



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

David Rodrigues Parrini

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Rio de Janeiro
Outubro de 2018

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM LINHAS
DE TRANSMISSÃO

David Rodrigues Parrini

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Denis Vinicius Coury, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2018

Parrini, David Rodrigues

Avaliação do Desempenho da Proteção Diferencial em Linhas de Transmissão/ David Rodrigues Parrini – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XI, 127 p.: il.; 29,7cm.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 111 – 115.

1. Proteção Diferencial. 2. Linhas de Transmissão. 3. Proteção. I. Assis, Tatiana Mariano Lessa de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço a minha orientadora Tatiana por me incentivar a começar e a finalizar esse trabalho. Suas sugestões foram fundamentais para a forma final dele. Agradeço a minha mãe Tania e a minha irmã Giselle pela sua paciência e sua compreensão por dividir o meu tempo entre elas e esse trabalho.

Algumas pessoas me apoiaram durante esse trabalho, sejam em discussões filosóficas sobre o assunto ou pesquisa em si, para ouvir (e serem ouvidos), para cobrar ou incentivar. Gostaria de mencioná-las, sem ordem de preferência: Alan Ferreira, Aline Zimmermann, Antônio Felipe, Antônio Paulo “Tunico”, Camilo Chaves, Carolina Santos, Hannah Caldeira, João Salvador, Juliana Pardal, Leander Rêgo, Oscar Santacruz, Rebecca Laginestra, Renan Fernandes, Ricardo Tenório, Samuel Souza, Tálita Moura e Thiago America.

Durante a produção desse trabalho, foram utilizadas ferramentas de código aberto e desenvolvidas por comunidades de voluntários, como os pacotes *NumPy*, *SciPy*, *Matplotlib* para *Python*, o pacote *MinGW* e as ferramentas *GCC* e *git*. Dados para fluxo de potência e análise de curto-circuito disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) foram fundamentais para algumas das aplicações desse trabalho. Algumas ferramentas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), como o *ANAREDE* e o *ANAFAS*, também oferecidas em versões para estudantes, foram importantes.

Finalmente, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Apoios como esse são indispensáveis para a formação de pesquisadores e a manutenção da produção científica brasileira.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

David Rodrigues Parrini

Outubro/2018

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Programa: Engenharia Elétrica

A expansão dos sistemas elétricos para a integração de parques geradores e o atendimento de cargas e sistemas antes isolados, justificam os projetos de linhas de transmissão longas e compensadas para maior capacidade de transmissão. Limitações econômicas ou físicas devidas a faixas de passagens já ocupadas podem ter como consequência a adição de novos terminais sem o completo seccionamento da linha de transmissão. Esses projetos, embora viáveis, tornam complexa a tarefa do projetista do sistema de proteção pela introdução de problemas inerentes a essas configurações.

A proteção diferencial de Linhas de Transmissão (LT) é uma alternativa às filosofias tradicionais de proteção para LTs que têm como principal característica a seletividade absoluta. A sua zona de proteção é bem definida pelos Transformadores de Corrente (TC) em todos os terminais da LT, onde os relés localizados nos diferentes terminais operam como uma unidade.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da proteção diferencial em linhas de transmissão, considerando linhas com compensação série e multiterminais. Diferentes características e formas de implementação da proteção diferencial são analisadas e comparadas, como a de restrição percentual, plano alfa e uma característica baseada em localizador de falta. O desempenho da proteção diferencial é comparado com o obtido com a proteção de distância tradicional para as mesmas condições, de forma a evidenciar as distinções entre essas filosofias e demonstrar a imunidade da proteção diferencial em relação a alguns efeitos adversos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

TRANSMISSION LINE DIFFERENTIAL PROTECTION PERFORMANCE EVALUATION

David Rodrigues Parrini

October/2018

Advisor: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Department: Electrical Engineering

The power grid expansion to integrate generating plants, load supply, and isolated networks justify long and compensated lines, which have higher power transfer capability. Economical or physical limitations such as the right of way space requirement may result in the addition of more terminals without the construction of switchyards at tap points. Even though these projects are feasible, it makes the task of the protection engineer more complex as inherent problems of these line configuration arise.

The line differential protection is an alternative to more traditional line protection which has absolute selectivity as a main feature. Its protection zone is well defined by the current transformers at each line terminal, where the different terminal relays operate as a unit.

The goal of this work is to evaluate the line differential protection application on series compensated and multiterminal transmission lines. Distinct differential principles and implementations, such as percentage restraint, alpha plane, and a fault locator-based principle are evaluated and compared. Its performance is compared with distance protection one for the same conditions, in order to point the differences between these philosophies and to demonstrate differential protection immunity to adverse conditions.

Sumário

Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Revisão bibliográfica	2
1.4 Estrutura do trabalho	4
Capítulo 2 Aspectos da Proteção de Linhas de Transmissão.....	6
2.1 Introdução	6
2.2 Medição e filtragem	6
2.3 Filosofias de proteção de linhas de transmissão	8
2.3.1 Proteção de distância	8
2.3.2 Esquemas de teleproteção.....	10
2.3.3 Proteção por comparação de fase	12
2.3.4 Proteção diferencial	13
2.4 Telecomunicações	14
2.4.1 Atrasos e sincronização de relógio	15
2.4.2 Problemas introduzidos pelos sistemas de telecomunicações	15
2.4.3 Meios de comunicação	16
2.5 Configurações de linhas de transmissão	17
2.5.1 LT com compensação série	17
2.5.2 LT multiterminais	20
2.5.3 LT terminadas em transformador	22
2.6 Localizadores de defeito	23
2.6.1 LT de dois terminais	23
2.6.2 LT de três terminais	25
2.7 Conclusões	27
Capítulo 3 Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão	28
3.1 Introdução	28
3.2 Característica de restrição percentual	28
3.3 Característica de plano α	31
3.4 Proteção diferencial baseada na estimação da distância ao defeito	35

3.5	Aplicações.....	38
3.5.1	Identificação da saturação de TC.....	38
3.5.2	Reatores de linha na zona de proteção.....	38
3.5.3	Linhas de transmissão com compensação série.....	38
3.5.4	Compensação de corrente de carregamento capacitivo.....	39
3.6	Ajustes da proteção diferencial.....	40
3.7	Teste da proteção diferencial em evento real.....	41
3.8	Conclusões.....	48

Capítulo 4 Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série 49

4.1	Sistema teste.....	49
4.2	Modelagem de banco de capacitores série para análise da proteção de linhas de transmissão.....	51
4.3	Modelagem da proteção.....	54
4.4	Ajuste inicial das proteções.....	56
4.5	Desempenho da proteção para o ajuste inicial e nova proposta de ajuste.....	59
4.6	Comparação de desempenho das características de proteção diferencial.....	62
4.6.1	Defeito interno.....	62
4.6.2	Defeito externo.....	68
4.6.3	Resultados da proteção com filtragem dos sinais de entrada.....	71
4.7	Comparação com proteção de distância.....	75
4.7.1	Inversão de corrente.....	76
4.7.2	Inversão de tensão.....	80
4.8	Conclusões.....	83

Capítulo 5 Proteção de Linhas de Transmissão Multiterminal..... 84

5.1	Proteção de distância.....	84
5.2	Proteção diferencial de restrição percentual e plano α	86
5.3	Proteção diferencial de plano α generalizado.....	87
5.4	Proteção diferencial baseada em estimador da distância ao defeito.....	89
5.5	Desempenho da proteção para um sistema teste de três terminais.....	90
5.5.1	Modelagem da proteção e do sistema teste.....	90
5.5.2	Desempenho da proteção diferencial.....	92
5.5.3	Desempenho da proteção de distância.....	104
5.6	Conclusões.....	106

Capítulo 6 Conclusões	108
6.1 Conclusões do trabalho	108
6.2 Trabalhos futuros	110
Referências	111
Apêndice A Módulo para leitura de COMTRADE no ATP	116
Apêndice B Modelagem da Proteção.....	119
Apêndice C Sistema Belém-Manaus.....	124
C.1 Dados.....	124
C.2 Proteção de banco de capacitores série	124
Apêndice D Programa para Análise de Curto-Circuito.....	126

Lista das Principais Siglas

ATP	Alternative Transient Program
BCS	Banco de Capacitores Série
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange
DFT	Discrete Fourier Transform
EMTP	Electromagnetic Transient Program
LT	Linha de Transmissão
MOV	Metal-Oxide Varistor
PMU	Phasor Measurement Unit
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

Lista dos Principais Símbolos

1FT	Defeito monofásico para a terra
2F	Defeito bifásico
2FT	Defeito bifásico para a terra
3FT	Defeito trifásico para a terra
α	Ângulo de bloqueio da característica de plano alfa
D	Índice do localizador de defeito
F	Ponto de defeito/falta
L	Comprimento de trecho ou total de uma LT
γ	Constante de Propagação da Onda EM na LT
Z_c	Impedância característica de uma LT
\dot{I}_R	Corrente do terminal R
\dot{I}_S	Corrente do terminal S
$\dot{I}_{S_{kF}}$	Corrente estimada da fase k no ponto F devida ao terminal S
$\dot{I}_{R_{kF}}$	Corrente estimada da fase k no ponto F devida ao terminal R
I_b	Corrente de restrição
I_d	Corrente diferencial
I_{re}	Parte real da razão entre correntes terminais
I_{im}	Parte imaginária da razão entre correntes terminais
k_{re}	Parte real da razão entre correntes terminais de LT equivalente
k_{im}	Parte imaginária da razão entre correntes terminais de LT equivalente
P	Ponto de tape/seccionamento de uma LT multiterminal
R	Razão entre correntes estimadas do plano $R\lambda$ ou resistência
λ	Diferença angular entre correntes estimadas do plano $R\lambda$
R_f	Resistência de defeito

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A proteção diferencial oferece característica de seletividade absoluta [1] se comparada às filosofias tradicionais de proteção de Linhas de Transmissão (LT). Tal característica é inerente à proteção diferencial, pois ela delimita a zona de proteção pela localização dos transformadores de corrente (TC) [2, 3]. Apesar da desvantagem dos custos do requisito de comunicação entre os terminais [4], a proteção diferencial oferece as vantagens de seletividade, sensibilidade e rapidez [2] para a proteção de circuitos de diferentes características.

Linhas de transmissão longas são fundamentais para integrar cargas e unidades geradoras geograficamente distantes, como, por exemplo, o circuito Xingu-Manaus, ilustrado na Figura 1.1. A transmissão a longas distâncias pode, entretanto, levar a problemas de estabilidade e de controle de tensão [5]. A compensação série de linhas de transmissão é utilizada com o objetivo de amenizar esses problemas, ampliando ainda a capacidade de transmissão de um circuito.

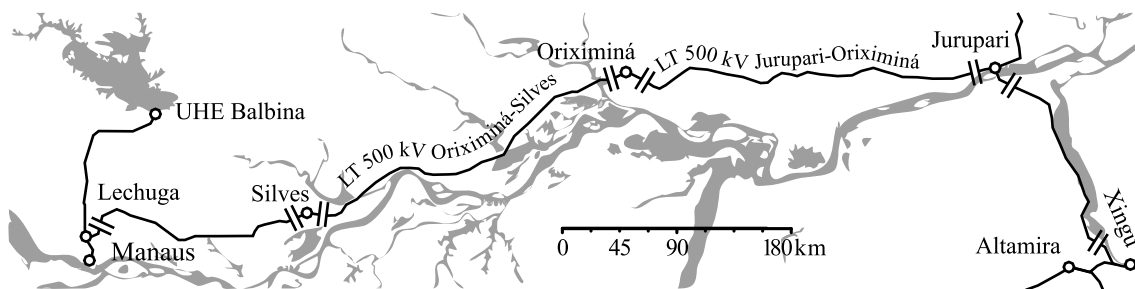


Figura 1.1 Circuito Xingu-Manaus [6].

Outra característica interessante nos sistemas de transmissão é o seccionamento de um circuito, prática relativamente comum para atendimento de uma área com crescimento de carga [5]. O seccionamento tem por objetivo a integração de novas instalações sem que haja efetivamente a construção de uma nova subestação, priorizando a economia ao custo da confiabilidade e da flexibilidade [7]. Ou seja, é comum o seccionamento sem que sejam instalados equipamentos de manobra [5], resultando na criação de circuitos multiterminais.

Tanto os circuitos multiterminais quanto as linhas de transmissão com compensação série representam desafios ao engenheiro de proteção. A contribuição com corrente de curto-circuito de diferentes terminais em LTs multiterminais pode prejudicar a atuação de esquemas de sobrecorrente e de distância [8]. Da mesma forma, problemas como a inversão de tensão e de corrente podem levar a falha dessas proteções em linhas compensadas [5].

A proteção diferencial é uma alternativa imune a alguns desses problemas e, do ponto de vista da proteção, de aplicação simples [2]. Há diferentes tipos de características de proteção diferencial que definem regiões de operação e de restrição das grandezas monitoradas [9], cada qual com as suas vantagens e desvantagens, que são exploradas neste trabalho.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é a avaliação da aplicação da proteção diferencial em linhas de transmissão. Em especial, serão analisadas linhas com compensação série e linhas multiterminais, topologias que enfrentam desafios maiores quando da utilização das filosofias tradicionais de proteção.

É apresentada uma revisão das filosofias de proteção de linhas de transmissão, bem como das características de proteção diferencial comumente utilizadas. Também são abordadas as considerações no projeto da proteção diferencial para diferentes configurações de linhas de transmissão, especialmente as LTs compensadas e as LTs multiterminais.

Dentre as características de proteção diferencial existentes, é detalhada uma característica baseada na estimação do ponto de defeito na LT, sendo proposta ainda uma extensão dessa característica para circuitos multiterminais.

Como resultado, as características de proteção diferencial são analisadas, comparadas e seu desempenho contrastado com o da proteção de distância nas diferentes aplicações.

1.3 Revisão bibliográfica

As referências [4, 10] abordam as filosofias de proteção para linhas de transmissão, servindo de guias para as diferentes aplicações, inclusive de teleproteção. A referência [3] é um guia de aplicação da proteção diferencial, abordando detalhes da implantação do esquema em diferentes configurações de linhas de transmissão. A

proteção por comparação de fases de corrente, uma das primeiras formas de proteção unitária, possui tratamento extenso em textos que tratam de teleproteção [11, 5, 12, 4, 13].

A característica de restrição percentual realiza a comparação de corrente com a diferença entre correntes dos terminais de uma LT e utiliza uma grandeza de restrição também baseada nas correntes terminais [3]. Em [14] é proposta uma variante em que a corrente diferencial é calculada em um ponto arbitrário da LT utilizando o modelo de parâmetros distribuídos da linha com o objetivo de reduzir a influência do carregamento capacitivo.

A característica de plano α , originalmente proposta em [15], define um plano baseado na razão entre as correntes do terminal remoto e local. Essa característica é avaliada em [16], onde o seu desempenho é explorado em diferentes configurações de LTs e diferentes aplicações. A comparação entre as características de restrição percentual e de plano α foram realizadas em estudos específicos [17, 18, 9]. Em [19, 20], os autores propõem uma característica alternativa ao plano α , onde são utilizadas a razão e a diferença angular entre correntes. Em [20], essa característica é definida como plano $R\lambda$ e a ideia de se utilizar o modelo distribuído da LT de [14] para estimar correntes em um ponto arbitrário na LT é associada a um localizador de falta.

Para linhas compensadas com bancos de capacitores série, a referência [21] apresenta uma visão geral dos problemas observados pelas diferentes filosofias de proteção e guia o ajuste da proteção. Em [17], através de um estudo de caso, é feita uma análise comparativa do desempenho das diferentes filosofias, incluindo a diferencial de plano α , durante os fenômenos de inversão de tensão e de corrente. Em [18] o desempenho das características de plano α e de restrição percentual são comparadas para uma LT compensada.

Para linhas multiterminais, as referências [7, 8] tratam da proteção dessas LTs com a filosofia de distância e esquemas com cabo piloto, limitando-se à tecnologia da época. Em [2] é apresentada a característica de plano α generalizado, uma adaptação para LTs multiterminais. Em [22] é apresentada uma variante da característica de restrição percentual para LTs de N terminais. Em [9], as características de restrição percentual, plano α normal e generalizado são comparados em uma aplicação de LT de três terminais.

A proteção diferencial também pode ser utilizada com medidas de componentes de sequência negativa e zero. Esses elementos são mais sensíveis a faltas de baixa amplitude de corrente diferencial ou de alta resistência [23]. Por outro lado, eles são mais

susceptíveis a erros de saturação de TCs durante defeitos externos, exigindo recursos para garantir a segurança durante esses eventos [23, 3].

Algumas filosofias de proteção emergentes e com aplicação prática são as baseadas em ondas viajantes [24, 25]. Diferentemente dos relés tradicionais, no domínio fasorial, esses relés monitoram grandezas elétricas com resolução de nanossegundos, podendo atuar em milissegundos. Denominadas de proteções no domínio do tempo [25], possuem as suas contrapartes das filosofias fasoriais como a diferencial de ondas viajantes (87TW).

Alternativa da proteção diferencial baseada em fasores também são as baseadas em valores instantâneos das correntes [26, 27, 28]. Nessa filosofia, amostras de um mesmo instante dos dois terminais são comparadas na característica de restrição percentual e, se um determinado número de amostras consecutivas estiver na região de operação, é sinalizado o *trip*.

Alguns trabalhos [29, 30, 19, 31] exploram características adaptativas para, por exemplo, prevenir a atuação incorreta contra defeitos externos que possam causar a saturação dos TCs e por consequência uma corrente diferencial falsa (provocada por erros de medição [17, 32, 31]). Outra fonte de erros é o carregamento capacitivo, cujo efeito e compensação na proteção diferencial é explorado em [33] e embutido nas características de [20, 14].

1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 são apresentadas as filosofias de proteção para Linhas de Transmissão e os seus recursos. Proteção de distância, de comparação de fases e diferencial são abordadas de maneira sucinta. Em seguida são descritas técnicas de telecomunicações para a teleproteção. Na sequência, são apresentadas as possíveis configurações de LTs e as dificuldades impostas aos sistemas de proteção. O capítulo aborda brevemente Linhas de Transmissão com compensação série, multiterminais e terminadas em transformadores. Finalmente, é apresentado um localizador de falta para LTs de dois e três terminais.

No Capítulo 3 a proteção diferencial é explorada em maiores detalhes. Diferentes características de proteção diferencial são introduzidas e criticadas. Algumas aplicações para a proteção diferencial são descritas e um roteiro para estudos de ajuste é proposto. Ao final do capítulo, a proteção diferencial é experimentada para uma ocorrência real.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de um caso de proteção de LT longa com compensação série. São detalhados a modelagem da proteção de Banco de Capacitores Série e o impacto dessa proteção na proteção da LT. O desempenho da proteção diferencial é avaliado para diferentes ajustes. No desfecho do capítulo, o desempenho da proteção diferencial é comparado com o da proteção de distância, realçando as vantagens e desvantagens dos esquemas para uma LT real.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de um caso de proteção para LT Multiterminal, especificamente de três terminais. São abordadas a proteção de distância e diferencial. Adaptações das características de proteção diferencial são expostas e utilizadas em testes de uma LT fictícia de três terminais. Mais uma vez o desempenho da proteção diferencial é comparado com o da proteção de distância de forma a avaliar as suas dificuldades.

No Capítulo 6 são feitas as conclusões desse trabalho, sobretudo acerca das diferentes características e das comparações com a proteção de distância. Ele é encerrado com propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Aspectos da Proteção de Linhas de Transmissão

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta os diversos aspectos da proteção de uma linha de transmissão. Os elementos que constituem o sistema de proteção de uma LT incluem os equipamentos de medição, os relés, os disjuntores e, dependendo do esquema, os sistemas de teleproteção.

Uma breve introdução sobre os aspectos da medição e filtragem aplicada à proteção de uma LT é feita na Seção 2.2. As principais filosofias de proteção de LTs, como distância e diferencial, são apresentadas na Seção 2.3. A Seção 2.4 aborda os sistemas de telecomunicação utilizados para teleproteção.

O capítulo segue com a apresentação de configurações alternativas de LT na Seção 2.5. Essas configurações necessitam de tratamento especial do ponto de vista da proteção. O capítulo é encerrado com a apresentação de um localizador de defeitos para linhas de transmissão de dois ou mais terminais na Seção 2.6, importante para uma característica de proteção apresentada no Capítulo 3.

2.2 Medição e filtragem

Os relés de proteção de uma linha de transmissão necessitam de medidas de corrente e tensão para o seu funcionamento. Essas grandezas são obtidas através de Transformadores de Potencial (TP) e de Transformadores de Corrente (TC). A medida do sinal analógico pode, então, ser convertida em valor eficaz através de um filtro de RMS. Tendo em vista que os sinais de tensão e corrente podem estar contaminados por componentes harmônicas e ruídos, a filtragem do sinal é necessária.

Para aplicação em sistemas de proteção, os TCs devem ser selecionados considerando condições de defeito, pois nessas circunstâncias podem estar sujeitos a correntes elevadas e a sobretensões no enrolamento secundário. Dessa forma, a máxima

corrente de defeito, a tensão nominal e a carga total do TC são parâmetros importantes para a sua seleção [34]. Uma seleção inadequada pode levar à escolha de um TC que desempenhe mal sua função durante um defeito.

Visando ao bom desempenho do TC, na sua escolha deve ser levada em consideração, além dos aspectos comentados, a sua característica de saturação [34]. Na Figura 2.1 (a) é ilustrado o circuito equivalente de um TC, alimentando uma carga, que pode representar um relé de proteção. O circuito mostra ainda a representação do ramo de magnetização como um elemento não-linear. A tensão V_S sobre esse ramo possui característica tensão x corrente similar à apresentada na Figura 2.1 (b). Quando sujeito a correntes elevadas, o ponto de operação na curva de saturação tende a ultrapassar o ponto p, efetivamente entrando na região não-linear de saturação. O efeito é o do aumento da componente de corrente de excitação I_E e a distorção da corrente I_S - I_E na carga, reduzindo a acurácia da medida. A redução da acurácia da medida pode afetar de sobremaneira os esquemas de proteção diferencial que dependem da comparação de valores de corrente [5].

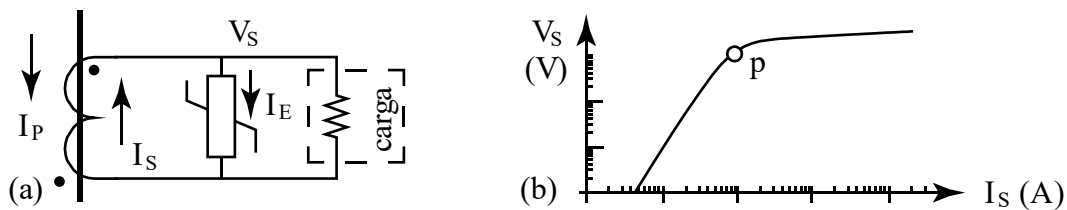


Figura 2.1 (a) circuito equivalente de um TC e (b) curva de saturação.

Outro ponto relevante na implementação de sistemas de proteção de linhas de transmissão é a filtragem dos sinais medidos. A solução comumente adotada para a filtragem dos sinais no tempo em relés numéricos é baseada na DFT (*Discrete Fourier Transform*) de um ciclo [18]. São extraídos valores eficazes de magnitude e ângulo das grandezas elétricas na frequência fundamental (50 ou 60 Hz) e descartadas as demais componentes. Outras soluções incluem os filtros de meio ciclo e de dois ciclos. O filtro de meio ciclo possui uma resposta mais rápida ao custo de em desempenho transitório pior e de não rejeitar harmônicos pares [35]. Algumas aplicações, como a de proteção de distância rápida, utilizam os filtros de um e meio ciclo em conjunto para uma decisão de *trip* de alta velocidade [36].

Em algumas aplicações, como a de LT terminada em transformador, discutida em detalhes na Seção 2.5.3, componentes harmônicas também podem ser extraídas do sinal analógico, caso sejam úteis para o esquema. Essa aplicação pode, por exemplo,

prevenir a operação do relé para eventos que não caracterizem um defeito, como na manobra de um equipamento.

A filtragem visa também a eliminar da medida final componentes de alta frequência que podem estar presentes nos sinais medidos. Geralmente após a medida analógica é utilizado um filtro passa-baixas para eliminar essas componentes e preservar a componente fundamental [35, 4]. Essas componentes podem ser originadas da manobra ou do curto-circuito em equipamentos próximos que contenham capacitância *shunt* [4]. Nessa etapa, é comum a utilização de filtros passa-baixas na função de *anti-aliasing* projetados para a taxa de amostragem utilizada [32].

Correntes de defeitos assimétricas têm maior probabilidade de levar o TC à saturação devido à presença da componente CC. Por outro lado, se a corrente de defeito simétrica for da ordem de 20 vezes a corrente nominal do TC e a sua carga for superior à sua carga nominal, ele também será levado à saturação [34].

Para um TC saturado, a corrente refletida terá um aspecto não senoidal. Os efeitos serão a da redução da magnitude da corrente vista pelo relé através do filtro de RMS e da defasagem angular dessa corrente em relação à corrente real [34, 3]. Métodos como a utilização de circuitos ou filtros mímicos eliminam as componentes CC devidas a saturação dos TCs [32].

Os TPs utilizados em aplicação de proteção não introduzem problemas para a proteção de LTs. Um TP do tipo divisor de tensão capacitivo introduz componente CC na medida de tensão quando houver uma mudança instantânea na tensão primária [35, 4]. Essa componente normalmente é filtrada nos relés de proteção.

Apresentadas as questões relativas à medição das grandezas necessárias à proteção de uma LT, nas seções seguintes serão introduzidas algumas filosofias de proteção.

2.3 Filosofias de proteção de linhas de transmissão

2.3.1 Proteção de distância

A proteção de distância tem como princípio de que a impedância medida por um relé nos terminais de uma LT em defeito é proporcional à distância do ponto de medição até o ponto de defeito. Sendo assim, a grandeza medida é a impedância (2.1).

$$\mathbf{Z} = \hat{V}/\hat{I} \quad (2.1)$$

Duas características comumente utilizadas para a proteção de distância são as características *mho*, da Figura 2.2 (a), e quadrilateral, da Figura 2.2 (b). O ajuste da característica *mho* é mais simples enquanto a característica quadrilateral oferece ajuste de alcance resistivo, importante para permitir ao relé maior sensibilidade contra defeitos de alta resistência [4]. O principal ajuste do relé de distância envolve a impedância do trecho da LT a ser protegido, definindo assim uma zona de proteção.

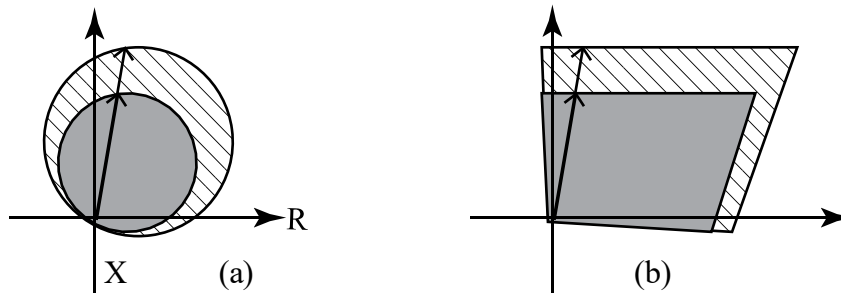


Figura 2.2 Características de relé de distância tipo (a) *mho* e (b) quadrilateral.

O relé de distância requer seis elementos para a proteção contra os dez tipos de defeitos [37]. Os elementos de fase monitoram medidas de linha (AB, BC, CA) e os elementos de terra monitoram medidas fase-terra (A, B, C) contra as combinações de possíveis curtos-circuitos (3FT, 2F, 2FT, 1FT). Os elementos de fase são capazes de operar contra defeitos do tipo 3FT, 2F e 2FT enquanto os elementos de terra para os defeitos tipo 3FT, 2FT e 1FT.

Os elementos de terra medem a impedância de sequência positiva por (2.2) e utilizam o fator de compensação de corrente de sequência zero \mathbf{k}_0 de forma que seja medida a impedância de sequência positiva até o defeito [37]. Os elementos de fase utilizam grandezas de linha para esse propósito (2.3).

$$\mathbf{Z} = \frac{\dot{V}_A}{\dot{I}_A + \mathbf{k}_0 \dot{I}_0}, \quad \mathbf{k}_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} \quad (2.3)$$

A proteção clássica de linhas de transmissão por relés de distância faz uso do “esquema de três zonas”, ilustrado na Figura 2.3. A primeira zona é ajustada para operação instantânea e cobre cerca de 80 a 95% da impedância total do circuito protegido. A margem de segurança de 20% a 5% visa a impedir que o relé atue para defeitos em linhas adjacentes. A segunda zona é ajustada para cobrir toda a linha protegida e mais um percentual da linha adjacente, garantindo proteção total do circuito protegido. A proteção

da segunda zona é temporizada, devendo coordenar com a proteção dos circuitos adjacentes. Note-se que defeitos no final do circuito protegido não terão proteção instantânea. Finalmente, uma terceira zona cobre uma impedância de até 200% da impedância da LT, servindo de proteção de retaguarda.

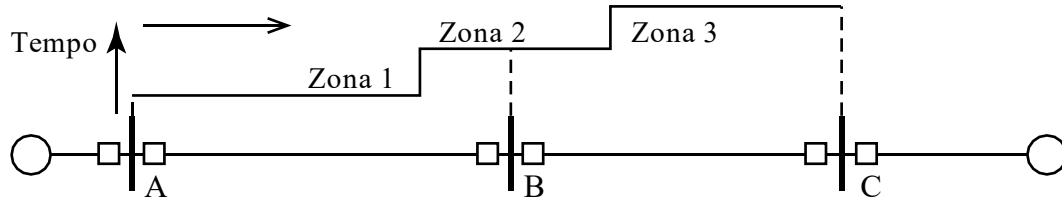


Figura 2.3 Zonas de proteção de um relé de distância no terminal A da LT A-B.

O esquema até aqui comentado, opera com alguma temporização, dependendo da localização do defeito. Tal temporização é fundamental para garantir seletividade, de forma que apenas o circuito sob defeito seja desligado.

Em sistemas de alta tensão, a temporização imposta pelo esquema tradicional de proteção de distância por zonas é inadmissível. As altas correntes envolvidas e, principalmente, problemas de estabilidade eletromecânica, exigem uma proteção de alta velocidade. Assim, para garantir a seletividade da proteção para defeitos em 100% do comprimento de uma LT, com alta velocidade de atuação, são utilizados esquemas de teleproteção. O uso desses esquemas na proteção de LTs é abordado na Seção 2.3.2.

2.3.2 Esquemas de teleproteção

Os esquemas de teleproteção envolvem a troca de sinais entre os relés terminais da LT para impedir (bloquear) a abertura do disjuntor no terminal remoto ou comandar a sua abertura [5]. Em esquemas de teleproteção, frequentemente são utilizadas proteções de distância e sobrecorrente direcionais de terra [4]. As considerações para o projeto são similares às aquelas descritas na Seção 2.3.1. Há esquemas que envolvem funções de subalcance e/ou sobrealcance.

Para a teleproteção baseada em relés de distância, a configuração da Zona 1 pode continuar sendo a de subalcance no elemento protegido. A Zona 2 também poderá continuar com sobrealcance do elemento, mas não há mais a necessidade de coordenação de tempo com os relés que protegem os elementos adjacentes [4].

Na Figura 2.4 estão ilustrados alguns outros esquemas de teleproteção. Nesses esquemas, funções de subalcance e/ou sobrealcance atuam em diferentes lógicas para garantir a seletividade para defeitos na LT. Nesses outros esquemas, a teleproteção é

utilizada ou para transferir um comando de *trip* ou para “permitir” o *trip* da proteção remota.

No esquema DUTT, *Direct Underreach Transfer Trip*, na Figura 2.4 (a), são utilizadas apenas funções em subalcance. A lógica de atuação dos relés nos terminais é de um OU lógico: abrir o disjuntor se a houver *trip* da proteção local ou da proteção remota. Ambas as funções de subalcance devem definir uma região de sobreposição na LT de maneira a evitar zonas cegas. Esse esquema garante *trip* rápido para defeitos dentro do alcance de suas funções. Se o canal de comunicação estiver inoperante, a proteção de um dos terminais deixará de atuar para um defeito além do seu alcance, necessitando da Zona 2 temporizada e assim sacrificando a velocidade da proteção.

O esquema PUTT, *Permissive Underreach Transfer Trip*, na Figura 2.4 (b), é uma extensão do esquema DUTT. Além dos elementos em subalcance, são consideradas funções em sobrealcance. A condição para abertura dos disjuntores é: ou houve atuação das funções de subalcance ou houve a atuação combinada de uma função de subalcance local com uma de sobrealcance remota. Assim, considerando a Figura 2.4 (b), se um defeito sensibilizar a função de sobrealcance do relé B, a operação somente será efetuada se for sensibilizado o relé de subalcance em A. Assim, evita-se a operação do relé de sobrealcance em B para um defeito além de A, atuando para defeitos na área em interseção.

Finalmente, o esquema POTT, *Permissive Overreach Transfer Trip*, na Figura 2.4 (c), é baseado somente em funções de sobrealcance. A condição é a de um E lógico entre as funções de sobrealcance nos terminais da LT. Havendo um defeito para além de A, a operação do relé em B não é permitida pois o relé em A não observa o defeito. Esse esquema garante segurança, pois, na falha da comunicação, não haverá *trip* para defeitos externos. Por outro lado, para defeitos internos também não haverá *trip*.

Os esquemas de teleproteção aqui mencionados são definidos como esquemas não-unitários, em que medidas são feitas em ambos os terminais e há comunicação entre eles, mas não há a comparação direta das medidas [5]. Esquemas unitários são aqueles que as medidas de todos os terminais são comparadas para se verificar a necessidade de *trip* [5], dessa forma considerando a LT como uma unidade protegida. Na Seção 2.3.3 é apresentada a filosofia de proteção por comparação de fase, um dos esquemas de proteção unitária.

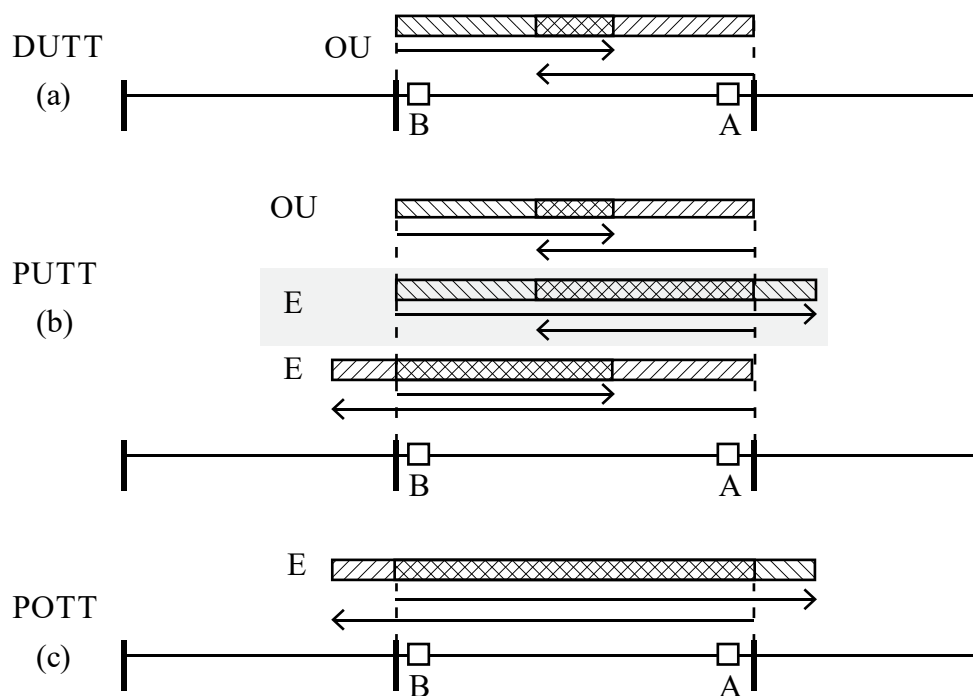


Figura 2.4 Esquemas de teleproteção (a) DUTT, (b) PUTT e (c) POTT [4].

2.3.3 Proteção por comparação de fase

Diferente dos esquemas de teleproteção apresentados na Seção 2.3.2, a filosofia de proteção por comparação de fase envolve informações de ambos os terminais para determinar a condição de defeito, se caracterizando como proteção unitária. A diferença de fase entre as correntes que entram nos terminais da LT é utilizada como a grandeza de operação e de restrição.

A Figura 2.5 (a) contém uma LT com defeito e o sentido de atuação das correntes nos terminais S e R. Ilustrada na Figura 2.5 (b) está uma característica que define um ângulo de operação Φ . Se a diferença de fase estiver entre $-\Phi$ e $+\Phi$, há um defeito na LT. Em condição normal de carga, as correntes I_S e I_R terão sentidos iguais e, tendo em vista que para a proteção o sentido das correntes é o da Figura 2.5 (a), a sua diferença de fase estará próxima a 180° . A operação de um relé comparador de fase pode ser realizada por um esquema de teleproteção do tipo permissivo ou de bloqueio [4].

Um relé de comparação de fase pode ser implementado com a troca de pulsos que informem o cruzamento com o zero da corrente de um determinado terminal. O tempo relativo entre um pulso de cruzamento com o zero da corrente do terminal remoto pode ser comparado com o do terminal local e assim uma diferença de fase ser inferida. Há esquemas segregados, isto é, com comparação de fases para cada um dos condutores de

uma LT, e esquemas mistos, em que informações das três fases são combinadas para a formação de um sinal cuja fase é comparada entre os terminais [13].

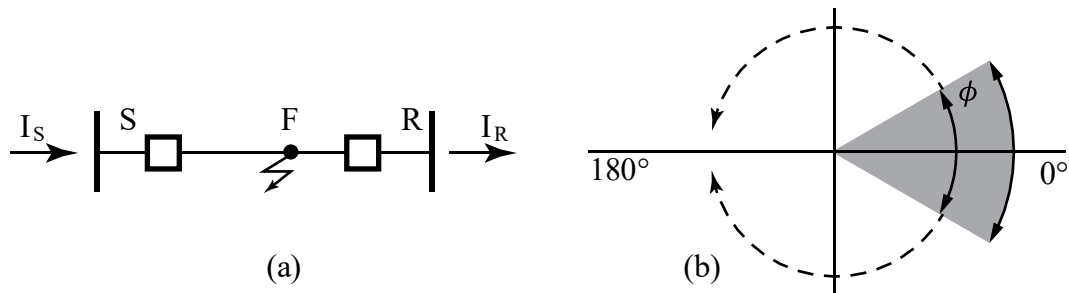


Figura 2.5 (a) LT sob falta com sentido das correntes para o defeito e (b) característica da proteção por comparação de fase.

A proteção por comparação de fase de corrente foi uma das primeiras formas de proteção diferencial de corrente [12, 13]. Na sua concepção mais simples, em que apenas uma informação de fase é transmitida [13], exige apenas um par de cabos para a transmissão da informação na forma de sinal analógico, sendo assim uma filosofia econômica e seletiva de proteção. Devido à tecnologia utilizada na sua concepção, da transmissão analógica em cabo piloto, o seu uso é limitado para circuitos de distâncias curtas [4].

Uma vez que seja necessário proteger circuitos mais longos e de maiores níveis de tensão, alguns problemas para a proteção por comparação de fase começam a surgir. Os atrasos da comunicação tendem a ser maiores, exigindo mais compensação ou uma redução na região de operação. As correntes de carregamento capacitivo da LT, acentuadas nas condições de carga leve, tendem a ter o sentido para dentro da LT (sentido de atuação da proteção) e, por essa razão, a condição de baixo carregamento pode ser confundida com uma condição de defeito.

A informação da amplitude das correntes terminais permite uma melhor definição do estado em que se encontra o circuito e é uma alternativa à filosofia de comparação de fase. A Seção 2.3.4 aborda a proteção diferencial para linhas de transmissão baseada nos fasores de correntes dos terminais da LT.

2.3.4 Proteção diferencial

O objetivo da proteção diferencial é o de determinar a condição de defeito no elemento protegido ao comparar as correntes que entram e saem deste. Baseada na Lei de Kirchhoff das correntes, que estabelece que a soma das correntes que entram em um nó deve ser nula, a proteção diferencial recebe esse nome devido à forma mais simples de se

comparar duas correntes ser através da sua diferença, conforme indicado em (2.4). Se essa diferença não for nula, há um “vazamento” de corrente no interior do equipamento, caracterizando um curto-circuito interno.

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 \neq 0 \quad (2.4)$$

Essa filosofia é aplicada em elementos conectados nos sistemas de potência, como transformadores, sejam eles de dois ou mais terminais, ou um barramento, que pode conter N conexões. Para a aplicação em LTs curtas, a filosofia de proteção diferencial pode ser aplicada sem dificuldades tal como a proteção por comparação de fase, com a vantagem de dispor da informação da magnitude das correntes terminais.

Com a informação do valor das correntes terminais, mais a diferença de fase, os problemas enfrentados pela proteção por comparação de fase podem ter impacto reduzido ou mesmo mitigados na proteção diferencial. Uma alteração simples de (2.4) pode ser da definição de um *pickup* de corrente diferencial como em (2.5). Com essa alteração, podem ser introduzidas no ajuste de I_{pickup} as considerações de eventuais erros de medição e corrente diferencial devido ao carregamento capacitivo e ao atraso de medidas.

$$|\dot{I}_1 - \dot{I}_2| > I_{pickup} \quad (2.5)$$

O Capítulo 3 dessa dissertação é dedicado à filosofia de proteção diferencial, onde são apresentadas diferentes características, aplicações e problemas. Na Seção 2.4, são tratados os sistemas de telecomunicação com ênfase na aplicação de proteção de linhas de transmissão.

2.4 Telecomunicações

Os circuitos de transmissão ocupam longas distâncias e há a necessidade da comunicação entre os seus terminais. Seja por motivos de proteção, supervisão ou controle remoto das instalações, a telecomunicação entre os terminais pode ser feita através de diferentes meios.

A utilização de sistemas de comunicação introduz novos problemas como atrasos nos dados devido às distâncias consideradas, problemas com a sincronização desses dados e mesmo da integridade desses dependendo do meio utilizado. Nas seções a seguir serão exploradas as técnicas para mitigar efeitos dos atrasos, comentados outros problemas introduzidos e abordados os meios de comunicações.

2.4.1 Atrasos e sincronização de relógio

A sincronização dos dados utilizados é um dos principais requisitos para a proteção diferencial de LTs [38]. Duas técnicas possíveis envolvem o uso de um relógio externo, como o GPS; a estimação e compensação dos atrasos com uma técnica como o “ping-pong” [3, 38]; e a marcação de cada amostra com marcas de tempo (*timestamps*) para o alinhamento local dos dados. Essa última técnica pode vir associada ao uso de GPS em ambos os terminais.

A técnica de *ping-pong* mede o tempo de envio e do recebimento de uma mensagem, e realiza uma amostragem de centenas de mensagens para determinar o tempo de atraso do canal de comunicação. Considerando a Figura 2.6, o primeiro relé envia uma mensagem para o segundo relé no instante t_0 . O segundo relé recebe a mensagem no instante t_1 e retorna a mensagem no instante t_2 . O primeiro relé, então, receberá a mensagem no instante t_3 . O atraso calculado da comunicação em um sentido pode ser obtido com (2.6), onde o instante o atraso $t_{\text{turnaround}} = (t_2 - t_1)$ é enviado ao emissor para que esse possa utilizá-lo e reconfigurar a compensação [3].

$$t_{\text{atraso}} = (t_3 - t_0 - (t_2 - t_1))/2 \quad (2.6)$$

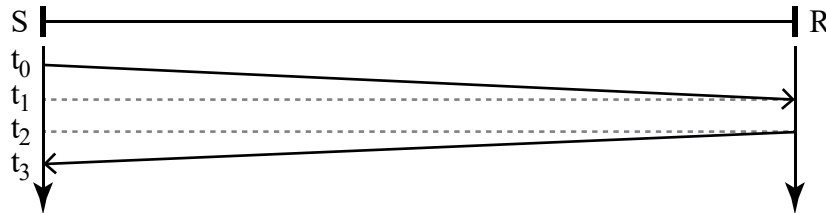


Figura 2.6. Instantes envolvidos na comunicação.

O efeito do atraso (2.6), sob o ponto de vista das grandezas utilizadas pela proteção, é a introdução de uma defasagem angular nas medidas terminais remotas, na forma de (2.7). Um atraso de $62 \mu\text{s}$ [38] pode levar a uma defasagem angular de até $1,3^\circ$, enquanto um erro de 1 ms irá atrasar em $21,6^\circ$. Essa última pode ocorrer por falhas do meio de comunicação utilizado [3], de forma que o tempo médio de falha deve ser previsto no ajuste da proteção.

$$\delta = \omega t_{\text{atraso}} \quad (2.7)$$

2.4.2 Problemas introduzidos pelos sistemas de telecomunicações

A transmissão dos dados pode incluir diferentes tempos de atraso dependendo do sentido da transmissão. Esse fenômeno é conhecido como assimetria [3] e geralmente

é ocasionado quando o caminho utilizado em um sentido é diferente do caminho utilizado em outro. O efeito da assimetria é de levar a uma compensação de atraso errada.

Outro problema, conhecido como *jitter*, ocorre quando o meio de comunicação tem os tempos de atrasos variáveis e não-determinísticos [3]. Visto que técnicas de compensação de atraso assumem atrasos determinísticos e de alguma forma previsíveis, a sua presença leva a imprecisões na compensação de atraso e, por sua vez, no alinhamento dos dados transmitidos.

2.4.3 Meios de comunicação

Os meios de comunicação que podem ser utilizados entre os terminais de uma LT podem ser de cabo piloto, onda portadora ou *Power Line Carrier* (PLC), micro-ondas e fibra-óptica. A escolha de um determinado meio irá depender de fatores como comprimento total do circuito, grau de disponibilidade necessária, quantidade de dados transmitidos, taxa de transmissão, viabilidade da instalação do sistema e o seu custo total.

De todos os meios citados, o primeiro a ser utilizado e de menor custo de implementação é a comunicação através de cabo piloto [5, 8, 11]. Entretanto, devido a limitações elétricas, a utilização de cabo piloto é limitada para circuitos curtos de até 30 km [11].

A segunda alternativa é a técnica de onda portadora ou PLC, também referida como canal *carrier* [11, 8] na proteção de LTs. Nessa técnica, o próprio circuito de potência é utilizado para a transmissão de dados entre os terminais, com a corrente de *carrier* sendo transmitida superposta à corrente em 60 Hz [39]. Para a sua implementação, são necessários cuidados para evitar a atenuação e interferência no sinal.

Os sistemas por torres de micro-ondas oferecem a vantagem de cobrirem maiores distâncias e fornecerem uma maior largura de banda para a transmissão de dados. Em contrapartida, a comunicação é influenciada por condições atmosféricas e tem custos de implementação que podem se tornar elevados dependendo dos aspectos geográficos do local por onde passa o circuito.

Em projetos de circuitos de transmissão recentes, é comum a utilização de cabos para-raios tipo OPGW (*Optic Fiber Ground Wire*), que incluem em sua alma um cabo de fibra óptica. Por vezes, alguns circuitos incluem dois cabos para-raios, aumentando a taxa de disponibilidade desse meio. Esse é o meio de maior confiabilidade, maior largura de banda e velocidade da transmissão de dados. A sua difusão encoraja o uso da proteção diferencial em LTs [3].

2.5 Configurações de linhas de transmissão

Nesta seção são apresentadas as configurações de linhas de transmissão que demonstram desafios para o projeto dos sistemas de proteção. Tais configurações não convencionais introduzem outros equipamentos em sua zona de proteção, tais como bancos de capacitores série e transformadores, ou possuem diferentes geometrias, como as multiterminais.

Essas configurações estão presentes nos sistemas de potência e possuem as suas particularidades de proteção na forma de filosofias de ajuste e problemas inerentes. Esta seção tem como objetivo apresentar de forma abreviada os problemas comuns dessas configurações.

2.5.1 LT com compensação série

Há diversos benefícios na compensação série de uma linha de transmissão, que vão desde o aumento da margem de estabilidade de um sistema de potência pela redução da impedância total da LT até o aumento da capacidade de transmissão de potência do circuito. Entretanto, a compensação série introduz complexidade nos sistemas de proteção e problemas como inversão de tensão, corrente e o de ressonância subsíncrona [5].

Os arranjos para compensação série de LTs são ilustrados na Figura 2.7, sendo os mais comuns a compensação (a) em ambos os terminais e (b) em terminal único. A compensação (c) no meio da LT muitas vezes se torna uma compensação tipo (b) pois o circuito é seccionado.

