

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALGORITMO DE ALTO DESEMPENHO PARA
PROTEÇÃO NUMÉRICA DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO IMUNE A OSCILAÇÕES DE
POTÊNCIA**

Tese de Doutorado

Adriano Peres de Moraes

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**ALGORITMO DE ALTO DESEMPENHO PARA
PROTEÇÃO NUMÉRICA DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO IMUNE A OSCILAÇÕES DE
POTÊNCIA**

por

Adriano Peres de Moraes

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, **Área de Concentração em Processamento de Energia**, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.

Santa Maria, RS, Brasil

2012

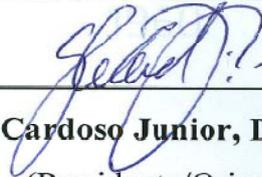
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado
elaborada por

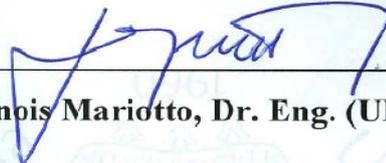
Adriano Peres de Moraes

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutorado em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:



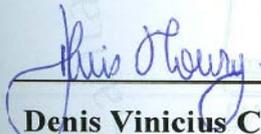
Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



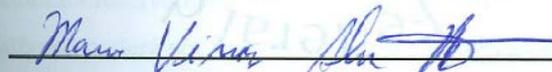
Lenois Mariotto, Dr. Eng. (UFSM)



Daniel Pinheiro Bernardon Dr. Eng (UFSM)



Denis Vinicius Courty, Dr. Eng. (EESC/USP)



Marcus Vinicius Alves Nunes, Dr. Eng. (UFPA)

Santa Maria, 04 de Maio de 2012.

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Adriano Peres de Moraes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: R. Comissário Justo, 1486/406, Bairro Centro, Santa Maria, RS, 970100-110.

Fone 55 32208047; End. Eletr.: adriano@mail.ufsm.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer imensamente ao Professor Ghendy Cardoso Junior, orientador desta tese, pelos conhecimentos transmitidos, seriedade, e pela sua amizade durante estes anos de convivência.

Ao Professor Lenois Mariotto por toda a atenção, colaboração, amizade e apoio que tem me fornecido desde os tempos da graduação em Engenharia Elétrica.

Aos Professores Denis Vinicius Coury, Marcus Vinícius Alves Nunes e Daniel Pinheiro Bernardon, membros da Comissão Examinadora, pelas valiosas sugestões.

Aos colegas do CEEMA pela agradável convivência durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao acadêmico do curso de Engenharia Elétrica, Flaviano Stefanello, pelo empenho e responsabilidade nas simulações no ATP.

Aos professores, colaboradores e colegas do CTISM em especial aos colegas que não hesitaram em trocar aulas comigo durante os períodos que necessitei.

Aos funcionários da secretaria do PPGEE, em especial ao Carlo Castelanelli, pela atenção e responsabilidade sempre demonstradas.

À CAPES, pelo suporte financeiro e à Universidade Federal de Santa Maria por ter me proporcionado um ensino de qualidade e gratuito.

A todos meus familiares que torciam por mim. Ao meu irmão, e grande amigo, Franco pelo apoio em todos os momentos. A minha namorada Raquel pela atenção, carinho e incentivo durante esta caminhada.

Um agradecimento especial aos meus pais Franklin e Sêila, pelo apoio incondicional em todas as minhas escolhas e pela compreensão nos momentos em que não estive presente durante todos estes anos de estudo.

À Deus pela vida e pela oportunidade de ter encontrado estas pessoas.

*“Pesquisar é ver aquilo que todos os
demais viram e imaginar aquilo que
ninguém havia pensado”*

Albert Szent Györgyi

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

ALGORITMO DE ALTO DESEMPENHO PARA PROTEÇÃO NUMÉRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO IMUNE A OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA

AUTOR: ADRIANO PERES DE MORAIS

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 04 de Maio de 2012

Neste trabalho propõe-se uma nova metodologia de proteção de linhas de transmissão, tolerante as oscilações de potência. O algoritmo desenvolvido tem a capacidade de detectar, classificar e localizar todos os tipos de faltas, com e sem a presença de oscilações de potência, inclusive aquelas que produzem altos valores de resistência de falta. Em uma primeira etapa com o emprego do método de ajuste de curvas por mínimos quadrados desenvolve-se um estimador para localizar a posição das faltas. Para fins de proteção, este é modelado por meio de um circuito R-L série representado por suas equações diferenciais. Em uma segunda etapa são apresentadas as principais causas das oscilações de potência, bem como suas consequências para os relés de distância de linhas de transmissão. Ainda neste contexto, são apresentadas, analisadas e comparadas algumas técnicas destinadas a minimizar estes efeitos. Essas técnicas foram testadas por meio de simulações computacionais, sob condições de oscilação de potência com e sem a presença de curtos-circuitos, considerando-se diversos valores de carregamento e frequências de oscilação. Os resultados mostraram que nenhum método é totalmente eficiente para todos os cenários. Desse modo, ainda há algumas incertezas sobre o desempenho das técnicas de proteção contra as oscilações de potência existentes. Em uma terceira etapa, foi desenvolvido um algoritmo para proteção numérica de linhas de transmissão imune as oscilações de potência. A metodologia faz uso da Morfologia Matemática nas etapas de detecção e classificação das faltas. De modo a se obter uma maior segurança na operação do relé, especialmente na região próxima ao limiar de operação, incorporou-se uma estratégia de contagem diferente das tradicionais. A principal contribuição do trabalho relaciona-se com a análise da diferença comportamental da componente exponencial decrescente (componente dc) para uma situação de falta e de oscilação de potência. Ou seja, a componente dc , obtida por meio de um filtro morfológico, é utilizada como critério de disparo do relé de distância. Para avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido, uma série de testes com diferentes cenários de faltas com e sem a presença de oscilações de potência foram realizadas. Devido à simplicidade das operações matemáticas utilizadas no algoritmo, a técnica apresenta segurança e velocidade na sua operação, mesmo durante oscilações de potência.

Palavras-chave: Proteção de linhas de transmissão; Relé de distância numérico; Oscilações de potência; Morfologia matemática, Componente exponencial decrescente.

ABSTRACT

Doctoral Thesis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

HIGH-PERFORMANCE ALGORITHM FOR NUMERICAL PROTECTION OF TRANSMISSION LINES IMMUNE TO POWER SWINGS

AUTHOR: ADRIANO PERES DE MORAIS

RESEARCH SUPERVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Santa Maria, May 04, 2012

This Doctoral Thesis proposes a new methodology for transmission line protection tolerant to power swings. The algorithm developed has the ability to detect, classify and locate all fault types with and without power swings, including those that produce high values of fault resistance. In a first step, it is proposed a fault distance estimator based on the least-square curve fitting. The fault locator, for protection proposes, was modeled by a series R-L circuit and differential equations. In a second step, the main causes and consequences of power swings in transmission lines distance relays are introduced. Also in this context, techniques to minimize these effects are presented. Besides, computer simulations of power swings, with different fault scenarios, were carried out to realize comparative analyses between the methods. The results show that none of the methods is efficient in all scenarios. Hence, there is still some concern about the performance of the protection methods against power swings. In a third step, it was developed an algorithm for numerical protection in transmission lines immune to power swings. The detection and classification steps are based on Mathematical Morphology. In order to obtain a safer operation of the relay, especially in the boundaries of threshold set, a counting strategy was developed. The main innovation of the work is based on difference of behavior of the exponentially decaying component (dc component) during a fault and during a power swing. The dc component, obtained by means of morphological filter, is used as a tripping criterion. Finally, in order to evaluate the algorithm performance, tests with different fault and power swings scenarios were performed. The results show that the technique has the speed and safety required even during power swings due to the simplicity of the algorithm used in mathematical operations.

Keywords: Transmission line protection; Numerical distance relay; Power swing; Mathematical Morphology, Exponentially decaying component.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3 MOTIVAÇÃO	14
1.4 REVISÃO DA LITERATURA	15
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	19
1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE	20
2. INTRODUÇÃO A MORFOLOGIA MATEMÁTICA	21
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	21
2.2 INTRODUÇÃO	21
2.3 TEORIA DOS CONJUNTOS	22
2.3.1 <i>Operação de Conjuntos</i>	22
2.4 OPERAÇÕES BÁSICAS DA MORFOLOGIA MATEMÁTICA	23
2.4.1 <i>Dilatação Binária</i>	23
2.4.2 <i>Erosão Binária</i>	27
2.5 MORFOLOGIA MATEMÁTICA EM ESCALA DE CINZA	27
2.6 OPERADORES ADICIONAIS	31
2.6.1 <i>Abertura e Fechamento</i>	31
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
3. PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE RELÉS DE DISTÂNCIA	34
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	34
3.2 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CLÁSSICA	34
3.3 RELÉS DE ESTADO SÓLIDO	36
3.4 RELÉS NUMÉRICOS	37
3.4.1 <i>Condicionamento do Sinal</i>	37
3.4.2 <i>Detecção da Falta</i>	45
3.4.3 <i>Classificação da Falta</i>	48
3.4.4 <i>Estimação da distância da falta</i>	50
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
4. VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE AJUSTE DE CURVAS POR MÍNIMOS QUADRADOS	61
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	61
4.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS	61

4.3	CRITÉRIOS UTILIZADOS NOS TESTES	62
4.4	RESULTADOS DOS TESTES	64
4.4.1	<i>Localização da Falta</i>	64
4.4.2	<i>Resistência de falta (R_f)</i>	66
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.	O EFEITO DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NOS RELÉS DE DISTÂNCIA	70
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	70
5.2	INTRODUÇÃO	70
5.2.1	<i>O Relé de Distância durante a Oscilação de Potência</i>	72
5.3	MÉTODOS CONVENCIONAIS PARA DETECÇÃO DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	79
5.3.1	<i>Método das Características Concêntricas (MCC)</i>	79
5.3.2	<i>Método Duplo Blinder (MDB)</i>	83
5.4	MÉTODOS NÃO-CONVENCIONAIS DE DETECÇÃO DE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	86
5.4.1	<i>Método do Cálculo Contínuo da Impedância (MCI)</i>	86
5.4.2	<i>Método da Taxa de variação da Magnitude da Tensão no Centro Elétrico (MVC)</i>	90
5.4.3	<i>Método de Detecção de Oscilações de Potência por meio das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente de Sequência Positiva (MCS)</i>	94
5.4.4	<i>Método de Detecção de Oscilação de Potência por meio da Análise de Transitórios (MAT)</i>	96
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6.	AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	100
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	100
6.2	EXEMPLO DE ATUAÇÃO INDEVIDA DO RELÉ DE DISTÂNCIA DEVIDO A OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA	100
6.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	105
6.3.1	<i>Crítérios Utilizados nos Testes</i>	105
6.3.2	<i>Resultados dos Testes</i>	106
6.3.3	<i>Análise dos Resultados e Discussões</i>	115
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
7.	ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO TOLERANTE A OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	117
7.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	117
7.2	ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO TOLERANTE AS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA	117
7.2.1	<i>Condicionamento do Sinal</i>	118
7.2.2	<i>Algoritmo Detector de Falta</i>	119
7.2.3	<i>Algoritmo Classificador de Falta</i>	121
7.2.4	<i>Algoritmo para Estimação da Distância da Falta</i>	122
7.2.5	<i>Detecção e Bloqueio Contra Oscilações de Potência</i>	126

7.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
8.	RESULTADOS	141
8.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	141
8.2	SISTEMA TESTE 1	141
8.2.1	<i>Testes sem Oscilação de Potência</i>	141
8.2.2	<i>Testes com Oscilações de Potência</i>	147
8.3	SISTEMA TESTE 2	155
8.3.1	<i>Faltas sem Oscilação de Potência</i>	156
8.3.2	<i>Oscilações de Potência sem Faltas</i>	158
8.3.3	<i>Oscilações de Potência com Faltas</i>	163
8.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	166
9.	CONCLUSÕES	168
9.1	CONCLUSÕES	168
9.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
10.	BIBLIOGRAFIA	171
11.	APÊNDICES	176
	<i>APÊNDICE A- Resultados do método de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados (MQC) para estimar da distância da falta</i>	176
	<i>A.1 - Efeito da componente dc</i>	176
	<i>A.2 - Variação da impedância da fonte</i>	176
12.	ANEXOS	179
	ANEXO A - PARÂMETROS DO SISTEMA TESTE 2 (IEEE 14 BARRAS)	179
	<i>A.1 – Dados dos Geradores</i>	179
	<i>A.2 – Dados das Linhas de Transmissão</i>	181
	<i>A.3 – Condições Iniciais do Sistema Teste 2 (Fluxo de Potência)</i>	182

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Há diversos fenômenos que podem originar problemas para a operação dos sistemas elétricos de potência (SEP). Entre os principais problemas, destacam-se os curtos-circuitos nas linhas de transmissão. Os esquemas de proteção tradicionalmente utilizados em linhas de transmissão, de modo a minimizar estes efeitos utilizam relés de distância (HOROWITZ & PHADKE, 2008). Esse tipo de proteção geralmente responde por impedância, admitância ou a reatância medida entre o início da linha, onde o relé é instalado, e o local da falta.

Mudanças repentinas no carregamento de um sistema elétrico podem ser causadas por diversas situações, tais como, curtos-circuitos, desconexão de linhas energizadas, religamento de linhas e pela entrada ou saída de grandes consumidores (HOLBACH, 2006). Esses chaveamentos forçam os geradores a se ajustarem a uma nova condição de operação. Durante esse período ocorrem oscilações no módulo e no ângulo da tensão e da corrente. As linhas de transmissão quando submetidas a estas condições sofrem variações na potência ativa e reativa, caracterizando um fenômeno denominado oscilação de potência.

A impedância aparente vista por um relé de distância durante uma oscilação de potência, adquire caráter oscilatório. Muitas vezes essa variação na impedância faz com que essa migre para o interior da região operacional do relé, causando atuações indevidas na proteção da linha.

Atualmente, os sistemas elétricos de potência apresentam configurações extremamente complexas, com diversas interligações para aumentar a confiabilidade de atendimento aos consumidores e envolvendo, desta forma, áreas geográficas muito amplas. Em virtude dessas interligações, as oscilações de potência geradas em uma região frequentemente atingem outro subsistema. Na literatura técnica são relatados diversos casos de operações indevidas do relé de distância devido a oscilações de potência. Destaca-se o blecaute ocorrido em 14 de agosto de 2003, no Nordeste dos Estados Unidos e Sudeste do Canadá, afetando mais de 50 milhões de usuários (IEEE PSRC WG D6, 2005).

De maneira a prevenir as atuações indevidas do relé de distância são utilizados bloqueadores de oscilações de potência, de forma que a proteção atue somente para as condições de curto-circuito e permaneça inoperante nos casos de oscilação de potência. Em outras palavras, a atuação do relé de distância (função ANSI 21) é bloqueada pelo relé contra oscilações de potência (função ANSI 68) quando o motivo da atuação for uma oscilação.

Diversos métodos para detectar oscilações já foram estudados, cada um com critérios e ajustes diferenciados. Assim como os relés de distância, a proteção contra oscilações de potência em linhas também vem sofrendo constantes avanços na busca por um melhor desempenho. No entanto, as técnicas ainda não apresentam um desempenho satisfatório para todas as condições, como, por exemplo, faltas trifásicas durante condições de oscilações de potência.

1.2 **Objetivos do Trabalho**

No contexto do tema de relés de distância para a proteção de linhas de transmissão, esta tese tem como objetivos gerais:

- abordar os assuntos relacionados ao relé de distância, com ênfase nos problemas que este tipo de proteção pode sofrer devido às oscilações de potência;
- prover informações a respeito das causas e consequências das oscilações de potência, e indicar soluções de modo a eliminar ou, ao menos, minimizar seus efeitos na proteção de linhas de transmissão;
- reunir as diversas técnicas de proteção contra oscilações de potência em um único texto, de maneira a facilitar a utilização de outros métodos não muito conhecidos;
- avaliar qualitativamente e quantitativamente alguns métodos de proteção contra oscilações de potência, de modo a destacar suas vantagens e desvantagens para diferentes cenários;
- identificar em quais circunstâncias um método é mais apropriado do que o outro, de modo a auxiliar os engenheiros de proteção na escolha da melhor alternativa;

Os objetivos específicos são:

- avaliar o desempenho de detectores e classificadores de falta que fazem uso de Morfologia Matemática;
- analisar o comportamento do algoritmo localizador da falta que modela a linha de transmissão por meio de um circuito R-L série e equações diferenciais;
- desenvolver um algoritmo completo de proteção numérica em linhas de transmissão (detecção, classificação e localização) confiável e veloz, utilizando modelo de linha representado por equações diferenciais;
- incorporar no algoritmo desenvolvido uma técnica que elimine os efeitos das oscilações de potência no desempenho do relé de distância.

1.3 **Motivação**

A linha de transmissão é o componente do sistema elétrico de potência com a maior incidência de defeitos, devido a sua extensão física e a sua exposição a intempéries. Por essa razão, aliada a importância das linhas de transmissão que interligam os sistemas elétricos, existe um grande interesse por parte da comunidade técnica e científica no estudo e melhoria do desempenho das proteções de linha de transmissão.

O motivo que leva esta tese abordar a proteção de distância e as oscilações de potência fundamenta-se no fato de que, nos últimos anos, vem crescendo as interligações de sistemas elétricos de potência, sobretudo no Sistema Interligado Nacional (SIN). Atualmente, apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2012).

A principal consequência positiva da interligação do sistema elétrico é o aumento da confiabilidade. No entanto, como consequência negativa, essa prática pode transformar os problemas locais em problemas para todo ou boa parte do sistema elétrico.

Em 10/11/2009, o sistema elétrico brasileiro sofreu desligamentos devido a um problema localizado em uma das linhas que interligam a usina hidrelétrica de Itaipu à região Sudeste. Às 22h13min ocorreu uma perturbação geral no SIN, envolvendo diretamente a região Sudeste/Centro-Oeste e desencadeando desligamentos em série. Este evento resultou em uma interrupção total de aproximadamente 28.800 MW de carga no SIN e 980MW de carga no Paraguai. Não se pode afirmar que foi devido às oscilações de potência que ocorreu os desligamentos em série. O que se sabe é que, como resultado da oscilação de potência

gerada, verificou-se que a região Sul operou com uma frequência de 63,6 Hz por alguns instantes, enquanto que a região Norte e Centro-Oeste com 58,3 Hz. Essa variação de frequência pode ter afetado o desempenho dos relés de distância das linhas de transmissão.

Dependendo da gravidade do distúrbio, que podem ser curtos-circuitos, desconexão de geradores ou linhas, etc, a conseqüente oscilação de potência gerada no local da falta, pode se propagar pelo sistema interligado e levá-lo ao colapso. Uma maneira de minimizar os efeitos das oscilações de potência no sistema é empregar técnicas de proteção de linhas de transmissão imunes as oscilações de potência, ou se utilizar bloqueadores de oscilações. Porém, existem diversos cenários que podem dificultar a ação dos bloqueadores, tais como, tipos de oscilações de potência (frequência de oscilação forte ou fraca), curto-circuito trifásico durante uma condição pré existente de oscilação, etc. Desse modo a maioria das técnicas não é eficiente em todas as hipóteses. Além disso, não existe uma fundamentação teórica clara sobre o fenômeno da oscilação de potência, principalmente no que diz respeito aos ajustes das técnicas de detecção mais empregadas destinadas a detecção do defeito. A parametrização dos métodos, geralmente, é realizada por meio de uma série de testes computacionais, o que demanda muito tempo. Desse modo, ainda há certo grau de incerteza sobre o desempenho dos métodos de proteção contra as oscilações de potência existentes. Tais fatores motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

1.4 Revisão da Literatura

O princípio fundamental do relé de distância tradicional para proteção em linhas é medir a impedância, admitância ou reatância entre o relé e o local da falta e assim determinar se a falta é interna ou externa à zona de proteção (ZIGLER, 1999). O processo de estimação da componente fundamental dos sinais de corrente e tensão, necessários para calcular a impedância, geralmente envolve o tradicional algoritmo baseado na Transformada Discreta de Fourier (MACLAREN & REDFERN, 1975) ou Componentes Simétricas (PHADKE et al., 1979), filtro de Kalman (GIRGIS & MAKRAM, 1988) e expansão ortogonal (SACHDEV & BARIBEAU). Estes algoritmos necessitam em torno de um (1) ciclo na frequência fundamental para estimar o fasor da tensão e corrente. Este tempo pode ser longo, principalmente quando ocorre a saturação do transformador de corrente (SEGUI & BERTRAND, 2001). Além disso, o desempenho destes algoritmos pode ser afetado pela componente exponencial decrescente do curto-circuito (componente *dc*), resultando em atraso

da operação do relé de distância ou até mesmo levando o relé a tomar uma decisão equivocada quanto à operação.

