

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Metodologia para Avaliação de Algoritmos Utilizados na Proteção
de Distância

João Tiago Loureiro Sousa Campos

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Setembro de 2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Metodologia para Avaliação de Algoritmos Utilizados na Proteção de Distância

João Tiago Loureiro Sousa Campos

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Flavio Bezerra Costa, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Setembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C198m Campos, João Tiago Loureiro Sousa.
Metodologia para avaliação de algoritmos utilizados na proteção de distância / João Tiago Loureiro Sousa Campos. – Campina Grande, 2016.
113 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa".

Referências.

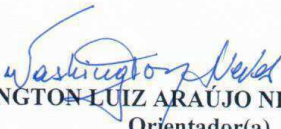
1. Relés Digitais. 2. Proteção de Distância. 3. Estimadores de Fasores. 4. Características Mho e Quadrilateral. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Costa, Flavio Bezerra. III. Título.

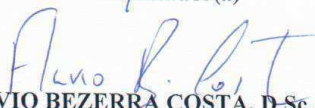
CDU 621.318.5(043)


"METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS UTILIZADOS NA PROTEÇÃO
DE DISTÂNCIA"


JOÃO TIAGO LOUREIRO SOUSA CAMPOS


TESE APROVADA EM 30/09/2016

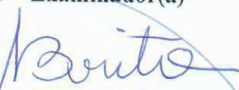

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)

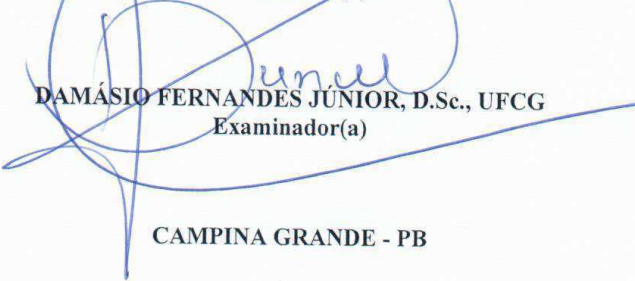

FLÁVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., UFRN
Orientador(a)


CLEVER SEBASTIÃO PEREIRA FILHO, Dr., UFMG
Examinador(a)


JOSÉ CARLOS DE MELO VIEIRA JÚNIOR, Dr., USP-São Carlos
Examinador(a)


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Examinador(a)


NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

É momento de agradecer àqueles que estiveram ao meu lado nessa longa caminhada rumo ao alcance do doutorado. Foram momentos de muitos esforços desprendidos, porém compensados pelos aprendizados adquiridos e pelas amizades construídas.

À minha família, motivo principal de minhas conquistas, agradeço pelo suporte contínuo em meus projetos. Apesar da longa distância, senti-me apoiado por todos na luta pelo alcance dos meus objetivos.

À minha esposa Mariama Saskya e seus familiares, agradeço pelo constante incentivo em minha trajetória acadêmica e profissional. Amada Mariama Saskya, obrigado também pelas contribuições dadas nesta tese.

Sou grato aos orientadores Washington Neves e Flávio Costa pelos conhecimentos compartilhados e construídos em conjunto. Estou certo de que levarei comigo todas as experiências adquiridas com esses grandes promotores do saber.

Aos colegas que me acolheram em Campina Grande e em Natal, agradeço pela companhia durante os momentos em que convivemos juntos. Um agradecimento especial aos grandes amigos Huilman Sanca Sanca e Mário Castelão, os quais tive a honra de conhecer nessas cidades, pela disposição constante para me ajudar. A amizade deles foi um dos melhores presentes que ganhei no período em que estive no doutorado.

Obrigado colegas do laboratório ProRedes da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pela companhia nos momentos de estudo, trabalho e descanso. Estar com vocês durante todo esse tempo foi fundamental para que eu continuasse a jornada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), agradeço pela concessão da bolsa ao longo de todo o período de realização deste doutorado.

À vida, gratidão por minha saúde e força de vontade para seguir os meus sonhos!

Resumo

Os relés de distância são usados tipicamente em proteção de linhas de transmissão e seu desempenho depende da parametrização correta, do estimador fasorial e do uso adequado da característica de distância. Identificar a parametrização e algoritmos mais adequados para o relé de distância para as diferentes topologias do sistema e os vários tipos de falta é uma tarefa difícil. Para facilitar a escolha apropriada desses algoritmos, nesta tese é proposta uma metodologia para avaliação de algoritmos de estimação fasorial e das várias lógicas de distância presentes em um relé digital, aplicável nas situações em que o relé de distância apresenta maiores dificuldades, tais como: operações incorretas por unidades de relé que não deviam atuar, disparos sobre- e sub-alcançados na zona de proteção, disparos incorretos próximos ao relé. A metodologia proposta pode ser utilizada para definir estratégias para a escolha do estimador de fasores e de características de distância mais adequados a específicas topologias de sistema de potência. De acordo com os resultados obtidos, a metodologia proposta poderá ajudar na avaliação de novos algoritmos de distância e estimação fasorial, bem como definir a melhor arquitetura do relé para determinada topologia do sistema.

Palavras-chave: Proteção de distância; Estimadores de fasores; Característica mho e quadrilateral; relés digitais.

Abstract

Distance relays are typically used in transmission line protection. Their accuracy depends on the correct relay parameterization, phasor estimators, and correct usage of distance characteristics. However, identifying suitable relay parameterization and algorithms considering various transmission line topologies and different fault types is a hard task. Here, a methodology based on the trip performance is proposed to evaluate all the main concerns of distance protection such as: maloperation trips per relay units in each fault type, overreach operation, and maloperation due to faults closer to the relay. The methodology could identify the best phasor estimators and distance configurations, as well as it could verify the power system topologies which yield in challenges for distance protection. The results achieved by the proposed methodology demonstrated that it can be useful for assisting the development of phasor estimators and new distance characteristics, as well as for setting existing distance protection in specific power system topologies.

Keywords: Distance protection; Phasor estimation; Mho and quadrilateral characteristics;

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito RL.	51
Figura 2 – Resposta em frequência - Cosseno Modificado.	53
Figura 3 – Resposta em frequência - Fourier de um ciclo.	53
Figura 4 – Resposta em frequência - Fourier de meio ciclo.	54
Figura 5 – Estimação fasorial de Fourier de um e meio ciclo sem componente CC.	55
Figura 6 – Estimação fasorial de Fourier de um e meio ciclo na presença de componente CC.	55
Figura 7 – Sistema de proteção.	58
Figura 8 – Sistema elétrico genérico com relé de proteção.	59
Figura 9 – Comparador de fase.	60
Figura 10 – Componentes dos algoritmos de distância: a) Principais Componentes; b) Relé baseado em mho; c) Relé baseado em quadrilateral.	62
Figura 11 – Característica mho auto-polarizada.	67
Figura 12 – Região de atuação da característica reatância.	72
Figura 13 – Característica reatância: influência do ângulo.	73
Figura 14 – Região de atuação resistência lateral.	74
Figura 15 – Característica resistência lateral.	75
Figura 16 – Região de atuação direcional.	77
Figura 17 – Influência de α na característica direcional.	78
Figura 18 – Passos para avaliação do grupo de relé com <i>status</i> 1.	86
Figura 19 – Passos para avaliação do grupo de relé com <i>status</i> 0.	87
Figura 20 – Falta monofásica em vários locais do sistema.	88
Figura 21 – Sistema de potência utilizado na pesquisa (adaptado de Committee (2004)).	93

Lista de tabelas

Tabela 3 – Artigos publicados em anais de eventos/revistas.	30
Tabela 4 – Informações fornecidas em manuais de fabricantes de relés	41
Tabela 5 – Sinopse da revisão bibliográfica dos estimadores de fasores	42
Tabela 6 – Tipos de falta que podem ocorrer no sistema elétrico.	60
Tabela 7 – Impedâncias medidas pelo relé.	61
Tabela 8 – Valores de k para várias características.	61
Tabela 9 – Tensão de polarização para cada tipo de falta.	68
Tabela 10 – Tensões e correntes de fase.	69
Tabela 11 – Tensão e corrente entre fases.	69
Tabela 12 – Tensão e corrente de fase de memória.	69
Tabela 13 – Tensão e corrente de memória entre fases.	69
Tabela 14 – <i>Status</i> de atuação das unidades do relé para cada tipo de falta.	83
Tabela 15 – Pesos padrões.	84
Tabela 16 – Caracterização das faltas monofásicas	88
Tabela 17 – Disparos das unidades terra relé.	89
Tabela 18 – Disparos das unidades fase do relé.	91
Tabela 19 – Parâmetros das linhas de transmissão do sistema de potência.	94
Tabela 20 – Parâmetros das fontes do sistema elétrico.	94
Tabela 21 – Parâmetros e curva de saturação do TC	94
Tabela 22 – Parâmetros do TPC	95
Tabela 23 – Faltas simuladas no estudo	96
Tabela 24 – Parametrização do relé mho.	96
Tabela 25 – Parametrização do relé quadrilateral.	97
Tabela 26 – Pesos dependentes do desvio padrão para $n=1000$	98
Tabela 27 – Desempenho das unidades fase-terra do relé.	101
Tabela 28 – Desempenho das unidades fase-fase do relé.	102
Tabela 29 – Influência da componente CC de decaimento exponencial nos estima- dores de fasores FMC e FMCM.	103
Tabela 30 – Influência do carregamento elevado do sistema de potência no relé.	106
Tabela 31 – Tempos de disparo do relé.	108

Lista de Símbolos

δ	- Ângulo do sinal.
$\bar{\delta}$	- Média do desvio padrão.
Δt	- Intervalo de tempo entre amostras.
ω_1	- Frequência angular fundamental.
$\sigma_e(-1 + 2\omega)$	- Perturbação adicionada com $0 < \omega < 1$.
ϕ_1	- Ângulo do sinal fundamental.
τ	- Constante de tempo.
Θ	- Rotação angular de uma amostra.
A_1	- Amplitude.
B_1, B_2, B_3, B_4 e B_5	- Barramentos.
c_0	- Coeficiente 0 de Fourier.
c_p	- Coeficiente de Fourier.
f_c	- Frequência de corte.
FF_{AB}	- Unidade AB fase fase do relé.
FF_{BC}	- Unidade BC fase fase do relé.
FF_{CA}	- Unidade CA fase fase do relé.
FT_A	- Unidade A fase terra do relé.
FT_B	- Unidade B fase terra do relé.
FT_C	- Unidade C fase terra do relé.

$G0$	- Grupo 0.
$G1$	- Grupo 1.
h	- Porcentagem de comprimento de linha - variável entre 0 e 1.
\hat{I}_0	- Corrente de sequência zero.
\hat{I}_{f2}	- Corrente de sequência negativa da linha protegida.
Ind_1	- Índice de desempenho 1.
Ind_2	- Índice de desempenho 2.
Ind_3	- Índice de desempenho 3.
Ind_4	- índice de desempenho 4.
\hat{I}_{Rop}	- Corrente de operação.
\hat{I}_{Rpol}	- Corrente de polarização.
j	- Número complexo.
k_1, k_2, k_3, k_4	- Constantes complexas.
kp	- Porção de suplementação.
L_1, L_2, L_3, L_4 e L_5	- Linhas de Transmissão.
$Max(\delta)$	- Máximo desvio padrão.
n	- Amostra do sinal.
N	- Número total de amostras da janela do sinal em um ciclo.
$N_{f1G1}, N_{f2G1},$	- Número total de faltas incrementados para

N_{f3G1} e N_{f4G1}	- os índices Ind_1 , Ind_2 , Ind_3 e Ind_4 no grupo 1.
N_{f2G0} , N_{f3G0}	- Número total de faltas incrementadas.
N_{f4G0}	- para os índices Ind_2 , Ind_3 e Ind_4 no grupo 0.
p	- Harmônica do sinal.
Pp_{in}	- Peso padrão perturbado $i = \{1, 2...8\}$ na simulação n.
$Ppad_{in}$	- Peso padrão $i = \{1, 2...8\}$ na simulação n.
S_1	- Fonte equivalente no barramento 1.
S_2	- Fonte equivalente no barramento 2.
\hat{S}_{op}	- Torque de operação.
\hat{S}_{pol}	- Torque de restrição.
t	- Amostra do tempo.
T	- Período do sinal.
$\hat{V}a_{1mem}$, $\hat{V}b_{1mem}$, $\hat{V}c_{1mem}$,	- Tensão de polarização de memória.
$\hat{V}ab_{1mem}$, $\hat{V}bc_{1mem}$ e $\hat{V}ca_{mem}$	- das unidade de relé AT, BT, CT, AB, BC e CA.
\hat{V}_{op}	- Tensão de operação.
\hat{V}_{pol}	- Tensão de polarização.
$\hat{V}_{pol_instantaneo}$	- Tensão de polarização instantânea.
$\hat{V}_{pol_quadmemoria}$	- Tensão de polarização de quadratura de memória.
$\hat{V}_{pol_suplementado}$	- Tensão de polarização de memória suplementada.
\hat{V}_{Rop} , \hat{V}_{Rpol}	- Valores medidos usados pelo relé da tensão.

x_t	- Sinal senoidal.
Y_0	- Coeficiente 0 de Fourier.
Y_{cp}	- Coeficiente p real de Fourier.
Y_{sp}	- Coeficiente p imaginário de Fourier.
\hat{Z}_d	- Ajuste da característica direcional.
\hat{Z}_{Dir}	- Ajuste da característica lateral direita.
\hat{Z}_{Esq}	- Ajuste da característica lateral esquerda.
Z_f	- Resistência de falta.
Z_L	- Impedância da linha.
\hat{Z}_{L1}	- Ajuste das características mho e reatância.
Z_{s1}	- Impedância equivalente de S_1 .
Z_{s2}	- Impedância equivalente de S_2 .
Z_t	- Impedância de transferência.

Lista de Siglas e Abreviaturas

- AB* - Falta bifásica entre as fases A e B.
- ABB* - Asea, Brown & Boveri.
- ABC* - Falta trifásica entre as fases A, B e C.
- ABT* - Falta bifásica à terra entre fases A, B e a terra.
- ANEEL* - Agência Nacional de Energia Elétrica.
- AT* - Falta monofásica da fase A com a terra.
- ATP* - *Alternative Transients Program*.
- CAPES* - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- CM* - Cosseno modificado.
- CNPq* - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- DC* - Disparo Correto.
- DFIG* - *Doubly-fed Induction Machine*.
- DI* - Disparo Incorreto.
- EHV* - *Extra High Voltage*.
- FACTS* - *Flexible Active Controlled Transmission Systems*.
- FC* - Fourier de um ciclo.
- FCM* - Fourier de um ciclo com filtro mímico.
- FF* - Fase-fase.

FMC - Fourier de meio ciclo.

FMCM - Fourier de meio ciclo com filtro mímico.

FT - Fase-terra.

GE - *General Electric.*

GSE - Grupo de Sistemas Elétricos.

GW - Gigawatt.

HVDC - *High Voltage Direct Current.*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

PES - *Power Energy Society*

RTDS - *Real Time Digital Simulator.*

SEL - Schweitzer Engineering Laboratories

SIN - Sistema Interligado Nacional.

SIR - *Source Impedance Ratio.*

SSC - *Series Synchronous Condenser.*

TC - Transformador de corrente.

TCSC - *Thyristor Controlled Series Compensation.*

TPC - Transformador de potencial capacitivo.

TWD - Transformada Wavelet Discreta.

TWDR - Transformada Wavelet Discreta Redundante.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.

UPFC - *Unified Power Flow Control.*

Sumário

	Lista de Símbolos	17
	Lista de Siglas e Abreviaturas	21
1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Relevância da Tese	27
1.2	Motivação	29
1.3	Objetivos da Tese	29
1.4	Contribuições da Tese	30
1.5	Organização do Texto	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Algoritmos de Estimação de Fasores	33
2.2	Avaliações de Algoritmos de Proteção de Distância	38
2.3	Informações dos Manuais dos Fabricantes de Relés	40
2.4	Resumo Bibliográfico	41
3	FUNDAMENTOS DA ESTIMAÇÃO FASORIAL	43
3.1	Algoritmo de Fourier de Um Ciclo	43
3.1.1	Exemplo Prático - Fourier de Um Ciclo	44
3.2	Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo	46
3.2.1	Exemplo Prático - Fourier de Meio Ciclo	46
3.3	Algoritmo de Cosseno Modificado	48
3.3.1	Exemplo Prático - Algoritmo Cosseno Modificado	50
3.4	Filtro Mímico	51
3.5	Resposta em Frequência	53
3.6	Filtragem da componente CC	54
3.7	Resumo do Capítulo	56
4	FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIGITAL DE DISTÂNCIA	57
4.1	Componentes do Relé Digital	57
4.2	Proteção de Distância	58
4.3	Ativação por Sobrecorrente	62
4.3.1	Demonstração de Cálculo	63
4.4	Seleção de Falta	64
4.4.1	Demonstração de Cálculo	65
4.5	Característica Mho	65

4.5.1	Comparação de Tensão de Polarização via Caso Prático	69
4.6	Característica Reatância	72
4.6.1	Demonstração de Cálculo	73
4.7	Característica Lateral	74
4.7.1	Demonstração de Cálculo	75
4.8	Característica Direcional	77
4.8.1	Demonstração de Cálculo	78
4.9	Resumo do Capítulo	80
5	METODOLOGIA PROPOSTA	81
5.1	Índices Propostos	81
5.2	Pesos	83
5.3	Algoritmo	84
5.4	Memorial de Cálculo	89
5.5	Resumo do Capítulo	92
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	93
6.1	Modelagem do Sistema de Potência	93
6.2	Simulações de Falta	95
6.3	Configurações dos Relés	95
6.4	Avaliação dos Pesos Padrões	97
6.5	Avaliação da Proteção de Distância	99
6.5.1	Avaliação dos Algoritmos de Estimadores de Fasores	99
6.5.2	Avaliação das Características de Distância	104
6.5.3	Desempenho dos Relés em Função das Topologias	104
6.5.4	Desempenho dos Relés em Função do Tipo de Falta	105
6.5.5	Condições de Elevado Carregamento	106
6.5.6	Tempos de Disparo	106
6.6	Resumo do Capítulo	107
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	109
7.1	Conclusões	109
7.2	Trabalhos Futuros	110
	REFERÊNCIAS	111

1 Introdução

1.1 Relevância da Tese

Os sistemas elétricos constituem uma estrutura complexa, por meio da qual a energia elétrica, forma de energia predominantemente utilizada pelo homem, é gerada, transmitida e distribuída à população. A distribuição eficiente da energia elétrica, cuja fonte geradora contempla uma variedade de opções (hídrica, eólica, térmica e nuclear, dentre outras), requer que os componentes dos sistemas elétricos operem de forma coordenada. Para tanto, unidades de geração dessa energia devem estar ligadas a sistemas de transmissão e esses sistemas conectados às subestações de distribuição, de modo que a atuação conjunta e sincronizada de todos esses elementos permita o atendimento às demandas da população por energia elétrica.

A forte dependência humana pela energia elétrica reforça a necessidade dos sistemas elétricos estarem em funcionamento adequado constantemente, o que nem sempre é possível em virtude de interrupções ainda observadas no fornecimento dessa energia aos consumidores, algumas das quais ocorridas nas linhas de transmissão.

Dentre os diversos componentes do sistema elétrico, as linhas de transmissão se destacam por estarem susceptíveis às condições ambientais adversas e a estresse devido a momentos de sobrecarga do sistema elétrico. Sendo essas linhas vitais para o bom funcionamento do sistema elétrico, é necessário assegurar a sua operação contínua por meio de proteção confiável. Portanto, o sistema de proteção das linhas de transmissão deve ser capaz de detectar faltas que surgem em virtude de causas externas ou internas e proceder ao desligamento rápido da linha, sem prejuízo dos demais equipamentos. Esse desligamento precisa ser feito seletivamente para que não prejudique zonas sãs do sistema elétrico.

O relé é um dos equipamentos principais de proteção das linhas de transmissão, sendo dotado de algoritmos de análise e comparação do estado da linha, que permitem a emissão de ordens de disparo ao disjuntor, o qual executa o desligamento da linha monitorada pelo relé diante de faltas em sua zona de proteção.

No que se refere à proteção de linhas de transmissão, a proteção de distância é a mais utilizada pela sua capacidade de ser inerentemente direcional, seletiva, mais rápida que a proteção de sobrecorrente e menos susceptível às variações de carga (ZIEGLER, 2011). No entanto, a confiabilidade da proteção de distância está limitada pelos vários blocos que compõem o relé digital, levando os engenheiros de proteção a adotarem uma regra empírica de definir a primeira zona de proteção de somente até 80% do valor da linha a proteger. A referida margem de erro inserida na proteção de distância causa atrasos no

tempo da proteção do relé, levando por vezes ao uso de esquemas de proteção das linhas de transmissão que possuem elevados custos, como, por exemplo, a proteção piloto. Um conhecimento aprimorado das limitações dos vários componentes do relé digital de distância poderia contribuir com a definição de estratégias que otimizassem os investimentos em sistemas de proteção.

Um dos principais blocos funcionais do relé digital de proteção de distância é a estimação fasorial. Os algoritmos de estimação devem ser imunes à componente CC de decaimento exponencial, aos harmônicos e inter-harmônicos, além de serem computacionalmente eficientes e rápidos para atenuar os efeitos causados pela falta ocorrida na linha de transmissão (Schweitzer III; ROBERTS, 1993). Os algoritmos de estimação fasorial baseados em Fourier apresentam limitações em prover uma resposta rápida, havendo na literatura uma tendência de buscar alternativas de algoritmos baseados no tempo (SCHWEITZER et al., 2015), apesar do surgimento de novas técnicas que vêm a atenuar os problemas que Fourier apresenta na estimação.

Outro bloco funcional importante do relé digital são os algoritmos que compõem as características de distância. Esses algoritmos precisam ser robustos para o relé não disparar na presença de situações de carga alta no sistema elétrico, ter boa convergência resistiva para o relé atuar para o máximo de faltas possíveis e apresentar seletividade na presença de outras proteções (KASZTENNY; FINNEY, 2008). As características atuais mais usadas na proteção de distância são as clássicas mho e quadrilateral e, apesar do funcionamento dessas características ser bem conhecido, o comportamento dinâmico e as lógicas adicionais acrescentadas pelos fabricantes de relés revelam dificuldade de previsão da resposta dessas características.

O conhecimento da lógica de proteção e da estimação fasorial é de extrema importância para o cálculo dos ajustes ideais para o relé, que pode variar com a topologia do sistema elétrico, tornando os ajustes ainda mais difíceis. Os ajustes inadequados do relé de proteção de distância compreendem uma das principais causas da má operação desse relé. Nesse sentido, definir estratégias para otimizar o processo de parametrização dos relés pode proporcionar uma proteção mais confiável e, conseqüentemente, um sistema elétrico mais robusto.

Propõe-se nesta tese uma metodologia de avaliação de algoritmos de estimação fasorial eficaz e das várias lógicas de distância presentes em um relé digital. Essa metodologia, desenvolvida a partir da composição de índices de desempenho relativos às limitações que o relé de distância tem no sistema de potência em situação de falta, permite uma análise rápida da qualidade da arquitetura de algoritmos do relé, identificando quais os melhores algoritmos de estimação de fasores e as características de distância mais apropriadas para os diferentes tipos de falta e de topologia do sistema elétrico. A metodologia pode vir a auxiliar as equipes de proteção na definição dos melhores ajustes do

relé para determinada configuração do sistema, evitando assim o uso de relés que possam atuar incorretamente e, por consequência, causar danos irreparáveis ao sistema elétrico.

1.2 Motivação

A motivação para esta tese advém da dificuldade existente em parametrizar os relés de distância corretamente, necessitando-se de novas técnicas que auxiliem nessa tarefa. Essa dificuldade se deve à constante evolução dos algoritmos utilizados pelos relés de distância, geralmente não divulgados nos manuais dos fabricantes, sendo então necessária a realização de numerosos testes e a utilização de margens de erro a serem inseridas na parametrização dos relés. As novas tecnologias introduzem desafios na proteção de distância e adicionam dificuldades na escolha dos grupos de ajustes para a proteção. A parametrização correta dos relés de distância pode proporcionar economia de custo em sistemas de proteção, uma vez que se pode evitar o uso de sistemas de proteção mais caros (diferencial de linha ou proteção piloto) para aumentar a confiabilidade da proteção. Com a metodologia proposta, a aceitação dos grupos de ajustes para a proteção será mais rápida, evitando dispêndio de tempo e estudos desnecessários.

1.3 Objetivos da Tese

O objetivo geral desta tese é propor uma metodologia de avaliação dos algoritmos de estimação fasorial e de lógicas da proteção de distância presentes nos relés de distância, recorrendo ao uso de índices de desempenho associados às respostas de seletividade, coordenação, rapidez e confiabilidade desejadas para o relé.

Os objetivos específicos da tese são:

1. Avaliar o desempenho dos algoritmos de estimação fasorial e lógicas de distância;
2. Averiguar a influência de faltas no desempenho do relé, simuladas em várias topologias do sistema de potência;
3. Identificar, para cada tipo de falta, o estimador de fasores e a característica de distância mais adequados para a configuração do sistema de potência avaliado;
4. Medir o impacto da componente CC de decaimento exponencial nos estimadores de fasores usando a metodologia proposta;
5. Avaliar o impacto do carregamento elevado nas características de distância a partir da metodologia proposta;
6. Medir a influência do tamanho da janela dos estimadores de fasores na resposta no tempo do relé por meio de análise estatística;
7. Analisar os resultados globais computados pela metodologia proposta e, com isso, obter informações relevantes sobre os ajustes adotados em cada topologia.

1.4 Contribuições da Tese

A principal contribuição desta tese é a proposição de um algoritmo, baseado em índices de desempenho, para auxiliar na escolha dos melhores algoritmos de estimação fasorial e de lógicas de proteção utilizados em relés de distância em diversas topologias de sistemas elétricos.

No que diz respeito à divulgação dos resultados da tese, apresentam-se na Tabela 3 as publicações até o momento.

Tabela 3 – Artigos publicados em anais de eventos/revistas.

Evento	Título	Autores
Electric Power System Research (Submetido)	New Methodology for Evaluation of Distance Relay Algorithms	Campos, J. T. L. S. ; Neves, W. L. A.; Costa, F. B. ; Fernandes Jr, D.
Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016	The Effect of Fault Variables in the Performance of Quadrilateral and MHO Relays	Campos, J. T. L. S. ; Neves, W. L. A.; Costa, F. B.
IEEE PES General Meeting, 2014	Methodology for Evaluation of Relay Digital Filters during a Fault	Campos, J. T. L. S. ; Neves, W. L. A. ; Fernandes Jr, D. ; Costa, F. B.
XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014	Impact of Anti-Aliasing Filter and Mimic Filter on Digital Protection Relaying	Campos, J. T. L. S. ; Neves, W. L. A.; Fernandes Jr, D. ; Costa, F. B.

1.5 Organização do Texto

A seguinte estrutura foi adotada para a organização da tese:

1. Um levantamento do estado da arte dos algoritmos de estimação de fasores e dos algoritmos utilizados em proteção de distância é mostrado no Capítulo 2, bem como um levantamento de relés comerciais e de suas lógicas de proteção;
2. No Capítulo 3 é apresentado a fundamentação teórica referente aos algoritmos de estimação de fasores, identificando-se as principais limitações de cada um desses algoritmos e algumas estratégias auxiliares para mitigá-las;
3. No Capítulo 4, as fundamentações teórica e matemática, as principais características, as vantagens e as desvantagens da proteção de distância são apresentadas;
4. No Capítulo 5, a metodologia proposta é descrita e fundamentada teoricamente;
5. No Capítulo 6 são descritos o modelo do sistema de potência usado nesta tese, as simulações de falta realizadas no estudo e os passos adotados para desenvolver a metodologia proposta. Além disso, são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta e as vantagens e desvantagens dessa metodologia que foram identificadas na construção da tese;

6. As considerações finais e as diretrizes para a continuação da pesquisa estão registradas no Capítulo 7.

2 Revisão Bibliográfica

Atualmente, os relés digitais são os mais utilizados para a proteção de linhas de transmissão. Esses relés recebem os sinais (tensões e correntes) do sistema de potência provenientes dos transformadores de proteção, calculam os fasores de tensão e de corrente e sinalizam disparos diante de falhas no sistema de potência.

Os algoritmos de estimação fasorial usados pelos relés digitais para a proteção das linhas de transmissão são numéricos e têm sido investigados ao longo dos anos, tendo em vista melhorias no desempenho em resposta no tempo do relé e na qualidade dos sinais elétricos estimados. Esses algoritmos vêm sendo alvo de atenção especial pela comunidade científica devido à sua importância na qualidade da resposta dos algoritmos de proteção. A maior parte dos estudos sobre os algoritmos de estimação concentra-se na resolução dos problemas da constante de decaimento exponencial CC, de sub-harmônicos, inter-harmônicos e de harmônicos.

As características de proteção de distância em relés também têm sido amplamente estudadas, devido ao surgimento de novos sistemas de controle de fluxo de potência: linhas compensadas com capacitores, *Unified Power Flow Control* (UPFC), *Series Synchronous Condenser* (SSC) e *Thyristor Controlled Series Compensation* (TCSC), por exemplo, que afetam a confiabilidade e dificultam a parametrização dos relés de distância.

2.1 Algoritmos de Estimação de Fasores

Diante da demanda por uma maior rapidez do algoritmo de Fourier, [Phadke, Hlibka e Ibrahim \(1976\)](#) propuseram um algoritmo denominado Fourier de meio ciclo. Apesar do aumento da velocidade, a precisão na estimação fasorial é reduzida nesse algoritmo, pelo fato dele ser incapaz de eliminar as componentes harmônicas pares. Comparado ao Fourier de um ciclo, o algoritmo de Fourier de meio ciclo apresenta um comportamento pior na estimação do fasor em relação à componente CC de decaimento exponencial.