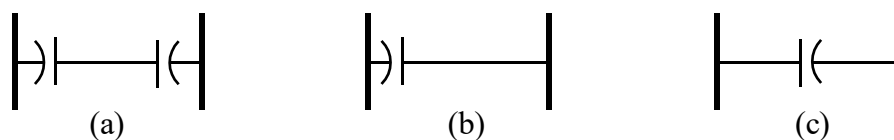


Figura 2.7 Tipos de compensação (a) em ambos terminais; (b) terminal; (c) meio de LT.

Para a proteção dos Bancos de Capacitores Série (BCS) normalmente são empregadas soluções que os retiram de serviço quando ocorrerem sobretensões em seus terminais, ou realizam o seu *bypass*. As sobretensões nos BCS podem ser provocadas por sobrecorrentes consequentes de algum defeito próximo ou interno à LT compensada. A proteção do BCS, então, afeta a proteção da LT, tendo em vista que a retirada do BCS altera a impedância total do circuito.

Uma LT compensada introduz alguns problemas para o projeto da proteção. São eles os problemas de sobrealcance, inversão da tensão e inversão da corrente. O problema

de sobrealcançe pode ser analisado com auxílio do sistema de exemplo da Figura 2.8 (a). Para esse sistema, supõe-se que no terminal S há um relé de distância com a primeira zona configurada para 80% da impedância da LT, sem considerar a compensação. Se o BCS estiver fora de serviço, a impedância aparente vista pelo terminal S é a da Figura 2.8 (b). Neste caso, a primeira zona do relé no terminal S não observará o defeito num ponto F próximo ao terminal remoto da LT (além de 80%) na condição de *bypass* do banco. Por outro lado, se o BCS não for retirado, a impedância observada pela LT será a da Figura 2.8 (c). Nesse caso, irá ocorrer o sobrealcançe da proteção em S, em que o defeito em F fora da sua zona ou mesmo para um defeito além dos terminais da LT sensibiliza a primeira zona.

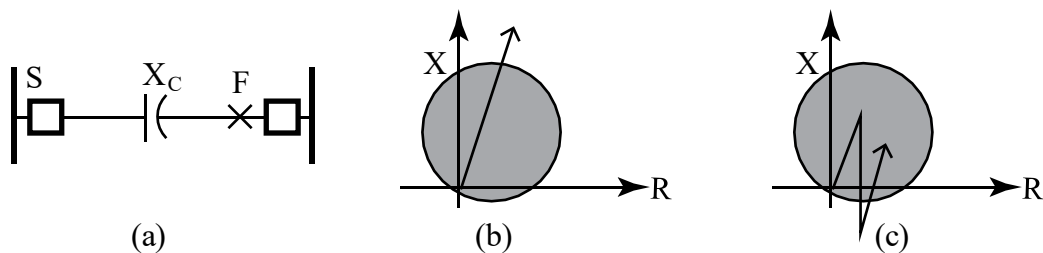


Figura 2.8

Os fenômenos da inversão de tensão e de corrente criam dificuldades no projeto da proteção pois resultam no relé observando um defeito no sentido reverso. Esses problemas são observados nos dois exemplos a seguir, baseados em [17]. Seja a LT da Figura 2.9 com compensação série de reatância X_C concentrada no meio da LT de reatância X_L . Um defeito é aplicado a uma distância d do terminal R. X_S e X_R são as reatâncias do sistema vistas pelos terminais S e R, respectivamente.

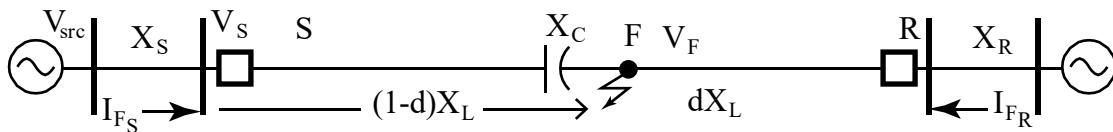


Figura 2.9 LT Compensada no meio.

A contribuição de corrente para o defeito pelo terminal S é (2.8), onde \dot{V}_F é a tensão pré-falta em F. A tensão no terminal S, vista por um relé instalado no mesmo, é dada por (2.9). Quando $X_C > (1 - d)X_L$, ou seja, X_C é maior do que a impedância da LT até o ponto S, e $X_C < (1 - d)X_L + jX_S$, o segundo termo da equação (2.9) pode superar, em módulo, o valor de \dot{V}_{src} e resultar num valor negativo de \dot{V}_S . Em outras palavras, nessas condições \dot{V}_S estará fora de fase com a tensão \dot{V}_{src} .

$$\dot{I}_{F_S} = \frac{\dot{V}_F}{jX_S + j(1-d)X_L - jX_C} \quad (2.8)$$

$$\dot{V}_S = \dot{V}_{src} - \dot{I}_{F_S} jX_S = \dot{V}_{src} - \frac{\dot{V}_F jX_S}{jX_S + j(1-d)X_L - jX_C} \quad (2.9)$$

A Figura 2.10 contém um diagrama fasorial com \dot{I}_{F_S} , \dot{V}_S e $\dot{V}_{S_{pré}}$ nas configurações (a) sem BCS e (b) com BCS [17]. Na configuração (a) sem BCS, observa-se que a corrente \dot{I}_{F_S} está atrasada em relação à tensão \dot{V}_S , o que é esperado para um sistema indutivo. Na configuração (b) com BCS, o efeito é o contrário. Devido à inversão da tensão no ponto S, a corrente \dot{I}_{F_S} está adiantada da tensão. A consequência é que um relé que utilize \dot{V}_S como grandeza de polarização identificará o defeito no sentido reverso.



Figura 2.10 Tensões pré e durante falta (a) com *bypass* de BCS e (b) com BCS e inversão de tensão.

Para verificar o problema da inversão de corrente, é considerada a LT da Figura 2.11 com BCS em ambos os seus terminais. Um defeito é aplicado a uma distância d do terminal R e a corrente de contribuição ao defeito pelo terminal S será (2.8). Se $X_C > X_S + (1-d)X_L$, ou seja, se a impedância entre a fonte e o defeito for capacitiva, a corrente \dot{I}_{F_S} no terminal S será capacitiva e adiantada da tensão em S. Esse fenômeno é descrito como inversão de corrente.

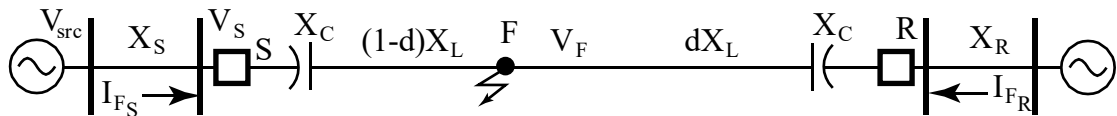


Figura 2.11 LT Compensada em ambos os terminais.

A inversão de corrente traz dois outros efeitos: elevações de tensão e correntes com o mesmo sentido nos terminais da LT para um defeito interno. As elevações de tensão podem ser observadas no perfil de tensões da Figura 2.12. Para correntes de curto-circuito indutivas, o efeito esperado é o do perfil de tensão reduzido, como no perfil sem BCS da Figura 2.12, e correntes terminais com sentido para dentro do circuito como na Figura 2.13 (a). A inversão de corrente pode, portanto, provocar sobretensões na LT durante um defeito. O segundo efeito é que, enquanto a corrente no terminal S é

capacitiva, a corrente no terminal R é indutiva, pois a impedância da fonte em R até o ponto de defeito F é indutiva. A Figura 2.13 (b) contém o diagrama fasorial dessa condição, em que I_{FR} tem sentido para dentro da LT e I_{FS} para fora. Esse efeito tem por consequência prejudicar o correto funcionamento de esquemas de proteção como os de distância e diferencial de corrente [21].

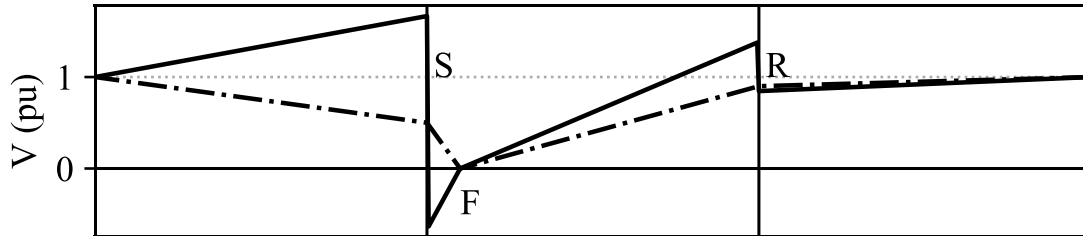


Figura 2.12 Perfil de tensão em uma LT após curto-circuito próximo ao terminal S. Perfil para LT Compensada em linha cheia e LT não compensada em linha pontilhada.



Figura 2.13 Fasores de correntes terminais para (a) *bypass* do BCS e (b) com BCS.

A inversão de corrente pode ser classificada como *outfeed*. Esse é um problema que também pode ocorrer em LTs multiterminais, explorada na Seção 2.5.2.

2.5.2 LT multiterminais

Em [8, 5], linhas de transmissão multiterminais são assim definidas quando os terminais do circuito possuem geração e/ou estão inseridos em uma rede elétrica de forma que quaisquer dois terminais formem uma interligação de sistemas. LTs com tapes (*tapped line*), por sua vez, são definidas [8, 5] quando os seus terminais conectam sistemas radiais ou cargas com pouca ou nenhuma possibilidade de contribuição de corrente para operar relés [10]. Essas duas possibilidades estão indicadas na Figura 2.14.

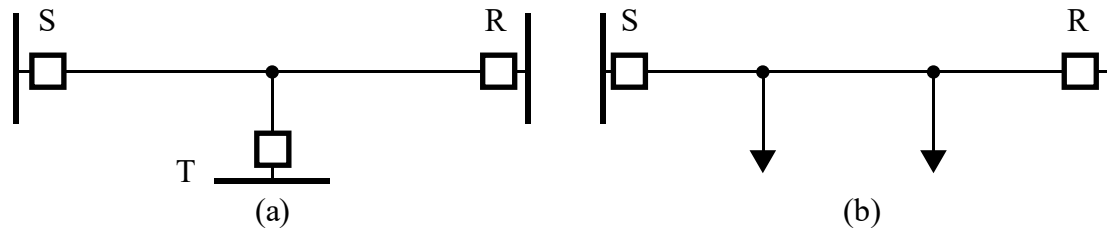


Figura 2.14 (a) LT multiterminal e (b) LT com tapes.

Dois problemas introduzidos pelos terminais adicionais em uma LT são os de *infeed* e de *outfeed* de corrente. O *infeed* é caracterizado por uma corrente adicional entrando na zona de proteção, o *outfeed* por uma parcela saindo. Um exemplo dos efeitos de *infeed* e *outfeed* na impedância observada por um dos terminais pode ser analisada através do exemplo da Figura 2.15 [40]. Nessa figura, é indicado o valor de Z em função da localização da falta F . Para o caso $I_T=0$, a impedância será proporcional ao comprimento do circuito. Uma vez que $I_T \neq 0$, se o defeito for para além do nó do *tape*, a impedância passa ser reduzida ou aumentada não mais em função apenas do comprimento. Na condição limite de *infeed*, um defeito localizado até $2L$ pode ser interpretado como para fora da LT.

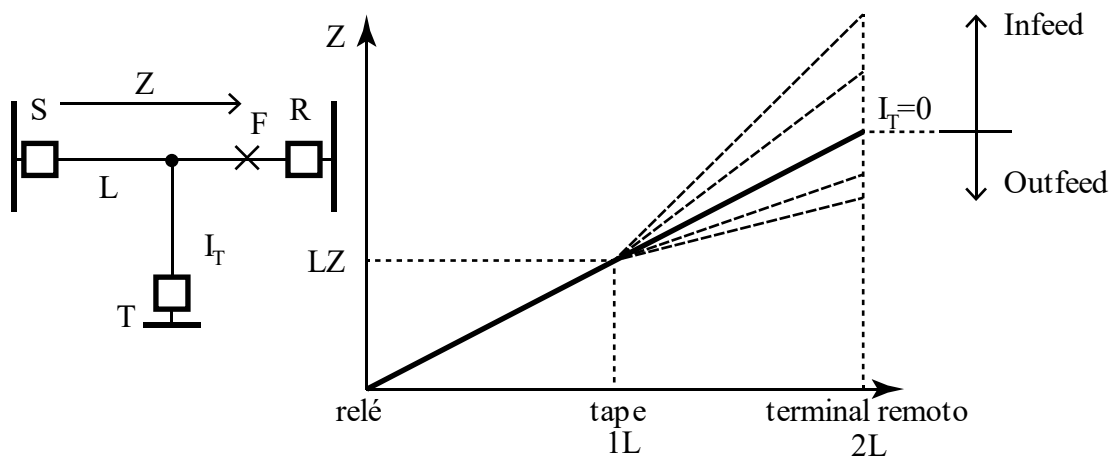


Figura 2.15 Influência do *infeed* e *outfeed* de na impedância vista por um relé [40].

Na Figura 2.16 (a) é ilustrada uma LT com um defeito em F e as correntes I_S e I_T com o sentido para o defeito. Se não há contribuição do terminal T , ou seja, $I_T=0$, o ponto observado pelo relé de distância seria o ponto F na Figura 2.16 (b). Existindo contribuição, a proteção em S observaria uma corrente de curto-circuito I_S inferior, resultando no ponto F' aparentemente mais distante. A consequência é que, com a presença de *infeed*, é necessário ajustar a proteção para o sobrealcance [8].

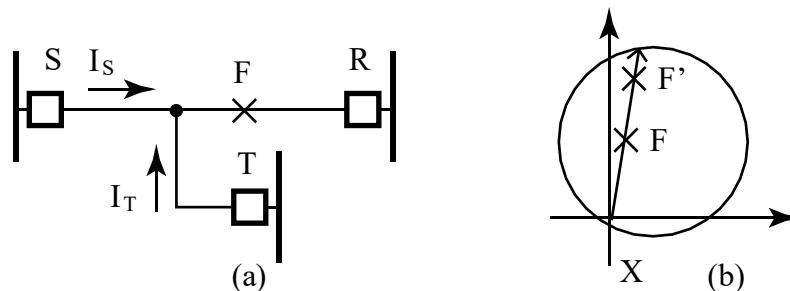


Figura 2.16 Efeito do *infeed* para a proteção do terminal S em (a) para a proteção de distância (b).

O problema do *outfeed* é melhor analisado com o auxílio do exemplo da Figura 2.17. Para um defeito interno à LT, próximo a um dos terminais, a falta pode ser alimentada através da transferência R-T e o relé em R não ser sensibilizado para o defeito. Para o relé em S, essa condição de *outfeed* tem o efeito contrário ao do exemplo de *infeed*, pois agora passa a observar o ponto F' mais próximo de seus terminais. Um ajuste para essa condição levaria ao subbalcance da proteção.

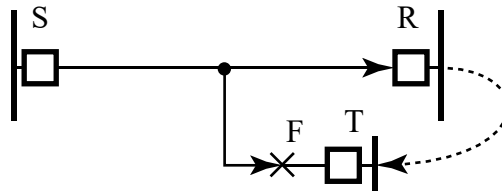


Figura 2.17 LT multiterminal com defeito próximo a terminal com transferência.

Linhas de transmissão multiterminais ou com tape podem ser terminadas em transformadores, isto é, ele pode estar incluso na mesma zona da LT. As linhas terminadas em transformador são discutidas na Seção 2.5.3.

2.5.3 LT terminadas em transformador

Por razões econômicas, um transformador pode estar conectado em série com uma LT sem possuir um disjuntor no lado da LT. Nessa configuração, também conhecida como LT composta [10], o transformador está inserido dentro da zona de proteção da LT e cria complexidade no projeto da proteção e dificuldades no seu desempenho. São ilustradas na Figura 2.18 as duas possibilidades de um transformador fazer parte de uma LT, sendo através da conexão de um tape (a) ou em um dos terminais da LT (b).

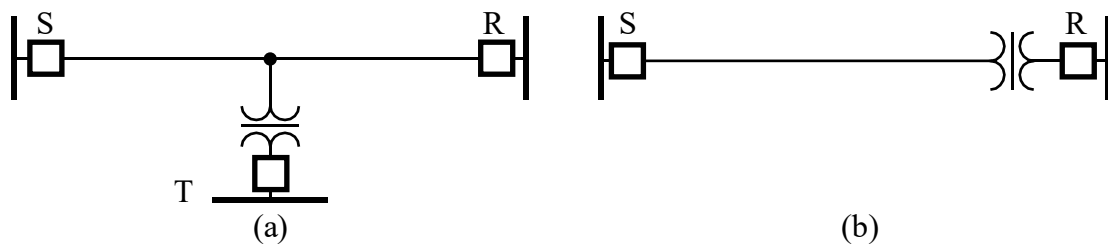


Figura 2.18 LTs terminadas em transformador. (a) em tape e (b) em série.

Com o transformador dentro da zona de proteção da LT, alguns cuidados devem ser tomados como [5]:

- (i) Compensação dos módulos das grandezas terminais, com o cuidado de compensar os TPs e casar as relações dos TCs nos diferentes níveis de tensão.
- (ii) Compensação de fase, necessário quando se tratar de um transformador defasador.

- (iii) Filtragem da componente de sequência zero da corrente [41], visto que o transformador aterrado se torna uma fonte de componente de sequência zero.
- (iv) Redução da acurácia das proteções devido à inclusão da impedância do transformador na zona de proteção da LT [4].

A importância da filtragem de sequência zero do item (iii) pode ser verificada com o exemplo a seguir. Supondo que o transformador da Figura 2.18 (a) ou (b) tenha ligação tipo estrela aterrado-delta. Na ocorrência de um defeito externo, haverá circulação de componente de sequência zero na corrente no lado estrela aterrado e bloqueado no lado delta. A consequência é que a corrente de sequência zero aparece como corrente diferencial para os relés da LT.

O item (iv) tem por consequências a dificuldade da proteção em distinguir se um defeito ocorreu na LT ou no transformador [10] e na estimação do local onde ocorreu a falta.

O último problema que deve ser previsto no projeto da proteção é o impacto da energização do conjunto LT e transformador. As elevadas correntes de *inrush* do transformador, altamente distorcidas, podem levar à sensibilização das proteções para uma condição de energização sob falta [41]. Uma solução é a detecção do *inrush* para bloquear a operação dos relés de proteção durante a energização [3].

2.6 Localizadores de defeito

Os localizadores de defeito são recursos presentes nos relés modernos e nos registradores digitais de perturbação. Eles são importantes para facilitar a localização de defeitos em LTs e agilizar investigações sobre a ocorrência e ações de manutenção. Para este trabalho, o localizador de defeito de LTs de dois terminais tem aplicação na proteção diferencial apresentada no Capítulo 3 e o localizador para LTs de três terminais tem aplicação no Capítulo 5. Esses localizadores são apresentados nas subseções 2.6.1 e 2.6.2, respectivamente.

2.6.1 LT de dois terminais

O método de estimação da distância ao defeito descrito a seguir utiliza medidas sincronizadas das tensões e correntes terminais de uma linha de transmissão através de PMU para detectar o ponto de defeito. No método são consideradas tensões e correntes de sequência positiva de tal sorte que o mesmo possa ser aplicado em LTs não transpostas

sem que sejam necessárias mudanças. O método tem sucesso e é indicado ainda que possam ocorrer defeitos desequilibrados [42, 43, 20].

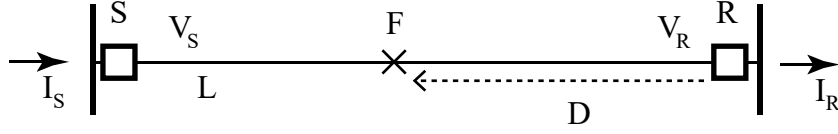


Figura 2.19 LT de dois terminais com defeito em F.

Seja a LT com comprimento L , terminais S e R e as tensões \dot{V}_S , \dot{V}_R e as correntes \dot{I}_S e \dot{I}_R com o sentido indicado na Figura 2.19. Em seguida, supõe-se um defeito no ponto F a uma distância D do terminal R. O defeito em F divide a LT original em duas LT de seções S-F e F-R. Considerando as relações de tensão e corrente de uma LT [44], a tensão no ponto F ($\dot{V}_{s_{kF}}$) em termos das medidas do terminal S é dada por (2.10) e a corrente por (2.11); em termos das medidas do terminal R a tensão é (2.12) e a corrente é (2.13). Nas equações, Z_C é a impedância característica, γ é a constante de propagação da LT e x a distância até o defeito em unidade de comprimento.

$$\dot{V}_{s_{kF}} = \frac{1}{2}(\dot{V}_R + Z_C \dot{I}_R)e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{V}_R - Z_C \dot{I}_R)e^{-\gamma x} \quad (2.10)$$

$$\dot{I}_{s_{kF}} = -\frac{\dot{V}_{s_{kF}}}{Z_C} \sinh \gamma(L-x) + \dot{I}_{s_{kF}} \cosh \gamma(L-x) \quad (2.11)$$

$$\dot{V}_{r_{kF}} = \frac{1}{2}(\dot{V}_S + Z_C \dot{I}_S)e^{-\gamma(L-x)} + \frac{1}{2}(\dot{V}_S - Z_C \dot{I}_S)e^{\gamma(L-x)} \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_{r_{kF}} = \frac{\dot{V}_{r_{kF}}}{Z_C} \sinh \gamma x + \dot{I}_{r_{kF}} \cosh \gamma x \quad (2.13)$$

Para a LT em defeito da Figura 2.19 (b) as tensões $\dot{V}_{s_{kF}}$ e $\dot{V}_{r_{kF}}$ serão iguais e, dessa igualdade pode ser obtido o valor da distância ao defeito D referida ao terminal R através do módulo da expressão (2.14), onde \dot{M} e \dot{N} são dados por (2.15) e (2.16).

$$D = \frac{\ln(\dot{N}/\dot{M})}{2\gamma L} \quad (2.14)$$

$$\dot{N} = \frac{1}{2}(\dot{V}_R - Z_C \dot{I}_R) - \frac{1}{2}e^{\gamma L}(\dot{V}_S - Z_C \dot{I}_S) \quad (2.15)$$

$$\dot{M} = \frac{1}{2}e^{-\gamma L}(\dot{V}_S + Z_C \dot{I}_S) - \frac{1}{2}(\dot{V}_R + Z_C \dot{I}_R) \quad (2.16)$$

Se não houver uma falha na LT, o valor de D calculado através de (2.14) não deverá convergir. Nesse sentido, um estimador de distância ao defeito pode ser associado a um detector de defeitos na LT.

2.6.2 LT de três terminais

Para LTs de três ou mais terminais, o estimador de (2.14) pode ser utilizado para se detectar um defeito dentro de seus terminais, desde que sejam conhecidas as tensões e correntes de todos os terminais [45].

Para isso é considerado o exemplo de uma LT de três terminais S, R e T da Figura 2.20. Nessa Figura, L_S , L_R e L_T são os comprimentos dos ramos SP, PR e PT, respectivamente, enquanto D_S e D_T são índices de distância ao defeito nos ramos SR e ST, respectivamente. Um terminal é escolhido como referência, sendo mais uma vez o terminal R. O comprimento do circuito desde o terminal R até o tape (ponto P) da LT é definido como comprimento de referência L_R . O ponto P é denominado terminal virtual.

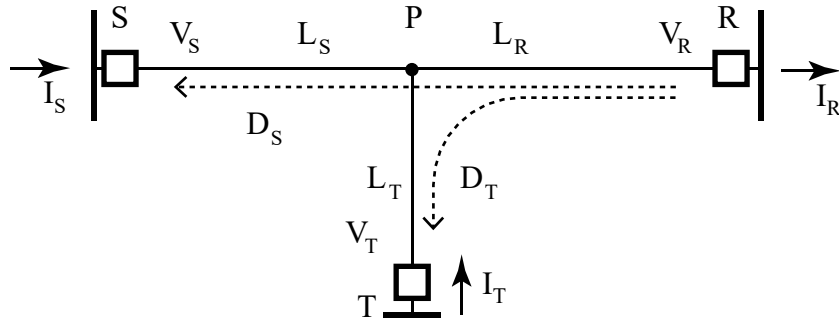


Figura 2.20 LT de três terminais R, S e T.

A tensão e a corrente no ponto P calculadas a partir da tensão e corrente no terminal S são dadas por (2.17) e (2.18), respectivamente, onde o subscrito “P, S” significa “no ponto P devido aos dados do terminal S”.

$$\dot{V}_{P,S} = \frac{1}{2}(\dot{V}_S + \mathbf{Z}_C \dot{I}_S)e^{\gamma L_R} + \frac{1}{2}(\dot{V}_S - \mathbf{Z}_C \dot{I}_S)e^{-\gamma L_R} \quad (2.17)$$

$$\dot{I}_{P,S} = \frac{1}{2}[(\dot{V}_S + \mathbf{Z}_C \dot{I}_S)e^{-\gamma L_S} - (\dot{V}_S - \mathbf{Z}_C \dot{I}_S)e^{+\gamma L_S}] \quad (2.18)$$

A corrente total que flui do ponto P para o terminal R é \dot{I}'' (2.19), onde $\dot{I}_{P,T}$ é a corrente calculada no ponto P com os dados do terminal T e é dada por (2.20).

$$\dot{I}'' = \dot{I}_{P,S} + \dot{I}_{P,T} \quad (2.19)$$

$$\dot{I}_{P,T} = \frac{1}{2} [(\dot{V}_T + Z_C \dot{I}_T) e^{-\gamma L_T} - (\dot{V}_T - Z_C \dot{I}_T) e^{+\gamma L_T}] \quad (2.20)$$

Com $\dot{V}_{P,S}$ e \dot{I}'' no ponto P, pode ser calculado o índice de distância ao defeito D_S (2.21), utilizando (2.22) e (2.23). A distância real ao defeito se traduz por $x = D_S L_R$.

$$D_S = \frac{\ln(\dot{N}_S / \dot{M}_S)}{2\gamma L_R} \quad (2.21)$$

$$\dot{N}_S = \frac{1}{2} (\dot{V}_R - Z_C \dot{I}_R) - \frac{1}{2} e^{\gamma L_R} (\dot{V}_{P,S} - Z_C \dot{I}'') \quad (2.22)$$

$$\dot{M}_S = \frac{1}{2} e^{-\gamma L_R} (\dot{V}_{P,S} + Z_C \dot{I}'') - \frac{1}{2} (\dot{V}_R + Z_C \dot{I}_R) \quad (2.23)$$

Por outro lado, com $\dot{V}_{P,T}$ e \dot{I}'' é possível determinar o índice de distância ao defeito D_T (2.24). Tal como para D_S , a distância real ao defeito se traduz por $x = D_T L_R$.

$$D_T = \frac{\ln(\dot{N}_T / \dot{M}_T)}{2\gamma L_R} \quad (2.24)$$

Quando ocorrer um defeito no trecho P-R, os índices D_S e D_T irão convergir para um mesmo valor $0 \leq D_S = D_T \leq 1$. Uma vez que o defeito ocorra num ponto F do trecho S-P, apenas o índice D_S trará a estimativa correta para a distância ao defeito. Por outro lado, D_T será igual a 1.

Com esse resultado, é possível obter um discriminante que indica em qual trecho da LT de três terminais encontra-se o defeito. Se $D_S = D_T \leq 1$, o defeito encontra-se no trecho P-R e ambos os índices estimam a distância correta. Se $D_S > 1$ e $D_T = 1$, o defeito encontra-se no trecho S-P e D_S estima a distância correta. Finalmente, se $D_T > 1$ e $D_S = 1$, o defeito encontra-se no trecho T-P e D_T estima a distância correta. Caso nenhuma das condições sejam atendidas, não há defeito na LT. A Tabela 2.1 resume essas condições.

Tabela 2.1 Lógica do seletor de trecho em defeito

D_S	D_T	Trecho em defeito	Estimador Real
$0 < D_S < 1$	$D_T = D_S$	P-R	D_S ou D_T
$D_S > 1$	$D_T = 1$	S-P	D_S
$D_S = 1$	$D_T > 1$	T-P	D_T

A localização do defeito para o caso de LT com mais de três terminais segue ideia similar [45]. No Capítulo 5 o localizador apresentado nesta seção é utilizado em uma proposta de proteção para LT multiterminal.

2.7 Conclusões

Este capítulo apresentou os principais elementos para a proteção de LTs, como as filosofias básicas de proteção e aspectos de telecomunicações importantes para a proteção. Configurações de LTs que exigem maiores cuidados pelo projetista da proteção foram introduzidas. A formulação de dois índices de distância ao defeito, um para LT convencional de dois terminais e outro para uma LT de três terminais foram apresentados. No Capítulo 4 a filosofia de proteção diferencial é explorada com maiores detalhes, incluindo uma característica baseada na estimação da distância a um defeito.

Capítulo 3

Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão

3.1 Introdução

Este capítulo desenvolve algumas das características de operação da filosofia de proteção diferencial de LTs (Seções 3.2 a 3.4). Aspectos da aplicação da proteção diferencial, como possíveis causas de problemas, são abordados na Seção 3.5. Em seguida, na Seção 3.6, uma proposta de estudos para o ajuste da proteção é apresentada. O capítulo é encerrado com testes das características abordadas com oscilografias de um evento real na Seção 3.7.

3.2 Característica de restrição percentual

A filosofia de proteção diferencial tradicionalmente adotada para linhas de transmissão é similar à utilizada na proteção de equipamentos em uma subestação, como barramentos [46] e transformadores [47] e geradores. A principal característica que a difere das utilizadas nesses equipamentos é a longa distância entre os seus terminais.

Para uma LT com terminais S e R e correntes terminais \dot{I}_S e \dot{I}_R com sentido positivo para dentro da LT, conforme Figura 3.1, são definidas duas grandezas: a corrente de restrição (*bias*) I_b (3.1) [3], como grandeza de estabilização, e a corrente diferencial I_d (3.2), como a grandeza de operação. A corrente de restrição é proporcional à corrente que flui através da LT, reduzindo a sua sensibilidade para altas correntes de carga ou defeitos externos. Essa técnica de estabilização é conhecida por restrição percentual [3].

Em uma primeira aproximação, para uma LT sem defeito, I_b assumirá o valor médio da corrente de carga na LT (por exemplo, 1 pu) e I_d será aproximadamente zero, salvo as diferenças devidas à corrente de carregamento capacitivo da LT.

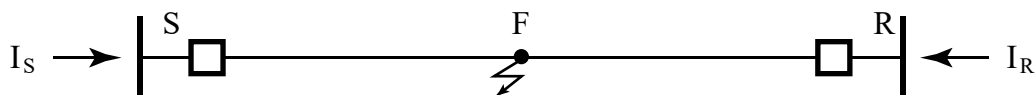


Figura 3.1 LT e sentido das correntes.

$$I_b = \frac{|\dot{I}_S| + |\dot{I}_R|}{2} \quad (3.1)$$

$$I_d = |\dot{I}_S + \dot{I}_R| \quad (3.2)$$

Alternativamente, a corrente de restrição I_b pode possuir outras definições como (3.3) [48], ou o valor máximo de (3.1) para as fases abc [49]. Nesse trabalho, será considerado o valor médio dos módulos das correntes terminais como em (3.1). A característica também pode ser encontrada [38] com denominação diferente, utilizando os subscritos r e o para restrição e operação (I_r e I_o), respectivamente, mantendo o significado.

$$I_b = |\dot{I}_S - \dot{I}_R| \quad (3.3)$$

Algumas das características que utilizam as grandezas I_b e I_d são ilustradas na Figura 3.2 [3, 46, 47]. Comum a todas as características, estão a definição de um valor de *pickup* para a corrente I_d (indicado por I_S em (a) e I_{S_1} nas demais), evitando a operação para pequenas diferenças de corrente diferencial, e o limiar para operação definido por uma reta. A característica da Figura 3.2 (a) define apenas um limiar entre os valores de I_b e I_d enquanto que as características da Figura 3.2 (b) e (c) definem dois limiares separados por uma corrente $I_b = I_{S_2}$, diferindo na posição em que a primeira reta cruza com o eixo I_d . O nome da característica, de restrição percentual, vem da relação $k = I_d/I_b$ utilizada para definir as inclinações das retas que definem os limiares de restrição e de operação [47].

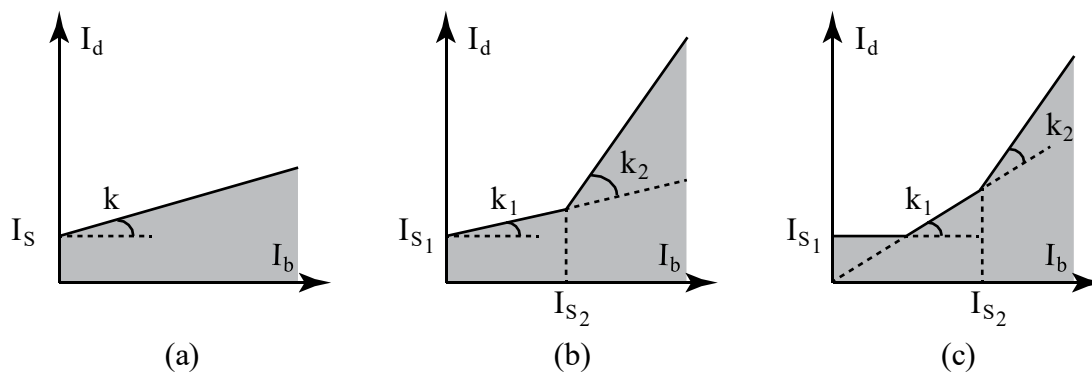


Figura 3.2 Características (a) com uma semirreta; (b) duas semirretas; (c) duas semirretas e *pickup*.

Um detalhe importante dessa característica é que ela é idêntica e independente do terminal da LT, ou seja, o relé no terminal S vê as grandezas num plano da mesma maneira que o relé no terminal R.

As razões para se definir um valor de *pickup* dependente de I_b são: evitar que eventuais imprecisões e atrasos das medidas levem à operação do relé [3] e estabelecer uma margem para diferenças entre as correntes nos dois terminais devido ao carregamento capacitivo especialmente preocupante em LTs longas e de alta tensão. A utilização de uma reta inclinada para se definir a característica surge da necessidade de se inibir eventuais erros de medida proporcionais ao aumento da corrente passante I_b [3].

As características de reta inclinada dupla da Figura 3.2 (b) e da (c) têm como objetivo prevenir que a saturação dos TCs terminais possa ocasionar a incorreta atuação da proteção. Para um carregamento pesado ou defeitos externos, as correntes terminais terão módulos maiores e I_b assumirá valores maiores do que àqueles observados em condições de carga média ou leve. Na ocorrência de um curto-circuito fora da linha de transmissão, a corrente de contribuição ao curto-circuito transmitida através dos terminais da LT pode levar à saturação de um ou ambos os TCs e levar a um valor elevado de I_d [3]. Por essa razão, para valores elevados de I_b (e carregamento da LT), a característica tem a sua inclinação incrementada para capturar valores elevados de I_d que possam ser originados de erros do TC.

Por simplificação, para a proteção diferencial percentual será considerada a característica da Figura 3.2 (b). A lógica para *trip* é apresentada por (3.4) para correntes $I_b \leq I_{s_2}$ e por (3.5) para correntes $I_b > I_{s_2}$.

$$I_d > k_1 I_b + I_{s_1} \quad (3.4)$$

$$I_d > k_2 I_b - (k_2 - k_1) I_{s_2} + I_{s_1} \quad (3.5)$$

O ajuste da corrente de *pickup* I_{s_1} envolve informações de duas condições [3]: (i) a mínima corrente de curto-circuito interno para o qual o relé deve operar e (ii) a máxima corrente de carregamento capacitivo da LT. Em LTs longas, o ajuste de I_{s_1} para evitar a atuação apenas com corrente de carregamento capacitivo pode acarretar a dessensibilização da proteção para defeitos internos. Na Seção 3.5.4 é apresentado um método de compensação de corrente próprio para a redução desse efeito.

O ajuste da corrente de limiar entre as diferentes inclinações I_{s_2} não é tão direto e deve levar em consideração os valores de corrente de restrição I_b para os quais os TCs estão mais propensos a saturarem. Assim como o ajuste de I_{s_2} , o ajuste das inclinações k_1 e k_2 (Figura 3.2 (b)) exigem estudos e análise criteriosa. Um fabricante de relés [50] sugere que apenas se ajuste o valor de I_{s_1} , com os outros parâmetros pré-configurados.

Finalmente, a Figura 3.3 resume o lugar geométrico, na característica de restrição percentual, para diferentes condições que podem ser observadas pelo relé. Defeitos internos tendem a sair do ponto de operação em condição normal, região de baixos valores de I_d , atravessando a reta de inclinação k_1 para valores elevados de I_d . Defeitos externos que não provocam a saturação dos TCs tendem a seguir uma trajetória de valores crescentes de I_b e reduzidos de I_d . Aqueles defeitos externos que provocam a saturação dos TCs podem, inicialmente, assumir essa mesma trajetória mas migrar para a parte de operação do plano $I_b \times I_d$ através da reta de inclinação k_2 [29]. Como defeitos de alta impedância tendem a produzir correntes que possam se assemelhar àquelas medidas em condição de carga, os parâmetros I_{S1} e k_1 devem ser ajustados para conferir sensibilidade a esses defeitos.

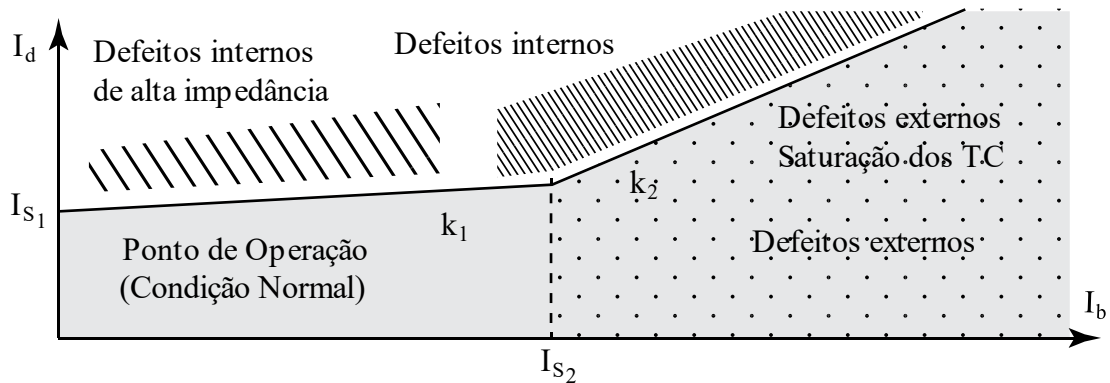


Figura 3.3 Regiões no plano de corrente de restrição percentual e corrente diferencial.

3.3 Característica de plano α

A característica de plano α , introduzida em [15], assim como a de proteção diferencial da Seção 3.2, é baseada na medida das correntes terminais da LT. A diferença fundamental entre as duas abordagens é que, enquanto a característica de restrição percentual utiliza a soma fasorial das correntes para o cálculo da corrente diferencial e de restrição, a característica de plano α faz uso da razão complexa entre os dois fasores de corrente como grandeza de restrição e de operação.

Para uma LT de terminais S e R e correntes terminais \dot{I}_S e \dot{I}_R tal como indicado na Figura 3.1, a característica de plano α para uma proteção no terminal S é definida por duas grandezas: I_{re} (3.6) e I_{im} (3.7), sendo essas a parte real e imaginária, respectivamente, da razão entre as correntes \dot{I}_S e \dot{I}_R . Numa primeira interpretação, para uma LT sem defeito e desprezando a corrente de carregamento capacitivo, a razão é aproximadamente unitária e $I_{re} \approx -1$ e $I_{im} \approx 0$. A relação inversa (\dot{I}_S/\dot{I}_R), pouco utilizada, define o plano β [15].

$$I_{re} = \mathcal{R}e \left\{ \dot{I}_R / \dot{I}_S \right\} \quad (3.6)$$

$$I_{im} = \mathcal{J}m \left\{ \dot{I}_R / \dot{I}_S \right\} \quad (3.7)$$

A característica de plano α é a da Figura 3.4 (a) [3], podendo ser da forma da Figura 3.4 (b) [48, 21]. Ela é definida por uma região de restrição formada por uma coroa circular centrada na origem e côncava para valores negativos de I_{re} . O parâmetro r define o raio do arco mais externo enquanto o raio mais interno é definido pelo valor recíproco de r . Assim, as características dos relés de ambos os terminais da LT se tornam simétricas. O ângulo total do setor é dado por α , definido como ângulo de bloqueio, e este é responsável por permitir uma tolerância a erros de fase devido a atrasos, alinhamento entre as medidas e saturação de TC [3].

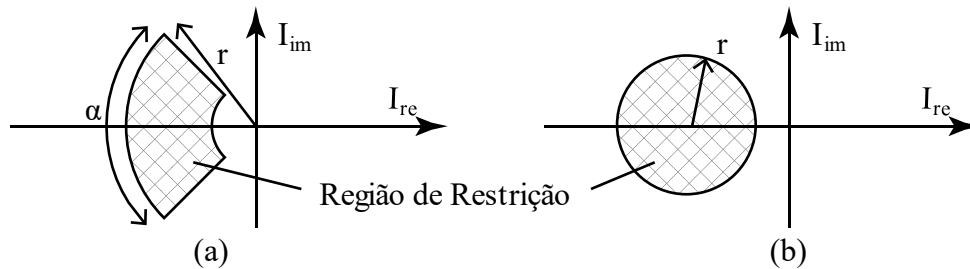


Figura 3.4 Característica do plano α (a) setor de coroa circular e (b) circular [15].

Em condições normais de carga, I_{re} terá valores negativos pois as correntes \dot{I}_S e \dot{I}_R terão o mesmo sentido (Figura 3.1). Uma vez que ocorra um defeito, as duas correntes terão sentidos opostos, I_{re} assumirá valores positivos e levará à operação do relé.

O efeito do carregamento capacitivo e de erros de medição ou atrasos são acomodados pelo plano α . Uma vez que esses fenômenos provocam variações nos valores de \dot{I}_S e \dot{I}_R de tal sorte que eles nunca sejam iguais durante carga ou defeitos externos, a razão \dot{I}_R / \dot{I}_S ocupará o lugar geométrico na área de restrição da Figura 3.4.

A saturação dos TCs levará a diferenças na razão entre os módulos das correntes e na sua diferença angular, podendo levar até à operação incorreta no caso em que I_{re} assumira valores positivos. Em razão disso é que se define o ângulo α de tal forma que a região de restrição alcance valores positivos de I_{re} mas que I_{im} possua módulo elevado. O módulo de I_{im} será tão elevado quanto maior for a diferença angular entre as correntes terminais.

Não apenas a saturação dos TCs como também o atraso da comunicação entre os terminais introduz erros nas medidas, sobretudo nas fases das correntes. Quando o meio

de comunicação for assimétrico (isto é, o atraso é função do sentido da transmissão de informação, Seção 2.4.2), poderá ser necessária a utilização de ajustes diferentes de compensação (atribuição de um valor *offset*) do ângulo da corrente remota para cada terminal. Quando o atraso não for previsível (*jitter*, Seção 2.4.2) dificulta compensar o atraso apenas com a compensação do ângulo da corrente remota. O ajuste angular da característica de plano α também serve para prevenir a atuação incorreta na ocorrência de atrasos. A Figura 3.5 mostra as diferentes regiões no plano α para além da região de restrição. A região de restrição pode ser ampliada para acomodar os erros devidos aos atrasos da comunicação e da saturação dos TCs.

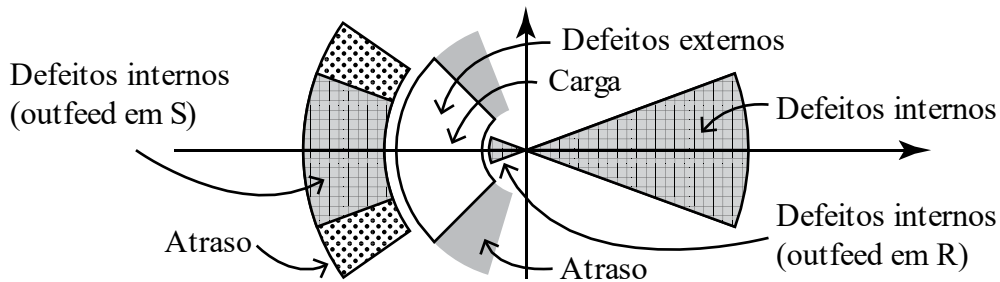


Figura 3.5 Regiões no plano α [48, 9] para um relé no terminal S.

A Figura 3.5 destaca três regiões de defeitos internos. De uma forma geral, para um defeito interno ambas as correntes terminais terão sentido para dentro da LT (Figura 3.1) e a sua razão será positiva, levando à região do semiplano direito. Quando a linha estiver em carga e o defeito for através de impedância considerável, poderá ocorrer *outfeed* em um dos terminais. Quando ocorrer um defeito que provoque *outfeed* no terminal local, o relé irá observar uma razão de valor elevado e correntes em sentidos opostos. Quando no terminal remoto, a razão terá um valor reduzido, tendendo a zero e com correntes de sentido oposto.

Em contrapartida à característica de restrição percentual, os relés que adotam a característica de plano α não enxergam as grandezas da mesma forma, isto é, o relé do terminal S verá um lugar geométrico para as suas medidas diferente do relé no terminal R, embora exista simetria no ajuste. A Figura 3.6 ilustra um exemplo de um defeito que provoca *outfeed* no terminal R e é visto em posições diferentes pelos terminais.

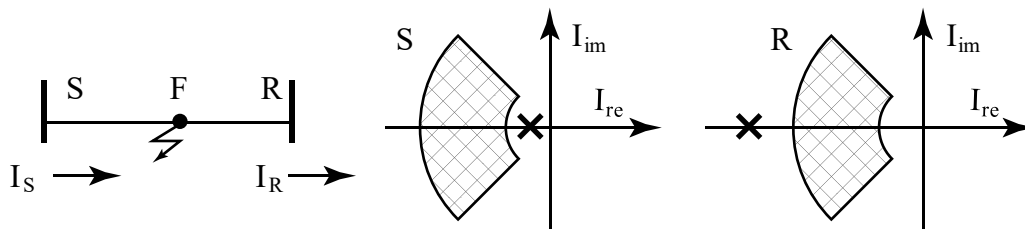


Figura 3.6 Localização de um defeito com *outfeed* em R no plano α dos relés em S e R.

Relés que implementam essa característica também implementam o bloqueio por *pickup* de corrente diferencial [48, 23], essa definida tal como a corrente diferencial da característica de restrição percentual (3.2). Esse bloqueio evita que, em condição normal de operação, o relé possa vir a atuar para valores baixos de correntes diferenciais, característicos da operação normal em carga, e assim distingui-los de condições de defeito.

O ajuste dos parâmetros da característica de plano α pode ser feito com ferramentas de análise de curto-circuito de regime permanente. A sequência para se determinar o ajuste ótimo do raio e ângulo da característica é indicada a seguir [21]:

1. Obter correntes de regime permanente para diferentes condições de carregamento da LT em programa de fluxo de carga para, então, obter as razões e ângulos entre as correntes;
2. Aplicar defeitos internos à LT em programa de curto-circuito de modo a obter as razões e ângulos entre as correntes;
3. Aplicar defeitos externos à LT, preferencialmente próximo a seus terminais, para obter as razões e ângulos entre as correntes para defeitos *close-in* [5] (próximos dos terminais);
4. Os valores obtidos no passo 1 e do passo 3 determinam os pontos que devem residir no interior da característica, enquanto os do item 2 determinam aqueles que devem residir fora da característica;
5. Se no passo 3 forem obtidas correntes que caracterizem um *outfeed* (ambas as correntes em fase ou razão com ângulo próximo a 180°), o ajuste do raio pode ser próximo à menor razão de correntes que produza esse efeito;
6. O valor do ângulo de bloqueio α deve ser ajustado para acomodar erros de comunicação (assimetria, atrasos), diferenças angulares na condição de carga e distorção devido a saturação de TC. A maior variação angular em condição de carga do passo 1 pode ser somada a um ângulo proporcional ao maior atraso esperado (ex.: 1 ms ou $21,6^\circ$);

- Com uma proposta inicial de ajuste, o desempenho da proteção deve ser testado em simulação no tempo na busca de um melhor ajuste que garanta maior sensibilidade com um menor custo de segurança.

3.4 Proteção diferencial baseada na estimação da distância ao defeito

As proteções convencionais das seções anteriores baseiam-se nas correntes terminais, podendo até utilizar tensões para calcular correntes de compensação. Supondo que fosse possível obter as correntes que alimentam a falta no ponto F como indicado na Figura 3.7, uma proteção diferencial poderia atuar verificando a diferença entre essas duas correntes próximas ao ponto do defeito, sem necessidade de se ajustar a compensação de carregamento capacitivo [20].

