Força das Fontes

A Figura 5.17 apresenta o desempenho do algoritmo de proteção para a ASP.8, no qual SIR_L varia de 0,1 a 10,0 para um curto-circuito interno monofásico na fase A. É notável que a variação da intensidade da fonte é feita quando se considera o mesmo valor de carga, neste caso $\delta = -5^\circ$. Assim, a impedância equivalente da fonte analisada é calculada com base no valor de SIR_L , e com base nisso, as tensões na fonte analisada são determinadas, a fim de manter a mesma carga durante a pré-falta.

Figura 5.17a mostra que os elementos diferenciais das fases sãs não têm alterações relevantes, o que é compreensível uma vez que a corrente de carga é mantida constante. Sendo assim, pode-se afirmar que a força das fontes afeta principalmente as correntes de falta. O elemento diferencial de fase da fase A é afetado, mostrando uma rotação que ocorre devido à

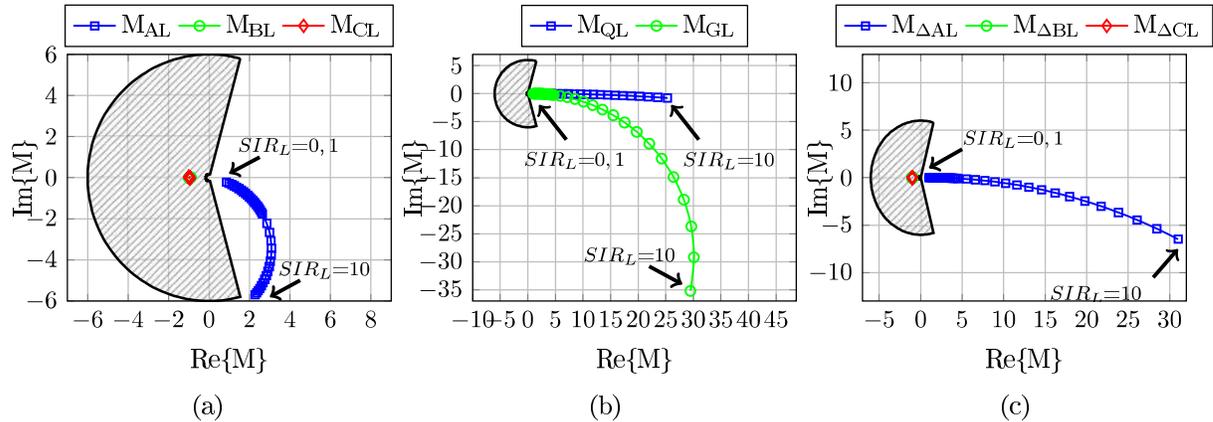


Figura 5.17. Caso 8 - Curto-circuito AT com SIR_L variando: (a) Elementos de Fase; (b) Elementos de Sequência Negativa e Zero; (c) Elementos Incrementais de Fase.

redução da corrente de falta total, o mesmo que a contribuição do terminal local. É importante notar que esta rotação tende a fazer a trajetória percorrida pelo elemento diferencial entrar na característica de restrição.

Pode observar-se a partir da Figura 5.17b que com o aumento de SIR_L , a contribuição para curtos-circuitos internos diminui, uma vez que as correntes diferenciais diminuem, aumentando a magnitude de $M_{\phi L}$. Por outro lado, como a fonte local é mais fraca ($SIR_L \geq 1$), a razão de elementos diferenciais de sequência no plano- α aumenta em magnitude, tendendo ao infinito, o que é mais claramente visto nas trajetórias dos elementos de sequência negativa e zero.

Analisando os elementos diferenciais incrementais da Figura 5.17c, pode-se ver que quanto mais fraca for a fonte local menor será sua contribuição para a corrente de falta e, portanto, maior a magnitude de $M_{\Delta\phi L}$ relacionado com a fase defeituosa. Também se pode ver que com a utilização de elementos incrementais a rotação vista na Figura 5.17a é suavizada e não tende a entrar na região de restrição.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi apresentado o desempenho de um algoritmo de proteção diferencial para LTs baseado em correntes incrementais no plano- α . Para isso, utilizou-se a tradicional proteção diferencial no plano- α e, por meio de análises pontuais e análises de variação paramétrica, ambos algoritmos foram comparados no que se diz respeito a correta operação da proteção. A partir dos resultados obtidos, o algoritmo proposto pôde garantir uma atuação rápida e segura da proteção, e suas vantagens puderam ser evidenciadas.

Através da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que o emprego dos elementos diferenciais incrementais tornou o algoritmo de proteção mais robusto. Estes elementos se mostraram praticamente insensíveis à resistência de falta, não dependentes do tipo de falta, além de variarem muito pouco o comportamento durante diferentes carregamentos do sistema e mantiverem atuação correta mesmo com a presença de diferentes forças na fonte. Constatou-se também que a proteção diferencial incremental operou adequadamente em todos os casos analisados de curtos-circuitos.

Verificou-se também que os elementos diferenciais incrementais que não estão envolvidos no curto-circuito apresentam localização constante no plano alfa, no ponto de estabilidade $(-1; 0)$, que caracteriza condições normais de operação. Ademais, ressalta-se que a metodologia aqui utilizada calcula as correntes incrementais em cada uma das fases em ambos os terminais da linha, possibilitando o *trip* segregado por fase e, conseqüentemente, evitando o uso de algoritmos adicionais de seleção de fase e simplificando a lógica de *trip* para religamento monopolar.