Em virtude dos problemas que o algoritmo de Fourier exibe na presença da constante CC de decaimento exponencial e de inter-harmônicos, diversos trabalhos foram realizados buscando alternativas de mitigar o impacto desse algoritmo na estimação de fasores. Dentre os autores que pesquisaram formas de minimizar os problemas do algoritmo de Fourier de um ciclo, estão: [Schweitzer III e Hou \(1993\)](#), [Benmouyal \(1995\)](#), [Ferrer, Verdusco e Martinez \(1996\)](#) [Argüelles et al. \(2006\)](#), [Yu \(2007\)](#), [Eisa e Ramar \(2008\)](#), [Kang et al. \(2009\)](#), [Cho et al. \(2009\)](#), [ElRefaie e Megahed \(2010\)](#), [Zadeh e Zhang \(2013\)](#), [Silva e Kusel \(2013\)](#), [Lee, Kang e Nam \(2013\)](#), [Rubeena, Zadeh e Bains \(2014\)](#) e [Bains e Zadeh](#)

(2015).

Através de análises nas respostas em frequência dos filtros de Fourier de um ciclo, [Schweitzer III e Hou \(1993\)](#) observaram que o filtro cosseno, responsável pelo cálculo da parte real do fasor, é menos afetado pela componente CC de decaimento exponencial que o filtro seno, o qual é responsável pelo cálculo da parte imaginária do fasor. Os autores propuseram então, uma nova técnica de filtragem denominada filtro cosseno, que aplica o filtro cosseno de Fourier à janela de dados atual e a uma janela de dados defasada de um quarto de ciclo. O grande problema desse algoritmo é que, em algumas situações, ele pode acrescentar um quarto de ciclo de atraso comparado ao algoritmo de Fourier de um ciclo.

[Ferrer, Verduzco e Martinez \(1996\)](#) seguiram a metodologia do filtro cosseno apresentada por [Schweitzer III e Hou \(1993\)](#) para propor o filtro seno. Aqueles autores adotaram uma estratégia híbrida, em que utilizaram o filtro cosseno para a estimação das correntes, devido a sua boa característica de resposta à componente CC de decaimento exponencial, e o filtro seno nas tensões, pela boa resposta desse filtro diante de sinais de altas frequências. De acordo com [Ferrer, Verduzco e Martinez \(1996\)](#), o método que propuseram, denominado por eles de seno-cosseno, apresentou um melhor desempenho de que o Fourier de um ciclo nos resultados obtidos em relação à filtragem das componentes de alta frequência do sinal.

Um método que pode ser aplicado tanto no algoritmo de Fourier de meio ciclo como no de um ciclo foi proposto por [Argüelles et al. \(2006\)](#). Esse método utiliza amostras espaçadas de um ciclo para calcular a componente CC e, posteriormente, corrigi-la no sinal original. A limitação desse método é que a componente CC só pode ser estimada usando duas amostras adicionais do sinal além de um ciclo, o que torna o algoritmo mais lento comparado àqueles que utilizam somente um ciclo do sinal. Os autores destacam a simplicidade de cálculo do algoritmo como uma de suas vantagens.

A partir de um filtro mímico proposto por [Benmouyal \(1995\)](#), [Yu \(2007\)](#) ajustou dinamicamente os parâmetros de ganho do filtro por meio da análise dos fasores de tensão e de corrente, e com isso conseguiu desenvolver um algoritmo para a remoção da componente CC de decaimento exponencial. Como a estimação da constante de tempo do filtro foi feita após a filtragem de Fourier de um ciclo, todas as componentes harmônicas foram eliminadas, não existindo interferência destas no ajuste dos parâmetros do filtro mímico, o que constitui uma vantagem alcançada pela combinação do filtro mímico com a técnica proposta, realizada por este autor. No entanto, para esse algoritmo, o valor correto da constante de tempo só é determinado em um ciclo após o início da falta.

Sabendo que um sinal puramente senoidal tem média zero após um ciclo e que um sinal exponencial não tem média zero no mesmo intervalo, [Eisa e Ramar \(2008\)](#) propuseram um método que, baseado nessas duas premissas, consegue remover a componente CC

de decaimento exponencial do sinal, aplicando posteriormente o algoritmo de Fourier de um ciclo. Esse método usa um ciclo mais uma amostra e recorre ao cálculo de integrais para estimar a componente CC, o que pode ser um fator limitante.

[Kang et al. \(2009\)](#) utilizaram um conjunto de amostras de sinal par e ímpar da transformada discreta de Fourier para remover a componente CC de decaimento exponencial. Como a componente CC é igual no conjunto de amostras par e ímpar, os autores removeram essa componente subtraindo o conjunto de amostras par e ímpar das saídas da transformada discreta de Fourier. Para suprimir o efeito do ruído originado pela subtração, os autores usaram um filtro passa-baixa. De acordo com os autores, esse método é imune à componente CC de decaimento exponencial, bem como à componente gerada no secundário do TC.

[ElRefaie e Megahed \(2010\)](#) propuseram um método em comparação ao proposto por [Kang et al. \(2009\)](#). Nesse método, os autores somam o fasor de corrente estimado pela transformada discreta de Fourier a um outro fasor estimado meio ciclo à frente. Com essa soma os autores conseguiram eliminar a componente CC de decaimento exponencial, restando apenas a componente fundamental do fasor da corrente. Os autores afirmam que o algoritmo proposto tem uma melhor resposta às altas frequências do que o proposto por [Kang et al. \(2009\)](#), não recorrendo ao filtro passa-baixo.

O método apresentado por [Cho et al. \(2009\)](#) utiliza técnicas de simplificação de cálculo como, por exemplo, a decomposição em série de Taylor da constante de tempo com apenas os dois primeiros termos. Nesse método, a componente CC é subtraída do sinal, aplicando-se depois o algoritmo de Fourier. O método usa uma janela do sinal com mais uma amostra seguinte para estimar a componente CC, o que torna a resposta mais lenta comparada com a resposta dos algoritmos que usam somente uma janela do sinal.

[Zadeh e Zhang \(2013\)](#) propuseram um algoritmo baseado em manipulações matemáticas simples para estimar a componente exponencial CC do sinal, retirá-la da componente fundamental e em seguida estimar o fasor usando o filtro de Fourier. Nesse estudo, os autores não apresentaram a resposta em frequência do filtro ao sinal e aplicaram o algoritmo somente para estimar a corrente, não o aplicando nos sinais de tensão.

[Silva e Kusel \(2013\)](#) propuseram um algoritmo baseado na transformada de Fourier, que aplica decimação ao sinal discreto proveniente do sistema elétrico para estimar a componente fundamental sem a influência da componente CC. O algoritmo foi comparado com o de [Kang et al. \(2009\)](#) e o de [Chen, Liu e Jiang \(2006\)](#) e apresentou, segundo os autores, melhor resposta no tempo. O método proposto utilizou subtrações na frequência, com a possibilidade de adição de sinais de ruído em caso de filtragem inapropriada.

Um algoritmo para solucionar problemas de estimação do algoritmo de Fourier na presença de sinais dinâmicos produzidos por Geradores de Indução Duplamente Ali-

mentados (DFIG) foi apresentado por Lee, Kang e Nam (2013). A desvantagem desse método é o uso de 1,75 ciclos do sinal para estimar o fasor da componente fundamental, ocasionando um aumento de processamento e atraso no tempo da estimação fasorial.

Rubeena, Zadeh e Bains (2014) e Bains e Zadeh (2015) propuseram algoritmos para a estimação *offline* do fasor usando análise de Prony em conjunto com Fourier na presença de frequências sub-síncronas. Apesar desses algoritmos terem apresentado uma estimação muito precisa, não é possível o uso deles em tempo real na proteção devido ao tamanho da janela dos algoritmos utilizados ser de dois ciclos.

Em alternativa aos algoritmos baseados em Fourier, alguns algoritmos de estimação vêm sendo propostos na literatura, dentre os quais estão os algoritmos baseados na transformada *wavelet* (WONG et al., 2001; LIANG; JEYASURYA, 2004; SILVA; NEVES; SOUZA, 2008), Kalman (ZAMORA et al., 2015), redes neurais (SILVA et al., 2015) e mínimos quadrados (SERNA, 2007; RAO; PRADHAN, 2016).

O primeiro algoritmo usando a transformada *wavelet* foi proposto por Wong et al. (2001), o qual foi comparado com os algoritmos Fourier de meio ciclo e de um ciclo. Os autores concluíram que esse algoritmo apresenta menor erro de ângulo que o de Fourier, porém é muito afetado pela componente CC de decaimento exponencial.

Em detrimento da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), Liang e Jeyasurya (2004) recorreram à Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR), que, devido às suas propriedades de redundância e invariância no tempo, provocam menos distorções no processo de reconstrução dos sinais. O algoritmo proposto por Liang e Jeyasurya (2004) apresentou um desempenho mais rápido que o algoritmo de Fourier de um ciclo, contudo os autores utilizaram um filtro *Butterworth* passa-alta de terceira ordem para eliminar a componente CC de decaimento exponencial. Na prática, a principal desvantagem do algoritmo proposto por Liang e Jeyasurya (2004) é o atraso no tempo que o filtro *Butterworth* introduz nos sinais de tensão e de corrente. A resposta em frequência do algoritmo de filtragem não foi analisada integralmente pelos autores, pois o filtro não foi capaz de eliminar a terceira e a sexta harmônicas do sinal. A escolha da taxa de amostragem para analisar o sinal e o nível de resolução da TWDR utilizados no estudo não foram explicitados no artigo.

Silva, Neves e Souza (2008) propuseram uma melhoria do algoritmo sugerido por Liang e Jeyasurya (2004), a partir de uma nova técnica de projeto de filtros ortogonais de um ciclo para a estimação de fasores, construindo assim um método híbrido que combina o algoritmo dos mínimos quadrados com os da filtragem da TWDR. Silva, Neves e Souza (2008) analisaram as respostas em frequência das linhas das matrizes *wavelet* e conseguiram identificar as harmônicas que não eram eliminadas, para *a posteriori* serem incluídas na formulação do algoritmo dos mínimos quadrados. Esses autores fizeram ainda uma comparação dos filtros projetados com os filtros de Fourier de um e de meio ciclo no

que diz respeito à resposta no tempo e na frequência. Para a eliminação da componente CC de decaimento exponencial, os autores utilizaram o método do filtro mímico digital presente em [Benmouyal \(1995\)](#), o que pode ser considerado uma limitação do algoritmo.

[Alexander e Andrichak \(1996\)](#) propuseram uma nova técnica para a estimação de fasores, derivada do algoritmo de Fourier, denominada *phaselets*. As *phaselets* consistem em somas parciais de produtos das amostras do sinal com os coeficientes dos filtros seno e cosseno de Fourier, de modo que a janela de dados pode apresentar tamanho variável. No caso da janela ser de um ou de meio ciclo, as *phaselets* são calculadas da mesma forma que nos algoritmos de Fourier. Caso não, é necessário fazer uma correção no fasor estimado devido ao fato de que as funções seno e cosseno não são ortogonais no intervalo considerado.

Analisando o trabalho proposto por [Alexander e Andrichak \(1996\)](#), em que introduziram uma nova metodologia com base no uso de *phaselet* na estimação de fasores, nota-se que a fundamentação matemática necessária para replicar o algoritmo não está explícita claramente. Visando atenuar essa limitação, [Serna \(2005\)](#) propôs um trabalho em que apresenta toda fundamentação matemática da estimação de fasores usando as *phaselets*, concluindo que essa técnica apresenta maior desempenho, em termos de velocidade, que o algoritmo de Fourier de um ciclo. O grande problema da técnica que usa *phaselets*, constatado pelo autor, é que o desempenho do algoritmo depende amplamente da eliminação da componente CC de decaimento exponencial.

Para diminuir o problema da resposta transitória dos algoritmos recursivos, [Serna \(2007\)](#) tentou resolver o problema recorrendo à combinação de *phaselets* com os métodos dos mínimos quadrados. O autor demonstrou que o algoritmo proposto proporciona uma resposta melhor em relação à velocidade e é menos prejudicado pela componente CC de decaimento exponencial, porém melhorias em relação à resposta em frequência são necessárias para aprimorar os resultados desse algoritmo.

Um algoritmo de estimação de fasores usando redes neurais foi apresentado por [Silva et al. \(2015\)](#), que identificou no estudo tempos de resposta desse algoritmo superiores aos tempos dos algoritmos baseados em Fourier. Apesar dessa vantagem, o algoritmo desenvolvido pelos autores obteve uma sobrestimação elevada no regime transitório, o que pode ocasionar disparos indesejados do relé de proteção.

Devido às limitações de Fourier na presença de componentes de baixa frequência próximas da fundamental, [Rao e Pradhan \(2016\)](#) propuseram um algoritmo baseado nos mínimos quadrados, que extrai essas componentes para calcular o fasor corretamente. Os autores compararam esse algoritmo com o algoritmo clássico de Fourier de um ciclo, que apresenta várias limitações na estimação fasorial.

Uma alternativa aos algoritmos baseados em Fourier foi indicada por [Zamora et al.](#)

(2015), que propuseram um algoritmo baseado em Kalman. Segundo os autores, esse algoritmo apresenta resposta transitória mais rápida que os algoritmos baseados em Fourier. A resposta em frequência do filtro de Kalman apresentado pelos autores sugere que esse filtro pode ter problemas na presença de sinais com frequências próximas da fundamental.

2.2 Avaliações de Algoritmos de Proteção de Distância

Uma avaliação dos relés eletromecânicos para proteção de distância foi feita por [Humpage e Kandil \(1968\)](#). Os autores analisaram a resposta do relé à variação da polarização e testaram o comportamento do relé quando a falta é alimentada por duas fontes equivalentes. No estudo, observou-se que o relé de distância tinha uma resposta melhor conforme o aumento do valor de potência que alimenta a falta e que a polarização é importante para o relé discriminar a direção da falta.

[Schweitzer III \(1989\)](#), usando as capacidades de memória dos relés digitais, apresentou em seu artigo uma metodologia para a escolha do tipo de falta baseada no torque calculado para a característica mho , resultando somente na abertura da fase afetada pela falta. No artigo, a polarização auto-polarizada foi comparada à de memória de sequência positiva, mas o autor teve como base de estudo relés com quatro amostras por ciclo, o que atualmente é ultrapassado.

Estudos comparativos foram realizados por [Leung \(1991\)](#) para revisar os parâmetros do relé para as zonas de proteção 2 e 3, no qual constatou-se que o uso de simulações computacionais para a avaliação de algoritmos de distância auxilia significativamente o trabalho do engenheiro de proteção.

[Roberts, Guzman e Schweitzer III \(1993\)](#) analisaram os sub-alcances e sobre-alcances das características quadrilateral e mho , comparando o uso da mho auto-polarizada com a de memória de sequência positiva. Ao final, os autores concluíram que o uso da característica mho pode ser prejudicial quando elevado fluxo de potência se conjuga com a resistência de falta. O artigo elaborado pelos autores apresenta o tipo de filtros digitais usado para calcular os fasores. As simulações de falta realizadas no estudo foram insuficientes para se ter uma visão generalizada do comportamento das características de distância.

A patente de [Schweitzer III \(1992\)](#) introduziu um conceito de proteção que melhorava a capacidade de atuação do relé. Nesse conceito, o relé detecta o tipo de falta da zona 3 e usa essa informação nas zonas 1 e 2 de proteção. Apesar da técnica melhorar a seletividade do disparo do relé, ela exige processamento elevado e pode atrasar a rapidez de disparo. Com os processadores atuais de elevada capacidade, o fato de requerer elevado processamento pode não mais ser uma limitação dessa técnica.

Schweitzer III e Roberts (1993) compararam os vários tipos de polarização usados na característica mho, sendo o trabalho desses autores considerado uma referência no estado da arte da proteção de distância. Em Schweitzer III (1994) foi proposta uma técnica que aumenta a eficiência de resposta do relé, diminuindo a quantidade de cálculos por meio da simplificação de equações. Segundo o autor, essa técnica permite uma maior rapidez de resposta.

A comparação de vários algoritmos de proteção de distância e a construção de um relé digital foram realizadas por Waikar, Liew e Elangovan (1996). Nesse trabalho, as lógicas de proteção foram implementadas em um *chip* da Intel 8097, sendo usada uma frequência de amostragem de 600 Hz. Apesar dos equipamentos utilizados serem já obsoletos e os filtros digitais desatualizados, o artigo pode ser uma referência para a implementação em *hardware* de um relé digital microprocessado.

Em Ferrer, Verduzco e Martinez (1996), foram comparados vários algoritmos digitais, mas essas comparações limitaram-se às suas respostas em frequência e o estudo não mostra o quanto isso pode impactar nos algoritmos de distância. Os algoritmos de proteção de distância usando filtros de janela longa, curta e equações diferenciais foram avaliados por Khorashadi-Zadeh e Daneshi (2004). Nesse estudo, um relé digital foi simulado em linguagem C e os filtros *anti-aliasing*, o filtro CC e os atrasos no tempo introduzidos na obtenção do fasor foram bem definidos. Os filtros utilizados por esses autores para a comparação entre eles não são muito utilizados atualmente devido ao seu comportamento transitório. Além disso, o filtro CC não é o mais indicado para filtrar a componente CC de decaimento exponencial, visto que assume que os valores de R e L são fixos, apesar de variarem dependendo do tipo de falta e da distância onde ocorre a falta.

Wu, Liu e Chen (2005) mostraram como modelar e testar um relé digital de distância no MatlabTM. O relé modelado pelos autores usou filtro mímico conjuntamente com o filtro de Fourier e a característica mho foi avaliada. Apesar dos autores ressaltarem as vantagens do MatlabTM em relação ao *Alternative Transients Program* (ATP), verifica-se que o MatlabTM não é a ferramenta mais indicada para esse tipo de teste, pois é um simulador *offline* e os algoritmos que funcionam perfeitamente nesse simulador podem não ser viáveis para uso em tempo real. Nesse caso, é mais apropriado utilizar o simulador de transitórios em tempo real (*Real Time Digital Simulator - RTDSTM*).

A trajetória que o disparo do relé faz até entrar nas zonas da proteção para linhas de alta e extra alta tensão foram avaliadas por Ravishankar e Thukaram (2011). Os autores definiram polígonos customizados, demonstrando que as características clássicas usadas em relés, como a quadrilateral e a mho, podem não ser as mais adequadas para a proteção de distância. Calero, Guzman e Benmouyal (2010) adaptaram a característica quadrilateral para aumentar a rapidez de disparo do relé, indicando assim que avaliações das características de proteção de distância são importantes para uma melhor adequação

das proteções.

2.3 Informações dos Manuais dos Fabricantes de Relés

Nesta seção, são descritas as principais informações técnicas contidas nos manuais técnicos dos principais fabricantes de relés para identificar os algoritmos usados pelos relés digitais. A revisão busca não apenas extrair informações sobre esses algoritmos como também apresentar as que não são disponibilizadas pelos fabricantes e que poderiam ser fornecidas. As informações coletadas são importantes para validar as tecnologias atualmente empregadas nos relés utilizados na proteção das linhas de transmissão. Os parâmetros que influenciam na resposta do relé identificados nos manuais foram:

1. Microprocessador e componentes

Algoritmos de maior complexidade necessitam de microprocessadores de elevada capacidade de processamento. Relés com microprocessadores mais modernos conseguem implantar algoritmos mais complexos;

2. Filtro *anti-aliasing* analógico

O filtro analógico filtra as componentes de alta frequência indesejadas nos sinais estimados pelos algoritmos;

3. Frequência de amostragem

Frequência de amostragem elevada exige processamento elevado. Esse parâmetro influencia na resposta no tempo dos disparos do relé;

4. Filtro digital

Esse filtro é um dos elementos mais importantes do *firmware* do relé. Quanto melhor for a estimação do fasor por esse filtro, mais aprimorada será a resposta do relé a eventos na linha;

5. Características de distância

A característica adotada influencia a resposta do relé a eventos. Existe uma grande variedade de características de distância, porém as mais usadas são a mho e a quadrilateral;

6. Sobrealcance transitório das características mho e quadrilateral

O sobrealcance é o erro de medida causado pelos estimadores de fasores e pela polarização da característica de distância. Esse elemento precisa ser levado em consideração quando se definem as zonas de proteção;

7. Tempos de disparo mínimo e máximo

O tempo que o relé demora para disparar depende da razão entre a impedância da fonte e a impedância da linha, denominada *Source Impedance Ratio* (SIR) pelos fabricantes de relés.

Na Tabela 4 são apresentadas as informações dos relés fornecidas pelos principais fabricantes: Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), SIEMENS AG, ABB Power T&D Company Inc, GE Energy e Schneider Electric, as quais levaram em consideração os parâmetros acima mencionados e os modelos de relé usados por essas empresas na proteção de linhas de transmissão. As informações não divulgadas na tabela estão representadas pelo sinal menos (-).

Tabela 4 – Informações fornecidas em manuais de fabricantes de relés

Parâmetros	Fabricantes e modelos do relé				
	SEL 311-C	SIEMENS SIPROTEC 4	ABB REL 300	GE D30	Schneider Micom P444
1	-	-	Intel 80C196	-	TMS320VC33
2	Butterworth $f_c=560$ Hz	-	-	-	-
3	960 Hz	-	480 Hz	3840 Hz	1440 Hz
4	Cosseno -	-	Fourier <i>notch-filter algorithm</i>	Fourier	Fourier
5	Mho e quadrilateral	Mho e quadrilateral	Mho e sobrecorrente direccional	Mho e quadrilateral	Mho e quadrilateral
6	±5%	±5%	-	±5%	±5%
7	-	Mín. (15 ms)	Mín. (12-14 ms) e Méd. (22 ms)	Dependente da SIR	Mín. (13 ms), Méd. (14 ms) e Máx. (18 ms)

2.4 Resumo Bibliográfico

Na estimação de fasores, melhorias no algoritmo de Fourier vêm sendo buscadas nos últimos anos na tentativa de atenuar problemas relacionados à presença da componente CC de decaimento exponencial e de frequências do sinal próximas da fundamental. Diante das limitações do algoritmo de Fourier, alternativas baseadas em outros algoritmos, como *wavelet*, Kalman, mínimos quadrados e redes neurais, têm sido desenvolvidas para otimizar a estimação fasorial, como sumarizado na Tabela 5. Na maioria dos estudos, a estimação é baseada no aprimoramento da estimação de corrente, porém resultados relativos à penalização da estimação da tensão não são apresentados (CAMPOS et al., 2014). Além disso, o impacto dos estimadores na estimação de tensão e a melhoria relativa ao uso desses estimadores em conjunto com as características de distância não são aspectos mostrados em grande parte da literatura da área.

Tabela 5 – Sinopse da revisão bibliográfica dos estimadores de fasores

Referência	Técnica Empregada	
Phadke, Hlibka e Ibrahim (1976) Alexander e Andrichak (1996) Schweitzer III e Hou (1993) Serna (2005)	Transformada discreta Fourier	
Ferrer, Verduzco e Martinez (1996) Argüelles et al. (2006) Yu (2007) Eisa e Ramar (2008) Kang et al. (2009) Cho et al. (2009)		
ElRefaie e Megahed (2010) Zadeh e Zhang (2013) Silva e Kusel (2013) Lee, Kang e Nam (2013) Rubeena, Zadeh e Bains (2014) Bains e Zadeh (2015)		
Wong et al. (2001) Liang e Jeyasurya (2004) Silva, Neves e Souza (2008)		Transformada Wavelet
Silva et al. (2015)		Redes Neurais
Zamora et al. (2015)		Filtro Kalman
Serna (2007) Rao e Pradhan (2016)		Mínimos Quadrados

3 Fundamentos da Estimação Fasorial

Neste capítulo, os algoritmos de estimação fasorial baseados na transformada de Fourier de um e meio ciclo e o algoritmo Cosseno Modificado são fundamentados matematicamente, e suas respostas em frequência e à componente CC analisadas. Esses algoritmos são usados em conjunto com os algoritmos de proteção de distância utilizados nesta tese.

3.1 Algoritmo de Fourier de Um Ciclo

Um sinal senoidal $x(t)$ periódico e contínuo no tempo pode ser representado matematicamente pela seguinte expressão (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999):

$$x(t) = \sum_{p=-\infty}^{p=\infty} c_p e^{jp\omega_1 t}, \quad (3.1)$$

sendo ω_1 a frequência fundamental, p a p -ésima harmônica do sinal $x(t)$ e c_p os coeficientes da série de Fourier.

Usando a equação de Euler

$$e^{jp\omega_1 t} = \cos(p\omega_1 t) + j\text{sen}(p\omega_1 t), \quad (3.2)$$

e substituindo-a na equação (3.1), tem-se:

$$x(t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} c_p e^{jp\omega_1 t} = Y_0 + \sum_{p=1}^{\infty} Y_{cp} \cos(p\omega_1 t) + \sum_{p=1}^{\infty} Y_{sp} \text{sen}(p\omega_1 t), \quad (3.3)$$

sendo Y_0 , Y_{cp} e Y_{sp} os coeficientes de Fourier dados por:

$$\begin{aligned} Y_0 &= c_0, \\ Y_{cp} &= c_p + c_{-p} \neq 0, \\ Y_{sp} &= j(c_p - c_{-p}) \neq 0. \end{aligned}$$

Os coeficientes de Fourier também equivalem a:

$$Y_0 = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) dt, Y_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(p\omega_1 t) dt, Y_{sp} = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \text{sen}(p\omega_1 t) dt, \quad (3.4)$$

em que T é o período do sinal.

No domínio discreto, os coeficientes de Fourier são representados da seguinte forma:

$$Y_{cp} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y(n) \cos(pn\theta), \quad (3.5)$$

$$Y_{sp} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y(n) \text{sen}(pn\theta), \quad (3.6)$$

sendo p a p -ésima harmônica calculada, N o número de amostras para o cálculo do fasor e $\theta = \frac{2\pi}{N}$ a rotação angular em radianos.

Nos relés de proteção de distância, a componente fundamental do sinal é a principal a ser extraída. Nesse caso, $p = 1$ e obtêm-se a amplitude A_1 e a fase ϕ_1 , respectivamente:

$$|A_1| = \sqrt{(Y_{c1})^2 + (Y_{s1})^2}, \quad (3.7)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{Y_{c1}}{Y_{s1}}. \quad (3.8)$$

Em se tratando de frequência industrial ($f = 60$ Hz), o algoritmo extrai do fasor passado o tempo de:

$$T = 1/60 = 16,67 \text{ ms}. \quad (3.9)$$

3.1.1 Exemplo Prático - Fourier de Um Ciclo

Para exemplificar o cálculo de fasor usando a técnica de Fourier de um ciclo, utilizou-se um sinal sinusoidal representado pela seguinte função:

$$\begin{aligned} \text{senal} &= 200 \text{sen}(wt + 45^\circ), \\ w &= 2\pi 60. \end{aligned}$$

Para extrair o fasor desse sinal, é necessário extrair uma janela de amostras de um ciclo do sinal. Na demonstração, considerou-se que o sinal é discretizado a 16 amostras por ciclo no intervalo $t=[0,005;0,025]$ ms, dando uma frequência de amostragem de 960 Hz. Então:

$$\begin{aligned} \text{janela} &= [77 \quad 0 \quad -77 \quad -141 \quad -185 \quad -200 \quad -185 \quad -141 \quad -77 \quad 0 \\ &\quad 77 \quad 141 \quad 185 \quad 200 \quad 185 \quad 141], \end{aligned}$$

sendo janela um vetor contendo 16 amostras do sinal correspondente a um ciclo.

Usando as equações (3.5) e (3.6) dos coeficientes de Fourier, calcula-se os 16 coeficientes reais e imaginários. Sabendo que $\theta = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{16}$ e substituindo na fórmula para $p=1$, tem-se para os coeficientes reais:

$$\begin{aligned} Y_{re}(1) &= \frac{2}{16} \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) = 0,115, \\ Y_{re}(2) &= \frac{2}{16} \cos\left(2\frac{2\pi}{16}\right) = 0,088, \\ &\quad \dots \\ Y_{re}(16) &= \frac{2}{16} \cos\left(16\frac{2\pi}{16}\right) = 0,125, \end{aligned}$$

sendo $Y_{re}(j)$ os coeficientes reais de Fourier de ordem j num total de 16.

Para os coeficientes imaginários, tem-se:

$$\begin{aligned} Y_{im}(1) &= \frac{2}{16} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{16} \right) = 0,048, \\ Y_{im}(2) &= \frac{2}{16} \text{sen} \left(2 \frac{2\pi}{16} \right) = 0,088, \\ &\dots \\ Y_{im}(16) &= \frac{2}{16} \text{sen} \left(16 \frac{2\pi}{16} \right) = 0; \end{aligned}$$

sendo $Y_{im}(j)$ os coeficientes imaginários de Fourier de ordem j num total de 16.

Os coeficientes calculados são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Coeficientes } Fourier_{real} &= [0,115 \quad 0,088 \quad 0,048 \quad 0,000 \quad -0,048 \quad -0,088 \\ &\quad -0,115 \quad -0,125 \quad -0,115 \quad -0,088 \quad -0,048 \quad 0,000 \\ &\quad 0,048 \quad 0,088 \quad 0,115 \quad 0,125], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficientes } Fourier_{imag} &= [0,048 \quad 0,088 \quad 0,115 \quad 0,125 \quad 0,115 \quad 0,088 \quad 0,048 \\ &\quad 0,000 \quad -0,048 \quad -0,088 \quad -0,115 \quad -0,125 \quad -0,115 \quad -0,088 \\ &\quad -0,04) \quad 0,000]. \end{aligned}$$

A parte real ($Sinal_{Re}$) e imaginária ($Sinal_{Im}$) do fasor é calculada a partir da soma das multiplicações entre a janela do sinal e os coeficientes reais e imaginários de Fourier, respectivamente. Portanto:

$$\begin{aligned} Sinal_{Re} &= 77 \times 0,12 + 0 \times 0,09 - 77 \times 0,05 - 141 \times 0,00 - 185 \times -0,05 - 200 \times (-0,09) \\ &\quad - 185 \times -0,12 + (-141) \times (-0,13) - 77 \times (-0,12) - 0 \times -0,09 + 77 \times -0,05 \\ &\quad + 141 \times -0,00 + 185 \times 0,05 + 200 \times 0,09 + 185 \times 0,12 + 141 \times 0,13 \\ &= 141,42, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sinal_{Im} &= 77 \times 0,05 + 0 \times 0,09 - 77 \times 0,12 - 141 \times 0,13 + (-185) \times 0,12 - 200 \times 0,09 \\ &\quad - 185 \times 0,05 - 141 \times 0,00 - 77 \times -0,05 - 0 \times -0,09 + 77 \times -0,12 + 141 \times -0,13 \\ &\quad + 185 \times -0,12 + 200 \times -0,09 + 185 \times -0,05 + 141 \times -0,00 \\ &= 141,42. \end{aligned}$$

Sendo o fasor do sinal correspondente à soma das partes real e imaginária do fasor, tem-se:

$$\begin{aligned} Fasor &= Sinal_{Re} + iSinal_{Im} \\ &= 141,42 + i141,42 \\ &= 200 \angle 45^\circ. \end{aligned}$$

3.2 Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo

Para se obter uma extração de fasores mais rápida, aplica-se ao sinal um janelamento de meia onda usando o algoritmo de Fourier (PHADKE; THORP, 2009), no qual são usadas $N/2$ amostras. Aplicando essa metodologia ao cálculo dos coeficientes de Fourier, obtém-se a parte cossenoidal

$$Y_{cp} = \frac{4}{N} \sum_{n=1}^{N/2} y(n) \cos(pn\theta) \quad (3.10)$$

e senoidal

$$Y_{sp} = \frac{4}{N} \sum_{n=1}^{N/2} y(n) \text{sen}(pn\theta). \quad (3.11)$$

Apesar do ganho em velocidade, como mostrado na literatura, o algoritmo de Fourier de meio ciclo é afetado pela componente CC de decaimento exponencial e não filtra as harmônicas pares.