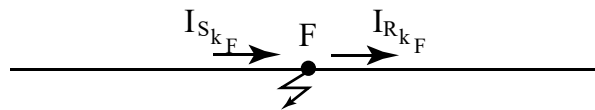


Figura 3.7 Correntes próximas ao ponto de defeito F.

Ao contrário das filosofias de proteção diferencial apresentadas nas Seções 3.2 e 3.3, neste caso, é necessária a inclusão de um localizador de defeito que seja suficientemente rápido para que se possa avaliar uma condição de falha na LT e, na ocorrência de defeitos internos, promover a atuação da proteção. Esse localizador deve ser ajustado com os parâmetros corretos da LT, podendo ser associado a um estimador de parâmetros [20, 51].

Considere a LT de comprimento total L_T da Figura 3.8, com os sentidos das correntes terminais I_S e I_R indicados. Associado a essa LT está um estimador da distância ao defeito para LT de dois terminais tal como o apresentado na Seção 2.6.1. Na ocorrência de um defeito no ponto F a uma distância x do terminal R, o estimador retornará o índice D , com o qual pode ser obtida a distância ao defeito $x = DL$.

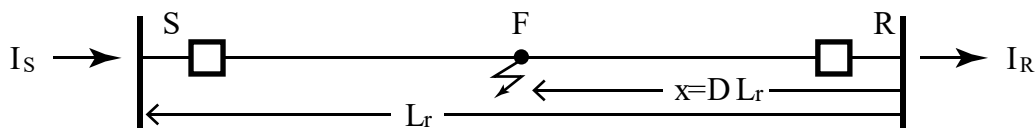


Figura 3.8 Sentido das correntes para LT de dois terminais

Com a informação do local do defeito, é possível estimar as correntes próximas do ponto do defeito (Figura 3.8) a partir dos dados de cada um dos terminais, utilizando princípio similar ao utilizado na Seção 2.6.1 para o cálculo de D . A corrente estimada

para a fase k , próxima ao ponto F , vista pelo terminal S é $\dot{I}_{S_{kF}}$ (3.8). Para o terminal R , a corrente será $\dot{I}_{R_{kF}}$ (3.9).

$$\dot{I}_{S_{kF}} = -\frac{\dot{V}_{S_{kF}}}{Z_C} \sinh \gamma(L-x) + \dot{I}_{S_{kF}} \cosh \gamma(L-x) \quad (3.8)$$

$$\dot{I}_{R_{kF}} = \frac{\dot{V}_{R_{kF}}}{Z_C} \sinh \gamma x + \dot{I}_{R_{kF}} \cosh \gamma x \quad (3.9)$$

De maneira similar como é feita com a proteção de característica do plano α , essas duas correntes podem ser comparadas através do módulo da sua razão R (3.10) e da diferença angular λ (3.11).

$$R = \frac{|\dot{I}_{S_{kF}}|}{|\dot{I}_{R_{kF}}|} \quad (3.10)$$

$$\lambda = \angle \dot{I}_{S_{kF}} - \angle \dot{I}_{R_{kF}} \quad (3.11)$$

Uma característica que leve em consideração que a estimação das correntes pode conter erros de medição ou mesmo de parâmetros [20, 51] pode ser definida, conforme a lógica de restrição ilustrada na Figura 3.9. Essa lógica é definida pela combinação das condições (3.12), resultando no plano $R\lambda$ da Figura 3.9.

$$\begin{aligned} R_{\min} &\leq R \leq R_{\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda \leq \lambda_{\max} \end{aligned} \quad (3.12)$$

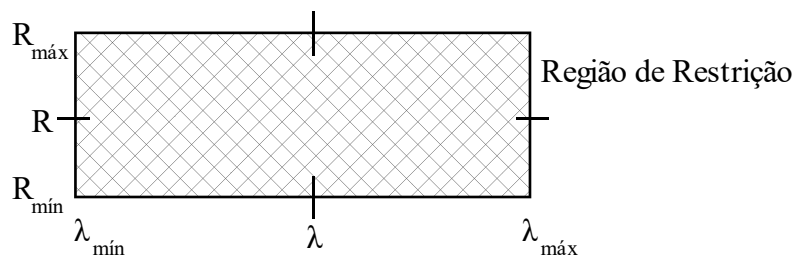


Figura 3.9 Característica $R\lambda$.

Para uma LT de dois terminais, o diagrama de blocos da Figura 3.10 indica os componentes básicos dessa proteção, que pode ou não conter um estimador de parâmetros da LT [20]. O localizador do defeito pode utilizar medidas de sequência positiva de tensões e correntes dos dois terminais enquanto o estimador das variáveis $\dot{I}_{S_{kF}}$ e $\dot{I}_{S_{kF}}$ utiliza as medidas da fase k dos terminais. Um estimador é descrito na Seção 2.6.

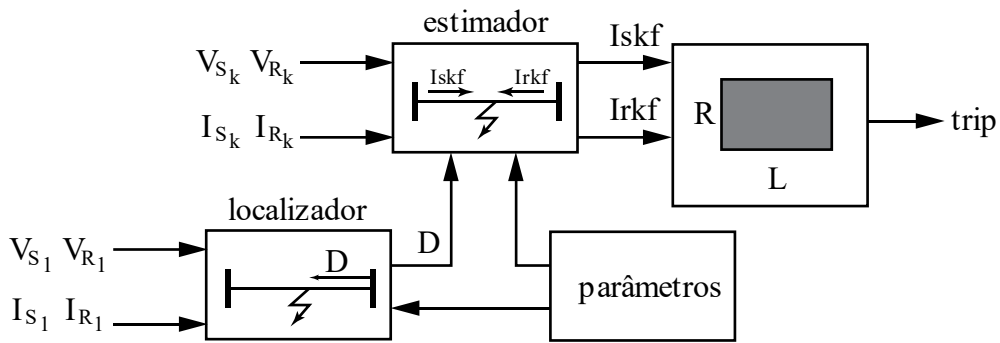


Figura 3.10 Componentes da proteção $R\lambda$

Essa característica pode ser comparada a do plano α visto que um setor de coroa circular num sistema de coordenadas retangulares, como a do plano α , se traduz em um retângulo num sistema de coordenadas polares como do plano $R\lambda$. Também é importante destacar que o sentido das correntes para essa característica é o contrário do admitido nas demais (Figura 3.1 e Figura 3.8), sendo assim, a maior diferença angular entre as correntes ocorrerá na condição de um defeito na LT. Diferente das demais características, essa não é influenciada pela corrente de carregamento capacitivo da LT.

A Figura 3.11 mostra as regiões no plano $R\lambda$ para diferentes tipos de defeitos. Com a proximidade do defeito do terminal local (S), a razão entre as correntes tende a aumentar e ser superior à unidade. Com o aumento da impedância do defeito, o ponto no plano tende a se aproximar da região de restrição através da redução de λ . Esse caminho descreve um arco [51], tendo em vista que as correntes de defeito superam as correntes de carga em magnitude, e gradualmente (com o aumento da impedância) a corrente de carga se torna predominante (ocorrência de *outfeed*) e $\lambda \rightarrow 0$.

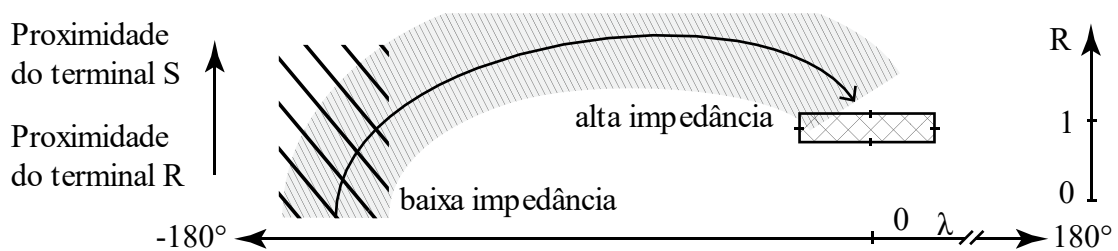


Figura 3.11 Regiões no plano $R\lambda$ [51].

Assim como a característica de plano α , essa característica também pode ter monitorada a corrente diferencial nos dois terminais ou mesmo as estimadas $I_{S_{kf}}$ e $I_{R_{kf}}$. Dessa forma, erros de estimação e medição não levariam a incorreta atuação da proteção.

3.5 Aplicações

3.5.1 Identificação da saturação de TC

A identificação da saturação de um TC é possível através da medição e filtragem de componentes harmônicas da corrente do TC. Essas medidas podem ser utilizadas para modificar e ampliar a região de restrição do relé diferencial de forma a aumentar a segurança para defeitos fora da zona de proteção [38, 9, 29, 30].

3.5.2 Reatores de linha na zona de proteção

Linhas de transmissão longas podem ter instaladas em seus terminais reatores de linha para compensação *shunt* com o propósito de reduzir sobretensões transitórias e de regime permanente. Eles podem ou não estar inseridos na zona de proteção da LT.

Se os reatores de linha estiverem contidos dentro da zona da proteção diferencial, as correntes por eles consumidas devem ser descontadas das grandezas de operação com o objetivo de melhorar a sensibilidade da proteção. Elas podem ser estimadas, de maneira similar à forma de estimar as correntes de carregamento capacitivo [3], descrita na Seção 3.5.4. Se os reatores forem manobráveis, o seu estado deve ser conhecido pela proteção da LT. Além disso, deve haver a coordenação entre as proteções dos reatores e a proteção da LT no sentido da proteção da LT não atuar para um defeito em quaisquer dos reatores [3].

Tal como ocorre com LT terminadas em transformadores, a manobra de um reator na LT leva a transitórios que introduzem componentes harmônicas que corrompem a medição do relé de proteção. As soluções podem incluir o bloqueio com base na medição de harmônicos, como descrito na Seção 2.5.3 ou uma região de restrição adaptativa na presença de harmônicos, como indicado na Seção 3.5.1.

3.5.3 Linhas de transmissão com compensação série

Para LTs com compensação série, a proteção diferencial é imune aos efeitos da inversão de tensão [3]. Entretanto, a inversão de corrente ou o *outfeed* para defeitos internos prejudicará a correta atuação do relé. Se o BCS for protegido por um MOV (*Metal-Oxide Varistor*) e/ou centelhador, ocorrerá o *by-pass* do BCS e a mitigação do efeito. Na falha dessas proteções, entretanto, o relé diferencial deve ser capaz de atuar corretamente para um defeito interno.

3.5.4 Compensação de corrente de carregamento capacitivo

O aumento do nível de tensão e do comprimento das linhas tem por consequência aumentar a capacitância *shunt* total do circuito. O efeito dessa capacitância é do aparecimento de uma componente adicional nas correntes dos terminais da LT definida como corrente de carregamento capacitivo (*line-charging*), a depender do seu carregamento. As filosofias de proteção apresentadas nas Seções 3.2 e 3.3 são baseadas nas diferenças entre as correntes terminais de uma LT, sendo fortemente afetadas pela capacitância da LT. Por vezes, uma proteção mal ajustada pode ser operada em condições de carga devido ao efeito da capacitância da LT levar a um ponto de operação fora da região de restrição.

Uma solução comumente utilizada [3, 49] é a da compensação da corrente de carregamento capacitivo. Se estiverem disponíveis as medidas das tensões terminais da LT, podem ser calculadas para cada terminal uma corrente de compensação a ser adicionada nas correntes efetivamente utilizadas nas proteções das Seções 3.2 e 3.3. A Figura 3.12 ilustra esse efeito.

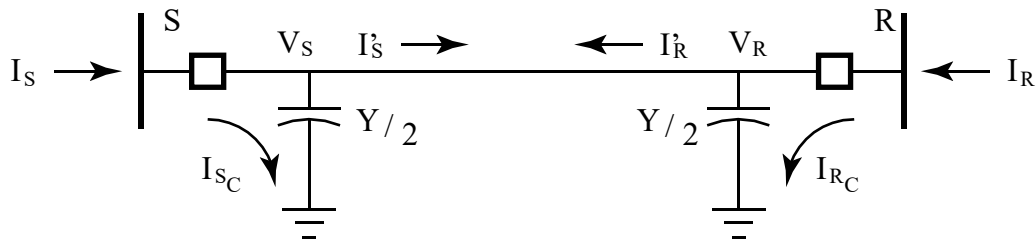


Figura 3.12 Corrente de carregamento capacitivo em LT.

Seja $Y = jbL$ a admitância *shunt* total da LT perfeitamente transposta. Para o terminal S, a corrente de compensação para cada fase será \dot{I}_{S_c} e a nova corrente terminal efetiva será \dot{I}'_S (3.13). Para o terminal R, a corrente de compensação para cada fase será \dot{I}_{R_c} e a corrente terminal efetiva será \dot{I}'_R (3.14). Descontado o efeito capacitivo da LT, os ajustes das proteções tenderão a ser mais sensíveis aos defeitos internos de alta impedância, a exemplo da característica de restrição percentual da Figura 3.3.

$$\dot{I}_{S_c} = \frac{\dot{V}_S Y}{2}, \quad \dot{I}'_S = \dot{I}_S - \dot{I}_{S_c} \quad (3.13)$$

$$\dot{I}_{R_c} = \frac{\dot{V}_R Y}{2}, \quad \dot{I}'_R = \dot{I}_R - \dot{I}_{R_c} \quad (3.14)$$

Outro método [3] calcula as correntes de compensação na forma de $I_C = \frac{1}{2} C \frac{dV}{dt}$, onde V é a tensão medida de um dos terminais. Para circuitos não transpostos, as correntes de compensação (3.13) e (3.14) podem ser calculadas considerando admitâncias variáveis por fase.

O método descrito nessa seção é robusto em relação à redução da corrente de carregamento capacitivo durante as subtensões provocadas por defeitos internos ou externos [3]. Nessas condições, as tensões terminais são reduzidas e a compensação da corrente será proporcional à tensão de cada terminal.

3.6 Ajustes da proteção diferencial

As características de proteção diferencial apresentadas nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4 se distinguem na filosofia de avaliação da condição de operação, mas compartilham de uma sequência de estudos similar para os seus ajustes. Essa seção descreve as etapas comuns para os ajustes de uma proteção diferencial qualquer.

O parâmetro comum entre as características avaliadas nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4 é a do *pickup* de corrente diferencial (3.2). Esse ajuste é intrínseco à característica de restrição percentual, sendo representado pelo parâmetro I_{S1} (Figura 3.2). Por outro lado, nas características baseadas na razão entre correntes (Seções 3.3 e 3.4), o valor de *pickup* de corrente diferencial esse é um ajuste complementar [21].

O ajuste da corrente diferencial de *pickup* envolve o conhecimento das correntes de carregamento normal da LT e das correntes para defeitos internos e externos. Análises de fluxo de carga e de curto-circuito de regime permanente podem fornecer ajustes iniciais para esse parâmetro. Numa segunda etapa, o estudo em EMTP pode confirmar os ajustes ou indicar modificações, sobretudo por permitir uma modelagem mais fidedigna da LT e de equipamentos associados à proteção, tais como os TCs.

Quanto às condições de carregamento, é de interesse verificar o carregamento da LT em condições de carga leve, de carga pesada, na contingência de algum circuito próximo ou paralelo etc. Se não houver compensação de corrente de carregamento capacitivo, as condições de carregamento leve podem fornecer um ajuste mínimo de corrente diferencial. Para os defeitos internos, é de interesse conhecer a mínima corrente de curto-circuito para o qual a proteção deve atuar (defeito através de alta impedância). Para defeitos externos, é de interesse verificar como as correntes terminais da LT

protegida são afetadas, se pode ocorrer a saturação dos TCs e, na ocorrência deles, se os relés são sensibilizados.

Sugestões de etapas para se obter o ajuste do valor de *pickup* de corrente diferencial são enumeradas abaixo. Essas sugestões foram baseadas em trabalhos como [17, 52, 9], que apresentam sequências de análises para a determinação dos ajustes.

1. Listar correntes para diferentes condições de carregamento da LT a partir de um programa de fluxo de carga. Deve ser descontada a contribuição de corrente de carregamento capacitivo se houver compensação. O valor mínimo de *pickup* deverá ser o da maior corrente diferencial encontrada multiplicado por fator de segurança.
2. Simular defeitos internos à LT, em diferentes locais e de diferentes impedâncias. Considerar a corrente diferencial mínima de defeito por um fator de segurança, desde que não seja inferior ao valor encontrado no passo 1.
3. Simular defeitos externos, de diferentes tipos, principalmente próximos aos seus terminais, para verificar a sensibilidade do ajuste em 2 e garantir a segurança.

3.7 Teste da proteção diferencial em evento real

As três características de proteção diferencial introduzidas neste capítulo são testadas com a utilização de dados de uma ocorrência real. A proteção é modelada e testada no programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP) *ATP*, com uso do pré-processador gráfico *ATPDraw*. A implementação da proteção, dos testes e os resultados são apresentados a seguir.

O incidente ocorreu em uma LT de 230 kV com cerca de 43 km de comprimento. O defeito foi de um curto-circuito monofásico na fase B, a aproximadamente 14,9 km do terminal R. A Figura 3.13 contém uma ilustração da condição.

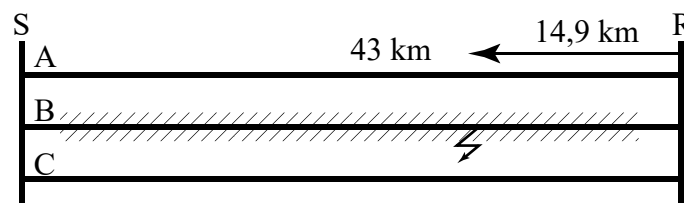


Figura 3.13 Representação da LT sob falta.

As oscilografias de tensões e correntes trifásicas de ambos os terminais da LT durante a ocorrência foram obtidas no formato *COMTRADE* [53]. Com base nas informações disponíveis nas oscilografias, pode-se extrair que a LT é protegida pelas

funções de distância 21 de 3 zonas e diferencial de corrente 87L. Não há informações sobre os ajustes das proteções. A sincronização dos dados dos terminais foi realizada considerando o instante de tempo em que as funções diferenciais de ambos os terminais comandaram o *intertrip*. Foi considerado como instante de falta aquele em que os Registradores Digitais de Perturbações (RDP) dos terminais detectaram um defeito.

Um módulo de leitura de múltiplos arquivos *COMTRADE* foi desenvolvido em C++ e link-editado com o *ATP* [54] para possibilitar a utilização das medidas terminais em uma simulação do *ATP*. O módulo permite a definição de deslocamentos no tempo, seleção dos canais de interesse, interpolação de pontos dos canais analógicos para possibilitar diferentes passos de simulação e o carregamento de canais de mais de um conjunto de arquivos *COMTRADE* em uma mesma simulação.

O *ATP* permite a definição de funções e modelos definidos pelo usuário desenvolvidos em programas externos, em linguagens como C, *Fortran*, C++, etc. [54]. Para isso foi utilizado o recurso de *Foreign Model* da linguagem *MODELS* [55], disponível no *ATP*, para comandar o módulo de leitura e trazer para a simulação os dados terminais. Na Figura 3.14 estão representados os componentes para possibilitar o uso do recurso. Mais detalhes sobre a implementação desse módulo estão no Apêndice A.

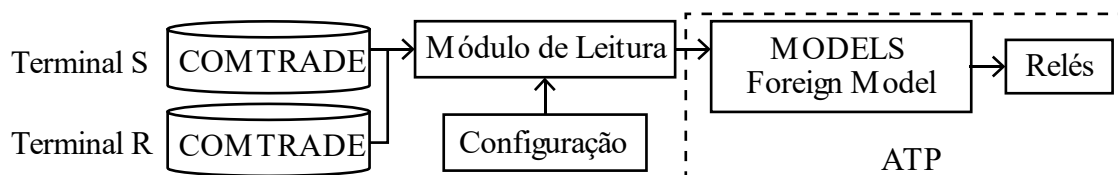


Figura 3.14 Arquitetura da solução para utilizar oscilografias em simulação do programa *ATP*.

Com o módulo desenvolvido, os arquivos de oscilografias obtidos pelos RDPs dos dois terminais puderam ser utilizados na simulação com os modelos propostos tal como na Figura 3.14. Foi utilizada a interpolação linear das amostras pelo módulo visto que o passo de simulação de 10 μ s utilizado é inferior ao intervalo entre duas amostras das oscilografias ($\approx 350 \mu$ s, ou 48 amostras por ciclo).

As proteções foram implementadas nas três fases, conforme descrito nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4, utilizando a linguagem *MODELS* do *ATP* [55]. O cálculo do índice de localização de defeitos *D*, apresentado na Seção 2.6.1, precisou ser implementado no *ATP* via *MODELS* tendo disponível apenas operações com números reais (por limitação de representação da *MODELS*) e seguiu implementação similar a realizada em [56]. Devido ao comprimento da LT e do nível de tensão, não se considerou compensação de corrente

de carregamento capacitivo. No Apêndice B são fornecidos mais detalhes da implementação da proteção no *ATP*.

As medidas são filtradas utilizando algoritmo de *Discrete Fourier Transform* (DFT) de um ciclo com taxa de 16 amostras por ciclo (ou 960 Hz) [57, 58]. Foi considerada a contagem de segurança [59, 60] de 2 amostras (≈ 2 ms) para a decisão de *trip*, isto é, o relé deve observar pelo menos duas amostras na região de operação para a tomada de decisão. Toda a proteção utiliza valores eficazes em pu das grandezas de fase para os seus ajustes. A compensação de atraso é feita através de um bloco de adição na saída de ângulo do algoritmo de DFT. Supondo que ambos os terminais tenham visto o defeito no mesmo instante de tempo, a compensação de atraso na fase de um dos terminais foi ajustada para -2 ms (ou $-43,2^\circ$).

As proteções foram ajustadas considerando apenas a condição pré-falta nas oscilografias. O tratamento mais adequado do ajuste das proteções é objeto de estudo do Capítulo 4. Por hora, o objetivo é avaliar o funcionamento das características para um ajuste preliminar sem exame abrangente. Foi considerada a corrente de *pickup* I_{S_1} de 0,7 pu, as inclinações $k_1 = 0,3$ e $k_2 = 1,5$ e $I_{S_2} = 2,0$ pu. Para o plano α , foi considerado raio de 2,5 e $\alpha = 210^\circ$. Para o plano $R\lambda$, erro de 30% no raio e de $\pm 30^\circ$ na fase.

As correntes terminais antes e durante o defeito estão incluídas na Figura 3.15, em pu, nas bases de 230 kV e 100 MVA. Devido ao seu valor de pico de aproximadamente 25 pu, fica evidente pela corrente I_R que esse é o terminal de maior nível de curto-circuito. Embora as outras fases tenham sido perturbadas, as amplitudes de suas correntes permanecem próximas dos valores da condição pré-falta.

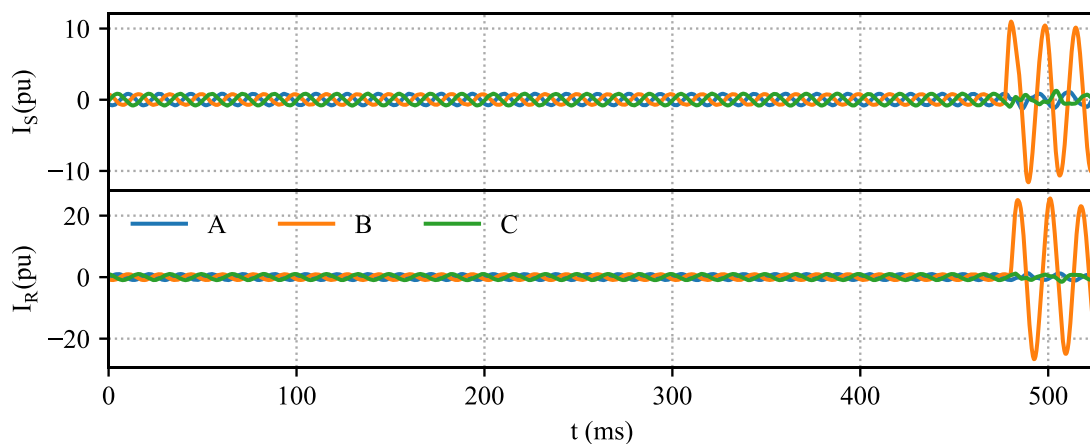


Figura 3.15 Valores instantâneos das correntes terminais.

Na Figura 3.16 estão indicados os valores eficazes das correntes terminais observadas pelos relés após a filtragem dessas no *ATP*, onde a reta vertical marca o

instante aproximado de defeito. Na parte inferior da figura também se encontram indicados os sinais lógicos de *trip* dos relés modelados para a fase B. Conclui-se que antes de que se tenha completado um ciclo em defeito (aproximadamente 16 ms), as proteções atuaram. As proteções de características $R\lambda$ e de corrente de restrição percentual atuaram primeiro, seguido pela característica de plano α com uma diferença de aproximadamente 3 ms.

Em relação à proteção real da LT, a Figura 3.17 contém os sinais de atuação das funções disponíveis nas oscilografias analisadas, sendo elas as funções de distância (21) e diferencial de LT (87L). Embora a função diferencial do terminal S (87L_S) tenha sido sensibilizada primeiro, a função que levou à eliminação da falta foi a 21 de primeira zona no terminal R (21Z1_R). O esquema de proteção diferencial utilizou um sinal de *intertrip* (87L_{TRIP}) um ciclo após a sensibilização da unidade do terminal S, indicando uma temporização intencional no esquema. Além disso, o atraso da sensibilização da função diferencial no terminal R (87L_R) indica a influência de erros de medição e atrasos, possivelmente originada da maneira como as medidas são trocadas entre as unidades terminais. Finalmente, em relação à proteção modelada no ATP, as funções de proteção reais foram sensibilizadas após pelo menos um ciclo da frequência fundamental depois da detecção da falta, indicando a possível presença de uma contagem de segurança de uma amostra de valor eficaz medido.

O plano da característica de restrição percentual durante o defeito está indicado na Figura 3.18, onde ● e ■ marcam o início e o fim da trajetória, respectivamente, e x marca o ponto na trajetória em que foi indicado *trip*. Em referência às regiões da Figura 3.3, no detalhe em (a) percebe-se que o ponto inicial da trajetória é o da condição pré-falta em carga mais possivelmente o carregamento capacitivo da LT. Na parte (b), a trajetória segue pela região de defeito interno indicada na Figura 3.3. A parte (c) contém a variação no tempo das correntes I_b e I_d , onde nota-se, em comparação com a Figura 3.16, que a rápida separação das correntes I_b e I_d resultou em *trip*. A proteção atuaria antes que as correntes atingissem os patamares de $I_b \approx 20$ pu e $I_d \approx 40$ pu após quase um ciclo em defeito.

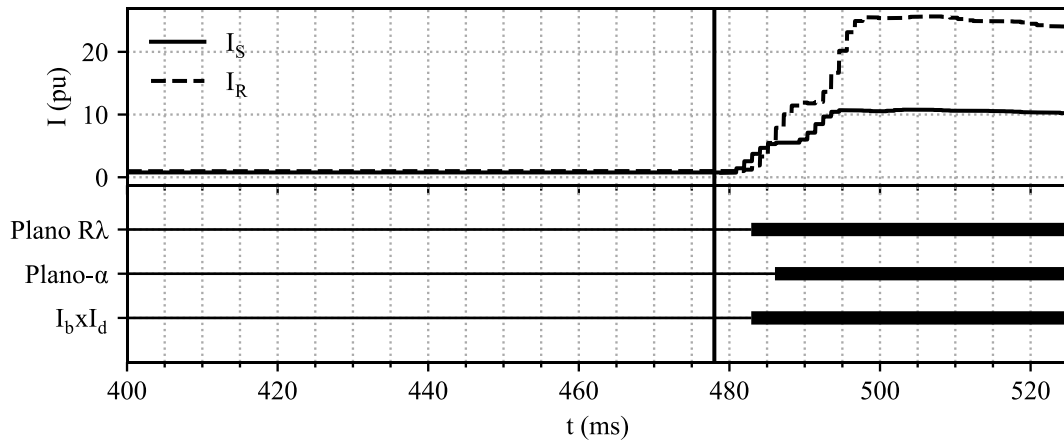


Figura 3.16 Correntes terminais em valor eficaz e instantes de atuação das proteções.

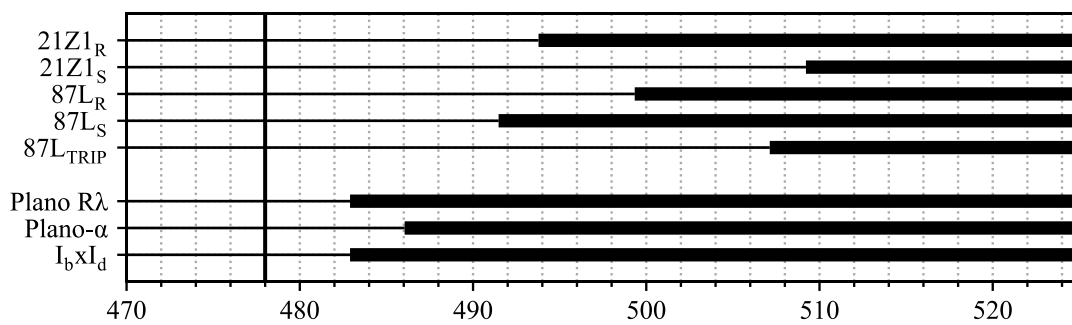


Figura 3.17 Comparação com os tempos de sensibilização dos relés

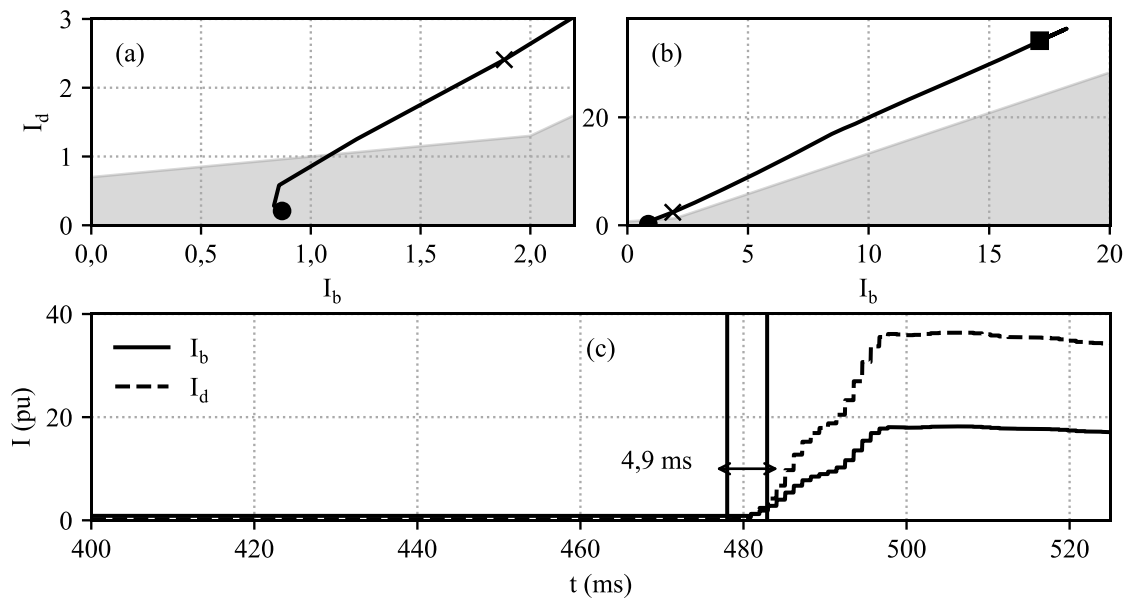


Figura 3.18 Plano de corrente diferencial e de restrição (a) detalhe e (b) todo o plano; (c) correntes de restrição (I_b) e diferencial (I_d) no tempo.

Análise similar pode ser feita para a característica de plano α . A Figura 3.19 contém na sua esquerda o plano com a trajetória observada pelo relé da fase B e à direita a variação no tempo das grandezas I_{re} e I_{im} . Em relação as regiões da Figura 3.5, observa-

se no plano da Figura 3.19 a reprodução dos locais indicados, como o da condição pré-falta próximo da coordenada $(I_{re}, I_{im}) = (-1, 0)$, e da condição de defeito no semiplano direito. A mudança de I_{re} para valores positivos é mais lenta que a separação das correntes I_b e I_d da Figura 3.18, justificando a pequena diferença nos tempos de atuação das proteções.

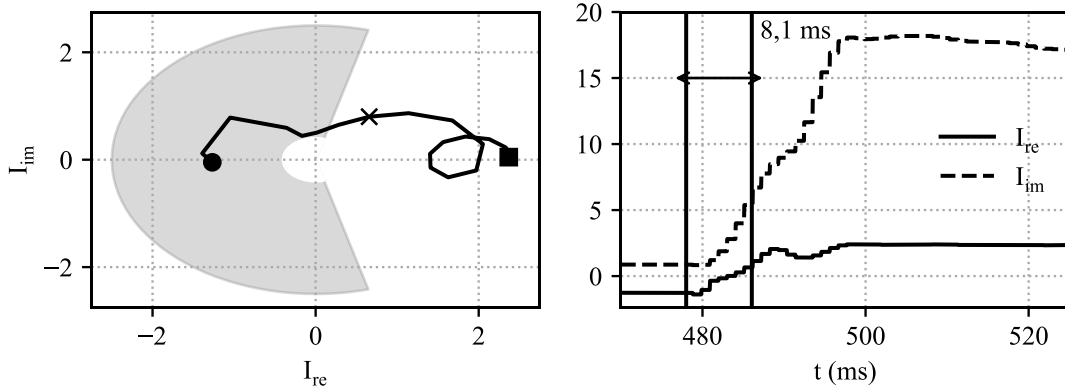


Figura 3.19 Trajetória no plano α da fase B e as grandezas I_{re} e I_{im} no tempo.

O desempenho da característica de plano $R\lambda$ pode ser examinado com auxílio das informações contidas na Figura 3.20. Essa figura contém variáveis importantes utilizadas na determinação do ponto de operação no plano $R\lambda$, como a distância ao defeito D utilizada e as correntes anterior e posterior ao ponto de defeito I_{S_f} e I_{R_f} . O gráfico em (a) contém em linha pontilhada indicada a distância real ao defeito e em linha sólida a distância estimada. Antes que o estimador convergisse para um valor inferior ao comprimento da LT (44 km), a proteção utilizou o valor padrão de 22 km (50%) para determinar o ponto de operação. No gráfico em (b), a variação dos fasores I_{S_f} e I_{R_f} é indicada e nota-se que as correntes estimadas rapidamente ficam fora de fase e se diferenciam em módulo. Nesse sentido, a trajetória no plano em (c) reproduz o efeito da diferença de fase e módulo entre as correntes estimadas.

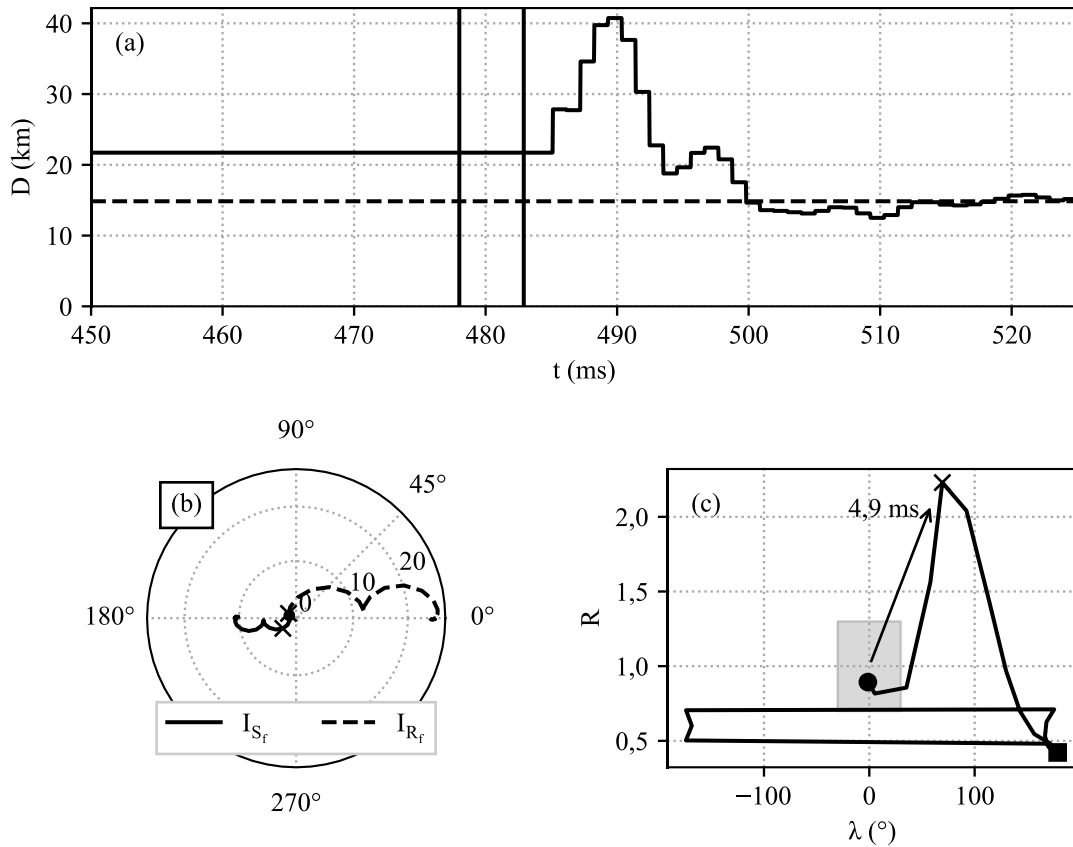


Figura 3.20 (a) estimador da distância ao defeito; (b) diagrama fasorial das correntes I_{Sf} e I_{Rf} ; (c) plano $R\lambda$ durante o defeito.

Conclusões não podem ser formadas sobre a melhor característica com base no tempo de atuação da proteção, tendo em vista que o desempenho foi avaliado para ajustes experimentais. Uma determinada característica pode atuar mais rapidamente para um mesmo defeito se a trajetória durante um defeito permanecer menos tempo na região de restrição. Dessa forma, a redução da região de restrição pode ser um artifício para acelerar a atuação da proteção. Por outro lado, a redução dessa região reduz a segurança da característica. A análise a seguir do efeito do atraso aborda esse aspecto.

O efeito do erro de atraso ou da compensação do atraso pode ser investigado com auxílio dos resultados na Figura 3.21. Nessa figura estão as trajetórias observadas pela fase A (sã) dos relés do terminal S para três diferentes condições de atraso: 1 ms, 2 ms e 3 ms, com setas apontando em direção ao maior atraso. Ao se examinar as diferentes características para essas configurações de atraso, verifica-se que a característica de corrente de restrição percentual e de plano $R\lambda$ tiveram o pior desempenho, no sentido que seriam sensibilizadas incorretamente. A análise da característica de plano α , por outro lado, confirma o afirmado na Seção 3.3 de que esta é aquela que apresenta a característica

mais robusta contra efeitos adversos de atraso. A característica do plano $I_b \times I_d$ precisaria ter a sua sensibilidade reduzida com o aumento dos parâmetros k_1 e/ou I_{S_1} para acomodar o efeito do atraso de 3 ms. A característica do plano $R\lambda$ também pode ser adequada para oferecer margens maiores de restrição, ampliando e/ou deslocando a região retangular no plano $R\lambda$. Assim, embora, no exemplo observado nessa seção, a característica de plano α não tenha sido a mais rápida, o ajuste considerado para ela se mostrou o mais seguro contra eventuais erros.

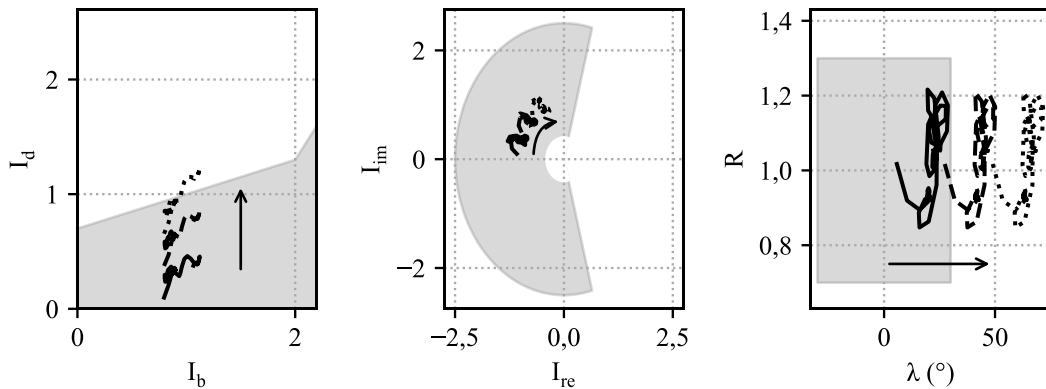


Figura 3.21 Efeito do erro de atraso em medidas da fase A durante o defeito nas características de proteção diferencial.

3.8 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a filosofia de proteção diferencial para LTs, algumas das suas características, recursos e roteiro de ajuste. Ao final, a proteção diferencial teve desempenho avaliado para uma ocorrência real.

A característica de restrição percentual provê um *pickup* de corrente diferencial que é proporcional à corrente na LT. A característica de plano α atua sobre a razão entre as correntes terminais e propicia o ajuste da região de restrição de tal sorte que se possa aumentar a segurança na decorrência de atrasos. Finalmente, a característica de plano $R\lambda$ conta com o suporte de um localizador de falta e é baseada em medidas das correntes e tensões terminais, sendo uma característica alternativa em relação às outras duas.

Finalmente, a proteção diferencial com as três características apresentadas foi testada com auxílio de oscilografias de um defeito em uma LT. O desempenho das proteções modeladas foi satisfatório, confirmando a validade da sua modelagem. A seguir, no Capítulo 4, é apresentado um projeto de proteção diferencial para uma LT real com compensação série, abordando as análises para o ajuste das proteções. No Capítulo 5 é avaliada a proteção diferencial para LT de três terminais.

Capítulo 4

Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série

Na Seção 2.5.1 foram descritos os problemas para a proteção de uma LT com compensação série. Neste capítulo, as diferentes características de proteção diferencial de LT apresentadas no Capítulo 3 são analisadas para uma linha com compensação série.

A avaliação do desempenho da proteção é realizada através de simulações de uma rede equivalente baseada em um sistema real, descrito na Seção 4.1, tanto em programa de análise de curto-circuito de regime permanente quanto em EMTP.

Na Seção 4.2 é apresentada a modelagem dos BCSs, incluindo a da sua proteção em detalhes. A atuação da proteção de BCSs impacta a proteção da LT, por isso a sua modelagem deve ser considerada nos estudos.

Na Seção 4.3 os esquemas de proteção diferencial e seus modelos são descritos. O ajuste inicial das proteções e os primeiros resultados de seu desempenho para um segundo ajuste são abordados nas Seções 4.4 e 4.5, respectivamente.

Finalmente, na Seção 4.6 as proteções diferenciais são comparadas entre si e, na Seção 4.7 elas são comparadas com a proteção de distância.

4.1 Sistema teste

Para exemplo de ajuste da proteção diferencial e para avaliação do seu desempenho, foi considerado um dos circuitos de 500 kV da área Belém-Manaus do Sistema Interligado Nacional (SIN). A Figura 4.1 mostra o diagrama unifilar de parte da área estudada, dando destaque ao circuito duplo que interliga as capitais. Da SE Tucuruí até a SE Lechuga são aproximadamente 1400 km de circuito duplo, onde cada circuito possui compensação série de 70 % em ambos os terminais (com exceção da LT 500 kV Xingu-Tucuruí em que a compensação é de 70% em um terminal). As SE Silves, Oriximiná e Jurupari possuem Compensadores Estáticos de Reativos (CER) e transformações para alimentar subsistemas próximos. O sentido do fluxo de potência, na

maior parte do tempo, se dá de Xingu para Lechuga. As barras de Xingu e Tucuruí apresentam os maiores níveis de curto-circuito, caracterizando essa como uma rede radial.

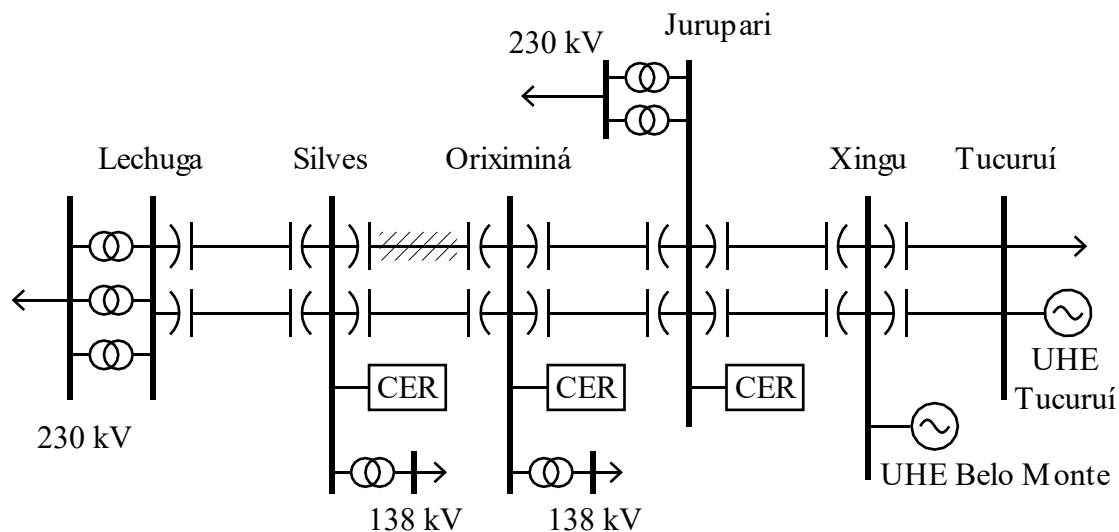


Figura 4.1 Unifilar de parte da área Belém-Manaus.

A LT escolhida para ser protegida é a LT 500 kV Silves-Oriximiná, circuito 1, de 334 km de extensão e compensação série de 70 %. As razões para a sua escolha são o seu comprimento (inferior apenas à LT 500 kV Jurupari-Oriximiná, de 350 km) e por estar compreendida entre dois outros circuitos com compensação série.

Para análise da proteção do circuito escolhido, foi elaborada a rede equivalente e simplificada da Figura 4.2. Apenas a rede de 500 kV entre os terminais da SE Lechuga e Jurupari foi modelada, com as transformações incluídas nos equivalentes. Todas as LTs foram modeladas por parâmetros distribuídos, consideradas idealmente transpostas e sem acoplamento mútuo com o circuito em paralelo devido a indisponibilidade de maiores detalhes. Os dados utilizados foram baseados no banco de dados de curto-circuito do ONS. Devido à indisponibilidade dos modelos dos CER de Silves e Oriximiná, estes foram modelados na forma de reatores simples dados o seu ponto de operação na condição analisada. Nessa figura estão indicados os circuitos que terão defeitos aplicados (interno, LT paralela e próxima) nas Seções posteriores.

As redes de níveis de tensão mais baixos, incluindo os transformadores para essas tensões, não foram modeladas diretamente na rede equivalente. Tanto a indisponibilidade de dados de magnetização dos transformadores quanto a não consideração de defeitos nas redes de tensões abaixo de 500 kV justificam a simplificação.

Os parâmetros dos elementos da rede, como equivalentes, LTs, BCSs, reatores, ponto de operação etc., se encontram no Apêndice C.1. A rede da Figura 4.2 foi modelada

no programa de curto-circuito de regime permanente *ANAFAS*, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e de transitórios eletromagnéticos (EMTP) *ATP*. No modelo de EMTP foram modeladas as malhas de medição e proteção da LT e o modelo completo do BCSs apresentado na Seção 4.2. Um programa de curto-circuito de sequência positiva com representação da proteção desenvolvido em *Python* e validado contra o *ANAFAS* foi utilizado para algumas das análises feitas nesse trabalho. Mais detalhes sobre o programa desenvolvido estão no Apêndice D.