A lógica operacional das técnicas de proteção contra oscilações de potência deve estar integrada à lógica operacional do relé de distância da linha de transmissão. Com o desenvolvimento da tecnologia de microprocessadores, uma variedade de critérios de proteção de linhas de transmissão, tais como, equações diferenciais, ondas viajantes, a Transformada Wavelet, Redes Neurais, Fuzzy, etc, têm sido apresentados como propostas de proteção de linhas de transmissão. A técnica de equações diferenciais se distingue das outras pelo fato de que neste caso, ao invés de se modelar os sinais de tensão e corrente, o método se dedica à modelagem do sistema elétrico em questão (COURY et al., 2007). As técnicas de proteção que fazem uso de equações diferenciais geralmente operam em um tempo inferior às que empregam técnicas fundamentadas na Transformada de Fourier (ALFUHAID & EL-SAYED, 1999). Além disso, não são afetadas pela componente *dc* (OSMAN et al., 2005).

Embora existam diferentes vertentes de pesquisa relacionadas às técnicas de proteção de linhas de transmissão e oscilações de potência, todas possuem o mesmo objetivo, evitar a atuação indevida dos relés de distância. A maioria das técnicas utilizam a filosofia de manter o relé de distância da linha habilitado, e caso ocorra uma oscilação de potência os bloqueadores desabilitam o relé. Nesta condição a maioria das técnicas apresenta bons resultados. Entretanto, caso ocorra uma falta durante a oscilação de potência, o relé de distância deve ser desbloqueado. Nesta condição algumas técnicas não apresentam bons resultados.

Quando ocorre um curto-circuito, a impedância aparente vista pelo relé migra instantaneamente para o interior das regiões características do relé. Porém, quando ocorre uma oscilação de potência, devido à inércia dos geradores, a impedância aparente vista por um relé de distância descreve uma trajetória no plano de impedâncias (*R-X*) mais lenta do que durante uma falta. Assim, Mooney & Fischer (2006) detalham dois métodos clássicos destinados ao bloqueio dos relés de distância durante oscilações. As técnicas são fundamentadas na medição do tempo em que a impedância aparente leva para atravessar determinada área no plano *R-X*. O método das Características Concêntricas é o mais simples. Este utiliza duas regiões concêntricas às zonas de proteção do relé. Outro método que utiliza um critério semelhante é o do Duplo *Blinder*. Nesse, os limites são definidos por retas paralelas a impedância da linha de transmissão no plano *R-X*. Quando a impedância atravessa o *blinder* externo é iniciada a contagem de tempo, a qual acaba quando o *blinder* interno é

alcançado. Se o tempo necessário à impedância para atravessar esta região for maior do que aquele ajustado na lógica do relé, então uma condição de oscilação de potência é detectada e o relé de distância é bloqueado.

Blumschein et al. (2008) propuseram o método Cálculo Contínuo da Impedância. Tal método utiliza critérios como o da continuidade e suavidade. O primeiro avalia o estado da impedância, ou seja, estacionário ou não-estacionário. O segundo verifica o modo como a impedância se move, ou seja, abrupto ou suave. Os dois critérios citados mais a averiguação de que a impedância se encontra em determinada área no plano $R-X$ são responsáveis pela detecção das oscilações de potência.

Diferentemente das técnicas clássicas que usam a taxa de variação da impedância, Benmouyal et al. (2005) detalham o método baseado na magnitude da tensão no centro elétrico e sua taxa de variação. O centro elétrico é definido como o ponto no sistema onde a tensão é zero durante uma abertura angular de 180° (IEEE PSRC WG D6, 2005). Em sistemas de grande porte, o cálculo do centro elétrico pode não ser uma tarefa simples, pois exige conhecimentos sobre a estabilidade transitória do sistema.

Jonsson & Daalder (2001) propuseram um algoritmo para proteção de linhas de transmissão que considera os efeitos das oscilações de potência. O método fundamenta-se em blocos matemáticos lógicos, e faz uso das componentes simétricas e a derivada do ângulo da corrente de sequência positiva.

Seguindo uma filosofia diferente dos métodos anteriores, Moore & Johns (1996) sugeriram um método no qual o relé de distância só opera na presença de transitórios típicos de curto-circuito. Essa técnica utiliza um detector de curto-circuito baseado na transformada discreta de Hartley.

Algumas técnicas bloqueiam o relé de distância corretamente para determinadas frequências, mas não são capazes de desbloquear o relé de distância caso ocorra uma falta durante a oscilação, como por exemplo, as clássicas técnicas Características Concêntricas e duplo Blinder. A maior dificuldade ainda está nas faltas equilibradas ocorridas durante a oscilação, pois, a oscilação de potência também é um fenômeno trifásico equilibrado. Seguindo essa linha de pesquisa, Brahma (2007) utiliza a Transformada Wavelet, e faz uso de treze níveis de frequência dos sinais de tensão e corrente, sendo os níveis de altas frequências responsáveis por detectar as faltas durante a oscilação de potência. Em cada nível de detalhe é calculada a energia armazenada no sinal, sendo para tal utilizada a norma de Frobenius. A

saída do algoritmo proposto, que possui frequência de amostragem de 40,96 kHz, é integrado com a saída do relé de distância convencional.

Reddy & Mohana (2008) utilizam a Transformada Wavelet para capturar as características do sinal e um sistema adaptativo neuro-fuzzy para extrair as informações mais relevantes dos coeficientes gerados pela Transformada Wavelet e tomar decisões quanto ao tipo de falta e oscilação.

Cada um dos métodos citados anteriormente apresenta suas peculiaridades em termos de ajuste e resposta. Portanto, a escolha da melhor alternativa, ou seja, a que apresenta simplicidade nos ajustes e melhores resultados, deve ser realizada de maneira cuidadosa, uma vez que diversas condições de operação do sistema devem ser analisadas.

Alguns trabalhos visam apenas realizar comparação entre diversos métodos apresentados na literatura técnica. Zadeh (2005), por exemplo, avalia os métodos das Características Concêntricas, Magnitude da Tensão no Centro Elétrico, Superposição e Decaimento da Resistência Aparente. O trabalho não inclui todos os tipos de eventos envolvendo oscilações de potência. Segundo o autor, a técnica Decaimento da Resistência Aparente apresentou os melhores resultados. Morais et al. (2009), apresenta uma análise comparativa entre as técnicas Características Concêntricas, Jonsson & Daalder (2001) e Moore & Johns (1996). Segundo os autores, os métodos apresentaram bons resultados quando submetidos a eventos de curtos-circuitos e oscilações de potência de forma separada. No entanto, em alguns casos em que foram testados curtos-circuitos durante oscilações de potência, os métodos apresentam falhas. Nessa mesma linha, Martuscello et al. (2009) avalia o desempenho da proteção de linhas e bloqueadores de oscilação de potência. O fato mais relevante deste trabalho é que foram realizados testes com dados de oscilografias do evento ocorrido em 14 de Agosto de 2003 no nordeste dos Estados Unidos e sudeste do Canadá (IEEE PSRC WG D6, 2005). Ainda neste contexto, Sena et al. (2008) avalia o desempenho dos relés de distância durante eventos de oscilações de potência do sistema elétrico uruguaio.

Morais et al. (2010) analisa o desempenho de três métodos destinados a detecção de oscilação de potência em linhas de transmissão. São eles: Características Concêntricas, Jonsson & Daalder (2001) e o terceiro utiliza como critério principal a variação da magnitude da tensão no centro elétrico (BENMOUYAL et al., 2005). As técnicas de bloqueio da proteção em linhas consideradas neste trabalho apresentaram bons resultados para oscilações fracas, sem a ocorrência de curto-circuito. No entanto, para oscilações fortes, os métodos Características Concêntricas e Jonsson & Daalder (2001) mostraram-se melhores. Para os

casos de faltas durante as oscilações, o método Jonsson & Daalder (2001) apresentou os melhores resultados.

Ainda no contexto de trabalhos comparativos, Bolzan et al. (2010) analisa o desempenho de seis métodos destinados a diferenciar oscilações de potência de curtos-circuitos em linhas de transmissão. Entre as técnicas avaliadas, a técnica fundamentada na magnitude da tensão no centro elétrico e na sua taxa de variação foi a que apresentou melhores resultados, pois é capaz de detectar curtos-circuitos durante oscilações. Também manteve percentuais de atuação semelhantes, tanto para curtos-circuitos trifásicos quanto monofásicos.

1.5 Contribuições da Tese

Com a nova estruturação do setor elétrico, o Operador Nacional do Sistema (ONS) possui a prerrogativa de aplicar multas elevadas quando ocorrer indisponibilidade não programada nos equipamentos ou linhas de transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro. Deste modo, um relé de proteção numérica de linhas de transmissão que consiga detectar as oscilações de potência de maneira confiável é algo de grande valia dentro de uma empresa transmissora, pois evita o desligamento indevido de um ou mais elementos de rede. Logo, a principal contribuição deste trabalho é propor uma nova metodologia de proteção de linhas de transmissão tolerante as oscilações de potência. O aspecto inovador do algoritmo desenvolvido está na utilização da componente *dc* para detectar as faltas entre fases durante as oscilações de potência, visto que as faltas monofásicas podem ser detectadas pela sequência zero.

A técnica desenvolvida tem a capacidade de:

- detectar, classificar e localizar faltas francas e com altos valores de impedância de falta em todo o comprimento da linha de transmissão;
- ser imune as oscilações de potência com frequências de oscilação fracas e fortes;
- detectar, classificar e localizar todos os tipos de falta com a presença de oscilação de potência.

1.6 Organização da Tese

O Capítulo 2 introduz os conceitos básicos da Morfologia Matemática, visto que, a técnica é utilizada em algumas etapas do algoritmo desenvolvido.

No Capítulo 3, são abordadas as principais técnicas de proteção de linhas de transmissão com relés de distância, desde os relés eletromecânicos à tecnologia de relés numéricos. Ainda nesse capítulo são descritas todas as etapas que englobam um relé de distância numérico, isto é, condicionamento do sinal, detecção da falta, classificação da falta e localização do defeito. Além disso, no Capítulo 3 é apresentada uma técnica, fundamentada em Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados, para estimação da localização do defeito.

No Capítulo 4 a técnica de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados, juntamente com outras duas técnicas (Mínimos Quadrados Recursivo e Rede Neural) são avaliadas sob diversos cenários de falta.

No Capítulo 5 são apresentados os fundamentos das oscilações de potência em linhas de transmissão, suas causas e consequências sob o ponto de vista da proteção. Além disso, são apresentadas diversas técnicas que visam evitar a operação indevida do relé de distância durante as oscilações de potência.

O Capítulo 6 realiza uma análise comparativa entre algumas técnicas de proteção contra oscilações de potência em linhas de transmissão apresentadas no Capítulo 5. Também são apresentados os critérios utilizados nas simulações.

O Capítulo 7 apresenta o algoritmo desenvolvido na tese. As etapas do condicionamento do sinal, detecção, classificação e localização da falta são detalhadas. A originalidade do trabalho se encontra na etapa de localização da falta. Nesta etapa, a impedância aparente é calculada por meio da distância da falta e impedância de sequência positiva da linha. Para tornar o algoritmo localizador de falta tolerante a oscilações de potência a componente exponencial decrescente é utilizada.

O Capítulo 8 aborda os resultados e discussões dos testes realizados com algoritmo proposto. Em um primeiro momento o algoritmo é testado em um sistema elétrico simplificado e em uma segunda etapa em um sistema teste maior.

Para finalizar, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

INTRODUÇÃO A MORFOLOGIA MATEMÁTICA

2.1 Considerações Gerais

O presente capítulo introduz os conceitos básicos da Morfologia Matemática (MM), visto que, as etapas de detecção, classificação e localização da falta do algoritmo desenvolvido utilizam operações que envolvem a MM. Em um primeiro momento é realizada uma breve revisão sobre a teoria dos conjuntos, pois, a MM faz uso deste tipo de operação.

A MM é dividida em operações binárias e não binárias, sendo ambas discutidas ao longo do capítulo. Por fim, os principais operadores morfológicos da MM, isto é, dilatação, erosão, abertura e fechamento, são abordados.

2.2 Introdução

A MM se refere ao estudo da estrutura geométrica das imagens. Os mais antigos usos da palavra “morfologia” estão relacionados com linguagem e biologia. Em linguística, morfologia é o estudo da estrutura das palavras. Em biologia, morfologia está relacionada à forma de um organismo. A MM é relativamente recente, foi introduzida em 1964 por Georges Matheron e Jean Serra com estudos na área de petrografia e mineralogia (SERRA, 1982; SERRA, 1988). Atualmente, a MM possui aplicação na área de processamento de imagens, processamento de sinais, bem como, em sistemas elétricos de potência (WU et al., 2009).

Uma maneira para descrever ou analisar a forma de objetos digitais é a morfologia digital. A ideia de morfologia digital está no fato que uma imagem consiste de um conjunto de “*picture elements*” (pixel) que são reunidos em grupos tendo uma forma bidimensional. Assim, certas operações matemáticas em conjuntos de pixels podem ser usadas para ressaltar aspectos específicos das formas, permitindo que sejam contadas ou reconhecidas. A base da MM consiste em extrair as informações relativas à geometria e a topologia de um conjunto desconhecido, no caso de uma imagem, por meio de outro conjunto bem-definido chamado elemento estruturante.

As operações básicas da morfologia digital são a erosão e a dilatação. Na erosão os pixels que não atendem um determinado padrão, definido pelo elemento estruturante, são apagados da imagem. Na dilatação uma pequena área relacionada a um pixel é alterada para um dado padrão, de modo a preencher os vazios existentes na imagem.

2.3 Teoria dos Conjuntos

A teoria dos conjuntos é a base da MM. Assim, antes de conhecer as operações da morfologia algumas definições básicas de conjuntos matemáticos são revisadas.

Conjunto, como o próprio nome diz, é uma coleção de objetos sem repetição. Um conjunto pode ser descrito listando-se os seus elementos em qualquer ordem, por exemplo:

$$A = \{1, 2, 3, 4\}$$

Se um conjunto é muito grande ou infinito, este pode ser descrito através de propriedades dos seus membros, como, por exemplo:

$$X = \{x|x \text{ é um } n^{\text{o}} \text{ inteiro, positivo e par}\}$$

2.3.1 Operação de Conjuntos

Sejam dois conjuntos X e Y:

2.3.1.1 União

A união de dois conjuntos X e Y é o conjunto de elementos que pertencem a X ou Y ou ambos:

$$X \cup Y = \{x|(x \in X) \text{ ou } (x \in Y)\}$$

Exemplo:

Considere dois conjuntos $A = \{1, 3, 5\}$ e $B = \{4, 5, 6\}$, então $A \cup B = \{1, 3, 4, 5, 6\}$.

2.3.1.2 Interseção

A interseção de dois conjuntos X e Y é o conjunto de elementos pertencentes a ambos X e Y:

$$X \cap Y = \{x|(x \in X) \text{ e } (x \in Y)\}$$

Exemplo:

Considere dois conjuntos $A = \{1, 3, 5\}$ e $B = \{4, 5, 6\}$, então $A \cap B = \{5\}$.

2.3.1.3 Diferença

A diferença entre os conjuntos X e Y é o conjunto de elementos que pertencem a X , mas não pertencem a Y :

$$X - Y = \{x | (x \in X) \text{ e } (x \notin Y)\}$$

Exemplo:

Considere dois conjuntos $A = \{1, 3, 5\}$ e $B = \{4, 5, 6\}$, então $A - B = \{1, 3\}$ e $B - A = \{4, 6\}$

2.3.1.4 Complemento

O complemento do conjunto X é o conjunto de elementos não pertencentes ao conjunto X .

$$X^c \text{ ou } X' = \{x | x \notin X\}$$

Exemplo:

Seja o conjunto $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ e $B = \{1, 3, 5\}$, então $B' = \{2, 4\}$ é o complemento de B em relação a A .

2.3.1.5 Disjunção

São disjuntos quando não existem elementos comuns entre eles.

$$X \cap Y = \emptyset, \text{ então } X \text{ e } Y \text{ são disjuntos}$$

Exemplo:

Seja o conjunto $A = \{1, 4, 5\}$ e $B = \{2, 6\}$, então A e B são disjuntos.

2.4 Operações Básicas da Morfologia Matemática

As operações morfológicas estão divididas em operações binárias, no caso de imagem, pixels pretos e brancos somente, e operações sobre imagens coloridas ou de tons de cinza. De modo a utilizar a MM em imagens que não são binárias, os operadores morfológicos devem ser estendidos aos operadores morfológicos em escalas de cinza. Para cada operação binária existente há uma correspondente para tons de cinza.

2.4.1 Dilatação Binária

A dilatação é uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando adição vetorial, seu símbolo é " \oplus ". Como o nome diz, seu resultado será uma imagem "engordada".

A dilatação de um conjunto A pelo conjunto B é definida por:

$$A \oplus B = \cup_{b \in \check{B}} (A)_b = \cup_{b \in B} (A)_{-b} = \cup_{b \in B} \{x | x = a - b, a \in A\}$$

Onde:

A representa a imagem sendo processada;

B é um segundo conjunto chamado de elemento estruturante, ou estrutural, e sua composição define a natureza específica da dilatação.

\check{B} é a reflexão de B ou uma rotação de 180° sobre a origem.

A dilatação expande uma imagem, sendo assim, ela pode ser representada por uma operação de união.

Exemplo:

Seja o conjunto $A = \{(1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,2), (3,3), (3,4), (4,3)\}$ e o elemento estruturante $B = \{(0,0), (0,1), (1,0)\}$.

Logo $\check{B} = \{(0,0), (-1,0), (0,-1)\}$.

Para um melhor entendimento das operações, podemos representar os conjuntos A e B e \check{B} pelas imagens binárias mostradas na Figura 2.1.

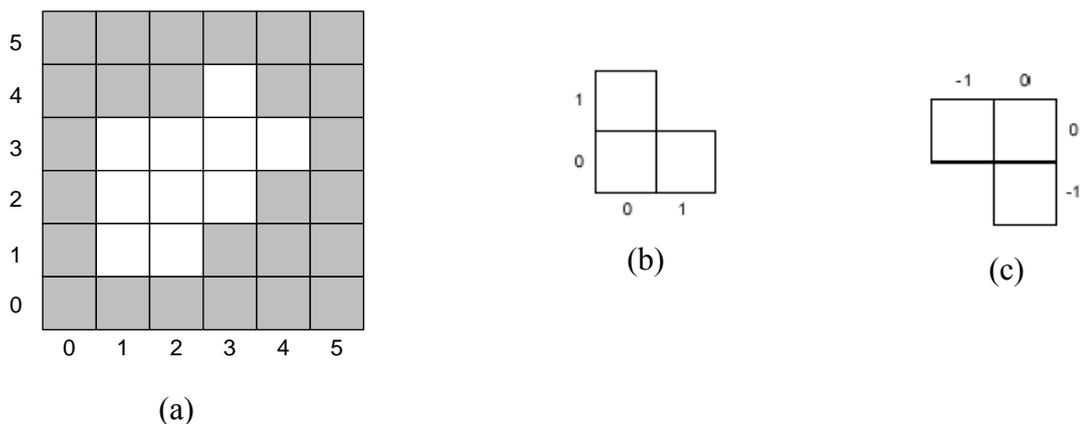


Figura 2.1 – Imagens binárias dos conjuntos: (a) A, (b) B e (c) \check{B}

Detalhando a sequência da operação $A \oplus B$:

Passo 1: $(A)_{(0,0)}$

$A - (0,0) =$

$(1,1) - (0,0) = (1,1)$

$(1,2) - (0,0) = (1,2)$

$(1,3) - (0,0) = (1,3)$

$(2,1) - (0,0) = (2,1)$

$(2,2) - (0,0) = (2,2)$

$(2,3) - (0,0) = (2,3)$

$$(3,2) - (0,0) = (3,2)$$

$$(3,3) - (0,0) = (3,3)$$

$$(3,4) - (0,0) = (3,4)$$

$$(4,3) - (0,0) = (4,3)$$

$$A - (0,0) = \{(1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,2), (3,3), (3,4), (4,3)\}$$

A imagem binária da operação $(A)_{(0,0)}$ é a própria imagem de A mostrada na Figura 2.1 – (a).