3.2.1 Exemplo Prático - Fourier de Meio Ciclo

Para exemplificar o cálculo de fasor usando a técnica de Fourier de meio ciclo, usou-se um sinal sinusoidal representado pela seguinte função:

$$\begin{aligned} \text{senal} &= 200 \text{sen}(wt + 45^\circ). \\ w &= 2\pi 60. \end{aligned}$$

Para extrair o fasor desse sinal, é necessário extrair uma janela de amostras de meio ciclo do sinal. Na demonstração, considerou-se que o sinal é discretizado a 16 amostras por ciclo, resultando numa frequência de amostragem de 960 Hz . A diferença da técnica de Fourier de meio ciclo para a de um ciclo advém do uso de uma janela menor por aquela técnica, que é metade da usada na técnica de um ciclo. Nesse caso, o vetor janela terá apenas 8 valores do sinal:

$$\text{janela} = [77 \quad 0 \quad -77 \quad -141 \quad -185 \quad -200 \quad -185 \quad -141 \quad],$$

sendo janela um vetor contendo 16 amostras do sinal correspondente a um ciclo.

Usando as equações (3.5) e (3.6) dos coeficientes de Fourier, calcula-se os 16 coeficientes reais e imaginários. Sabendo que $\theta = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{16}$ e substituindo na fórmula para $p=1$, tem-se para os coeficientes reais:

$$\begin{aligned} Y_{re}(1) &= \frac{4}{16} \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) = 0,231, \\ Y_{re}(2) &= \frac{4}{16} \cos\left(2\frac{2\pi}{16}\right) = 0,177, \\ &\dots \\ Y_{re}(8) &= \frac{4}{16} \cos\left(8\frac{2\pi}{16}\right) = -0,250. \end{aligned}$$

Para os coeficientes imaginários. tem-se:

$$\begin{aligned}
 Y_{im}(1) &= \frac{4}{16} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{16} \right) = 0,096, \\
 Y_{im}(2) &= \frac{4}{16} \text{sen} \left(2 \frac{2\pi}{16} \right) = 0,177, \\
 &\dots \\
 Y_{im}(8) &= \frac{4}{16} \text{sen} \left(8 \frac{2\pi}{16} \right) = 0.
 \end{aligned}$$

Os coeficientes calculados são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned}
 \text{Coeficientes } Fourier_{real} &= [0,231 \quad 0,177 \quad 0,096 \quad 0,000 \quad -0,096 \quad -0,177 \\
 &\quad -0,231 \quad -0,250];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Coeficientes } Fourier_{imag} &= [0,096 \quad 0,177 \quad 0,231 \quad 0,250 \quad 0,231 \\
 &\quad 0,177 \quad 0,096 \quad 0,000],
 \end{aligned}$$

A parte real ($Sinal_{Re}$) e imaginária ($Sinal_{Img}$) do fasor é calculada a partir da soma das multiplicações entre a janela do sinal e os coeficientes reais e imaginários de Fourier, respectivamente. Portanto:

$$\begin{aligned}
 Sinal_{Re} &= 77 \times 0,231 + 0 \times 0,177 - 77 \times 0,096 + -141 \times 0,000 - 185 \times -0,096, \\
 &\quad - 200 \times -0,177 - 185 \times -0,231 - 141 \times -0,250, \\
 &= 141,42,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Sinal_{Img} &= 77 \times 0,096 + 0 \times 0,177 + -77 \times 0,231 + -141 \times 0,250 - 185 \times 0,231, \\
 &\quad - 200 \times 0,177 + -185 \times 0,096 + -141 \times 0,000, \\
 &= 141,42.
 \end{aligned}$$

Sendo o fasor do sinal correspondente à soma das partes real e imaginária do fasor, tem-se:

$$\begin{aligned}
 Fasor &= Sinal_{Re} + iSinal_{Img}, \\
 &= 141,42 + i141,42, \\
 &= 200 \angle 45^\circ.
 \end{aligned}$$

Como seria esperado, o resultado para o algoritmo de Fourier de meio ciclo foi igual ao obtido pelo algoritmo de Fourier de um ciclo.

3.3 Algoritmo de Cosseno Modificado

Aplicando a propriedade de ortogonalidade dos coeficientes de Fourier, [Schweitzer III e Hou \(1993\)](#) propuseram um algoritmo usando o filtro cosseno, que extrai os fasores sem a componente CC de decaimento exponencial, tendo como base duas amostras espaçadas de 90 graus. O problema desse algoritmo é a introdução de um atraso de um quarto de ciclo, tornando a estimação dos fasores mais lenta.

A partir do filtro proposto por [Schweitzer III e Hou \(1993\)](#), um filtro cosseno modificado foi apresentado por [Hart, Novosel e Smith \(2000\)](#), o qual usa amostras subsequentes de modo que as amostras se tornem ortogonais entre si. Com isso, foi possível obter um fasor com um tempo menor que um quarto de ciclo, sendo o tempo dependente da taxa de amostragem.

Para a formulação do algoritmo, considerou-se um sinal discreto composto por amostras compreendidas em meio ciclo:

$$x(k) = A_0 e^{\frac{-\Delta t}{\tau} k} + \sum_{n=1}^{N/2} A_p \cos(pk\delta + \phi_p), \quad (3.12)$$

sendo A_p e ϕ_p a amplitude e a fase da p -ésima harmônica, respectivamente, $e^{-\Delta t/\tau}$ o termo exponencial, τ a constante de decaimento da componente CC e Δt o intervalo entre amostras.

Desconsiderando a componente CC do sinal apresentado na equação (3.12) e aplicando-se a transformada de Fourier à parte real do sinal, tem-se:

$$Y_c(k) = \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N x(k - N + r) \cos(r\delta). \quad (3.13)$$

Substituindo a equação (3.12) na equação (3.13), tem-se:

$$Y_c(k) = \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N A_1 \cos[(k - N + r)\delta + \phi_1] \cos(r\delta), \quad (3.14)$$

resultando na equação:

$$\begin{aligned} Y_c(k) &= \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N A_1 \cos[(k - N + r)\delta] \cos(\phi_1) \cos(r\delta) - \\ &\quad \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N A_1 \cos[(k - N + r)\delta] \sin(\phi_1) \cos(r\delta). \end{aligned} \quad (3.15)$$

As relações trigonométricas

$$\sum_{r=1}^N \cos[(k - N + r)\delta] \cos r\delta = \frac{N}{2}, \quad (3.16)$$

$$\sum_{r=1}^N \text{sen}(k - N + r)\delta] \cos r\delta = 0, \quad (3.17)$$

inseridas na equação (3.15) resultaram na seguinte equação:

$$Y_c(k) = A_1 \cos \phi_1. \quad (3.18)$$

Analogamente, a parte real do fasor para a amostra anterior traz como resultado:

$$Y_c(k-1) = \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N x(k - N + r - 1) \cos(r\delta). \quad (3.19)$$

Para a amostra anterior, com base na equação (3.15), tem-se:

$$Y_c(k-1) = \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N A_1 \cos[(k-N+r)\delta] \cos(\phi_1 - \delta) \cos(r\delta) - \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N A_1 \cos[(k-N+r)\delta] \text{sen}(\phi_1 - \delta) \cos(r\delta). \quad (3.20)$$

Recorrendo às relações trigonométricas mostradas nas equações (3.16) e (3.17), tem-se:

$$Y_c(k-1) = A_1 \cos(\phi_1 - \delta) = A_1 \cos \phi_1 \cos \delta + A_1 \text{sen} \phi_1 \text{sen} \delta, \quad (3.21)$$

e simplificando a equação (3.21) conforme a equação (3.18), tem-se:

$$Y_c(k-1) = Y_c(k) \cos \delta + Y_s(k) \text{sen} \delta, \quad (3.22)$$

sendo possível extrair o fasor da parte imaginária a partir do fasor da parte real da amostra recente Y_{ck} e de outro fasor da parte real da amostra passada Y_{ck-1} da transformada de Fourier do sinal:

$$Y_s(k) = \frac{Y_c(k-1) - Y_c(k) \cos \delta}{\text{sen} \delta}, \quad (3.23)$$

obtendo-se assim o fasor do sinal:

$$\hat{Y}(k) = Y_c(k) + jY_s(k), \quad (3.24)$$

sendo o módulo do fasor:

$$|A| = \sqrt{(Y_c(k))^2 + (Y_s(k))^2}, \quad (3.25)$$

e a fase:

$$\phi = \arctan\left(\frac{Y_s(k)}{Y_c(k)}\right). \quad (3.26)$$

O algoritmo cosseno modificado é imune ao efeito da componente CC de decaimento exponencial e não requer processamento elevado.

3.3.1 Exemplo Prático - Algoritmo Cosseno Modificado

Para exemplificar o cálculo de fasor usando a técnica de cosseno modificado, use-se um sinal sinusoidal representado pela seguinte função:

$$\begin{aligned} \text{senal} &= 200\text{sen}(wt + 45^\circ), \\ w &= 2\pi 60. \end{aligned}$$

Para extrair o fasor desse sinal usando a técnica de cosseno modificado, é necessário ter duas janelas de sinal espaçadas no tempo de 1 amostra, ou seja, extrai-se a primeira janela no tempo $T - 1$ e a segunda janela no tempo T como se pode visualizar na equação (3.23). Na demonstração, considerou-se que o sinal é discretizado a 16 amostras por ciclo, dando uma frequência de amostragem de 960 Hz . Os valores dos vetores $\text{janela}(T - 1)$ e $\text{janela}(T)$ são:

$$\begin{aligned} \text{janela}(T - 1) &= [141 \quad 77 \quad 0 \quad -77 \quad -141 \quad -185 \quad -200 \quad -185 \quad -141 \\ &\quad -77 \quad -0 \quad 77 \quad 141 \quad 185 \quad 200 \quad 185 \quad], \\ \text{janela}(T) &= [77 \quad 0 \quad -77 \quad -141 \quad -185 \quad -200 \quad -185 \quad -141 \quad -77 \quad 0 \\ &\quad 77 \quad 141 \quad 185 \quad 200 \quad 185 \quad 141]. \end{aligned}$$

O cálculo da parte real do fasor usando a técnica do cosseno modificado é igual ao cálculo utilizado no algoritmo de Fourier de um ciclo conforme consta na seção 3.1.1. Para o cálculo da parte imaginária do fasor, é necessário calcular a parte real da $\text{janela}(T - 1)$, multiplicando os valores do vetor $\text{janela}(T - 1)$ pelos coeficientes reais de Fourier previamente definidos na seção 3.1.1, como segue:

$$\begin{aligned} \text{Sinal}_{Re}(T - 1) &= 141 \times 0,115 + 77 \times 0,088 + 0 \times 0,048 - 77 \times 0,000 + (-141) \times 0,048, \\ &\quad - 185 \times -0,088 - 200 \times (-0,115) - 185 \times -0,125 - 141 \times (-0,115), \\ &\quad - 77 \times (-0,088) - 0 \times (-0,048) + 77 \times -0,000, \\ &\quad + 141 \times 0,048 + 185 \times 0,088 + 200 \times 0,115 + 185 \times 0,125, \\ &= 184,77. \end{aligned}$$

Assim, o cálculo da parte imaginária usando a técnica Cosseno Modificado é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Sinal}_{Im} &= \frac{\text{Sinal}_{Re}(T - 1) - \text{Sinal}_{Re}(T) \times \cos(\theta)}{\text{sen}(\theta)}, \\ \text{Sinal}_{Im} &= \frac{184,77 - 141,2 \times \cos(0.39)}{\text{sen}(0.39)}, \\ &= 141,42. \end{aligned}$$

sendo $Sinal_{Im}$ a parte imaginário do fasor e $\theta = \frac{2\pi}{16}$.

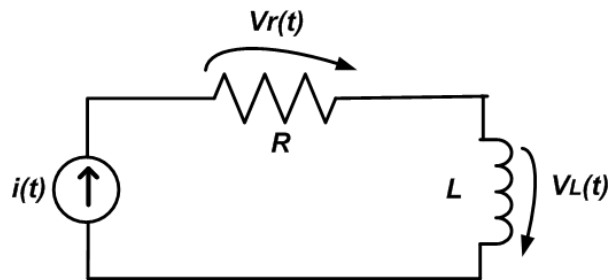
O fasor do sinal resulta, portanto, em:

$$\begin{aligned} Fasor &= Sinal_{Re} + iSinal_{Img} \\ &= 141,42 + i141,42 \\ &= 200\angle 45^\circ. \end{aligned}$$

3.4 Filtro Mímico

Para solucionar o problema dos filtros digitais que não possuem a capacidade de filtrar a componente CC, o filtro mímico digital foi apresentado por [Benmouyal \(1995\)](#). Esse filtro é um circuito RL que, colocado em série na saída do sinal, consegue eliminar a componente CC de decaimento exponencial. No entanto, a componente CC de decaimento exponencial só é totalmente eliminada quando a relação da constante de tempo R/L do filtro for igual à relação R/L do circuito RL projetado.

Figura 1 – Circuito RL.



Fonte: o autor.

No circuito da Figura 1, a impedância é $Z = R + X$ e a tensão do circuito é $V = ZI$. No domínio de Laplace, $Z = R + Ls$, resultando a tensão em:

$$V(s) = (R + Ls)I(s). \quad (3.27)$$

Se a fonte de corrente for igual à componente CC de decaimento exponencial, tem-se:

$$i(t) = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}. \quad (3.28)$$

No domínio de Laplace,

$$I(s) = \frac{1}{s + 1/\tau}, \quad (3.29)$$

resultando a tensão em:

$$V(s) = \frac{R + Ls}{s + 1/\tau}. \quad (3.30)$$

No caso em que $\tau = L/R$, a tensão é dada por:

$$V(s) = L, \quad (3.31)$$

que resulta no domínio do tempo:

$$v(t) = Lu(t), \quad (3.32)$$

em que $u(t)$ é a função degrau. A saída da tensão em forma de degrau indica que a componente CC, representada pelo corrente $i(t)$, foi completamente eliminada.

Com base nessas premissas, a impedância do filtro mímico é reescrita:

$$Z = K(1 + s\tau_d). \quad (3.33)$$

sendo τ_d a constante de tempo do circuito da Figura 1.

O valor de ganho K é projetado de tal forma que o ganho do filtro mímico seja unitário para a frequência fundamental:

$$K = \sqrt{\frac{1}{[1 + \tau_d - \tau_d \cos(\frac{2\pi}{N})]^2 + [\tau_d \text{sen}(\frac{2\pi}{N})]^2}}. \quad (3.34)$$

O valor de τ_d deve ser escolhido de forma a aproximar-se o máximo possível do valor da constante de tempo do sistema analisado. Sendo o valor de τ_d igual à constante de tempo do sistema, o filtro mímico digital filtrará toda a componente CC de decaimento exponencial. Essa é uma das grandes limitações do filtro mímico, já que a estimação será afetada se o valor projetado de τ_d divergir consideravelmente do valor da constante do sistema.

Transformando a equação (3.33) para o domínio da transformada Z, tem-se:

$$Z = K[(1 + \tau_d) - \tau_d z^{-1}]. \quad (3.35)$$

Sejam os valores K e τ_d (valor em amostras do sinal) projetados para uma determinada constante de tempo do sistema de potência, vem que o sinal discreto x_k^* é filtrado no instante k :

$$x_k^* = K[(1 + \tau_d)x_k - \tau_d x_{k-1}], \quad (3.36)$$

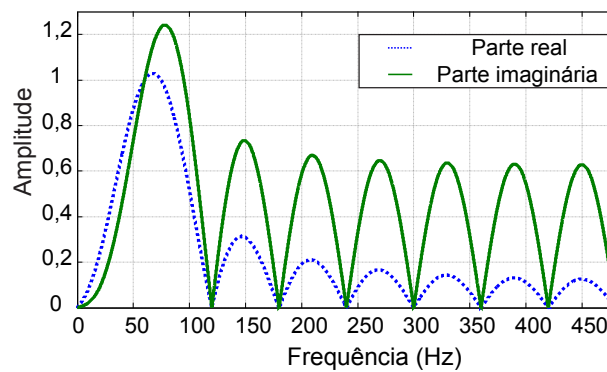
sendo x_k e x_{k-1} o sinal não filtrado no instante k e $k - 1$, respectivamente.

3.5 Resposta em Frequência

A resposta em frequência demonstra de que forma o algoritmo irá se comportar em uma faixa de componentes de frequência. Os algoritmos do tipo impulso finito são projetados para ter ganho unitário na frequência fundamental (60 Hz). As características desses algoritmos permitem a filtragem das harmônicas da frequência fundamental de um modo natural, já que o ganho é zero para essas frequências. No entanto, esses filtros não têm ganho zero para as frequências inter-harmônicas, podendo ocasionar erros na estimação de fasores.

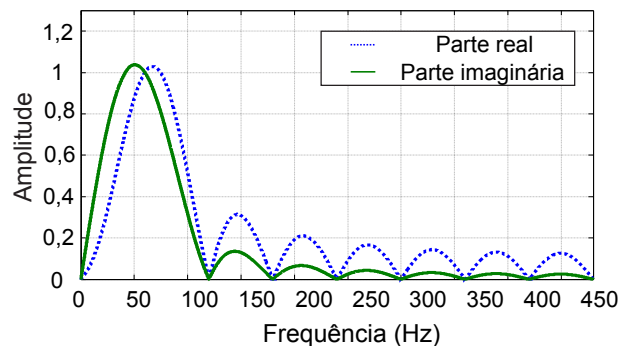
Nas Figuras 2, 3 e 4, apresentam-se as respostas em frequência dos filtros de estimação fasorial usados nesta tese. No cálculo dessas respostas, considerou-se uma frequência de amostragem de 960 Hz, por esta ser usada no relé comercial da [Schweitzer Engineering Laboratories \(2007\)](#).

Figura 2 – Resposta em frequência - Cosseno Modificado.



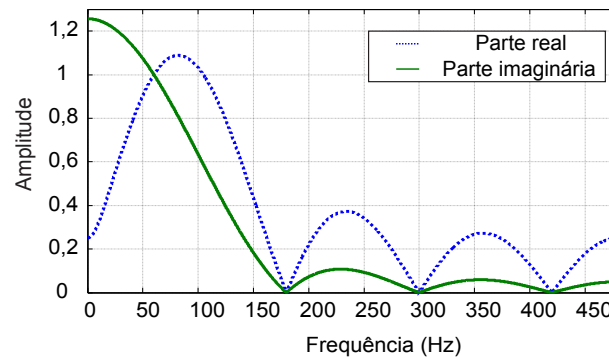
Fonte: o autor.

Figura 3 – Resposta em frequência - Fourier de um ciclo.



Fonte: o autor.

Figura 4 – Resposta em frequência - Fourier de meio ciclo.



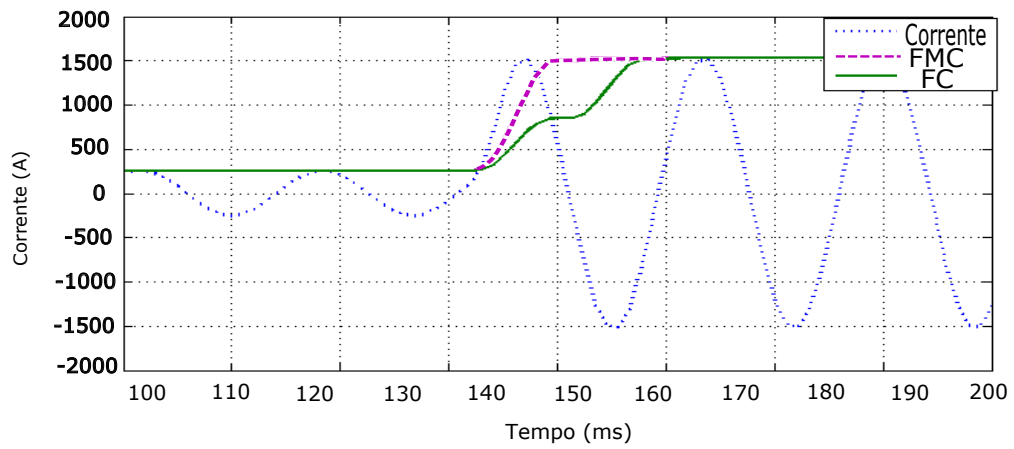
Fonte: o autor.

3.6 Filtragem da componente CC

Existem várias formas de filtrar a componente CC. [Guo, Kezunovic e Chen \(2003\)](#) adotaram a manipulação da transformada discreta de Fourier incluindo a componente CC, enquanto que [Hart, Novosel e Smith \(2000\)](#) adotaram as propriedades do filtro cosseno e usaram os seus coeficientes para compor o filtro, que responde melhor à componente CC de decaimento exponencial. Outra alternativa de filtragem da componente CC é o uso de filtros auxiliares, como é o caso do filtro mímico digital de [Benmouyal \(1995\)](#) e o filtro mímico adaptativo de [Silva e Küsel \(2012\)](#).

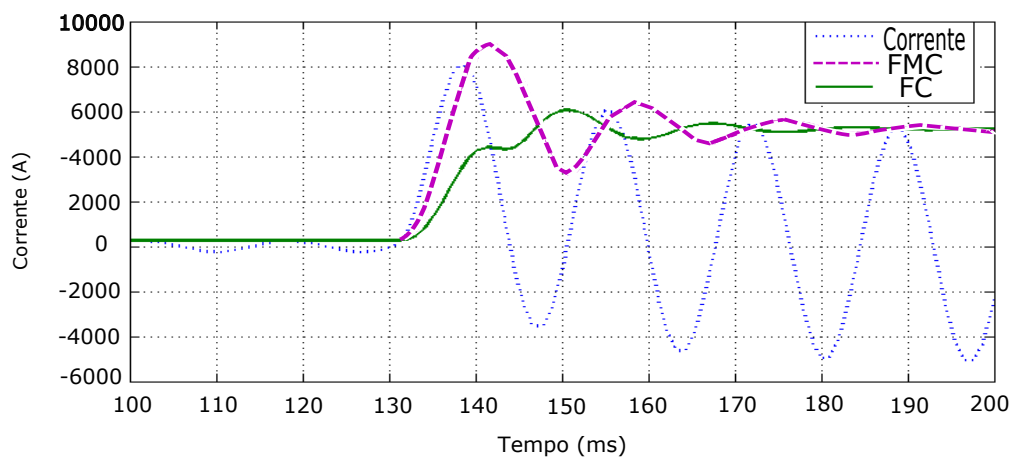
A componente CC de decaimento exponencial provoca sobrestimação do filtro de Fourier, como se pode observar nas Figuras 5 e 6 provenientes de duas faltas simuladas no ATP ([CAMPOS, 2012](#)). Na Figura 5, a componente CC é desprezível, não havendo, portanto, sobrestimação significativa do algoritmo de Fourier de um ciclo e meio ciclo. A Figura 6, por sua vez, apresenta uma sobrestimação de cerca de 16% ([CAMPOS, 2012](#)) para o Fourier de um ciclo e de cerca de 70% para o de meio ciclo ([CAMPOS, 2012](#)), o que é crítico para o desempenho que se deseja para um relé digital.

Figura 5 – Estimação fasorial de Fourier de um e meio ciclo sem componente CC.



Fonte: o autor.

Figura 6 – Estimação fasorial de Fourier de um e meio ciclo na presença de componente CC.



Fonte: o autor.

3.7 Resumo do Capítulo

A fundamentação matemática e a resposta em frequência dos algoritmos Fourier de um ciclo, Fourier de meio ciclo e Cosseno Modificado usados no relé avaliado nesta tese foram apresentadas, bem como uma análise da influência da componente CC no algoritmos de estimação fasorial. A teoria exposta nesta seção permitiu a análise de erros presentes na estimação de fasor, os quais foram avaliados pela metodologia proposta nesta tese.

4 Fundamentos da Proteção Digital de Distância

Neste capítulo, as duas características de distância mais usuais em relés de distância (mho e quadrilateral) são fundamentadas matematicamente e é apresentada uma descrição do funcionamento da proteção digital de distância que será utilizada nesta tese.

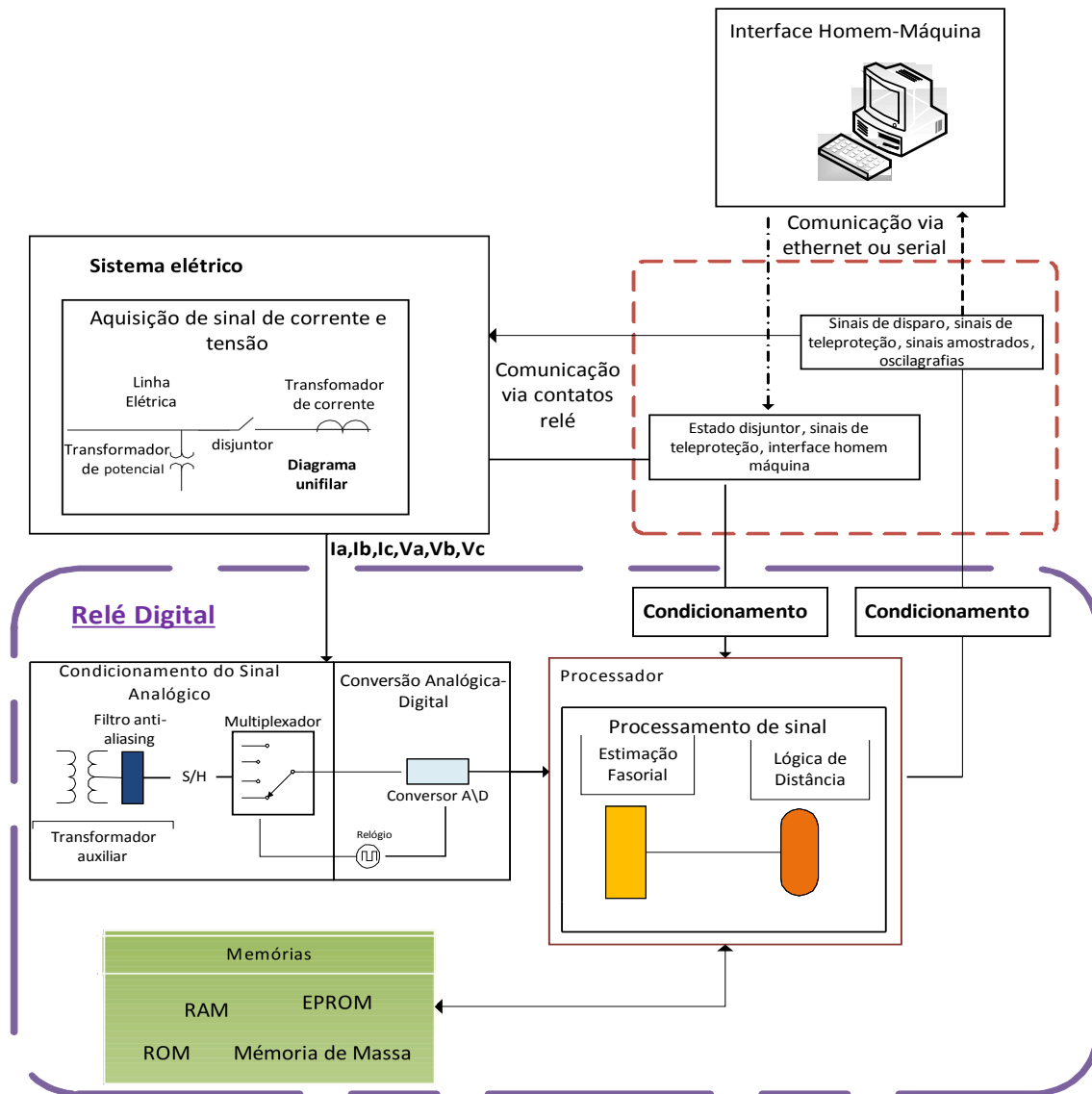
4.1 Componentes do Relé Digital

O relé digital apresenta várias vantagens em relação aos eletromecânicos (ZIEGLER, 2011), tais como: facilidade de parametrização, auto-teste, montagem mais fácil e rápida e customização das funções de proteção.

Na Figura 7 apresentam-se os principais componentes de um relé digital e as interações deste com o sistema elétrico. O relé digital recebe os sinais analógicos provenientes dos transformadores de medição de corrente e tensão e, por meio da análise desses sinais, decide se vai atuar ou não. Para atuar corretamente, o relé condiciona os sinais analógicos por um filtro *anti-aliasing*, responsável por filtrar as componentes de alta-frequência e evitar o *aliasing* do sinal. Os filtros *anti-aliasing* típicos utilizados em relés de distância são os do tipo Butterworth (PHADKE; THORP, 2009). Com o sinal analógico filtrado, o relé faz uma amostragem do sinal, transformando o sinal analógico em digital com taxa de amostragem definida por seu relógio interno. As taxas de amostragem típicas usadas em relés comerciais variam entre 480 e 3840 Hz, como foi demonstrado na revisão dos manuais dos fabricantes de relé apresentada no Capítulo 2.