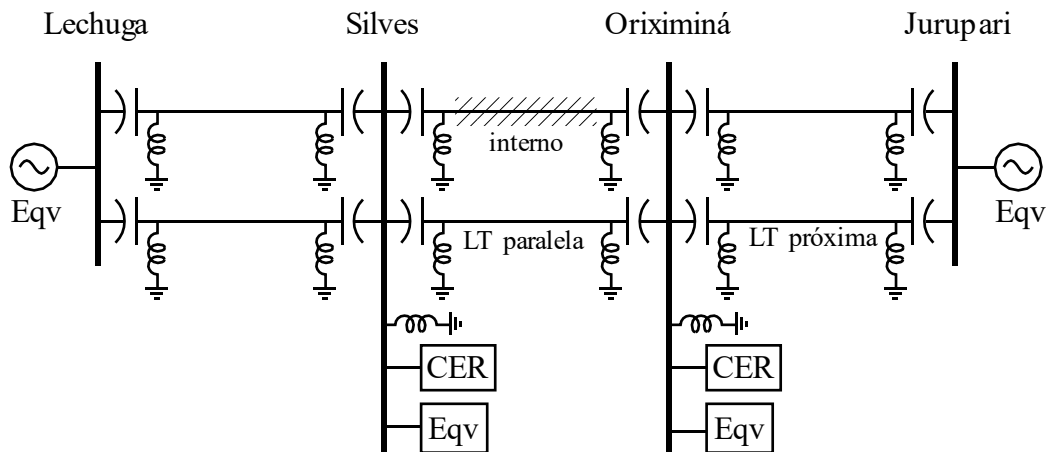


Figura 4.2 Unifilar do sistema equivalente do circuito Belém-Manaus.

4.2 Modelagem de banco de capacitores série para análise da proteção de linhas de transmissão

A proteção dos BCSs tem como objetivo primário evitar sobretensões excessivas nos mesmos devido à passagem de correntes de curto-circuito acima da sua capacidade nominal. A atuação da proteção do BCSs leva ao seu *bypass*, o que, durante um defeito, impacta nas grandezas de tensão e corrente observadas por um relé. Essa seção descreve as proteções básicas de um BCS e como elas foram modeladas para o estudo do desempenho da proteção.

A proteção primária do BCS envolve evitar sobretensões em seus terminais com a sua retirada de serviço. São propostos diferentes esquemas de proteção, com diferentes recursos [5, 61], mas aqui será considerado um dos esquemas mais completos, o que envolve três níveis de proteção.

A Figura 4.3 (a) contém o circuito de uma unidade de BCS e a sua proteção. Nessa figura, (i) um MOV encontra-se em paralelo ao capacitor série, sendo esse a proteção de primeiro nível. Paralelo aos dois, estão a combinação série de um (ii) circuito de amortecimento com um (iii) centelhador (ou *gap*) e um (iv) disjuntor de *bypass*. O *gap*

tem a função de proteger o MOV enquanto o disjuntor de *bypass* a de proteger o *gap* e efetivamente todo o conjunto. A necessidade de proteções para as proteções [61] do BCS surge de limitações de seus componentes.

A característica típica de um MOV é ilustrada na Figura 4.3 (b). Um MOV é projetado para começar a conduzir corrente uma vez que um limite de sobretensão do BCS seja ultrapassado, oferecendo um caminho de baixa resistência e atuação instantânea. Abaixo desse limite, o MOV conduz uma corrente residual da ordem de mA, permanecendo em operação conectado em paralelo ao BCS [5]. Uma vez que o MOV pode conduzir correntes elevadíssimas, parte do seu projeto prevê qual a energia máxima que pode ser dissipada no MOV sem que este seja permanentemente danificado. Essa situação pode ocorrer para um defeito interno ou externo que não tenha sido detectado pelas proteções, ou numa situação de religamento malsucedido.

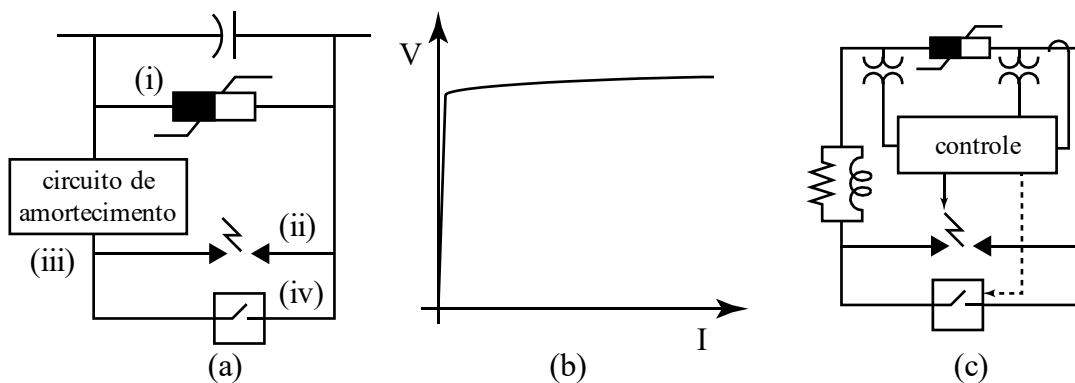


Figura 4.3 (a) Proteção de BCS; (b) Característica de um MOV; (c) Medição do controle do centelhador.

Com o intuito de evitar que o MOV seja danificado para defeitos severos, é utilizada a proteção adicional por *force triggered gap*, com o elemento (ii) da Figura 4.3 (a). Essa proteção consiste em um centelhador controlado por um circuito eletrônico que realiza medições e verifica se o limite de corrente ou de energia máxima do MOV tenham sido ultrapassados. Se verificada essa condição, o disparo do gap pode ocorrer tipicamente em 0,5 ms [61] e leva ao *bypass* do conjunto BCS e MOV. O *gap* pode vir a falhar em atuar, falhar em eliminar o arco ou mesmo vir a ser danificado se mantiver a operação por um tempo elevado. Assim, uma vez que o *gap* seja disparado, o disjuntor de *bypass* é acionado.

Ao mesmo tempo, o disjuntor de *bypass*, elemento (iv) da Figura 4.3 (a), é acionado para a completa retirada de serviço do BCS em 40 a 50 ms [5]. Assim, ele age como último estágio da proteção do BCS e dos seus dispositivos de proteção. Finalmente,

o elemento (iii) da Figura 4.3 (a) é o circuito de amortecimento, necessário para limitação da corrente durante o disparo do *gap* ou do fechamento do disjuntor de *bypass*.

O modelo implementado para os estudos da proteção é o da Figura 4.3 (c). Foi sintetizada uma característica única para ambos os MOVs dos BCSs do circuito duplo em análise. Essa característica é apresentada no Apêndice C.2 e a sua síntese foi baseada em uma curva típica de para-raios [62], mas adaptada para a proteção de um BCS [61].

O bloco de controle do disparo do *gap* monitora a corrente instantânea no MOV e a tensão entre seus terminais. O disparo é executado se a corrente instantânea superar um valor predefinido de *pickup* ou se a energia máxima, calculada como a integral do produto da tensão e corrente medidas, ultrapassar o ajuste de energia nominal do MOV. Tão logo o *gap* inicie a condução, o disjuntor de *by-pass* é comandado a fechar. No modelo considerado, o disparo do *gap* ocorre após 1 ms na condição de *trip*. Foi considerado o limite de 8 kA-pico de corrente e de 30 MJ de energia. O código *MODELS* do controle do *gap* e o circuito da proteção em *ATP* são apresentados no Apêndice C.2.

O modelo foi simplificado de forma a unir as ações do *gap* e do disjuntor de *bypass*. Foi considerado que o *gap* pode atuar como uma chave simples. Caso a chave do *gap* tenha sido fechada por sobrecorrente e a energia absorvida pelo MOV não tenha superado o limite de energia/térmico configurado, o BCS poderá voltar a operação passados 100 ms do *by-pass* com a abertura da chave que representa o *gap* e o disjuntor de *bypass*.

A Tabela 4.1 resume os ajustes da proteção dos BCSs da LT protegida e da LT paralela a ela. A Figura 4.4 mostra o módulo da corrente instantânea e a energia no MOV observada pelo controle do *gap* na aplicação de um curto-circuito trifásico interno próximo ao BCS. Nessa figura é possível observar a atuação do controle do *gap* para a sobrecorrente de aproximadamente 10 kA e o aumento da energia dissipada a cada pulso de corrente no MOV. Em aproximadamente 25 ms o BCS e o MOV são retirados de serviço durante o defeito.

É importante mencionar que, embora a filosofia seja a mesma, há diferentes maneiras de se implementar o controle do *gap*. Por exemplo, uma técnica [61] realiza cálculo da energia utilizando uma tabela de pontos para obter a tensão no MOV em função da corrente.

O efeito da proteção do BCS, então, é a retirada dele de serviço quando a corrente passante pelo BCS leva à superação dos ajustes da sua proteção. A consequência esperada para a proteção da LT é uma nova configuração de operação, sem os efeitos do capacitor

série, onde podem ser observadas inversões de tensão e corrente. Na seção a seguir é descrita a modelagem da proteção da LT em estudo.

Tabela 4.1 Parâmetros da proteção do BCS

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Corrente Máxima (kA)	8	Tempo para retorno do BCS (ms)	100
Energia Máxima (MJ)	30	Resistência de <i>damping</i> (Ω)	1
Atraso do disparo (ms)	1	Reatância de <i>damping</i> (Ω)	0,001

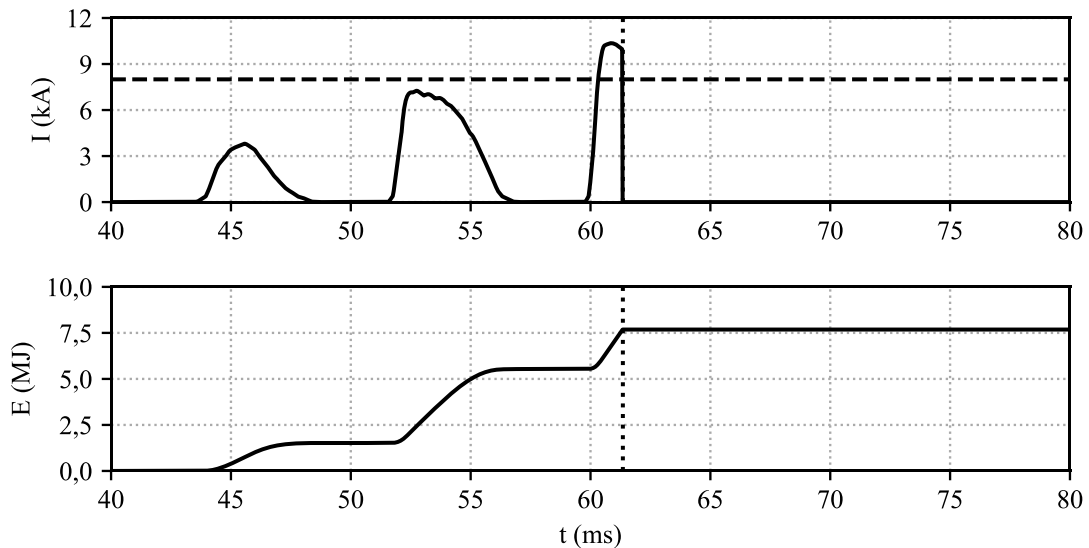


Figura 4.4 Desempenho da proteção do BCS para um curto-circuito trifásico próximo.

4.3 Modelagem da proteção

Para cada terminal da LT protegida foi utilizado o esquema da Figura 4.5. Foi modelada a proteção dos BCSs conforme descrito na Seção 4.2. As proteções da LT incluem a de distância 21 e a diferencial de LT 87L. A proteção de distância é de primeira zona (alcance de 80% da impedância da LT não compensada) por característica *mho*, com elementos de fase e de terra em ambos terminais. As proteções diferenciais apresentadas no Capítulo 3, de restrição percentual, plano α e plano $R\lambda$ foram modeladas nas três fases para atuar paralelamente.

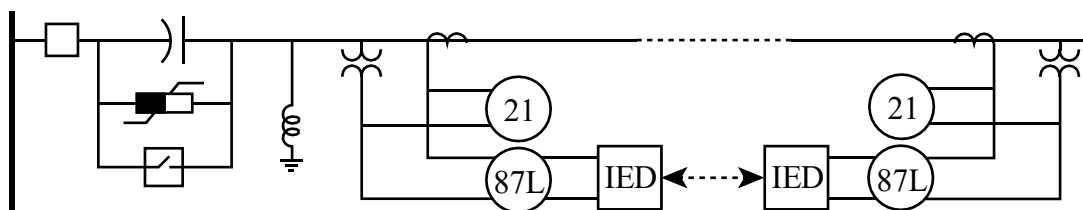


Figura 4.5 Esquemático das proteções da LT.

As medições de tensão e corrente são realizadas num ponto da LT, após o BCS e o reator de linha. A medição da tensão diretamente na LT é vantajosa na configuração de LT com compensação série nos terminais, pois evita que defeitos internos próximos aos terminais sejam incorretamente identificados como defeitos externos à LT [5]. A medição de corrente, entretanto, normalmente é feita próxima ao disjuntor da LT, e a escolha de ser inserido para dentro da LT é para que seja descontada a corrente solicitada pelo reator de LT.

Para o TC foi utilizado um modelo de TC saturável, utilizando o componente de transformador saturável do ATP [63] com a curva de saturação da Figura 6.5 do Apêndice B. A carga do TC de 2Ω foi selecionada. A relação de transformação é $RTC = 500$, com corrente de 5 A no secundário.

Na Figura 4.6 consta a representação da parte de medição utilizada pelos relés de restrição percentual e plano α . Na Figura 4.7 está indicada a medição para o relé de plano $R\lambda$. Um filtro de sequência positiva foi utilizado para a entrada de informações no índice de localização de defeitos. Toda a proteção utiliza valores eficazes em pu das grandezas de fase para os seus ajustes. As saídas de módulos V_{mod} , I_{mod} dos filtros estão em pu e os ângulos V_{ang} e I_{ang} em graus. A corrente compensada $I'_{mod} \angle I'_{ang}$ é utilizada nas proteções diferenciais. A corrente remota $I'_{Rmod} \angle I'_{Rang}$ é obtida já compensada e considerada sem atraso. Num primeiro momento, não é considerado o filtro passa-baixas (*anti-aliasing*) na entrada do filtro DFT. Mais detalhes sobre a implementação da medição estão no Apêndice B.

Uma entrada de *offset* na saída do filtro de corrente permite a correção do sentido da corrente do TC, tendo em vista que proteções que utilizam sentidos diferentes (como a de plano $R\lambda$, em que a corrente I_R é considerada com sentido para fora da LT) aproveitam o mesmo TC.

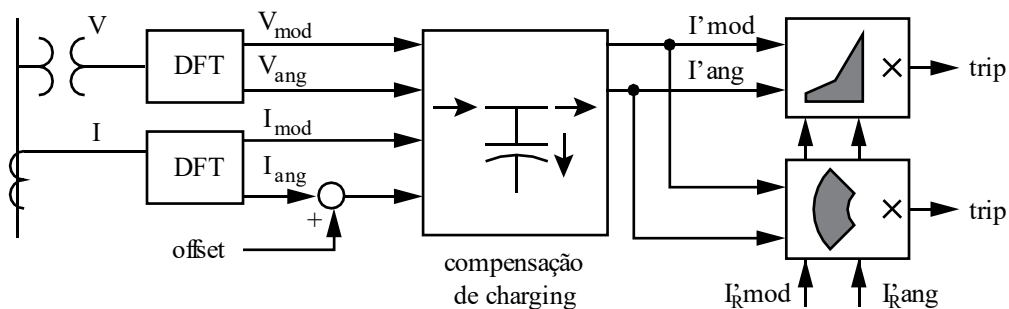


Figura 4.6 Medição e compensação de corrente de carregamento capacitivo para as proteções de restrição percentual e plano α .

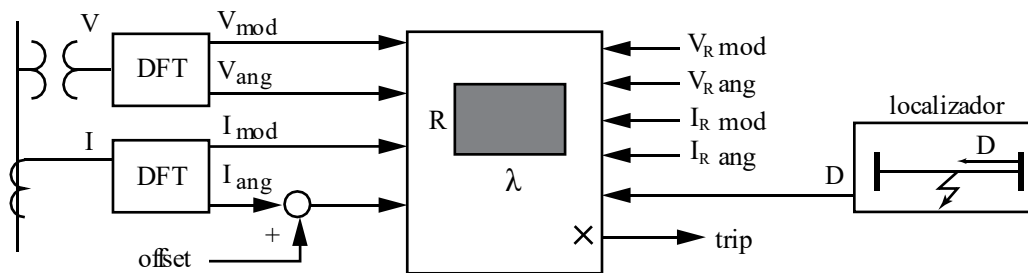


Figura 4.7 Medição e localizador de falta para a proteção $R\lambda$ em LT de dois terminais.

As proteções foram implementadas conforme descrito nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4, de maneira similar à realizada na Seção 3.7. O cálculo do estimador de distância, para esse caso em particular, teve como critério de convergência a comparação entre a diferença do valor atual e do valor anterior com erro de 0,5%. Mais detalhes da implementação da proteção estão no Apêndice B.

Todas as proteções compartilham de um bloqueio por *pickup* de corrente diferencial, conforme descrito na Seção 3.6 [21]. Para o cálculo da corrente diferencial, a proteção $R\lambda$ utiliza um esquema de compensação de corrente de carregamento capacitivo como o descrito na Seção 3.5.4.

Na Seção 4.4 são abordados os estudos para o ajuste inicial das proteções, sobretudo o ajuste do *pickup* de corrente diferencial comum a todas.

4.4 Ajuste inicial das proteções

Os ajustes iniciais das proteções diferenciais podem ser realizados com o conhecimento dos diferentes cenários de carregamento da LT a ser protegida em condições normais de operação e da análise de curto-circuito de regime permanente. Comum a todas as proteções diferenciais consideradas, é o *pickup* de corrente diferencial, em que um método de ajuste é descrito na Seção 3.6.

Os ajustes das proteções de característica de restrição percentual e de plano α envolvem o conhecimento das condições de carga a que é submetida a LT protegida, das correntes de curto-circuito internas sobre a qual a proteção deve atuar e externas a evitar sensibilização. Para o ajuste inicial da proteção, foram avaliadas diferentes condições de carregamento utilizando a ferramenta de fluxo de carga *ANAREDE*, desenvolvido pelo CEPEL e, para cada característica específica, correntes de defeito no programa de curto-circuito de regime permanente apresentado no Apêndice D e no *ANAFAS*.

A Tabela 4.2 apresenta os fasores das correntes terminais da LT protegida, onde “de” refere-se ao terminal Silves e “para”, ao terminal Oriximiná. Na mesma tabela

encontram-se a razão observada na característica de plano α e as correntes no plano $I_b \times I_d$. Esses valores fornecem indicativos para a sensibilidade dos esquemas de proteção. Os casos consistem de patamares de carga leve e média de diferentes casos de programação elétrica mensal disponibilizado pelo ONS. Foi também verificada a indisponibilidade N-1 do circuito em paralelo ao protegido. Verifica-se, por exemplo, o efeito da corrente de carregamento capacitivo nos casos de carga leve no ponto de operação do plano α , em que o ponto não coincide com -1, e do plano $I_b \times I_d$, em que é verificada uma maior corrente diferencial para uma menor corrente média (I_b).

Tabela 4.2 Correntes em condição de carga

Caso				Plano α	Restrição Percentual	
Mês de referência	Carga	I_{de}	I_{para}	Razão	I_d	I_b
Maio 2017	Média	3,98 \angle 162°	4,11 \angle 32°	1,03 \angle 165°	1,06	4,05
Maio 2017	Leve	2,80 \angle -172°	3,04 \angle -16°	1,09 \angle 156°	1,26	2,92
Setembro 2017	Média	4,42 \angle 95°	4,47 \angle -98°	1,01 \angle 167°	0,99	4,45
Setembro 2017	Leve	2,85 \angle 113°	2,82 \angle -93°	0,99 \angle 155°	1,24	2,83
Setembro 2017	Mínima	1,24 \angle 148°	0,99 \angle -44°	0,80 \angle 104°	1,39	1,12
Setembro 2017, N-1	Leve, N-1	2,57 \angle 177°	2,20 \angle 27°	0,86 \angle 150°	1,30	2,38

O ajuste da característica de restrição percentual foi realizado após a aplicação sucessiva de curtos-circuitos trifásicos através de resistência ao longo da LT com o programa descrito no Apêndice D. Em seguida o ajuste foi verificado com simulações de defeitos monofásicos em duas diferentes resistências de defeito no ANAFAS. A seguir é descrita a metodologia utilizada para determinar os ajustes iniciais.

Para cada defeito, a soma dos fasores das correntes terminais é calculada e o menor valor de corrente diferencial permite definir o ajuste de *pickup* das proteções. Com o programa de curto-circuito desenvolvido, foram simulados defeitos internos com resistências de defeito R_f de 0, 25, 250 e 2500 Ω . Também foram simulados defeitos externos em um dos circuitos. A Tabela 4.3 contém alguns dos resultados, selecionados pela menor corrente diferencial I_d para um determinado valor de I_b , onde D é distância em % ao primeiro terminal. Em comparação com as correntes de carga da Tabela 4.2, o ajuste de *pickup* de corrente diferencial $I_{s1} = 1,50$ pu, próximo do menor valor de corrente para defeito interno da Tabela 4.3, parece razoável e mantém a sensibilidade da proteção contra defeitos de alta impedância (como 2500 Ω). Esse ajuste é compartilhado com as demais proteções diferenciais.

Para o ajuste da característica de plano α , foram calculadas as correntes terminais para defeitos internos a LT e externos em uma das LTs vizinhas. Foram considerados

defeitos trifásicos através de diferentes impedâncias. Dos resultados para defeitos internos, devem ser observados aqueles que resultem no menor valor de ajuste de raio para garantir a seletividade. Para defeitos externos, qual o maior valor do raio para abrigar esses defeitos dentro da sua característica e garantir a segurança.

Tabela 4.3 Resultados de curto-circuito para a característica de restrição percentual

Caso	LT	Tipo	D (%)	Rf (Ω)	I _d	I _b
1	Silves-Oriximiná	Interno	0,1	2500	1,72	2,863
2	Silves-Oriximiná	Interno	46,0	250	5,07	10,140
3	Silves-Oriximiná	Interno	48,0	25	13,66	27,310
4	Lechuga-Silves	Externo	16,0	0	4,56	2,485

Na Tabela 4.4 estão indicados alguns casos selecionados. Todos os defeitos internos foram posicionados no semiplano direito do plano α , indicando que não haverá dificuldades para a detecção de defeitos internos. Todos os defeitos externos levaram a razões e ângulos no semiplano esquerdo. O caso 3 da Tabela 4.4 indica que um ajuste de $R = 1,70$ ($\approx 1/0,588$) pode levar à incorreta identificação desse defeito como um defeito interno. O caso 6 da Tabela 4.4, de defeito externo próximo ao terminal Oriximiná, por outro lado, indica que R deve ser pelo menos maior que 2,62 para acomodar esse caso dentro da sua característica.

No ajuste inicial da proteção $R\lambda$ é adotado um erro de 20% na razão e de $\pm 20^\circ$ de ângulo. Esses valores foram selecionados na expectativa de que o ponto de operação estimado possa assumir erros nessa ordem de grandeza durante o transitório do defeito. O ajuste final somente poderá ser feito após a simulação dessa proteção em EMTP.

Finalmente, ajustes iniciais foram testados para defeitos monofásicos internos no ANAFAS. A Figura 4.8 mostra o lugar geométrico dos defeitos aplicados nos planos das características. Em azul, defeitos de resistência igual a 250Ω e, em vermelho, defeitos francos. Para a característica de restrição percentual foram utilizados, inicialmente, os parâmetros $k_1 = 0,30$, $k_2 = 1,5$, $I_{s_1} = 1,50$ e $I_{s_2} = 2,0$ pu. Para o plano α , ângulo de bloqueio $\alpha = 210^\circ$ e $r = 2,62$.

Tabela 4.4 Resultados de curto-circuito para ajuste da característica de plano α

Caso	LT	Tipo	D (%)	Rf (Ω)	Razão
1	Silves-Oriximiná	Interno	50,1	25	1,04 \angle 0,6
2	Silves-Oriximiná	Interno	98,0	25	2,76 \angle -6,5
3	Lechuga-Silves	Externo	1,1	25	0,58 \angle 178,3
4	Lechuga-Silves	Externo	98,1	25	0,71 \angle 179,3
5	Oriximiná-Jurupari	Externo	1,1	25	1,57 \angle 179,0
6	Oriximiná-Jurupari	Externo	88,1	25	2,62 \angle 178,7

Para a atuação das proteções foi considerada a contagem de segurança de 10 amostras consecutivas dentro da região de operação. Para a taxa de amostragem considerada (16 amostras por ciclo), isso significa uma temporização intencional de aproximadamente 10,42 ms.

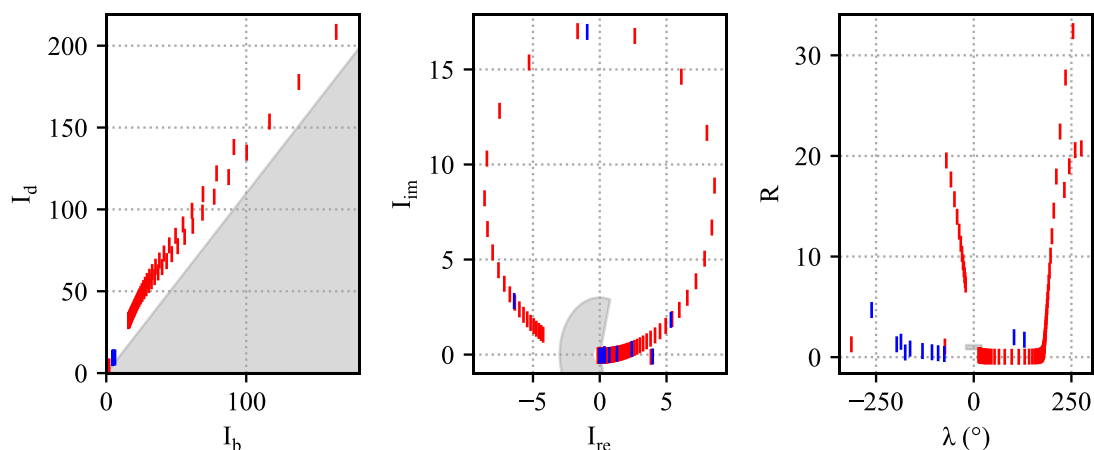


Figura 4.8. Defeitos internos monofásicos francos simulados no ANAFAS.

Finalmente, o ajuste das proteções de distância obedeceu à prática de se utilizar um valor de diâmetro da característica mho compreendido entre 80 e 90 % da impedância da LT protegida para a Zona 1, sendo selecionado o ajuste de 80%.

4.5 Desempenho da proteção para o ajuste inicial e nova proposta de ajuste

Para a verificação do ajuste da proteção, foram realizadas simulações em EMTP para as condições abaixo:

1. Defeitos internos na LT, em diferentes posições e para diferentes impedâncias de curto-circuito;
2. Defeitos externos na LT paralela;
3. Defeitos externos em LT próxima (LT 500 kV Oriximiná-Jurupari).

Os defeitos internos foram simulados através das resistências indicadas na Tabela 4.5. Os tipos de defeitos considerados são os da Tabela 4.6. Os defeitos em LT foram aplicados a partir de uma distância de 5% de um terminal até a distância de 95%, em passos de 5% baseados no comprimento da LT, sendo 18 posições no total. Para os defeitos externos foi considerada somente a resistência R1 da Tabela 4.5.

Foram analisadas quais características identificaram corretamente um defeito interno e incorretamente um defeito externo como interno, para se obter estatísticas do seu desempenho e verificar se um reajuste é necessário. A Tabela 4.7 apresenta os

percentuais de atuação das proteções para diferentes locais e tipos de defeitos. Em cada LT foram aplicados defeitos em 18 diferentes posições e variadas as resistências de defeito. Os locais de aplicação de falta podem ser observados na Figura 4.2.

Tabela 4.5 Resistências dos defeitos internos

Referência	Resistência de Defeito (Ω)
R1	10
R2	250
R3	1250

Tabela 4.6 Tipos de defeitos

Mnemônico	Defeito
3FT	Trifásico para a terra
1FT	Monofásico, fase C para a terra
2FT	Bifásico, fases B e C para a terra
2F	Bifásico, fases B e C

Tabela 4.7 Atuação das proteções para defeitos internos e externos

Local	Defeito	Rf	Plano α	$I_b \times I_d$	$R\lambda$
LT paralela	3FT	R1	50,0%	44,4%	61,1%
	1FT	R1	16,7%	5,5%	11,1%
	2FT	R1	22,2%	27,7%	0
	2F	R1	44,4%	38,9%	38,9%
LT próxima	3FT	R1	5,5%	11,1%	33,3%
	1FT	R1	11,1%	0	0
	2FT	R1	0	0	0
	2F	R1	0	0	11,1%
Interno	3FT	R1	100%	100%	100%
	1FT	R2			
	2FT	R3			
	2F				

Para defeitos na LT protegida (Interno), as proteções detectaram e atuaram corretamente em 100% dos casos. Para defeitos externos, em especial na LT paralela, o desempenho das proteções foi inferior ao esperado, chegando a 61,1% de atuações incorretas para defeitos trifásicos externos. Considerando todos os casos de defeitos externos, em 31,3% deles houve atuação incorreta de ao menos um dos esquemas de proteção (45 de 144 casos no total). Como esse é um problema comum às demais proteções, as trajetórias do ponto de operação nas características devem ser analisadas e o ajuste comum de corrente diferencial precisa ser revisto.

A Figura 4.9 contém as correntes diferenciais vistas pelos relés durante dois defeitos externos trifásicos (próximos aos terminais da LT paralela). Nela é possível concluir que o ajuste de 1,50 para *pickup* diferencial é baixo considerando esses defeitos externos, visto que por aproximadamente 20 ms a proteção observa uma corrente diferencial de mais de 2 pu. As alternativas seriam: (i) ampliar o ajuste para, por exemplo, 2,0, aumentando a contagem de segurança ou inserindo uma temporização de ≈ 20 ms, ou

(ii) aumentar o ajuste para 2,5 mantendo a atuação instantânea, considerando que haverá perda da seletividade para defeitos internos de alta impedância.

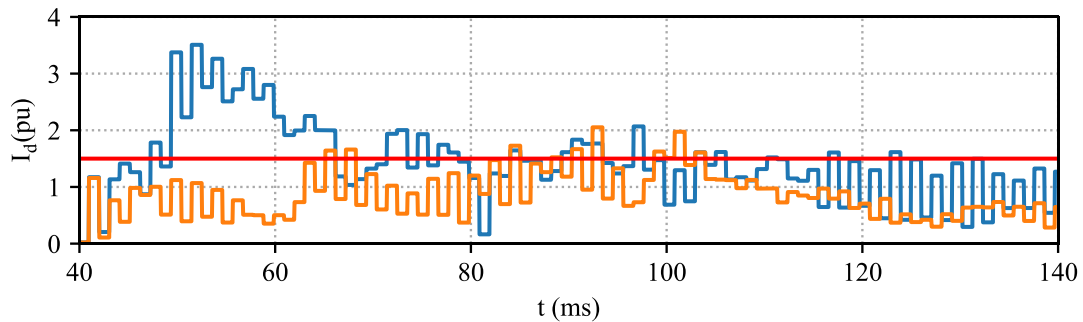


Figura 4.9 Corrente diferencial de *pickup* para os casos de defeitos trifásicos próximos aos terminais da LT paralela.

Para não comprometer o tempo de *pickup*, o segundo ajuste das proteções terá o *pickup* de corrente diferencial igual a 2,50 pu. As simulações para o ajuste anterior foram repetidas com o novo ajuste e levaram aos resultados da Tabela 4.8. Os locais de aplicação de defeitos podem ser observados na Figura 4.2.

Tabela 4.8 Atuação das proteções para o segundo ajuste

Local	Defeito	Rf	Plano α	$I_b \times I_d$	$R\lambda$
LT paralela	3FT	R1	5,5%	5,5%	22,2%
	1FT				
	2FT				
	2F				
LT próxima	3FT	R1	0	0	0
	1FT				
	2FT				
	2F				
Interno	3FT	R1	100%	100%	100%
		R2			
	1FT	R3	0	0	0
	2FT	R1	100%	100%	100%
		R2			
2F	R3				

O novo ajuste diminuiu a sensibilidade da proteção para defeitos internos com a maior resistência considerada ($R3=1250 \Omega$), mas manteve desempenho satisfatório para os defeitos internos em geral. Quanto aos defeitos externos, o novo ajuste se demonstra melhor que o ajuste anterior, ainda que tenham sido encontradas falhas (cerca de 6 atuações indevidas em 4 casos ou 2,8% de 144 casos). Dos 4 casos de defeito externo em que a proteção atuou incorretamente, a Figura 4.10 mostra a corrente diferencial medida pelos relés e indica passagem pelo valor de *pickup* nos quatro casos.

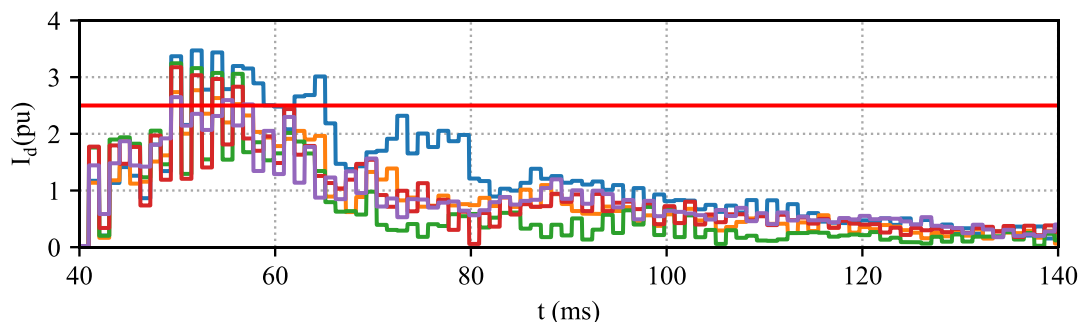


Figura 4.10 Corrente diferencial de *pickup* para os casos de defeito trifásico em LT paralela em que a proteção atuou incorretamente com o novo ajuste.

O processo para se obter um ajuste definitivo para a corrente de *pickup* poderia continuar se for estabelecida para qual máxima resistência de defeito a proteção atue corretamente. Neste trabalho, optou-se por manter o segundo ajuste realizado. Na seção a seguir as características de proteção diferencial terão os seus desempenhos comparados considerando a filtragem apenas por DFT das medições.

4.6 Comparação de desempenho das características de proteção diferencial

Na análise preliminar da Figura 4.11, verifica-se que todos os esquemas diferenciais identificaram e atuaram corretamente para defeitos internos. Para esses casos, na Seção 4.6.1, as proteções são comparadas, observando o tempo de atuação e os lugares geométricos nas características anterior ao *trip*. Os defeitos externos são avaliados nos casos em que houve atuação incorreta da proteção na Seção 4.6.2. Na Seção 4.6.3, é avaliada a utilização de filtros passa-baixas na entrada das medidas para melhorar o desempenho geral da proteção.

4.6.1 Defeito interno

A Figura 4.11 mostra as medidas vistas pelos diferentes relés para os defeitos internos à LT, dos diferentes tipos e de resistências R1 e R2 (azul e vermelho, respectivamente). Todos os defeitos foram corretamente identificados e os ajustes se mostram adequados. As características mostradas são relativas aos relés no terminal Silves (transmissor), muito embora sejam as mesmas para o terminal Oriximiná (receptor), salvo a de plano α .

Para a característica de restrição percentual, nota-se a distribuição dos defeitos nos lugares geométricos esperados (Seção 3.2, Figura 3.2). Defeitos de baixa resistência

(R1) produzem as maiores correntes de curto-circuito e, portanto, tendem na direção superior direita do plano, de maiores correntes média e diferenciais. Os defeitos de maior resistência (R2) tendem a serem localizados na região de pequenos valores de (I_b , I_d), em relação aos demais, mas ainda assim elevados em relação àqueles observados em condições de carga, tal como sugerido na Figura 3.2. Observa-se uma tendência dos pontos se posicionarem ao longo de uma reta deslocada e de coeficiente angular um pouco maior do que aquele ajustado, o que fornece um indicativo de um bom ajuste.

Para a característica de plano α , observa-se que a maioria dos pontos estão posicionados no semiplano direito, o que indica que a proteção não observou efeito de *outfeed* ou inversão de corrente quando sinalizou o *trip*. Os pontos observados, embora tendem a se aproximar da característica pelo eixo imaginário através de arcos circulares (tal como o lugar geométrico esperado na Seção 3.3), se posicionam distantes da característica configurada. Um ponto em particular, para um defeito trifásico próximo ao terminal Silves (5%) de resistência R2, localiza-se próximo à origem no semiplano esquerdo.

Para a característica $R\lambda$, nota-se a conformidade com o lugar geométrico esperado (Seção 3.4). Nota-se também que defeitos após a metade da LT em relação ao terminal receptor R se posicionam à esquerda, e os demais na parte inferior direita. Além disso, há uma tendência dos defeitos de maior resistência de se aproximarem da característica de restrição. Assim como para as demais características, todos os defeitos internos puderam ser corretamente discriminados.

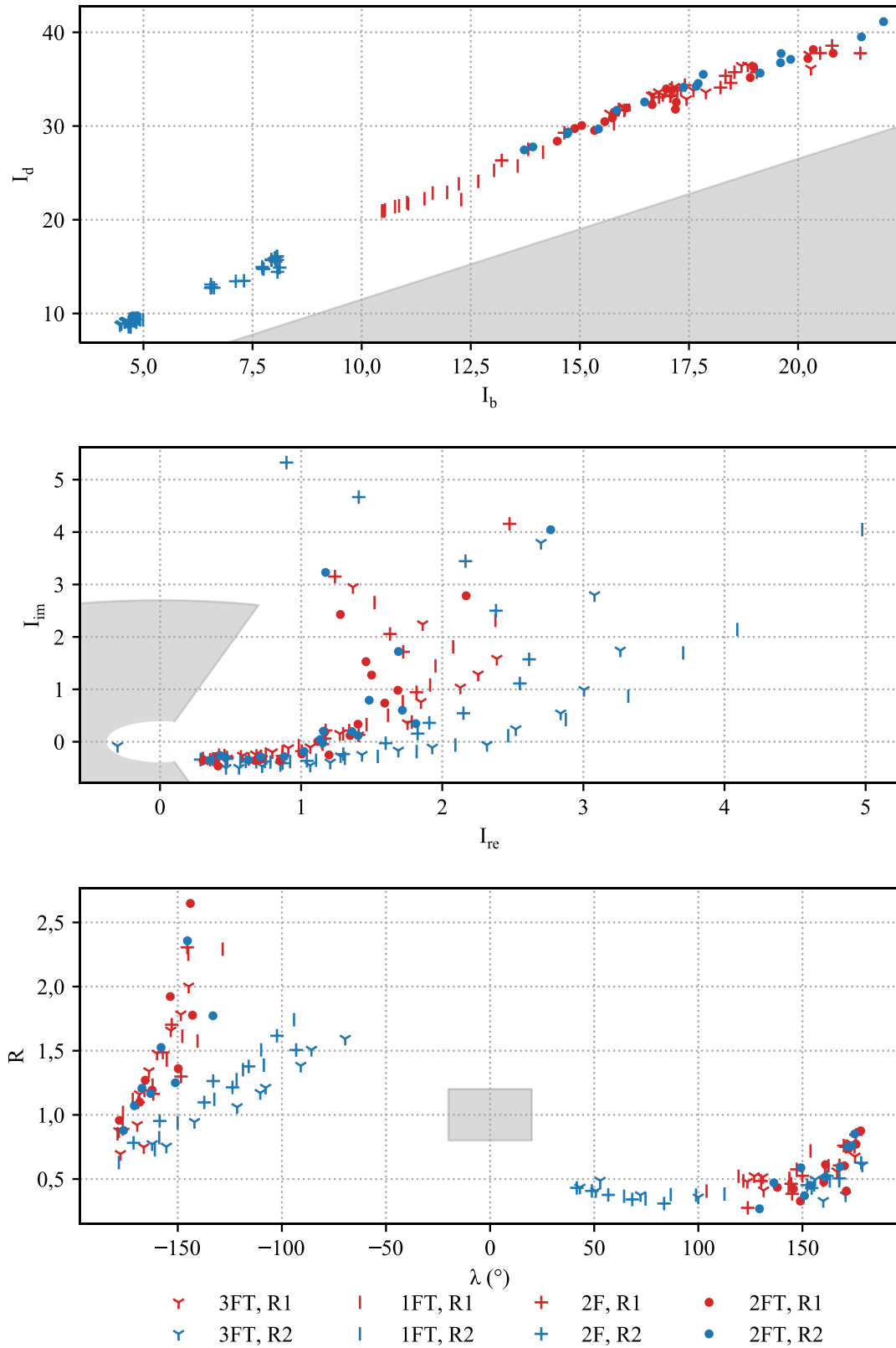


Figura 4.11 Pontos observados pelos relés antes da sinalização de *trip*.

A característica da proteção de plano α pode ser otimizada, visando melhorar a sua velocidade, se verificadas as trajetórias de alguns dos defeitos internos e externos. A Figura 4.12 mostra o desempenho dessa proteção para o defeito cujo ponto de operação do relé encontra-se mais próximo do centro do plano (0, 0) e no semiplano esquerdo. Para esse caso, observa-se a demora na operação da proteção (63,5 ms após aplicação do defeito) e que o ponto observado pelo relé sai da região de restrição três vezes, retornando duas vezes antes do *trip*. Para esse caso em particular, a redução do ajuste do ângulo α ou a diminuição do ajuste do raio (que levaria ao aumento do raio interno) poderia aumentar a velocidade do relé. A Figura 4.13, por outro lado, mostra um caso em que o ponto observado pelo relé excursiona fora da região da restrição e é observado nas proximidades da característica antes do *trip*. Ambas as figuras sugerem, então, que uma redução do ângulo α pode vir a ser benéfica para a caracterização de uma falta.

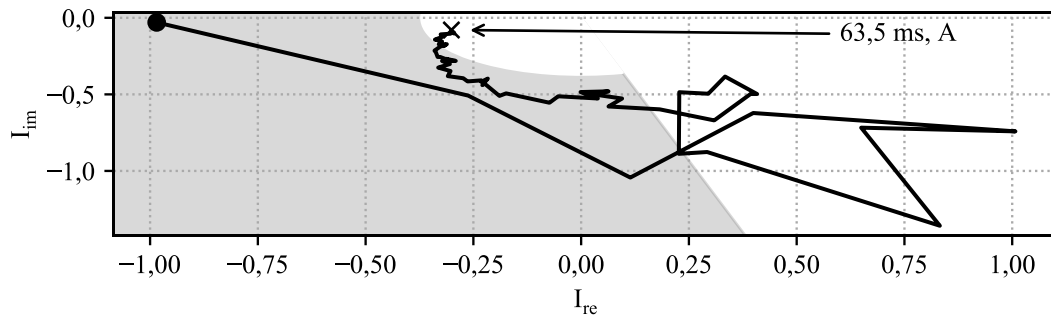


Figura 4.12 Defeito trifásico à 5% de distância do terminal transmissor através de 250 Ω .

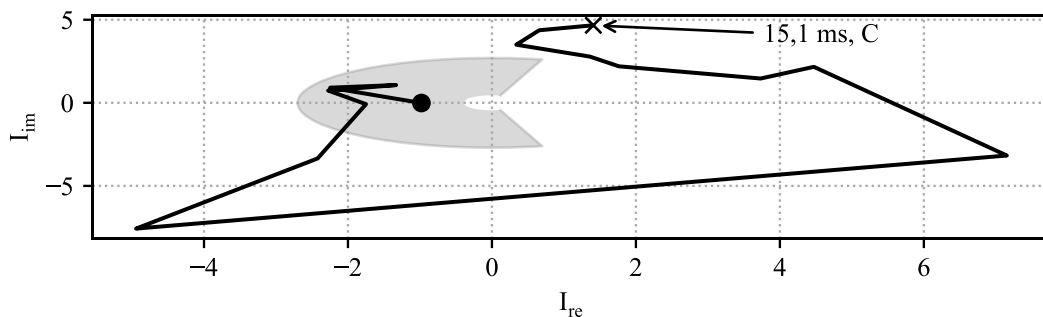


Figura 4.13 Defeito bifásico à 10% de distância do terminal receptor através de 250 Ω .

A característica $R\lambda$, por outro lado, não possui a mesma flexibilidade quanto ao ajuste da sua característica. A Figura 4.14 mostra a trajetória para dois defeitos trifásicos em diferentes pontos da LT. Tão logo ocorre um defeito, o ponto observado pela proteção move de (0°, 1) e oscila ao redor de um ponto. A atuação da proteção não é instantânea pois uma das condições de *trip*, além do *pickup* de corrente diferencial, é a da

convergência da distância estimada. Nesses casos, foi adotado como critério de convergência uma diferença máxima de 5% entre duas distâncias calculadas consecutivamente. Um aumento da tolerância de convergência poderia resultar em tempos de atuação mais rápidos.

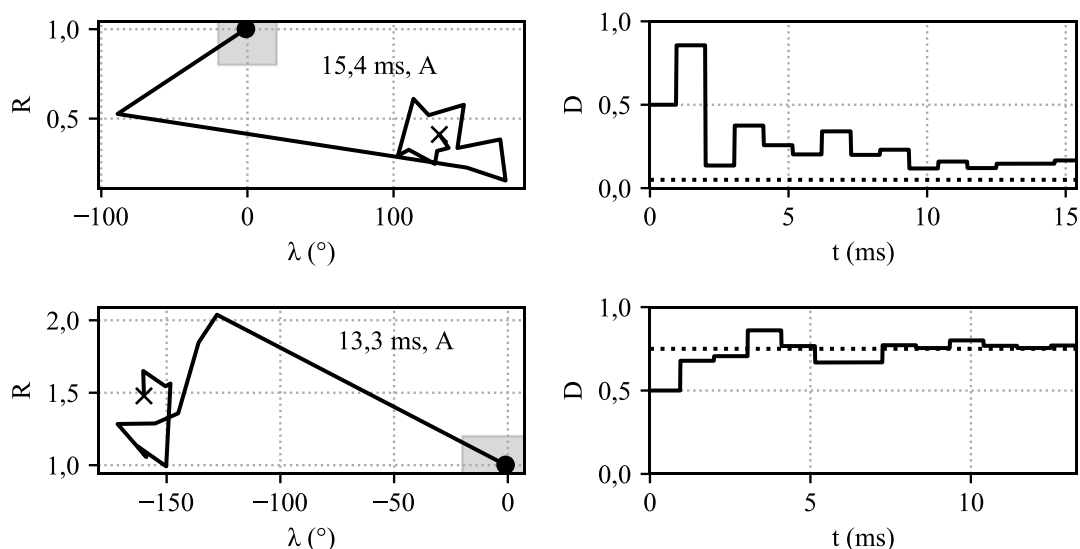


Figura 4.14 Plano $R\lambda$ e distância estimada para defeitos trifásicos através de 10Ω à 5% (superior) e à 75% de distância do terminal receptor.

Visto que todas as proteções testadas atuaram corretamente para todos os defeitos internos, outro aspecto que deve ser comparado é a velocidade das proteções em identificar um defeito. A Tabela 4.9 contém os tempos médios de identificação de defeito interno para diferentes tipos de curtos-circuitos. É possível concluir que as proteções de plano α e de restrição percentual obtiveram os melhores tempos médios, de aproximadamente 13 ms após a aplicação do defeito. A proteção do plano $R\lambda$, na média, identificou o defeito 5 ms após as demais proteções.

Tabela 4.9 Tempos de identificação de defeito (ms)

Defeito	Rf	Plano α	$I_b \times I_d$	$R\lambda$	Número de casos
3FT	R1	10,950	10,95	12,717	18
1FT	R1	13,925	14,042	20,050	18
2FT	R1	13,925	14,042	20,050	18
2F	R1	14,100	14,450	22,792	18
Média		13,225	13,371	18,902	Total: 72

A razão dessa diferença pode ser investigada se observados os critérios para operação da proteção do plano $R\lambda$: *pickup* de corrente diferencial, convergência do estimador de distância e lugar geométrico na característica da proteção. O primeiro

critério é compartilhado com as demais proteções, portanto não participaria da demora na atuação somente dessa proteção. Os demais critérios merecem ser analisados e a análise feita anteriormente sobre os defeitos da Figura 4.14 indicam que a diferença pode estar no estimador de distância.

A Figura 4.15 mostra a distância estimada pela característica $R\lambda$ para diferentes tipos de defeitos a uma mesma distância na LT protegida (75% do terminal receptor). Observa-se que, após 20 ms, não há convergência do estimador para a distância real. O algoritmo assume a convergência quando duas estimativas seguidas diferirem em menos de 5% o que ocorre com dificuldade devido à natureza oscilatória da resposta. Todas as estimativas produziram um comportamento transitório inicial dentro dos primeiros 20 ms de defeito, com amplitudes similares e uma oscilação mais lenta que tende a desaparecer após 80 ms. A estimativa relativa ao defeito 1FT se mostrou aquela com oscilação lenta de maior amplitude, com frequência de aproximadamente 110 Hz. A oscilação lenta é originária da corrente medida, como mostra a Figura 4.16.