Passo 2: $(A)_{(1,0)}$

$$A - (1,0) =$$

$$(1,1) - (1,0) = (0,1)$$

$$(1,2) - (1,0) = (0,2)$$

$$(1,3) - (1,0) = (0,3)$$

$$(2,1) - (1,0) = (1,1)$$

$$(2,2) - (1,0) = (1,2)$$

$$(2,3) - (1,0) = (1,3)$$

$$(3,2) - (1,0) = (2,2)$$

$$(3,3) - (1,0) = (2,3)$$

$$(3,4) - (1,0) = (2,4)$$

$$(4,3) - (1,0) = (3,3)$$

$$A - (1,0) = \{(0,1), (0,2), (0,3), (1,1), (1,2), (1,3), (2,2), (2,3), (2,4), (3,3)\}$$

A Figura 2.2 mostra o resultado da imagem binária da operação $(A)_{(1,0)}$.

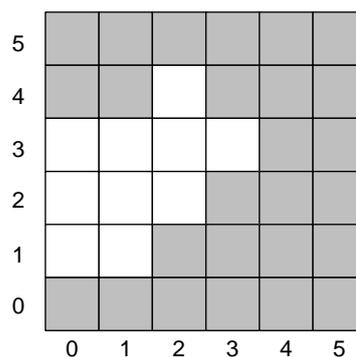


Figura 2.2 – Imagem binária da operação $(A)_{(1,0)}$

Passo 3: $(A)_{(0,1)}$

$$A - (0,1) =$$

$$(1,1) - (0,1) = (1,0)$$

$$(1,2) - (0,1) = (1,1)$$

$$(1,3) - (0,1) = (1,2)$$

$$(2,1) - (0,1) = (2,0)$$

$$(2,2) - (0,1) = (2,1)$$

$$(2,3) - (0,1) = (2,2)$$

$$(3,2) - (0,1) = (3,1)$$

$$(3,3) - (0,1) = (3,2)$$

$$(3,4) - (0,1) = (3,3)$$

$$(4,3) - (0,1) = (4,2)$$

$$A - (0,1) = \{(1,0), (1,1), (1,2), (2,0), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2), (3,3), (4,2)\}$$

A Figura 2.3 mostra o resultado da imagem binária da operação $(A)_{(0,1)}$.

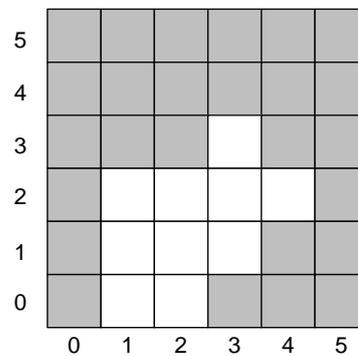


Figura 2.3 – Imagem binária da operação $(A)_{(0,1)}$

Por fim, fazendo a operação $(A)_{(0,0)} \cup (A)_{(1,0)} \cup (A)_{(0,1)}$, isto é, a união das imagens mostradas nas Figuras 2.1 – (a), 2.2 e 2.3, resulta na dilatação de A por B, conforme mostra a Figura 2.4, ou seja:

$$A \oplus B = \{(0,1), (0,2), (0,3), (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4), (3,1), (3,2), (3,3), (3,4), (4,2), (4,3)\}$$

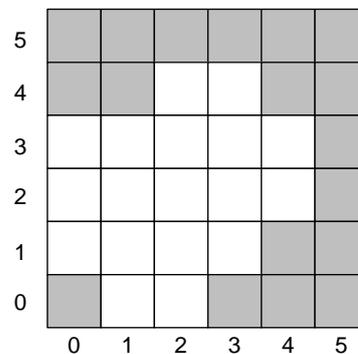


Figura 2.4 – Imagem binária da dilatação de A por B

2.4.2 Erosão Binária

A erosão basicamente encolhe uma imagem e pode ser vista com uma transformação morfológica que combina dois conjuntos usando vetores de subtração. É expressa como a interseção de A e B e seu símbolo é " \ominus ".

A erosão da imagem A pelo elemento estruturante B pode ser definida como:

$$A \ominus B = \bigcap_{b \in \tilde{B}} (A)_b = \bigcap_{b \in B} (A)_{-b} = \bigcap_{b \in B} \{x | x = a - b, a \in A\}$$

Exemplo:

Utilizando os mesmos conjuntos A e B apresentados no exemplo da subseção 2.4.1, o resultado da operação da erosão $A \ominus B$ é:

$$A \ominus B = \{(1,1), (1,2), (2,2), (3,3)\}$$

ou seja, $(A)_{(0,0)} \cap (A)_{(1,0)} \cap (A)_{(0,1)}$. Esta operação também pode ser vista por meio da interseção entre as Figuras 2.1 – (a), 2.2 e 2.3, conforme mostra a Figura 2.5.

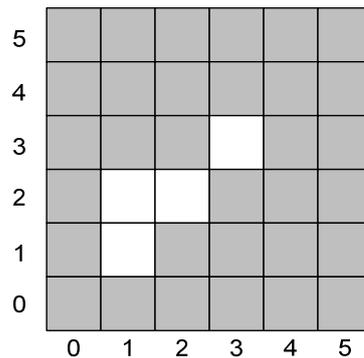


Figura 2.5 – Imagem binária da erosão de A por B

2.5 Morfologia Matemática em Escala de Cinza

De modo a utilizar a MM no processamento de imagens e sinais não binários, os operadores morfológicos precisam ser estendidos em escala de cinza (WU et al., 2009). Ao invés de executar as operações de dilatação e erosão por meio de união e interseção no caso de imagens ou sinais binários, na escala de cinza, uniões se tornam máximos e interseções se tornam mínimos.

O princípio básico do funcionamento da MM no processamento de sinais em tons de cinza segue a mesma ideia do caso binário. Ou seja, o sinal é processado por uma função denominada elemento estruturante. Por meio de uma janela móvel, a função estruturante

“desliza” pelo sinal de modo a detectar características específicas na vizinhança de cada amostra do sinal. O cálculo matemático envolvido na MM inclui apenas adição, subtração, e operações de máximo e mínimo. Logo, quando processam o mesmo sinal, os operadores morfológicos calculam os fasores de tensão e corrente de forma mais rápida que as técnicas de transformada tradicionais, tais como, transformadas de Fourier, Wavelet, Kalman, etc (WU et al., 2009).

Agora, um pixel pode ter qualquer valor inteiro, assim a facilidade de considerar a imagem como um conjunto desaparece. Sendo f o sinal a ser processado e g o elemento estruturante, as operações de dilatação e erosão são definidas por (WU et al., 2009):

$$f \oplus g(x) = \max_s \{f(x+s) + g(s) | (x+s) \in D_f, s \in D_g\}$$

$$f \ominus g(x) = \min_s \{f(x+s) - g(s) | (x+s) \in D_f, s \in D_g\}$$

Sendo D_f e D_g as definições de domínio de f e g , respectivamente.

Supondo que o domínio do elemento estruturante g é $D_g = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$. A operação de dilatação $f \oplus g(x)$ é dada por:

$$f \oplus g(x) = \max\{f(x-2) + g(-2); f(x-1) + g(-1); f(x-0) + g(0); f(x+1) + g(1); f(x+2) + g(2)\}$$

e a operação de erosão $f \ominus g(x)$ é definida por:

$$f \ominus g(x) = \min\{f(x-2) - g(-2); f(x-1) - g(-1); f(x-0) - g(0); f(x+1) - g(1); f(x+2) - g(2)\}$$

Um pseudo código de dilatação e erosão pode ser encontrado em (WU et al., 2009).

Exemplo:

Seja uma função f que origina o sinal com 10 amostras mostrado na Figura 2.6. Utilizando um elemento estrutural $g(s) \equiv 0$ com tamanho 3, ou seja, $g(-1) = g(0) = g(1) = 0$.

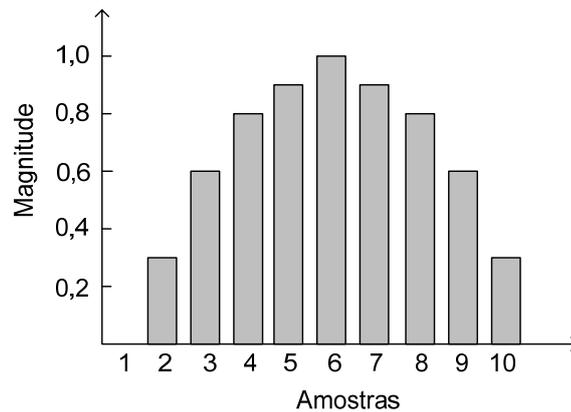


Figura 2.6 – Sinal da função f

Detalhando a operação $f \oplus g(x)$:

Para a amostra $x = 1$:

$$\begin{aligned}
 f \oplus g(1) &= \max\{f(1-1) + g(-1), f(1) + g(0), f(1+1) + g(1)\} \\
 &= \max\{f(0) + g(-1), f(1) + g(0), f(2) + g(1)\} \\
 &= \max\{0; 0; 0,3\} \\
 f \oplus g(1) &= 0,3
 \end{aligned}$$

Para a amostra $x = 2$:

$$\begin{aligned}
 f \oplus g(2) &= \max\{f(2-1) + g(-1), f(2) + g(0), f(2+1) + g(1)\} \\
 &= \max\{f(1) + g(-1), f(2) + g(0), f(3) + g(1)\} \\
 &= \max\{0; 0,3; 0,6\} \\
 f \oplus g(2) &= 0,6
 \end{aligned}$$

Raciocinando de forma análoga com as outras amostras:

$$\begin{aligned}
 f \oplus g(3) &= 0,8 \\
 f \oplus g(4) &= 0,9 \\
 f \oplus g(5) &= 1,0 \\
 f \oplus g(6) &= 1,0 \\
 f \oplus g(7) &= 1,0 \\
 f \oplus g(8) &= 0,8 \\
 f \oplus g(9) &= 0,6 \\
 f \oplus g(10) &= 0,3
 \end{aligned}$$

Deste modo a operação de dilatação $f \oplus g(x)$ resulta no sinal mostrado na Figura 2.7.

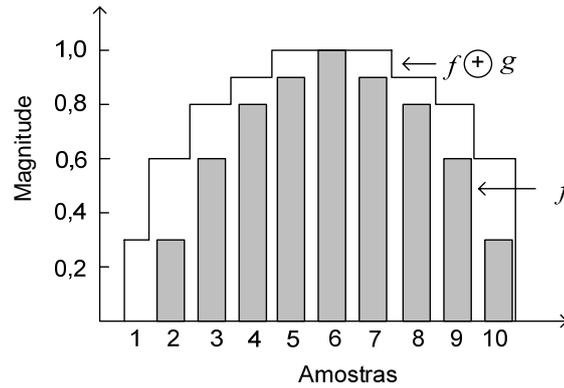


Figura 2.7 – Função f dilatada

Detalhando a operação $f \ominus g(x)$:

Para a amostra $x = 1$:

$$\begin{aligned} f \ominus g(1) &= \min\{f(1-1) + g(-1), f(1) + g(0), f(1+1) + g(1)\} \\ &= \min\{f(0) + g(-1), f(1) + g(0), f(2) + g(1)\} \\ &= \min\{0; 0; 0,3\} \\ f \ominus g(1) &= 0,0 \end{aligned}$$

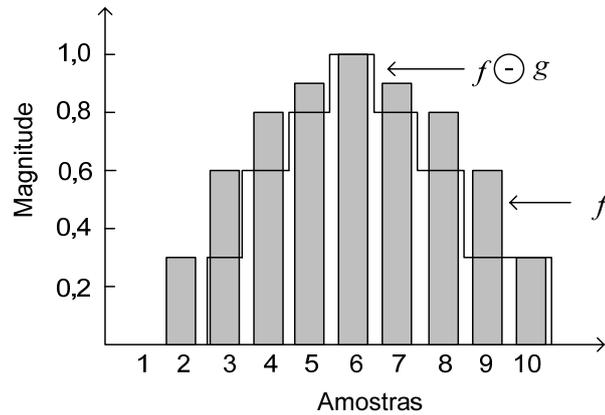
Para a amostra $x = 2$:

$$\begin{aligned} f \ominus g(2) &= \min\{f(2-1) + g(-1), f(2) + g(0), f(2+1) + g(1)\} \\ &= \min\{f(1) + g(-1), f(2) + g(0), f(3) + g(1)\} \\ &= \min\{0; 0,3; 0,6\} \\ f \ominus g(2) &= 0,0 \end{aligned}$$

Raciocinando de forma análoga com as outras amostras:

$$\begin{aligned} f \ominus g(3) &= 0,3 \\ f \ominus g(4) &= 0,6 \\ f \ominus g(5) &= 0,8 \\ f \ominus g(6) &= 0,9 \\ f \ominus g(7) &= 0,8 \\ f \ominus g(8) &= 0,6 \\ f \ominus g(9) &= 0,3 \\ f \ominus g(10) &= 0,3 \end{aligned}$$

Deste modo a operação de dilatação $f \ominus g(x)$ resulta no sinal mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Função f erodida

2.6 Operadores Adicionais

Conforme já mencionado, os principais operadores utilizados na MM são a dilatação e erosão. No entanto, existem outras operações aplicadas na MM, sendo a maioria delas derivadas da dilatação e erosão, tais como: abertura, fechamento, gradiente morfológico, acerto, erro, engorda, emagrecimento, esqueletonização, limiarização, etc. O presente trabalho faz uso de apenas dois destes operadores adicionais que são as operações de abertura e fechamento. Sendo assim, somente estes serão abordados.

2.6.1 Abertura e Fechamento

A abertura em geral suaviza o contorno de uma imagem ou sinal, quebra estreitos e elimina proeminências delgadas. A abertura usa uma erosão seguida de uma dilatação usando o mesmo elemento estruturante. A definição de uma operação de abertura em MM em escala de cinza é dada por (WU et al., 2009):

$$f \circ g = (f \ominus g) \oplus g$$

Sendo f o sinal a ser processado, g é o elemento estrutural e " \circ " o símbolo que representa uma operação de abertura.

O fechamento elimina pequenos vazios de uma imagem, estas operações podem remover muitos dos pixels brancos com ruídos. Em outras palavras, o fechamento trabalha de modo oposto ao método abertura. O fechamento usa uma dilatação seguida de uma erosão usando o mesmo elemento estruturante, isto é:

$$f \cdot g = (f \oplus g) \ominus g$$

Sendo f o sinal a ser processado, g é o elemento estruturante e " \cdot " o símbolo que representa uma operação de fechamento.

Usando a função f , mostrada na Figura 2.6, e o elemento estrutural $g(s) \equiv 0$ com tamanho 3, ou seja, $g(-1) = g(0) = g(1) = 0$, o sinal de uma operação de abertura e fechamento resulta nas Figuras 2.9 e 2.10, respectivamente.

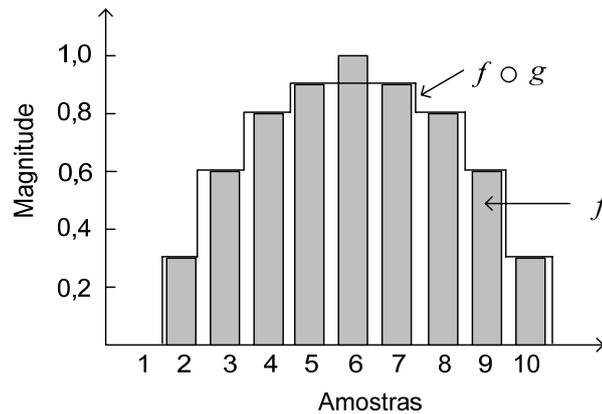


Figura 2.9– Resultado da operação abertura

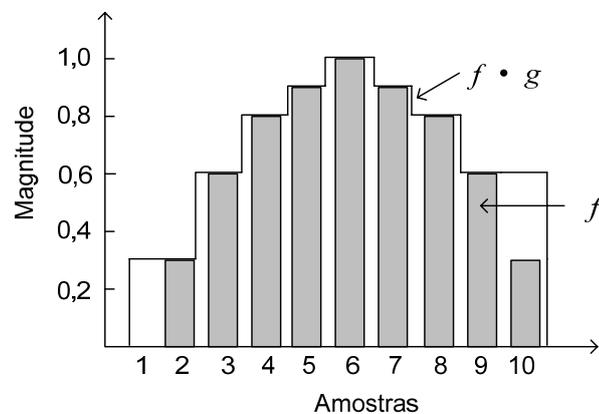


Figura 2.10– Resultado da operação fechamento

2.7 Considerações Finais

O presente capítulo abordou os conceitos básicos da MM destacando seus dois operadores principais, isto é, dilatação e erosão. Exemplos de operações binárias e operações sobre uma função não binária foram realizados.

Na área do processamento de sinais, a MM processa o sinal diretamente no domínio do tempo, em contraste com a maioria das técnicas de filtragem, como, por exemplo,

Transformada de Fourier, que realiza suas funções no domínio da frequência. Além disso, não é restrita a sinais periódicos, isto é, pode ser utilizada em sinais transitórios não periódicos.

No contexto do algoritmo de proteção de linhas de transmissão proposto, a MM processa os sinais instantâneos das correntes de fase, de modo a detectar e classificar a falta. Além disso, a MM é utilizada como critério adicional para diferenciar as oscilações de potência das faltas.

Capítulo 3

PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE RELÉS DE DISTÂNCIA

3.1 Considerações Gerais

Os relés de distância constituem a proteção principal das linhas de transmissão de energia elétrica, e servem como proteção de retaguarda para diversos equipamentos do sistema elétrico de potência, tais como, geradores, transformadores, barramentos e alimentadores. Entre as principais vantagens deste tipo de relé quando comparado com outros são: ajuste de tempo independente do nível de curto-circuito, a não necessidade de comunicação, a facilidade na coordenação com outros relés de equipamentos e linhas adjacentes, e também, é menos suscetível às mudanças do carregamento do sistema e condições de operação. O presente capítulo abordará de forma sucinta as técnicas precursoras relacionadas à proteção de distância nas linhas de transmissão, isto é, fundamentadas em relés eletromecânicos, e discutirá com mais ênfase as técnicas mais modernas, utilizadas nos relés microprocessados.

3.2 Proteção de Linhas de Transmissão Clássica

Desde 1920, quando o relé de distância do tipo eletromecânico foi introduzido, a proteção de distância vem sofrendo avanços (ZIEGLER, 1999). O relé de distância (função ANSI 21/21N) recebeu este nome genérico, devido à sua filosofia operacional ser fundamentada na impedância, admitância ou reatância vista pelo relé. Como estes parâmetros são proporcionais ao comprimento da linha, surge o nome do relé.

Uma vez que os relés de distância medem impedâncias, é importante que suas características de operação sejam traçadas no plano $R-X$. Essa providência facilita bastante a sua aplicação, uma vez que se pode relacionar a impedância da carga e da falta, com a

impedância medida pelo relé para avaliar o desempenho da proteção. Os ângulos das impedâncias medidos por esses relés dependem dos sentidos (sinais) dos fluxos de potências ativas e reativas no elemento protegido. As impedâncias medidas se apresentarão em um dos quadrantes do plano $R-X$ conforme ilustra a Figura 3.1.

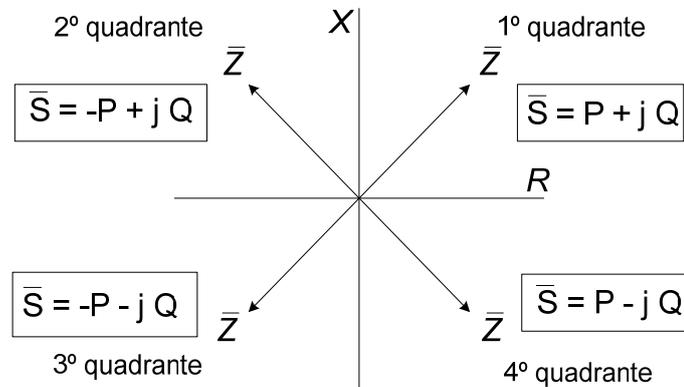


Figura 3.1 – Localização de \bar{Z} no plano $R-X$ de acordo com o fluxo de potência

As principais características dos relés eletromecânicos podem ser descritas a partir de suas respectivas equações de conjugado. O conjugado de fechamento do relé de distância, devido à interação dos fluxos magnéticos originados pelas grandezas de corrente elétrica, e tensão elétrica, é descrito de forma universal pela equação (3.1) (HOROWITZ & PHADKE, 2008).

$$C = K_1 I^2 + K_2 V^2 + K_3 VI \cos(\alpha - \tau) - K_4 \quad (3.1)$$

Onde:

C é o conjugado operacional;

I é o valor eficaz da corrente elétrica;

V é o valor eficaz da tensão elétrica;

α é defasagem angular entre tensão e corrente;

τ é o ângulo de máximo conjugado;

K_1, K_2, K_3 e K_4 são constantes.