Com os sinais amostrados do sistema elétrico, o relé digital calcula os fasores usando os algoritmos de estimação fasorial, que serão analisados por meio de algoritmos de proteção, como as lógicas de proteção de distância. Dessa análise resultarão sinais digitais que podem corresponder à sinalização de abertura de linha, alertas para o operador ou oscilografias. Os estimadores de fasores e os algoritmos de distância serão definidos com mais detalhes nas seções seguintes, visto que são os blocos mais importantes do relé digital.

Figura 7 – Sistema de proteção.



Fonte: o autor.

4.2 Proteção de Distância

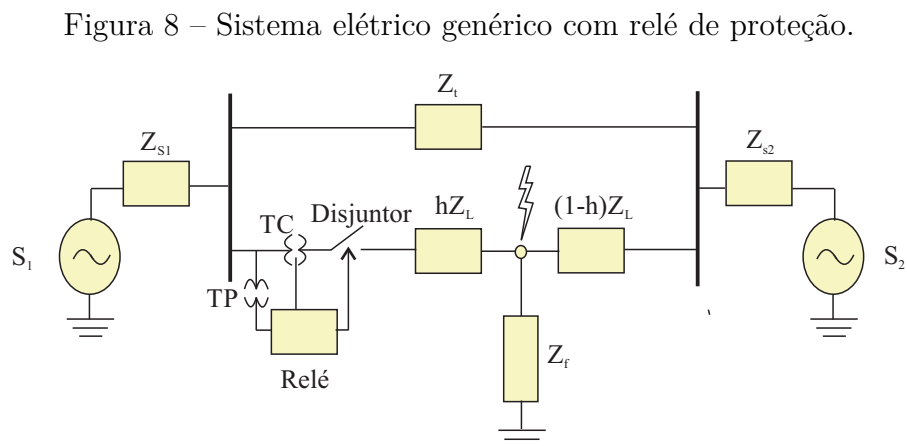
A proteção de distância é baseada na estimação da impedância da linha (ZIEGLER, 2011) e, para sua melhor compreensão, faz-se necessário entender como é realizado o cálculo das impedâncias de falta em cada unidade do relé.

Para o cálculo das impedâncias de falta em uma linha de transmissão, o modelo da caixa preta presente em Anderson (1999) foi usado neste trabalho. No modelo da caixa preta, a dinâmica da linha de transmissão com os demais elementos do sistema de potência é representada pela impedância de transferência Z_t .

O sistema elétrico representado na Figura 8 foi usado para determinar essas

impedâncias de falta, sendo os componentes descritos:

- S_1 - Fonte equivalente no barramento 1;
- Z_{s1} - Impedância equivalente de S_1 ;
- S_2 - Fonte equivalente no barramento 2;
- Z_{s2} - Impedância equivalente de S_2 ;
- Z_t - Impedância de transferência;
- h - Porcentagem de comprimento de linha - variável (entre 0 e 1);
- Z_L - Impedância da linha;
- Z_f - Resistência de falta;
- TC - Transformador de corrente;
- TP - Transformador de potencial.



Fonte: o autor.

Na Tabela 6 estão sumarizados os tipos de falta que podem ocorrer no sistema de potência, as unidades e o grupo associado dos relés ativos para as respectivas faltas, e as componentes simétricas associadas. Os relés foram divididos em dois grupos: grupo das unidades de terra, com as unidades de terra FT_A , FT_B e FT_C responsáveis por atuar em faltas envolvendo a terra nas fases A, B e C, respectivamente; e grupo das unidades de fase, com as unidades de fase FF_{AB} , FF_{BC} e FF_{AC} responsáveis por atuar nas faltas envolvendo mais de uma fase.

O conhecimento das componentes simétricas ativas em cada unidade do relé é importante para definir estratégias de detecção de falta. A componente de sequência

Tabela 6 – Tipos de falta que podem ocorrer no sistema elétrico.

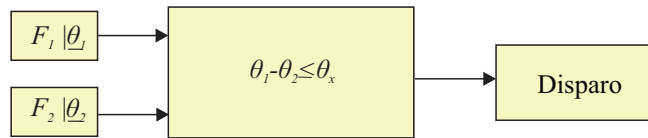
Tipo Falta		Unidades Ativas do Relé	Componentes Simétricas
A-T	Fase-Terra	FT_A	1, 2 e 0
B-T	Fase-Terra	FT_B	1, 2 e 0
C-T	Fase-Terra	FT_C	1, 2 e 0
A-B	Fase-Fase	FF_{AB}	1 e 2
B-C	Fase-Fase	FF_{BC}	1 e 2
A-C	Fase-Fase	FF_{AC}	1 e 2
A-B-T	Fase-Fase-Terra	FF_{AB}, FT_A e FT_B	1, 2 e 0
A-C-T	Fase-Fase-Terra	FF_{AC}, FT_A e FT_C	1, 2 e 0
B-C-T	Fase-Fase-Terra	FF_{BC}, FT_B e FT_C	1, 2 e 0
A-B-C	Trifásica	FF_{AB}, FF_{BC} e FF_{AC}	1
A-B-C-T	Trifásica-Terra	FT_A, FT_B e FT_C FF_{AB}, FF_{BC} e FF_{AC}	1, 2 e 0

zero, por exemplo, não existe para faltas não envolvendo a terra. As faltas trifásicas são identificadas quando está presente apenas a componente de sequência positiva.

As impedâncias calculadas em cada unidade do relé estão sumarizadas na Tabela 7, em que $k_e = (Z_0 - Z_1)/(Z_1)$ é o fator de compensação de sequência zero.

No caso da proteção de distância, o comparador de fase advém da comparação de ângulos entre fasores, como ilustrado na Figura 9, no qual a base de decisão do relé para a abertura da linha protegida é dada de acordo com a diferença de ângulo.

Figura 9 – Comparador de fase.



Fonte: o autor.

O comparador de ângulo corresponde ao comparativo entre o ângulo do torque de operação e o ângulo do torque de polarização. Quando a subtração desses ângulos resultar em um valor absoluto menor que o definido pelo usuário, o relé atuará. Para a característica mho, esse valor absoluto é de 90 graus (ZIEGLER, 2011).

Conforme Kasztenny e Finney (2008), os torques de operação \hat{S}_{op} e polarização \hat{S}_{pol} são definidos por:

$$\begin{aligned}\hat{S}_{op} &= k_1 \hat{I}_{Rop} \angle \phi + k_2 \hat{V}_{Rop} \angle 0, \\ \hat{S}_{pol} &= k_3 \hat{I}_{Rpol} \angle \phi + k_4 \hat{V}_{Rpol} \angle 0,\end{aligned}$$

sendo k_1, k_2, k_3 e k_4 constantes complexas, $\hat{V}_{Rop}, \hat{V}_{Rpol}$ e $\hat{I}_{Rop}, \hat{I}_{Rpol}$ os valores medidos da tensão e corrente de operação e polarização, respectivamente, usados pelo relé. Defi-

Tabela 7 – Impedâncias medidas pelo relé.

Tipos de Falta	Unidades do Relé	Impedâncias	Tipos de Faltas	Unidades do Relé	Impedâncias
A-T	FT_A	$Z_{at} = \frac{V_{at}}{I_a + k_e I_n}$		FT_B	$Z_{bt} = \frac{V_{bt}}{I_b + k_e I_n}$
B-T	FT_B	$Z_{bt} = \frac{V_{bt}}{I_b + k_e I_n}$	B-C-T	FT_{BC}	$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}$
C-T	FT_C	$Z_{ct} = \frac{V_{ct}}{I_c + k_e I_n}$		FT_C	$Z_{ct} = \frac{V_{ct}}{I_c + k_e I_n}$
A-B	FF_{AB}	$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$		FF_{AB}	$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$
B-C	FF_{BC}	$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}$	A-B-C	FF_{CA}	$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$
A-C	FF_{CA}	$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$		FF_{BC}	$Z_{bc} = \frac{V_a - V_c}{I_a - I_c}$
	FT_B	$Z_{bt} = \frac{V_{bt}}{I_b + k_e I_n}$		FT_A	$Z_{at} = \frac{V_{at}}{I_a + k_e I_n}$
A-B-T	FF_{AB}	$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$		FT_B	$Z_{bt} = \frac{V_{bt}}{I_b + k_e I_n}$
	FT_A	$Z_{at} = \frac{V_{at}}{I_a + k_e I_n}$	A-B-C-T	FT_C	$Z_{ct} = \frac{V_{ct}}{I_c + k_e I_n}$
	FF_{CA}	$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$		FF_{AB}	$Z_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$
A-C-T	FF_C	$Z_{ct} = \frac{V_{ct}}{I_c + k_e I_n}$		FF_{BC}	$Z_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}$
	FT_A	$Z_{at} = \frac{V_{at}}{I_a + k_e I_n}$		FF_{CA}	$Z_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$

nindo as constantes complexas \hat{k}_1 , \hat{k}_2 , \hat{k}_3 e \hat{k}_4 de várias formas, é possível obter diferentes características de proteção, como sumarizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de k para várias características.

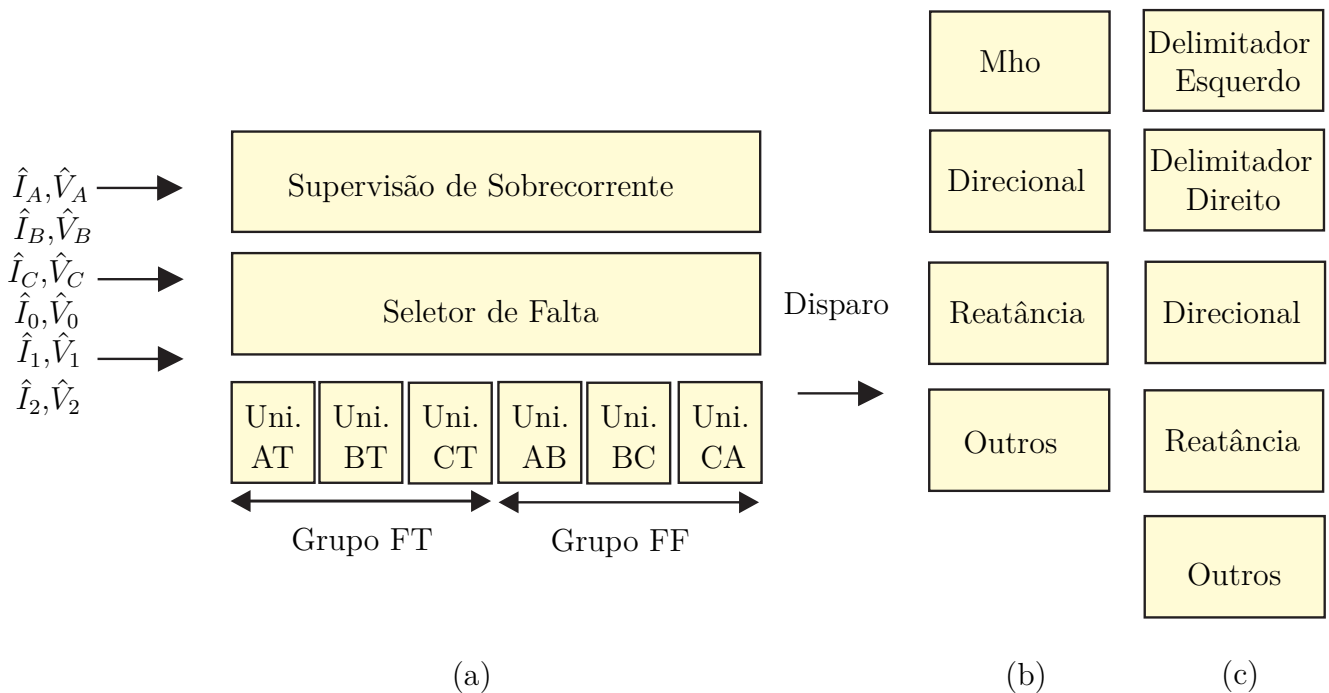
Características	k_1	k_2	k_3	k_4
Mho	\hat{Z}_{L1}	-1	0	1
Reatância	\hat{Z}_{L1}	-1	\hat{Z}_{L1}	0
Direcional	\hat{Z}_d	0	0	1
Seleção de fase	1	0	0	1
Delimitador Direito	\hat{Z}_{Dir}	-1	\hat{Z}_{Dir}	0
Delimitador Esquerdo	\hat{Z}_{Esq}	-1	\hat{Z}_{Esq}	0

Sendo \hat{Z}_{L1} o ajuste usado para parametrizar as características mho e reatância, \hat{Z}_d o ajuste para parametrizar a característica direcional, \hat{Z}_{Dir} e \hat{Z}_{Esq} os ajustes da características lateral direita e esquerda.

As características apresentadas são utilizadas em conjunto, configurando um relé baseado na mho e outro na quadrilateral. O relé baseado em mho usa as características reatância, direcional e mho em conjunto com o seletor de falta e o ativador de sobrecorrente. O relé baseado na quadrilateral usa dois delimitadores (um direito e outro esquerdo), a característica direcional e, como no relé baseado na mho, usa um seletor de falta e o ativador.

Na Figura 10 ilustra-se a arquitetura do relé baseado em mho e na quadrilateral, a mesma adotada para modelar os relés avaliados nesta tese. Esses relés usam as tensões e correntes medidas em cada fase ($\hat{V}_A, \hat{V}_B, \hat{V}_C, \hat{I}_A, \hat{I}_B$ e \hat{I}_C) e as componentes calculadas de sequência zero, positiva e negativa das tensões (\hat{V}_0, \hat{V}_1 e \hat{V}_2) e correntes (\hat{I}_0, \hat{I}_1 e \hat{I}_2) para serem ativadas pelo ativador de sobrecorrente ou pelo seletor de falta. Se ativadas, essas medidas seguem para o conjunto de características do respectivo relé mho ou quadrilateral, para, em seguida, ser calculado o disparo.

Figura 10 – Componentes dos algoritmos de distância: a) Principais Componentes; b) Relé baseado em mho; c) Relé baseado em quadrilateral.



Fonte: o autor.

4.3 Ativação por Sobrecorrente

As unidades de terra e de fase do relé de distância necessitam de ativação por meio de uma unidade de sobrecorrente para evitar a atuação indevida do relé em situações de carga pesada, sendo o ativador mais importante para o caso da característica quadrilateral,

que apresenta uma maior cobertura no plano R-X. Os relés comerciais ([SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2007](#)) utilizam características de distância supervisionadas por essa ativação.

Para supervisionar as unidades de terra e de fase do relé são usadas as correntes residual e fase-fase, respectivamente, e o limite de cada ativador é definido pelo usuário conforme as condições de carga do sistema.

4.3.1 Demonstração de Cálculo

Nesta subseção, demonstra-se como seria utilizada a função de ativação por sobrecorrente em situação de falta.

Primeiramente, é necessário definir os ajustes para as unidades de terra e de fase. No exemplo aqui apresentado, foi definido que as unidades de terra teriam um valor de ajuste de sobrecorrente de 300 A e as unidades de fase um ajuste de 500 A.

As unidades de terra do relé atuam quando o valor da corrente de sequência zero I_0 é superior ao ajuste definido, ou seja, quando

$$|I_0| > 300. \quad (4.1)$$

As unidades de fase do relé atuam quando as correntes de fase são superiores ao ajuste definido, ou seja, quando

$$|I_{AB}| > 500 \parallel |I_{AB}| > 500 \parallel |I_{CA}| > 500. \quad (4.2)$$

Neste exemplo, considerou-se os dados de uma falta AT a 100 km do relé com resistência de falta de 50 Ω , utilizando o caso 1 do sistema elétrico usado em [Campos \(2012\)](#).

Os valores de tensões e correntes injetados no relé foram:

Tensão de falta	Corrente de falta
$Va_{falta} = 5,16 \times 10^4 e^{-j11^\circ} \text{ V}$	$Ia_{falta} = 222 e^{-j154^\circ} \text{ A}$
$Vb_{falta} = 2,34 \times 10^5 e^{-j119^\circ} \text{ V}$	$Ib_{falta} = 264 e^{-j152^\circ} \text{ A}$
$Vc_{falta} = 2,36 \times 10^5 e^{j116^\circ} \text{ V}$	$Ic_{falta} = 274 e^{j111^\circ} \text{ A}$

Tensão entre fases de falta	Corrente entre fases de falta
$Vab_{falta} = 2,5 \times 10^5 e^{-j84^\circ} \text{ V}$	$Iab_{falta} = 42,8 e^{j38^\circ} \text{ A}$
$Vbc_{falta} = 3,2 \times 10^5 e^{j153^\circ} \text{ V}$	$Ibc_{falta} = 403 e^{-j109,5^\circ} \text{ A}$
$Vca_{falta} = 2,86 \times 10^5 e^{j22^\circ} \text{ V}$	$Ica_{falta} = 367 e^{j73,9^\circ} \text{ A}$

A impedância da linha L_1 onde ocorre a falta é dada por:

$$\begin{aligned} Z1 &= 0,0954682 + 0,759902i \quad \text{ohm} \setminus \text{Milha}, \\ Z0 &= 0,362698 + 2,43790i \quad \text{ohm} \setminus \text{Milha}. \end{aligned}$$

Sendo a impedância total da linha (400 km):

$$\begin{aligned} Z1 &= 190e^{j82^\circ} \quad \Omega, \\ Z0 &= 612e^{j81^\circ} \quad \Omega. \end{aligned}$$

Para o cálculo das tensões de operação do relé, é preciso calcular os valores de I_N e de K_0 , conforme as equações:

$$\begin{aligned} I_N &= I_{a_{falta}} + I_{b_{falta}} + I_{c_{falta}} = 222e^{-j154^\circ} + 264e^{-j152^\circ} + 274e^{j111^\circ}, \\ I_N &= 532e^{j176^\circ} \text{ A}, \\ K0 &= \frac{Z0 + Z1}{3Z1} = \frac{612e^{j81^\circ} + 190e^{j82^\circ}}{3 \times 190e^{j82^\circ}}, \\ K0 &= 0,73e^{-j1,88^\circ}, \end{aligned}$$

sendo I_N a corrente de terra que circula na linha L_1 e K_0 o fator de compensação de sequência zero.

Utilizando os dados de falta, tem-se:

$$\begin{aligned} |I_0| &= 177, \\ |I_{AB}| &= 42, \\ |I_{BC}| &= 402, \\ |I_{CA}| &= 367. \end{aligned}$$

Para os ajustes definidos neste exemplo, nota-se que nenhuma característica seria ativada, visto que os valores das correntes ficaram abaixo do limiar definido para as unidades de terra e fase.

4.4 Seleção de Falta

A unidade de seleção de falta é usada para evitar a sobrecorrente das unidades de terra do relé para faltas fase-fase-terra e para impedir a atuação das unidades de fase do relé para faltas à terra (Schweitzer III; ROBERTS, 1993).

Para detectar o tipo de falta, compara-se a corrente de sequência zero (\hat{I}_0) com a corrente de sequência negativa (I_{f2}) da linha protegida (Schweitzer III; ROBERTS, 1993). Quando a seguinte condição é atendida:

$$\text{angulo}(\hat{I}_0 \hat{I}_{f2}^*) < 50^\circ, \quad (4.3)$$

o relé identificará falta nas fases f (A, B e C).

4.4.1 Demonstração de Cálculo

O uso da unidade de seleção de falta requer o conhecimento dos valores das correntes de seqüências zero e negativa para cada fase analisada para as unidades de terra, a fim de posteriormente calcular os torques de cada unidade.

Sabendo que $I_0 = I_n/3$ e que o valor da corrente de seqüência negativa (I_n) já foi previamente calculado na subseção 4.3.1, calcula-se a falta AT quando o torque da unidade AT do relé é $|\text{angulo}(I_0 I_{2A}^*)| < 50$.

Com base nos dados de falta utilizados na subseção 4.3.1, os torques são calculados como segue:

$$\begin{aligned} \text{angulo}(T_{AT}) &= |\text{angulo}(I_0 I_{2A}^*)| \\ &= |176 - (-172)| = 12^\circ, \\ \text{angulo}(T_{BT}) &= |\text{angulo}(I_0 I_{2B}^*)| \\ &= |176 - (-52)| = 132^\circ, \\ \text{angulo}(T_{CT}) &= |\text{angulo}(I_0 I_{2C}^*)| \\ &= |176 - 67| = 109^\circ. \end{aligned}$$

Como o $\text{angulo}(T_{AT})$ foi menor que 50° , a falta foi identificada como sendo AT porque atendeu a condição desejada, o que está de acordo com a simulação.

4.5 Característica Mho

A característica mho é uma das mais difundidas e usadas em relés de proteção. Essa característica apresenta muitas vantagens em relação às demais pelo fato de usar apenas um comparador, ter alcance bem definido, ser inerentemente direcional e responder bem às variações de carga (ROBERTS; GUZMAN; Schweitzer III, 1993).

De acordo com Schweitzer III e Roberts (1993), o tipo de polarização influencia a qualidade da resposta da característica mho, sendo a polarização por memória a que

apresenta melhor resposta. A característica mho é um comparador cosseno, em que o valor de operação é comparado com o valor de polarização.

A tensão de operação (\hat{V}_{op}) da característica mho é definida por (KASZTENNY; FINNEY, 2008):

$$\hat{V}_{op} = \hat{Z}_{ref} \hat{I}_r - \hat{V}_{pol}, \quad (4.4)$$

em que \hat{Z}_{ref} é o valor de impedância de referência que define o diâmetro da característica mho, normalmente definido para um intervalo de 80 a 90% da linha (ZIEGLER, 2011), \hat{I}_R é a corrente de curto circuito e \hat{V}_{pol} é a tensão de polarização medida e usada pelo relé.

Considerando que \hat{V}_{pol} é a tensão de polarização, a atuação da característica mho é definida por:

$$\Re(\hat{V}_{op} \hat{V}_{pol}) \geq 0, \quad (4.5)$$

em que \Re é a parte real da equação, que, quando positiva, o relé atuará.

Para a resolução da equação (4.5), recorreu-se ao uso do comparador cosseno (ROBERTS; GUZMAN; Schweitzer III, 1993), já que este é zero para ângulos de 90 graus.

A solução para a equação (4.5) é alcançada quando a diferença de ângulos entre \hat{V}_{op} e \hat{V}_p está entre $\pm 90^\circ$, ou seja, quando $-90^\circ < \theta_1 - \theta_2 < +90^\circ$, considerando θ_1 o ângulo do fasor \hat{V}_{op} e θ_2 o ângulo do fasor \hat{V}_p . Se for feito um gráfico com esses pontos, é definida uma característica circular e a sua zona de convergência dependerá da tensão de polarização.

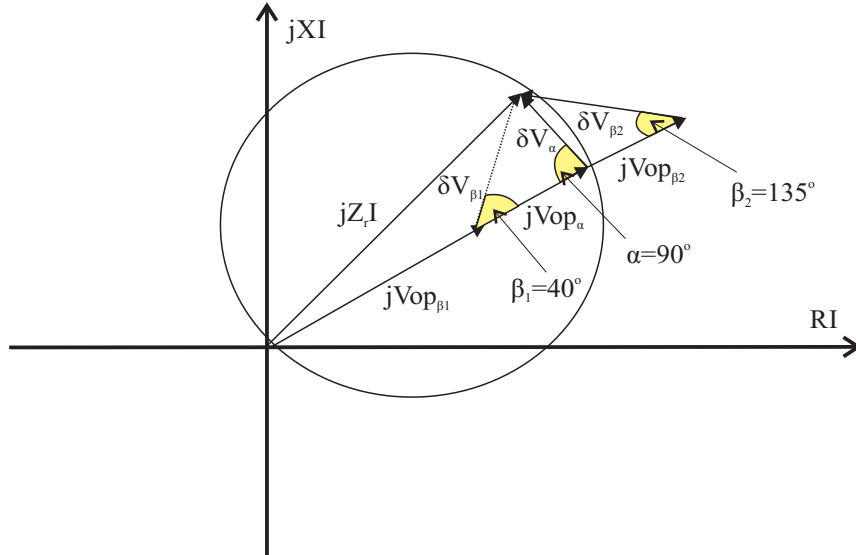
Para poder atuar, a característica mho precisa ser polarizada por uma tensão de polarização em fase com a polarização de operação. Como exemplos de tensão de polarização, enumeram-se:

1. auto-polarizada;
2. polarizada cruzada;
3. polarizada com tensão de sequência positiva;
4. polarizada cruzada com memória;
5. polarizada com tensão de sequência positiva com memória;

A característica mho auto-polarizada usa como tensão de polarização \hat{V}_{pol} a tensão medida no momento da falta. Essa característica apresenta como principal problema o fato de não conseguir definir uma resposta para faltas muito próximas ao relé, já que a tensão de polarização é nula e podendo até disparar para faltas reversas em situações de elevada carga (Schweitzer III; ROBERTS, 1993). A Figura 11 ilustra o comportamento da característica mho auto-polarizada em três situações de falta com $\beta_1 = 40^\circ$, $\alpha = 90^\circ$

e $\beta_2 = 135^\circ$. Com $\beta_1 = 40^\circ$ a falta entrou dentro da característica, com $\alpha = 90^\circ$ a falta ficou no limite da característica, e com $\beta_2 = 135^\circ$ a falta ficou fora da característica.

Figura 11 – Característica mho auto-polarizada.



Fonte: o autor.

A característica mho polarizada cruzada não tem o problema de não operação para faltas próximas ao relé e ainda apresenta expansão durante a falta, o que não acontece com a característica auto-polarizada. A inexistência de fases sãs torna essa característica vulnerável no caso de acontecer uma falta trifásica, porque não há tensão de polarização nessa situação. Outra vulnerabilidade da mho polarizada cruzada é o fato de poder atuar para faltas reversas em situações de elevada carga (Schweitzer III; ROBERTS, 1993).

O uso de tensões memorizadas de pré-falta torna possível a atuação da característica mho para faltas trifásicas. A fim de obter memória de pré-falta, utilizam-se porções de valor instantâneo de medição em conjunto com valores alocados na memória, conforme segue:

$$\hat{V}_{pol_suplementado} = (1 - kp)\hat{V}_{pol_instantaneo} + kp(\hat{V}_{pol_quadmemoia}(i - kN)), \quad (4.6)$$

em que $\hat{V}_{pol_suplementado}$ é a tensão de polarização suplementada pelo valor instantâneo da tensão $\hat{V}_{pol_instantaneo}$ com a tensão de memória em quadratura $\hat{V}_{op_quadmemoia}$, sendo o fator kp o nível de suplementação de memória desejado.

A tensão de polarização de sequência positiva faz uso das componentes simétricas para formar as tensões de polarização. Para faltas na fase A, usa-se a tensão de sequência positiva A_1 , para faltas na fase B, a tensão B_1 , e assim por diante. Segundo Schweitzer III e Roberts (1993), essa é a melhor polarização, pois apresenta a maior expansão, permitindo

uma cobertura resistiva maior, memória para todos os tipos de falta e uma tensão de polarização comum a todas as unidades do relé, tornando-se interessante para o caso em que é necessária a abertura monopolar.

Na patente [Schweitzer III \(1992\)](#) foi proposto um filtro de memória de constante de tempo de quatro ciclos, que fornece polarização de memória pelos vinte ciclos seguintes. A tensão de polarização de sequência positiva de memória ($\hat{V}a1_{mem}$) usa a porção 1/16 instantânea da tensão de sequência positiva $\hat{V}a1$ com a porção $\frac{15}{16}\hat{V}a1_{mem}$ $\left(\frac{N}{2}\right)$ da tensão de sequência positiva de memória $N/2$ amostras atrás, conforme segue:

$$\hat{V}a1_{mem} = \frac{1}{16}\hat{V}a1(0) - \frac{15}{16}\hat{V}a1_{mem} \left(\frac{N}{2}\right), \quad (4.7)$$

Na Tabela 9 estão sumarizadas as polarizações: auto-polarizada (\hat{V}_{p1}), cruzada (\hat{V}_{p2}), cruzada com memória (\hat{V}_{p3}) e sequência positiva com memória (\hat{V}_{p4} , para cada tipo de falta e respectivas unidades do relé, considerando-se o fator $kp = 1$ ([ZIEGLER, 2011](#)) para a polarização cruzada com memória.

Tabela 9 – Tensão de polarização para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	Unidade Relé	\hat{V}_{p1}	\hat{V}_{p2}	\hat{V}_{p3}	\hat{V}_{p4}
A-T	FT_A	\hat{V}_{at}	$j\hat{V}_{bc}$	$j\hat{V}_{bcm}$	\hat{V}_{a1m}
B-T	FT_B	\hat{V}_{bt}	$j\hat{V}_{ca}$	$j\hat{V}_{cam}$	\hat{V}_{b1m}
C-T	FT_C	\hat{V}_{ct}	$j\hat{V}_{ab}$	$j\hat{V}_{abm}$	\hat{V}_{c1m}
A-B	FF_{AB}	\hat{V}_{ab}	$-j\hat{V}_a$	$-j\hat{V}_{am}$	$-j\hat{V}_{c1m}$
B-C	FF_{BC}	\hat{V}_{bc}	$-j\hat{V}_b$	$-j\hat{V}_{bm}$	$-j\hat{V}_{a1m}$
A-C	FF_{CA}	\hat{V}_{ca}	$-j\hat{V}_c$	$-j\hat{V}_{cm}$	$-j\hat{V}_{b1m}$
A-B-T	FT_A	\hat{V}_{at}	$j\hat{V}_{bc}$	$j\hat{V}_{bcm}$	\hat{V}_{a1m}
	FT_B	\hat{V}_{bt}	$j\hat{V}_{ca}$	$j\hat{V}_{cam}$	\hat{V}_{b1m}
	FF_{AB}	\hat{V}_{ab}	$-j\hat{V}_a$	$-j\hat{V}_{am}$	$-j\hat{V}_{c1m}$
A-C-T	FT_A	\hat{V}_{at}	$j\hat{V}_{bc}$	$j\hat{V}_{bcm}$	\hat{V}_{a1m}
	FT_C	\hat{V}_{ct}	$j\hat{V}_{ab}$	$j\hat{V}_{abm}$	\hat{V}_{c1m}
	FF_{CA}	\hat{V}_{ca}	$-j\hat{V}_c$	$-j\hat{V}_{cm}$	$-j\hat{V}_{b1m}$
B-C-T	FT_B	\hat{V}_{bt}	$j\hat{V}_{ca}$	$j\hat{V}_{cam}$	\hat{V}_{b1m}
	FT_C	\hat{V}_{ct}	$j\hat{V}_{ab}$	$j\hat{V}_{abm}$	\hat{V}_{c1m}
	FF_{BC}	\hat{V}_{bc}	$-j\hat{V}_b$	$-j\hat{V}_{bm}$	$-j\hat{V}_{a1m}$
A-B-C	FF_{AB}	\hat{V}_{ab}	$-j\hat{V}_a$	$-j\hat{V}_{am}$	$-j\hat{V}_{c1m}$
	FF_{CA}	\hat{V}_{ca}	$-j\hat{V}_c$	$-j\hat{V}_{cm}$	$-j\hat{V}_{b1m}$
	FF_{BC}	\hat{V}_{bc}	$-j\hat{V}_b$	$-j\hat{V}_{bm}$	$-j\hat{V}_{a1m}$

4.5.1 Comparação de Tensão de Polarização via Caso Prático

Nesta subseção, serão apresentados resultados numéricos baseados nas fórmulas registradas na seção 4.5.