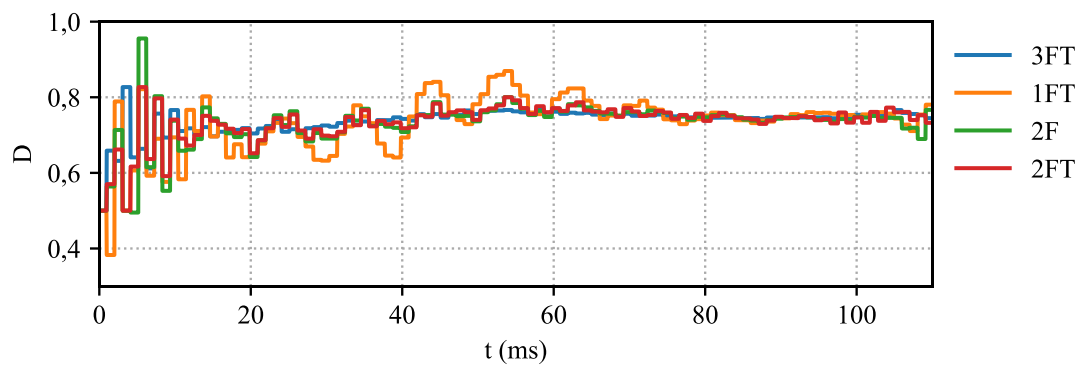


Figura 4.15 Distância estimada para diferentes tipos de defeitos à 75% do terminal Oriximiná.

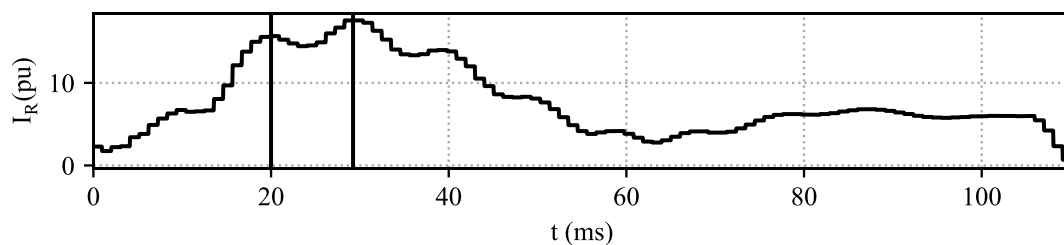


Figura 4.16 Módulo da corrente medida no terminal Oriximiná, destacando picos sucessivos para o defeito 1FT.

As oscilações encontradas no estimador de distância podem ser explicadas ao se analisar a forma de onda da corrente de defeito. A Figura 4.17 mostra as correntes secundárias medidas durante o defeito 1FT, e é possível nela observar o comportamento

ressonante das correntes durante o defeito. Enquanto pelo terminal Oriximiná (I_R) é transmitida uma corrente de aspecto indutivo, pelo terminal Silves (I_S) a corrente é capacitiva e apresenta comportamento ressonante. O seu valor máximo ocorre 50 ms da aplicação do defeito.

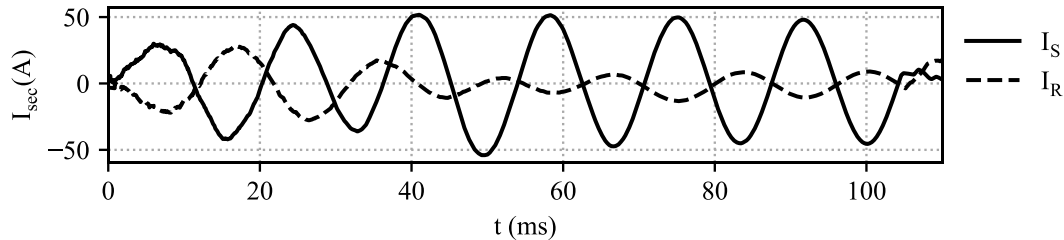


Figura 4.17 Correntes secundárias nos terminais da LT protegida.

4.6.2 Defeito externo

O defeito trifásico na LT paralela, de resistência R1 e uma distância de 25% do terminal Oriximiná, foi um dos defeitos para os quais as três filosofias de proteção atuaram incorretamente (4 casos ou 2,8%). A Figura 4.18 mostra o tempo de atuação para as diferentes características, onde o defeito ocorreu aos 40 ms. Em primeira análise, são verificadas as características das proteções.

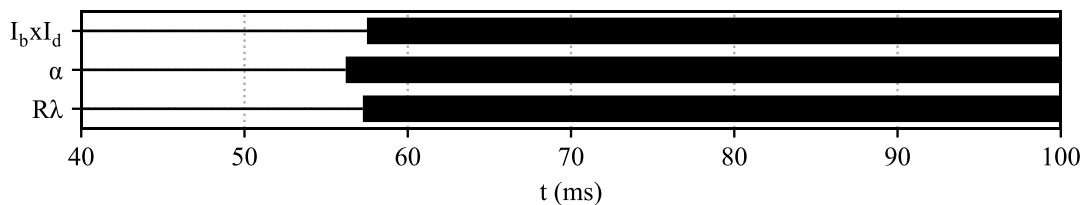


Figura 4.18 Tempo de atuação das proteções diferenciais para defeito externo em LT paralela.

A Figura 4.19 mostra o plano α e o plano $I_b \times I_d$. Para o plano α , a figura indica oscilação no ponto observado de tal forma que ele saiu da região de restrição e permaneceu até a sinalização do *trip*. Para o plano $I_b \times I_d$, há a tendência de o ponto observado sair da região de restrição com um comportamento menos oscilatório que aquele para o plano α , com um aumento nas correntes (I_b) e na diferença fasorial entre elas (I_d).

A Figura 4.20 mostra, na esquerda, o plano $R\lambda$ e os pontos observados durante o defeito até a sinalização do *trip*. Assim como o plano α , o ponto observado é oscilatório e sai da região de restrição. Visto que a análise da característica do plano $I_b \times I_d$ indicou

um comportamento de aumento da corrente diferencial, essa é mostrada na parte superior direita da Figura 4.20. Observa-se o aumento da corrente diferencial para além do ajuste de *pickup*, ficando acima do mesmo. A Figura 4.20 apresenta ainda as variações no tempo das variáveis R e λ , mostrando uma tendência das duas de oscilarem fora de seus limites. Visto que o aspecto oscilatório se reproduz no plano α e no plano $R\lambda$, as correntes medidas pelos relés devem ser observadas.

A Figura 4.21 mostra as correntes terminais medidas pelos TCs dos relés e, na parte inferior, as correntes medidas pelos relés após filtragem. Fica evidente através dessa última a origem da oscilação nos planos α e $R\lambda$. As correntes instantâneas demonstram comportamento pouco senoidal, sobretudo a corrente I_S , do terminal de menor nível de curto-circuito. O efeito é de se obter o aspecto oscilatório observado na corrente I_S filtrada, devido ao transitório de alta frequência presente nas correntes instantâneas. Esse efeito não é tão aparente para defeitos internos analisados na Seção 4.6.1, como na corrente da Figura 4.16, mas verifica-se o impacto no estimador de distância para defeitos internos na Figura 4.15.

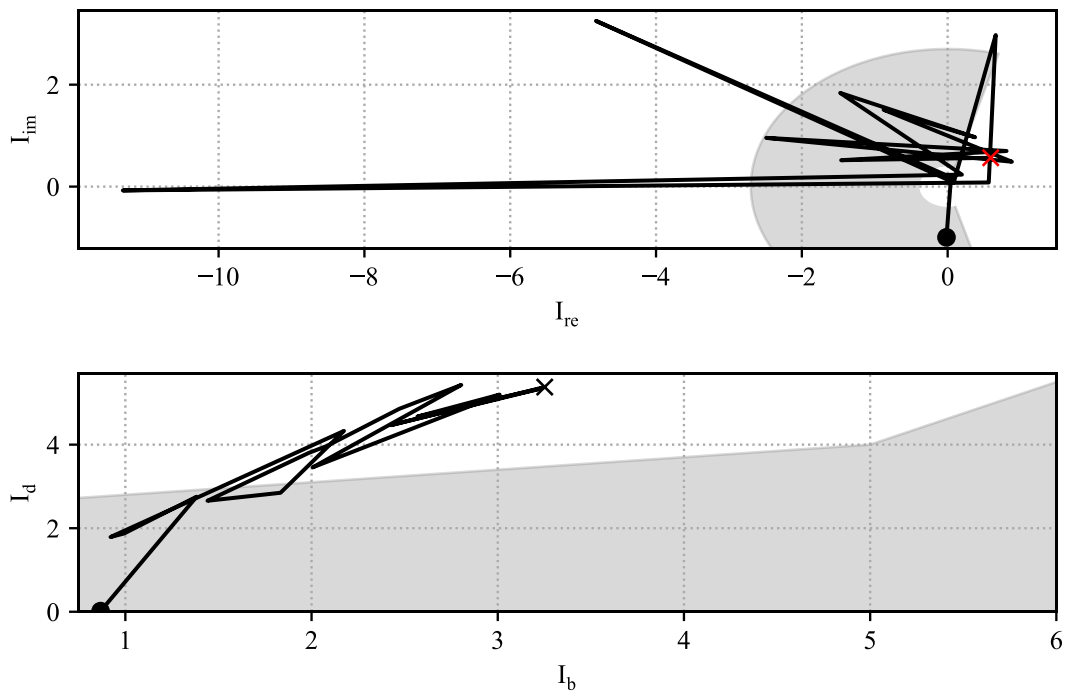


Figura 4.19 Planos α e $I_b \times I_d$ para defeito externo em LT paralela.

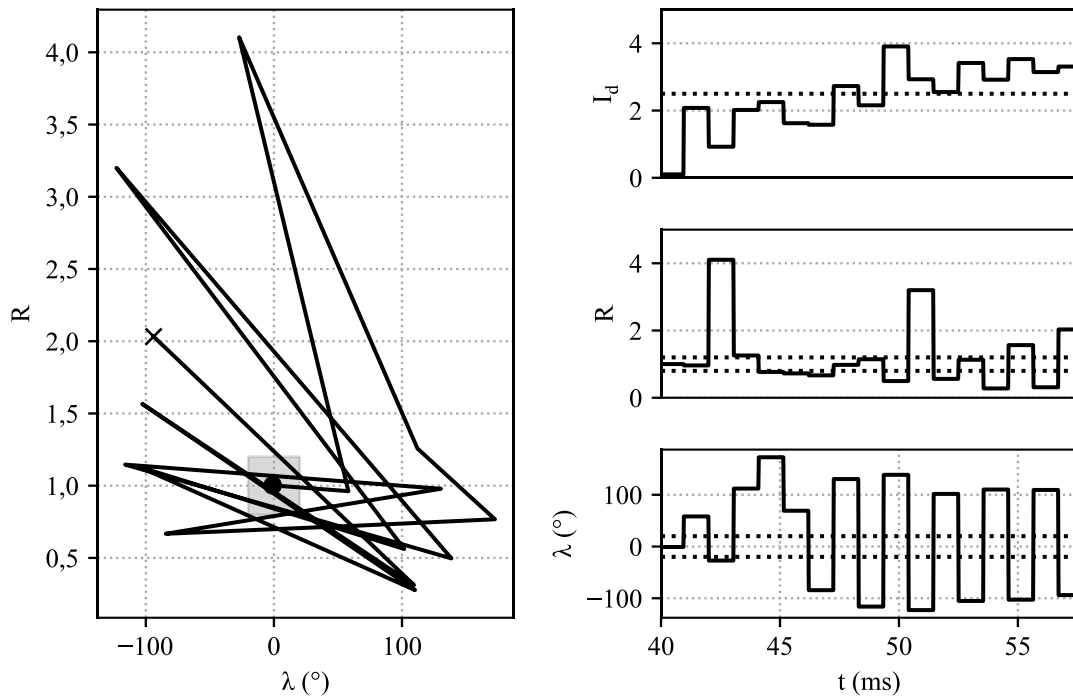


Figura 4.20. Plano $R\lambda$, corrente diferencial, variação de R e λ no tempo para defeito externo em LT paralela.

Visto que não há atrasos de comunicação modelados, as medidas filtradas estão alinhadas no tempo e observam a mesma alta frequência de oscilação em fase. Isso justifica o comportamento oscilatório não se reproduzir no cálculo da corrente diferencial.

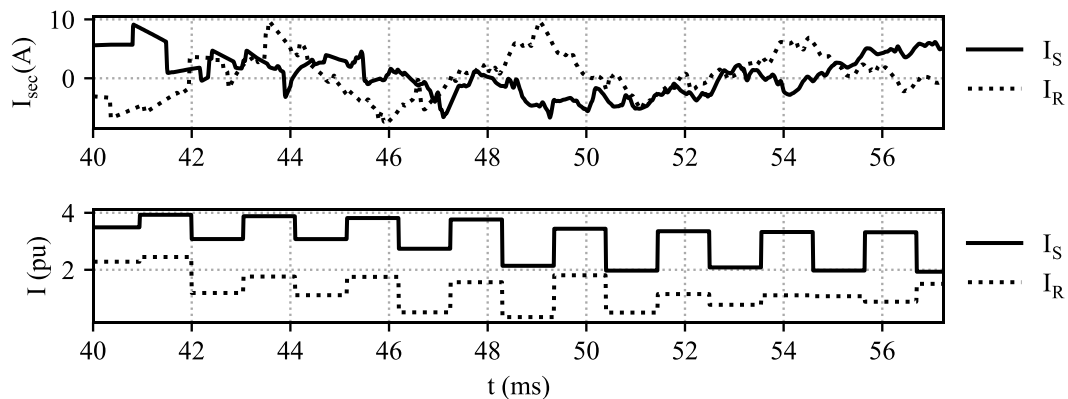


Figura 4.21 Correntes nos TCs e medidas nos relés terminais para defeito externo em LT paralela.

Os resultados dessa seção indicam que, para melhor segurança contra defeitos externos e estabilização das características, é necessário melhorar a filtragem dos sinais medidos pelos relés. A Seção 4.6.3 apresenta a solução adotada e os resultados para a nova configuração.

4.6.3 Resultados da proteção com filtragem dos sinais de entrada

Os resultados da Seção 4.6.2 indicam que, nos primeiros milissegundos do início de um defeito, as proteções observam medidas não senoidais e encontram dificuldades na extração da componente da frequência fundamental. Embora a seletividade da proteção não seja prejudicada, para os defeitos internos, a segurança é comprometida.

Com o objetivo de projetar um filtro que elimine as componentes harmônicas presentes nos sinais de entrada dos relés, pode-se avaliar o conteúdo desses sinais, sobretudo as frequências envolvidas nos primeiros milissegundos após o defeito.

É esperada a presença de transitórios de baixa e de alta frequência durante manobras e defeitos no sistema. As componentes de alta frequência são devidas às indutâncias e capacitâncias da rede, enquanto as de baixa frequência podem ser originadas de condição ressonante entre os capacitores série e as indutâncias série da rede [5]. As altas frequências podem ter componentes de até 1000 Hz com até 15% da magnitude da frequência fundamental [5].

Como verificado na análise do desempenho da velocidade da proteção na Seção 4.6.1, durante um defeito, surgem componentes oscilatórias de alta e baixa frequência. Como foi observado naquela Seção, componentes de alta frequência atrasam a detecção do defeito pelo relé, visto que diversas das grandezas demoram a convergir para valores que refletem uma condição de defeito. Na Seção 4.6.2 é observado que a proteção tem seu desempenho afetado por essas componentes de alta frequência, que provocam erros no cálculo das correntes diferenciais e nas grandezas de operação dos relés.

A ferramenta utilizada para encontrar as frequências que afetam as medições dos relés é a do espectrograma, baseado na aplicação da técnica de *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Essa técnica divide um sinal em pequenos segmentos de mesmo comprimento no tempo e calcula a transformada de Fourier para cada segmento [64]. Uma forma de visualizar os resultados da STFT é através do espectrograma, que mostra o espectro contínuo de frequências de um sinal de interesse cujas propriedades (amplitude e frequência) variam com o tempo [64]. Ele indica a energia de uma determinada frequência dentro de uma janela temporal discreta com uma escala de cores.

O propósito da janela na STFT é de limitar a extensão da sequência a ser transformada, de maneira a manter as características espectrais (amplitude e frequência) constantes na duração da janela. Quanto mais rápidas as mudanças nas características do sinal, menor deve ser a janela, permitindo observar as mudanças com o tempo. Com a

redução da janela, também e reduzida a resolução na frequência, isto é, dificulta a nitidez de alguns componentes do sinal. Assim, há um compromisso entre a resolução na frequência e a resolução no tempo [64]. Para o propósito de ajuste da proteção, foi considerada uma janela de um ciclo de 60 Hz, o que permitirá determinar frequências maiores com alguma resolução. Não é uma ferramenta precisa para se detectar quais frequências fazem parte do sinal, mas fornece subsídios para projetar um filtro. Outras aplicações da STFT relacionadas a proteção incluem alguns trabalhos [65, 66] que utilizam a STFT para classificação e detecção de defeitos de alta impedância, respectivamente.

Utilizando o mesmo caso de defeito externo analisado na Seção 4.6.2, a Figura 4.22 mostra a corrente secundária do terminal receptor e o espectro dessa corrente no tempo com a indicação da frequência fundamental de 60 Hz em vermelho. A escala de cores do espectrograma varia do mais escuro ao mais claro conforme aumenta a energia naquela determinada faixa de frequências. A largura das faixas no tempo foi selecionada para acomodar um período de 60 Hz, não sendo esse espectrograma, portanto, ideal para verificar frequências inferiores à fundamental. Tal análise exigiria ainda uma simulação mais prolongada de maneira que fosse possível observar as oscilações subsíncronas.

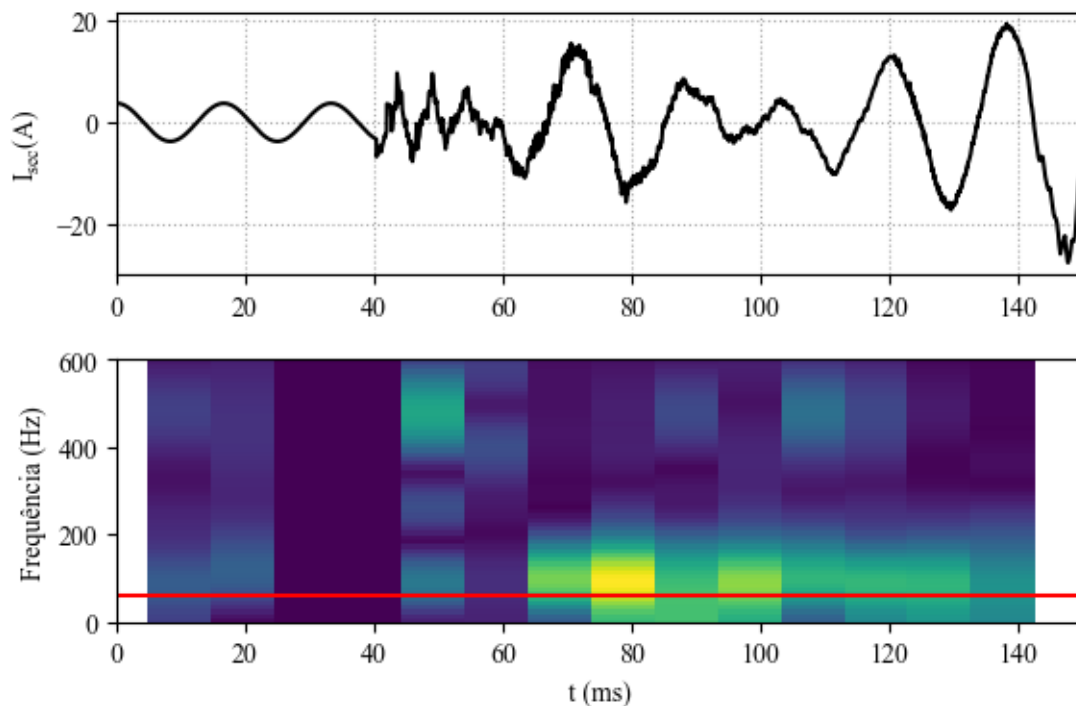


Figura 4.22 Espectrograma do sinal de corrente medida pelo TC do terminal receptor, fase C.

Descartados o espectro anterior à aplicação do defeito ($t = 40$ ms), o espectrograma da Figura 4.22 mostra que há uma alta energia relativa na faixa de frequências de 400 a 600 Hz durante os primeiros 20 ms do defeito.

Após a os primeiros 20 ms do defeito, há maior concentração de energia para frequências abaixo de 200 Hz, com ocasionais concentrações na faixa entre 400 e 600 Hz. Para eliminar as componentes na faixa de 400 a 600 Hz, foi selecionada a frequência de corte de 200 Hz (igual à metade da menor frequência a ser eliminada) e considerado um filtro passa-baixas. Essa frequência ainda assegura que a própria frequência fundamental não seja atenuada. Por outro lado, a filtragem com uma frequência de corte muito baixa pode introduzir atraso nas medições da frequência de 60 Hz e afetar a velocidade da proteção [35].

Considerando a taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo (ou 960 Hz), outro cuidado necessário é a da utilização de um filtro *anti-aliasing*. Pelo teorema de amostragem de Nyquist, para evitar o efeito de *aliasing*, o filtro deve possuir frequência de corte de até metade da frequência de amostragem (480 Hz) [64, 67, 32]. A escolha da frequência de 200 Hz também atende a esse objetivo.

O tipo de filtro selecionado foi o passa-baixas tipo *Butterworth* de segunda ordem, implementado na forma de um filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) por ser um filtro de fácil projeto [64]. O filtro antecede os filtros de DFT das medidas de tensão e corrente de entrada dos relés, agindo sobre grandezas instantâneas.

Com a adição dos filtros, todos os casos da Seção 4.5 foram reanalisados e seu desempenho verificado. Mais uma vez, a proteção atuou corretamente para todos os defeitos internos, como fica evidente na Figura 4.23, mas com desempenho superior em termos de velocidade. A Tabela 4.10 indica os tempos médios de atuação das proteções e, em comparação com a Tabela 4.9, evidencia a melhora no tempo de resposta da proteção, com algumas proteções atuando, em média, quase na metade do tempo em que atuariam sem a filtragem.

Tabela 4.10 Tempos de identificação de defeito (ms)

Defeito	Rf	Plano α	$I_b \times I_d$	$R\lambda$	Número de casos
3FT	R1	7,000	7,000	8,575	18
1FT	R1	10,092	10,150	10,791	18
2FT	R1	7,000	7,000	11,200	18
2F	R1	7,700	8,867	12,425	18
Média		7,948	8,254	10,748	Total: 72

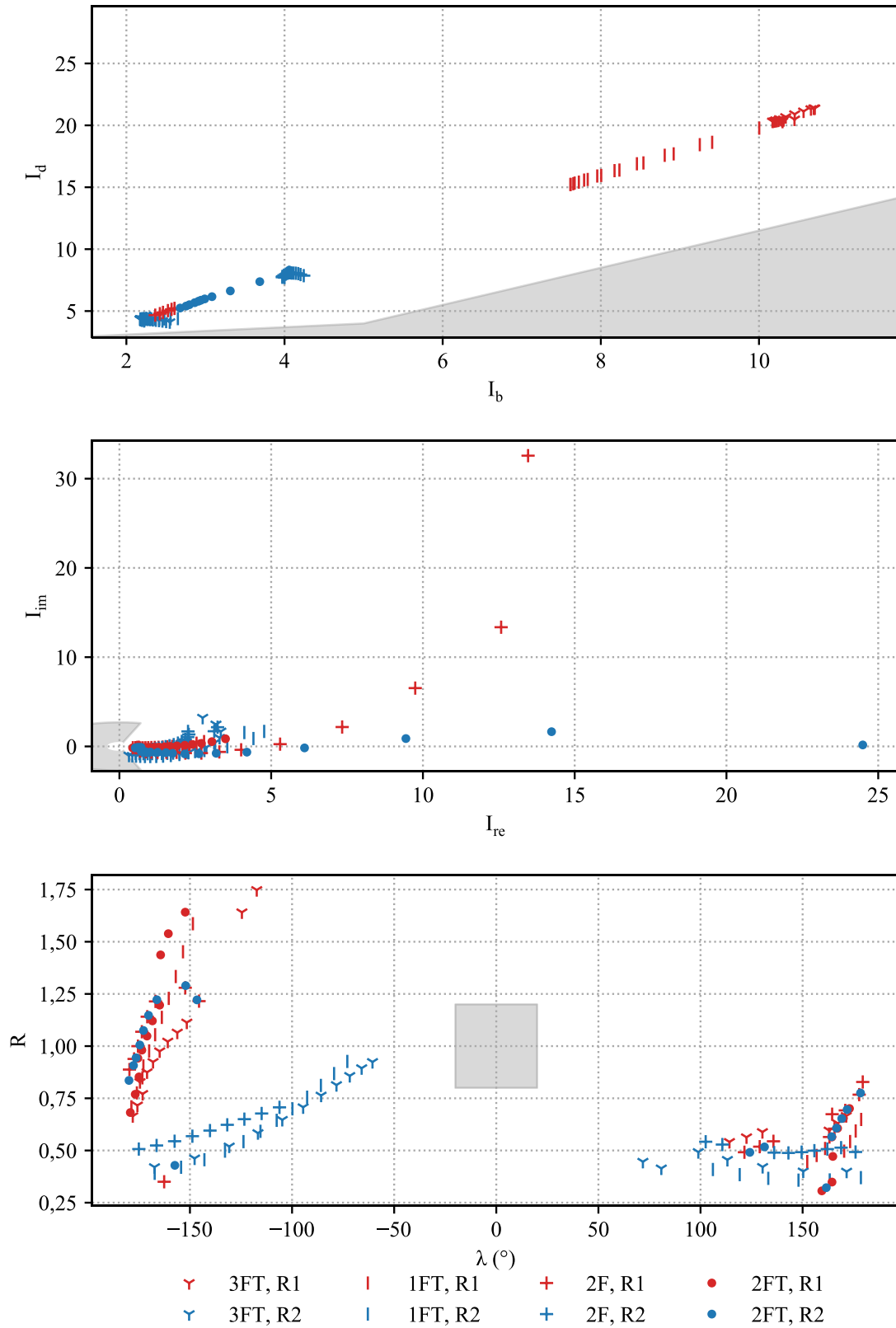


Figura 4.23 Pontos observados pelos relés antes da sinalização de *trip*, após mudança da filtragem.

Finalmente, verificou-se que as proteções não atuaram incorretamente para nenhum defeito externo dentre aqueles analisados. Assim, conclui-se que o ajuste da proteção requer também uma análise do comportamento transitório observado pelos relés afim de garantir também a adequação dos seus componentes. Com os desempenhos das diferentes filosofias de proteção diferencial comparados, na Seção 4.7, serão comparados os desempenhos da proteção diferencial e da proteção de distância.

4.7 Comparação com proteção de distância

O desempenho da proteção de distância de primeira zona para LT com compensação série será analisado e comparado com o da proteção diferencial para os mesmos casos. As seções a seguir abordam os problemas que surgem da compensação série e que afetam a proteção de distância.

Para o mesmo conjunto de defeitos tratados na Seção 4.6.3, considerando também a mesma filtragem da entrada, a proteção de distância pode ser avaliada. Os elementos de distância com medidas tipo fase-terra e fase-fase foram avaliados. A Tabela 4.11 apresenta os resultados da taxa de atuação para defeitos da proteção de distância, sendo que “0” significa que não houve atuação. Nessa tabela, os relés nos extremos da LT foram considerados em esquema DUTT, ou seja, a atuação de um ou do outro ocasionará no *trip* da LT. A coluna “Mho F-T” indica a atuação dos elementos de terra, “Mho F-F” dos elementos de fase e “Mho total” o caso em que ambos os elementos atuaram simultaneamente.

Em complemento a Tabela 4.11, a Figura 4.24 mostra o ponto observado após a detecção de um defeito interno pelos relés de distância. O desempenho da proteção foi satisfatório para a resistência de defeito baixa R1. A atuação da proteção para defeitos além dos seus terminais, sobretudo na LT adjacente e na LT paralela se justifica com o sobrealcançe da proteção. Em ambas as condições não houve o *bypass* dos BCS e o defeito foi classificado como um defeito interno pela proteção.

De uma forma geral, fica evidente a dificuldade da proteção para atuar para defeitos internos de maior impedância. Esse problema é solucionável com uma seleção adequada da característica quadrilateral, que permite o ajuste do alcance resistivo, como apresentado na Subseção 2.3.1.

Finalmente, em alguns dos casos de defeito interno de alta resistência foram verificadas inversão de corrente, dessensibilizando a proteção de distância. Alguns desses casos serão analisados na Subseção 4.7.1. Alguns dos defeitos externos provocaram a

inversão de tensão, levando a operação incorreta da proteção da LT. Alguns desses casos são analisados na Subseção 4.7.2. Os locais de aplicação dos defeitos podem ser observados na Figura 4.2.

Tabela 4.11 Atuação das proteções para defeitos internos e externos

Local	Defeito	Rf	Mho F-T (DUTT)	Mho F-F (DUTT)	Mho total (DUTT)
LT próxima	3FT	R1	0	0	0
	1FT	R1	11,1%	0	11,1%
	2FT	R1	38,9%	66,6%	66,6%
	2F	R1	16,7%	38,9%	38,9%
LT paralela	3FT	R1	11,1%	55,5%	55,5%
	1FT	R1	0	0	0
	2FT	R1	44,4%	83,3%	83,3%
	2F	R1	33,3%	72,2%	72,2%
Interno	3FT	R1	100%	100%	100%
		R2	0	0	0
	1FT	R1	100%	38,9%	100%
		R2	0	0	0
	2FT	R1	100%	100%	100%
		R2	100%	100%	100%
	2F	R1	100%	100%	100%
		R2	0	0	0

4.7.1 Inversão de corrente

O fenômeno da inversão de corrente, tal como definido na Seção 2.5.1, é caracterizado pela corrente de curto-circuito interno na LT com sentido para fora da LT. É consequência de a impedância do sistema até o ponto de o defeito ser de natureza capacitiva.

Alguns dos casos analisados provocaram inversão de corrente e a incorreta atuação da proteção. Dois desses casos são indicados na Figura 4.25.

O primeiro defeito analisado indicado na Figura 4.25 é um curto-circuito monofásico de resistência de 250Ω a 90% do terminal receptor. A Figura 4.26 apresenta o lugar geométrico do fasor de corrente no terminal S e o plano R-X observado pelo elemento de terra nesse terminal. É possível observar que a corrente, durante os 100 ms de aplicação do defeito, jamais inverte de sentido em relação ao sentido pré-falta (grafado com a reta pontilhada no plano polar). Em um dado momento, o fasor assume valor próximo ao valor pré-falta. O efeito é que, segundo o plano R-X da Figura 4.25, o relé nesse terminal irá observar o defeito para trás da LT.

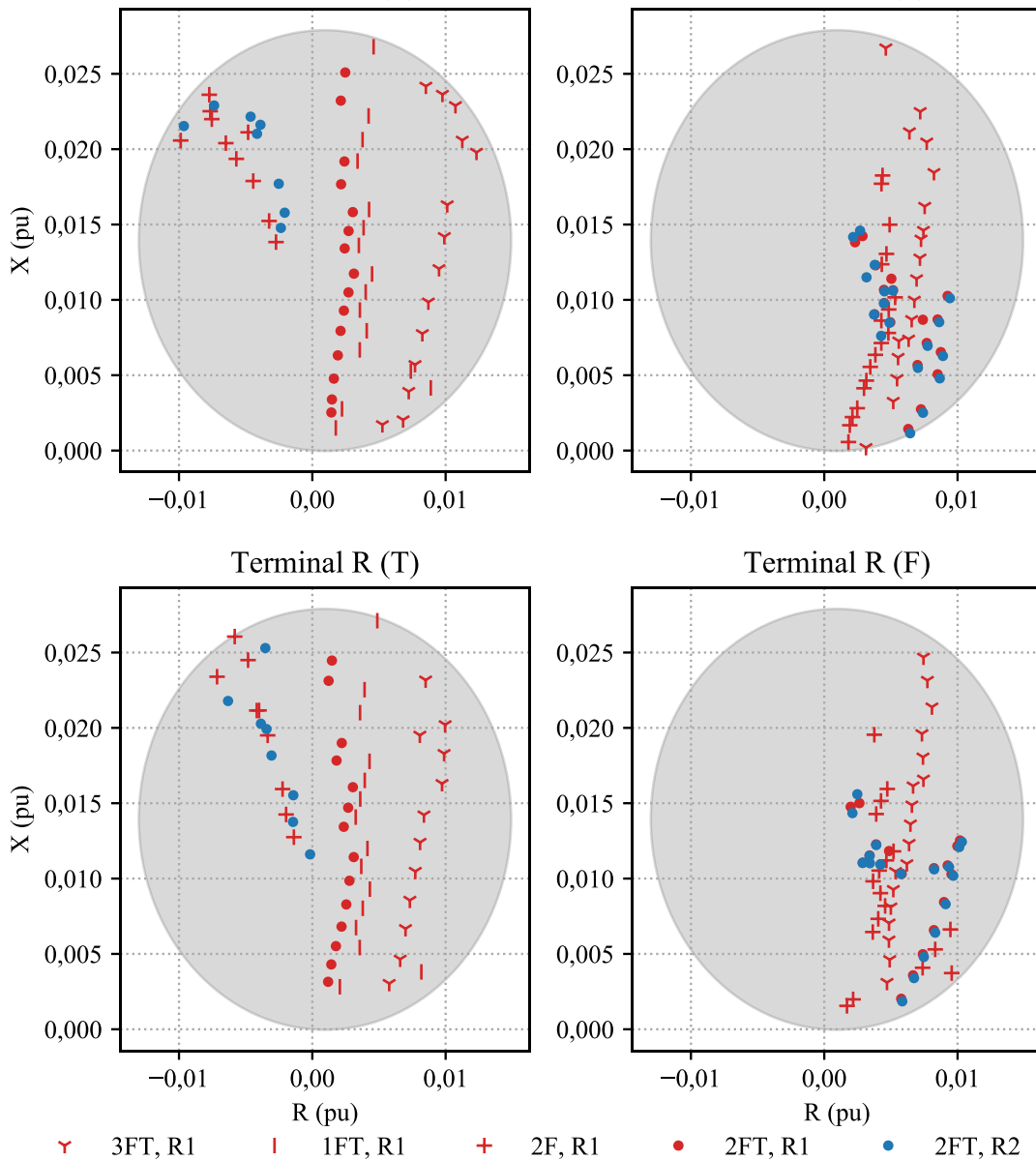


Figura 4.24 Pontos observados pelos relés nos terminais S e R antes da sinalização de *trip* para defeitos internos.

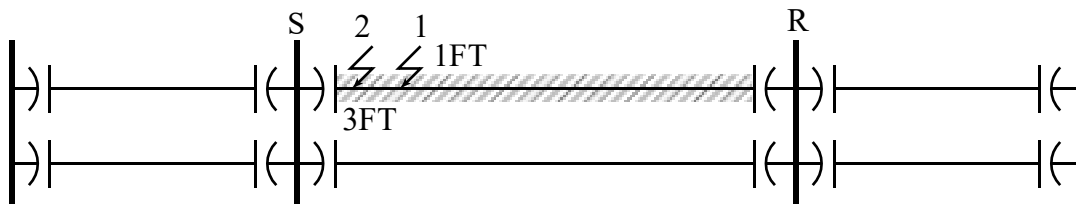


Figura 4.25 Localização de dois defeitos que provocaram inversão de corrente.

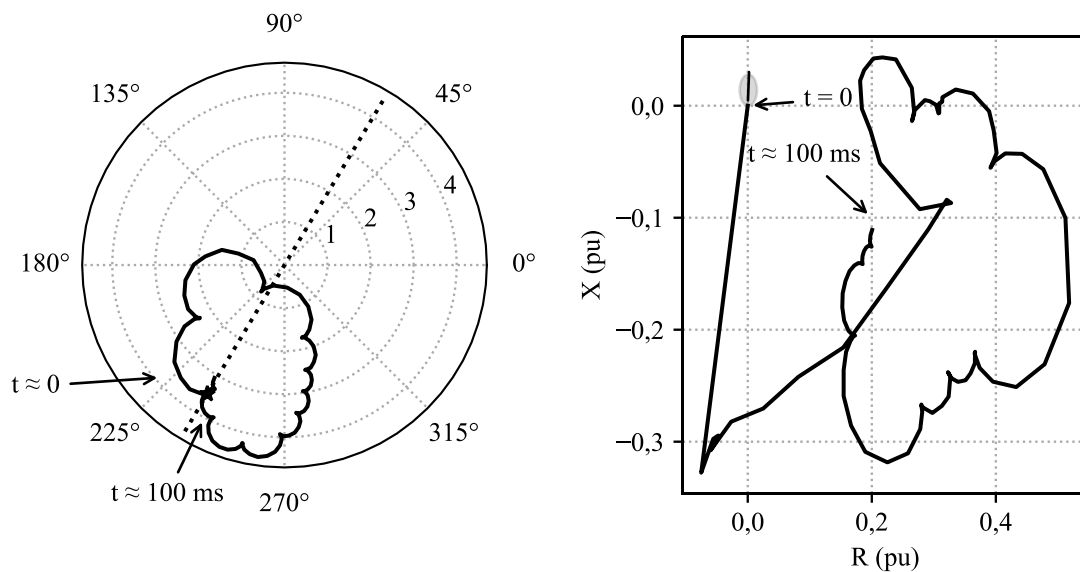


Figura 4.26 Localização do fasor de corrente da fase C e plano R-X do relé do terminal S para o defeito 1 da Figura 4.25.

O segundo defeito analisado da Figura 4.25 é um defeito trifásico resistência de 250Ω a 95% do terminal receptor R. A Figura 4.27 mostra o lugar geométrico do fasor de corrente na fase C e o plano R-X observado pelo elemento de terra da fase C nesse terminal. Para esse caso, a corrente muda de sentido temporariamente, o que é observado no plano R-X para o lugar geométrico de valores positivos de X. Entretanto, o módulo da corrente nessas condições é inferior ao módulo da corrente de carga, tendo por consequência que o relé observe o defeito como uma carga. Finalmente, a corrente novamente inverte de sentido, para o sentido da corrente pré-falta e termina no semiplano inferior do plano R-X.

A Figura 4.28 mostra o lugar geométrico nos planos das proteções diferenciais para o defeito do caso 1 e a Figura 4.29 para o caso 2. Essas figuras mostram as condições durante os 100 ms de defeito, mesmo que os relés tenham sido sensibilizados e indicado *trip* para os defeitos internos (ponto da sensibilização marcado com um círculo). Observa-se que todos eles atuaram corretamente, como era de se esperar dados os resultados da Seção 4.6.3, antes de que a inversão de corrente pudesse ser observada e comprometer a sua operação.

Em alguns casos, como o que pode ser observado no plano de restrição percentual e no plano α da Figura 4.29, o relé pode voltar a observar um ponto dentro da sua região de restrição se houver a demora na sinalização do *trip*. Na característica de plano α , há a tendência de caracterizar o defeito na condição de *outfeed*, o que é esperado durante uma inversão de corrente. Na característica de restrição percentual, há uma tendência de

aumento da corrente I_b nessa condição, levando o ponto de operação de volta para a região de restrição. A proteção de plano $R\lambda$ se mostrou imune nos dois casos.

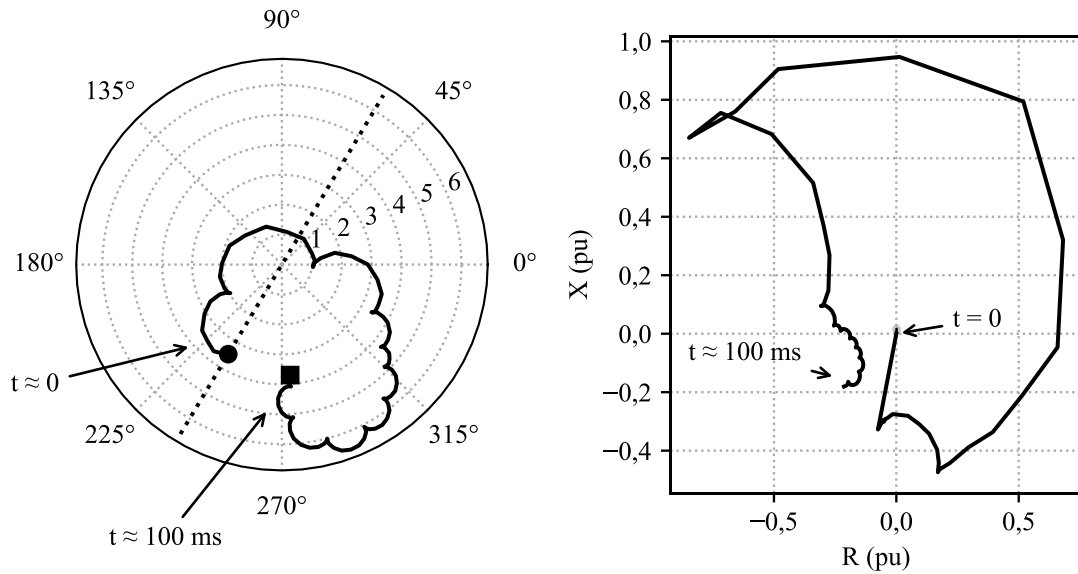


Figura 4.27 Locus do fasor de corrente da fase C e plano R-X do relé do terminal S para o defeito 2 da Figura 4.25.

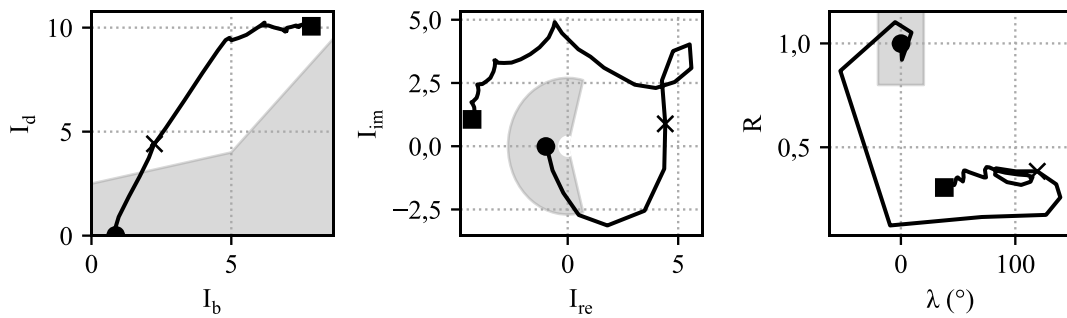


Figura 4.28 Planos das proteções diferenciais para o defeito 1.

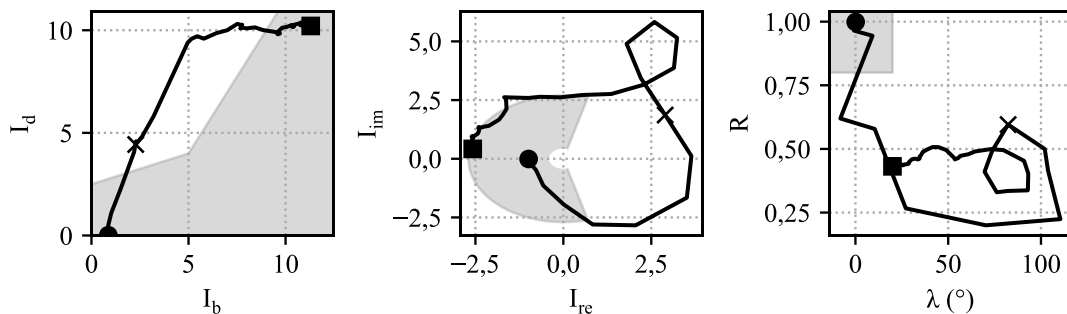


Figura 4.29 Planos das proteções diferenciais para o defeito 2.

Em geral, a inversão de corrente pode durar menos de um ciclo [17]. Em defeitos internos próximos ao capacitor, a impedância capacitiva pode superar a impedância

equivalente do sistema, levando a uma corrente de defeito capacitiva. Se essa corrente não provocar uma queda de tensão no capacitor de tal sorte que leve ao *bypass* pelo MOV e a sua retirada completa pelo *gap*, o fenômeno de inversão de corrente poderá acontecer. Nos dois exemplos analisados, ambos os BCSs da LT protegida não foram removidos pelos seus *gaps*. A Figura 4.30 mostra as correntes nos MOVs do capacitor próximo ao terminal cuja corrente inverteu, incapazes de sensibilizar a proteção de *gap* (ajustado para 8 kApico).

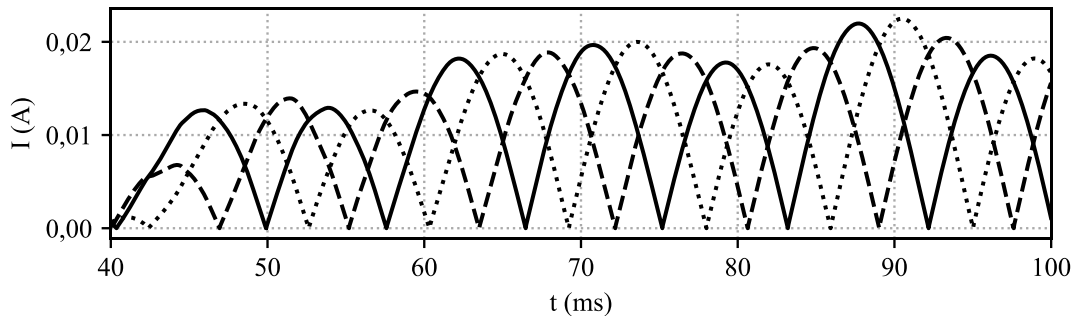


Figura 4.30 Correntes nos MOVs do terminal S durante o defeito 2 da Figura 4.25.

4.7.2 Inversão de tensão

O fenômeno da inversão de tensão, tal como definido na Seção 2.5.1, é caracterizado pela tensão em um terminal da LT durante um defeito se encontrar em oposição de fase em relação à tensão pré-falta. É consequência de a impedância desse terminal até o ponto de defeito ser de natureza capacitiva.

A Figura 4.31 indica os defeitos para os quais foram observadas as inversões de tensão. A condição não foi obtida para defeitos internos a LT pois, como observado na Seção 2.5.1, a localização dos pontos de medição dos relés não favorece essa condição.

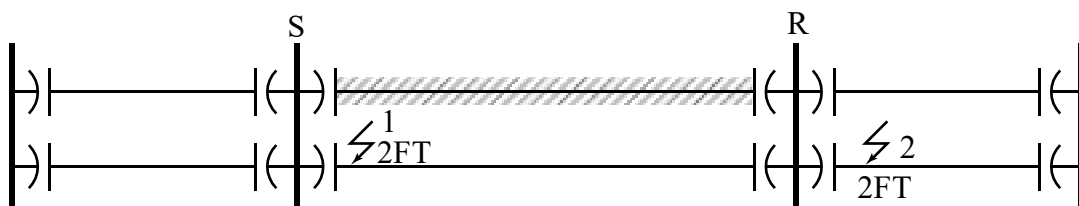


Figura 4.31 Localização de dois defeitos que causaram inversão de tensão na LT protegida.

O primeiro defeito da Figura 4.31 é um defeito bifásico para a terra através de 10Ω , a 5% do terminal S da LT paralela à LT protegida (externo). A Figura 4.32 mostra o lugar geométrico do fasor de tensão no terminal S da LT protegida e o plano R-X observado pelo relé de terra nesse terminal para esse defeito. O lugar geométrico do fasor

de tensão tem grafado uma reta com a fase da tensão pré-falta e é possível observar que a tensão, durante o defeito, alcança fase de 180° em relação à condição pré-falta. Enquanto o relé observava um defeito para fora e para trás de sua zona de proteção, no momento da inversão, ocorre troca do sinal da impedância e, em pouco tempo, o defeito passa ser observado para dentro da sua zona, ocasionando o falso *trip*.