Selecionando de forma apropriada os valores das constantes K_1, K_2, K_3 e K_4 da equação (3.1), pode-se obter uma variedade de relés de distância, dentre os quais cita-se (HOROWITZ & PHADKE, 2008):

- (i) Relé de impedância;
- (ii) Relé de admitância;
- (iii) Relé de reatância;

- (iv) Relé de impedância ou admitância modificado.

3.3 Relés de Estado Sólido

As características operacionais obtidas com a tecnologia dos relés eletromecânicos eram basicamente retas e círculos. Com a necessidade de sistemas de proteção mais confiáveis, surgiram, no final da década de 1950, os relés estáticos, baseados em componentes de estado sólido tais como diodos e transistores. Eles incorporaram todas as características dos relés eletromecânicos e, devido à facilidade que a nova tecnologia oferecia, incluíram variações nas geometrias circulares, tais como a característica quadrilateral, poligonal, lenticular, tomate ou até personalizadas. Na realidade, algumas destas variações podem ser obtidas com relés eletromecânicos, através da combinação de dois ou mais relés, naturalmente a um custo mais elevado.

Em virtude de possuírem uma limitada tolerância a temperaturas extremas e umidade, principalmente se comparados aos eletromecânicos, os relés de estado sólido vêm gradativamente sendo substituídos por relés numéricos. A Figura 3.2 mostra no plano R - X a característica operacional dos relés de distância modificados mais utilizados (HOROWITZ & PHADKE, 2008).

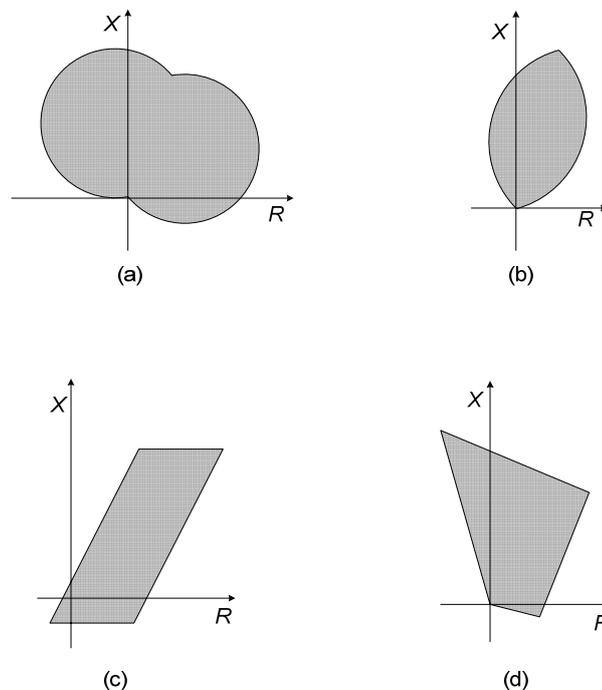


Figura 3.2 – Relés de distância modificados: (a) tomate; (b) lenticular; (c) quadrilateral; (d) poligonal

3.4 Relés Numéricos

Com o desenvolvimento da tecnologia de microprocessadores na década de 1970, deu-se início a evolução dos relés de distância numéricos, ou microprocessados. Entre os principais benefícios esperados com o uso da proteção digital pode-se destacar (COURY et al., 2007): o custo, a confiabilidade e autodiagnose, integração digital, a flexibilidade funcional e a possibilidade de implementação de técnicas inteligentes.

A tecnologia de relés numéricos possibilitou que a proteção de sistemas elétricos de potência possa ser realizada por uma série de metodologias distintas. Entre os diversos métodos destinados à proteção numérica de linhas de transmissão, uma das técnicas mais utilizadas segue a filosofia dos relés eletromecânicos. No entanto, ao invés de se ter critérios operacionais por meio de equações de conjugado, os relés são fundamentados em algoritmos que calculam o valor da impedância aparente vista pelo relé.

Independente do tipo de metodologia utilizada na proteção digital de linhas de transmissão, isto é, estimação de componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente, equações diferenciais, ondas viajantes, etc, o relé do tipo numérico é desenvolvido dentro de um contexto de tarefas que engloba:

- o condicionamento do sinal;
- a detecção da falta;
- a classificação da falta;
- a estimação distância de falta.

3.4.1 Condicionamento do Sinal

Os relés digitais são constituídos de subsistemas com funções bem definidas. A Figura 3.3 apresenta o diagrama de blocos de um relé numérico. A linha tracejada na parte superior da Figura 3.3 indica o limite do pátio da subestação. Todos os outros equipamentos estão dentro da sala de operação.

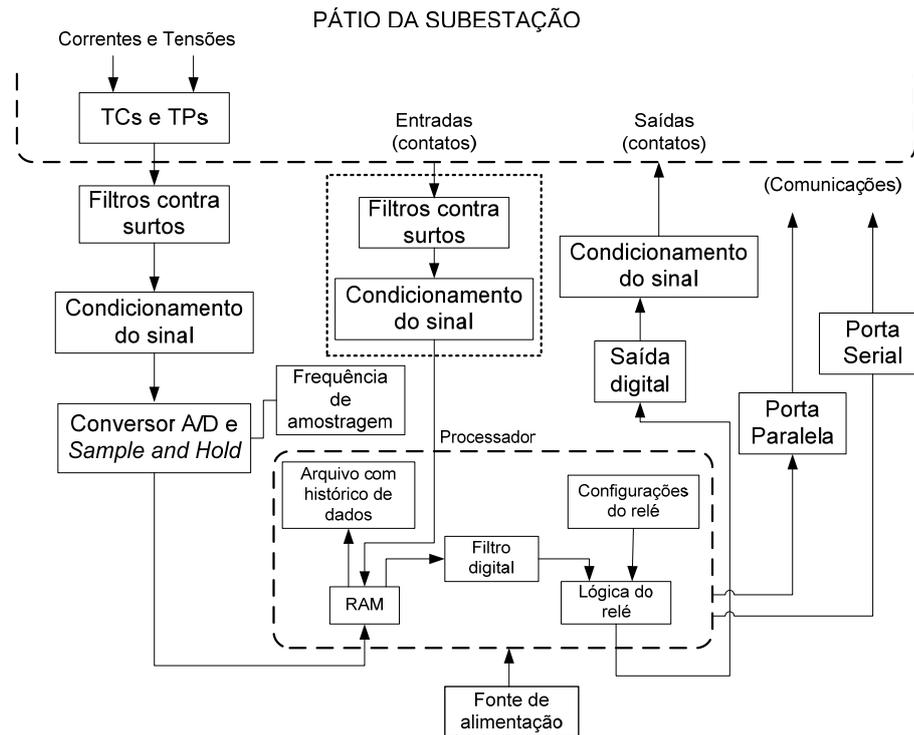


Figura 3.3 - Subsistemas de um relé numérico

Uma vez que os sinais analógicos obtidos do sistema assumem valores bastante elevados (kA e kV) é necessário utilizar transformadores para reduzir esses sinais aos níveis compatíveis com os relés de proteção, os quais são padronizados para correntes de 5A ou 1A e tensão de linha de 115 V ou 120 V, dependendo da norma utilizada (KINDERMAN, 2005). Esses transdutores são denominados de Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs).

É importante que os TCs sejam bem dimensionados, de modo a não saturarem para elevadas correntes de curto-circuito. Um TC com um núcleo saturado distorce a forma de onda do sinal no terminal secundário, podendo causar a má atuação dos relés a ele conectados (SANTOS et al., 2010).

Do mesmo modo, os TPs reproduzem proporcionalmente, no seu circuito secundário, a tensão do circuito primário. Em geral, os TPs são dispositivos de alta exatidão e com boa resposta transitória (IEEE TUTORIAL COURSE, 1979). Em linhas de transmissão com tensão até 69 kV, o TP pode ser utilizado. Com o aumento do nível de tensão, devido à classe de isolamento, já compensa utilizar um dispositivo auxiliar, denominado de Divisor Capacitivo de Potencial (DCP) (KINDERMAN, 2005).

Os sinais analógicos provenientes dos TCs e TPs devem ser submetidos a uma filtragem contra surtos de alta tensão, os quais são ocasionados por faltas, operações de chaveamento no sistema de potência, descargas atmosféricas, entre outros. Após essa filtragem, é necessário realizar um condicionamento dos sinais, ou seja, os sinais analógicos provenientes dos TCs e TPs devem ser convertidos para sinais de tensão que estejam em níveis adequados para a conversão analógico-digital, que é feita pelo conversor Analógico-Digital (A/D). Usualmente, a entrada de um conversor A/D é restrita a valores de ± 10 V (PHADKE & THORP, 2009).

Após estas etapas, os dados já amostrados e digitalizados são enviados para a memória RAM (Memória de Acesso Aleatório), que armazena temporariamente esses dados e os envia para um arquivo de histórico de dados (memória permanente), para posterior análise. Além disso, a memória RAM também acumula resultados intermediários dos algoritmos de proteção.

Como os dados amostrados são corrompidos por ruídos, componentes harmônicas e transitórias, esses não podem ser utilizados diretamente pelos algoritmos do relé. Visto que, na maioria dos casos, os algoritmos requerem somente a componente de frequência fundamental. Dessa forma, é necessário reter somente a componente de interesse dos sinais de entrada amostrados. Essa função é desempenhada pelo filtro digital, que é essencial em todos os relés numéricos.

Desse modo, as principais etapas pelas quais os sinais obtidos do sistema de potência devem passar até se tornarem adequados ao relé, ilustradas na Figura 3.4 são: amostragem periódica, filtro *anti-aliasing*, *sample-and-hold*, multiplexador e conversor A/D.

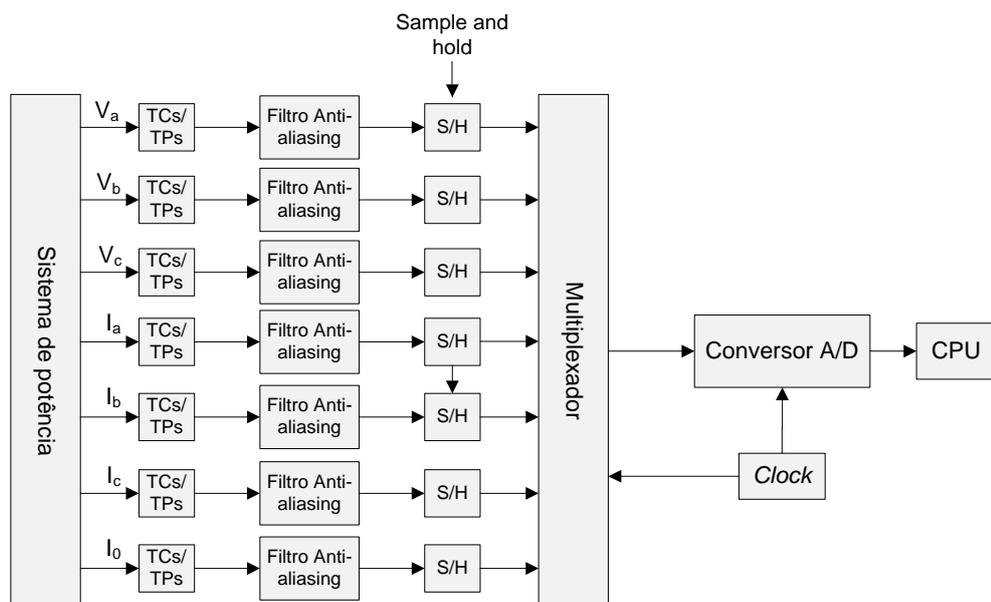


Figura 3.4 – Etapas envolvidas na digitalização dos sinais analógicos

3.4.1.1 Amostragem periódica

Uma das primeiras decisões a serem tomadas no desenvolvimento e utilização de relés numéricos é a taxa de amostragem do processamento do sinal. A amostragem pode ser definida como o processo de converter um sinal contínuo no tempo, tal como um sinal de corrente ou de tensão, em um sinal discreto no tempo (RANSIK, 1998). A maneira mais comum de fazer essa conversão é por meio da amostragem periódica, em que uma sequência de amostras, $x[n]$, é obtida a partir de um sinal contínuo no tempo, $x_c(t)$, de acordo com a seguinte relação (OPPENHEIM, 1999):

$$x[n] = x_c(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (3.2)$$

Onde:

T é o período de amostragem e seu recíproco, $f_s=1/T$, é a frequência de amostragem, em amostras por segundo ou Hz.

O sistema que implementa a operação da equação (3.2) pode ser visto como um conversor ideal de tempo contínuo para tempo discreto (C/D). Na prática, a amostragem é implementada por um conversor analógico-digital (A/D), que é uma aproximação do conversor C/D ideal.

É interessante ressaltar que a diferença de tempo (Δt) entre uma amostra e outra, determina o tempo que o processador tem para completar a sua rotina de cálculo. Uma amostragem de 12 amostras por ciclo, por exemplo, resulta em um Δt de 1,3889 ms na frequência de 60 Hz. Nessa mesma frequência, um sistema com uma taxa de amostragem igual a 96 resulta em um Δt igual a 0,1736 ms. Ou seja, taxas de amostragem mais elevadas exigem que se tenha um processador mais veloz e/ou algoritmos mais simples.

3.4.1.2 Filtro Anti-Aliasing

Os sinais de tempo contínuo podem ser processados por meio de suas amostras no tempo discreto. Para isso, é importante manter a taxa de amostragem suficientemente alta, de modo que o sinal original possa ser reconstruído, sem erros (ou com um erro tolerável), a partir de suas amostras (LATHI, 1998). A determinação da menor taxa de amostragem requerida para amostrar um determinado sinal é dada pelo Teorema da Amostragem de Nyquist (OPPENHEIM, 1999).

Os sinais obtidos pelos TCs e TPs nunca serão estritamente limitados em frequência, devido à existência da componente dc , ruídos, entre outros. Assim, quando o sinal for

amostrado, as componentes de alta frequência serão falsamente representadas por componentes de baixa frequência – *aliasing* (OPPENHEIM, 1999). Para evitar esse fenômeno, o sinal deve ser forçado a ser limitado em frequências abaixo da metade da frequência de amostragem. Isso é conseguido com uma filtragem do sinal, do tipo passa-baixas, antes do mesmo ser amostrado. O filtro passa-baixas que precede o processo de conversão analógico-digital é denominado filtro *anti-aliasing*.

A característica de um filtro passa-baixas ideal com frequência de corte f_c é mostrada na Figura 3.5 (a) enquanto o comportamento real desse filtro é apresentado na Figura 3.5 (b).

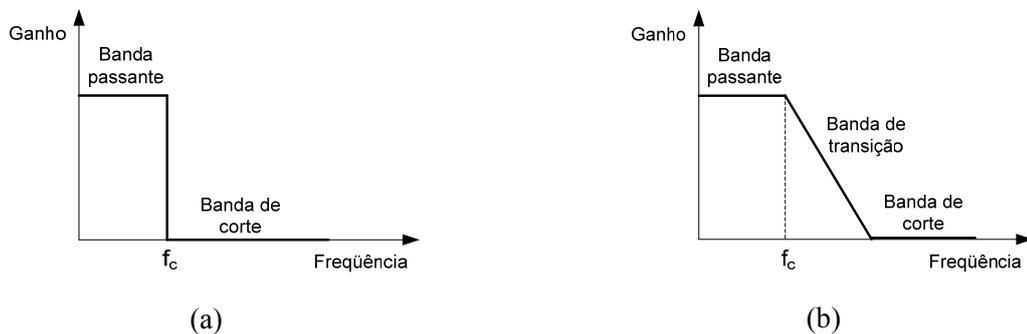


Figura 3.5 – Característica de um filtro passa-baixas: (a) ideal, (b) real

Um filtro passa-baixas pode ter a banda passante e de corte com características planas ou oscilatórias (com *ripple*). A seguir são apresentadas as características dos principais filtros passa-baixas.

- *Bessel e Butterworth*: banda passante e de corte planas.
- *Chebyshev*: banda passante oscilatória e banda de corte plana.
- *Chebyshev inverso*: banda passante plana e banda de corte oscilatória.
- *Elípticos*: banda passante e de corte oscilatórias.

As respostas de magnitude desses filtros são apresentadas na Figura 3.6 (WINDER, 2002). Devido a sua resposta, o filtro Butterworth é o mais utilizado nas aplicações de proteção dos sistemas elétricos de potência.

3.4.1.3 Sample-and-hold

O conversor A/D inicia e termina a conversão do sinal a cada T segundos. No entanto, a conversão não é instantânea, e por esta razão, os sistemas de conversão A/D incluem um circuito *sample-and-hold*. A forma de onda de saída desse circuito é formada por degraus, sendo que os valores amostrados são mantidos constantes durante o período de amostragem

de T segundos (OPPENHEIM, 1999). Uma representação do sinal de entrada, $x_c(t)$, e de saída, $x_0(t)$, do circuito *sample-and-hold* é mostrada na Figura 3.7.

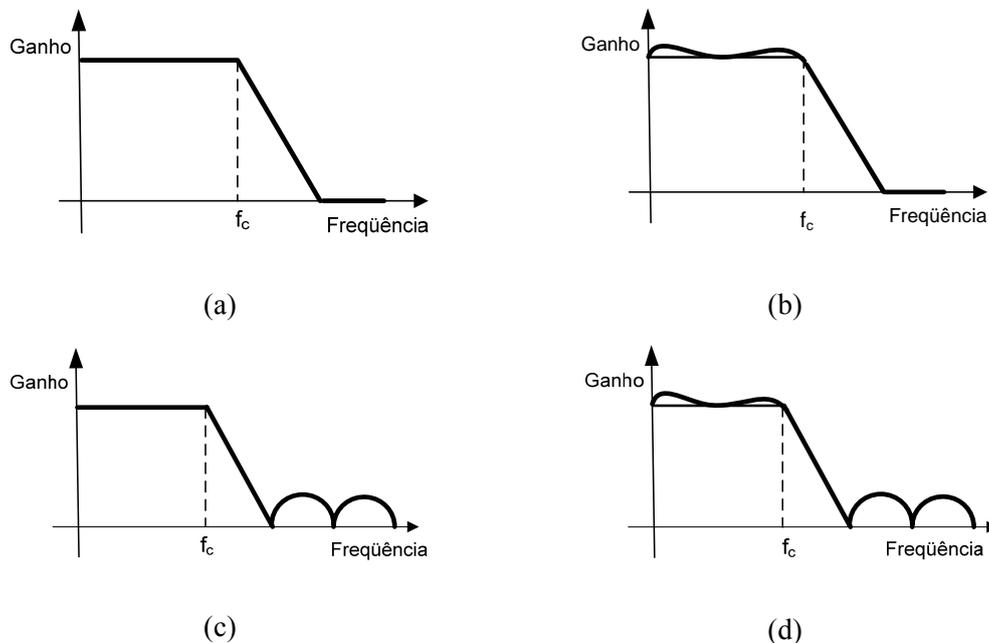


Figura 3.6 – Respostas da banda passante e banda de corte. (a) Banda passante plana (Butterworth e Bessel), (b) Banda passante oscilatória (Chebyshev), (c) Banda de corte oscilatória (Chebyshev Inverso), (d) Banda passante e de corte oscilatória (Elíptico)

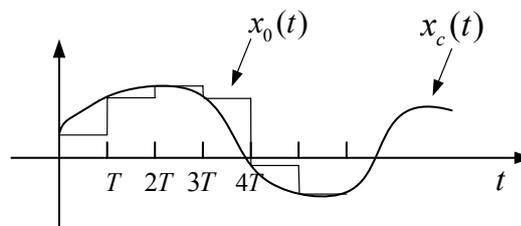


Figura 3.7 – Representação dos sinais de entrada e saída de um circuito *sample-and-hold*

Os circuitos *sample-and-hold* são projetados para amostrar $x_c(t)$ tão instantaneamente quanto possível e armazenar o valor amostrado da maneira mais constante possível, até a próxima amostra ser obtida. O propósito disso é fornecer o sinal de tensão ou corrente constante requerido pelo conversor A/D.