Como exemplo prático, considerou-se a linha utilizada em Campos (2012) e a ocorrência de uma falta AB a 140 km da localização do relé com resistência de falta igual a 1Ω . A primeira zona de proteção é definida para proteger 80% da linha ($r=0,8$) e é considerado um ângulo da impedância de referência igual ao da linha protegida:

$$Z_{ref} = 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ}. \quad (4.8)$$

As tensões e as correntes medidas pelo relé no momento de falta estão sumarizadas nas Tabelas 10 e 11 e os valores de memória sumarizados nas Tabelas 12 e 13.

Tensão de falta	Corrente de falta
$Va_{falta} = 115,96e^{-j11^\circ} \text{ kV}$	$Ia_{falta} = 1362e^{-j53^\circ} \text{ A}$
$Vb_{falta} = 115,05e^{-j119^\circ} \text{ kV}$	$Ib_{falta} = 1183e^{j128^\circ} \text{ A}$
$Vc_{falta} = 135,53e^{j116^\circ} \text{ kV}$	$Ic_{falta} = 179e^{j120^\circ} \text{ A}$

Tabela 10 – Tensões e correntes de fase.

Tensão entre fases de falta	Corrente entre fases de falta
$Vab_{falta} = 186e^{j24,8^\circ} \text{ kV}$	$Iab_{falta} = 2545e^{-j52^\circ} \text{ A}$
$Vbc_{falta} = 222e^{-j89^\circ} \text{ kV}$	$Ibc_{falta} = 1006e^{j129^\circ} \text{ A}$
$Vca_{falta} = 225e^{j140^\circ} \text{ kV}$	$Ica_{falta} = 1540e^{j126^\circ} \text{ A}$

Tabela 11 – Tensão e corrente entre fases.

Tensão de memória	Corrente de memória
$Va_{mem} = 135e^{j3^\circ} \text{ kV}$	$Ia_{mem} = 179e^{j8^\circ} \text{ A}$
$Vb_{mem} = 135e^{-j117^\circ} \text{ kV}$	$Ib_{mem} = 179e^{-j112^\circ} \text{ A}$
$Vc_{mem} = 135e^{j123^\circ} \text{ kV}$	$Ic_{mem} = 179e^{j128^\circ} \text{ A}$

Tabela 12 – Tensão e corrente de fase de memória.

Tensão entre fases de memória	Corrente entre fases de memória
$Vab_{mem} = 234e^{j33^\circ} \text{ kV}$	$Iab_{mem} = 310e^{j38^\circ} \text{ A}$
$Vbc_{mem} = 234e^{-j87^\circ} \text{ kV}$	$Ibc_{mem} = 310e^{-j82^\circ} \text{ A}$
$Vca_{mem} = 234e^{j153^\circ} \text{ kV}$	$Ica_{mem} = 310e^{j158^\circ} \text{ A}$

Tabela 13 – Tensão e corrente de memória entre fases.

Para calcular as tensões de operação do relé, faz-se necessário o cálculo dos valores de I_N e de K_e :

$$\begin{aligned} I_N &= I_{a_{falta}} + I_{b_{falta}} + I_{c_{falta}} = 1362e^{-j53^\circ} + 1183e^{j128^\circ} + 179e^{j120^\circ}; \\ I_N &= 1,9128e^{-j15^\circ} \text{ A}; \\ K_e &= \frac{Z_0 + Z_1}{3Z_1} = 0,6624e^{j13^\circ}. \end{aligned}$$

As tensões de operação vistas pelo relé em cada *loop* serão, portanto:

$$\begin{aligned} V_{op_{at}} &= (1362e^{-j53^\circ} + 1,9128e^{-j15^\circ} \times 0,6624e^{j13^\circ}) \times 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ} - 115,98 \exp^{-j11^\circ}, \\ V_{op_{at}} &= 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \text{ V}, \\ V_{op_{bt}} &= (1183e^{j128^\circ} + 1,9128e^{-j15^\circ} \times 0,6624e^{j13^\circ}) \times 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ} - 115e^{-j119^\circ}, \\ V_{op_{bt}} &= 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \text{ V}, \\ V_{op_{ct}} &= (179e^{j120^\circ} + 1,9128e^{-j15^\circ} \times 0,6624e^{j13^\circ}) \times 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ} - 135,5e^{j116^\circ}, \\ V_{op_{ct}} &= 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \text{ V}, \\ V_{op_{ab}} &= 2545e^{-j52^\circ} \times 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ} - 186e^{j24,8^\circ}, \\ V_{op_{ab}} &= 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \text{ V}, \\ V_{op_{bc}} &= 1006e^{j129^\circ} \times 0,8 * 74,7836e^{j79^\circ} - 222e^{-j89^\circ}, \\ V_{op_{bc}} &= 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \text{ V}, \\ V_{op_{ca}} &= 1540e^{j126^\circ} \times 0,8 * 74,7836e^{j79^\circ} - 225e^{j140^\circ}, \\ V_{op_{ca}} &= 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \text{ V}. \end{aligned}$$

Tendo os valores referentes às tensões de operação, o valor de torque é calculado para os quatro tipos de polarização, conforme segue:

Torque de tensão auto-polarizada:

$$\begin{aligned} T_{at} &= V_{op_{at}} V_{a^*} = 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \times 115,96e^{j11^\circ} = 8,05 \times 10^3 e^{j119^\circ}, \\ T_{bt} &= V_{op_{bt}} V_{b^*} = 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \times 115,05e^{j119^\circ} = 7,36 \times 10^3 e^{j229^\circ}, \\ T_{ct} &= V_{op_{ct}} V_{c^*} = 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \times 135,53e^{-j116^\circ} = 1,80 \times 10^4 e^{j-185^\circ}, \\ T_{ab} &= V_{op_{ab}} V_{ab^*} = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 186e^{j-24,8^\circ} = 1,25 \times 10^3 e^{j59,8^\circ}, \\ T_{bc} &= V_{op_{bc}} V_{bc^*} = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 222e^{j89^\circ} = 4,4 \times 10^4 e^{j199^\circ}, \\ T_{ca} &= V_{op_{ca}} V_{ca^*} = 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \times 225e^{j-140^\circ} = 4,6 \times 10^4 e^{j210^\circ}. \end{aligned}$$

Torque de tensão polarizada cruzada sem memória:

$$\begin{aligned}
T_{at} &= V_{op_{at}} j V b c^* = 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \times 222 e^{j1^\circ} = 1,5 \times 10^4 e^{j109^\circ}, \\
T_{bt} &= V_{op_{bt}} j V c a^* = 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \times 225 e^{j-230^\circ} = 1,4 \times 10^4 e^{j-130^\circ}, \\
T_{ct} &= V_{op_{ct}} j V a b^* = 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \times 186 e^{j-114^\circ} = 2,4 \times 10^4 e^{j-183,7^\circ}, \\
T_{ab} &= V_{op_{ab}} (-j V c^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 135 e^{j-26^\circ} = 0,9 \times 10^3 e^{j58,6^\circ}, \\
T_{bc} &= V_{op_{bc}} (-j V a^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 115,96 e^{j101^\circ} = 2,2 \times 10^4 e^{j215,96^\circ}, \\
T_{ca} &= V_{op_{ca}} (-j V b^*) = 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \times 115,7 e^{j209^\circ} = 2,3 \times 10^4 e^{j139^\circ}.
\end{aligned}$$

Torque de tensão polarizada com memória:

$$\begin{aligned}
T_{at} &= V_{op_{at}} j V b c_{mem}^* = 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \times 234 e^{j-3^\circ} = 1,7 \times 10^4 e^{j105^\circ}, \\
T_{bt} &= V_{op_{bt}} j V c a_{mem}^* = 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \times 234 e^{-j243^\circ} = 1,4 \times 10^4 e^{j-143^\circ}, \\
T_{ct} &= V_{op_{ct}} j V a b_{mem}^* = 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \times 234 e^{j-123^\circ} = 3,1 \times 10^4 e^{j-192,7^\circ}, \\
T_{ab} &= V_{op_{ab}} (-j V c_{mem}^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 135 e^{j-33^\circ} = 0,9 \times 10^1 e^{j51,6^\circ}, \\
T_{bc} &= V_{op_{bc}} (-j V a_{mem}^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 135 e^{-j273^\circ} = 2,6 \times 10^4 e^{j-163^\circ}, \\
T_{ca} &= V_{op_{ca}} (-j V b_{mem}^*) = 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \times 135 e^{-j153^\circ} = 2,7 \times 10^4 e^{-j223^\circ}.
\end{aligned}$$

Torque de tensão de sequência de memória positiva:

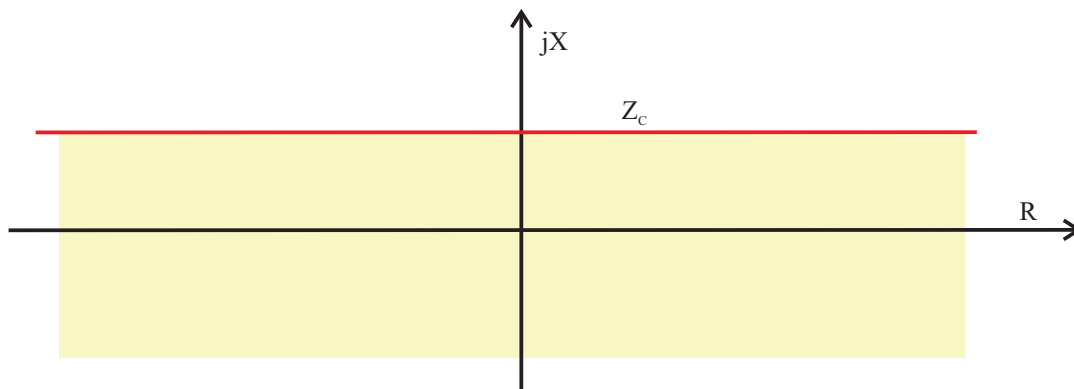
$$\begin{aligned}
\alpha &= 1 e^{j120^\circ}, \\
V a_{mem1} &= \frac{1}{3} (V a_{mem} + V b_{mem} \alpha + V c_{mem} \alpha^2 = 135 e^{j3^\circ}) kV, \\
T_{at} &= V_{op_{at}} V a_{mem1}^* = 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \times 135 e^{-j3^\circ} = 9,45 \times 10^3 e^{j105^\circ}, \\
T_{bt} &= V_{op_{bt}} (\alpha^2 V a_{mem1}^*) = 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \times 135 e^{-j243^\circ} = 8,6 \times 10^3 e^{-j133^\circ}, \\
T_{ct} &= V_{op_{ct}} (\alpha V a_{mem1}^*) = 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \times 135 e^{-j123^\circ} = 1,8 \times 10^4 e^{-j192,7^\circ}, \\
T_{ab} &= V_{op_{ab}} (-j \alpha V a_{mem1}^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 135 e^{j-33^\circ} = 0,9 \times 10^3 e^{j51,6^\circ}, \\
T_{bc} &= V_{op_{bc}} (-j V a_{mem1}^*) = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 135 e^{j93^\circ} = 2,6 \times 10^4 e^{j203^\circ}, \\
T_{ca} &= V_{op_{ca}} (-j \alpha^2 V a_{mem1}^*) = 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \times 135 e^{-j150^\circ} = 2,7 \times 10^4 e^{-j230^\circ}.
\end{aligned}$$

O relé atuará quando o ângulo entre o torque de operação e restrição apresentar um valor entre -90 e 90 de acordo com a fundamentação apresentada na seção 4.2.

4.6 Característica Reatância

A característica reatância é utilizada nos relés baseados na quadrilateral e mho para assegurar que os relés não sobrealcancem o valor de impedância definido. A característica reatância é representada por uma linha reta paralela ao eixo da resistência no diagrama R-X, como representado na Figura 12, que também exibe o ajuste dessa característica (\hat{Z}_c). Toda a impedância medida abaixo da reatância X fará o relé disparar.

Figura 12 – Região de atuação da característica reatância.



Fonte: o autor.

As equações que mostram a operação feita pelo relé para o cálculo da característica reatância são as seguintes:

$$\begin{aligned}\hat{S}_{op} &= \hat{Z}_c \hat{I}_R - \hat{V}_R, \\ S_{pol} &= \hat{Z}_c \hat{I}_{pol}.\end{aligned}$$

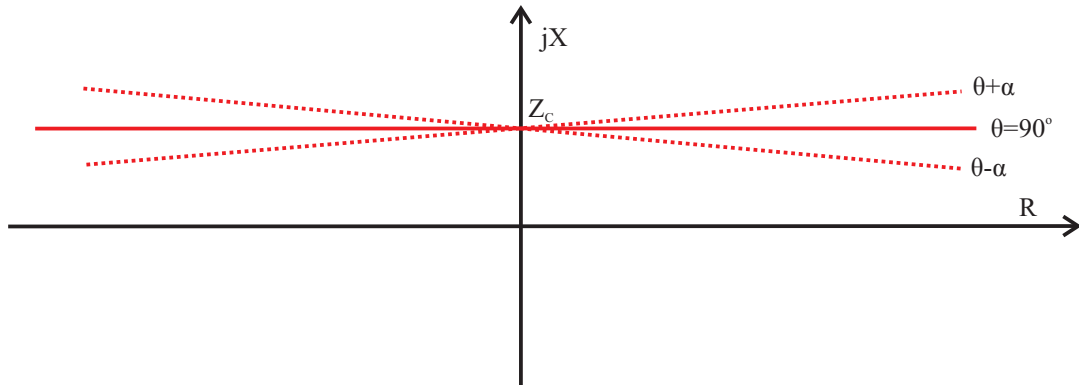
O alcance do relé será influenciado pela parte imaginária de \hat{Z}_c e pelo ângulo de \hat{Z}_c ajustado por θ . Na Figura 13 é demonstrada a influência do ângulo θ na resposta da característica reatância.

Para polarizar a característica reatância utiliza-se, no caso das unidades de terra do relé, a corrente de sequência negativa (\hat{I}_2) ou zero (\hat{I}_0), devido à corrente de carga levar à sobre- ou sub-estimação. Esse comportamento de sobre- e sub-estimação é dependente da direção do fluxo de carga, como demonstrado em [Andrichak e Alexander \(2007\)](#). Para as unidades de fase, a corrente de polarização é a corrente medida na fase. Para a unidade AB, por exemplo, é usada a corrente \hat{I}_{AB} .

O relé reatância irá disparar quando a equação 4.9 for satisfeita:

$$\text{angulo}(\hat{S}_{op} \hat{S}_{pol}^*) \leq |90| . \quad (4.9)$$

Figura 13 – Característica reatância: influência do ângulo.



Fonte: o autor.

4.6.1 Demonstração de Cálculo

Nesta subseção, os cálculos necessários para obter a resposta da característica de reatância é demonstrada. Para essa demonstração, foram utilizados os valores da falta registrados na seção 4.5.1.

Após o ajuste da impedância:

$$Z_c = 0,8 \times 74,7836e^{j79^\circ}, \quad (4.10)$$

calcula-se a corrente de sequência zero usada nas unidades de terra do relé:

$$I_0 = (I_a + I_b + I_c)/3,$$

$$I_0 = (1362e^{-j53^\circ} + 1183e^{j128^\circ} + 179e^{j120^\circ})/3$$

e procede-se ao cálculo dos torques de polarização:

$$V_{pol_{at}} = Z_c I_0 = 38,14e^{j63^\circ},$$

$$V_{pol_{bt}} = Z_c I_0 = 38,14e^{j63^\circ},$$

$$V_{pol_{ct}} = Z_c I_0 = 38,14e^{j63^\circ},$$

$$V_{pol_{ab}} = Z_c I_{ab} = 1,5 \times 10^5 e^{j26^\circ},$$

$$V_{pol_{bc}} = Z_c I_{bc} = 6 \times 10^4 e^{-j151^\circ},$$

$$V_{pol_{ca}} = Z_c I_{ca} = 9 \times 10^4 e^{-j154^\circ}.$$

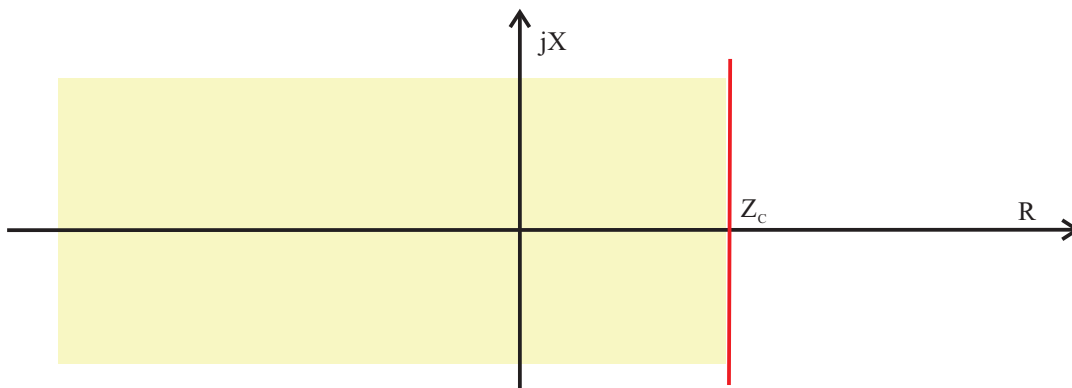
Os valores dos torques de operação da característica reatância para cada unidade do relé são idênticos aos valores dos torques de operação calculados na seção 4.5.1 para a característica mho com polarização do tipo auto-polarizada.

$$\begin{aligned} T_{at} &= V_{op_{at}} V_{pol_{at}}^* = 7 \times 10^4 e^{j125^\circ} \times 38,14 e^{j63^\circ} = 8,05 \times 10^3 e^{j119^\circ}, \\ T_{bt} &= V_{op_{bt}} V_{pol_{bt}}^* = 6,8 \times 10^4 e^{j96^\circ} \times 38,14 e^{j63^\circ} = 7,36 \times 10^3 e^{j229^\circ}, \\ T_{ct} &= V_{op_{ct}} V_{pol_{ct}}^* = 1,34 \times 10^5 e^{-j68^\circ} \times 38,14 e^{j63^\circ} = 1,80 \times 10^4 e^{j-185^\circ}, \\ T_{ab} &= V_{op_{ab}} V_{pol_{ab}}^* = 3,5 \times 10^4 e^{-j162^\circ} \times 0,5 \times 10^5 e^{j26^\circ} = 1,25 \times 10^3 e^{j59,8^\circ}, \\ T_{bc} &= V_{op_{bc}} V_{pol_{bc}}^* = 2 \times 10^5 e^{j106^\circ} \times 6 \times 10^4 e^{-j151^\circ} = 4,4 \times 10^4 e^{j199^\circ}, \\ T_{ca} &= V_{op_{ca}} V_{pol_{ca}}^* = 2 \times 10^5 e^{j-63^\circ} \times 9 \times 10^4 e^{-j154^\circ} = 4,6 \times 10^4 e^{j210^\circ}. \end{aligned}$$

4.7 Característica Lateral

A característica resistência lateral é utilizada na característica quadrilateral, sendo uma linha reta paralela ao eixo das reatâncias no diagrama R-X. Toda a impedância medida do lado esquerdo fará atuar o relé no caso do ajuste ter o ângulo entre $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Se o ângulo do ajuste tiver definido entre $90^\circ < \theta < 180^\circ$, a impedância medida do lado direito fará o relé disparar. Ressalta-se que, para valores de θ próximos a 90 graus, o relé passa a ser de reatância. Um exemplo da região de atuação do relé de resistência lateral é apresentado na Figura 14

Figura 14 – Região de atuação resistência lateral.



Fonte: o autor.

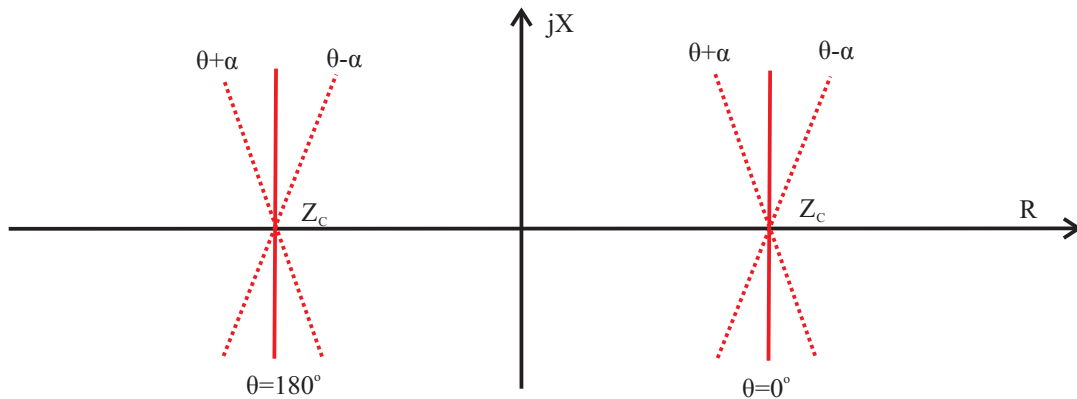
As equações que mostram a operação feita pelo relé para o cálculo da característica resistência lateral são as seguintes:

$$S_{op} = Z_c \times I_R - V_R, \quad (4.11)$$

$$S_{pol} = Z_c \times I_{pol}. \quad (4.12)$$

Verifica-se que as equações (4.12) e (4.11) são similares às equações da característica reatância, sendo diferente apenas o ângulo θ do fasor de impedância do ajuste Z_c . Para valores de θ de ajuste próximos de 0 e 180 graus, têm-se a característica resistência lateral descrita na Figura 15, em que é também possível visualizar a influência que o ângulo θ representa nessa característica.

Figura 15 – Característica resistência lateral.



Fonte: o autor.

A diferença da característica reatância para a resistência lateral reside na corrente de polarização. Sendo I_{pol} , neste caso, a corrente medida pelo relé compensada pelo fator de compensação zero ($I_{a_{pol}} = I_a + K_0 \times I_n$) para as unidades de terra. Para as unidades fase-fase a corrente de polarização é igual à utilizada na característica de reatância.

4.7.1 Demonstração de Cálculo

Para a demonstração de operação da característica resistência lateral, considerou-se o ajuste usado para a resistência lateral de $Z_c = 100e^{j0^\circ}$. Com esse ajuste, se considerado o diagrama R-X, será obtida uma linha paralela ao eixo das reatâncias cruzando na coordenada (100,0) no eixo das resistências do plano R-X.

Se porventura fosse utilizado um ângulo de 180°, a linha seria paralela ao eixo das reatâncias, mas cruzaria na coordenada (-100,0) no eixo das resistências no plano R-X, como está ilustrado na Figura 15.

Lembrando que o torque de operação característica se calcula $V_{op_{at}} = (I_a + I_n \times K_0) \times Z_c - Va$, sendo análogo para as outras unidades de terra. Para unidades fase-fase $V_{op_{ab}} = I_{ab} \times Z_c - Vab$, sendo análogo para as outras unidades de fase. Usando os dados de falta apresentados na subseção 4.3.1 e o ajuste definido nesta demonstração, procede-se

ao cálculo dos torques de operação:

$$\begin{aligned}
 V_{op_{at}} &= (222e^{-j154^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} - 5,16 \times 10^4 e^{-j146^\circ}, \\
 V_{op_{at}} &= 2,8 \times 10^4 e^{j125^\circ} V, \\
 V_{op_{bt}} &= (264e^{-j152^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} - 2,34 \times 10^5 e^{j107^\circ}, \\
 V_{op_{bt}} &= 2,3 \times 10^4 e^{-j88^\circ} V, \\
 V_{op_{ct}} &= (274e^{j111^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} - 2,36 \times 10^5 e^{j19,7^\circ}, \\
 V_{op_{ct}} &= 2,76 \times 10^5 e^{-j170^\circ} V, \\
 V_{op_{ab}} &= 42,8e^{j38^\circ} \times 100e^{j0^\circ} - 2,5 \times 10^5 e^{-j84^\circ}, \\
 V_{op_{ab}} &= 2,56 \times 10^5 e^{j95^\circ} V, \\
 V_{op_{bc}} &= 403e^{-j109,5^\circ} \times 100e^{j0^\circ} - 3,2 \times 10^5 e^{j153^\circ}, \\
 V_{op_{bc}} &= 3,32 \times 10^4 e^{-j33^\circ} V, \\
 V_{op_{ca}} &= 367e^{j73,9^\circ} \times 100e^{j0^\circ} - 2,86 \times 10^5 e^{j22^\circ}, \\
 V_{op_{ca}} &= 2,65 \times 10^5 e^{-j163^\circ} V.
 \end{aligned}$$

Com o cálculo dos torques de operação, procede-se ao cálculo dos torques de polarização. Lembrando que $V_{pol_{at}} = (I_a + I_n \times K_0) \times Z_c$, analogamente para as outras unidades de terra. Para unidades fase-fase $V_{pol_{ab}} = I_{ab} \times Z_c$, analogamente para as outras unidades de fase. Os torques de polarização calcula-se da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 V_{pol_{at}} &= (222e^{-j154^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{at}} &= 5,9 \times 10^4 e^{-j174^\circ} V, \\
 V_{pol_{bt}} &= (264e^{-j152^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{bt}} &= 6,3 \times 10^4 e^{-j172^\circ} V, \\
 V_{pol_{ct}} &= (274e^{j111^\circ} + 532e^{j176^\circ} \times 0,73e^{-j1,88^\circ}) \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{ct}} &= 5,7 \times 10^4 e^{j148^\circ} V, \\
 V_{pol_{ab}} &= 42,8e^{j38^\circ} \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{ab}} &= 4,23 \times 10^3 e^{j38^\circ} V, \\
 V_{pol_{bc}} &= 403e^{-j109,5^\circ} \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{bc}} &= 4,02 \times 10^4 e^{-j109^\circ} V, \\
 V_{pol_{ca}} &= 367e^{j73,9^\circ} \times 100e^{j0^\circ} \\
 V_{pol_{ca}} &= 3,67 \times 10^4 e^{j74^\circ} V.
 \end{aligned}$$

O relé disparará quando $|angulo(V_{op}.V_{pol}^*)| < 90^\circ$. Para cada unidade do relé,

os ângulos serão:

$$\begin{aligned} \text{angulo}(T_{AT}) &= |125 - (-174)| = 61^\circ, \\ \text{angulo}(T_{BT}) &= |-88 - (-172)| = 84^\circ, \\ \text{angulo}(T_{CT}) &= |-170 - 148| = 32^\circ, \\ \text{angulo}(T_{AB}) &= |95 - 38| = 57^\circ, \\ \text{angulo}(T_{BC}) &= |-33 - (-109)| = 76^\circ, \\ \text{angulo}(T_{CA}) &= |-163 - 74| = 123^\circ, \end{aligned}$$

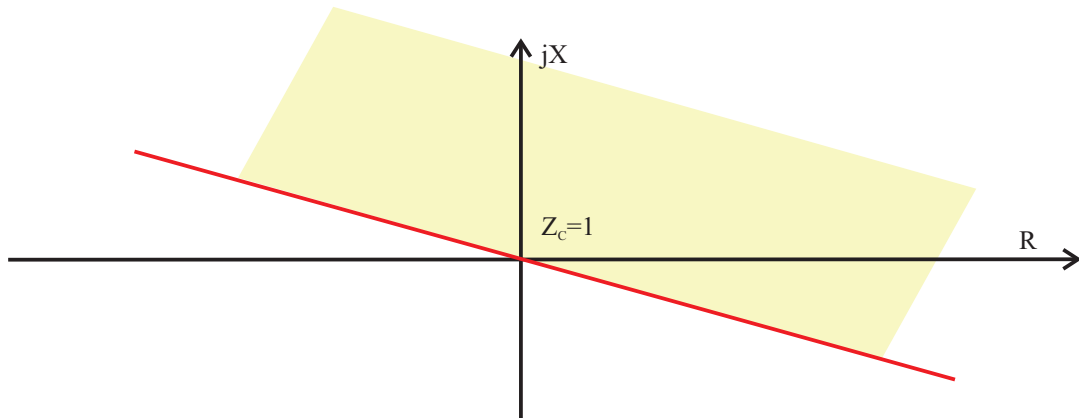
sendo o critério de disparo do relé atendido para todas as unidades, menos a unidade $\text{angulo}(T_{CA})$.

4.8 Característica Direcional

A característica direcional é também utilizada nas características quadrilateral e mho, sendo representada por uma linha reta paralela ao eixo da resistência que passa pela origem no diagrama R-X. Toda impedância medida pelo relé acima da reta delimitada pela característica direcional fará disparar o relé.

A característica direcional assegura que o relé só dispare para faltas diretas, impedindo-o de atuar para faltas reversas. A região de atuação da característica direcional está representada na Figura 16 colorida de amarelo.

Figura 16 – Região de atuação direcional.