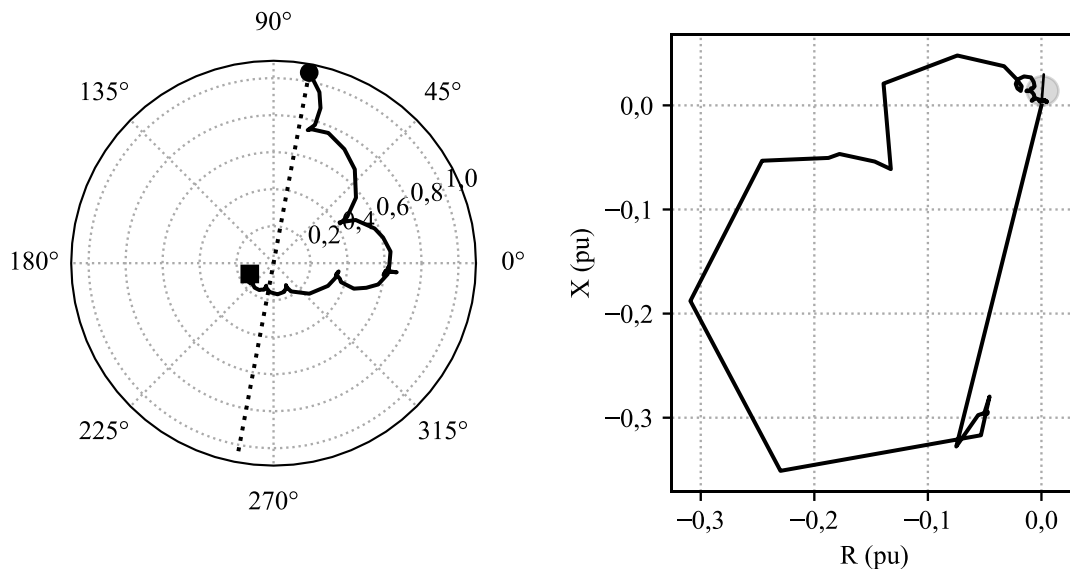


Figura 4.32 Locus do fasor de tensão da fase C e plano R-X do relé do terminal S para o defeito 1 da Figura 4.31.

Para esse caso, o ângulo da tensão observada entra em quadratura com o valor pré-falta após 20 ms da aplicação do defeito. Até que uma condição próxima a de inversão seja alcançada, são mais algumas dezenas de milissegundos do sistema em condição de defeito, como pode ser visto na Figura 4.33. Se a proteção do elemento sob defeito não atuar dentro desse tempo, a proteção da LT em análise atuará incorretamente.

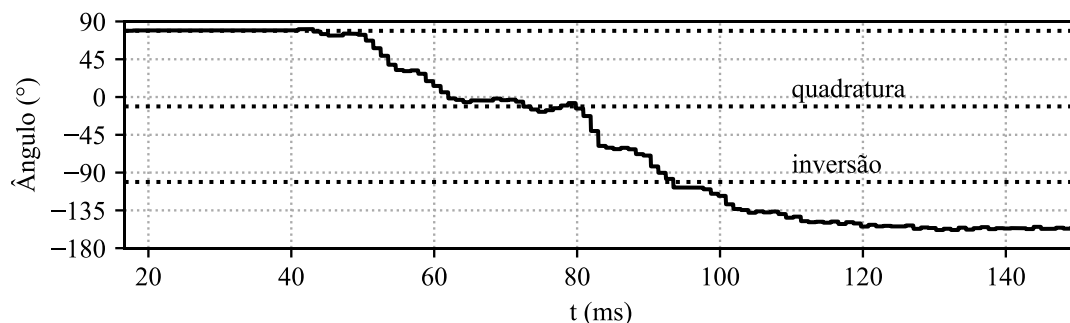


Figura 4.33 Variação do ângulo da tensão da fase C do terminal S com o tempo, com patamares da quadratura e inversão em relação ao valor pré-falta.

O segundo defeito da Figura 4.31 é um defeito bifásico para a terra através de 10Ω , a 25% do terminal R de LT próxima à LT protegida (externo). É um defeito

relativamente distante, mas que, como está localizado a jusante da LT protegida, que faz parte de um sistema radial, teve consequências nas grandezas dessa. A Figura 4.34 mostra o lugar geométrico do fasor de tensão no terminal R e do ponto observado pelo relé de terra nesse terminal para esse caso. Pode ser observado que o valor do módulo da tensão é reduzido até que ocorra a inversão. Assim como o ocorrido para o defeito anterior, quando ocorre a inversão, o relé passa a observar uma medida no semiplano superior e, em pouco tempo, observará o ponto dentro da sua zona, levando ao falso *trip*.

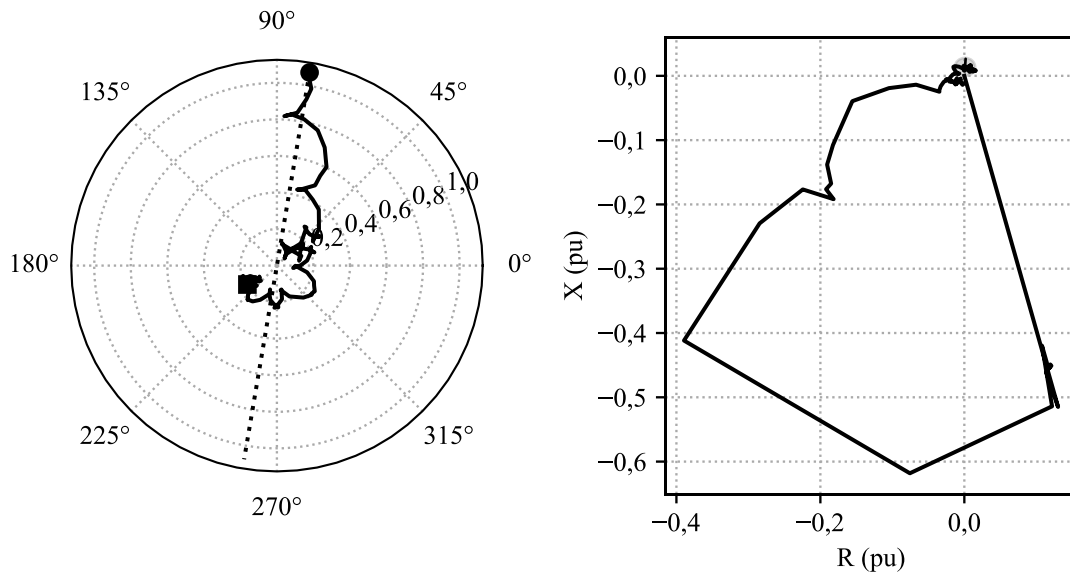


Figura 4.34 Locus do fasor de tensão da fase C e plano R-X do relé do terminal S para o defeito 2 da Figura 4.31.

As proteções diferenciais tendem a não serem afetadas pelo fenômeno de inversão de tensão, visto que as suas grandezas de atuação são as correntes terminais.

A Figura 4.35 mostra os planos das proteções diferenciais e nela fica evidente que o problema de inversão de tensão causa pouco ou nenhum impacto nessas proteções. Para o plano da proteção de restrição percentual, é observado um aumento na corrente passante I_b na LT, natural devido ao aumento das correntes de contribuição ao defeito. Embora o ponto observado no plano $R\lambda$ possa ser perturbado, a corrente diferencial não alcança o seu valor de *pickup* durante o defeito. Assim, ainda que ocorra a inversão de tensão, a proteção $R\lambda$ não é sensibilizada durante o defeito.

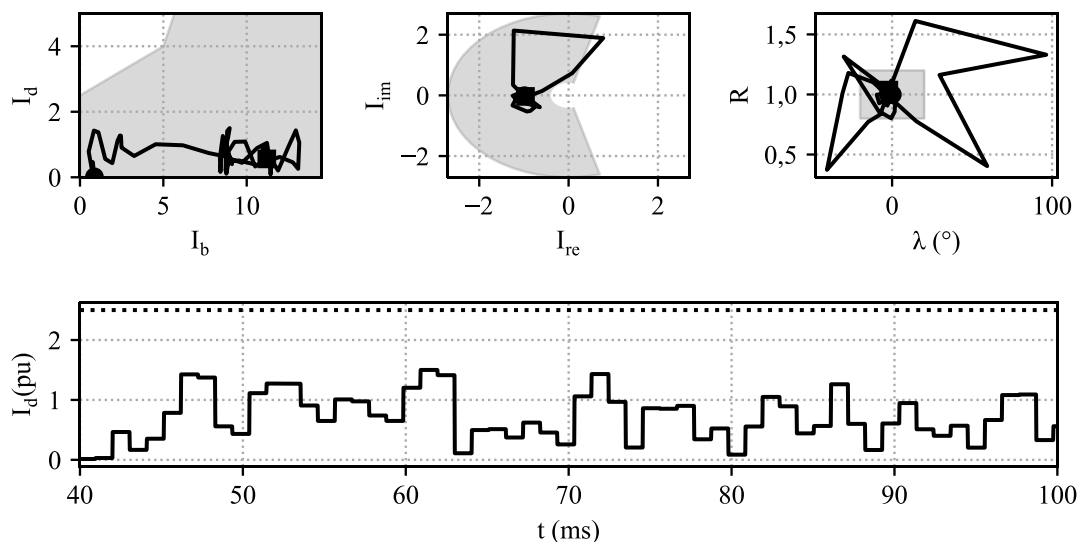


Figura 4.35 Planos das proteções diferenciais e corrente diferencial durante defeito externo 2.

4.8 Conclusões

Este capítulo demonstrou as etapas para o ajuste da proteção diferencial em uma aplicação considerada complexa [5]. A modelagem do sistema de proteção de BCSs, dos relés de proteção e de um sistema equivalente em um programa EMTP para estudos de ajuste e avaliação da proteção foi apresentada. O desempenho da proteção diferencial de LT foi analisado durante as etapas de ajuste e, para um ajuste final, comparada com a proteção de distância.

Alguns dos problemas que surgem com a compensação série, como a inversão de tensão e de corrente, foram observados. O desempenho da proteção diferencial foi satisfatório nos casos em que surgiram esses problemas. A proteção de distância foi modelada para uma comparação com a proteção diferencial, com o objetivo de mostrar a imunidade da proteção diferencial em relação a esses problemas.

Os resultados deste capítulo mostram que a proteção diferencial para LT com compensação série simplifica o projeto da proteção, garantindo o grau de seletividade que apenas um esquema de proteção unitária pode oferecer. Problemas que outrora afetam as proteções não-unitárias tradicionais, como a de distância, pouco ou em nada influenciam no desempenho da proteção diferencial.

Capítulo 5

Proteção de Linhas de Transmissão

Multiterminal

Neste capítulo serão analisadas filosofias para a proteção de LTs multiterminais, sobretudo do tipo diferencial. A proteção de distância é apresentada como alternativa, e alguns dos problemas mencionados na Seção 2.5.2 são explorados com a ótica da proteção de distância. Em seguida, são apresentadas adequações nas características de proteção diferencial introduzidas no Capítulo 3 e as características de plano α generalizado e plano $R\lambda$ para LTs multiterminais.

Finalmente, para um sistema fictício que contém uma LT de 3 terminais, o desempenho das diferentes características de proteção diferencial e da proteção de distância é analisado.

5.1 Proteção de distância

A proteção de distância é utilizada em aplicações de LTs multiterminais. Algumas das dificuldades inerentes dessa filosofia de proteção incluem aquelas discutidas na Seção 2.5.2. O *infeed* ou *outfeed* de corrente da zona de proteção dificultam o ajuste e prejudicam a atuação dos relés. A proteção rápida e segura de LTs de três ou mais terminais também depende da comunicação entre os seus terminais, como será visto a seguir.

O *infeed* tem o efeito de aumentar a impedância vista pelo relé de um dos terminais da LT, resultando no subalcançe da proteção [4]. O *outfeed* de corrente da zona de proteção tem o efeito de reduzir a impedância vista pelo relé, resultando no sobrealcançe da proteção. Na Seção 2.5.2 foi feita uma breve análise da impedância vista por um relé para níveis variados de *infeed* e *outfeed* [40].

A prática de ajuste da proteção dos relés de distância para LT de três terminais é a de definir a zona de proteção baseada na distância entre um terminal e aquele mais próximo na LT [8]. Considerando a LT da Figura 5.1 (a), o ajuste da primeira zona do relé no terminal S deverá levar em conta a distância até o terminal mais próximo, T. O

ajuste do relé em T será similar ao de S e o ajuste do relé em R será relativo à distância entre R e S. Na LT da Figura 5.1 (b), como há simetria na distância entre os terminais, os ajustes das primeiras zonas dos relés serão idênticos. A escolha da distância do terminal mais próximo evita o sobrealcance da proteção. Configurações como a da Figura 5.1 (a) com terminais muito próximos podem inviabilizar a aplicação da proteção de primeira zona [4].

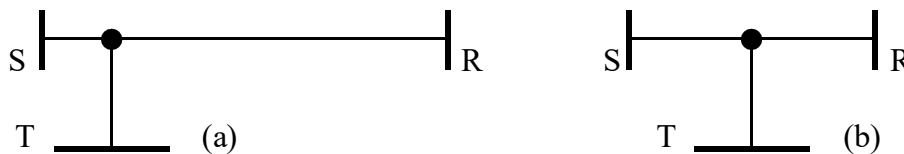


Figura 5.1 Duas configurações de LT de três terminais (a) com dois terminais próximos e (b) terminais simétricos.

A definição da primeira zona com base nesse critério estabelece a região de *trip* simultâneo [40, 7]. Tal região é constituída pelos trechos da LT em que os relés de todos os terminais podem ser sensibilizados para um defeito. A Figura 5.2 apresenta as regiões de *trip* simultâneo para as LTs da Figura 5.1. Observa-se que, quanto maior a simetria entre os terminais, maior será essa região. O *trip* simultâneo é interessante no sentido de aumentar a rapidez da proteção da LT e evitar a dependência da teleproteção nos terminais.

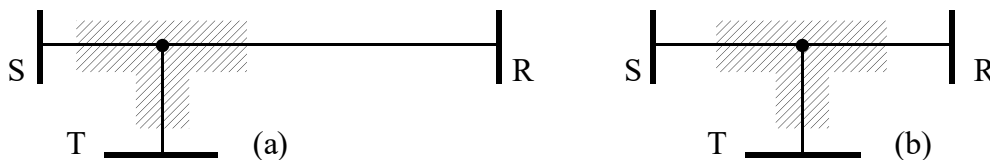


Figura 5.2 Região de *trip* simultâneo para duas configurações de LT de três terminais (a) com dois terminais próximos e (b) terminais simétricos.

Para defeitos mais próximos dos terminais ou em LTs multiterminais de pouca simetria, a proteção de primeira zona pode não ser suficiente. Uma vez que o relé de um dos terminais detecte o defeito e opere abrindo o disjuntor, a LT de três terminais passa a operar como uma LT de dois terminais. Os outros terminais remanescentes, então, podem identificar o defeito e atuar, seja na primeira ou na segunda zona. Esse efeito é conhecido como *trip* sequencial [4, 8] e, muitas vezes, é indesejado pois leva a tempos maiores para a eliminação da falta.

Adicionalmente, o *trip* sequencial pode ser provocado por uma condição de *outfeed*. Considerando a Figura 5.3 (a), um defeito próximo a um dos terminais (R) provoca *outfeed* no terminal T. A proteção de primeira zona do terminal R atua instantaneamente e a condição de *outfeed* é desfeita conforme a Figura 5.3 (b). Para o

terminal S, são possíveis dois cenários: (i) que ele sobrealcance devido ao *outfeed* no terminal T, atuando para um defeito fora da sua zona ou (ii) que não ocorra a atuação da primeira zona e reste para a segunda zona eliminar a falta na Figura 5.3 (b). Para ambos os relés, a situação na Figura 5.3 (b), sem a contribuição de R, tende a elevar as correntes em seus terminais e levar ou não à atuação da primeira zona. Não sendo esse o caso, atuaria a segunda zona.

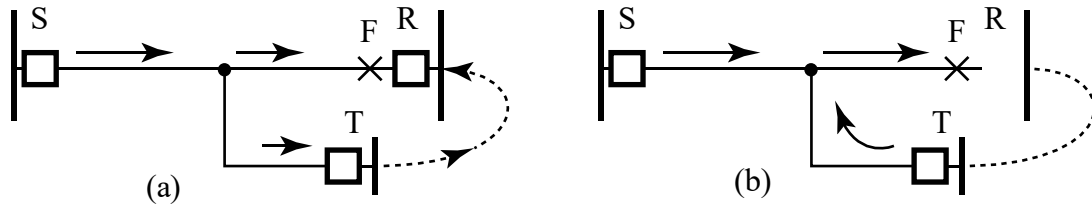


Figura 5.3 (a) circulação de corrente entre terminais para um defeito próximo do terminal R e com *outfeed* em T; (b) *outfeed* defeito após a abertura do terminal R.

Pode-se concluir que, tanto para evitar o *trip* sequencial e diminuir a dependência da segunda zona para eliminar um defeito, a comunicação entre os terminais é vantajosa. Adaptações dos esquemas que envolvem cabo piloto, como os discutidos na Seção 2.3.2, podem ser utilizados para a proteção de LT multiterminal afim de eliminar o *trip* sequencial [4].

5.2 Proteção diferencial de restrição percentual e plano α

De forma a conseguir um bom desempenho na proteção de LTs multiterminais, modificações simples podem ser feitas nas características de restrição percentual e de plano α apresentadas nas Seções 3.2 e 3.3, mantendo a filosofia básica dessas proteções.

Para a característica do plano de corrente de restrição percentual e diferencial, uma modificação pode ser realizada nas correntes de restrição (5.1) e diferencial (5.2) se o fasor de corrente no terceiro terminal estiver disponível. Essa filosofia é similar à utilizada para transformadores de três enrolamentos [15].

$$I_b = \frac{1}{2} (|\dot{I}_S| + |\dot{I}_R| + |\dot{I}_T|) \quad (5.1)$$

$$I_d = |\dot{I}_S + \dot{I}_R + \dot{I}_T| \quad (5.2)$$

Para a característica de plano α , as correntes dos terminais remotos podem ser utilizadas com a soma vetorial para definir uma corrente remota \dot{I}_R equivalente, modificando as grandezas para (5.3) e (5.4).

$$I_{re} = \mathcal{R}e \left\{ \frac{\dot{I}_R + \dot{I}_T}{\dot{I}_S} \right\} \quad (5.3)$$

$$I_{im} = \mathcal{J}m \left\{ \frac{\dot{I}_R + \dot{I}_T}{\dot{I}_S} \right\} \quad (5.4)$$

A corrente de carregamento capacitivo pode ser compensada com método similar ao utilizado para LTs de dois terminais. Em vez de se considerar a parcela devida à metade da admitância total da LT, a corrente de cada terminal pode ser compensada pela parcela da admitância total do segmento do seu terminal até o tape. A Figura 5.4 indica o esquema utilizado, em que a parcela da admitância yL e a tensão V_R são utilizadas para determinar a corrente de carregamento capacitivo I_{RC} do terminal R.

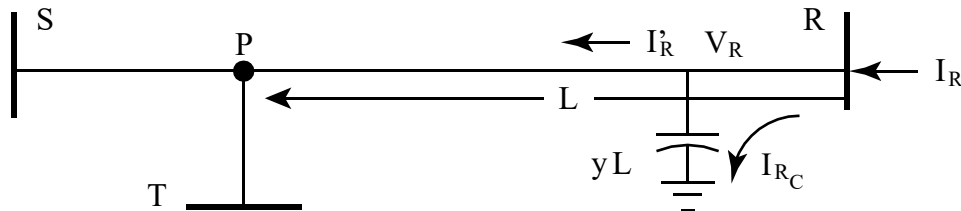


Figura 5.4 Compensação de corrente de carregamento capacitivo para LTs de 3 terminais, com ênfase no terminal R.

O *outfeed* através de um dos terminais poderá prejudicar o desempenho da proteção diferencial, sendo importante que, durante os estudos para o ajuste da proteção, se verifique as condições para o seu aparecimento.

5.3 Proteção diferencial de plano α generalizado

Em [2] é apresentado uma extensão da proteção de plano α para LTs multiterminais. A proposta é simplificar a interpretação pouco intuitiva da ação da proteção para LTs multiterminal, como se esta fosse uma LT de dois terminais [9], além de estender o princípio do plano α para LTs multiterminal. Na Seção 2.5.2 comenta-se dos possíveis problemas que podem surgir para a proteção de LT multiterminais, sobretudo da circulação de corrente entre os terminais.

Essa filosofia une as filosofias de restrição percentual e de plano α , no sentido de que as grandezas da característica de restrição percentual são utilizadas para definir um circuito equivalente de dois terminais. Finalmente, a característica de plano α é utilizada para critérios de operação e de restrição.

O motivador do desenvolvimento dessa característica [9] é de encontrar duas correntes terminais equivalentes \dot{I}_L e \dot{I}_R que resultem na mesma corrente diferencial \dot{I}_d

(fasorial) e de restrição I_b que aquelas calculadas para uma LT de N terminais (Seção 5.2). Para esse fim, de se determinar 4 incógnitas (módulo e ângulo das correntes \dot{I}_L e \dot{I}_R) com o uso de três equações (definição fasorial de \dot{I}_d e módulo de I_b), é suposto que a corrente \dot{I}_R tem um ângulo fixo β , conforme descrito a seguir.

Para se determinar as grandezas de operação da característica, é necessário calcular a corrente diferencial (fasorial) e a corrente de restrição seguindo (5.5).

$$\begin{aligned}\dot{I}_d &= \dot{I}_S + \dot{I}_T + \dot{I}_R \\ I_b &= |\dot{I}_S| + |\dot{I}_T| + |\dot{I}_R|\end{aligned}\quad (5.5)$$

Para cada terminal ($n = S, T, R$) é calculado um número auxiliar (5.6), utilizado para classificar as correntes terminais. Esse índice determina a corrente terminal \dot{I}_n com a maior projeção sobre o fasor de corrente diferencial \dot{I}_d .

$$R_n = \mathcal{R}e\{\dot{I}_n \dot{I}_d^*\} \quad (5.6)$$

A corrente terminal \dot{I}_n cujo valor R_n seja o maior é definida como a corrente de referência \dot{I}_p . O ângulo da corrente de referência \dot{I}_p , então, é definido como β (5.7). Este é o ângulo utilizado para a corrente remota equivalente \dot{I}_R .

$$\beta = \angle \dot{I}_p \quad (5.7)$$

Uma corrente diferencial auxiliar \dot{I}_X , defasada em β , é calculada em (5.8).

$$\dot{I}_X = \dot{I}_d \angle -\beta \quad (5.8)$$

E as correntes local e remota da LT equivalente de dois terminais são calculadas por (5.9).

$$\begin{aligned}\dot{I}_L &= \left[\frac{\mathcal{J}m\{\dot{I}_X\}^2 - (I_b - \mathcal{R}e\{\dot{I}_X\})^2}{2(I_b - \mathcal{R}e\{\dot{I}_X\})} + j \mathcal{J}m\{\dot{I}_X\} \right] \angle \beta \\ \dot{I}_R &= (I_b - |\dot{I}_L|) \angle \beta\end{aligned}\quad (5.9)$$

A característica de plano α é utilizada com a razão entre as correntes equivalentes \dot{I}_L e \dot{I}_R (5.10).

$$k = \dot{I}_R / \dot{I}_L \quad (5.10)$$

Uma alternativa simplificada de plano α generalizado [68] define as correntes equivalentes \dot{I}_M e \dot{I}_N (5.11). Com base nessas correntes, é calculada a razão (5.12) utilizada no plano α para determinar a condição de *trip*.

$$\begin{aligned}\dot{I}_M &= \frac{1}{2}(\mathcal{R}e\{\dot{I}_d\} + I_b + j\mathcal{I}m\{\dot{I}_d\}) \\ \dot{I}_N &= \frac{1}{2}(\mathcal{R}e\{\dot{I}_d\} - I_b + j\mathcal{I}m\{\dot{I}_d\})\end{aligned}\quad (5.11)$$

$$k = \dot{I}_M / \dot{I}_N \quad (5.12)$$

5.4 Proteção diferencial baseada em estimador da distância ao defeito

A proteção diferencial da Seção 3.4 pode ser adaptada para utilizar um estimador de distância ao defeito para LTs multiterminais. O estimador de defeito descrito na Seção 2.6.2 pode ser utilizado com esse objetivo.

O algoritmo da proteção para uma LT de 3 terminais é descrito a seguir, com base na LT de três terminais da Figura 5.5.

1. Obter medidas de tensão e corrente de cada fase e de sequência positiva dos terminais R, S e T.
2. Determinar valor dos localizadores D_S e D_T (Seção 2.6.2).
3. Com base nos localizadores D_S e D_T , determinar em qual ramo localiza-se o defeito (R-P, S-P ou T-P), conforme Tabela 2.1.
4. De posse do ramo, estimar tensões e correntes incógnitas de cada fase no tape P (\dot{V}_P e \dot{I}_P).
5. Aplicar a lógica do plano $R\lambda$ para LT de dois terminais da Seção 3.4 utilizando as grandezas do ramo onde localiza-se a falta.

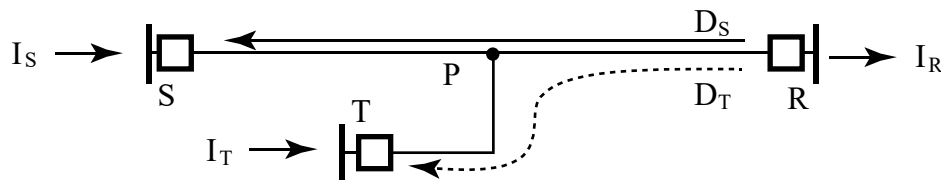


Figura 5.5 LT de três terminais e os localizadores D_S e D_T .

O algoritmo pode adotar critérios para evitar falso *trip*, como o de convergência dos índices de distância e do seletor de ramos. Quando não houver um defeito na LT, a característica pode ser estabilizada utilizando também um *pickup* de corrente diferencial.

5.5 Desempenho da proteção para um sistema teste de três terminais

As proteções diferenciais apresentadas nesse capítulo foram modeladas no *ATP* para um sistema teste de três terminais. Além disso, também foram configuradas proteções de distância de primeira zona nos três terminais da LT. Na primeira parte dessa Seção o desempenho das proteções diferenciais apresentadas será comparado entre elas e, em seguida, comparado com o da proteção de distância.

5.5.1 Modelagem da proteção e do sistema teste

A modelagem foi realizada utilizando-se a linguagem *MODELS* [55] e o recurso de *foreign model* [69, 54] para a implementação em *C++* do seletor de ramos descrito na Seção 2.6.2 e da característica de plano α generalizado da Seção 5.3. O código em *MODELS* da característica de restrição percentual e em *C++* da de plano α generalizado estão no Apêndice B.

Embora a linguagem *MODELS* ofereça todos os recursos necessários para implementar as proteções descritas neste capítulo, o recurso de *foreign model* permite facilidades para testar a correta implementação dos modelos, possibilitando o uso de ferramentas de desenvolvimento, e oferece um ganho de desempenho em processamento durante a simulação.

A rede simulada é a da Figura 5.6, fictícia, com uma LT de três terminais (R, S e T), tape no ponto P, idealmente transposta e de parâmetros homogêneos r , x e b (resistência, reatância e susceptância *shunt*, respectivamente). Os seus ramos são quase simétricos, possuindo os comprimentos $L_s = L_r = 50$ km e $L_t = 40$ km. Há interligação de transferência entre os terminais T e R, com circuito equivalente de 120 km. As impedâncias equivalentes nos terminais são tais que o terminal S é aquele de maior potência de curto-circuito. O ponto de operação foi configurado para que o terminal S transmita potência para os demais terminais, num ponto de operação de carga leve.

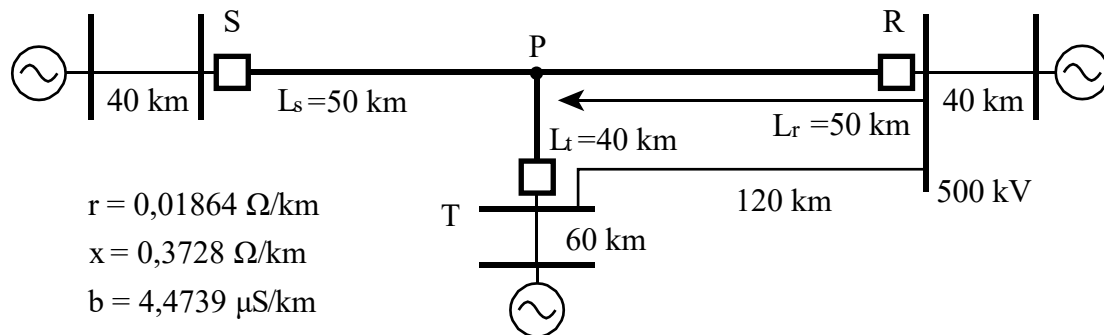


Figura 5.6 LT 500 kV de 3 terminais e sistema equivalente.

A proteção de distância foi configurada para alcance de 80% relativa à distância até o terminal mais próximo. Para esse caso, a menor distância é de 90 km e a proteção de todos os terminais foram ajustadas para cobrir 72 km na primeira zona. Para a proteção do terminal T, isso significa que ela pode vir a atuar para defeitos a até 32 km do ponto P em direção aos terminais S e R. Num primeiro momento, não será considerada a proteção de segunda zona ou a comunicação entre as proteções de distância dos terminais. A característica utilizada é do tipo *mho*.

As proteções diferenciais possuem compensação de corrente de carregamento capacitivo e possuem *pickup* de corrente diferencial ajustado para 0,7 pu. Esse ajuste tem como base o valor residual de corrente na LT após a compensação. Não foi modelado o atraso da comunicação entre os terminais. O ajuste do parâmetro de razão das correntes da característica de plano α seguiu o roteiro utilizado para LTs de dois terminais. O mesmo ajuste foi utilizado para a característica de plano α generalizado. Foram considerados $r = 2,50$, $\alpha = 210^\circ$, $R = 1 \pm 0,30$, $\lambda = \pm 30^\circ$, $k_1 = 0,30$, $k_2 = 1,50$, $I_{s_2} = 2,0$ e contagem de segurança de 2 amostras.

As proteções foram testadas com defeitos internos e externos, de diferentes tipos e resistências de defeito, tal como realizado no Capítulo 4. Defeitos internos foram aplicados em 16 pontos igualmente espaçados em cada um dos trechos S-P, T-P e R-P, como indicado na Figura 5.7.

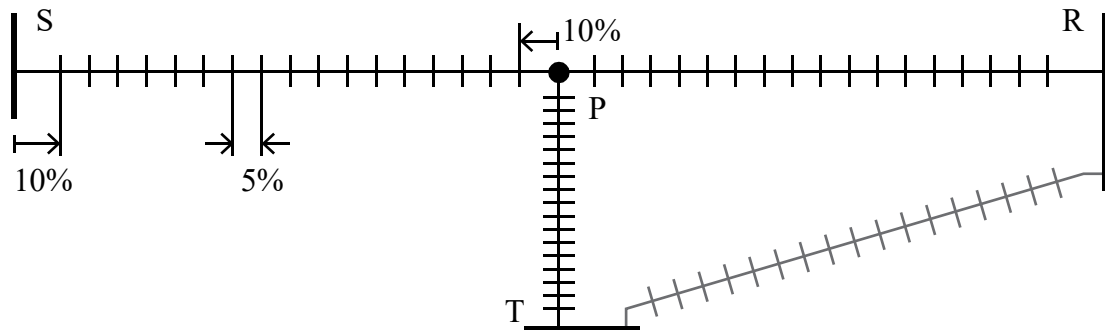


Figura 5.7 Divisão dos trechos da LT para aplicação de defeitos.

O primeiro ponto localiza-se a 10% do comprimento do trecho de distância do terminal mais próximo, e os demais pontos são espaçados em 5% desse comprimento. Defeitos foram aplicados no circuito que interliga os terminais T e R de forma a verificar o desempenho das proteções para defeitos externos. A Tabela 5.1 indica os valores de resistência de defeito utilizados.

Tabela 5.1 Resistências dos defeitos internos

Referência	Resistência de Defeito (Ω)
R1	1
R2	300

5.5.2 Desempenho da proteção diferencial

As diferentes proteções diferenciais foram testadas para defeitos internos e externos. O seu desempenho primeiro será avaliado para defeitos internos, seguido para defeitos externos. Um caso excepcional de defeito externo é analisado na Seção 5.5.2.3 para verificar o impacto da saturação de um TC. Finalmente, na Seção 5.5.2.4 é avaliado o impacto do comprimento relativo dos terminais da LT na proteção diferencial.

5.5.2.1 Defeitos internos

A Figura 5.8 mostra os pontos observados nos diferentes planos para defeitos internos à LT de três terminais. As proteções diferenciais atuaram corretamente para todos os defeitos internos testados, sem exceções.

A Tabela 5.2 apresenta os tempos médios de identificação de defeito pelas proteções diferenciais. Verificou-se que, na média, a proteção de restrição percentual foi aquela com a decisão mais rápida, seguida da proteção de plano α generalizado. A proteção do plano $R\lambda$, na média, demorou mais que as demais, com valor médio de cerca de 4 ms superior ao tempo de operação da proteção de restrição percentual. Essa diferença de tempo, num primeiro momento, pode ser justificada pela necessidade da convergência dos algoritmos de estimação da distância e de seleção do ramo sob falta.

Tabela 5.2 Tempos de identificação de defeito (ms)

Defeito	Rf	Plano α	Plano α -gen.	$I_b \times I_d$	$R\lambda$	Número de casos
3FT	R1	7,83	6,85	6,85	10,78	18
	R2	10,05	8,95	8,02	12,75	18
1FT	R1	7,90	7,27	7,73	10,61	18
	R2	10,07	8,95	8,33	15,18	18
2FT	R1	6,85	6,85	6,85	10,13	18
	R2	6,85	6,85	6,85	10,16	18
2F	R1	6,85	6,85	6,85	10,16	18
	R2	8,43	7,90	7,90	11,50	18
Média		8,10	7,56	7,42	11,41	Total: 144

Para um defeito próximo ao terminal S e outro próximo ao terminal P, a Figura 5.9 mostra o módulo das correntes terminais no tempo e os fasores em diferentes instantes. Para esse caso de LT multiterminal com trechos de comprimentos similares e

equivalentes nos terminais de níveis de curto-circuito similares, quanto mais próximo do ponto P for o defeito, mais próximas serão as correntes terminais. Quanto mais distante do ponto P, mais uma corrente tenderá a superar as outras. Outro resultado importante que pode ser observado na Figura 5.9 é que as correntes entram em fase (sentido para dentro da LT) durante o defeito.

O efeito da localização da falta nos planos das proteções diferenciais no terminal S pode ser observado na Figura 5.10. O efeito no plano de restrição percentual da Figura 5.10 (a) é o do aumento das correntes de restrição e diferencial com a proximidade do terminal S. Isso fica evidente com o auxílio da Figura 5.9, pois, durante um defeito, as correntes terminais ficam em fase e tanto a soma do módulo quanto a soma fasorial das correntes tende a ser maior na proximidade do terminal S, como também esse é o terminal de maior nível de curto-circuito. Para as proteções que operam no princípio da razão entre as correntes terminais, a proximidade com o terminal S (local) leva a maiores correntes nesse terminal, justificando a razão menor que 1 no plano α e maior que 1 no plano $R\lambda$.

No plano α da Figura 5.10 (b), a proximidade com S tende a reduzir a razão entre as correntes remotas (\dot{I}_T, \dot{I}_R) e a corrente local (\dot{I}_S). Para os defeitos trifásicos de resistência R1 considerados na figura, as correntes estão todas em fase e, portanto, o lugar geométrico é sobre o eixo imaginário com $I_{re} > 0$.

No plano α generalizado da Figura 5.10 (c), todos os defeitos trifásicos de resistência R1 estão posicionados ao redor da coordenada $(k_{re}, k_{im}) = (3, 26) \times 10^{-4}$. Isso é consequência da corrente local equivalente \dot{I}_L (5.9) possuir módulo superior ao módulo da corrente remota equivalente $\dot{I}_R = (I_b - |\dot{I}_L|) \angle \beta$. Considerando o defeito no meio do trecho S-P, a Figura 5.11 mostra o plano α e os fasores das grandezas envolvidas. Dentre os fasores das correntes terminais I_S, I_T e I_R , observa-se que I_S é a corrente de maior módulo e, portanto, esta é escolhida como corrente de referência. A corrente remota equivalente I_{rem} é calculada (5.9) com a mesma fase da corrente I_S . Finalmente a corrente local equivalente I_{loc} é calculada (5.9) e a razão complexa k (5.10) pode ser obtida.

No plano $R\lambda$ da Figura 5.10 (d), de maneira similar ao que ocorre para o plano α , o posicionamento é função da razão entre as correntes e, para defeitos que se aproximam de S, a razão entre as correntes estimadas $R = |\dot{I}_{S_F} / \dot{I}_{R_F}|$ tende a aumentar. A diferença angular entre as correntes estimadas \dot{I}_{S_F} e \dot{I}_{R_F} é de aproximadamente $\pm 180^\circ$, pois, em condições de defeito, o sentido delas é contrário entre si.

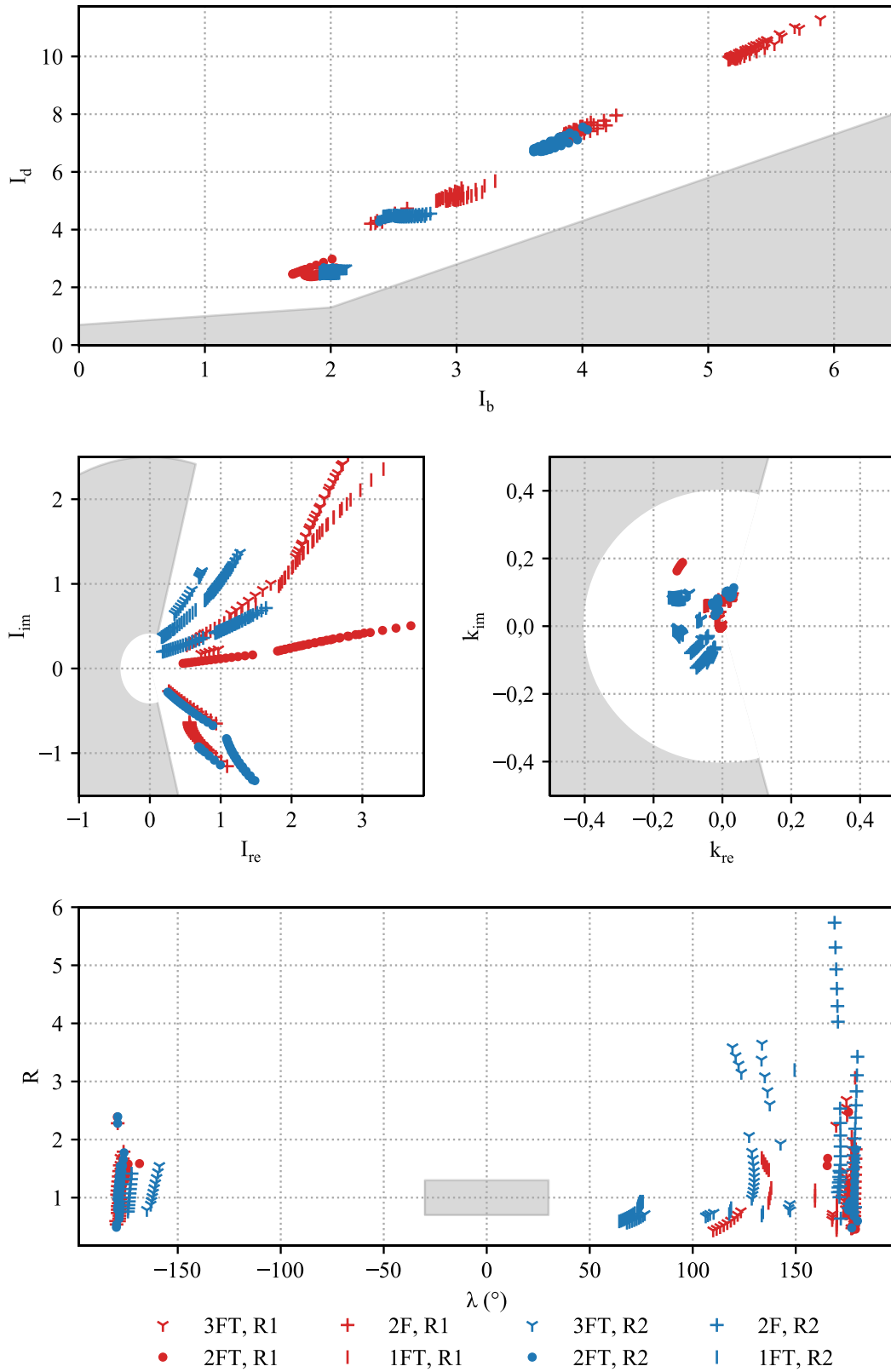


Figura 5.8 Pontos observados pelos relés antes da sinalização de *trip*.

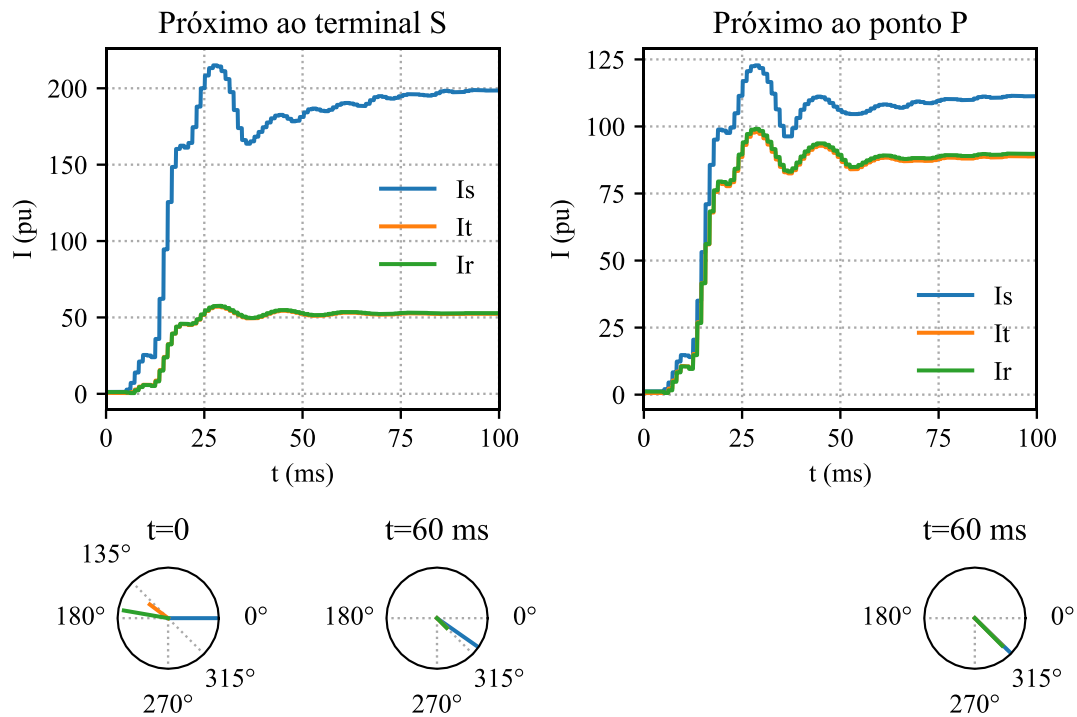


Figura 5.9 Variação das correntes terminais com a localização do defeito em um ramo (defeito trifásico de resistência R1).

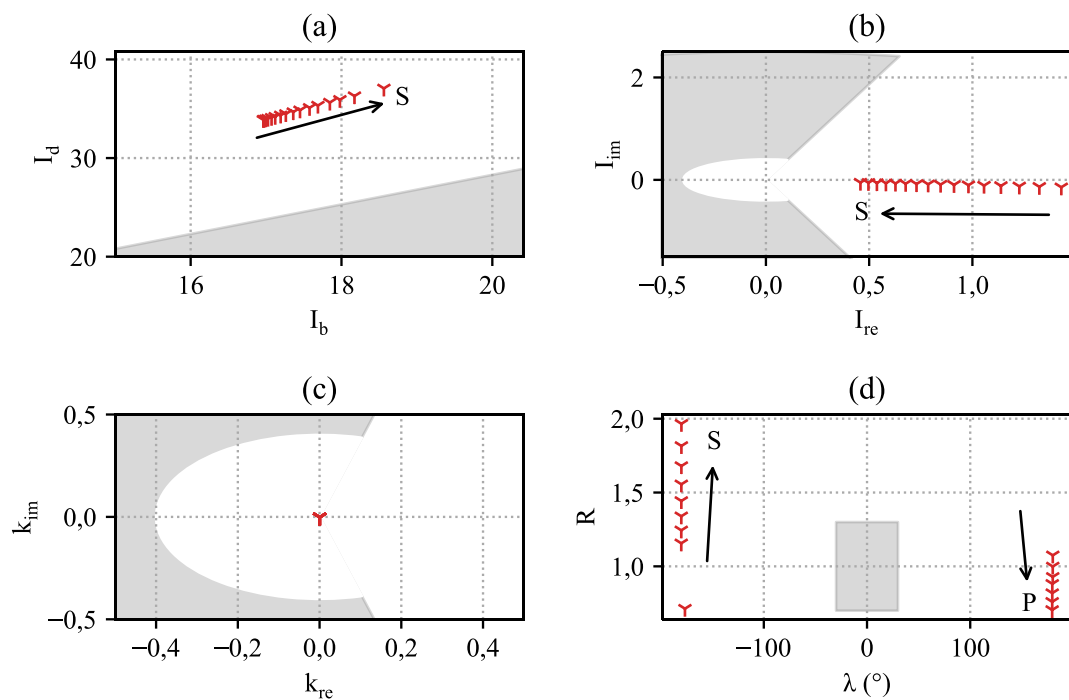


Figura 5.10 Coordenadas nos planos das proteções para defeitos trifásicos no trecho S-P.

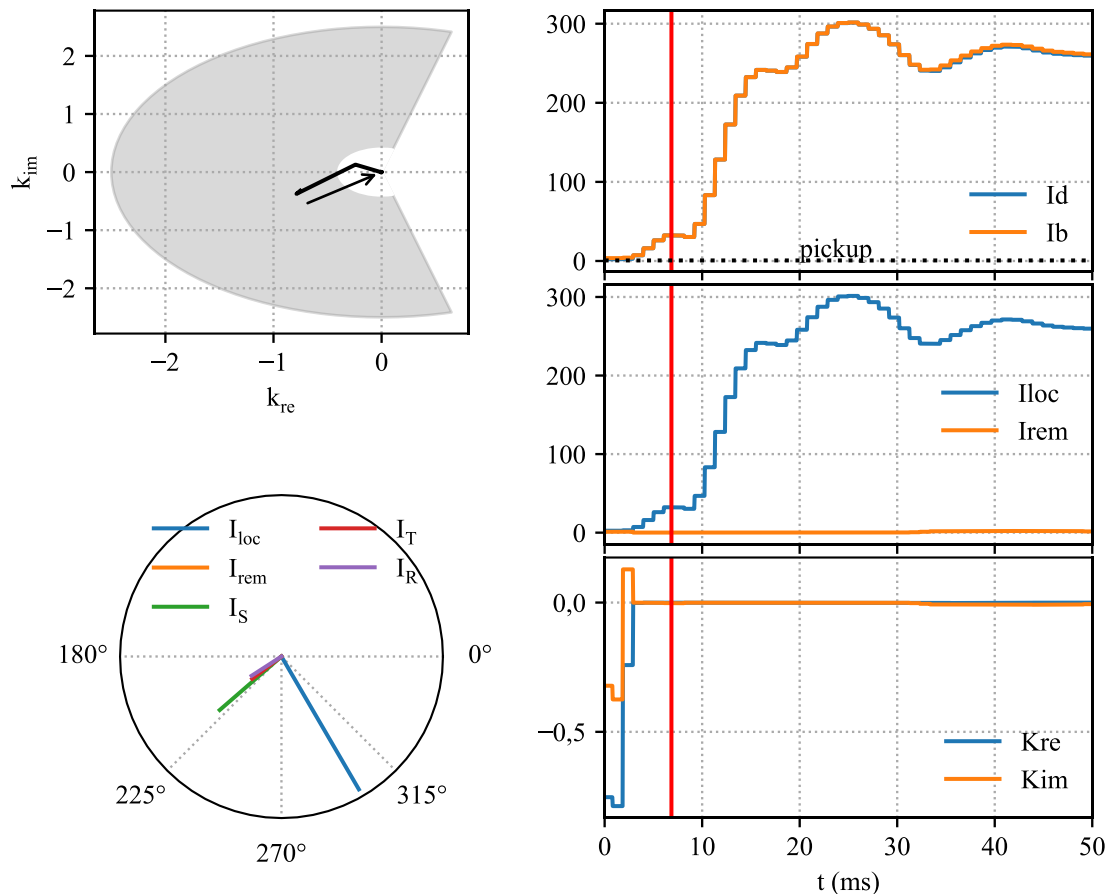


Figura 5.11 Análise das variáveis do plano α generalizado para um defeito trifásico de resistência R1 à 50% de distância do terminal S.