A maioria dos algoritmos dos relés digitais requer informações tais como a relação temporal entre os sinais medidos. Existem dois métodos para se conseguir isso utilizando circuitos *sample-and-hold*. O primeiro método foi mostrado na Figura 3.4 e utiliza vários

circuitos *sample-and-hold*, sendo cada um responsável por amostrar um dos sinais de entrada. Nesse caso, todas as entradas são amostradas simultaneamente, o que permite que os dados sejam utilizados diretamente pelo algoritmo do relé, sem qualquer erro devido à amostragem sequencial. O segundo método utiliza apenas um circuito *sample-and-hold*, conforme mostrado na Figura 3.8 (RANSIK, 1998).

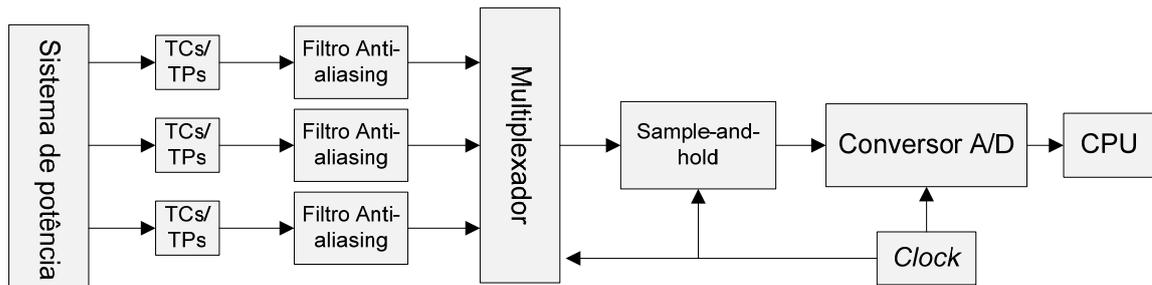


Figura 3.8 – Implementação com um único circuito *sample-and-hold*

Neste caso, cada amostra é obtida em um intervalo de tempo conhecido, sendo que os sinais são amostrados de maneira sequencial, ou seja, a amostragem não é simultânea. Portanto, é necessário aplicar um fator de correção de tempo a cada amostra, de modo a compensar o atraso de tempo das amostras sucessivas. Com isso, os sinais amostrados sequencialmente podem ser vistos como se tivessem sido amostrados simultaneamente (RANSIK, 1998).

Supondo que se deseja calcular os fasores de dois sinais quaisquer, $x(t)$ e $y(t)$, e considerando que a amostragem desses sinais inicie nos instantes t_x e t_y , respectivamente. Então, as referências desses dois fasores estarão defasadas de um ângulo \varnothing (PHADKE & THORP, 1988):

$$\varnothing = (t_x - t_y) \frac{2\pi}{T} \quad (3.3)$$

onde T é o período de frequência fundamental do sinal.

Se a diferença entre t_x e t_y é conhecida, então o ângulo de fase entre as duas referências também é conhecido e os dois fasores podem ser colocados em uma referência comum por meio da compensação de \varnothing .

3.4.1.4 Multiplexador

O número de entradas analógicas de um relé numérico está diretamente relacionado com a sua função. Um relé de distância, por exemplo, requer, no mínimo, as correntes e tensões das três fases, totalizando seis entradas analógicas. Já um relé diferencial de proteção de barra necessita de quinze entradas analógicas de corrente, se houver cinco circuitos conectados à barra (IEEE TUTORIAL COURSE, 1979). Dessa forma, muitas conversões para a forma digital devem ser feitas a cada instante de amostragem. Uma alternativa para desempenhar essa função é utilizar um conversor A/D para cada uma das entradas analógicas, o que resulta em um sistema bastante caro. Devido a isso, utiliza-se um multiplexador, o qual tem a função de selecionar, a cada instante de tempo, somente uma de suas entradas e a transferir para a saída, de modo que seja necessário somente um conversor A/D.

Dessa forma, o sistema utilizado é o apresentado na Figura 3.9, ou seja, cada sinal é amostrado separadamente, de forma simultânea, e os valores das amostras são retidos para sua conversão e transmissão ao processador.

O multiplexador pode ser comparado funcionalmente a uma chave seletora. Sob um sinal de controle, o multiplexador, sequencialmente, conecta a saída a cada uma das entradas, sendo que cada conexão é realizada em um instante de tempo diferente. A Figura 3.9 ilustra um multiplexador com quatro entradas, de modo que cada uma é selecionada por meio das entradas de controle, A e B.

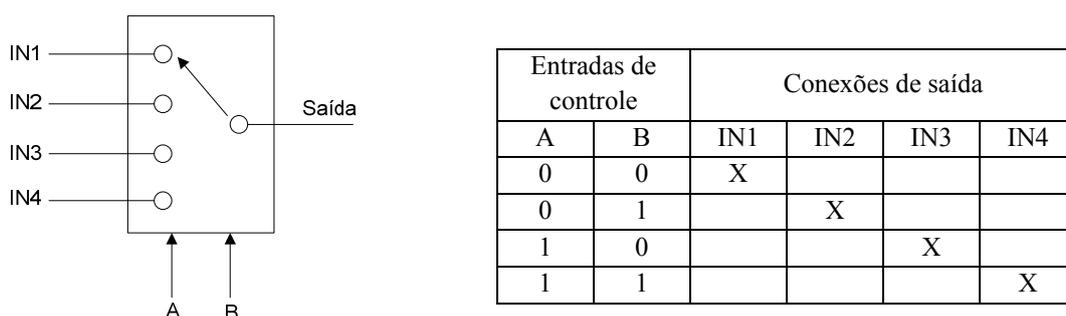


Figura 3.9- Esquema de um multiplexador com quatro entradas

3.4.1.5 Conversor A/D

O conversor ideal contínuo/digital (C/D) converte um sinal contínuo no tempo em um sinal discreto no tempo. Na prática, existem os conversores analógico-digitais (A/D), os quais são uma aproximação para os conversores ideais, e convertem um sinal analógico em um sinal

digital, ou seja, em uma sequência de amostras de precisão finita ou quantizada (OPPENHEIM, 1999).

3.4.2 Detecção da Falta

A detecção é a primeira etapa do diagnóstico e tem por objetivo identificar um distúrbio ou falta no sistema elétrico. É desejável que o algoritmo detector tenha uma rápida resposta durante o transitório. Geralmente este tipo de algoritmo está associado à mudança nos sinais de corrente e/ou tensão. Existem várias técnicas destinadas a este fim. Uma das mais simples e rápidas faz uso da variação repentina no sinal da corrente no momento da falta. Esse método pode ser aplicado em linhas com pequenas impedâncias e com forte *in-feed*, isto é, altas correntes de curto-circuito em todos os pontos da linha. O ajuste, segundo Ziegler (1999), deve ser aproximadamente 1,3 vezes a máxima corrente de carga nas fases, e 0,5 vezes a corrente nominal do TC de neutro para faltas monofásicas.

Recentemente foi apresentada uma técnica que também faz uso da repentina mudança do sinal de corrente no momento da falta, no entanto, o trabalho faz uso da MM (WU et al., 2009).

3.4.2.1 Detector de falta utilizando MM

Desprezando as componentes harmônicas, o comportamento da corrente de falta em uma linha pode ser representado por duas parcelas, isto é, pela componente fundamental e componente *dc*. A amostra k da corrente de falta é representada por:

$$I(k) = A\cos(\omega k\Delta t + \theta) + B^{\lambda k\Delta t} \quad (3.4)$$

Onde:

ω é a frequência angular;

θ é o ângulo da corrente de fase;

A e B são as amplitudes das componentes das correntes senoidais e *dc*, respectivamente;

Δt é o intervalo de amostragem;

λ equivale a $-1/\tau$, no qual τ é a constante de tempo do sistema.

A expansão de Taylor de primeira ordem da equação (3.4) origina (WU et al., 2009):

$$I(k) = A\cos(\omega k\Delta t + \theta) + B + \lambda k\Delta t \quad (3.5 - a)$$

Fazendo com que $I(k)$ seja a amostra central, uma amostra anterior a $I(k)$ e outra posterior resulta em:

$$I(k + n) = A\{\cos[\omega(k + n)\Delta t + \theta] + B + (k + n)\lambda\Delta t\} \quad (3.5 - b)$$

$$I(k - n) = A\{\cos[\omega(k - n)\Delta t + \theta] + B + (k - n)\lambda\Delta t\} \quad (3.5 - c)$$

Adicionando-se as equações (3.5 - b) e (3.5 - c):

$$I(k + n) + I(k - n) = 2I(k) \cos(\omega n\Delta t) + 2[B + \lambda k\Delta t][1 - \cos(\omega n\Delta t)] \quad (3.6)$$

Se n é um número inteiro pequeno e a frequência de amostragem é alta, o valor de $\cos(\omega n\Delta t)$ se aproxima de 1, resultando em:

$$I(k + n) + I(k - n) = 2I(k) \cos(\omega n\Delta t) \quad (3.7)$$

Considerando a característica do sinal senoidal da tensão e corrente, de modo a detectar o transitório da falta, MM usa o grupo de elemento estrutural (b) definido como:

$$b = \begin{bmatrix} * & \dots & * & \cos\phi & * & \cos\phi & * & \dots & * \\ * & \dots & \cos 2\phi & \cos\phi & * & \cos\phi & \cos 2\phi & \dots & * \\ & & & & \vdots & & & & \\ & & & & \vdots & & & & \\ \cos m\phi & \dots & \cos 2\phi & \cos\phi & * & \cos\phi & \cos 2\phi & \dots & \cos m\phi \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde:

$$\phi = \omega\Delta t;$$

* significa que a correspondente amostra do sinal I não é envolvida pela operação morfológica;

m é o número de elementos estruturantes definidos no grupo;

Os operadores dilatação e erosão são definidos pelas equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$(I \oplus b_n)(k) = \max_s \{I(k - s)/b_n(s)\} \quad (3.9)$$

$$(I \ominus b_n)(k) = \min_s \{I(k + s)/b_n(s)\} \quad (3.10)$$

Somando o resultado obtido nas equações (3.9) e (3.10) e multiplicando por 1/2, obtém-se a operação intermediária, $D_n(k)$, definida pela equação (3.11).

$$D_n(k) = \frac{1}{2}(I \oplus b_n + I \ominus b_n) \quad (3.11)$$

A diferença entre o sinal verdadeiro $I(k)$ e o sinal estimado D_n ($n=1; 2; \dots m$) é calculado, como mostra a equação (3.12)

$$\Delta I(k) = I(k) - \frac{D_1(k) + D_2(k) + \dots + D_m(k)}{m} \quad (3.12)$$

O detector de falta é baseado em $\Delta I(k)$, conforme mostra a equação (3.13). O valor de $\Delta D(k)$ é continuamente monitorado e comparado com um ajuste M previamente selecionado.

$$\Delta D(k) = |\Delta I(k + 1) - \Delta I(k)| \quad (3.13)$$

Se $\Delta D(k) > M$, o contador C é inicializado, isto é, C igual a 1. O valor de C é incrementado de um em um a cada amostra $\Delta D(k) > M$ e decrementado de um em um a cada amostra $\Delta D(k) \leq M$, desde que $C \geq 1$.

Por fim, a falta é detectada se o contador C é maior que o valor previamente ajustado $C_{aj.}$. Para a detecção de faltas entre fases o algoritmo é aplicado para todas as correntes de fase. Para detecção de faltas envolvendo a terra é utilizada a corrente de sequência zero. A Figura 3.10 mostra o fluxograma do detector utilizado.

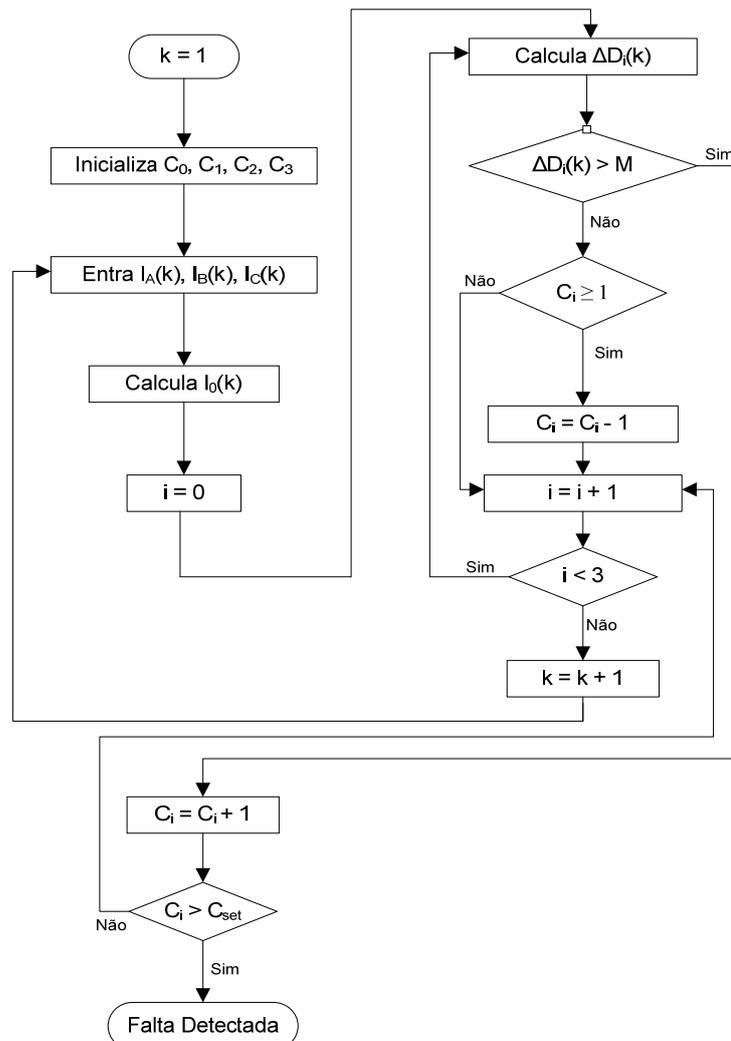


Figura 3.10 – Fluxograma do detector de falta usando MM (WU et al., 2009)

3.4.3 Classificação da Falta

A etapa de classificação da falta é incorporada ao algoritmo para permitir uma rápida identificação das fases faltosas e, com isso, reduzir o tempo de processamento na localização da falta. A maioria dos classificadores de falta faz uso de algoritmos baseados em variações de tensão ou corrente (PHADKE & THORP, 2009).

Assim como o algoritmo detector de falta é essencial para o relé digital, pois dá início a cadeia de tarefas do relé, o classificador de falta também é de suma importância. O algoritmo classificador é responsável por habilitar corretamente o algoritmo destinado a estimar a distância da falta. Enquanto os critérios para a classificação da falta não forem totalmente satisfeitos, o algoritmo de estimação da falta não deve realizar nenhuma tarefa. Logo, para evitar atrasos no tempo de operação, utilizam-se técnicas simplificadas e que produzam pequenos atrasos de tempo. Em sistemas onde é possível se ter religamentos monopolares deve-se ter classificadores de falta ainda mais confiáveis, uma vez que, nesses casos, somente a fase sob falta deve ser identificada. A técnica escolhida para a classificação da falta segue a filosofia do detector, isto é, a MM conforme sugerido por Wu et al., (2009).

3.4.3.1 Classificador de falta utilizando MM

A técnica calcula a quantidade de energia contida no detector de falta $\Delta D(k)$, por meio da norma Euclidiana. A norma Euclidiana (E) do detector $\Delta D(k)$, que é calculado conforme equação (3.12), é efetuada para as correntes de fase (I_A , I_B e I_C) e corrente de sequência zero (I_0), conforme ilustra a equação (3.14).

$$E_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_D} \Delta D_i^2(k)}, \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (3.14)$$

Onde:

E_i é a norma Euclidiana referente a I_0 , I_A , I_B e I_C que correspondem a $i = 0, 1, 2, 3$, respectivamente;

ΔD é o detector de falta morfológico;

N_D é o número de amostras contidas na janela no cálculo de E_i .

k é a amostra;

Se o valor de E_i for maior que um valor previamente ajustado, ε , incrementa seu valor de zero para um (1) como mostra a equação (3.15) e a(s) fase(s) e/ou a sequência zero é então detectada como faltosa. A Figura 3.11 mostra o diagrama operacional do classificador usando MM.

$$L_i = \begin{cases} 1 & E_i > \varepsilon \\ 0 & E_i \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3.15)$$

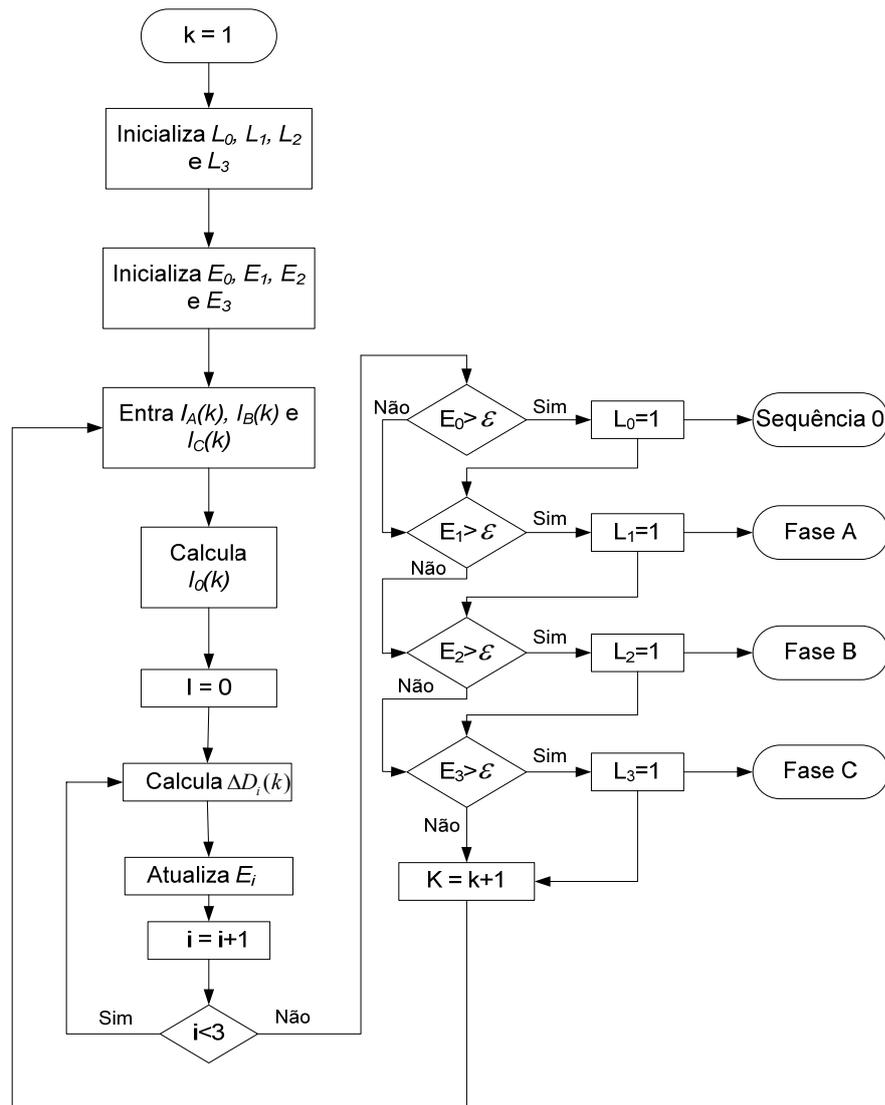


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do classificador de falta usando MM (WU et al., 2009)

3.4.4 Estimação da distância da falta

O processo de estimação dos fasores de tensão e corrente, essenciais para se calcular a distância da falta ou impedância aparente vista pelo relé, basicamente envolve os tradicionais algoritmos fundamentados em Transformadas de Fourier (MACLAREN & REDFERN, 1975), componentes simétricas (PHADKE et al., 1979), filtro de Kalman (GIRGIS & MAKRAM, 1988), expansão ortogonal (SACHDEV & BARIBEAU, 1979). Estes algoritmos necessitam um tempo em torno de um ciclo na frequência fundamental para o cálculo dos fasores de tensão e corrente. Além disso, sabe-se que os sinais de corrente originado por uma falta não são puramente senoidais, isto é, são compostos pela componente fundamental, componente exponencial decrescente (componente *dc*) e componentes harmônicas. Como a impedância aparente deve ser calculada considerando somente a componente fundamental, as componentes harmônicas e *dc*, dependendo do algoritmo de estimação de fasores utilizados, ocasionam erro nesse processo. Por exemplo, o desempenho das técnicas que calculam os sinais de corrente e tensão citadas, (Fourier, Kalman, componentes simétricas, expansão ortogonal), podem ser afetadas por sinais que não estão na frequência fundamental, resultando um cálculo errado da impedância/distância de falta.