Fonte: o autor.

As equações de torque que formam a característica direcional são as seguintes (KASZTENNY; FINNEY, 2008):

$$\hat{S}_{op} = \hat{Z}_d \hat{I}_R, \quad (4.13)$$

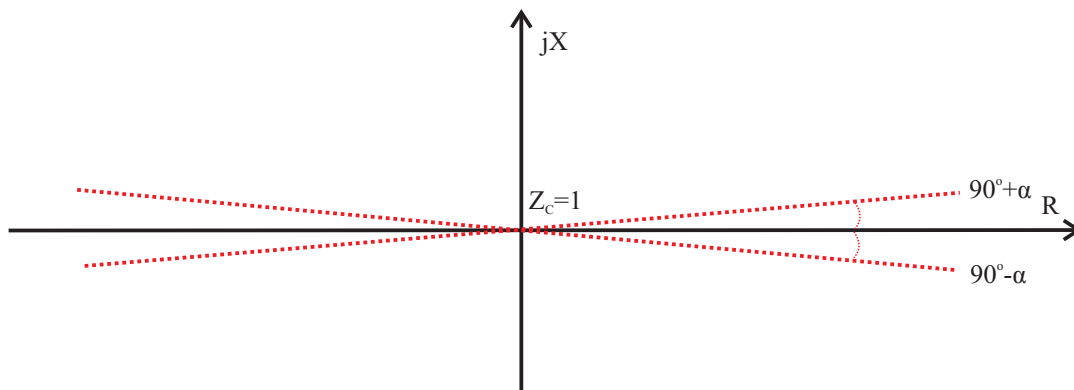
$$\hat{S}_{pol} = \hat{V}_{pol}, \quad (4.14)$$

sendo \hat{Z}_d o fasor de ajuste, em que a magnitude é unitária e com desfasamento θ ($\hat{Z}_d = 1e^{j\theta}$). A corrente \hat{I}_R pode ser a corrente de sequência zero ou negativa, no caso das unidades de terra do relé, ou correntes fase-fase nas unidades fase-fase do relé. Para a tensão \hat{V}_{pol} , vários tipos de polarização podem ser usados, dentre eles:

1. auto-polarizada ($AT : \hat{V}_a \dots AB : \hat{V}_{ab\dots}$);
2. polarizada cruzada ($AT : \hat{V}_{bc} \dots AB : \hat{V}_c$);
3. tensão de memória de sequência positiva ($AT : \hat{V}_{a1m} \dots AB : \hat{V}_{ab1m}$);

Na Figura 17, o efeito que o ângulo α produz na característica direcional é ilustrado.

Figura 17 – Influência de α na característica direcional.



Fonte: o autor.

4.8.1 Demonstração de Cálculo

Nesta subseção, são demonstrados os cálculos necessários para identificar se a característica direcional irá atuar, tendo como base os dados de falta utilizados na subseção 4.3.1. A polarização utilizada nesta demonstração é a auto-polarizada. Para o cálculo das tensões de operação, no caso das unidades de terra, foi usada a corrente de sequência negativa.

O ajuste de relé direcional foi definido como:

$$Z_{dir} = e^{j82,8^\circ}, \quad (4.15)$$

sendo o ângulo do ajuste igual ao ângulo da linha L_1 .

Primeiramente, as correntes de sequência negativa foram calculadas para as três fases, sendo $\alpha = e^{j120^\circ}$:

$$\begin{aligned} I2_a &= (I_a + I_b \times \alpha^2 + I_c \times \alpha)/3, \\ I2_a &= (222e^{-j154^\circ} + 264e^{-j152^\circ} \times e^{-j120^\circ} + 274e^{j111^\circ} e^{j120^\circ})/3, \\ I2_a &= 121,9e^{-j172^\circ}, \\ I2_b &= I2_a \alpha = 121,9e^{-j52^\circ}, \\ I2_c &= I2_a \alpha^2 = 121,9e^{j67^\circ}, \end{aligned}$$

de seguida procede-se ao cálculo dos torques de operação, lembrando que as tensões de operação se calculam $Vop_{UT} = I2_{UT}Z_{dir}$ para $UT \in \{AT, BT, CT\}$ para as unidades de terra e para as unidades fase-fase $Vop_{UF} = I_{UF}Z_{dir}$ com $UF \in \{AB, BC, CA\}$:

$$\begin{aligned} Vop_{at} &= 121,9e^{-j172^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 121,9e^{-j89^\circ} \text{ V}, \\ Vop_{bt} &= 121,9e^{-j52^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 121,9e^{j30^\circ} \text{ V}, \\ Vop_{ct} &= 121,9e^{j67^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 121,9e^{j150^\circ} \text{ V}, \\ Vop_{ab} &= 42,8e^{j38^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 42,8e^{j121^\circ} \text{ V}, \\ Vop_{bc} &= 403e^{-j109,5^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 403e^{-j26,7^\circ} \text{ V}, \\ Vop_{ca} &= 367e^{j73,9^\circ} \times e^{j82,8^\circ} = 367e^{j156,8^\circ} \text{ V}. \end{aligned}$$

Para as tensões de polarização, como é usada a tensão auto-polarizada, $Vpol_{UT} = Vafalta$ para as unidades terra e $Vpol_{UF} = Vabfalta$ para as unidades fase-fase.

As tensões de polarização são, portanto:

$$\begin{aligned} Vpol_{at} &= 5,16 \times 10^4 e^{-j146^\circ}, \\ Vpol_{bt} &= 2,34 \times 10^5 e^{j107^\circ}, \\ Vpol_{ct} &= 2,36 \times 10^5 e^{j10,7^\circ}, \\ Vpol_{ab} &= 2,5 \times 10^5 e^{-j84^\circ}, \\ Vpol_{bc} &= 3,2 \times 10^5 e^{j153^\circ}, \\ Vpol_{ca} &= 2,86 \times 10^5 e^{j22^\circ}. \end{aligned}$$

O relé disparará quando $|angulo(Vop.Vpol^*)| < 90^\circ$. Calculando os ângulos para

cada unidade do relé, tem-se:

$$\text{angulo}(T_{AT}) = |-89 - (-146)| = 56^\circ,$$

$$\text{angulo}(T_{BT}) = |30 - (107)| = 76,8^\circ,$$

$$\text{angulo}(T_{CT}) = |150 - 10,7| = 130^\circ,$$

$$\text{angulo}(T_{AB}) = |121 - (-84)| = 154^\circ,$$

$$\text{angulo}(T_{BC}) = |-26,7 - 153| = 179^\circ,$$

$$\text{angulo}(T_{CA}) = |156,8 - 22| = 134^\circ.$$

sendo as condições de disparo atendidas pelas unidades AT ($\text{angulo}(T_{AT})$) e BT ($\text{angulo}(T_{BT})$).

4.9 Resumo do Capítulo

Os componentes do relé digital e as características de distância mais utilizadas em relés de distância (mho, reatância, lateral e direcional) são discutidos neste capítulo, no qual ressaltam-se também as equação de torque de cada característica e suas polarizações típicas. Os principais problemas presentes na proteção de distância foram expostos nesta seção, os quais serão posteriormente avaliados pela metodologia proposta nesta tese.

5 Metodologia Proposta

Apresenta-se neste capítulo uma descrição detalhada da técnica proposta nesta tese, a qual permite uma análise quantitativa dos algoritmos de estimação fasorial e de lógicas de proteção em relés de distância por meio de índices que representam o desempenho desses relés, sendo uma técnica sistemática para aprimorar a resposta dos relés no regime transitório.

5.1 Índices Propostos

A proteção de distância é a mais utilizada na proteção de linhas de transmissão (ZIEGLER, 2011). Devido a essa importância, os ajustes escolhidos para os relés de distância são cuidadosamente analisados pelos engenheiros de proteção e numerosos estudos na área de proteção precisam ser realizados para confirmar a qualidade desses ajustes. Na escolha dos referidos ajustes, situações em que a proteção de distância pode atuar erroneamente são devidamente testadas, tais como: sobre-alcance da proteção de distância no limite do ajuste, disparos incorretos de unidades do relé que não eram para atuar e erros na direcionalidade devido às faltas próximas do relé. Essas situações são incluídas nos índices propostos nesta tese.

A técnica proposta é baseada em índices que têm como objetivo fornecer uma avaliação quantitativa do desempenho do relé de distância associado à qualidade dos algoritmos de estimação fasorial e de lógicas de proteção para a proteção de distância. Com esses índices, uma percepção rápida da qualidade dos ajustes é obtida, possibilitando estratégias que resultem no aprimoramento da configuração do relé.

As seguintes premissas foram utilizadas como base para o desenvolvimento dos índices propostos:

1. Na ocorrência de uma falta, atua apenas a unidade do relé responsável por monitorar esse tipo de falta, até à distância definida pelo usuário. Na ocorrência de uma falta AT, por exemplo, apenas a unidade AT do relé deverá atuar até à distância definida pelo usuário, permanecendo as outras unidades sem atuação;
2. Disparos incorretos por unidades do relé não responsáveis por atuar em um determinado tipo de falta dentro da zona de proteção não são muito prejudiciais. Na ocorrência de uma falta AT no alcance definido pelo usuário, por exemplo, a unidade BT poderia disparar ao invés da unidade AT sem grande prejuízo para a operação do sistema;

3. Na ocorrência de uma falta interna à linha protegida mas fora da zona de proteção, o disparo incorreto do relé configura-se como um erro, porém moderado, pois a falta situa-se na linha protegida. A proteção da linha deve ser moderadamente penalizada pela sobrecarga, que pode levar a problemas de coordenação.
4. Disparos incorretos do relé fora da linha protegida devem ser severamente penalizados, pois podem causar graves problemas à estabilidade do sistema elétrico.

A primeira premissa corresponde ao índice de qualidade 1 (Ind_1) e reflete a grande vantagem da proteção de distância em relação a outros tipos de proteção, que é a capacidade do relé de distância de atuar até uma distância predefinida. No entanto, na ocorrência de faltas com impedância elevada, o relé tende a sub-alcançar a impedância estimada, não atuando para esse tipo de falta na zona de proteção definida pelo usuário.

A segunda premissa corresponde ao índice de qualidade 2 (Ind_2) e assume importância em caso de aberturas monopolares da linha de transmissão, as quais são necessárias quando a linha de transmissão é de extrema importância para o sistema de potência. Nesses casos, o desempenho do relé precisa ser penalizado caso ocorra uma falta monofásica à terra, e o relé, ao invés de abrir a fase sob falta, abre indesejadamente outra fase, gerando nessa situação a abertura total da linha quando esta poderia funcionar com as outras duas fases sãs. Além do mais, a segunda premissa permite aferir a qualidade dos classificadores de falta, pois quando a premissa é penalizada significa que o classificador não detetou a falta apropriadamente.

O Índice de Qualidade 3 (Ind_3) leva em consideração a terceira premissa, a qual está relacionada aos reconhecidos problemas que o relé de distância apresenta, dentre eles: sobrestimar a impedância devido à lógica de distância, erros inerentes à estimação fasorial, erros nos transformadores de medição e erros de quantização nos conversores analógicos digitais. Esses erros resultaram na regra empírica utilizada pelos engenheiros de proteção que define o alcance da proteção do relé de distância em 80% do valor da impedância da linha protegida (ANDERSON, 1999; MASON, 1956) para evitar possíveis problemas de coordenação com as outras zonas de proteção.

Os disparos incorretos apontados na quarta premissa são um dos mais severos em sistemas de proteção de linhas, visto que graves problemas na coordenação da proteção do sistema elétrico, em virtude do não atendimento a essa premissa, pode levar à abertura de linhas sãs, causando, na mais grave das situações, uma ruptura total do sistema de potência. O Índice de Qualidade 4 (Ind_4) reflete o desempenho do relé para esse tipo de cenário.

O relé de distância é composto normalmente por unidades que pertencem aos grupos fase-fase ou grupo fase-terra, atuando cada uma especificamente para um tipo de falta (GE ENERGY, 2012; ABB POWER T& D COMPANY INC., 1996; SCHWEIT-

ZER ENGINEERING LABORATORIES, 2007; SCHNEIDER ELECTRIC, 2011), como sumarizado na Tabela 14. A avaliação do desempenho do relé de distância realizada nesta tese foi dividida em dois grupos: definindo-se como o grupo G_1 , o das unidades atuantes, e o grupo G_0 , como o das unidades não atuantes.

Tabela 14 – *Status* de atuação das unidades do relé para cada tipo de falta.

Tipo de Falta		Fase-Terra				Fase-Fase			
		Unidades			Grupo	Unidades			Grupo
		AT	BT	CT	FT	AB	BC	CA	FF
Monofásica	AT	1	0	0		0	0	0	
	BT	0	1	0	1	0	0	0	0
	CT	0	0	1		0	0	0	
Fase-Fase	AB	0	0	0		1	0	0	
	BC	0	0	0	0	0	1	0	1
	CA	0	0	0		0	0	1	
Bifásica à Terra	ABT	0	0	0		1	0	0	
	BCT	0	0	0	0	0	1	0	1
	CAT	0	0	0		0	0	1	
Trifásica	ABC	0	0	0	0	1	1	1	1

O grupo de unidades atuante foi definido nesta tese como aquele que tem pelo menos uma unidade que deve atuar em determinado tipo de falta, estando representado na Tabela 14 como o grupo com *status* 1. Para faltas monofásicas, o grupo FT do relé foi considerado como grupo atuante, enquanto que, para os outros tipos de falta, adotou-se como grupo atuante o grupo FF do relé. O grupo FT é formado pelas unidades AT, BT e CT, quanto que o grupo FF é formado pelas unidades AB, BC e CA.

O grupo de unidades atuantes e não atuantes (G_1 e G_0) apresentam variáveis associadas aos quatro índices de qualidade definidos como Ind_{1G1} , Ind_{2G1} , Ind_{3G1} e Ind_{4G1} para o grupo com *status* 1 e Ind_{2G0} , Ind_{3G0} e Ind_{4G0} para o grupo com *status* 0. A variável Ind_i é usada quando a distinção entre Ind_{iG1} e Ind_{iG0} não for necessária.

5.2 Pesos

Os pesos representam matematicamente a influência que os índices propostos têm no bom funcionamento do relé de distância, sendo:

1. P_1 , P_2 , P_3 e P_4 definidos como os pesos associados aos índices Ind_{1G1} , Ind_{2G1} , Ind_{3G1} e Ind_{4G1} , respectivamente, para o grupo de relé com *status* 1;
2. P_5 , P_6 e P_7 como os pesos associados aos índices Ind_{2G0} , Ind_{3G0} e Ind_{4G0} , respectivamente, para o grupo de relé com *status* 0;

3. $P_8 = P_1 + P_2$ foi definido como o peso associado ao índice Ind_{1G1} . As faltas trifásicas não têm o Ind_2 para as unidades fase-fase, pois nesse tipo de falta todas as unidades de fase atuam.

A escolha dos pesos padrão seguiu uma regra normalizada para garantir que o relé avaliado pela técnica proposta obtenha um desempenho máximo de 100%, como segue:

$$\sum_{i=1}^4 P_i = 1, \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=5}^7 P_i = 1, \quad (5.2)$$

$$P_8 + P_3 + P_4 = 1. \quad (5.3)$$

A escolha correta dos pesos reflete na eficiência da técnica proposta, que considera que os pesos devem ser definidos conforme o grau de importância que os índices propostos apresenta para a correta avaliação do desempenho do relé de distância. Sugere-se nesta tese, os pesos padrão apresentados na Tabela 15, que foram definidos tendo como referência a importância dos índices aos quais estão associados.

Tabela 15 – Pesos padrões.

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
40%	5%	10%	45%	10%	20%	70%	45%

Para a definição dos valores atribuídos aos pesos, considerou-se que os disparos incorretos associados ao índice Ind_2 não são muito importantes, resultando no baixo valor atribuído ao peso correspondente a esse índice. Havendo simulações de falta que englobem elevadas resistências, os pesos associados ao Ind_3 são relativamente valorizados. Os pesos associados ao Ind_1 , relacionado aos disparos corretos do relé, têm uma importância de 40%, e os pesos associados aos índices Ind_2 , Ind_3 e Ind_4 , em conjunto, referentes aos disparos incorretos do relé, têm uma importância de 60%. Esses pesos foram escolhidos para garantir uma confiabilidade elevada ao relé e evitar disparos incorretos, atribuindo-se uma importância maior a faltas fora da zona de proteção.

5.3 Algoritmo

Seguindo as premissas consideradas nesta tese e recorrendo aos *status* de cada grupo de relé, como apresentado na Tabela 14, a técnica propõe as seguintes equações para cada tipo de falta:

1. Faltas monofásicas

$$FT_X = Ind_{1G_1}P_1 + Ind_{3G_1}P_3 + Ind_{4G_1}P_4, \quad (5.4)$$

$$FT_Y = Ind_{2G_1}P_2 + Ind_{3G_1}P_3 + Ind_{4G_1}P_4, \quad (5.5)$$

$$FF_{AB} = FF_{BC} = FF_{CA} = Ind_{2G_0}P_5 + Ind_{3G_0}P_6 + Ind_{4G_0}P_7, \quad (5.6)$$

sendo o sub-índice X associado à unidade do relé do grupo 1 que deve atuar para a falta e Y associado às unidades de relé que não devem atuar para a falta do grupo 1. Por exemplo, em uma falta AT tem-se $FT_A = FT_X$ e $FT_B = FT_C = FT_Y$.

2. Faltas bifásicas e bifásicas à terra

$$FT_A = FT_B = FT_C = Ind_{2G_0}P_5 + Ind_{3G_0}P_6 + Ind_{4G_0}P_7, \quad (5.7)$$

$$FF_X = Ind_{1G_1}P_1 + Ind_{3G_1}P_3 + Ind_{4G_1}P_4, \quad (5.8)$$

$$FF_Y = Ind_{2G_1}P_2 + Ind_{3G_1}P_3 + Ind_{4G_1}P_4, \quad (5.9)$$

sendo que em uma falta AB ou ABT, por exemplo, tem-se $FF_{AB} = FF_X$ e $FF_{BC} = FF_{CA} = FF_Y$.

3. Faltas trifásicas

$$FT_A = FT_B = FT_C = Ind_{2G_0}P_5 + Ind_{3G_0}P_6 + Ind_{4G_0}P_7, \quad (5.10)$$

$$FF_{AB} = FF_{BC} = FF_{CA} = Ind_{1G_1}P_8 + Ind_{3G_1}P_3 + Ind_{4G_1}P_4. \quad (5.11)$$

Cada índice representa, matematicamente, uma quantidade de disparos obtidas diretamente pelo relé em cada grupo. Ind_1 depende diretamente da quantidade de disparos certos (DC) que o relé obteve atuando na zona de proteção em um número total de faltas N_{f1G_1} ocorridas nessa zona. Essa razão entre DC e N_{f1G_1} define quanto o relé é eficiente em disparar em todas as faltas dentro da sua zona de proteção. Já os índices Ind_2 , Ind_3 e Ind_4 estão diretamente relacionados à quantidade de disparos incorretos (DI) feitos pelo relé a um número total de faltas N_{fyGz} , sendo $y = \{2, 3, 4\}$ e $z = \{0, 1\}$, na respectiva zona do índice e são calculados separadamente para o grupo G_0 e G_1 . Assim, define-se cada índice, matematicamente, como:

$$Ind_{1G_1} = DC/N_{f1G_1}, \quad (5.12)$$

$$Ind_{2Gz} = Ind_{3Gz} = Ind_{4Gz} = 1 - (DI/N_{fyGz}), \quad (5.13)$$

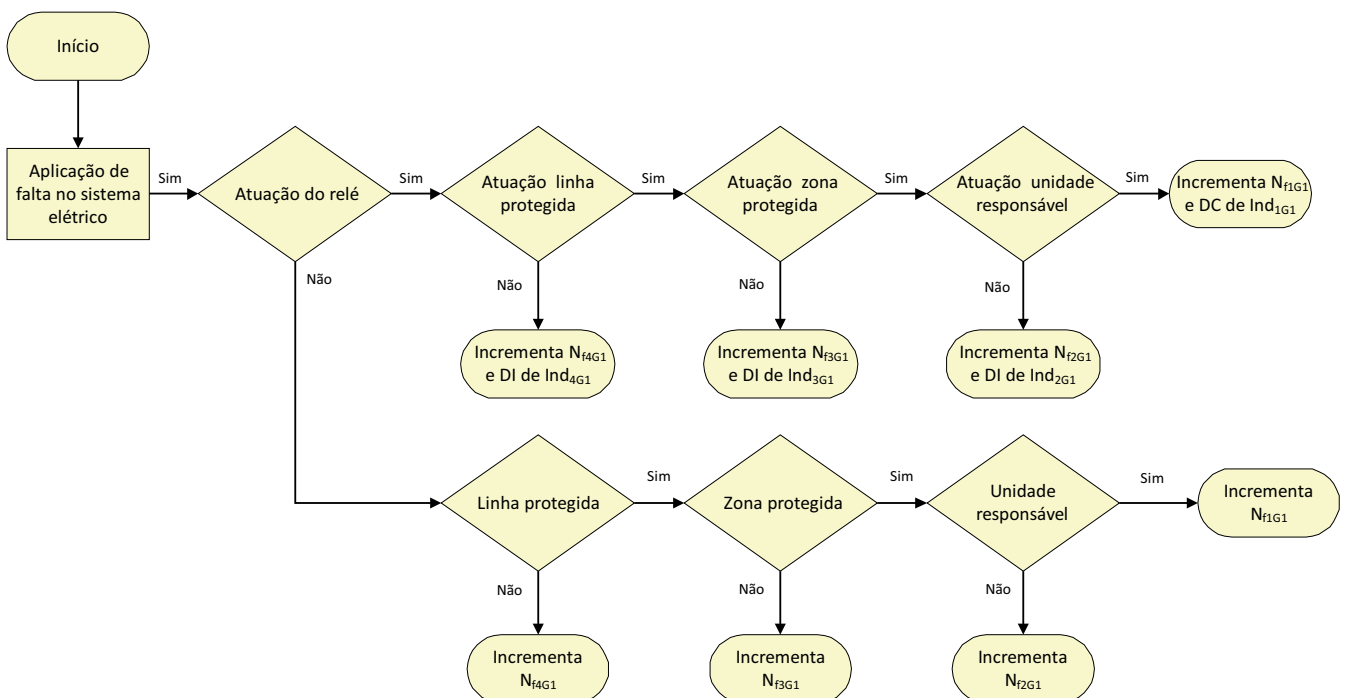
dessa forma, o desempenho global do relé irá atingir 100%, se o relé atuar corretamente em todas as faltas sob sua responsabilidade e não tiver nenhum disparo errado.

Para faltas envolvendo mais de uma fase, o desempenho do relé dependerá de suas unidades fase-fase, pois a arquitetura adotada para o relé usa as características lógicas que indica o tipo de falta e responsável pela ativação por sobrecorrente, que devem desativar as unidades de terra para esses tipos de faltas. No entanto, as unidades de terra poderão atuar erroneamente devido a um mau funcionamento dessas características lógicas, sendo necessário avaliar o desempenho dessas unidades.

Para calcular corretamente o valor dos índices que podem ser utilizados na análise do desempenho global do relé, a técnica proposta seguiu os passos que constam nos fluxogramas apresentados nas Figura 18 e Figura 19.

Na Figura 18 é descrito o algoritmo para avaliação dos índices do grupo de relé com *status* 1. Se a unidade com *status* 1 do grupo com *status* 1 atuar dentro da zona de proteção, o *DC* do Ind_{1G1} e N_{f1G1} são incrementados. Se, nessa mesma situação, as outras unidades atuarem, são incrementados o *DI* do Ind_{2G1} e N_{f2G1} . Caso as unidades do relé atuem fora da zona de proteção, são incrementados o *DI* do Ind_{3G1} e N_{f3G1} quando a atuação se dá dentro da linha protegida e o *DI* do Ind_{4G1} e N_{f4G1} para atuações fora da linha protegida. Por outro lado, se houver falta e o relé não atuar, se a falta for fora da linha protegida incrementa-se o N_{f4G1} , se for dentro da linha protegida e fora da zona de proteção incrementa-se o N_{f3G1} , se for na zona de proteção e a unidade responsável do grupo para atuar nessa falta não atuar incrementa-se o N_{f1G1} , se não for a unidade responsável a atuar na zona de proteção incrementa-se o N_{f2G1} .

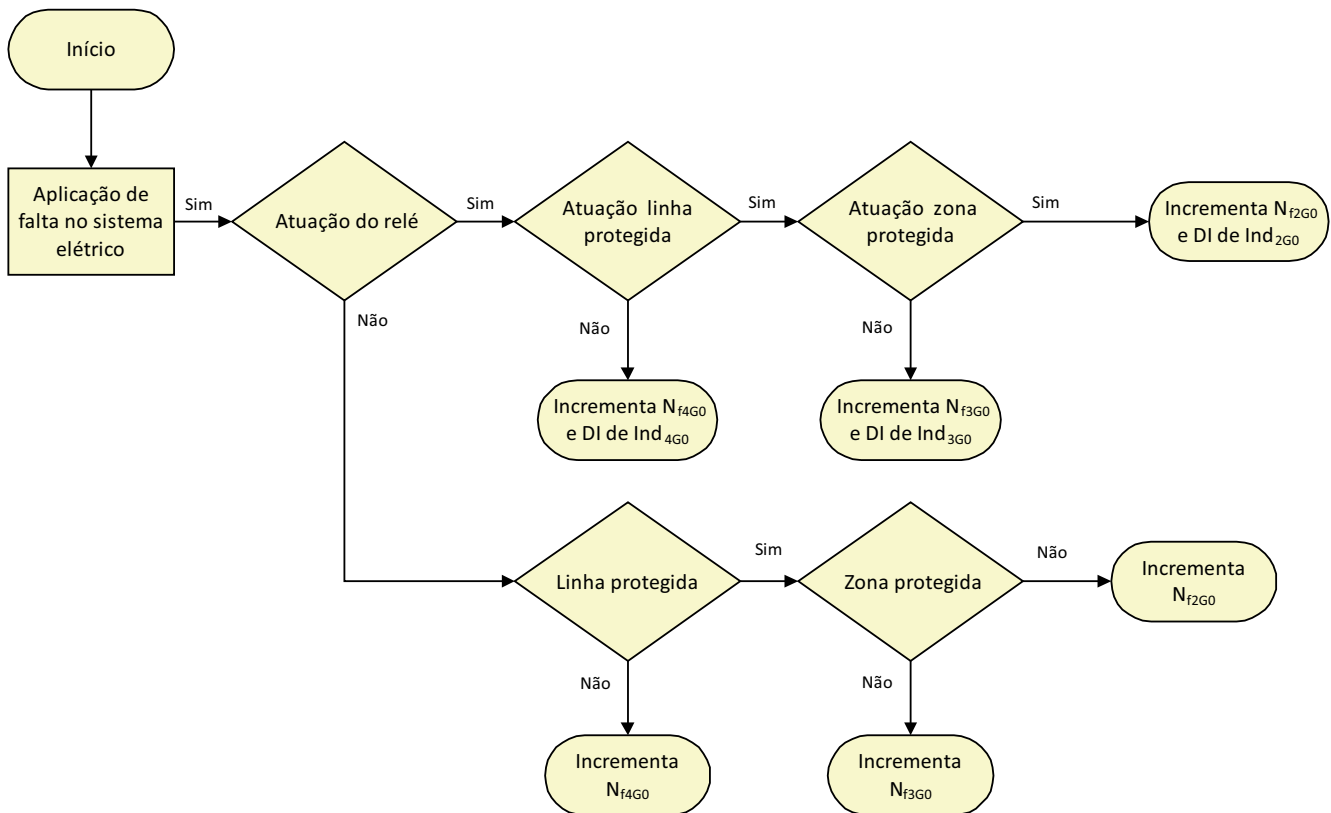
Figura 18 – Passos para avaliação do grupo de relé com *status* 1.



Fonte: o autor.

Na Figura 19 o algoritmo usado para o cálculo dos índices propostos para a avaliação do grupo de relé com *status* 0 é descrito. Se as unidades atuarem dentro da zona de proteção, incrementam-se o *DI* do Ind_{2G0} e N_{f2G0} . Caso as unidades do relé atuem fora da zona de proteção, incrementam-se o *DI* do Ind_{3G0} e N_{f3G0} quando a atuação se dá dentro da linha protegida e o *DI* do Ind_{4G0} e N_{f4G0} para atuações fora da linha protegida. Por outro lado, se houver falta e o relé não atuar, se a falta foi fora da linha protegida incrementa-se o N_{f4G0} , se falta foi dentro da linha protegida mas fora da zona de proteção incrementa-se N_{f3G0} , se a falta foi dentro da zona de proteção incrementa-se N_{f2G0} .

Figura 19 – Passos para avaliação do grupo de relé com *status* 0.

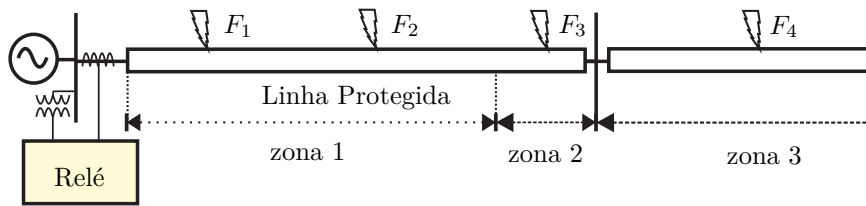


Fonte: o autor.

As equações propostas permitem um conhecimento da qualidade dos algoritmos de estimação fasorial e lógicas de distância escolhidos pelo usuário para o relé de distância, as quais adquirem maior importância quando características mais elaboradas de distância são usadas no relé, já que a avaliação da qualidade dos algoritmos se torna mais complexa.

Na Figura 20 apresentam-se quatro faltas AT genéricas em locais diferentes de um sistema de potência (F_1 , F_2 , F_3 e F_4) para ilustrar as atuações das unidades do relé que foram consideradas na técnica proposta.

Figura 20 – Falta monofásica em vários locais do sistema.



Fonte: o autor.