Na Figura 5.12 estão exibidos o plano $R\lambda$, os índices D_S e D_T (Seção 2.6.2) do localizador de defeitos e a saída do algoritmo seletor de ramos após a aplicação de defeitos 3FT de resistência R1 em três localizações diferentes: no meio de cada segmento formado por um terminal e o ponto P. Na Figura, \bullet e \blacksquare marcam o início e o fim da trajetória, enquanto \times marca o ponto na trajetória em que foi indicado *trip*. Para o primeiro defeito, no trecho S-P, o índice D_S tem valor superior ao D_T , que converge para a distância até o ponto P ($D_T \approx 1$), sendo então D_S o estimador correto. O seletor de ramos, então, identifica em 2,5 ms que o defeito está no ramo S-P. O estimador das correntes \hat{I}_{S_F} e \hat{I}_{R_F} utiliza as informações terminais e as saídas dos estimadores de distância e do seletor de ramo para calcular a coordenada no plano $R\lambda$.

Uma vez que os critérios de convergência do estimador de distância e do seletor de ramo sejam satisfeitos, são verificados o *pickup* de corrente diferencial e se a coordenada no plano $R\lambda$ está fora da zona de restrição. Assim que todas essas condições forem satisfeitas, é emitido o *trip* após 13 ms de início da falta.

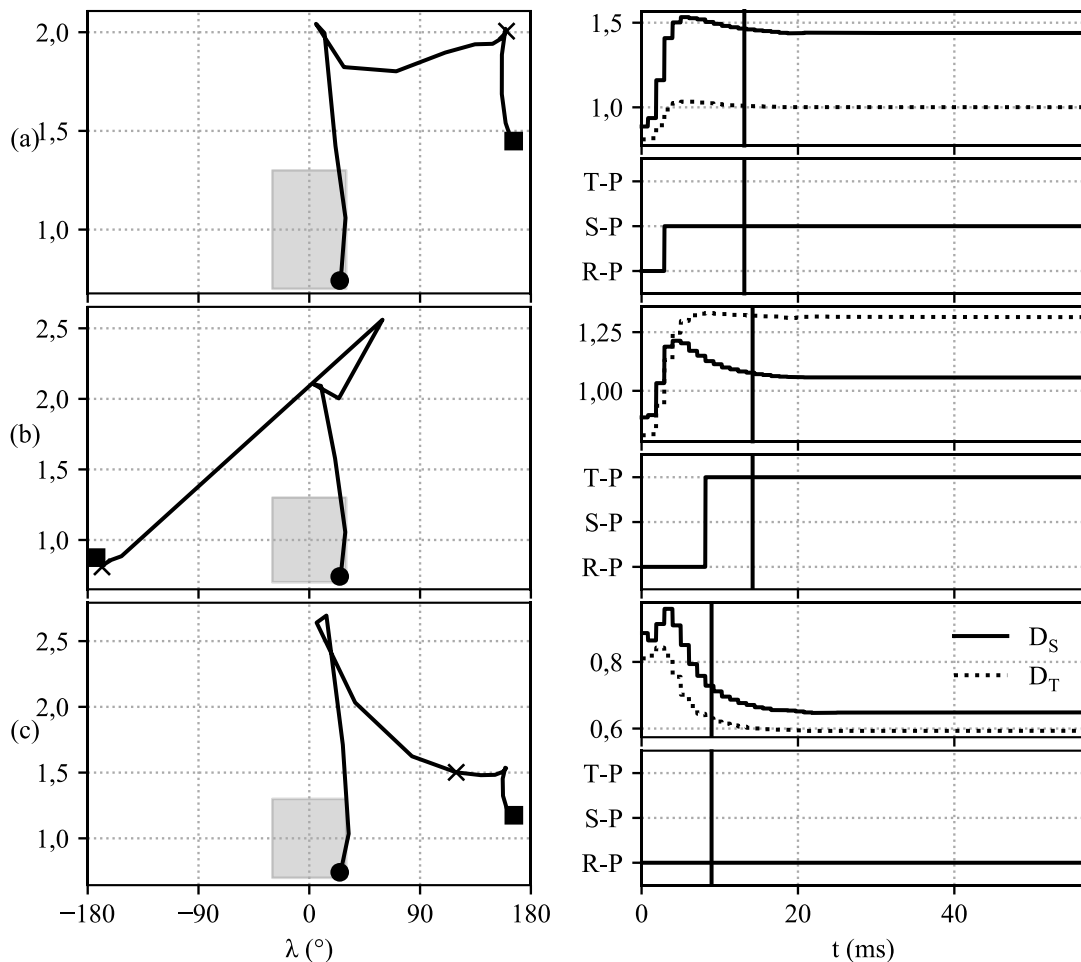


Figura 5.12 Atuação da proteção de característica $R\lambda$ em três diferentes localizações para defeitos trifásicos de resistência R2: (a) 50% do ramo S-P; (b) 50% do ramo T-P; (c) 50% do ramo R-P.

Análise similar pode ser feita para o defeito no ramo T-P. Observa-se uma relativa demora do seletor de ramo em identificar o defeito no ramo T-P, necessitando de 8 ms. O estimador da distância converge para 1,31 pu de distância do terminal R, aproximadamente 65,5 km, sendo 15,5 km para dentro do trecho T-P de comprimento total de 40 km.

Finalmente, para o terminal R a proteção teve o desempenho mais rápido dos três casos, sinalizando *trip* após 9 ms. As razões são a rápida identificação do ramo sob falta R-P, que é o valor inicial do algoritmo seletor de ramos, e da distância ao defeito, que é considerada como a média dos localizadores D_S e D_T .

A lógica de atuação da característica $R\lambda$ é aquela que precisa do maior conjunto de informações para ser sensibilizada. É necessário que o estimador de distância e o seletor de ramos estejam convergidos, que a corrente diferencial supere o valor de *pickup* e que a coordenada no plano $R\lambda$ esteja fora da região de restrição. Por outro lado, a

característica de restrição percentual é aquela com a menor quantidade de informações para ser sensibilizada, bastando a coordenada medida estar fora da região de restrição. Isso é importante para a velocidade da atuação da proteção, pois, uma vez que uma dessas informações dessensibilizem a proteção, será necessário que a trajetória observada permaneça novamente na região de operação durante uma nova contagem de segurança (Seção 3.7).

5.5.2.2 Defeitos externos

Foram testados defeitos externos ao longo do circuito que interliga os terminais T e R da LT, conforme Figura 5.7. Foram testados os defeitos tipo 3FT, 2FT, 2F e 1FT de resistência R1. A Figura 5.13 mostra o que cada característica de relé diferencial observa após a aplicação de diferentes tipos de defeito. Em todos os casos, com a exceção de um explorado na Seção 5.5.2.3, não houve a atuação incorreta da proteção durante a aplicação do defeito.

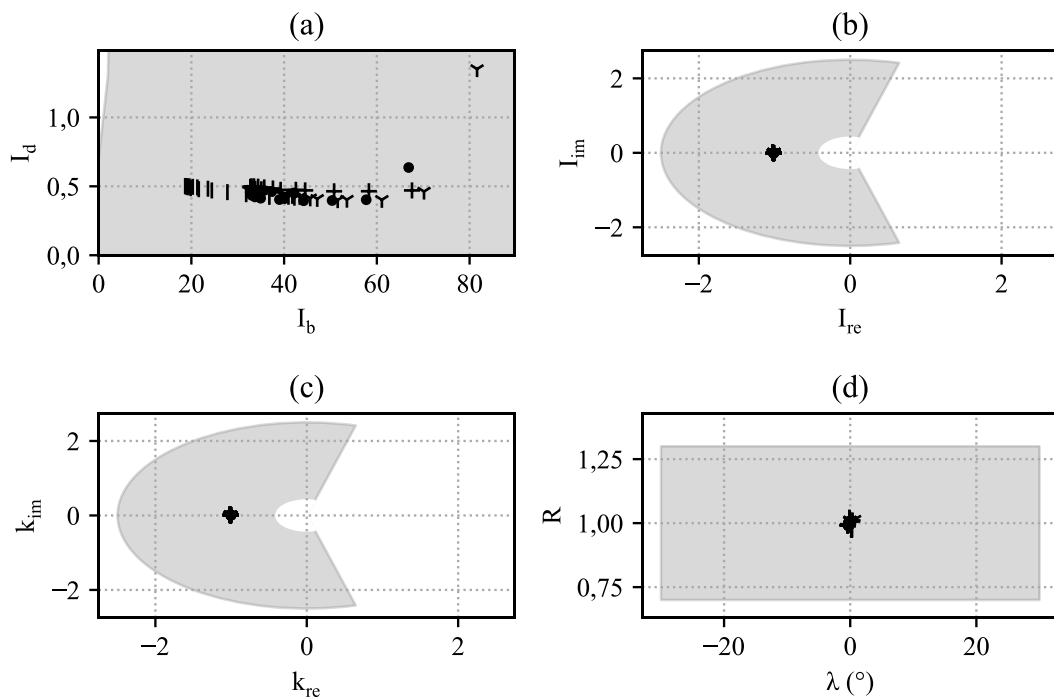


Figura 5.13 Ponto observado por cada característica na fase C após 20 ms da aplicação da falta. (a) Restrição percentual; (b) plano α ; (c) plano α generalizado e (d) plano $R\lambda$.

Uma avaliação adicional de defeitos externos foi feita sobre os terminais da LT. Para um defeito monofásico na barra do terminal R, a Figura 5.14 mostra o desempenho da característica de plano $R\lambda$, através das suas coordenadas no plano, os valores dos índices de localização de falta D_S e D_T no tempo e o resultado do seletor de ramo no tempo.

Analisando a Figura 5.14 pode-se notar que ambos os índices do localizador de falta D_S e D_T tendem para uma localização além da LT, de fato não convergindo para um valor interno. O valor considerado é o D_{ef} , nesse caso atribuído a distância de R até P ($D_{ef} = 1$) devido a não convergência de D_S e D_T para o mesmo valor. Para esse valor, o seletor de ramo convergiu para o ramo S-P e o algoritmo calculou as correntes \dot{I}_{S_F} e \dot{I}_{R_F} de tal sorte que o valor da razão R dessas correntes tendeu a 1. Embora R tenha temporariamente admitido valor 1,5 para fora da característica, esse valor não levou à superação da corrente de *pickup* muito menos ao *trip* por não ter ocorrido a convergência do seletor de ramos e do localizador.

Para esse e outros defeitos externos, a corrente diferencial observada pelos relés, eventualmente, superou transitoriamente o valor de *pickup*. A Figura 5.15 mostra as correntes diferenciais trifásicas para o caso da Figura 5.14. Não fosse a não convergência do localizador de defeito e do estimador de ramo, como anteriormente comentado, a proteção poderia vir a operar nesse caso. Assim, o ajuste do *pickup* poderia ser elevado.

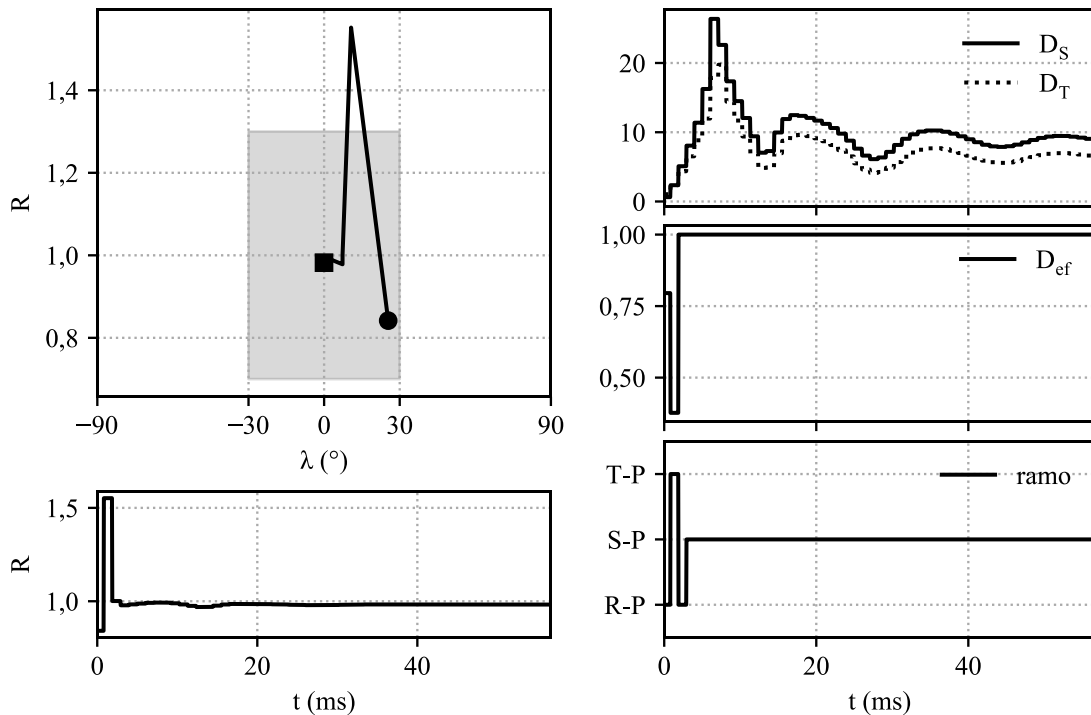


Figura 5.14 Desempenho da característica $R\lambda$ durante defeito IFT de resistência R1 no terminal R (externo à LT).

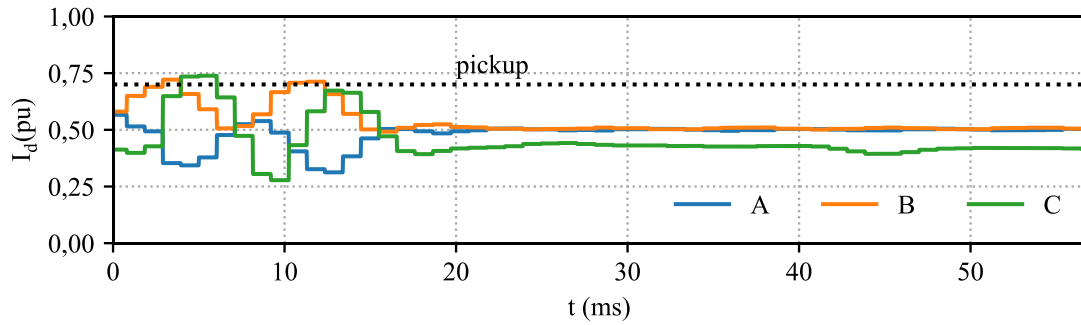


Figura 5.15 Corrente diferencial observada pelos relés nas três fases durante o defeito 1FT no terminal R.

5.5.2.3 Efeito da saturação de TC

O caso excepcional de atuação indevida durante defeito externo da Seção 5.5.2.2 ocorreu para um defeito tipo 2F a 75% do terminal R na LT entre os terminais T e R. O *trip* incorreto foi produzido pela característica $R\lambda$ e a razão pode ser compreendida com o auxílio da Figura 5.16.

As correntes das fases em falta B e C no terminal T alcançam aproximadamente 9 kA-pico com uma componente CC considerável. A presença da componente CC tende a provocar a saturação prematura do TC, causando oscilações na filtragem de medida eficaz [58] quando esta é realizada por DFT de um ciclo [35]. O valor pico-a-pico instantâneo no primeiro ciclo é de aproximadamente 6 kA. O valor eficaz da componente de 60 Hz (gráfico inferior da Figura 5.16) é alternado entre 51 e 43 pu, ou 8,3 e 7,0 kA-pico.

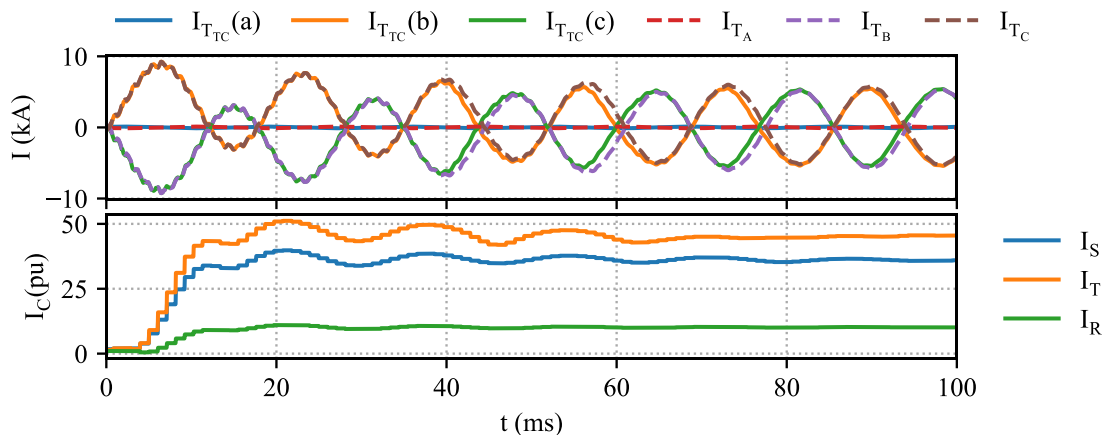


Figura 5.16 Correntes de defeito externo 2F com componente CC.

Após 40 ms do início do defeito, fica evidente a saturação dos TCs das fases B e C do terminal T. A Figura 5.17 mostra que, a partir de 40 ms há um erro de fase considerável, introduzido na corrente I_T observada pelos relés, produzindo valor elevado

de corrente diferencial. A consequência é da atuação indevida do relé por interpretar esse como um defeito interno. Esse é um erro que é tipicamente introduzido pela saturação dos TCs [34], conforme discutido na Seção 2.2.

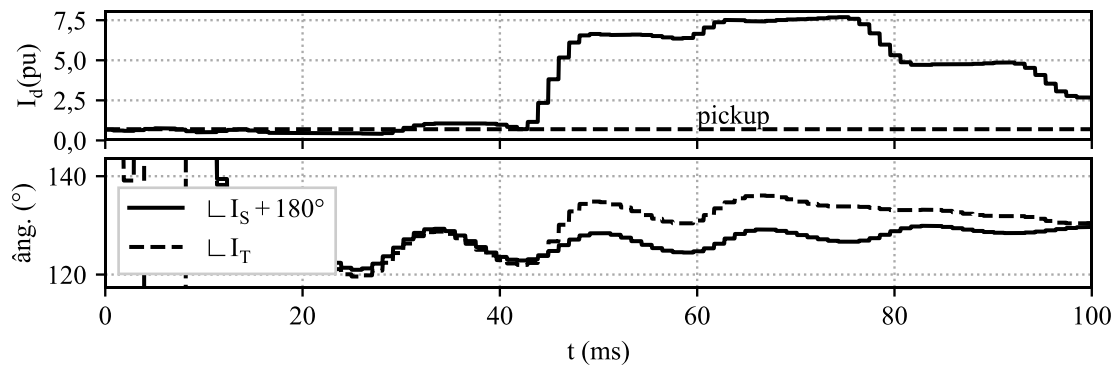


Figura 5.17 Módulo da corrente diferencial e ângulo das correntes dos terminais I_S e I_T com erro devido a saturação para defeito externo 2F.

5.5.2.4 Efeito da assimetria entre os comprimentos dos trechos da LT

Diferente do que foi visto na Seção 5.1 sobre o efeito do comprimento dos trechos da LT para o ajuste da proteção de distância, para a proteção diferencial o comprimento relativo dos trechos não é influente [8].

Para verificar essa afirmação, o sistema da Figura 5.6 foi modelado no programa de análise de curto-circuito de regime permanente apresentado no Apêndice D em duas configurações distintas, emulando a configuração assimétrica da Figura 5.1 (a), com ramo S-P e T-P menores e de comprimento de 20 km, e ramo P-R de comprimento de 80 km, e a configuração simétrica da Figura 5.1 (b). A configuração simétrica é a original da Figura 5.6, em que os trechos possuem comprimentos de 50, 40 e 50 km, respectivamente. Os equivalentes e o ramo de transferência entre os terminais T e R foram mantidos na parametrização original.

Para os dois sistemas, foram simulados defeitos equilibrados através de resistência ao longo do comprimento de cada trecho. A distância entre dois defeitos aplicados consecutivos é equivalente a 5% do comprimento daquele trecho. As resistências de defeito são $R_1=1 \Omega$ e $R_2=300 \Omega$. Os resultados para o sistema simétrico e o assimétrico são mostrados na Figura 5.18 e na Figura 5.19, respectivamente.

As proteções teriam atuado corretamente para todos os defeitos e os lugares geométricos observados pelos relés são similares àqueles discutidos na Seção 5.5.2.1, com exceção do plano α generalizado que, para defeitos de alta resistência, exibiu razões elevadas entre as correntes remota e local estimadas e um lugar geométrico afastado da origem.

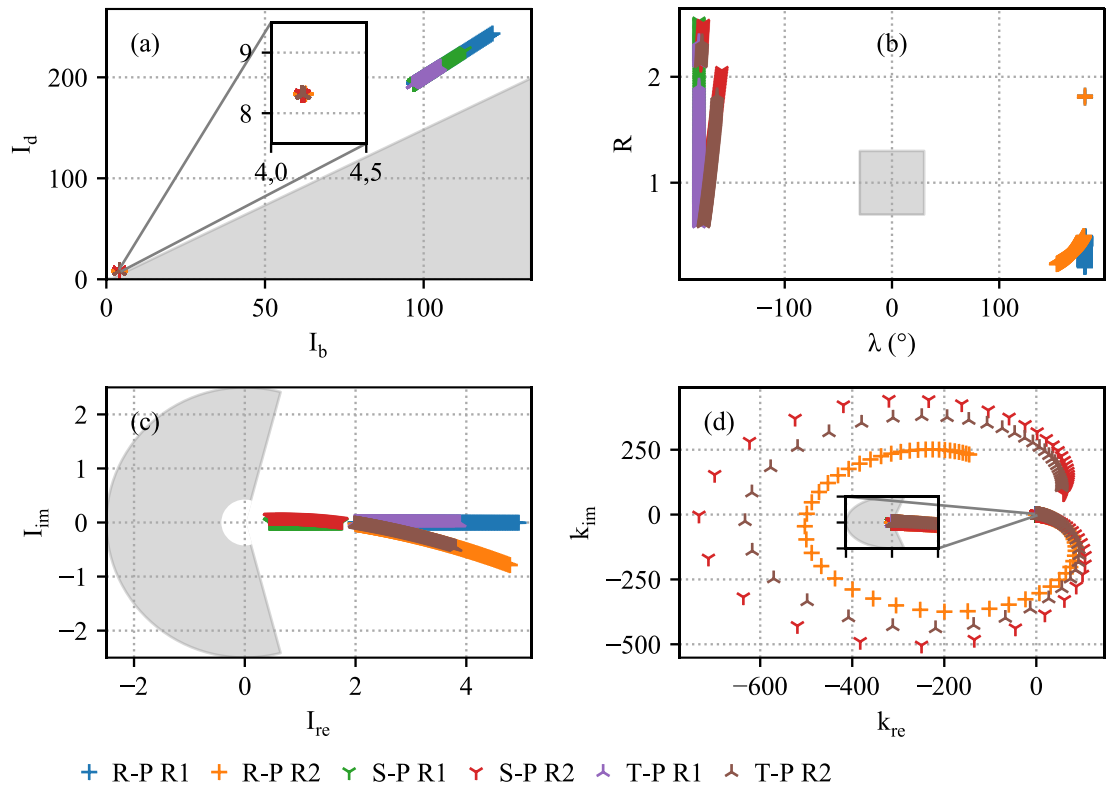


Figura 5.18 Pontos observados pela proteção para defeitos equilibrados internos na LT simétrica da Figura 5.1 (b).

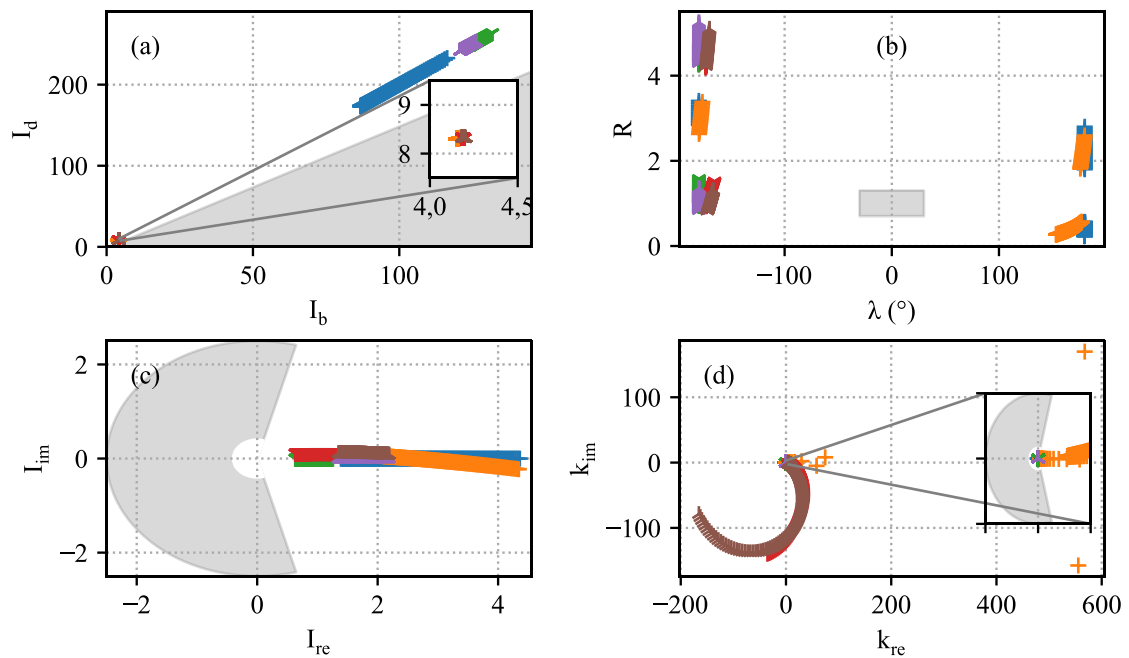


Figura 5.19 Pontos observados pela proteção para defeitos equilibrados internos na LT assimétrica da Figura 5.1 (a).

5.5.2.5 Desempenho durante *outfeed*

Nas Seções anteriores, foram discutidos resultados para a aplicação de defeitos no sistema da Figura 5.6, mas em nenhum deles foi observado o fenômeno de *outfeed*. Com base no exemplo descrito em [4], o sistema da Figura 5.6 foi modificado para o da Figura 5.20, onde o comprimento do trecho T-P foi reduzido para 20 km, os terminais T-R aproximados, o equivalente do terminal T removido (supondo que alimenta uma carga) e o equivalente do terminal R alterado para um equivalente de sistema fraco. Dessa forma, com geração predominante em apenas um dos terminais, a LT da Figura 5.20 passa a ser classificada como uma LT com *tape* [8, 10].

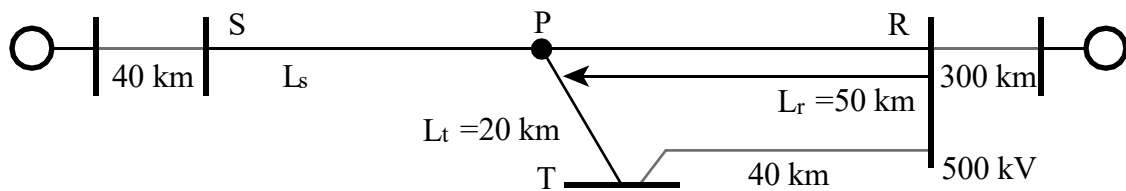


Figura 5.20 Sistema para teste da condição de *outfeed*.

O sistema da Figura 5.20 tem, propositalmente, o circuito de transferência entre os terminais T e R mais curto que o trecho T-P-R. Se um defeito for aplicado próximo ao terminal T, no ramo T-P (interno), a proximidade dos terminais R-T poderia ocasionar *outfeed* em R. E é esse o efeito que a Figura 5.21 mostra. Para esse defeito, os relés no terminal R observaram uma corrente de baixa amplitude (inferior a 5 pu) e com o sentido para fora da LT ($\angle I_r \approx 180^\circ$). A maior parte da corrente proveniente do equivalente do terminal S alimentou o defeito através da transferência T-R e do terminal T.

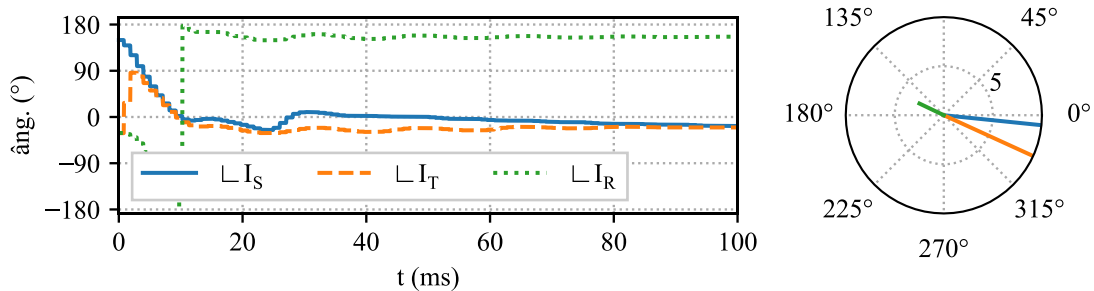


Figura 5.21 Ângulo de fase das correntes terminais durante um defeito próximo ao terminal T e fasores de corrente (ampliação para mostrar I_r).

Para esse defeito todas as proteções diferenciais atuaram corretamente. A proteção de distância de primeira zona do terminal R não atuou para o defeito, enquanto as dos terminais S e T atuaram. Nessa situação, se a proteção de distância for a única opção, o resultado seria o *trip* em sequência [8] dos terminais, podendo levar à demora para a eliminação do defeito [10].

A Figura 5.22 mostra as correntes das três fases no terminal S e o módulo dos fasores da fase C nos terminais. Tal como na Seção 5.5.2.3, é possível observar a ocorrência dos fenômenos da componente CC e da saturação do TC nas correntes medidas, com uma influência ainda mais significativa. O resultado aqui difere da Seção 5.5.2.3, pois o defeito é interno e a correta atuação das proteções não foi afetada.

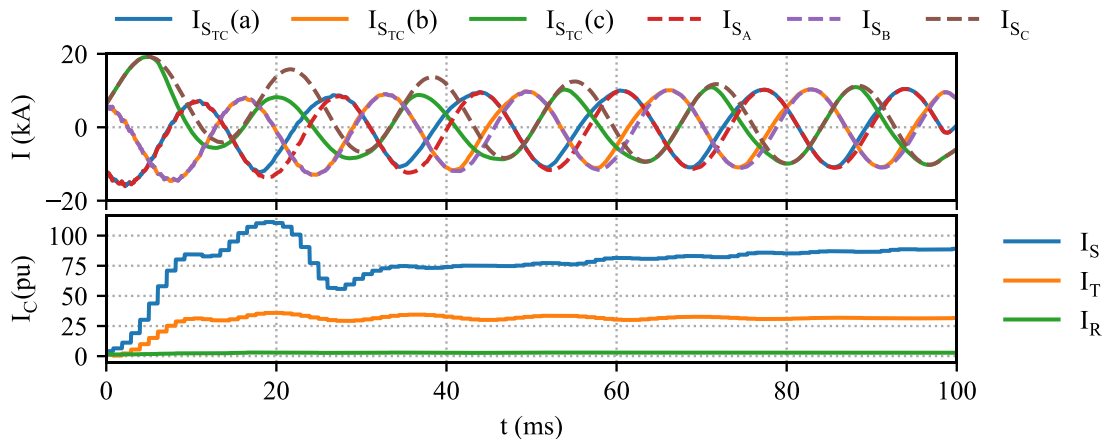


Figura 5.22 Valores instantâneos das correntes no terminal S e eficazes das correntes da fase C dos três terminais.

É possível imaginar um cenário realístico para a configuração da Figura 5.20. Se originalmente existe um circuito S-R e uma carga em T precisa ser alimentada, a solução paliativa e econômica de construir o tape T-P alcançaria esse objetivo. Futuramente, com o aumento da carga em T, pode ser construída a ligação T-R, mais curta que o trecho R-P-T ou com parâmetros tais que a LT seja eletricamente mais curta, o que consequentemente exigiria o reajuste da proteção da LT S-T-R.

5.5.3 Desempenho da proteção de distância

As proteções de distância de primeira zona dos três terminais tiveram ótimo desempenho para os defeitos internos e defeitos externos aplicados. Nenhuma proteção de primeira zona atuou indevidamente para defeitos externos e nenhum defeito interno de baixa impedância (R1) foi ignorado pelas proteções, embora não tenha ocorrido *trip* simultâneo em todos os casos. A Figura 5.23 mostra o plano R-X para defeitos internos observados pelos relés de distância de terra e de fase dos três terminais, onde a primeira coluna contém os pontos para os defeitos internos em que ao menos um elemento do respectivo terminal atuou e a segunda coluna contém os pontos para os defeitos internos da primeira coluna em que os relés dos três terminais atuaram em conjunto.

Todos os relés de distância atuaram para todos os defeitos trifásicos de resistência R1, sem exceção. O *trip* simultâneo ocorreu para todos esses casos, com a exceção de 4 deles, mais próximos dos terminais S e T, em que o relé do terminal R não foi sensibilizado. Para os outros tipos de defeitos, o desempenho do conjunto variou.

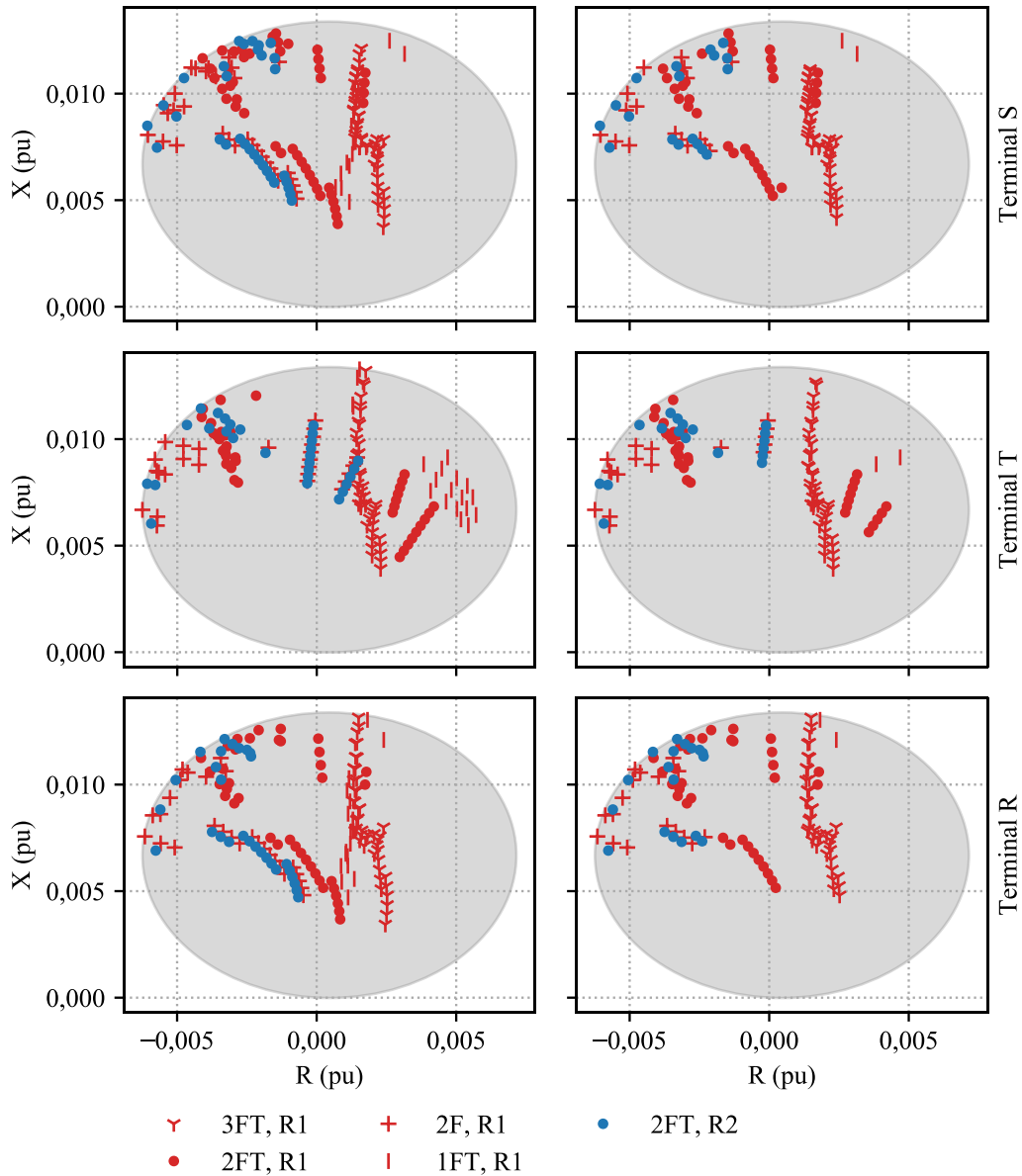


Figura 5.23 Planos R-X para os relés dos três terminais da LT – operação individual e conjunta.

A Figura 5.24 mostra quais relés atuaram para os defeitos 2FT de resistência R2 ao longo dos diferentes trechos da LT. A região de *trip* simultâneo para o ajuste de 80% de 90 km (menor distância entre dois terminais) é equivalente à cobertura de 72 km. Isso significa que, a proteção de distância no terminal S tem alcance para até 22 km dentro dos trechos P-R e P-T, o que se traduz a 44% partindo de P em direção à R e 55% partindo de P em direção à T. O resultado da Figura 5.24 é coerente com a discussão sobre a região

de *trip* simultâneo, tendo em vista que essa região é percentualmente maior no trecho T-P. As diferenças se justificam por discrepâncias nas contribuições de corrente de curto-circuito entre os terminais e os erros dos TCs durante o defeito como observado na Seção 5.5.2.3.

Os defeitos de maior resistência (R2) não capturados pela proteção de distância se localizaram à direita das características *mho* da Figura 5.23. Em análise posterior, para melhorar a atuação contra defeitos de maior resistência, a característica quadrilateral, conforme discutido na Seção 2.3.1, é uma alternativa que permite o ajuste do alcance resistivo da proteção de distância. Assim, a adequação da característica para um projeto de proteção também faz parte do ajuste da proteção de distância.

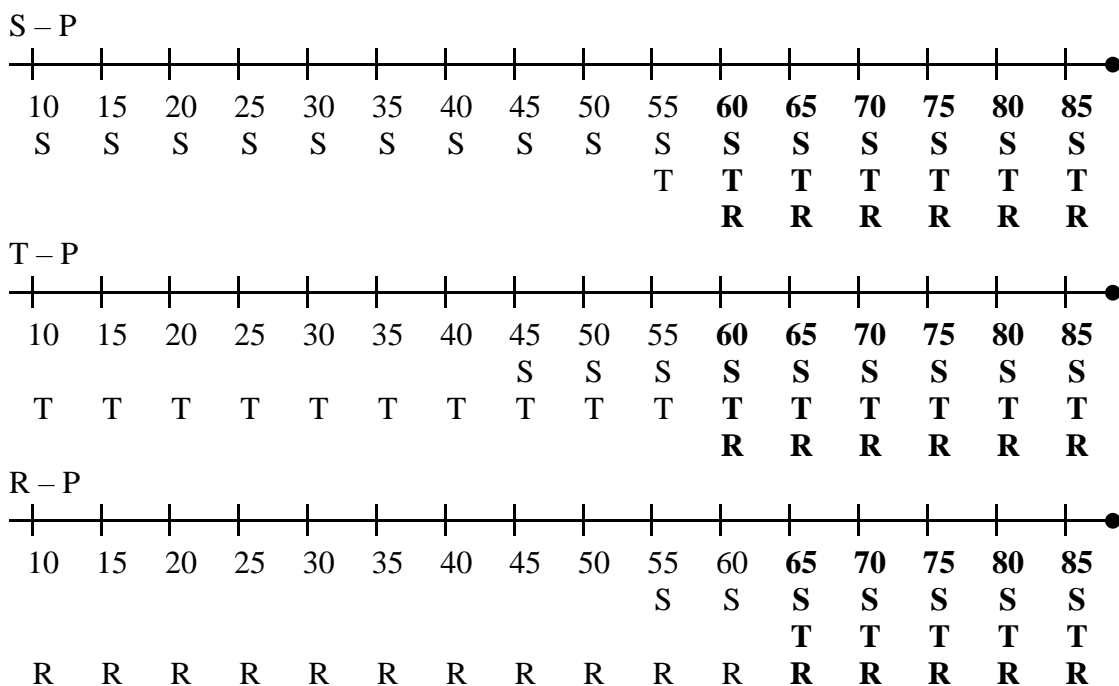


Figura 5.24 Relés de terra dos terminais que sinalizaram *trip* para defeitos 2FT de resistência R2, com destaque para as posições com *trip* simultâneo dos três terminais.

5.6 Conclusões

Os resultados deste capítulo confirmam que a filosofia de proteção diferencial é eficaz, segura e rápida para proteger Linhas de Transmissão Multiterminais. Dentre as opções de esquemas que envolvem a comunicação entre terminais, é a que possui o projeto mais direto e insensível às diferentes configurações de LTs [8], como diferentes comprimentos, números de terminais, presença ou não de fontes em seus terminais e variação do nível de curto-circuito.

Embora existam muitos estudos e recomendações sobre o uso da filosofia de proteção de distância em LTs multiterminais [8, 7, 12, 10, 4, 5], a necessidade da

teleproteção reduz a vantagem econômica que, na configuração de LT de dois terminais, melhor posicionariam essa filosofia em relação à diferencial. Os resultados da Seção 5.5.3 indicam que não se pode contar apenas com a proteção por zonas para proteger toda a LT se o *trip* sequencial for indesejado.

Dentre as características analisadas, mais uma vez, a característica de restrição percentual se mostrou a mais simples e eficaz para os eventos analisados e dentro dos limites admitidos. A característica de plano α generalizado se mostrou uma novidade equiparável, com grandezas notadamente estáveis no plano e agilidade na detecção da condição de defeito, embora de formulação mais complexa. A característica de plano $R\lambda$ apresentada teve desempenho satisfatório, embora seja dependente de outros elementos para a sua correta atuação e estabilização.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões do trabalho

Embora seja uma solução difundida para a proteção de LTs curtas [3], a proteção diferencial pode ser aplicada em circuitos mais longos e complexos. As antigas barreiras para a implantação da filosofia, sejam relativas aos custos associados aos comprimentos dos circuitos, ou à velocidade e confiabilidade da tecnologia de comunicação utilizada, já não são impedimentos tão relevantes para a sua implantação devido à evolução tecnológica e à demanda pela técnica.

Nesse trabalho foram apresentadas algumas das diversas filosofias de proteção para LTs, com maior ênfase na filosofia de proteção diferencial. Algumas características da proteção diferencial foram abordadas, sejam elas práticas, implementadas em relés reais, como a de restrição percentual e a de plano α , sejam ainda puramente teóricas, como a de plano $R\lambda$. O correto funcionamento delas foi, num primeiro momento, verificado com auxílio de oscilografias de um evento real de defeito em uma LT curta.

Algumas configurações de LTs que introduzem dificuldades no projeto da proteção foram apresentadas, como as LTs com compensação série e as LTs multiterminais. As dificuldades dos projetos foram comentadas e posteriormente verificadas nos resultados de simulações de sistemas baseados em casos reais ou hipotéticos.

Em todos os casos analisados, incluindo de LTs multiterminais, o projeto da proteção diferencial foi demonstrado para a proteção completa de uma LT. O caso da LT com compensação série, em particular, teve análises para identificar as condições de carregamento, correntes de curto-circuito de regime permanente e simulação em EMTP para obter os melhores ajustes. Comparado com esquemas que utilizam a filosofia de distância, a proteção diferencial é mais simples. A zona de proteção é o próprio elemento.

Para o caso da LT com compensação série, nos eventos simulados, a proteção diferencial se mostrou imune aos efeitos de inversão de tensão e corrente. Para esse último, especial cuidado deve ser tomado, tendo em vista que a inversão de corrente tende a dessensibilizar a proteção diferencial. Para os elementos dependentes de medidas de

tensão, como a compensação de carregamento capacitivo e o estimador da distância ao defeito, a inversão da tensão não se mostrou um problema, considerando-se que os TPs podem ser posicionados para o lado de dentro da LT, após os BCSs. O projeto de filtragem da medição do relé também foi explorado nesse trabalho. Embora os parâmetros da filtragem não sejam comumente abertos nos relés comercializados, foi observado o seu impacto no desempenho da proteção, sobretudo na segurança contra defeitos externos e na velocidade de operação para defeitos internos.

Para o caso da LT multiterminal, foi estudado o projeto da proteção de uma LT de três terminais, com terminais de diferentes níveis de curto-circuito, transferência e comprimentos. A principal conclusão do estudo é que, para o projeto da proteção diferencial desse tipo de LT, a configuração física tem pouco ou nenhum impacto no ajuste da proteção. Desde que comunicação e medidas de todos os terminais estejam disponíveis, a proteção diferencial é uma solução para LTs multiterminais.

Tradicionalmente utilizadas para LTs multiterminais, com literatura extensa, a proteção de distância pode depender de teleproteção, reduzindo a sua vantagem econômica em relação à diferencial. Além disso, apresenta aspectos que devem ser julgados cuidadosamente, como a região de *trip* simultâneo e o *trip* sequenciado dos terminais. Para LTs com tapes, as proteções tradicionais de sobrecorrente e distância podem ser vantajosas se considerado o custo-benefício de se implantar medição e comunicação em todos os terminais.

Dentre as filosofias de proteção diferencial analisadas, nos casos estudados, como o de evento real, da LT compensada e da LT de três terminais, podem ser destacadas as suas qualidades. De uma maneira geral, a característica de restrição percentual de dupla inclinação se mostrou a mais simples e eficaz. A característica de plano α é aquela que oferece mais graus de liberdade para o ajuste da proteção, proporcionando o melhor controle para inibir efeitos de atraso sem ceder em segurança.

A proteção diferencial não deve ser considerada uma substituta das proteções tradicionais. Pelo contrário, os resultados desse trabalho indicam que a proteção diferencial deve fazer parte da proteção principal ou alternada de uma LT. Do ponto de vista de confiabilidade, na falha do meio de comunicação, a LT não deve ficar desprotegida. Além disso, embora o atraso da comunicação em linhas longas possa ser compensado, a informação trocada entre os terminais não é instantânea, sendo assim a proteção diferencial não substitui uma proteção de primeira zona no que diz respeito à rapidez.

6.2 Trabalhos futuros

Embora este trabalho se dedique a avaliar a proteção diferencial de LT, não é possível esgotar o assunto em um único texto. Como trabalhos futuros, dentro da temática de proteção diferencial para LT, podem ser exploradas novas características, paradigmas de proteção, o desempenho em diferentes configurações de LT, aplicações, recursos envolvidos e projetos completos de proteção.

Características adaptativas podem ser exploradas, tendo em vista os problemas que afetam a proteção diferencial. Dentre eles, o erro de medida devido à saturação dos TCs pode ter efeito mitigado com auxílio de recursos para a identificação do estado de saturação do TC e aplicação de técnicas de estabilização, e com isso modificar os parâmetros da proteção.

Pode ser analisado o projeto e o desempenho da proteção diferencial para outras configurações de LT, como aquelas que incluem elementos dentro da sua zona de proteção (transformadores, cargas etc.) ou que possuem acoplamento de componentes de sequência zero com circuitos vizinhos.

Recursos como a estimação da distância ao defeito e da compensação da corrente de carregamento capacitivo podem ser investigados em trabalhos adicionais. O efeito desse último no desempenho das diferentes características de proteção diferencial merece atenção na aplicação desse tipo de proteção em circuitos longos e de alta tensão.

O desempenho da proteção diferencial pode ser comparado ao de outros esquemas de teleproteção, como aqueles que envolvam elementos direcionais ou de comparação de fases.

Paradigma como o da proteção no domínio do tempo, que possibilita a identificação de um defeito em fração de um ciclo [25], pode ser explorado em comparação com o paradigma tradicional da proteção baseada em fasores. Uma vez que esse paradigma deve antecipar uma série de problemas relativos a transitórios rápidos, novas aplicações podem surgir.

Finalmente, o trabalho aqui desenvolvido pode ser aperfeiçoado, seja com uma modelagem mais fidedigna do circuito do Capítulo 4 e da rede equivalente, seja com a aplicação em LTs de mais de três terminais. O impacto da proteção dos BCSs na proteção de distância e em outras filosofias pode ser melhor investigado.