Os sinais com frequência fora da nominal são de difícil remoção, visto, serem de complexa previsão. Os transdutores de corrente e tensão, principalmente o acoplamento capacitivo do transformador de tensão, o comportamento não linear do arco de falta, e até mesmo erros na conversão A/D, podem contribuir com a geração desse tipo de sinal. No entanto, a maioria destes sinais contém componentes harmônicas com ordens de frequências elevadas, que podem ser reduzidas com o uso do filtro *anti-aliasing*. Além disso, em linhas de extra-alta de tensão, que geralmente se localizam eletricamente distantes das cargas, as componentes harmônicas não são tão significativas.

Embora existam algoritmos compensatórios, a componente *dc*, função da constante de tempo da linha, é a principal causa do sobrealcance em relés de resposta rápida. Para linhas de extra-alta tensão a constante de tempo típica varia entre 30 – 50 ms, ou seja, a componente *dc* pode permanecer no sinal de corrente durante 2 a 3 ciclos da frequência nominal de 60 Hz. Essa situação ainda pode ser mais complicada na ocorrência de faltas próximas ao gerador.

Muitas técnicas para redução ou eliminação do efeito da componente *dc* nos filtros digitais para relés de proteção numéricos têm sido apresentadas na literatura (SACHDEV & BARIBEAU, 1979; BENMOUYAL, 1995; YU & GU, 2001; SIDHU et al. 2003; LEE et al.

2008). Stefanello et al. (2011) fazem uma boa revisão sobre as técnicas de filtragem destinadas a proteção digital e avalia o desempenho de diversos algoritmos para relés numéricos em termos da capacidade de rejeição da componente dc , resposta transitória, exatidão, frequência de amostragem e imunidade a ruídos. Além dos filtros clássicos de Fourier de ciclo completo e Cosseno, também são consideradas duas Transformadas Discretas de Fourier (TDF) modificadas. Os resultados mostram que na maioria dos casos os filtros de Fourier modificados apresentam o melhor desempenho. Esses possuem uma excelente capacidade de rejeição de harmônicas e da componente dc , no entanto exigem um maior esforço computacional, devido ao número de operações matemáticas envolvidas. Porém, segundo Stefanello et al. (2011) esse fato não causou aumento considerável no tempo de processamento.

Na tecnologia de relés numéricos, outras técnicas, que encontravam limitações práticas na década de 70, referente aos conversores necessários para a sua implementação, foram rapidamente sendo aperfeiçoadas. Uma dessas técnicas é fundamentada em equações diferenciais para estimar a distância da falta (SEGUI & BERTRAND, 2001; ALFUHAID & EL-SAYED, 1999; BORNARD & BASTIDE, 1982). Geralmente as técnicas baseadas em equações diferenciais estimam a distância da falta em tempos inferiores que os tradicionais algoritmos que utilizam Fourier. Em alguns casos, o tempo de operação ocorre antes mesmo de uma eventual saturação do transformador de corrente. Além disso, não são afetadas pela componente dc (OSMAN, et al., 2005). Algoritmos para proteção de linhas que utilizam equações diferenciais favorecem a adequação ao tempos críticos de abertura estabelecidos pelo estudos de estabilidade transitória. Estes algoritmos em conjunto com disjuntores rápidos podem reduzir os tempos de abertura de uma linha garantindo os limites críticos de abertura (AKKE & THORP, 1998).

3.4.4.1 Cálculo da distância de falta utilizando equações diferenciais

Ao invés do sinal ser o objeto de modelagem, como é realizado nas técnicas de Fourier, os algoritmos que utilizam equações diferenciais são baseados no modelo da linha de transmissão. O propósito do método é descrever a dinâmica de uma linha de transmissão por meio de um circuito R-L série. Na sua modelagem assume-se que a linha seja tal que a capacitância *shunt* possa ser desprezada, ficando a linha composta apenas por uma resistência e uma indutância. As equações das componentes simétricas da tensão na fase 'a' no ponto onde o relé é instalado, conforme mostra a Figura 3.12, são (OSMAN et al., 2005):

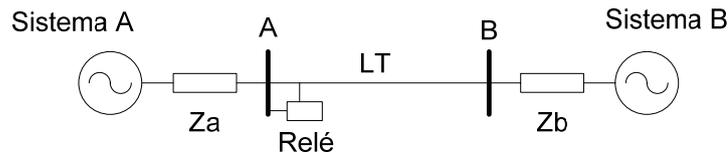


Figura 3.12 – Modelo da linha de transmissão

$$V_{a0} = Z_0 I_{a0} + V_{a0}^f \quad (3.16 - a)$$

$$V_{a1} = Z_1 I_{a1} + V_{a1}^f \quad (3.16 - b)$$

$$V_{a2} = Z_2 I_{a2} + V_{a2}^f \quad (3.16 - c)$$

Onde:

V_{a0}, V_{a1}, V_{a2} , são as componentes de sequência da tensão na fase “a”, medidas no ponto de instalação do relé;

I_{a0}, I_{a1}, I_{a2} , são as componentes de sequência da corrente de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

Z_0, Z_1, Z_2 , são as impedâncias de sequência entre o ponto do onde o local está instalado e o ponto da falta;

$V_{a0}^f, V_{a1}^f, V_{a2}^f$ são as componentes de sequência da tensão na fase “a”, no ponto da falta;

Adicionando as equações (3.16-a), (3.16-b) e (3.16-c), resulta:

$$V_a = Z_1 I_a + (Z_0 - Z_1) I_{a0} + V_a^f \quad (3.17)$$

Onde, se assumiu $Z_1 = Z_2$. No domínio ‘s’, com $Z_1 = R_1 + sL_1$ e $Z_0 = R_0 + sL_0$, a equação (3.17), resulta em:

$$V_a(s) = (R_1 + sL_1) I_a(s) + (R_0 + sL_0 - R_1 - sL_1) I_{a0}(s) + V_a^f(s) \quad (3.18)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace na equação (3.18), a tensão no domínio do tempo no ponto onde o relé é instalado é (OSMAN et al., 2005):

$$v_a(t) = v_a^f(t) + D_f \left[r_1 i_a(t) + l_1 \frac{di_a(t)}{dt} \right] + D_f \left[(r_0 - r_1) i_{a0}(t) + (l_0 - l_1) \frac{di_{a0}(t)}{dt} \right] \quad (3.19)$$

Onde:

$v_a(t)$ é a tensão da fase “a” no ponto onde o relé está instalado;

$v_a^f(t)$ é a tensão da fase “a” no ponto da falta;

$i_a(t)$ é a corrente da fase “a” no ponto onde o relé está instalado;

$i_{a0}(t)$ é a componente de sequência zero da corrente na fase “a”, no ponto onde o relé está instalado;

D_f é a distância entre o ponto de instalação do relé e o local da falta;

r_1 é a resistência de sequência positiva por unidade de comprimento da linha;

r_0 é a resistência de sequência zero por unidade de comprimento da linha;

l_1 é a indutância de sequência positiva por unidade de comprimento de da linha;

l_0 é a indutância de sequência zero por unidade de comprimento da linha;

A tensão de fase no local da falta, $v_a^f(t)$, pode ser expressa em termos da resistência de falta, R_f , e corrente de falta, $i_a^f(t)$, como:

$$v_a^f(t) = R_f i_a^f(t) \quad (3.20)$$

No caso de falta monofásica, a componente de sequência zero da corrente de falta é calculada por:

$$i_{a0}^f = \frac{i_a^f(t)}{3} \quad (3.21)$$

Por meio de uma nova disposição da equação (3.21), e substituindo-a na equação (3.22), a tensão de fase no local da falta, $v_a^f(t)$, pode ser expressa por:

$$v_a^f(t) = 3R_f i_{a0}^f(t) \quad (3.22)$$

De acordo com o diagrama de sequência zero do sistema, ilustrado na Figura 3.13, a corrente de sequência zero da falta é composta de duas parcelas e possui a seguinte relação com a corrente de sequência zero no local onde o relé está instalado (OSMAN et al., 2005):

$$i_{a0}^f(t) = i_0(t) \left[\frac{(x_0^{SE} + D_f x_0) + x_0^{RE} + (L - D_f)x_0}{x_0^{RE} + (L - D_f)x_0} \right] \quad (3.23)$$

Onde:

x_0^{SE} e x_0^{RE} são as impedâncias de sequência zero dos sistemas equivalentes do terminal local e remoto, respectivamente;

x_0 é a reatância de sequência zero por unidade de comprimento da linha;

L é o comprimento da linha;

D_f é a distância entre o ponto de instalação do relé e o local da falta.

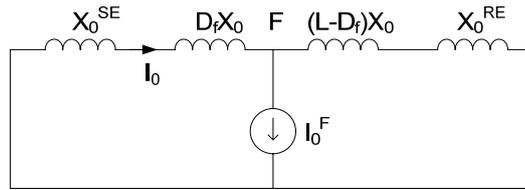


Figura 3.13 – Diagrama de sequência zero do sistema para uma falta monofásica

Fazendo

$$K_0 = \frac{(x_0^{SE} + D_f x_0)}{x_0^{RE} + (L - D_f) x_0} \quad (3.24)$$

Tem-se:

$$i_{a0}^f(t) = i_0(t)(1 + K_0) \quad (3.25)$$

Utilizando a equação (3.25) para reescrever a equação (3.22), temos:

$$v_a^f(t) = 3R_f i_0(t)(1 + K_0) \quad (3.26)$$

Considerando R'_f conforme a equação (3.27), a tensão no local da falta, $v_a^f(t)$, pode ser expressa como mostra a equação (3.27)

$$R'_f = 3R_f(1 + K_0) \quad (3.27)$$

$$v_a^f(t) = i_0(t)R'_f \quad (3.28)$$

Substituindo a equação (3.28) na equação (3.19), resulta na equação diferencial que modela o circuito da linha de transmissão durante uma falta monofásica, isto é:

$$\begin{aligned} v_a(t) = i_0(t)R'_f + D_f \left[r_1 i_a(t) + l_1 \frac{di_a(t)}{dt} \right] \\ + D_f \left[(r_0 - r_1) i_{a0}(t) + (l_0 - l_1) \frac{di_{a0}(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

A equação (3.29) foi desenvolvida para uma falta monofásica na fase “a”. Esta equação, que engloba o efeito da resistência de falta e o efeito da variação da corrente devido a mudanças das impedâncias dos equivalentes local e remoto, pode ser facilmente manipulada para faltas monofásicas nas fases “b” e “c”. Para faltas entre fases, a resistência de falta é normalmente desprezada, e não há componente de sequência zero da corrente. De acordo com a discussão acima, a equação diferencial que descreve a dinâmica de uma linha de transmissão para uma falta bifásica entre as fases “a” e “b”, por exemplo, é dada por:

$$v_{ab}(t) = D_f r_1 (i_a(t) - i_b(t)) + D_f l_1 \frac{di_a(t)}{dt} - D_f l_1 \frac{di_b(t)}{dt} \quad (3.30)$$

Analisando as equações (3.29) e (3.30), observa-se que existem dois parâmetros desconhecidos, isto é, D_f e R'_f , mas que podem ser estimados. Quando a resistência de falta é desprezada, caso da equação (3.30), que descreve a dinâmica de uma linha de transmissão para uma faltas entre fases, tem-se apenas o parâmetro D_f a ser estimado.

De modo a simplificar a notação, os termos que multiplicam D_f e R'_f , usando como exemplo a equação (3.29), podem ser representados por $H_{1a}(t)$ e $H_{2a}(t)$, respectivamente, ou seja:

$$v_a(t) = H_{1a}(t)D_f + H_{2a}(t)R'_f \quad (3.31)$$

Onde:

$$H_{1a}(t) = \left[r_1 i_a(t) + l_1 \frac{di_a(t)}{dt} \right] + \left[(r_0 - r_1) i_{a0}(t) + (l_0 - l_1) \frac{di_{a0}(t)}{dt} \right] \quad (3.32)$$

e

$$H_{2a}(t) = i_0(t) \quad (3.33)$$

Com o objetivo de obter a equação (3.31) na forma em que possa ser utilizada com sinais digitais é utilizada utiliza-se a derivada de primeira ordem e a equação (3.32) e (3.33) resultam em, respectivamente:

$$H_{1a}(n) = \left[r_1 i_a(n) + l_1 \frac{i_a(n) - i_a(n-1)}{\Delta t} \right] + \left[(r_0 - r_1) i_{a0}(n) + (l_0 - l_1) \frac{i_{a0}(n) - i_{a0}(n-1)}{\Delta t} \right] \quad (3.34)$$

e

$$H_{2a}(n) = i_0(n) \quad (3.35)$$

Utilizando as equações (3.34) e (3.35), a equação (3.31) pode ser escrita por:

$$v_a(n) = [H_{1a}(n) \ H_{2a}(n)] \begin{bmatrix} D_f \\ R'_f \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Os dois parâmetros desconhecidos na equação (3.36), isto é, D_f e R'_f , podem ser estimados. Como um dos objetivos deste trabalho, em um primeiro momento, é investigar o desempenho do modelo R-L para diferentes condições de falta, procurou-se analisar diferentes técnicas existentes, bem como, desenvolver um método para solucionar a equação (3.36).

Para exemplificar as metodologias de estimação da distância da falta, utilizou-se a equação (3.36), isto é, equação que modela o comportamento da linha para uma falta monofásica na fase “a”. Para os outros tipos de faltas, apropriados valores de tensão e $H_1(n)$ e $H_2(n)$ deverão ser utilizados.

Alfuhaid & El-Sayed (1999) apresenta uma solução para a equação (3.36) utilizando Mínimos Quadrados de forma recursiva. Conforme mostra a equação (3.37), no instante de tempo t_{k+1} os parâmetros D_f e R'_f são obtidos a partir de seus valores no instante de tempo t_k .

$$\begin{bmatrix} D_{fk+1} \\ R'_{fk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{fk} \\ R'_{fk} \end{bmatrix} + [G_k][v_{ak} - H_{1k} D_{fk} - H_{2k} R'_{fk}] \quad (3.37)$$

Sendo G_k o vetor ganho dado por:

$$[G_k] = \begin{bmatrix} G_1(k) \\ G_2(k) \end{bmatrix} = [P_k][H_k]^T \quad (3.38)$$

Onde:

A matriz 2 X 2 $[P_k]$ é a matriz covariância no instante de tempo t_k , sua inversa, $[P_k]^{-1}$, é calculada utilizando a fórmula recursiva:

$$[P_k]^{-1} = [P_{k-1}]^{-1} + [H_k]^T [H_k] \quad (3.39)$$

Outra técnica para estimar a distância de falta D_f , utilizando o modelo R-L é apresentada por Osman et al. (2003). Neste trabalho os autores calculam a distância da falta por meio de um algoritmo genético (AG). A otimização online estima os pesos ótimos de D_f e R'_f , que podem gerar a saída de tensão, $v_a(n)$, a partir das entradas de corrente incluídas em $H_{1a}(n)$ e $H_{2a}(n)$. O AG proposto maximiza a função definida por:

$$J_n = -\sum_{i=1}^n (v_a(i) - \theta^T H_a(i))^2 \quad (3.40)$$

Onde:

$$\theta = [R'_f \quad D_f] \quad (3.41)$$

e

$$H_a(i) = [H_{1a}(i) \quad H_{2a}(i)] \quad (3.42)$$

Ainda no contexto de técnicas para estimar a distância da falta utilizando o modelo de equações diferenciais da linha de transmissão, Osman et al. (2005) propuseram uma rede neural do tipo *feed-forward*, cujo treinamento é realizado de forma online, para a solução da equação (3.36). A rede proposta possui um único neurônio; duas entradas $H_{1a}(n)$ e $H_{2a}(n)$ com

pesos $\omega_1 = D_f$ e $\omega_2 = R'_f$, respectivamente; valor de bias nulo; uma função de ativação linear e uma saída $v_a(n)$, conforme mostra a Figura 3.14.

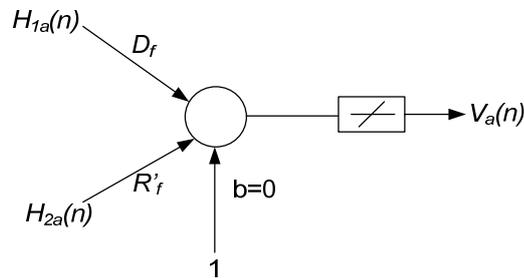


Figura 3.14 - Estrutura da rede neural proposta por Osman et al. (2005)

O treinamento online da rede neural é basicamente o processo de estimar os valores ótimos dos pesos, D_f e R'_f , que podem gerar o valor de tensão medido, $v_a(n)$, a partir dos valores de corrente medidos, inclusos nas entradas $H_{1a}(n)$ e $H_{2a}(n)$.

Realizando uma análise mais detalhada na rede neural utilizada por Osman et al. (2005), verifica-se que foi utilizado um algoritmo de Newton para o seu treinamento. No entanto, o algoritmo Levenberg-Marquardt é indicado para aplicações de treinamentos rápidos. Este algoritmo possui um desempenho superior ao de Newton, no quesito velocidade de convergência. Logo, neste trabalho a rede neural proposta por Osman et al. (2005) foi implementada com o algoritmo Levenberg-Marquardt.

3.4.4.2 Proposta de cálculo da distância da falta

Analisando a equação (3.36), surge uma das propostas inovadoras neste trabalho (MORAIS et al., 2010), isto é, estimar os parâmetros desconhecidos utilizando o método para ajuste de curvas por mínimos quadrados (PHADKE & THORP, 2009). Reescrevendo a equação (3.36), em termos das amostras de $v_a(n)$, $H_{1a}(n)$ e $H_{2a}(n)$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} H_{1a}(n)D_{fa} + H_{2a}(n)R_{fa} \\ H_{1a}(n+k)D_{fa} + H_{2a}(n+k)R_{fa} \\ \dots \\ H_{1a}(m)D_{fa} + H_{2a}(m)R_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a(n) \\ v_a(n+k) \\ \dots \\ v_a(m) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

O algoritmo desenvolvido utiliza uma janela de dados adaptativa. O tamanho da janela de dados da equação (3.43) aumenta de forma progressiva a cada amostra de corrente e tensão disponível, até que janela tenha o tamanho de um período da frequência fundamental. Este procedimento aumenta a velocidade de uma resposta confiável do relé, uma vez que não é

necessário uma janela completa de um ciclo. Geralmente, nos relés tradicionais o tamanho da janela de dados para estimar a distância de falta de forma precisa é de um (1) ciclo.

Para estimar a distância da falta por meio da equação (3.43), o presente trabalho faz uso de uma matriz pseudo inversa (PAN et al., 2004). Uma concisa representação matricial da equação (3.43) é mostrada pela equação (3.44), que a partir da equação (3.45), estima-se a distância da falta.

$$MP = I \quad (3.44)$$

$$P = (M^T M)^{-1} M^T I \quad (3.45)$$

Adequando a equação (3.36) de acordo com a equação (3.45), resulta na equação (3.46), que é capaz de estimar a distância da falta D_f (MORAIS et al., 2010). Ao contrário das técnicas apresentadas por Osman et al. (2003) e Osman et al. (2005), o método desenvolvido não necessita de ajustes prévios, é de simples implementação e apresenta bons resultados.

$$\begin{bmatrix} D_{fa} \\ R'_{fa} \end{bmatrix} = \{[H_{1a}(n) \ H_{2a}(n)]^T [H_{1a}(n) \ H_{2a}(n)]\}^{-1} [H_{1a}(n) \ H_{2a}(n)]^T v_a(n) \quad (3.46)$$

3.4.4.3 Efeito da capacitância shunt

A modelagem do algoritmo foi realizada desprezando as capacitâncias *shunt* da linha de transmissão. A grande maioria das técnicas que utilizam as equações diferenciais na modelagem de algoritmos para proteção de linhas realizam esta consideração (AKKE & THORP, 1998; SEGUI & BERTRAND, 2001; ALFUHAID & EL-SAYED, 1999; BORNARD & BASTIDE, 1982). O circuito da Figura 3.15 inclui as capacitâncias *shunt* da linha de transmissão nos terminais do relé. Utilizando as capacitâncias da linha, a tensão medida no ponto de instalação do relé é dada por (PHADKE & THORP, 2009):

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} - \left[RC \frac{dv(t)}{dt} - LC \frac{d^2v(t)}{d^2t} \right] \quad (3.47)$$

Onde:

$v(t)$ é a tensão instantânea medida no ponto de instalação do relé;

$i(t)$ é a corrente instantânea medida no ponto de instalação do relé;

R é a resistência série da linha de transmissão;

L é a indutância série da linha de transmissão;

C é a capacitância *shunt* da linha de transmissão.