Cada uma das faltas representadas na Figura 20 é caracterizada na Tabela 16 recorrendo à técnica proposta conforme o *status* do grupo, gerando assim oito casos de análise, contendo a proteção desejada pelo relé, o desempenho que ele obteve e o índice associado a esse desempenho, bem como o grau de importância e os pesos relacionados a esse índice, parâmetros que foram utilizados para a análise do relé com a técnica proposta. A referida tabela destaca a importância dos índices propostos e a proteção desejada para cada grupo de proteção.

No primeiro caso apresentado na Tabela 16, como o relé atuou devidamente na zona de proteção, o *DC* do índice Ind_{1G1} foi incrementado. No segundo caso, o relé não atuou para uma falta dentro da zona de proteção e, portanto, o *DC* do índice Ind_{1G1} não foi incrementando, diminuindo assim a pontuação global desse índice. No terceiro caso, o relé atuou indevidamente fora da zona de proteção, porém, na linha protegida, usando-se nessa situação o índice Ind_{3G1} . No quarto caso, o relé atuou indevidamente fora da linha protegida, sendo usado o índice Ind_{4G1} que é de grande importância para a avaliação do relé. Nos casos seguintes (5, 6, 7 e 8), foram analisadas as atuações indevidas do grupo de relé com *status* 0, para os quais foram associados, respectivamente, os índices Ind_{2G0} , Ind_{2G0} , Ind_{3G0} e Ind_{4G0} .

Tabela 16 – Caracterização das faltas monofásicas

	<i>Status</i> do Grupo							
	1				0			
Casos	1	2	3	4	5	6	7	8
Posição da Falta	F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4
Proteção Desejada	✓	✓						
Desempenho	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Índices	Ind_{1G1}	Ind_{1G1}	Ind_{3G1}	Ind_{4G1}	Ind_{2G0}	Ind_{2G0}	Ind_{3G0}	Ind_{4G0}
Importância	A	A	M	A	B	B	M	A
Pesos	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_5	P_6	P_7

A:Alta; M:Média; B:Baixa

5.4 Memorial de Cálculo

Este memorial de cálculo é um guia para aplicar a metodologia proposta nesta tese. Para a correta aplicação da metodologia, se faz necessária uma implementação prévia do modelo da arquitetura interna do relé que se pretende avaliar ou o uso direto de relés comerciais com uma ferramenta de simulação online, a exemplo do RTDS.

Neste memorial de cálculo, para a modelagem do relé avaliado, implementou-se o algoritmo cosseno modificado, com base na fundamentação teórica de algoritmos de fasores (Capítulo 3), e as lógicas de proteção mho, direcional, seleção de falta e reatância, conforme a teoria referente à lógica de proteção (Capítulo 4), usando a linguagem de *script* do *Matlab*. O relé implementado foi posteriormente avaliado por meio de simulações de um sistema de transmissão baseado no sistema de teste do IEEE de 230 kV (COMMITTEE, 2004), usando a metodologia desta tese com os pesos padrões propostos na Seção 5.2.

Várias faltas monofásicas (378) foram simuladas em todos os locais do sistema de potência teste, o qual foi composto por 4 linhas (L_1 , L_2 , L_3 , e L_4) e dois barramentos (B_2 e B_3). Um total de 126 faltas foram simuladas na linha protegida L_3 até 80% do seu comprimento, tendo a unidade AT do relé atuado 93 vezes e as outras unidades de terra (BT e CT) não atuado. Um total de 72 faltas foram simuladas entre 80% e 100% de L_3 , tendo a unidade AT do relé atuado em 45 situações e as outras unidades de terra não atuado. Ao longo de L_1 e L_4 , foram simuladas 72 faltas em cada linha, e nos barramentos B_2 e B_3 foram simuladas 18 faltas em cada um, não tendo atuado as unidades de terra em nenhuma dessas faltas.

Na Tabela 17 sumariza-se as faltas totais aplicadas em cada local do sistema analisado, demonstrando as respectivas atuações das unidades terra do relé.

Tabela 17 – Disparos das unidades terra relé.

Unidades Relé	Disparos					
	$L_3 < 80\%$	$L_3 > 80\%$	L_1	L_4	B_2	B_3
AT	93	45	0	0	0	0
BT	0	0	0	0	0	0
CT	0	0	0	0	0	0
Simulações Totais	126	72	72	72	18	18

O cálculo do Ind_{IG1} é dado pela razão entre os disparos efetuados pelo relé na zona protegida de L_3 e as simulações de falta totais aplicadas na zona protegida, multiplicada pelo peso padrão de 40% correspondente a esse índice (Seção 5.2), o que indica a eficiência do relé para disparar acertadamente. As faltas monofásicas avaliadas foram na fase A, sendo por isso contabilizados os disparos da unidade AT do relé, que é a unidade ativa

para esse tipo de falta. O índice Ind_{1G1} é calculado, portanto, da seguinte forma:

$$Ind_{1G1} = (93/126) 0,40 = 0,2952,$$

Sendo AT a unidade atuante, o índice Ind_{2G1} corresponde à média entre o sub-índice $Ind_{2G1_{BT}}$, referente à unidade BT, e o sub-índice $Ind_{2G1_{CT}}$, associado à unidade CT, os quais foram calculados a partir da razão entre os disparos efetuados pelas unidades BT e CT, respectivamente, na zona protegida da linha protegida e as simulações totais aplicadas nessa zona, multiplicada pelo peso padrão de 5% associado a esse índice (Seção 5.2). O cálculo do índice Ind_{2G1} é dado por:

$$\begin{aligned} Ind_{2G1_{BT}} &= \left(1 - \frac{0}{126}\right) 0,05 = 0,05, \\ Ind_{2G1_{CT}} &= \left(1 - \frac{0}{126}\right) 0,05 = 0,05, \\ Ind_{2G1} &= \frac{Ind_{2G1_{BT}} + Ind_{2G1_{CT}}}{2} = 0,05. \end{aligned}$$

Como as unidades BT e CT do relé não atuaram para faltas em $L_3 < 80\%$, obtiveram um desempenho de 100%, contribuindo, portanto, o índice Ind_{2G1} com 5% para o desempenho global do relé na avaliação do grupo do relé com status 1.

O índice Ind_{3G1} representa os disparos na linha protegida, mas fora da zona de proteção, das unidades do grupo com status 1. O cálculo do índice Ind_{3G1} é a média entre os sub-índices correspondentes às três unidades terra do relé ($Ind_{3G1_{AT}}$, $Ind_{3G1_{BT}}$ e $Ind_{3G1_{CT}}$), calculados a partir da razão entre os disparos efetuados pelas unidades AT, BT e CT, respectivamente, na linha protegida e fora da zona de proteção, e as simulações totais aplicadas nessa zona, multiplicada pelo peso padrão de 10% associado a esse índice (Seção 5.2). O índice Ind_{3G1} é calculado por:

$$\begin{aligned} Ind_{3G1_{AT}} &= (1 - 45/72) 0,10 = 0,0375, \\ Ind_{3G1_{BT}} &= Ind_{3G1_{CT}} = (1 - 0/72) 0,10 = 0,10, \\ Ind_{3G1} &= \frac{Ind_{3G1_{AT}} + Ind_{3G1_{BT}} + Ind_{3G1_{CT}}}{3} = 0,0792. \end{aligned}$$

Como o relé teve disparos incorretos para faltas em $L_3 > 80\%$ na fase AT, o índice Ind_{3G1} foi penalizado pelo resultado do sub-índice $Ind_{3G1_{AT}}$, obtendo o relé a pontuação geral de 7,92%.

O índice Ind_{4G1} representa os disparos das unidades do grupo com status 1 fora da linha protegida. O cálculo do índice Ind_{4G1} consiste na média entre os sub-índices correspondentes às três unidades terra do relé ($Ind_{4G1_{AT}}$, $Ind_{4G1_{BT}}$ e $Ind_{4G1_{CT}}$), calculados a partir da razão entre os disparos efetuados pelas unidades AT, BT e CT, respectivamente, fora da linha protegida e as simulações totais aplicadas nessa zona, multiplicada pelo peso

padrão de 45% associado a esse índice (Seção 5.2). O cálculo do índice Ind_{4G1} é dado por:

$$Ind_{4G1_{AT}} = Ind_{4G1_{BT}} = Ind_{4G1_{CT}} = \left(1 - \frac{2(0/72) - 2(0/18)}{4}\right) 0,45 = 0,45,$$

$$Ind_{4G1} = \frac{(Ind_{4G1_{AT}} + Ind_{4G1_{BT}} + Ind_{4G1_{CT}})}{3} = 0,45.$$

O relé não teve nenhum disparo fora da linha protegida, obtendo assim o índice Ind_{4G1} uma pontuação de 45%.

A Tabela 18 sumariza os disparos realizados pela unidades fase do relé para as faltas avaliadas neste memorial de cálculo. Como o relé não atuou para nenhuma das faltas, o relé obteve 100 % de desempenho para a avaliação do grupo do relé com *status* 0.

Tabela 18 – Disparos das unidades fase do relé.

Unidades Relé	Disparos					
	$L_3 < 80$	$L_3 > 80$	L_1	L_4	B_2	B_3
AB	0	0	0	0	0	0
BC	0	0	0	0	0	0
CA	0	0	0	0	0	0

O cálculo do índice Ind_{2G0} leva em conta os disparos efetuados pelas unidades fase do relé na linha protegida e dentro da zona de proteção, sendo a média dos sub-índices $Ind_{2G0_{AB}}$, $Ind_{2G0_{BC}}$ e $Ind_{2G0_{CA}}$. Cada sub-índice é calculado como a razão entre os disparos de suas respectivas unidades e as simulações totais aplicadas na zona protegida, multiplicada pelo peso padrão de 10% associado a esse índice (Seção 5.2). O índice Ind_{2G0} é calculado como segue:

$$Ind_{2G0_{AB}} = Ind_{2G0_{BC}} = Ind_{2G0_{CA}} = (1 - 0/126) 0,10 = 0,10,$$

$$Ind_{2G0} = \frac{Ind_{2G0_{AB}} + Ind_{2G0_{BC}} + Ind_{2G0_{CA}}}{3} = 0,10.$$

O índice Ind_{3G0} corresponde aos disparos efetuados pelas unidades fase do relé na linha protegida mas fora da zona de proteção, cujo o cálculo consiste na média dos sub-índices $Ind_{3G0_{AB}}$, $Ind_{3G0_{BC}}$ e $Ind_{3G0_{CA}}$. Cada sub-índice é calculado como a razão entre os disparos de suas respectivas unidades e as simulações totais aplicadas na linha protegida mas fora da zona de proteção, multiplicada pelo peso padrão de 20% associado a esse índice (Seção 5.2). O índice Ind_{3G0} é calculado por:

$$Ind_{3G0_{AB}} = Ind_{3G0_{BC}} = Ind_{3G0_{CA}} = (1 - 0/72) 0,20 = 0,20,$$

$$Ind_{3G0} = \frac{Ind_{3G0_{AB}} + Ind_{3G0_{BC}} + Ind_{3G0_{CA}}}{3} = 0,20.$$

Os disparos efetuados pelas unidades fase do relé fora da linha protegida são contabilizados pelo índice Ind_{4G0} , sendo este a média dos sub-índices $Ind_{4G0_{AB}}$, $Ind_{4G0_{BC}}$ e $Ind_{4G0_{CA}}$. Cada sub-índice é calculado como a razão entre os disparos de suas respectivas unidades e as simulações totais aplicadas fora da linha protegida, multiplicada pelo peso padrão de 70% associado a esse índice (Seção 5.2). O cálculo do índice Ind_{4G0} é dado por:

$$Ind_{4G0_{AB}} = Ind_{4G0_{BC}} = Ind_{4G0_{CA}} = \left(1 - \frac{2(0/72) - 2(0/18)}{4}\right) 0,70 = 0,70,$$

$$Ind_{4G0} = \frac{Ind_{4G0_{AB}} + Ind_{4G0_{BC}} + Ind_{4G0_{CA}}}{3} = 0,70.$$

A soma dos índices associados ao grupo de relés com *status* 0, como seria de esperar, resulta em 100%, demonstrando que as unidades fase do relé não dispararam incorretamente em nenhuma falta analisada.

5.5 Resumo do Capítulo

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento da técnica proposta, para qual foram propostos índices relacionados ao desempenho obtido pelo relé e seus respectivos pesos. Os valores dos pesos padrões recomendados para serem utilizados com a técnica também estão exibidos neste capítulo. Além disso, são expostos também os algoritmos utilizados no desenvolvimento da técnica e uma ilustração mostrando vários casos típicos relativos à atuação da proteção de distância e suas relações com a técnica proposta. Por fim, um memorial de cálculo demonstrando o uso prático da metodologia é mostrado.

6 Avaliação de Desempenho

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com a técnica proposta na análise de desempenho de relés de proteção de distância considerando-se faltas aplicadas em um sistema de potência com a linha protegida nas topologias simples, dupla e com três terminais.

6.1 Modelagem do Sistema de Potência

O modelo de sistema de potência utilizado para avaliação dos relés de proteção (Figura 21) baseou-se no sistema de potência de 230 kV proposto por [Committee \(2004\)](#) para avaliação de sistemas de proteção, sendo composto por cinco linhas de transmissão (L_1, L_2, L_3, L_4 e L_5), cinco barramentos (B_1, B_2, B_3, B_4 e B_5) e três fontes equivalentes (S_1, S_2 e S_3). O relé modelado adquiriu os valores de corrente e de tensão por transformadores de corrente (TC) e de potencial capacitivos (TPC), respectivamente, protegendo a linha L_3 junto ao barramento B_3 .

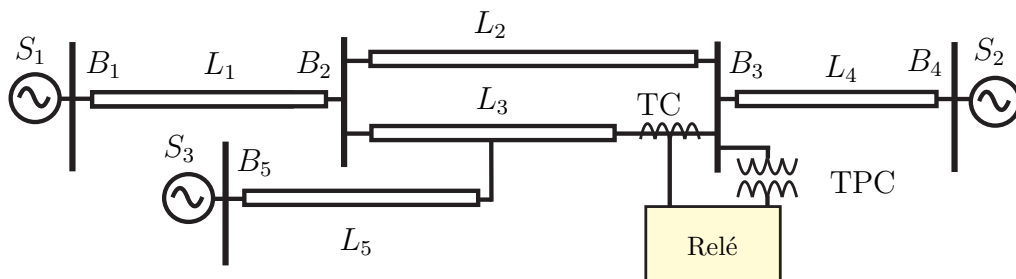


Figura 21 – Sistema de potência utilizado na pesquisa (adaptado de [Committee \(2004\)](#)).

As linhas de transmissão foram modeladas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência, permitindo aplicação de faltas ao longo da linha. Os parâmetros dessas linhas (impedâncias Z_0, Z_1 e Z_{0m} e comprimento) foram calculados a partir do modelo físico apresentado em [Committee \(2004\)](#), com o uso da ferramenta *powergui* do *Matlab*[®], e estão sumarizados na Tabela 19. Conforme a Figura 21, as linhas L_2 e L_3 pertencem a uma linha de circuito duplo e, portanto, apresentam significativo acoplamento de sequência zero entre ambas (Z_{0m}), conforme apresentado na Tabela 19.

As condições de fluxo de carga (tensão e tensão base), a impedância equivalente (Z_{eq}) e as conexões das fontes S_1, S_2 e S_3 estão sumarizadas na Tabela 20. As fontes foram conectadas em estrela aterrada e a impedância equivalente foi modelada a parâmetros concentrados.

Tabela 19 – Parâmetros das linhas de transmissão do sistema de potência.

	$L2$ e $L3$	$L1$, $L4$ e $L5$
$Z_0(\Omega/\text{km})$	$0,2253 + j1,5149$	$0,2253 + j1,5149$
$Z_1(\Omega/\text{km})$	$0,05932 + j0,4722$	$0,05932 + j0,4722$
$Z_{0m}(\Omega/\text{km})$	$0,1660 + j0,9324$	-
Comprimento(km)	120	80

Tabela 20 – Parâmetros das fontes do sistema elétrico.

Fontes	S_1	S_2	S_3
Tensão (pu)	$1,05\angle 10^\circ$	$1,05\angle -10^\circ$	$1,05\angle 10^\circ$
Tensão base (kV)	230	230	230
$Z_{eq}(\Omega)$	$0,35 + j3,15$	$0,35 + j4,12$	$0,35 + j4,12$
Conexão	Estrela aterrada	Estrela aterrada	Estrela aterrada

O TC , cujos parâmetros de resistência série (R), resistência de carga (CT_{carga}) e razão de transformação, bem como a curva de saturação, estão sumarizados na Tabela 21, sendo composto por um modelo de transformador saturado que está ligado em série à resistência de carga. O TPC é composto por um divisor de tensão capacitivo (C_1 e C_2), um reator de compensação (X_c , R_c , C_c , C_p), um transformador abaixador (*Abaixador*) e um Circuito Supressor de Ferrorressonância (FSC , C_f e R_f), estando os parâmetros de cada um desses componentes sumarizados na Tabela 22.

Tabela 21 – Parâmetros e curva de saturação do TC .

Parâmetros do TC	
$R(\Omega)$	0,75
$CT_{carga}(\Omega)$	4
Razão	1,25/2000
Curva de Saturação	
Corrente (A)	Fluxo (ϕ_m) (Wb)
0,02	0,29
0,03	0,6
0,04	1,11
0,06	1,53
0,07	1,86
0,10	2,28
0,22	2,65
0,70	3,02
1,0631	3,11
15,9	3,23

Tabela 22 – Parâmetros do *TPC*.

Parâmetros TPC	
$C1$ (nF)	2,43
$C2$ (nF)	82
C_c (pF)	100
X_c (k Ω)	58
R_c (Ω)	228
C_p (pF)	150
C_f (uF)	9,6
R_f (Ω)	40
$Carga$ (Ω)	100
$Abaixador$ (razão)	6584/115
FSC (razão)	1,98/1

6.2 Simulações de Falta

As faltas aplicadas no sistema de potência utilizado na pesquisa estão sumarizadas na Tabela 23, na qual constam variações do tipo de falta, ângulo de incidência (Θ_f), resistências de falta de terra (R_t) e de fase (R_f) e distâncias das faltas aplicadas ao longo das linhas dependendo da topologia do sistema. Essa diversidade de faltas aplicadas permitiu aferir o desempenho do relé de uma maneira mais significativa.

A topologia 1 refere-se às simulações de falta realizadas com o sistema de potência em linha simples, em que a linha paralela L_2 está em circuito aberto e L_5 desconectada; a topologia 2 é relativa às simulações de falta no sistema em linha dupla, no qual a linha L_5 está desconectada, e a topologia 3 corresponde a simulações realizadas com o sistema em três terminais.

6.3 Configurações dos Relés

O relé modelado no *software Matlab*[®] recebeu os sinais filtrados por um filtro analógico *Butterworth* de 2ª ordem, com frequência de corte de 480 Hz. Os sinais foram posteriormente amostrados a 960 Hz e, em seguida, os fasores calculados com cada um dos seguintes algoritmos descritos no Capítulo 3: CM (HART; NOVOSEL; SMITH, 2000), *FMCM* ou *FCM*.

Tabela 23 – Faltas simuladas no estudo

Topologias	Descrição	
1, 2 e 3	Tipo de Falta	AT, AB, ABT e ABC
1, 2 e 3	Θ_f (graus)	0, 45, 90
1, 2 e 3	R_t e R_f (Ω),	0, 1, 5, 10, 50, 100
1, 2 e 3	Localização de Falta (km) (L_1, L_4, L_5)	15, 25, 50, 75
1 e 2	Localização de Falta (km) (L_2, L_3)	15, 25, 50, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270
3	Localização de Falta (km) (L_2, L_3)	15, 25, 50, 100, 110, 120, 125, 130, 145, 155, 170, 230

Para os relés modelados com característica mho e quadrilateral foram utilizadas algumas rotinas de proteção descritas no Capítulo 4, dentre elas: direcional, mho, reatância, lateral direita, lateral esquerda, seletor de falta e supervisão por relé de sobrecorrente.

Os ativadores de sobrecorrente de fase e de terra foram parametrizados, respectivamente, com correntes de 600 A e 100 A. O valor do ajuste para o ativador de sobrecorrente de fase foi baseado na aplicação de uma margem de segurança de 10 % na corrente de carregamento do sistema de potência avaliado (500 A). Para o ativador de sobrecorrente de terra, o valor do ajuste foi escolhido de modo que o relé fosse sensível a todas as faltas envolvendo a terra e não disparasse em situações nas quais o ruído do sinal de corrente se apresentasse elevado.

O relé mho modelado compreende as características mho, reatância e direcional, cuja parametrização adotada está sumarizada na Tabela 24. Para o relé mho, a característica mho foi polarizada com tensão de memória proposta em Schweitzer III (1992) e com ajuste definido para corresponder a 80 % da impedância da linha L_3 nas topologias 1 e 2 e 40 % da impedância da linha L_3 para a topologia 3. A característica reatância foi polarizada com a corrente de sequência negativa com ajuste de impedância igual ao da característica mho, enquanto que a característica direcional foi parametrizada com o ajuste igual ao ângulo da impedância da linha L_3 nas topologias 1, 2 e 3.

Tabela 24 – Parametrização do relé mho.

Topologias	Ajustes		
	Mho	Reatância	Direcional
1 e 2	$0,8L_3$	$0,8L_3$	$1\angle L_3$
3	$0,4L_3$	$0,4L_3$	$1\angle L_3$

O relé quadrilateral modelado compreende as características lateral direita e esquerda, direcional e reatância, cuja a parametrização adotada é sumarizada na Tabela 25. Os ajustes escolhidos para as características direcional e reatância foram iguais ao relé

mho, porém a característica reatância foi polarizada com corrente de terra para as suas unidades de terra (FT_A , FT_B e FT_C) e usado um $\theta = 0$. Para a característica lateral direita usou-se um ajuste de 100Ω a fim de garantir boa convergência resistiva ao relé quadrilateral. A característica lateral esquerda foi ajustada com 10Ω para garantir boa convergência de retaguarda, sendo essa característica mais utilizada na zona 3 de proteção.

Tabela 25 – Parametrização do relé quadrilateral.

Topologias	Ajustes			
	Lateral Direita	Lateral Esquerda	Reatância	Direcional
1 e 2	$100 \angle 0^\circ$	$10 \angle 180^\circ$	$0,8L_3$	$1 \angle L_3$
3	$100 \angle 0^\circ$	$10 \angle 180^\circ$	$0,4L_3$	$1 \angle L_3$

Na avaliação do relé, que teve como base a metodologia proposta, foram utilizados os valores padrões de pesos descritos na Tabela 15, aos quais foram atribuídos valores conforme o grau de importância dos índices a eles associados, visando uma resposta equilibrada do relé.

6.4 Avaliação dos Pesos Padrões

Para provar que os pesos padrões escolhidos (Tabela 15) refletem adequadamente o desempenho desejado para o relé de distância, um estudo estatístico foi realizado, ao qual foram aplicadas perturbações Gaussianas nos valores padrões propostos pela metodologia para os pesos.

Os valores dos pesos sugeridos na Tabela 15 levaram em consideração as premissas em que a construção dos índices propostos, aos quais esses pesos estão associados, foi baseada, o que não impede o usuário escolher pesos mais apropriados para uma determinada situação de avaliação do sistema elétrico ou avaliar outro tipo de proteção. É importante ressaltar que a escolha incorreta dos pesos pode levar a resultados imprevisíveis não condizentes com a literatura, por isso uma análise dos fundamentos da proteção deve ser realizada antes de proceder à mudança dos pesos padrão sugeridos nesta tese.

As perturbações foram aplicadas nos pesos da seguinte maneira:

$$Pp_{in} = Ppad_{in} + \sigma_e(-1 + 2\omega), \quad (6.1)$$

em que Pp_{in} é o valor do peso $i = \{1, 2...8\}$) perturbado na simulação n , $Ppad_{in}$ é o valor do peso padrão de acordo com a Tabela 15 e $\sigma_e(-1 + 2\omega)$ é a perturbação adicionada com o ω aleatório entre zero e um ($0 < \omega < 1$).

Devido ao uso de valores aleatórios na perturbação dos pesos, a soma dos valores dos pesos usados na avaliação do relé de distância pode extrapolar o máximo de 100% ou

ficar abaixo desse valor. Como forma de garantir que essa soma seja 100%, utilizou-se a seguinte correção nos pesos aleatórios gerados em cada n simulações:

$$P_i = \begin{cases} \left(Pp_i - Ppad_i \left[\left(\sum_{k=5}^7 Pp_k \right) - 1 \right] \right) 100, & \text{se } FT = 0, \\ \left(Pp_i - Ppad_i \left[\left(\sum_{k=1}^4 Pp_k \right) - 1 \right] \right) 100, & \text{se } FT = 1, \end{cases}$$

com isso, foi possível garantir que P_i fosse proporcionalmente corrigido de acordo com seu respectivo valor padrão.

Na Tabela 26 estão sumarizados os resultados da metodologia obtidos a partir dos pesos perturbados. Observou-se que quanto maior o valor de σ_e , maior o valor do desvio padrão nos pesos, chegando o desvio a atingir um máximo de, em valor absoluto, 16,29%, o que corresponde a cerca de 36% (16,29%/45,24%) do valor da média do respectivo peso analisado (P_4), no caso da avaliação do grupo de relé com *status* 1.

Apesar do valor elevado dos desvios padrões aplicados nos pesos, o maior valor de erro médio de desvio padrão em relação à média ($\bar{\delta}$) foi de aproximadamente 4,53%, tendo esse valor atingido o máximo desvio padrão ($Max(\delta)$) de 6,21%. Os valores de erro foram calculados comparando o resultado da metodologia usando os pesos padrões da Tabela 15 com 1000 (mil) simulações realizadas com os pesos perturbados na topologia 1.

Com relação à avaliação do grupo de relé com *status* 0, as perturbações adicionadas nos pesos não tiveram influência no resultado final, calculado com a metodologia usando os valores padrão dos pesos comparada a 1000 (mil) simulações com os pesos perturbados, já que os erros $\bar{\delta}$ e $Max(\delta)$ foram aproximadamente zero para todos os valores de σ .

Tabela 26 – Pesos dependentes do desvio padrão para $n=1000$.

Grupo de relé com status 1										
σ_e	P_1		P_2		P_3		P_4		$Max(\delta)$	$\bar{\delta}$
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ		
0,1	39,93%	1,76%	5,02%	0,33%	9,99%	0,63%	45,06%	1,80%	0,7%	0,47%
0,3	39,89%	5,14%	4,97%	0,96%	10,07%	1,89%	45,07	5,34%	2,04%	1,49%
0,6	39,94%	10,64%	4,95%	1,91%	9,96%	3,86%	45,16%	10,93%	4,22%	3,07%
0,9	39,37%	15,69%	5,14%	2,89%	10,25%	5,78%	45,24%	16,29%	6,21%	4,53%
Grupo de relé com status 0										
σ_e	P_5		P_6		P_7		$Max(\delta)$	$\bar{\delta}$		
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ				
0,1	9,99%	0,66%	19,94%	1,27%	70,07%	1,54%	0,01%	0,00%		
0,3	9,94%	1,98%	20,21%	3,63%	69,85%	4,48%	0,04%	0,00%		
0,6	9,76%	3,90%	20,10%	7,45%	70,14%	9,08%	0,08%	0,01%		
0,9	9,85%	6,05%	20,25%	10,85%	69,90%	13,45%	0,13%	0,01%		

Inicialmente, um estudo foi feito com $n = 100, 1000, 10000$ para encontrar o valor de n mais adequado para a validação da metodologia. Como o resultado final para

$n = 1000$ foi aproximadamente igual ao resultado para $n = 10000$, optou-se por àquela quantidade de simulações por requerer menor processamento, já que o resultado é o mesmo.

Conclui-se que os pesos padrões escolhidos são robustos e confiáveis, já que variações impostas de até 15% no valor médio do peso nas variadas simulações provocaram somente um desvio máximo de aproximadamente 4,53% em relação à média dos resultados obtidos pela técnica proposta, demonstrando que grandes variações dos pesos resultaram em variação significativa no resultado final. Essa conclusão oferece segurança à técnica proposta, pois os pesos padrões escolhidos irão refletir o desempenho esperado do relé e não serão tendenciosos em relação a certos índices. Se uma variação média grande dos pesos escolhidos resultasse numa variação elevada no desempenho final do relé, não seria possível usar os pesos escolhidos, pois a técnica não forneceria resultados consistentes se outros pesos fossem escolhidos.

6.5 Avaliação da Proteção de Distância

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pela técnica proposta considerando-se diversos relés de distância nas topologias 1, 2 e 3. Os resultados foram calculados para três algoritmos de estimação de fasores (*CM*, *FMCM* e *FCM*), combinados com as características *mho* (*MHO*) e quadrilateral (*QUAD*), originando seis combinações para cada tipo de falta e topologia.

Os resultados globais obtidos pelas unidades fase-terra e fase-fase do relé usando a técnica proposta, por meio da qual foram avaliados os disparos no sistema de potência nas faltas enumeradas na seção 6.2, estão sumarizados, respectivamente, nas Tabelas 27 e 28.

Complementarmente às análises globais dos relés, também foram avaliadas a influência da componente CC de decaimento exponencial na estimação de fasores e a influência das condições de elevado carregamento do sistema de potência nos relés, que estão sumarizadas nas Tabelas 29 e 30.

Os tempos obtidos pelo relé modelado para as faltas simuladas estão sumarizados na Tabela 31. A informação do tempo de atuação é importante para avaliar o tamanho da janela do algoritmo estimador de fasores e o tamanho da característica de distância.

6.5.1 Avaliação dos Algoritmos de Estimadores de Fasores

Como a componente CC de decaimento exponencial representa um dos principais parâmetros que influencia nos estimadores de fasores, ela foi objeto de avaliação da técnica proposta. Para isso, realizou-se uma comparação entre o algoritmo de meio ciclo de

Fourier com e sem filtro mímico, cujos resultados estão apresentados na Tabela 29 para as topologias 1, 2 e 3 do sistema.

Tabela 27 – Desempenho das unidades fase-terra do relé.