Referências

- [1] Cigré Working Group B5.23, "Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks," 2014.
- [2] H. Miller, J. Burger, N. Fischer and B. Kasztenny, "Modern Line Current Differential Protection Solutions," in *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2010.
- [3] IEEE-SA, "Std C37.243-2015 IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication," IEEE, 2015.
- [4] IEEE-SA Standards Board, "IEEE Guide for Protective Relaying Applications to Transmission Lines (Std C37.113-1999(R2004)," IEEE, 2004.
- [5] P. Anderson, *Power System Protection*, IEEE Press, 1999.
- [6] "Web Map EPE - Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro," [Online]. Available: <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>.
- [7] M. A. Bostwick and E. L. Harder, "Relay Protection of Tapped Transmission Lines," *Transactions of the AIEE*, vol. 63, no. 10, pp. 645-650, 1943.
- [8] AIEE Committee Report, *Protection of Multiterminal and Tapped Lines*, AIEE, 1961.
- [9] B. Kasztenny, G. Benmouyal, H. J. Altuve and N. Fischer, "Tutorial on Operating Characteristics of Microprocessor-Based Multiterminal Line Current Differential Relays," in *38th Annual Western Protective Relay Conference*, 2011.
- [10] Cigré Working Group 04, "Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations," Cigré, 1991.
- [11] C. R. Mason, *The Art & Science of Protective Relaying*, GE.
- [12] W. A. Elmore, *Pilot Protective Relaying*, New York: Marcel Dekker, Inc., 1999.
- [13] B. Kasztenny, I. Voloh and E. A. Udren, "Rebirth of the Phase Comparison Line Protection Principle," in *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2006.
- [14] Z. Xu, Z. Du, L. Ran, Y. Wu, Q. Yang and J. He, "A Current Differential Relay for a 1000-kV UHV Transmission Line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1392-1399, July 2007.
- [15] A. R. v. C. Warrington, *Protective Relays: their Theory and Practice Vol. I*, Springer, 1968.
- [16] G. Benmouyal, "The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane," in *32nd Annual Western Protective Relay Conference*, 2005.

- [17] E. Bakie, C. Weshoff, N. Fischer and J. Bell, "Voltage and Current Inversion Challenges When Protecting Series-Compensated Lines - A Case Study," in *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2016.
- [18] L. F. Santos and P. M. Silveira, "Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines," in *IEEE/PES Transmisson & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006.
- [19] S. Dambhare, S. Soman and M. C. Chandorkar, "Adaptive Current Differential Protection Schemes for Transmission-Line Protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1832-1841, 2009.
- [20] G. Sivanagaraju, S. Chakrabarti and S. C. Srivastava, "Uncertainty in Transmission Line Parameters: Estimation and Impact on Line Current Differential Protection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 6, pp. 1496-1504, Junho 2014.
- [21] H. J. Altuve, J. B. Mooney and G. E. Alexander, "Advances in Series-Compensated Line Protection," in *35th Annual Western Protective Relay Conference*, 2008.
- [22] J. Jesus, S. Richards, S. Subramanian e H. Ha, "New and smart multi-ended differential solution for power networks," em *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 2017.
- [23] M. Boecker, G. Corpuz, G. Hargrave, S. Das, N. Fischer and V. Skendzic, "Line current differential relay response to a direct lightning strike on a phase conductor," in *71st Annual Conference of Protective Relaying Engineers (CPRE)*, 2018.
- [24] E. O. Schweitzer III, D. E. Whitehead, G. Zweigle, V. Skendzic and S. V. Achanta, "Millisecond, Microsecond, Nanosecond: What can we do with more precise time?," in *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2016.
- [25] E. O. Schweitzer III, B. Kasztenny and M. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults," in *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2016.
- [26] H. Yufeng, C. Deshu, Y. Xianggen, Z. Zhe and C. Yanxia, "The theory and application of differential protection based on instantaneous values," in *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2002.
- [27] L. Xiaohua, Y. Xianggen, C. Deshu and W. Gang, "Theoretical Analysis of Differential Protection Based on Sampled Values," in *International Conference on Power System Technology*, 2006.
- [28] Y. Jingchao, Y. Xianggen, C. Deshu and Z. Ze, "Study on the operating characteristic of sampled value differential protection," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2003.
- [29] S. AsghariGovar and H. Seyedi, "Adaptive CWT-based transmission line differential protection scheme considering cross-country faults and CT

- saturation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2035-2041, 2016.
- [30] S. Sarangi and A. K. Pradhan, "Adaptive α -plane line differential protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2468-2477, 2017.
- [31] D. Costello, J. Young and J. Traphoner, "Paralleling CTs for Line Current Differential Applications: Problems and Solutions," in *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2015.
- [32] A. Phadke, *Computer Relaying for Power Systems*, Wiley, 2009.
- [33] Y. Xue, D. Finney and B. Le, "Charging Current in Long Lines and High-Voltage Cables - Protection Application Considerations," in *39th Annual Western Protective Relay Conference*, 2012.
- [34] G. Benmouyal, J. Roberts e S. E. Zocholl, "Seleção de TCs para Otimização do Desempenho dos Relés," *SEL Journal of Reliable Power*, vol. 2, nº 3, 2011.
- [35] E. O. Schweitzer III, "Filtering for Protective Relays," in *IEEE WESCANEX 93 Communications, Computers and Power in the Modern Environment*, 1993.
- [36] A. Guzmán, J. Mooney, G. Benmouyal, N. Fischer and B. Kasztenny, "Transmission Line Protection System for Increasing Power System Requirements," in *Modern Electric Power Systems*, 2010.
- [37] F. Calero and H. J. Altuve, "Identifying the Proper Impedance Plane and Fault Trajectories in Distance Protection Analysis," in *38th Annual Protective Relay Conference*, 2011.
- [38] GE, "A New Approach to Current Differential Protection for Transmission Lines," in *Protective Relaying Comittee Meeting*, Portsmouth, NH, 1998.
- [39] G. Kindermann, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência v. 2*, Florianópolis, 2012.
- [40] W. D. Humpage and D. W. Lewis, "Distance protection of teed circuits," *Proceedings of the IEE*, vol. 114, no. 10, pp. 1483-1498, 1967.
- [41] R. Hedding, *Advanced Multi-terminal Line Current Differential Relaying and Applications*, 2007.
- [42] J.-A. Jiang, Y.-H. Lin, C.-W. Liu e J.-C. Ma, "An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines - Part I: Theory and Algorithms," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, nº 2, pp. 486-493, 2000.
- [43] J.-A. Jiang, Y.-H. Lin, J.-Z. Yang, T.-M. Too and C.-W. Liu, "An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines - Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1136-1146, 2000.
- [44] W. D. Stevenson and J. J. Grainger, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.

- [45] C.-W. Liu, K.-P. Lien, C.-S. Chen and J.-A. Jiang, "A Universal Fault Location Technique for N-Terminal ($N \geq 3$) Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1366-1373, 2008.
- [46] M. Proctor, "Not all differentials are the same: How different percent differential relay algorithm methods can impact relay settings and performance," in *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2016.
- [47] M. Thompson, "Percentage Restrained Differential, Percentage of What?," in *64th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 2011.
- [48] H. Altuve, G. Benmouyal, J. Roberts and D. A. Tziouvaras, "Transmission Line Differential Protection with an Enhanced Characteristic," in *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, 2004.
- [49] Schneider Electric, MiCOM P54x Current Differential Protection Relay - Technical Manual, 2013.
- [50] Schneider Electric, *MiCOM P54x Current Differential Protection Relay Technical Manual*, 2013.
- [51] D. R. Parrini e T. M. L. Assis, "Modelagem do Sistema de Comunicação em uma Ferramenta de Simulação Dinâmica com Aplicação na Proteção Diferencial de Linhas Longas Baseada em Sincrofasores," em *SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Curitiba, 2017.
- [52] V. Henn, R. Krebs, G. Arruda, R. Dutra and P. Campos, "High Degrees of Series Capacitors in Bulk Power Transmission Systems Need Special Protection Principles," in *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, 2009.
- [53] IEEE, "Std C37.111-1999, Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems," 1999.
- [54] O. P. Hevia, «Compilación del ATP al alcance del usuario.,» *Revista Iberoamericana del ATP*, 2002.
- [55] L. Dubé, Users Guide to MODELS in ATP, 1996.
- [56] D. R. Parrini, Implementação e Desenvolvimento de Aplicações de um Sistema de Comunicação na Ferramenta Simulight, Trabalho de Conclusão de Curso, 2016.
- [57] R. E. Wilson and J. M. Nordstrom, "EMTP Transient Modeling of a distance relay and a comparison with EMTP laboratory testing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 984-992, July 1993.
- [58] J. A. Marinez-Velasco, «Simulación de sistemas de protección con el EMTP,» *Revista Iberoamericana del ATP*, Julio 1998.
- [59] J. M. Kennedy, G. E. Alexander and J. S. Thorp, "Variable Digital Filter Response Time in a Digital Distance Relay," [Online]. Available: <https://store.gegridsolutions.com/faq/documents/ALPS/GER-3798.pdf>.
- [60] Y. Q. Xia and K. K. Li, "Development and implementation of a variable-window algorithm for high-speed and accurate digital distance protection," *IEE*

Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 4, pp. 383-389, 1994.

- [61] IEEE, "IEEE Std C37.116 Guide for Protective Relay Application to Transmission-Line Series Capacitor Banks," 2007.
- [62] ArresterWorks, "ArresterFacts 003.1 Arrester V-I Characteristics Tool," 2016. [Online]. Available: <https://www.arresterworks.com/arresterfacts/>. [Accessed 23 06 2018].
- [63] Argentinian EMTP/ATP User group CAUE, ATP Rule Book, 2013.
- [64] A. Oppenheim, Discrete-Time Signal Processing, Pearson, 2010.
- [65] J. Han, W. Kim, J. Lee e C. Kim, "Fault type classification in transmission line using STFT," em *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection*, 2012.
- [66] E. M. Lima, N. S. D. Brito, B. A. Souza, W. C. Santos e L. M. A. Fortunato, "Analysis of the Influence of the Window Used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault Detection," em *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016.
- [67] J. T. Campos, W. Neves, D. Fernandes Jr. and F. Costa, "Impact of anti-aliasing filter and mimic filter on digital protection relaying," in *XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2014.
- [68] K. M. Silva and R. G. Bainy, "Generalized Alpha Plane for Numerical Differential Protection Applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2565-2566, Dezembro 2016.
- [69] X. Luo and M. Kezunovic, "Interactive Protection System Simulation Using ATP MODELS and C++," in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, 2006.
- [70] E. Jones, T. Oliphant and P. Peterson, "Scipy: Open Source Sicientific Tools for Python," 2001. [Online]. Available: <http://www.scipy.org/>.
- [71] T. Oliphant, "Python for Scientific Computing," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, nº 3, 2007.
- [72] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, 2007.
- [73] Object Management Group (OMG), "Unified Modeling Language (OMG UML) Version 2.5.1," 2017.
- [74] F. Sato e W. Freitas, Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica, Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- [75] N. Tleis, Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practice, Elsevier, 2008.

Apêndice A Módulo para leitura de COMTRADE no ATP

Esse apêndice trata de detalhes da implementação de um módulo de leitura de *COMTRADE* para *ATP*. Não é o objetivo detalhar a link-edição de programas com o *ATP* ou a sua interface com modelos externos. Para detalhes a respeito da compilação e código de interface com outras linguagens, as referências [54, 69] podem ser consultadas. Para mais informações sobre como utilizar a linguagem *MODELS* para interagir com um programa do usuário, é indicado [55].

A interface disponível pelo *ATP* para esse propósito é a indicada na Figura 6.1, onde a função `comtrade_init__` é executada uma vez no início da simulação e a função `comtrade_exec__` é executada a cada passo de simulação. Os argumentos `xin_ar`, `xout_ar`, `xdata_ar` e `xvar_ar` são vetores numéricos que funcionam como a interface de troca de informações entre o *ATP* e o programa externo. Não é possível a troca de outro tipo de informação, como informações textuais (nomes de arquivos e variáveis). Além disso, o vetor numérico `xvar_ar` é o único recurso que a interface do *ATP* disponibiliza ao programa externo para armazenamento de informações entre passos durante a simulação. Uma vez que os conjuntos de arquivos *COMTRADE* teriam que ser processados em todos os passos de simulação e há o requisito da leitura de mais de um conjunto, o módulo foi desenvolvido de forma a contornar essas limitações.

```
extern "C" {
    void comtrade_init__(double xdata_ar[], double xin_ar[],
                        double xout_ar[], double xvar_ar[])
    {
        // inicializar vetor de saída (xout_ar)
        // carregar arquivo de inicialização
    }

    void comtrade_exec__(double xdata_ar[], double xin_ar[],
                        double xout_ar[], double xvar_ar[])
    {
        // exec: para t=0, instanciar Comtrades baseado no arquivo de configuração
        // exec: carregar arquivos de dados e processar
        // exec: para cada t, atribuir valores de saída à xout_ar[]
    }
}
```

Figura 6.1 Código da estrutura do módulo de *COMTRADE* para *ATP*.

O módulo utiliza um arquivo de configuração (INI) para determinar o nome dos conjuntos de arquivos *COMTRADE* acessíveis dentro da simulação (Figura 3.14). O conjunto mínimo de arquivos *COMTRADE* compreende um arquivo de configuração (extensão CFG), com metadados dos canais e parâmetros, e um arquivo de dados (DAT)

com os pontos registrados nos formatos ASCII ou binário. Em referência ao arquivo INI, o usuário pode configurar o bloco *COMTRADE* dentro *ATP* para a leitura de um determinado conjunto, indexado por um número (Figura 3.14, *COMTRADEs* números 1 e 2).

Tendo em vista que se verificou que o número de variáveis transportadas para o *ATP* influencia no tempo de processamento da simulação, o bloco *COMTRADE* permite ao usuário definir qual a sequência de canais é importada. A Figura 6.2 contém o exemplo de um bloco configurado para transferir para uma simulação os dados dos canais de número *i* até o número *j* de um conjunto de arquivos *COMTRADE* de índice *n*.

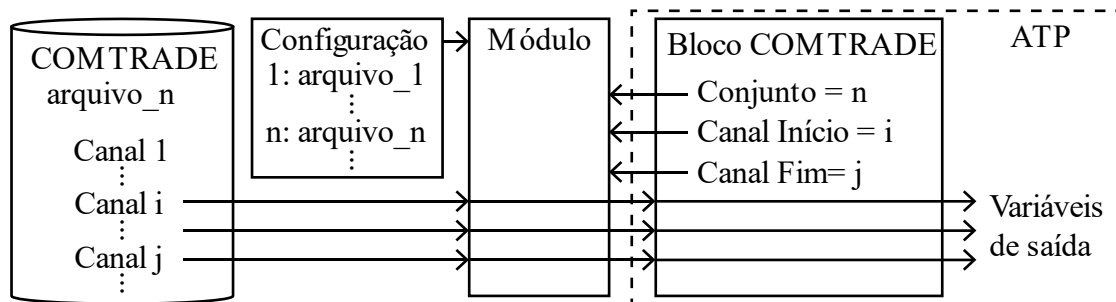


Figura 6.2 Diagrama esquemático da configuração de um bloco *COMTRADE* no *ATP* para a leitura dos canais *i* até *j* do conjunto de arquivos *COMTRADE* *n*.

A estrutura interna do módulo de leitura e a maneira que as informações contidas nos arquivos *COMTRADE* são mantidas em objetos que representam os arquivos. Exceto pelas funções de interface com o *ATP*, o módulo é orientado a objetos, contando com uma classe *Comtrade* para carregar, processar e armazenar os dados das oscilografias. A classe *Comtrade* contém propriedades para acesso as informações dos canais e das oscilografias. Ela possui duas especializações (*subclasses*), *ComtradeBin* e *ComtradeAscii*, baseadas nos dois formatos de arquivo de dados do padrão *COMTRADE*: binário e ASCII. A classe é instanciada uma vez, durante uma simulação, para cada conjunto de arquivos de oscilografias indicados no arquivo de configuração.

A Figura 6.3, complementar a Figura 6.2, contém representado o ciclo de vida do módulo de leitura desenvolvido em C++. O módulo é carregado na primeira chamada *comtrade_init__* pelo *ATP* e assim também o arquivo de configuração. A primeira e as subsequentes chamadas *comtrade_exec__*, para *t=0*, informam ao módulo quais arquivos *COMTRADE* carregar e quais canais extrair. Nos passos seguintes, em cada chamada de *comtrade_exec__*, o módulo recupera a instância da classe *Comtrade* associada a chamada e retorna (definindo uma posição em *xout_ar*) uma amostra interpolada no instante *t*. Finalmente, o módulo determina o fim da simulação quando

$t=t_{max}$ e finaliza a sua função destruindo as instâncias de *Comtrade* e descarregando o módulo.

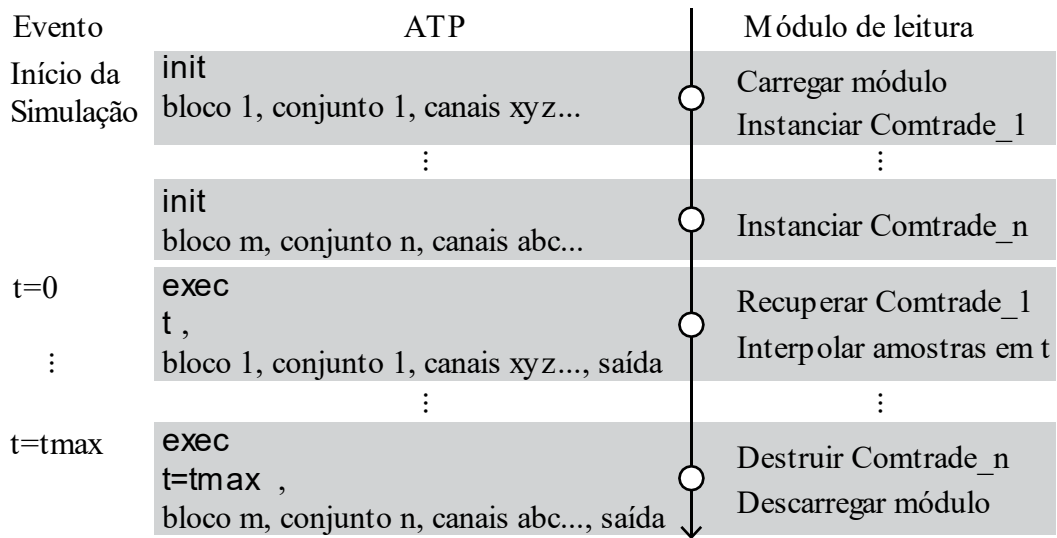


Figura 6.3 Ciclo de vida do módulo de leitura de *COMTRADE* durante uma simulação do *ATP*.

Apêndice B Modelagem da Proteção

Na Seção 3.7 são apresentados resultados de testes de modelos de relés no *ATP* com oscilografias no formato *COMTRADE*. A Figura 6.4 contém o diagrama de blocos do processamento da entrada de dados a partir de blocos *COMTRADE* desenvolvidos nesse trabalho. Nessa Figura, o Conjunto 0 de arquivos *COMTRADE* contém oscilografias do terminal S e o Conjunto 1 do terminal R. A saída dos blocos *COMTRADE* possui seus canais separados e os ganhos K e H convertem as unidades de tensão e corrente, respectivamente, de V e A para pu, em suas respectivas bases. Para a análise da Seção 3.7, o filtro passa-baixas foi desabilitado. As variáveis à direita da Figura 6.4 são aquelas utilizadas diretamente pelos relés.

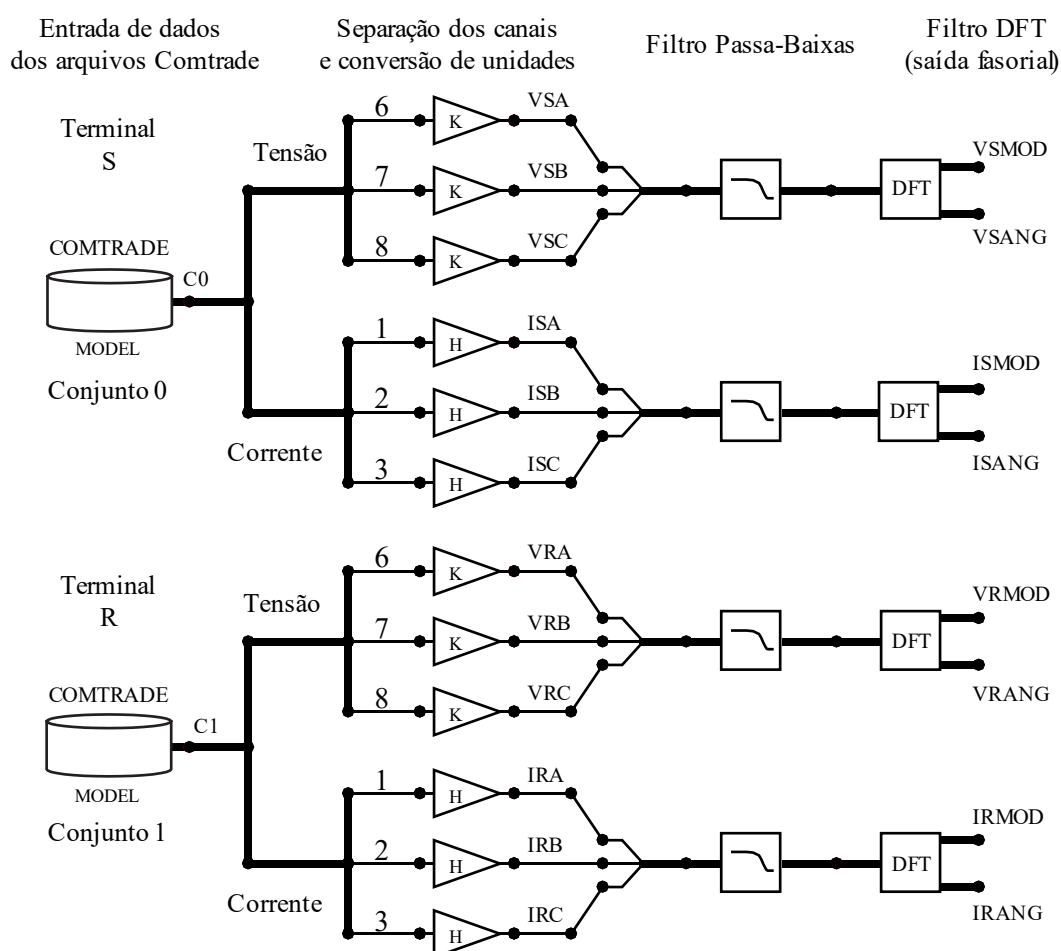


Figura 6.4 Etapas da filtragem de medidas originadas de arquivo *COMTRADE* no *ATPDraw*.

As medidas das proteções modeladas em outros casos estudados nesse trabalho foram processadas e filtradas de maneira similar ao esquema indicado na Figura 6.4 mas com a utilização de um modelo de TC simples com medidas da rede simulada no lugar

dos blocos *COMTRADE*. A Figura 6.5 contém a curva de saturação utilizada nos TCs desse trabalho.

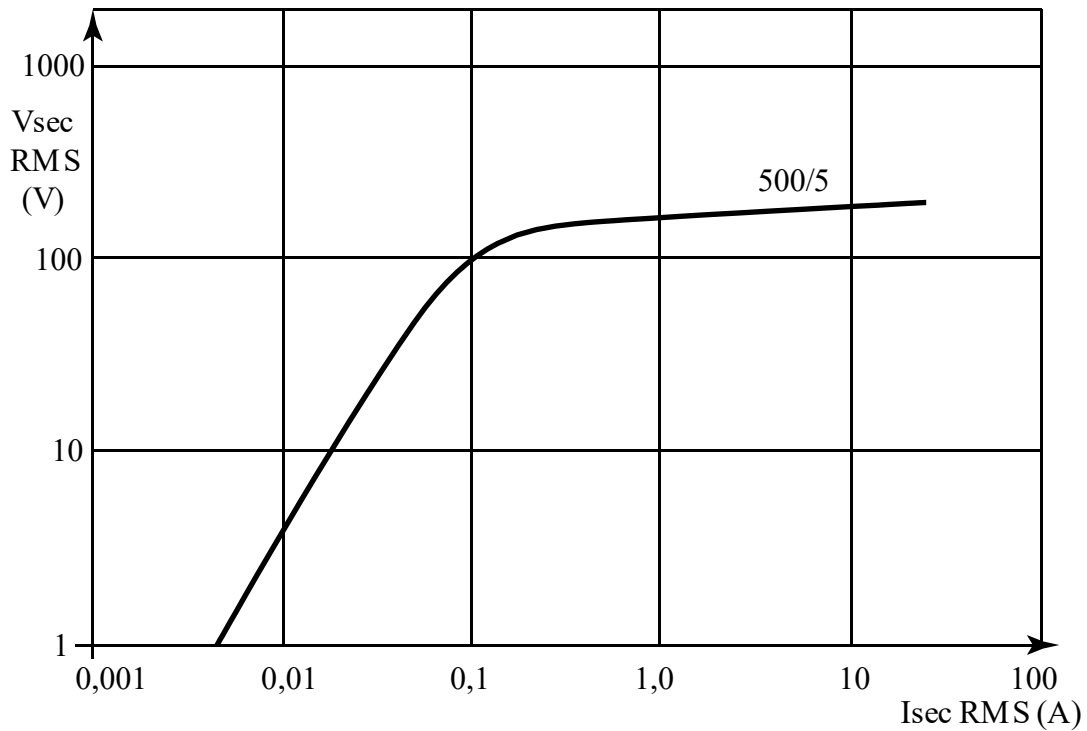


Figura 6.5 Curva de Saturação dos TCs.

Utilizando as variáveis de indicadas na Figura 6.4, os relés diferenciais do tipo restrição percentual e plano α foram representados no *ATP* da forma indicada na Figura 6.6. As medidas de tensão e corrente de ambos os terminais são processadas por um bloco de compensação de corrente de carregamento capacitivo (*line-charging*) e as correntes compensadas ($I_{SCMD} \angle I_{SCAG}$, $I_{RCMD} \angle I_{RCAG}$) são utilizadas como entrada nas proteções diferenciais indicadas.

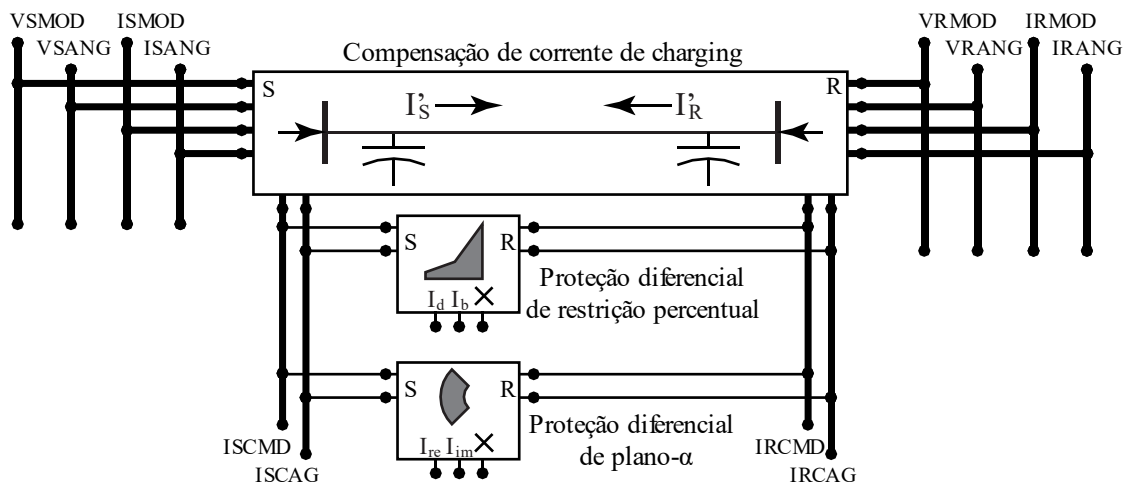


Figura 6.6 Representação dos relés diferenciais de restrição percentual e plano α no *ATPDraw*.

Na Figura 6.7 é indicada a estrutura de medição do relé de plano $R\lambda$. Medidas de tensão e corrente de ambos os terminais são utilizadas na entrada do relé e no localizador de falta. O localizador de falta utiliza medidas de sequência positiva para calcular o índice D , que é utilizado nos cálculos da proteção de plano $R\lambda$.

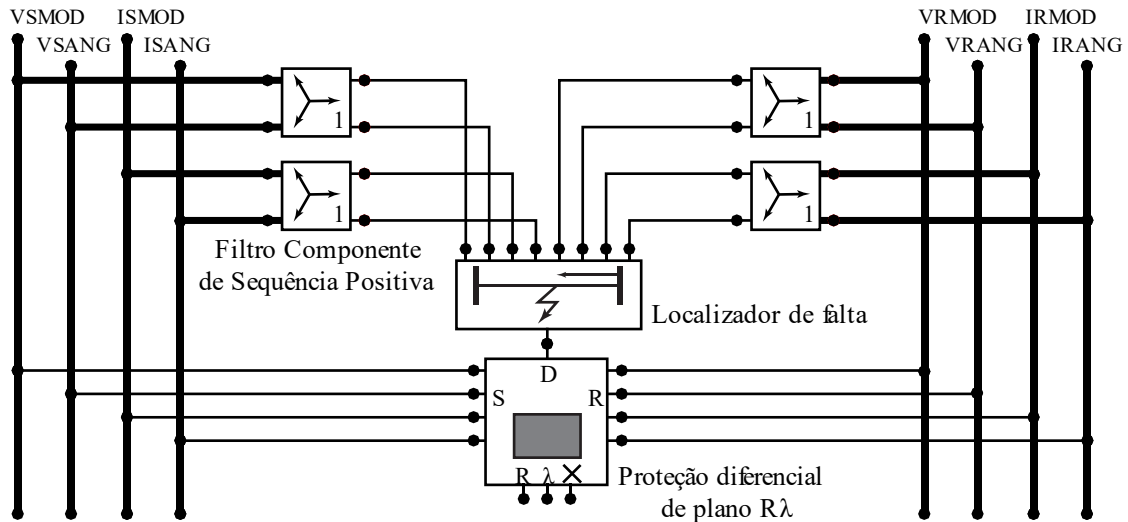


Figura 6.7 Representação do relé diferencial de plano $R\lambda$ no *ATPDraw*.

A Figura 6.8 contém a representação de um relé de distância, em que as medidas tipo fase-terra de um dos terminais são utilizadas. Um filtro de sequência zero calcula o módulo e ângulo da corrente de sequência zero que é utilizado pelo relé para compensação do *loop* de falta. As unidades de fase utilizam medidas tipo fase-fase e não possuem compensação de corrente de sequência zero.

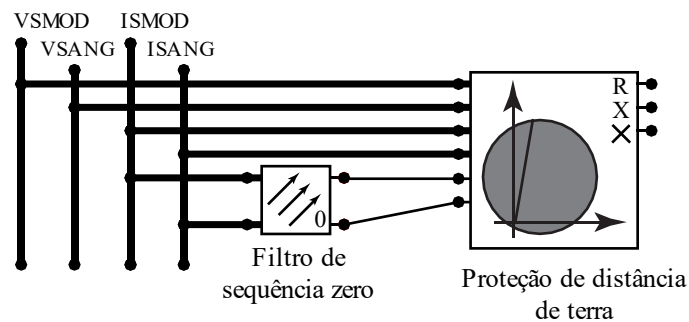


Figura 6.8 Representação de um relé de distância de terra no *ATPDraw*.

As proteções diferenciais para linhas de três terminais foram implementadas de maneira similar às para linhas de dois terminais. Entradas adicionais para fasores de tensão e corrente do terceiro terminal foram adicionadas.

As proteções de distância e diferenciais foram implementadas utilizando a linguagem *MODELS*. Na Figura 6.9 está o código reduzido da proteção de restrição percentual para LTs de três terminais. Os blocos *VAR* e *INIT* foram removidos por não acrescentarem informações. A lógica de contagem de tempo e trip (*“time counter and trip*

signal”) é comum a todas as proteções implementadas. A contagem de segurança foi implementada na forma de um atraso intencional (parâmetro *Ttrip*). Embora todas as características emitam sinal de *trip*, as proteções foram modeladas em malha aberta.

```

MODEL R87PR3
DATA
  k1      {DFLT: 0.30}
  k2      {DFLT: 1.50}
  Is1     {DFLT: 0.50}
  Is2     {DFLT: 2.00}
  Ttrip   {DFLT: 0.0}
  OFS     {DFLT: 0.0}
  FREQ    {DFLT: 60.0}
INPUT
  ISMOD, ISANG, IRMOD, IRANG, ITMOD, ITANG
OUTPUT
  trip, ib, id
VAR
  trip, ib, id, id_re, id_im
  test -- outside the restraining region test
  tsense -- the time when the relay started the time counter
  activated -- if the relay started the time counter
EXEC
  IF t > 1/FREQ THEN
    ib:= (ISMOD + IRMOD + ITMOD) / 2.0
    id_re:=ISMOD*cos(rad(ISANG)) + IRMOD*cos(rad(IRANG + OFS)) +
           ITMOD*cos(rad(ITANG))
    id_im:=ISMOD*sin(rad(ISANG)) + IRMOD*sin(rad(IRANG + OFS)) +
           ITMOD*sin(rad(ITANG))
    id:=norm(id_re, id_im)
    -- is (ib,id) in the operating region?
    IF ib < Is2 THEN
      test:=id > (k1*ib + Is1)
    ELSE
      test:=id > (k2 *(ib - Is2) + k1*Is2 + Is1)
    ENDIF
    -- time counter and trip signal
    IF test THEN
      IF activated and t >= tsense + Ttrip THEN
        trip:=test
      ELSE
        IF not(activated) THEN
          activated:=true -- start the time counter
          tsense:=t
        ENDIF
      ENDIF
    ELSE
      -- stop the counter
      activated:=false
    ENDIF
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 6.9 Código em *MODELS* da função diferencial por restrição percentual para LTs de três terminais.

Recursos como a entrada de dados de arquivos *COMTRADE*, o seletor de ramos e a proteção de plano α generalizado foram implementadas em *C++* utilizando o recurso de *foreign function* do ATP [54]. Na Figura 6.10 está o código *C++* da implementação do plano α generalizado. A cada passo de simulação *alphag3_exec__* é executada, extrai os dados de entrada do bloco do relé no ATP (*xin_ar*), calcula o ponto de operação da característica e entrega ao ATP os valores de K_{re} e K_{im} (*xout_ar*). A utilização desses

valores é feita pela contraparte em *MODELS* para verificar a condição de *trip*, que também é feita de forma similar a utilizada na proteção de plano α .

```
DLLEXPORT void alphag3_exec__(double xdata_ar[],
    double xin_ar[], double xout_ar[], double xvar_ar[])
{
    double const DEG2RAD = PI/180.0;
    double const RAD2DEG = 180.0/PI;
    double const ITOL = 1E-5;

    double t      = xin_ar[INP_INDEX_T];
    double tmax   = xin_ar[INP_INDEX_TMAX];
    double ismod  = xin_ar[INP_INDEX_ISMOD];
    double isang  = xin_ar[INP_INDEX_ISANG];
    double itmod  = xin_ar[INP_INDEX_ITMOD];
    double itang  = xin_ar[INP_INDEX_ITANG];
    double irmod  = xin_ar[INP_INDEX_IRMOD];
    double irang  = xin_ar[INP_INDEX_IRANG];

    // input conversion
    complex is = pol2rect(ismod, isang*DEG2RAD);
    complex it = pol2rect(itmod, itang*DEG2RAD);
    complex ir = pol2rect(irmod, irang*DEG2RAD);

    double Irst = ismod + itmod + irmod;
    if (IRST < ITOL) Irst = ITOL;
    complex Idiff = is + it + ir;

    double Rs = (is * Idiff.conj()).real;
    double Rt = (it * Idiff.conj()).real;
    double Rr = (ir * Idiff.conj()).real;

    double beta;
    if (Rs >= Rt && Rs >= Rr)    beta = is.phase();
    else if(Rt >= Rs && Rt >= Rr) beta = it.phase();
    else                          beta = ir.phase();

    // Auxiliary phasor Ix
    complex Ix = Idiff*(pol2rect(1.0, beta));

    // Equivalent currents
    double Ilocal_re;
    double irx = Irst - Ix.real;
    if (abs(irx) > ITOL) Ilocal_re = (Ix.imag*Ix.imag - irx*irx)/(2*irx);
    else Ilocal_re = ITOL;

    double Ilocal_im = Ix.imag;
    complex Ilocal = complex(Ilocal_re, Ilocal_im) * pol2rect(1.0, beta);
    complex Iremote = pol2rect(Irst - Ilocal.mod(), beta);

    complex k = Iremote / Ilocal;

    xout_ar[OUT_INDEX_KRE] = k.real;
    xout_ar[OUT_INDEX_KIM] = k.imag;
}
```

Figura 6.10 Código em C++ da função diferencial por plano α generalizado para LTs de três terminais.

Apêndice C Sistema Belém-Manaus

C.1 Dados

Dados nas bases de 100 MVA e 500 kV.

Tabela 6.1 Parâmetros das LTs

LT	R1 (%)	X1 (%)	B1 (Mvar)	R0 (%)	X0 (%)	B0 (Mvar)	L (km)
LT Lechuga/Silves 500 kV	0,165	2,376	354,09	1,852	8,31	212,45	224
LT Silves/Oriximiná 500 kV	0,238	3,483	534,21	2,571	22,99	320,53	334
LT Oriximiná/Jurupari 500 kV	0,248	3,638	555,85	2,659	12,49	333,51	350

Tabela 6.2 Reatância dos BCSs

LT	Reatância Série (%)
LT Lechuga-Silves 500 kV	-0,832
LT Silves-Oriximiná 500 kV	-1,208
LT Oriximiná-Jurupari 500 kV	-1,273

Tabela 6.3 Reatância dos Reatores de Linha

LT	Reatância Shunt (%)
LT Lechuga-Silves 500 kV	90,91
LT Silves-Oriximiná 500 kV	50,0
LT Oriximiná-Jurupari 500 kV	50,0

Tabela 6.4 Equivalentes

Barra	R1 (%)	X1 (%)	R0 (%)	X0 (%)
Lechuga 500 kV	0,0922	3,1007	0,0259	1,3543
Silves 500 kV		33,1155		
Oriximiná 500 kV		68,00		
Jurupari 500 kV	0,1031	0,7423	0,1957	1,6317

C.2 Proteção de banco de capacitores série

Os BCSs foram modelados com a estrutura da Figura 6.11. A curva adotada nos MOVs é formada pelos pontos da Tabela 6.5. Essa curva foi baseada na curva disponível em [62] e ajustada para os BCSs com base nas etapas descritas em [61].

Tabela 6.5 Característica VxI dos MOVs dos BCSs

I (A)	0,03	3	30	375	750	1500	3000	4500	9000	15000	300000	600000	120000
U (kV)	122	128	135	150	155	160	169	175	184	194	207	228	256

O *gap* e o disjuntor de *by-pass* são representados por uma única chave e o seu controle é realizado pelo modelo “SPARKGAP” cujo código *MODELS* está na Figura 6.12, com os blocos VAR e INIT omitidos. Satisfeitas as condições para o *gap* atuar, a chave

comandada por GAP_SW é fechada e a chave comandada por MOV_SW é aberta (para retirar o MOV de serviço junto do BCS) e vice-versa.

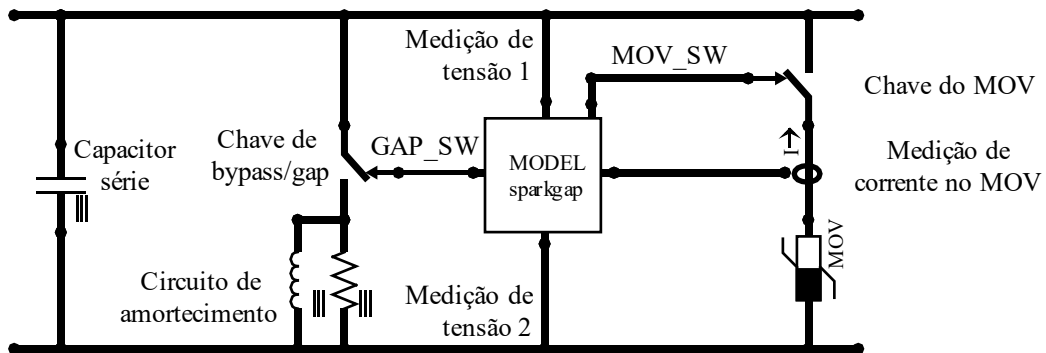


Figura 6.11 Representação de um BCS no ATP.

```

MODEL SPARKGAP
DATA
  CURR_PICKUP {DFLT: 8000} -- A
  EN_PICKUP   {DFLT: 30}   -- MJ
  TRIP_DELAY  {DFLT: 0.001} -- s
  CLEAR_TIME  {DFLT: 0.100} -- s
INPUT
  Vmov1[1..3], Vmov2[1..3], Imov[1..3]
OUTPUT
  GAP_SW[1..3], MOV_SW[1..3]
EXEC
  FOR ph:=1 TO 3 DO
    power[ph]:=abs(Imov[ph] * (Vmov1[ph]-Vmov2[ph]))
    energy[ph]:=integral(power[ph])
    abscurr[ph]:=abs(Imov[ph])
    current_test:=abscurr[ph] >= CURR_PICKUP
    energy_test:=energy[ph] >= EN_PICKUP*J_2_MJ
    IF current_test or energy_test THEN -- trip condition
      IF not trip_condition[ph] THEN
        trip_test_time[ph]:=t
      ENDIF
      trip_condition[ph]:=true
    ELSE
      trip_condition[ph]:=false
    ENDIF
    IF t >= trip_test_time[ph] + TRIP_DELAY and -- trip delay
      trip_condition[ph] and GAP_SW[ph]<>true THEN
      GAP_SW[ph]:=true
      tripped_time[ph]:=t
    ENDIF
    IF t >= tripped_time[ph] + CLEAR_TIME and -- restart
      GAP_SW[ph]<>false and energy_test=false THEN
      GAP_SW[ph]:=false
    ENDIF
    MOV_SW[ph]:=NOT GAP_SW[ph]
  ENDFOR
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 6.12 Código em MODELS do controle do gap de um BCS.

Apêndice D Programa para Análise de Curto-Circuito

Um programa para análise de curto-circuito equilibrado foi implementado em *Python* [70, 71, 72] com o propósito de obter ajustes iniciais para proteções de LTs apresentadas nesse trabalho. Embora o *ANAFAS* permita calcular correntes para defeitos de diferentes tipos ao longo do comprimento de LTs e a representação de carregamento pré-falta, carregamento capacitivo etc., o programa desenvolvido permite incluir proteções nos circuitos para que seja possível verificar o ponto de operação em suas características.

A Figura 6.13 contém o diagrama de classes [73] do programa desenvolvido com os principais elementos representados. Uma execução precisa de uma instância da classe *ShortCircuit*, onde são definidas as opções de execução do programa, como características do defeito e o modo de execução, e contém a representação da rede (lista de *Element*) e, opcionalmente, da proteção (lista de *Protection*). A classe *Element* é um elemento de rede que contém uma representação por matriz de admitância. A classe *Protection* representa um relé (*Device*) ou esquema com relés (*Scheme*) para a produção de relatórios da operação de relés em defeitos na rede.

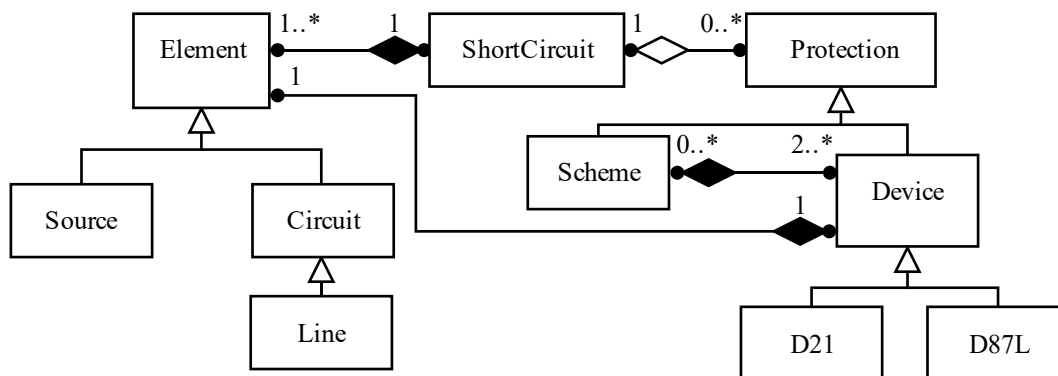


Figura 6.13 Diagrama de classes [73] do programa de análise de curto-circuito.

O método de solução do programa é por fatoração da matriz de admitância da rede [74, 75]. O programa permite a definição de opções como da utilização de tensões pré-falta, fator multiplicativo de tensões, representação ou não de cargas, elementos *shunt* e carregamento capacitivo. Trata também da possibilidade de defeito em posição intermediária de uma linha, a substituindo por duas linhas e um nó intermediário.

Os tipos básicos da classe *Element* são *Source*, considerada como uma impedância para a terra com contribuição para a corrente de defeito em todos os modos de execução e *Circuit*, servindo de elemento série genérico entre dois nós ou mais nós.

Os tipos básicos da classe *Protection* são *Scheme* e *Device*. *Device* representa uma função de um relé de proteção (ex.: 21 e 87L) e deve ser associado a algum elemento da rede para a monitoração das suas grandezas. *Scheme* deve ser associado a dois ou mais relés para implementar uma lógica composta, como por exemplo um esquema de teleproteção envolvendo dois relés nos terminais de uma linha. Numa execução do programa, um relatório indica quais funções e esquemas atuaram.

Para validação da ferramenta, foi considerado o sistema teste apresentado na Seção 4.1 cujos dados são fornecidos na Seção C.1 do Apêndice C. Com a hipótese simplificadora de que as correntes de curto-circuito são superiores às correntes de carga [74], foram ignorados parâmetros *shunt* das LTs, cargas, reatores e os CERs. Assim, os dados para a reprodução do caso são aqueles de sequência positiva da Tabela 6.1 e Tabela 6.4. O sistema simplificado adquire a forma da Figura 6.14.

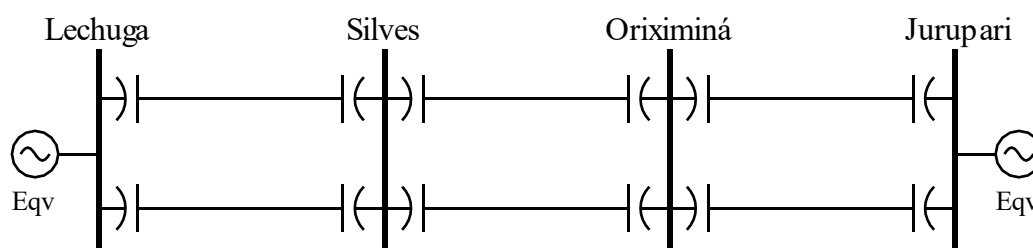


Figura 6.14 Rede simplificada representada nos programas de curto-circuito.

Os resultados da execução do programa em comparação com o *ANAFAS* estão na Tabela 6.6. Conclui-se que os programas produzem os mesmos resultados.

Tabela 6.6 Corrente de defeito (pu) e tensões nas barras (pu) para defeitos no sistema

Defeito em		Corrente	V (Lechuga)	V (Silves)	V (Oriximiná)	V (Jurupari)
Lechuga	Programa C.C.	$77,036\angle - 82,8^\circ$	$0,000\angle - 82,80^\circ$	$0,165\angle - 1,91^\circ$	$0,411\angle - 1,63^\circ$	$0,663\angle - 1,64^\circ$
	ANAFAS	$77,036\angle - 82,8^\circ$	0,000	0,165	0,411	0,663
Silves	Programa C.C.	$82,642\angle - 81,98^\circ$	$0,106\angle - 10,15^\circ$	$0,000\angle - 81,99^\circ$	$0,295\angle - 1,82^\circ$	$0,597\angle - 1,93^\circ$
	ANAFAS	$82,642\angle - 82,0^\circ$	0,106	0,000	0,295	0,597
Oriximiná	Programa C.C.	$101,341\angle - 81,43^\circ$	$0,228\angle - 8,55^\circ$	$0,137\angle - 8,36^\circ$	$0,000\angle - 81,43^\circ$	$0,428\angle - 2,80^\circ$
	ANAFAS	$101,341\angle - 81,4^\circ$	0,228	0,137	0,000	0,428
Jurupari	Programa C.C.	$155,367\angle - 82,47^\circ$	$0,323\angle - 7,51^\circ$	$0,243\angle - 7,43^\circ$	$0,123\angle - 7,53^\circ$	$0,000\angle - 82,47^\circ$
	ANAFAS	$155,367\angle - 82,5^\circ$	0,323	0,243	0,123	0,000