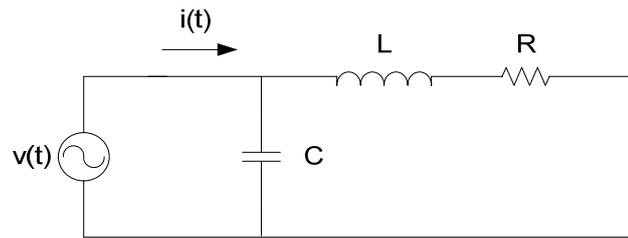


Figura 3.15– Modelo de linha monofásico com a capacitância *shunt*

Utilizando o algoritmo desenvolvido em uma linha considerando a capacitância *shunt*, os dois últimos termos da equação (3.47) representam erros. A magnitude destes erros é função da localização da falta e da frequência do sinal em $v(t)$. A dependência da localização da falta é quadrática, alcançando o seu máximo para faltas no final da linha. Para faltas distantes do relé em linhas com tensões elevadas estes termos podem ser substanciais, especialmente se as altas frequências forem consideradas em $v(t)$. Por outro lado, os termos RC e LC são pequenos para faltas próximas a barra local onde relé é instalado e com tensões menores.

Uma possível solução para minimizar o erro na estimação da distância de falta causado pelas capacitâncias *shunt* é incluí-las na equação que modela a linha que é utilizada no algoritmo. Fazendo isso, uma grande quantidade de cálculo matricial é exigida, consequentemente esta solução representa um grande aumento no custo computacional do algoritmo. Logo, ainda existe uma incerteza na justificativa de se incluir ou não as capacitâncias *shunt* no equacionamento de relés de distância em linhas longas, uma vez que o modelo *pi* já é uma aproximação (PHADKE & THORP, 2009).

3.5 Considerações Finais

O presente capítulo fez uma revisão sobre o desenvolvimento da tecnologia de relés, com ênfase nos relés microprocessados. Como o foco do capítulo é o relé de distância numérico, uma breve discussão sobre filtragem digital foi realizada. Foram apresentadas algumas técnicas de filtragem, destacando-se algumas vantagens relacionadas aos filtros que removem a componente *dc* do sinal.

As etapas de detecção da falta, classificação usando MM foram abordadas. Para estimação da distância de falta, um modelo de linha de transmissão R-L série utilizando equações diferenciais foi detalhado. Por fim, uma das propostas inovadoras deste trabalho foi

elucidada neste capítulo, isto é, estimar a distância de falta utilizando o método para ajuste de curvas por mínimos quadrados. A técnica desenvolvida é validada no capítulo a seguir.

Capítulo 4

VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE AJUSTE DE CURVAS POR MÍNIMOS QUADRADOS

4.1 Considerações Gerais

No algoritmo proposto, descrito no Capítulo 7, o cálculo da distância da falta é essencial para a correta estimativa da impedância aparente vista pelo relé. As equações para o cálculo da distância da falta (equação 3.29 e equação 3.30) e as técnicas que visam solucionar estas equações foram abordadas no Capítulo 3, subseção 3.4.4.1. Deste modo, em um primeiro momento a técnica desenvolvida, que faz uso de ajuste de curvas por mínimos quadrados – MQC (MORAIS et al., 2010), foi avaliada juntamente com outras duas técnicas. São elas: Mínimos quadrados recursivo – MQR (ALFUHAID & EL-SAYED, 1999) e rede neural – RN (OSMAN et al., 2005). Esta análise visa verificar o desempenho do método desenvolvido perante uma série de casos, sem considerar as oscilações de potência. Neste capítulo são apresentados os critérios e resultados desta avaliação.

4.2 Ferramentas Computacionais Utilizadas

As simulações computacionais foram realizadas no programa ATP (*“Alternative Transients Program”*). O ATP é considerado o programa mais utilizado para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos, bem como de natureza eletromecânica, em sistemas elétricos. Sua primeira versão, na época denominada de EMTP (*“Eletromagnetic Transient Program”*), foi desenvolvida no início da década de 60 por Herman W. Dommel, para a Bonneville Power Administration (Alternative Transient Program, 2010). Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo. Esta nova versão, denominada de ATP, constitui uma ferramenta poderosa e vem sendo continuamente atualizada por meio de contribuições internacionais.

O programa ATP calcula as variáveis de interesse do sistema elétrico em função do tempo. Basicamente, utiliza regra de integração trapezoidal para resolver as equações diferenciais dos componentes do sistema. O ATP possui vários modelos de equipamentos, tais como, geradores, transformadores, linhas, cabos, etc. Distúrbios equilibrados e desequilibrados são permitidos. Além disso, estudos dinâmicos podem ser realizados utilizando os módulos TACS (“*Transient Analysis of Control Systems*”) e modelos de controle desenvolvidos pelo próprio usuário.

Para avaliar os métodos, escolheu-se o sistema teste apresentado por Roberts et al., (1993), aqui denominado de Sistema Teste 1, o qual é composto por uma linha de transmissão e duas barras conectadas a dois geradores, que representam os equivalentes de dois sistemas elétricos, ambos em 400 kV. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 4.1 e seus parâmetros na Tabela 4.1. A taxa de amostragem utilizada foi de 1920 Hz, o que, na frequência de 60 Hz, corresponde a 32 amostras por ciclo.

Em virtude de sua alta performance voltada ao cálculo numérico e características de praticidade de programação, muitos usuários utilizam o MATLAB como a primeira ferramenta para o desenvolvimento de algoritmos e testes necessários a uma determinada pesquisa. Realizados os testes e concluídos os resultados, o algoritmo ou sistema desenvolvido pode, seguramente, ser implementado em outras plataformas de programação acessíveis, assim como o desenvolvimento de hardware dedicado. No trabalho em questão, todos os algoritmos analisados, bem como o tratamento dos sinais de tensão e corrente, foram desenvolvidos no MATLAB.

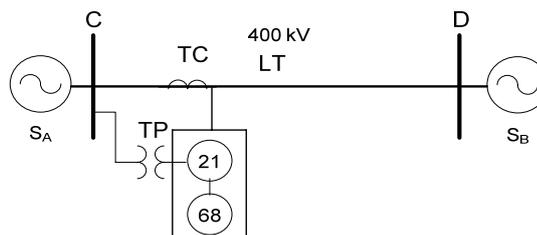


Figura 4.1 – Sistema Teste 1

4.3 Critérios Utilizados nos Testes

As simulações abrangem uma variedade de casos, isto é, tipo de falta, distância da falta, carregamento do sistema, resistência de falta, efeito da componente *dc* e variação da impedância da fonte, ou seja:

**Tabela 4.1 – Dados do Sistema
Teste 1**

Parâmetro	Valor
$Z_{ILT} = Z_{2LT} (\Omega/\text{km})$	$0,1 + j 1,1$
$Z_{0LT} (\Omega/\text{km})$	$3 \cdot Z_{ILT}$
$L(\text{km})$	100
Z_{ISA}	$0,1 \cdot Z_{ILT}$
Z_{OSA}	$3 \cdot Z_{0LT}$
Z_{ISB}	Z_{ISA}
Z_{OSB}	Z_{OSA}
RTP	$3500:1$
RTC	$320:1$

- A. Tipo da falta: Os algoritmos numéricos foram testados para faltas trifásicas ($CC_{3\phi}$) e faltas monofásicas ($CC_{1\phi g}$).
- B. Localização da falta: Nesta etapa de testes duas distâncias de falta pertencentes a primeira zona de atuação do relé de distância (5 e 80% do comprimento da linha) foram consideradas.
- C. Carregamento: O efeito do ângulo de carga também foi analisado. Três ângulos de carga foram considerados nos testes, ou seja, $\delta = 0^\circ$, -15° e -30° .
- D. Resistência de falta: Sabendo que a resistência de falta pode afetar significativamente o desempenho da proteção de distância, nas faltas monofásicas foram analisadas resistências de falta R_f de 100, 150 e 200 Ω .
- E. Variação da impedância dos equivalentes das fontes: Como o sistema estudado possui uma linha de transmissão que conecta dois sistemas, representados pelos seus equivalentes, é possível que ocorra mudanças na impedância dos equivalentes devido à entrada ou saída de geradores, transformadores, linhas de transmissão, etc. Deste modo, diferentes níveis de corrente circularão pelo relé. Além dos testes com as impedâncias dos dois equivalentes iguais, foram realizados testes com a impedância do equivalente da fonte onde o relé está instalado 30% maior que a impedância da fonte remota, e 90% menor que a fonte remota, conforme mostram as equações (4.1) e (4.2). Os resultados desta avaliação são apresentados no Apêndice A.

$$Z_{SA} = 1,3Z_{SB} \quad (4.1)$$

$$Z_{SA} = 0,1Z_{SB} \quad (4.2)$$

Onde:

Z_{SA} é a impedância do equivalente local;

Z_{SB} é a impedância do equivalente remoto.

F. Efeito da componente dc

O curto-circuito foi aplicado no instante de tempo igual a 500 ms com duração de 200 ms. Além disso, de modo a investigar a influência da componente dc no desempenho das técnicas, faltas com ângulo de inserção que resultam a máxima componente dc também são analisadas. Os resultados desta avaliação são apresentados no Apêndice A

Em todos os casos buscou-se avaliar as técnicas por meio do tempo em que a distância leva para convergir e o erro entre a distância estimada e a distância real da falta, usando a equação (4.3).

$$erro = \frac{|d_{est.} - d_{real}|}{L} 100\% \quad (4.3)$$

Onde:

$d_{est.}$ é a distância estimada;

d_{real} é a distância real da falta;

L é o comprimento (km) da linha de transmissão.

4.4 Resultados dos Testes

4.4.1 Localização da Falta

Os algoritmos de proteção numérica foram submetidos a duas distâncias de falta, isto é, 5 e 80% do comprimento da linha de transmissão, para curtos-circuitos trifásicos e monofásicos. Vale ressaltar que os algoritmos de detecção de classificação, que utilizam MM, foram os mesmos para as três técnicas avaliadas. A Tabela 4.2 mostra a resposta dos métodos para faltas trifásicas realizadas na 1ª zona de atuação do relé. Nesta tabela, a distância estimada é o valor de saída do algoritmo no instante que a distância calculada está convergindo para um determinado valor. Para isso, a distância estimada deve satisfazer o critério da convergência, apresentado pelas equações (4.4 – a), (4.4 – b) e (4.4 – c). Se as três diferenças forem menores que 5% inicia-se o cálculo da impedância aparente.

$$\varepsilon_1 = |D_f(k) - D_f(k - 1)| \quad (4.4 - a)$$

$$\varepsilon_2 = |D_f(k) - D_f(k - 2)| \quad (4.4 - b)$$

$$\varepsilon_3 = |D_f(k - 1) - D_f(k - 2)| \quad (4.4 - c)$$

Onde:

$\varepsilon_{1,2,3}$ é a diferença entre duas amostras de D_f ;

D_f é a distância de falta estimada;

k é o valor da amostra atual;

Conforme mostra a Tabela 4.2, para faltas trifásicas realizadas na 1ª zona de atuação do relé, as três técnicas se mostram eficientes e apresentam respostas precisas e semelhantes. O tempo de operação mostrado na Tabela 4.2, que inclui o tempo de detecção, classificação e localização, foi sempre menor que um (1) ciclo e o mesmo valor para os três algoritmos.

Os resultados mostram que quanto maior a distância entre o relé e o local da falta, maior é o erro percentual entre a distância estimada e real. A variação do ângulo do fluxo de potência, δ , apresentou pouca variação sob os resultados, conforme ilustra a Figura 4.2. Nessa figura é mostrado a distância de falta estimada pelo algoritmo MQC em função do tempo para os três valores de δ .

Tabela 4.2 – Resposta dos algoritmos de localização para faltas trifásicas

Distância Falta (%LT)	Fluxo de Potência (δ°)	Distância estimada (km)			Erro (%)			Tempo de operação (ms)		
		MQR ⁽¹⁾	MQC ⁽²⁾	RN ⁽³⁾	MQR	MQC	RN	MQR	MQC	RN
5	0	5,023	5,112	5,112	0,023	0,112	0,112	5,9	5,9	5,9
	-15	5,084	5,080	5,080	0,084	0,080	0,080	10,4	10,4	10,4
	-30	5,084	5,079	5,079	0,084	0,079	0,079	10,4	10,4	10,4
80	0	80,175	79,580	80,175	0,175	0,420	0,175	11,9	11,9	11,9
	-15	80,138	79,577	80,138	0,138	0,423	0,138	11,9	11,9	11,9
	-30	80,125	79,573	80,125	0,125	0,427	0,125	11,9	11,9	11,9

Método:

⁽¹⁾ = Mínimos quadrados recursivo; ⁽²⁾ = Ajuste de curvas por mínimos quadrados; ⁽³⁾ = Rede neural;

A Figura 4.3 mostra a distância estimada em função do tempo utilizando os três algoritmos de estimação da distância de falta. Nesta figura, a falta foi a 80% do comprimento

da linha e δ igual a -15° . Conforme ilustra a Figura 4.3, o traçado da distância estimada dos três algoritmos é muito similar. A solução proposta (MQC) apresenta um *overshoot* inicial um pouco maior que as demais, mas mantém seu valor de distância praticamente constante após um (1) ciclo se completar, diferentemente dos demais que ainda oscilam após um (1) ciclo de dados.

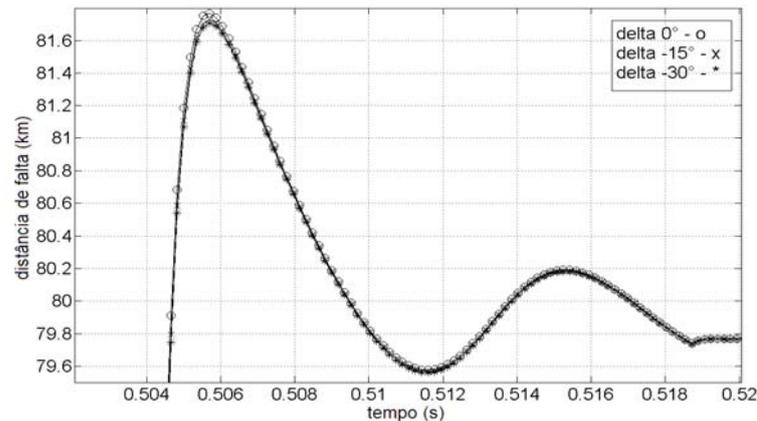


Figura 4.2 – Distância estimada pelo algoritmo MQC para três valores de δ

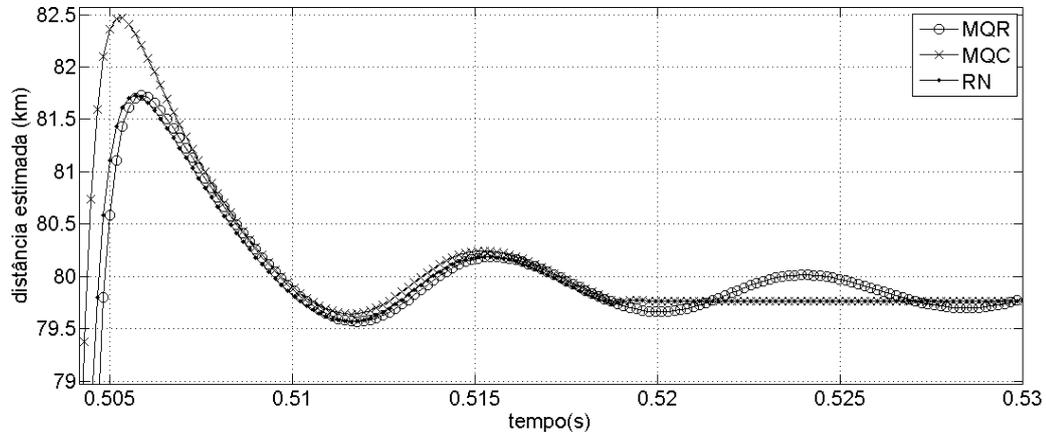


Figura 4.3 – Distância estimada pelos três algoritmos para uma falta trifásica em 80% da linha

4.4.2 Resistência de falta (R_f)

Uma operação satisfatória dos relés de distância pode ser comprometida sob a condição de faltas altamente resistivas. Os algoritmos de estimação da distância de falta foram testados para curtos-circuitos monofásicos considerando três valores de resistência de falta (100, 150 e 200 Ω). A Tabela 4.3 mostra a resposta dos algoritmos para faltas monofásicas a 5 e 80% do comprimento da linha sob as diversas condições de carregamento do sistema e

resistência de falta. Do mesmo modo que ocorreu nos testes das faltas trifásicas, a variação de δ não resultou em significativos erros nas distâncias estimadas, e as faltas mais distantes do relé resultaram em erros e tempos de operação maiores.

Para as faltas a 5% da linha de transmissão os três algoritmos operaram com um tempo inferior a meio ciclo. Já para faltas a 80% da linha os algoritmos MQC e RN obtiveram melhores respostas, tanto no erro, quanto no tempo de operação. Estes dois algoritmos operaram com um tempo inferior a 3/4 de ciclo em todos os casos testados. Já o MQR operou em um tempo superior a um (1) ciclo em 5 casos, sendo que o maior tempo foi de 30,9 ms após a ocorrência da falta. A Figura 4.4 ilustra a distância estimada pelo MQC para diferentes valores de resistência de falta.

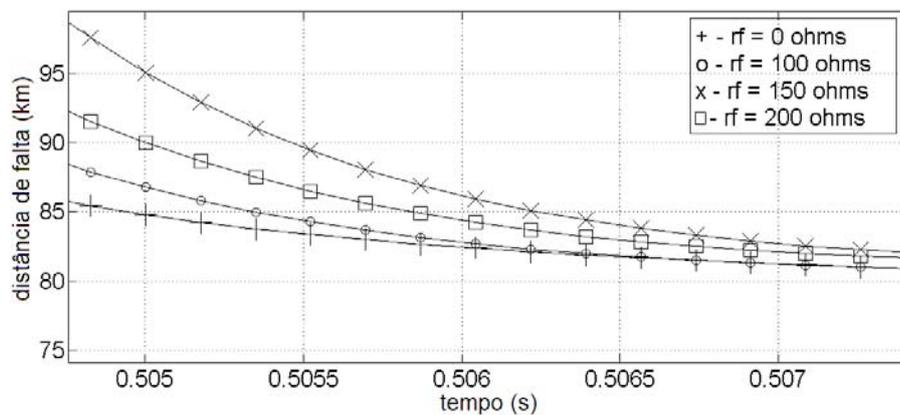


Figura 4.4 – Distância estimada pelo MQC para diferentes valores de R_f

Tabela 4.3 – Resposta dos algoritmos de localização para faltas monofásicas

Distância Falta (%LT)	Fluxo de Potência (δ°)	Resistência Falta (Ω)	Distância estimada (km)			Erro (%)			Tempo de operação (ms)		
			MQR	MQC	RN	MQR	MQC	RN	MQR	MQC	RN
5	0	0	5,043	5,030	5,030	0,043	0,030	0,030	5,5	5,3	5,3
		100	5,008	5,015	5,015	0,008	0,015	0,015	5,5	5,3	5,3
		150	5,087	4,989	4,989	0,087	0,011	0,011	5,0	6,4	6,4
		200	4,975	4,961	4,961	0,025	0,039	0,039	7,3	6,7	6,7
	-15	0	5,037	5,024	5,024	0,037	0,024	0,024	5,5	5,3	5,3
		100	5,003	5,009	5,009	0,003	0,009	0,009	5,5	5,3	5,3
		150	5,077	4,994	4,994	0,077	0,006	0,006	5,5	6,2	6,2
		200	5,085	4,975	4,975	0,085	0,025	0,025	5,2	6,6	6,6
	-30	0	5,104	5,103	5,103	0,104	0,103	0,103	3,8	3,8	3,8
		100	5,002	5,009	5,009	0,002	0,009	0,009	5,5	5,3	5,3
		150	5,076	5,000	5,000	0,076	0,000	0,000	5,5	5,5	6,2
		200	5,086	4,987	4,987	0,086	0,013	0,013	5,0	6,6	6,6
80	0	0	80,183	80,385	80,385	0,183	0,385	0,385	13,5	11,6	11,6
		100	79,497	79,92	79,924	0,503	0,08	0,076	12,1	9,0	9,0
		150	79,686	79,635	79,635	0,314	0,365	0,365	23,9	8,6	8,6
		200	79,478	78,786	79,000	0,522	1,214	1,224	30,9	8,5	8,6
	-15	0	79,337	79,432	79,432	0,663	0,568	0,568	11,9	10,0	10,0
		100	79,263	79,416	79,416	0,737	0,584	0,584	19,4	9,9	9,9
		150	79,204	79,472	79,473	0,796	0,528	0,527	13,0	9,5	9,5
		200	79,217	79,287	79,287	0,783	0,713	0,713	19,2	9,3	9,3
	-30	0	78,817	78,903	78,903	1,183	1,097	1,097	9,2	7,6	7,6
		100	79,971	79,082	79,082	0,029	0,918	0,918	19,2	10,4	10,4
		150	78,997	79,192	79,192	1,003	0,808	0,808	13,3	10	10
		200	79,058	79,135	79,135	0,942	0,865	0,865	18,2	9,9	9,9

4.5 Considerações Finais

O grande desafio deste trabalho é desenvolver um algoritmo numérico para proteção de linhas de transmissão imune as oscilações de potência. Para isso, primeiramente buscou-se uma análise detalhada no modelo de equações diferenciais da linha de transmissão, de modo a verificar seu desempenho perante uma série de casos sem considerar as oscilações de potência. A principal vantagem da técnica desenvolvida é a velocidade de convergência da distância estimada e a simplicidade de sua implementação. Além disso, apresenta um bom desempenho frente às condições testadas, mostrando ser promissora para alcançar os objetivos almejados.