Conclui-se, portanto, que a proteção diferencial incremental é capaz de garantir sua correta operação e através disso assegurar a integridade da LT protegida. Sendo assim, afirma-se que o algoritmo proposto corresponde a uma alternativa eficiente no que se refere a proteção de LTs.

Diante do exposto e visando consolidar o algoritmo proposto, propõe-se como continuação

do estudo apresentado nesta dissertação os seguintes tópicos de pesquisa:

- Avaliação da metodologia na presença de oscilações de potência;
- Análise do desempenho do método proposto na presença de componentes harmônicas no sinal, por exemplo na existência de TC saturado.
- Avaliação do comportamento do algoritmo proposto em um sistema com compensação série capacitiva de LTs.
- Adequação do algoritmo proposto para sistemas com múltiplos terminais e transformadores na mesma zona de proteção da LT.
- Incorporação da lógica de detecção de faltas externas ao algoritmo utilizado afim de fornecer maior segurança em casos como curto-circuitos evolutivos.
- Avaliação dos erros impostos pelos TCs em regime permanente no algoritmo de proteção proposto.
- Avaliação do desempenho do algoritmo de proteção para sistemas não homogêneos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTUVE, H.; BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D. A. Transmission line differential protection with an enhanced characteristic. In: *Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 414–419 Vol.2. ISSN 0537-9989. Citado na página 5.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 10.
- BENMOUYAL, G. *The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 6, 9, 22, 23, and 36.
- BENMOUYAL, G.; LEE, T. *Securing Sequence-Current Differential Elements*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6, and 19.
- BENMOUYAL, G.; MOONEY, J. B. *Advanced Sequence Elements for Line Current Differential Protection*. Pullman, WA, 2006. Citado na página 6.
- BI, T.; YU, Y.; HUANG, S.; YANG, Q. An accurate compensation method of distributed capacitance current in differential protection of uhv transmission line. In: *Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.]: June, 2005. Citado na página 16.
- FERRER, H. J. A.; SCHWEITZER, I. E. O. *Modern Solutions for Protection, Control and Monitorin of Eletronic Power System*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 18.
- ABB POWER T&D COMPANY INC. David G. Hart, Damir Novosel & Robert A. Smith. *Modified Cosine Filters*. 2000. US00615487A, apr. 15, 1998, Nov. 28, 2000. Citado na página 40.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power System Relaying*. 3rd. ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 10.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Citado na página 51.
- KASZTENNY, B.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. J.; FISCHER, N. *Tutorial on Operating Characteristics of Microprocessor-Based Multiterminal Line Current Differential Relays*. Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland,, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 16.
- KASZTENNY, B.; FISCHER, N.; ALTUVE, H. J. Negative-sequence differential protection - principles, sensitivity, and security. In: *Protective Relay Engineers, 2015 68th Annual Conference for*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 364–378. Citado na página 9.

- KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; ADAMIAK, M.; ZEEK, J. Application of current differential protection to tapped transmission lines. *GE Power Management*, 2010. Citado na página 7.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program: Rule Book*. Herverlee, Belgium, 1987. Citado na página 51.
- MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: TEXAS A&M CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. Texas, USA, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 7, 9, 17, 19, and 40.
- MILLS, D. L. Internet time synchronization: The network time protocol. *IEEE Transactions on Communications*, v. 39, n. 10, p. 1482–1493, out. 1991. Citado 2 vezes nas páginas 19 and 38.
- MOLAS, E. C.; MORAIS, L. P.; SILVA, K. M. Análise das trajetórias no plano alfa referentes a operação da proteção diferencial de linhas de transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XXII SNPTEE). Brasília, DF, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 23.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados de Equipamentos Referente ao Ano de 2015 - RE 3/0078/2016*. Rio de Janeiro, Brasil, 2015. Citado 2 vezes nas páginas v and 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados Referente ao Ano de 2015 - Linhas de Transmissão - RE 3/0077/2016*. Rio de Janeiro, Brasil, 2015. Citado 2 vezes nas páginas v and 2.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 12.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 2, 2008. Citado na página 52.
- ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. *The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2001. Citado 6 vezes nas páginas 5, 18, 20, 21, 22, and 42.
- SAADAT, H. *Power System Analysis*. 3. ed. Minnesota, USA: PSA Publishing, 2010. Citado na página 59.
- SCHWEITZER III, E. O.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. A fresh look at limits to the sensitivity of line protection. In: *Protective Relay Engineers, 2011 64th Annual Conference for*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 44–55. Citado na página 8.
- TZIOUVARAS, D. A.; ALTUVE, H.; BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J. *Line Differential Protection with an Enhanced Characteristic*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 5, 20, and 21.
- WARRINGTON, A. R. C. *Protective Relays: Their Theory and Practice, Volume 1*. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1962. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 14.

XUE, Y.; FINNEY, D.; LE, B. *Charging Current in Long Lines and High Voltage Cables Protection Application Considerations*. Pullman, WA, 2012. Citado na página 8.

XUE, Y.; KASZTENNY, B.; TAYLOR, D.; XIA, Y. *Line Differential Protection Under Unusual System Conditions*. Pullman, WA, 2012. Citado na página 8.

ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2nd. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 2, 4, and 13.

ZIGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2006. Citado na página 2.