Topologia	Faltas Monofásicas						Faltas Bifásicas					
	CM		FMCM		FCM		CM		FMCM		FCM	
	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD
1	85,62%	87,44%	86,57%	87,96%	83,85%	88,00%						
2	85,79%	87,44%	86,88%	88,53%	85,75%	87,72%					100 %	
3	83,65%	87,92%	83,65%	88,43%	83,79%	88,43%						
Topologia	Faltas Bifásicas à Terra						Faltas Trifásicas					
	CM		FMCM		FCM		CM		FMCM		FCM	
	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD
1			99,93%	99,97%								
2	100 %		99,83%	99,89%						100 %		
3			99,98%	99,99%								

Tabela 28 – Desempenho das unidades fase-fase do relé.

Topologia	Faltas Monofásicas						Faltas Bifásicas						
	CM		FMCM		FCM		CM		FMCM		FCM		
	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	
1							86,45%	88,97%	87,96%	89,74%	86,79%	89,25%	
2			100 %					86,05%	88,55%	87,06%	88,63%	86,23%	88,69%
3							83,58%	88,26%	84,92%	90,11%	83,72%	89,43%	
Topologia	Faltas Bifásicas à Terra						Faltas Trifásicas						
	CM		FMCM		FCM		CM		FMCM		FCM		
	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	MHO	QUAD	
1	86,45%	88,85%	87,70%	89,82%	86,45%	89,11%	85,24%	86,83%	85,25%	88,27%	86,31%	87,24%	
2	86,45%	88,31%	86,69%	88,97%	86,31%	88,45%	84,64%	84,35%	84,50%	85,83%	84,50%	84,88%	
3	84,92%	88,38%	84,92%	89,72%	83,72%	89,10%	82,32%	87,33%	83,75%	87,83%	82,46%	88,25%	

A componente CC de decaimento exponencial penalizou consideravelmente o algoritmo estimador de fasor sem filtro mímico nas topologias 1 e 2, enquanto que, para a topologia 3 não se observou diferença significativa no desempenho das proteções com os estimadores de fasores FMC e FMCM. Como o FMC não filtra a componente de decaimento exponencial e nem os harmônicos pares do sinal estimado (PHADKE; THORP, 2008), o seu desempenho no processo de estimação fasorial foi penalizado pela metodologia proposta.

A técnica proposta foi capaz de identificar a influência da componente CC nos estimadores de fasores, reconhecendo os algoritmos que não apresentam boa capacidade de filtragem. A diferença de desempenho entre os filtros FMC e FMCM, indicada pela metodologia proposta, foi muito acentuada em certos tipos de faltas, demonstrando a necessidade de exclusão do uso do filtro FMC em relés de distância nas situações em que as faltas foram analisadas.

Tabela 29 – Influência da componente CC de decaimento exponencial nos estimadores de fasores FMC e FMCM.

Topologia	Faltas Monofásicas		Faltas Bifásicas		Faltas Bifásicas à Terra		Faltas Trifásicas	
	FMC	FMCM	FMC	FMCM	FMC	FMCM	FMC	FMCM
1			74,29%	89,74%	74,17%	89,82%	71,07%	88,27%
2	100 %		88,55%	88,63%	74,05%	88,97%	71,07%	85,83%
3			88,26%	90,11%	88,38%	89,72%	87,33%	87,83%

Comparando os algoritmos de estimação de fasores CM, FMCM e FCM na avaliação das unidades fase-terra e fase-fase (Tabelas 27 e 28, respectivamente), os resultados obtidos com a metodologia proposta para os três algoritmos são próximos. Porém, o FMCM apresentou resultados superiores na maioria dos casos. A avaliação dos algoritmos de estimação pela metodologia sugere que, pelo menos para os algoritmos analisados, a estimação de fasores não influencia na resposta global do relé, indicando que todos os algoritmos apresentam boa resposta à componente CC de decaimento exponencial. De acordo com Campos et al. (2014), estes algoritmos apresentam, de fato, boa resposta à componente CC de decaimento exponencial.

Uma vez que a metodologia proposta é capaz de identificar algoritmos de estimação fasorial dependentes de um determinado parâmetro, a exemplo da componente CC de decaimento exponencial, assim como identificar os melhores algoritmos entre aqueles que apresentam boa resposta à componente CC, a metodologia pode ser utilizada como ferramenta valiosa no projeto de novos filtros para estimação fasorial, essencial para a proteção de distância.

6.5.2 Avaliação das Características de Distância

O desempenho global obtido pela metodologia proposta foi apresentado nas Tabelas 27 a 28, no qual a característica quadrilateral apresentou desempenho geral superior à mho, devido a sua maior convergência resistiva (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010), obtendo desempenhos superiores de até mais de 5 % em relação à mho. Apesar da característica quadrilateral ter alcançado melhores resultados, essa característica pode apresentar problemas de confiabilidade em alguns casos, a exemplo de elevadas condições de carregamento como identificado pela metodologia proposta e discutido nas próximas seções. A característica mho tem geralmente melhor desempenho para os tipos de falta que não envolvem a terra, devido a sua geometria e polarização favorecer maior expansão nesses casos (ROBERTS; GUZMAN; Schweitzer III, 1993).

A técnica proposta conseguiu identificar que o desempenho das características varia com o tipo de falta, sendo esse dado importante para poder adaptar o relé de distância no sentido de aumentar o seu desempenho, se o relé for usado em conjunto com um seletor de falta.

6.5.3 Desempenho dos Relés em Função das Topologias

As diferentes topologias do sistema elétrico influenciam no desempenho do relé (IEEE. . . , 2016), sendo essa influência avaliada com a metodologia proposta. Comparando os resultados obtidos pelas topologias 1 e 2 do sistema, a partir da técnica proposta, denota-se que esses resultados são bastante similares por configuração do relé, indicando que a compensação realizada nos estimadores de fasores para a linha dupla pode ter suprido os problemas relatados na literatura (IEEE. . . , 2016), que advém da impedância mútua entre linhas.

Em relação à topologia 3, os resultados foram similares aos alcançados pelas topologias 1 e 2, sinalizando que a parametrização adotada para o relé para essa topologia é a mais indicada. Caso fosse adotada uma parametrização que ultrapassasse o ponto de conexão entre as linhas L_3 e L_5 , o relé teria seu desempenho reduzido devido às correntes de alimentação da L_5 , podendo causar sobre ou sub-estimação (ZIEGLER, 2011) da impedância da linha protegida L_3 pelo relé de distância.

Apesar da similaridade de resultados entre as topologias analisadas, o relé apresentou um desempenho marginal geral pior na topologia 3 e desempenho superior na topologia 1, indicando que a técnica proposta mesmo diante de situações nas quais a proteção de distância utiliza configurações já bem estabelecidas na literatura, consegue identificar alguns padrões de desempenho e fornecer subsídios que justifiquem uma análise aprofundada por topologia para reajustes de relés. Quando isso acontece, por exemplo, o passo seguinte seria aumentar ou diminuir a parametrização definida, por topologia, e usar

os resultados calculados pela técnica proposta para reavaliar a parametrização escolhida.

6.5.4 Desempenho dos Relés em Função do Tipo de Falta

Considerando que os tipos de falta definem as unidades do relé que devem atuar, uma análise do relé por tipo de falta e por unidade foi realizada pela técnica proposta.

A unidade terra do relé apresentou resultados excelentes para as faltas bifásicas, bifásicas à terra e trifásicas, tendo obtido um desempenho de 100% em quase todas as situações, o que indica que a arquitetura adotada para essa unidade é confiável, tanto para a mho quanto para a quadrilateral como é demonstrado na Tabela 27. Apenas o algoritmo FMCM alcançou os 100%, pelo fato desse algoritmo ter atuado erroneamente em algumas poucas situações. A técnica demonstra que, apesar dos erros de atuação do FMCM em poucas situações, essas situações acabaram por refletir no resultado final, podendo se tornar um fator para desclassificar o uso deste algoritmo.

Para as faltas monofásicas, as unidades fase-terra do relé apresentaram resultados satisfatórios em todas as arquiteturas adotadas (Tabela 27), tendo obtido desempenho maior que 80% em todos os casos. Os resultados indicam que o relé não foi capaz de atuar para todas as faltas analisadas, tendo o relé sido penalizado nas simulações em que as faltas apresentaram uma resistência acima de 10Ω , que consiste em uma situação na qual a impedância estimada pelos relés irá muito para a direita do eixo X com R positivo no diagram R-X impossibilitando o correto diagnóstico da falta (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010). Com isso, a técnica demonstrou que, para obter um resultado mais satisfatório, é necessário usar algoritmos e características que consigam alcançar resultados melhores em relação a faltas com impedâncias mais elevadas (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010).

As unidades fase-fase do relé apresentaram resultados excelentes para faltas monofásicas (Tabela 27), tendo obtido 100% de desempenho independentemente do algoritmo e da característica escolhida, indicando que a arquitetura adotada para o relé funcionou, impedindo essas unidades de atuar para as referidas faltas. A arquitetura adotada de restringir os elementos fase-fase de atuar para faltas envolvendo a terra por meio de seletor de falta e lógica de restrição de sobrecorrente mostrou-se eficaz (Schweitzer III; ROBERTS, 1993).

Para faltas envolvendo mais de uma fase, as unidades fase-fase do relé obtiveram resultados satisfatórios, apresentando desempenhos superiores a 80% em todas as arquiteturas do relé escolhidas, como é demonstrado na Tabela 28. Essas unidades, apesar de serem menos afetadas pela resistência de falta (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010), não conseguiram atingir os 100 % de eficiência em casos de resistência elevada de falta.

6.5.5 Condições de Elevado Carregamento

O desempenho das características quadrilateral e mho do relé foi avaliado em condições de elevado carregamento do sistema ($\Delta\delta = 60^\circ$), com o sistema na configuração de topologia 1 (Tabela 30) (ROBERTS; GUZMAN; Schweitzer III, 1993). Para conseguir essa condição de elevado carregamento, o ângulo da fonte S_1 foi ajustado para 30° e o da fonte S_2 ajustado para -30° .

Os relés quadrilateral e mho foram penalizados sob condições de elevado carregamento, conforme esperado de acordo com a literatura (IEEE... , 2016), sendo a característica quadrilateral a mais afetada em faltas bifásicas, bifásicas à terra e trifásicas. Os resultados obtidos com a técnica proposta são os esperados com o estado da arte (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010), pois é reconhecido que a característica quadrilateral é bastante penalizada nas referidas condições. Comparada à característica mho, a quadrilateral apresentou melhores resultados para as faltas monofásicas, indicando que características que normalmente apresentam melhor cobertura resistiva em situações normais, apresentam melhores resultados em faltas envolvendo a terra (CALERO; GUZMAN; BENMOUYAL, 2010).

A técnica proposta conseguiu identificar que na presença de elevado carregamento as características diminuíram o seu desempenho, sendo um indicativo importante para a utilização de lógicas de distância adicionais, como por exemplo a característica invasão de carga, que possibilita o aumento da capacidade de carga da linha (Schweitzer III; ROBERTS, 1993), mostrando que a técnica é capaz de identificar problemas na configuração do relé por simples inspeção dos valores de desempenho obtidos pelo relé com e sem elevadas condições de carregamento.

Tabela 30 – Influência do carregamento elevado do sistema de potência no relé.

Tipo de Falta	Unidades Fase Terra		Unidades Fase Fase	
	MHO	QUAD	MHO	QUAD
FT	71,43%	77,50%	100 %	
FF	100 %		72,92%	69,75%
FFT	100 %		72,83%	69,75%
FFF	100 %		69,33%	65,00%

6.5.6 Tempos de Disparo

Os tempos de disparo do relé analisado estão diretamente relacionados ao tipo de algoritmo escolhido e ao tamanho da característica de distância (PHADKE; THORP, 2009). Se os algoritmos usados forem de janela curta ou de meio ciclo (como o FMCM), esses algoritmos tendem a ter uma resposta mais rápida do que os algoritmos de um

ciclo (como o FC e o CM) (PHADKE; THORP, 2009), conforme os resultados obtidos na Tabela 31.

Conforme a Tabela 31, o tamanho da característica fez a trajetória da falta entrar mais rapidamente na zona de atuação do relé, beneficiando a característica que apresentou maior área, que foi a mho devido à expansão dinâmica que é proporcionada pela polarização de memória de sequência positiva (Schweitzer III, 1992). Além disso, os resultados sinalizam a superioridade do FMCM em relação aos demais algoritmos, em todas as situações, por este ser de meio ciclo, o que proporciona velocidades médias em torno de meio ciclo do sinal.

6.6 Resumo do Capítulo

A modelagem do sistema de potência, as simulações de faltas e as configurações do relé utilizadas para a avaliação da técnica proposta foram apresentadas neste capítulo. Uma análise dos pesos padrão que influenciam nos índices propostos na técnica foi realizada, verificando-se que os pesos padrão escolhidos estão de acordo com o estado da arte.

A influência dos algoritmos de fasores, das características de distância, das topologia do sistema, dos tipos de falta, da componente exponencial CC, das condições de elevado carregamento e dos tempos de disparo na configuração do relé foi também apresentada neste capítulo, tendo em vista a importância desses aspectos na análise e validação da técnica proposta.

Tabela 31 – Tempos de disparo do relé.

Topologia	CM				FCCM				FCM			
	MHO		QUAD		MHO		QUAD		MHO		QUAD	
	Média (ms)	σ (ms)	Média (ms)	σ (ms)	Média (ms)	σ (ms)	Média (ms)	σ (ms)	Média (ms)	σ (ms)	Média (ms)	σ (ms)
Faltas Monofásicas												
1	23,95	12,39	24,15	10,36	16,41	10,44	16,7	9,25	21,48	11,8	23,05	10,34
2	23,47	12,2	23,9	10,67	16,13	10,32	16,71	9,5	22,28	12,18	22,67	11,08
3	21,67	10,81	22,65	9,81	14,51	9,42	16,05	8,6	20,58	10,7	22,1	9,85
Faltas Bifásicas												
1	22,99	11,44	23,92	10,19	15,6	9,4	16,93	8,34	21,38	11,11	22,66	10,08
2	22,67	11,37	23,48	11,23	15,96	9,88	17,09	8,83	21,04	11,38	22,05	11,15
3	20,69	9,76	22,83	9,92	15	9,22	15,89	8,38	19,88	9,87	21,39	9,79
Faltas Bifásicas à Terra												
1	22,72	11,24	23,92	10,19	15,57	9,44	16,85	8,34	21,21	11,09	22,66	10,08
2	22,47	11,36	23,48	11,23	15,93	9,86	16,92	8,83	21	11,36	22,03	11,17
3	21,47	10,16	22,74	9,89	15,05	9,17	15,89	8,38	19,88	9,87	21,39	9,79
Faltas Trifásicas												
1	22,44	11,46	23,92	10,19	15,57	9,44	15,79	9,05	20,51	11,49	21,99	10,65
2	20,83	12,49	23,48	11,23	15,46	10,09	16,32	9,23	19,72	12,1	21,4	11,61
3	21,47	10,16	22,38	10,11	14,39	9,49	15,89	8,38	18,09	11,02	20,84	10,25

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Utilizando a metodologia proposta, diversas topologias de sistema de potência com variadas configurações de relé foram analisadas, tendo avaliado quantitativamente a configuração adotada do relé por meio de pesos atribuídos a situações em que a proteção de distância tende a falhar.

De acordo com os resultados obtidos, se os algoritmos de estimação de fasores escolhidos forem pouco influenciados pela componente DC, a proteção de distância apresentará desempenho semelhante, sendo a metodologia importante para identificar novos algoritmos de estimadores de fasores que possam vir a surgir no estado da arte. Os algoritmos usados na avaliação apesar de terem tido desempenhos semelhantes, casos críticos foram identificados por simples inspeção do resultado global obtido, como foi o caso de operações errôneas que *FMCM* obteve.

A partir da metodologia proposta, foi possível concluir que as características de distância apresentam grande influência no desempenho global do relé de distância, já que podem ser construídas de modo a obter maior cobertura resistiva da falta. A característica quadrilateral apresentou desempenho superior nas faltas envolvendo a terra, enquanto que a mho apresenta melhor desempenho em faltas envolvendo mais que uma fase. Essas conclusões relativamente às características de distância mais utilizadas nos relés de distância estão de acordo com o estado da arte, mostrando que a metodologia é confiável numa possível identificação de problemas em futuras características de distância propostas

As configurações do relé avaliadas foram analisadas no tempo de disparo para as faltas analisadas, verificando-se um desempenho superior na rapidez do algoritmo FMCM com a característica quadrilateral nas diferentes topologias. O tempo de disparo sendo um dos parâmetros usados pelos fabricantes de relés pode se torna-se um fator de escolha para privilegiar a escolha do estimador de fasores, se ele se mostrar confiável na avaliação realizado pela metodologia.

A influência de condições de elevado carregamento foi analisada por meio da metodologia, que também identificou problemas na característica quadrilateral para faltas bifásicas, bifásicas à terra e trifásicas. Nessas faltas, a característica mho apresentou resultados superiores, apesar do seu desempenho global ter sido afetado também. Para as faltas monofásicas, a característica quadrilateral apresentou, em condições de elevada carga, um desempenho superior.

A metodologia provou ser uma ferramenta relevante para identificar vários proble-

mas que os algoritmos usados em relés de distância normalmente apresentam em diversas topologias de sistemas, condições de carregamento e faltas com elevada impedância. Para cada topologia do sistema, a metodologia é útil para identificar a característica e os estimadores de fasores ideais e problemas em condições de elevada carga no sistema, sendo ainda importante para mensurar o impacto de algoritmos que são fortemente influenciados pela componente DC de decaimento exponencial.

7.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros enumeram-se as seguintes sugestões:

1. Uso da lógica fuzzy para classificar qualitativamente os algoritmos analisados por meio dos resultados quantitativos calculados pela metodologia proposta. Com os resultados quantitativos, a lógica fuzzy qualificaria os algoritmos em excelente, bom ou mau, provendo uma interface amigável para quem não é familiarizado com os resultados quantitativos;
2. Inclusão da influência do tempo de disparo do relé no resultado global da metodologia. A adição do tempo de atuação fornecerá ao usuário informações sobre a velocidade de atuação do relé analisado, sendo mais um critério de diferenciação entre os algoritmos;
3. Identificar automaticamente os algoritmos ótimos por topologia, possibilitando melhorias na resposta do relé quando na mudança da topologia do sistema, como no caso de linhas duplas que funcionam, em casos de manutenção, em modo de linha simples;
4. Detetar os algoritmos internos usados pelos relés, que atualmente não são divulgados pelos fabricantes de relé, possibilitando ao engenheiro de proteção otimizar os ajustes de proteção baseado nessas novas informações;
5. Adaptação da metodologia para uso na avaliação da proteção diferencial e proteção por ondas viajantes;

Referências

- ABB POWER T& D COMPANY INC. *REL300 Relay System*. V2.71. [S.l.], 1996. Citado 2 vezes nas 82 e 83.
- ALEXANDER, G. E.; ANDRICHAK, J. G. *Application of Phase and Ground Distance Relays to Three-Terminal Lines*. Malvern, PA, 1996. Citado 2 vezes nas 37 e 42.
- ANDERSON, P. *Power System Protection*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1999. (IEEE Press Power Engineering Series). ISBN 9780071343237. Citado 2 vezes nas 58 e 82.
- ANDRICHAK, J. G.; ALEXANDER, J. G. *Distance Relay Fundamentals*. [S.l.], 2007. Disponível em: (<http://www.gedigitalenergy.com/smartgrid/Mar07/article7.pdf>). Citado na 72.
- ARGÜELLES, J. M. et al. A new method for decaying dc offset removal for digital protective relays. *Electric Power Systems Research*, v. 76, n. 4, p. 194 – 199, 2006. ISSN 0378-7796. Citado 3 vezes nas 33, 34 e 42.
- BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Enhanced phasor estimation technique for fault location in series-compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 4, p. 2058–2060, Aug 2015. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas 34, 36 e 42.
- BENMOUYAL, G. Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 621 –630, apr 1995. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas 33, 34, 37, 51 e 54.
- CALERO, F.; GUZMAN, A.; BENMOUYAL, G. Adaptive phase and ground quadrilateral distance elements. *SEL Journal of Reliable Power*, v. 1, n. 1, July 2010. Citado 4 vezes nas 39, 104, 105 e 106.
- CAMPOS, J. *Proteção de Distância: Algoritmos de Estimação Fasorial*. [S.l.], 2012. Citado 3 vezes nas 54, 63 e 69.
- CAMPOS, J. T. L. S. et al. Methodology for evaluation of relay digital filters during a fault. In: *2014 IEEE PES General Meeting — Conference Exposition*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas 41 e 103.
- CHEN, C.-S.; LIU, C.-W.; JIANG, J.-A. Application of combined adaptive fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 2, p. 619 – 626, april 2006. ISSN 0885-8977. Citado na 35.
- CHO, Y.-S. et al. An innovative decaying dc component estimation algorithm for digital relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 1, p. 73 –78, jan. 2009. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas 33, 35 e 42.
- COMMITTEE, P. S. R. *EMTP reference models for transmission line relay testing report*. draft 10a, Tech Rep., 2004. Disponível em: (<http://www.pes-psrc.org/>). Citado 3 vezes nas 13, 89 e 93.

- EISA, A.; RAMAR, K. Removal of decaying dc offset in current signals for power system phasor estimation. In: *Universities Power Engineering Conference*. Padova: IEEE, 2008. p. 1–4. Citado 3 vezes nas 33, 34 e 42.
- ELREFAIE, H.; MEGAHED, A. A novel technique to eliminate the effect of decaying dc component on dft based phasor estimation. In: *Power and Energy Society General Meeting*. Minneapolis, MN: IEEE, 2010. p. 1–8. ISSN 1944-9925. Citado 3 vezes nas 33, 35 e 42.
- FERRER, H. A.; VERDUZCO, I. D.; MARTINEZ, E. V. Fourier and walsh digital filtering algorithms for distance protection. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 457–462, feb 1996. ISSN 0885-8950. Citado 4 vezes nas 33, 34, 39 e 42.
- GE ENERGY. *D30 Line Distance Protection System Instruction Manual*. GE, 2012. Citado 2 vezes nas 82 e 83.
- GUO, Y.; KEZUNOVIC, M.; CHEN, D. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 3, p. 711–717, july 2003. ISSN 0885-8977. Citado na 54.
- David G. Hart, Damir Novosel e Robert A Smith. *Modified cosine filters*. 2000. 6154687. Disponível em: (<http://www.freepatentsonline.com/6154687.html>). Citado 3 vezes nas 48, 54 e 95.
- HUMPAGE, W.; KANDIL, M. Discriminative performance of distance protection under fault operating conditions. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 115, n. 1, p. 141–152, january 1968. ISSN 0020-3270. Citado na 38.
- IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines. *IEEE Std C37.113-2015 (Revision of IEEE Std C37.113-1999)*, p. 1–141, June 2016. Citado 2 vezes nas 104 e 106.
- KANG, S.-H. et al. Fourier transform-based modified phasor estimation method immune to the effect of the dc offsets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 3, p. 1104–1111, july 2009. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas 33, 35 e 42.
- KASZTENNY, B.; FINNEY, D. Fundamentals of distance protection. In: *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, TX: IEEE, 2008. p. 1–34. Citado 4 vezes nas 28, 60, 66 e 77.
- KHORASHADI-ZADEH, H.; DANESHI, H. Evaluation and performance comparisons of digital distance protection algorithms. In: *39th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*. Seattle: IEEE, 2004. v. 4, p. 2463–2468 vol.4. ISSN 0197-2618. Citado na 39.
- LEE, D. G.; KANG, S. H.; NAM, S. R. Modified dynamic phasor estimation algorithm for the transient signals of distributed generators. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 1, p. 419–424, March 2013. ISSN 1949-3053. Citado 3 vezes nas 33, 36 e 42.
- LEUNG, K. Computer-aided setting calculation for distance zone 2 and zone 3 protection. In: *International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*. Hong Kong: IET, 1991. p. 152–157 vol.1. Citado na 38.

- LIANG, F.; JEYASURYA, B. Transmission line distance protection using wavelet transform algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, p. 545 – 553, abril 2004. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas 36 e 42.
- MASON, C. *The art and science of protective relaying*. [S.l.]: Wiley, 1956. (General Electric series). ISBN 9780471575528. Citado na 82.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-time signal processing (2nd ed.)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1999. ISBN 0-13-754920-2. Citado na 43.
- PHADKE, A.; HLIBKA, T.; IBRAHIM, M. A digital computer system for ehv substations: Analysis and field tests. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 95, n. 1, p. 291 – 301, jan. 1976. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas 33 e 42.
- PHADKE, A.; THORP, J. *Computer Relaying for Power Systems*. [S.l.]: Wiley, 2009. ISBN 9780470747575. Citado 4 vezes nas 46, 57, 106 e 107.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. [S.l.]: New York: Springer, 2008. Citado na 103.
- RAO, J. G.; PRADHAN, A. K. Accurate phasor estimation during power swing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 1, p. 130–137, Feb 2016. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas 36, 37 e 42.
- RAVISHANKAR, K.; THUKARAM, D. Analysis of distance relay trip regions for ehv and uhv transmission lines. In: *2011 International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*. Chennai: IEEE, 2011. p. 1 –6. Citado na 39.
- ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; Schweitzer III, E. O. $Z=V/I$ does not make a distance relay. In: *20th Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane: Sel, 1993. Citado 5 vezes nas 38, 65, 66, 104 e 106.
- RUBEENA, R.; ZADEH, M. R. D.; BAINS, T. P. S. An accurate offline phasor estimation for fault location in series-compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 876–883, April 2014. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas 33, 36 e 42.
- SCHNEIDER ELECTRIC. *MiCOM P441/P442 P444 Numerical Distance Protection*. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas 82 e 83.
- SCHWEITZER, E. O. et al. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 448–461. Citado na 28.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-311C Relay, Protection and Automation System Instruction Manual*. [S.l.], 2007. Citado 4 vezes nas 53, 63, 82 e 83.
- Schweitzer III, E.; HOU, D. Filtering for protective relays. In: *WESCANEX 93. 'Communications, Computers and Power in the Modern Environment.' Conference Proceedings., IEEE*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 15 –23. Citado 4 vezes nas 33, 34, 42 e 48.

- Schweitzer III, E. O. *New Developments in Distance Relay Polarization and Fault Type Selection*. presented at the 16th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 1989. Disponível em: <http://www.selinc.com/techpprs.htm>. Citado na 38.
- E. O. Schweitzer III. *Distance relay using a polarizing voltage*. 1992. 5140492. Disponível em: <http://www.freepatentsonline.com/5140492.html>. Citado 4 vezes nas 38, 68, 96 e 107.
- E. O. Schweitzer III. *Computationally-efficient distance relay for power transmission lines*. 1994. 5325061. Disponível em: <http://www.freepatentsonline.com/5325061.html>. Citado na 39.
- Schweitzer III, E. O.; ROBERTS, J. Distance relay element design. In: *47th Annual Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, TX: IEEE, 1993. Citado 8 vezes nas 28, 39, 64, 65, 66, 67, 105 e 106.
- SERNA, J. Phasor estimation from phasorlets. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 54, n. 1, p. 134 – 143, feb. 2005. ISSN 0018-9456. Citado 2 vezes nas 37 e 42.
- SERNA, J. A. de la O. Reducing the error in phasor estimates from phasorlets in fault voltage and current signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 56, n. 3, p. 856 –866, june 2007. ISSN 0018-9456. Citado 3 vezes nas 36, 37 e 42.
- SILVA, C. D. L. da et al. Phasor estimation in power systems using a neural network with online training for numerical relays purposes. *IET Science, Measurement Technology*, v. 9, n. 7, p. 836–841, 2015. ISSN 1751-8822. Citado 3 vezes nas 36, 37 e 42.
- SILVA, K.; KUSEL, B. Dft based phasor estimation algorithm for numerical digital relaying. *Electronics Letters*, v. 49, n. 6, p. 412–414, March 2013. ISSN 0013-5194. Citado 3 vezes nas 33, 35 e 42.
- SILVA, K.; NEVES, W.; SOUZA, B. Distance protection using a novel phasor estimation algorithm based on wavelet transform. In: *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1 –8. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas 36 e 42.
- SILVA, K. M.; KÜSEL, B. F. On combining wavelet-based designed filters and an adaptive mimic filter for phasor estimation in digital relaying. *Electric Power Systems Research*, v. 92, n. 0, p. 60 – 72, 2012. ISSN 0378-7796. Citado na 54.
- WAIKAR, D.; LIEW, A.; ELANGOVA, S. Design, implementation and performance evaluation of a new digital distance relaying algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 448 –456, feb 1996. ISSN 0885-8950. Citado na 39.
- WONG, C. kong et al. A novel algorithm for phasor calculation based on wavelet analysis [power system analysis]. In: *Power Engineering Society Summer Meeting*. Vancouver: IEEE, 2001. v. 3, p. 1500 –1503 vol.3. Citado 2 vezes nas 36 e 42.
- WU, L.-C.; LIU, C.-W.; CHEN, C.-S. Modeling and testing of a digital distance relay matlab/simulink. In: *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*. Ames: IEEE, 2005. p. 253 – 259. ISSN 0537-9989. Citado na 39.

- YU, C.-S. Removal of the decaying DC effects in distance protection by simultaneously considering the voltage and current waveforms. *JOURNAL OF THE CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS*, CHINESE INST ENGINEERS, #1, 4TH FL, SEC 2, JEN-AI RD, TAIPEI 10019, TAIWAN, 30, n. 6, p. 1047–1057, SEP 2007. ISSN 0253-3839. Citado 3 vezes nas [33](#), [34](#) e [42](#).
- ZADEH, M. D.; ZHANG, Z. A new dft-based current phasor estimation for numerical protective relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 4, p. 2172–2179, Oct 2013. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas [33](#), [35](#) e [42](#).
- ZAMORA, A. et al. Digital filter for phasor estimation applied to distance relays. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 9, n. 14, p. 1954–1963, 2015. ISSN 1751-8687. Citado 3 vezes nas [36](#), [38](#) e [42](#).
- ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. [S.l.]: Wiley, 2011. ISBN 9783895786679. Citado 8 vezes nas [27](#), [57](#), [58](#), [60](#), [66](#), [68](#), [81](#) e [104](#).