Capítulo 5

O EFEITO DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NOS RELÉS DE DISTÂNCIA

5.1 Considerações Gerais

Os relés de distância utilizados em linhas de transmissão visam proteger a linha contra curtos-circuitos que possam vir a ocorrer em uma determinada zona. No entanto, distúrbios que ocorrem fora desta zona de atuação do relé geram oscilações de potência as quais podem sensibilizar os relés. O relé de distância não deve atuar para as oscilações de potência. Entretanto, são comuns os relatos de operações indevidas dos relés de distância por esse motivo. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar os principais conceitos relacionados ao fenômeno da oscilação de potência, suas causas e consequências para os relés de distância.

Diversas publicações na área de proteção de sistemas elétricos de potência abordam as técnicas de bloqueio do relé de distância durante as oscilações de potência. Deste modo, nesse capítulo também é realizada uma descrição dos métodos convencionais de detecção e bloqueio e outros mais modernos.

5.2 Introdução

Na condição de regime permanente existe uma situação de balanço entre potência gerada e consumida. Nestas condições os sistemas elétricos de potência devem operar com frequência em torno de seu valor nominal. Segundo o Operador Nacional do Sistema (2009) nas condições de regime permanente a frequência pode variar dentro do intervalo de 0,5 Hz. Geralmente, em um grande sistema de potência a frequência varia entre +/- 0,02 Hz do seu valor nominal (IEEE PSRC WG D6, 2005).

Mudanças repentinas no carregamento de um sistema elétrico de potência são causadas principalmente por curtos-circuitos, desconexão ou religamentos de linhas e desligamento de grandes blocos de carga. Este desequilíbrio entre potência gerada e potência consumida, força os geradores a buscarem uma nova condição de operação

(HOLBACH, 2006). Durante esse período ocorrem oscilações no módulo e no ângulo da tensão e da corrente. As linhas de transmissão quando submetidas a estas condições sofrem variações na potência ativa e reativa, caracterizando um fenômeno denominado oscilação de potência. Com a ação dos dispositivos de controle do gerador, o sistema pode alcançar um novo estado de operação aceitável, referido como uma oscilação estável. Geralmente, esse tipo de oscilação tem frequência de oscilação menor que um (1) Hz (ANDERSON, 1999).

Quando a oscilação de potência não resultar em um novo ponto de operação aceitável, a oscilação é do tipo instável. Neste caso, irá ocorrer perda de sincronismo entre sistemas ou grupos de geradores e alguma ação corretiva será necessária, ou seja, o sistema interligado deve ser rapidamente separado em pré-determinadas áreas, de modo a evitar danos em equipamentos e blecautes. Para isso existe a proteção contra a perda de sincronismo, cuja função é realizar a distinção entre a oscilação de potência estável e instável e enviar o sinal para a separação das áreas, se a oscilação for do tipo instável. A Figura 5.1 ilustra o traçado típico da impedância aparente durante uma oscilação de potência do tipo estável e instável, ambas cruzando a região operacional da proteção. A oscilação do tipo instável tende a cruzar a linha, já a do tipo estável, tende a buscar outro ponto operacional sem cruzar a linha.

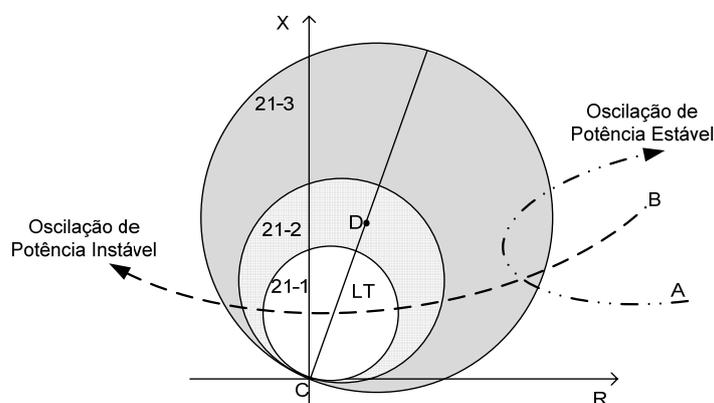


Figura 5.1 – Característica típica da impedância aparente durante oscilação estável e instável

As oscilações de potência, estáveis ou instáveis, podem causar operações indevidas em diversos tipos de proteção (sobrecorrente, direcional, distância, etc.) em diferentes pontos do sistema elétrico. O relé de distância tradicional determina a zona em que a falta se encontra por meio do cálculo da impedância aparente. Em alguns casos, as oscilações de potência fazem com que a impedância vista pelo relé de

distância migre para o interior de sua região operacional, causando atuações indevidas, conforme é mostrado na Figura 5.1. As oscilações de potência tendem a cruzar com mais frequência a zona 3 do relé de distância em razão dessa zona possuir uma área operacional maior. No entanto, a zona 1 do relé de distância é mais propensa a operar durante as oscilações de potência por ser de alta velocidade, e geralmente não fazer uso de temporização.

De maneira a prevenir atuações indevidas do relé de distância, utilizados em linhas de transmissão, bloqueadores de oscilação de potência (função ANSI 68) são inseridos na lógica operacional do relé de forma que a proteção atue somente para as condições de curto-circuito e permaneça inoperante nos casos de oscilação estáveis ou instáveis. Porém, a ocorrência de curto-circuito durante a oscilação de potência deve ser detectada, ou seja, o detector de oscilação deve ser capaz de desbloquear o relé de distância no momento da falta, de modo que este elimine o defeito.

Mesmo durante as oscilações instáveis, os relés de distância não devem operar. Oscilações instáveis devem ser detectadas pela proteção contra a perda de sincronismo. Por meio de critérios de estabilidade, e conforme a coerência dos geradores e equilíbrio entre a potência gerada e consumida (MARIOTTO et al., 2010), a proteção contra a perda de sincronismo realizará a separação do(s) sistema(s) em áreas pré definidas.

Até certo tempo, a preocupação com atuações indevidas da proteção de linhas de transmissão com relés de distância devido às oscilações de potência basicamente se concentrava em linhas que realizavam a conexão de dois grandes sistemas. Esta atitude era realizada de modo a evitar que perturbações em um sistema pudessem gerar oscilações de potência e, conseqüentemente possíveis danos no outro sistema. No entanto, a prática da utilização de bloqueadores de oscilação de potência vem crescendo, à medida que muitos fabricantes de relés microprocessados incorporam tal função nos relés de distância numéricos e, em virtude do aumento da interligação dos sistemas elétricos, os sistemas estão cada vez mais suscetíveis às oscilações externas.

5.2.1 O Relé de Distância durante a Oscilação de Potência

Desprezando-se as resistências e capacitâncias do sistema, a quantidade de potência ativa (P) transmitida entre as barras 'A' e 'B' do sistema mostrado na Figura 5.2 pode ser representada pela equação (5.1) (KUNDUR, 1994)

$$P = \frac{E_A E_B}{X_T} \text{sen}(\delta) \quad (5.1)$$

Onde:

E_A é o módulo da tensão na fonte A;

E_B é o módulo da tensão na fonte B;

δ é a defasagem angular entre E_A e E_B ;

X_T é a reatância total entre as fontes A e B.

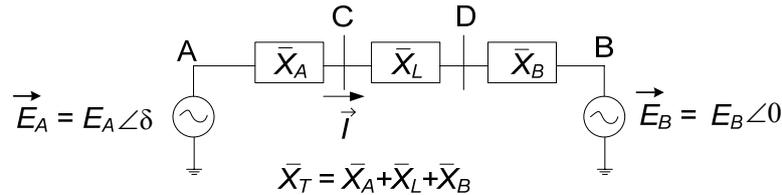


Figura 5.2 – Sistema com duas fontes

Por meio da equação (5.1), mantendo-se constante os valores de E_A , E_B e X_T , pode-se verificar que a potência ativa transferida aumenta à medida que o valor de δ cresce. A máxima potência ativa (P_{max}) transferida ocorre para δ igual a 90° . A partir de 90° , a quantidade de potência transferida diminui com o aumento de δ , como mostra a Figura 5.3 (MOONEY & FISCHER, 2006). Para garantir a estabilidade estática do sistema, a operação não pode ser mantida com valores de $\delta > 90^\circ$, ou seja, 90° corresponde ao limite estático de estabilidade (ZIEGLER, 1999). Na prática, de modo a garantir uma margem de segurança, em um sistema simplificado como o exemplo da Figura 5.2, dificilmente esse valor ultrapassará 60° .

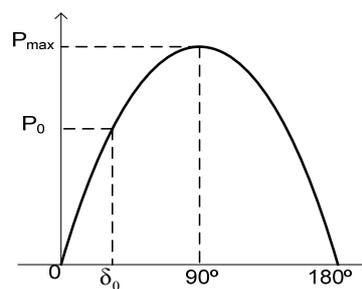


Figura 5.3 – Gráfico potência ativa (P) versus ângulo do rotor (δ)

Mudanças transitórias acima de 90° no ângulo δ podem ser permitidas. Este tipo de análise é realizado por meio de estudos de estabilidade dinâmica e visa determinar o δ crítico e o tempo crítico para a abertura da linha.

Na ocorrência de uma falta, como, por exemplo, um curto-circuito na linha CD da Figura 5.2, a potência ativa (P) diminui repentinamente. Como a potência mecânica de entrada não pode ser instantaneamente reduzida, o gerador, que antes da falta operava com velocidade constante, começa a acelerar até que os dispositivos de controle comecem a agir e reduzir a potência mecânica de entrada. Enquanto o gerador não operar com velocidade constante, ocorrerá a oscilação de potência.

No sistema da Figura 5.2, o relé de distância, que visa proteger a linha CD, é conectado na barra C. Os fasores de corrente \vec{I} e de tensão \vec{E}_c podem ser determinados pelas equações (5.2) e (5.3), respectivamente.

$$\vec{I} = \frac{E_A \angle \delta - E_B \angle 0}{\bar{Z}_T} \quad (5.2)$$

$$\vec{E}_c = \vec{E}_A - \bar{Z}_A \vec{I} \quad (5.3)$$

A impedância vista pelo relé de distância, para uma polarização direta, instalado na barra C é:

$$\bar{Z}_c = \frac{\vec{E}_c}{\vec{I}} = \frac{\vec{E}_A - \bar{Z}_A \vec{I}}{\vec{I}} = -\bar{Z}_A + \bar{Z}_T \frac{E_A \angle \delta}{E_A \angle \delta - E_B \angle 0} \quad (5.5)$$

Se $E_A = E_B = 1,0 \text{ p.u.}$, com algumas manipulações trigonométricas, tem-se a impedância vista pelo relé.

$$\bar{Z}_c = -\bar{Z}_A + \frac{\bar{Z}_T}{1 \angle 0 - 1 \angle -\delta} \quad (5.5)$$

$$\bar{Z}_c = -\bar{Z}_A + \bar{Z}_T \frac{1 \angle 0 + 1 \angle -\delta}{(1 \angle 0 - 1 \angle -\delta)(1 \angle 0 + 1 \angle -\delta)} \quad (5.6)$$

$$\bar{Z}_c = -\bar{Z}_A + \bar{Z}_T \frac{1 + \cos \delta + j \operatorname{sen} \delta}{2j \operatorname{sen} \delta} \quad (5.7)$$

$$= -\bar{Z}_A + \bar{Z}_T \left[\frac{1}{2} - j \left(\frac{1 + \cos \delta}{2 \operatorname{sen} \delta} \right) \right] \quad (5.8)$$

Finalmente, a impedância vista pelo relé de distância ligado na barra C é:

$$\bar{Z}_c = \left(\frac{\bar{Z}_T}{2} - \bar{Z}_A \right) - j \left(\frac{\bar{Z}_T}{2} \cot \frac{\delta}{2} \right) \quad (5.9)$$

Se a relação E_A/E_B for unitária e constante, à medida que o ângulo do rotor aumenta, a impedância aparente se desloca do seu ponto inicial, por exemplo, $\delta = 60^\circ$ em direção à esquerda, $\delta = 90^\circ$ e $\delta = 180^\circ$, conforme mostra a Figura 5.4. Essa figura mostra a interpretação geométrica da equação (5.9). Quando $\delta = 0^\circ$, a corrente \vec{I} é zero e \bar{Z}_C é infinito. Quando $\delta = 180^\circ$, o gerador terá um escorregamento de pólo e a tensão no centro elétrico será zero. Neste caso, como as impedâncias das fontes são iguais, o centro elétrico será no meio da linha. Assim, o relé de distância, localizado no terminal C, interpretará o fenômeno como um curto-circuito trifásico no centro elétrico. Neste exemplo, os lugares do centro elétrico e da impedância vista pelo relé coincidem (KUNDUR, 1994). Caso o valor da impedância dos dois equivalentes forem iguais, o centro elétrico se localizará no meio da linha. Se não forem iguais, o centro elétrico tenderá a se localizar mais próximo do equivalente de maior impedância. Quanto mais próximo do relé estiver localizado o centro elétrico, mais propenso a atuar a proteção de distância da linha devido às oscilações de potência. Ou seja, nestes casos a impedância aparente durante uma oscilação de potência pode atingir a primeira e segunda zona de atuação da proteção da linha de transmissão com pequenas variações nos valores de δ .

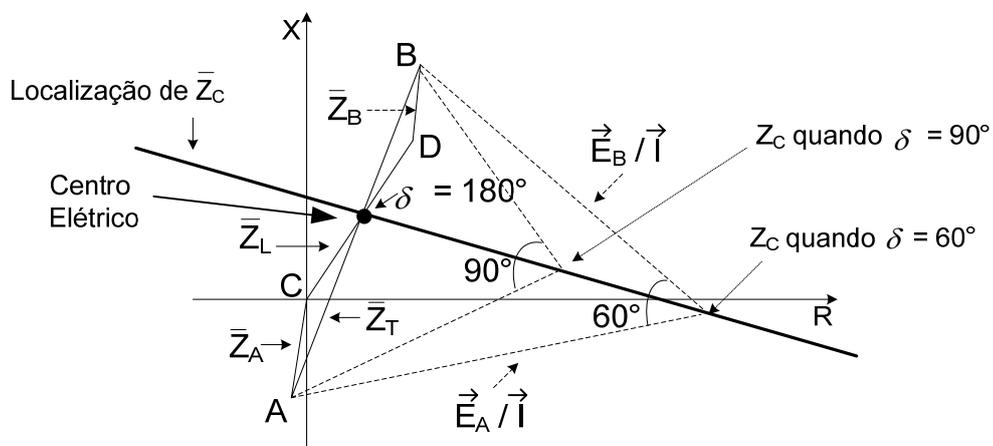


Figura 5.4 – Construção gráfica da impedância vista pelo relé no plano R-X, com $E_A=E_B$ (KUNDUR, 1994)

O caminho traçado pela impedância aparente para os vários valores de E_A/E_B são círculos. Para cada valor de E_A/E_B variando-se o ângulo δ , tem-se um círculo centrado sobre a impedância do sistema \bar{Z}_T (reta \overline{AB}) cujo raio e deslocamento (*offset*) são determinados pela razão E_A/E_B conforme mostra a Figura 5.5. O caso específico de $E_A/E_B = 1$ tem raio e *offset* infinitos.

Se o ângulo δ entre \vec{E}_A e \vec{E}_B for mantido constante enquanto a razão E_A/E_B é variada, a impedância aparente também irá traçar uma porção de círculos os quais cruzam os pontos A e B como mostra a Figura 5.6. A reta \overline{AB} é parte de uma circunferência com raio infinito, o qual representa uma separação angular de 0° ou 180° (KUNDUR, 1994). Logo a impedância aparente vista pelo relé de distância durante uma oscilação de potência é uma combinação das duas famílias de curvas mostradas nas Figuras 5.5 e 5.6, formando trajetórias helicoidais.

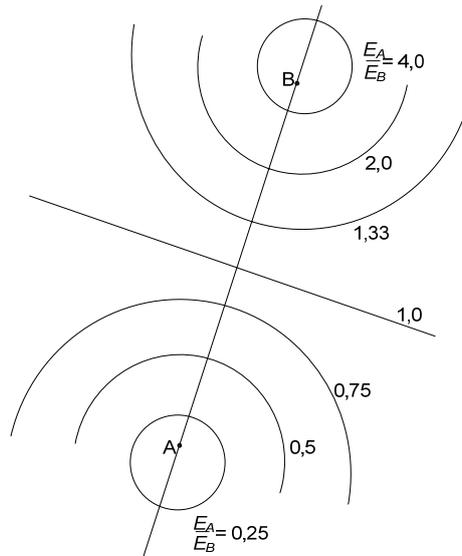


Figura 5.5 – Impedância aparente para diferentes valores de δ para cada valor de E_A/E_B

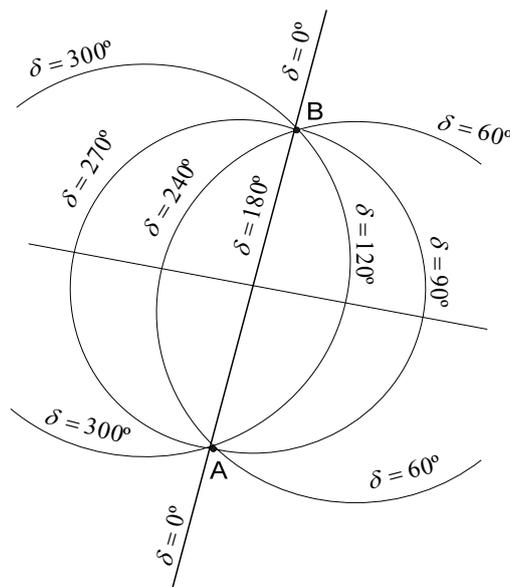


Figura 5.6 – Impedância aparente para diferentes valores de E_A/E_B para cada valor de δ

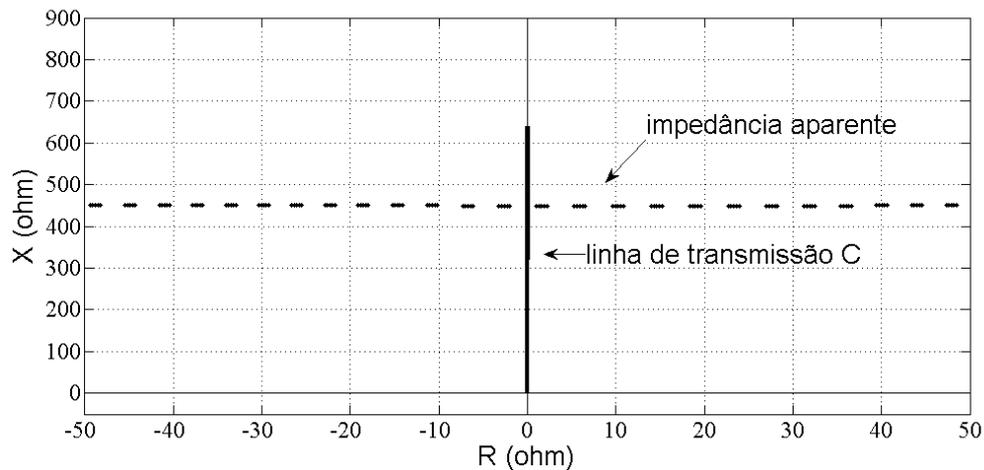


Figura 5.8 – Impedância aparente vista pelo relé de distância da linha C

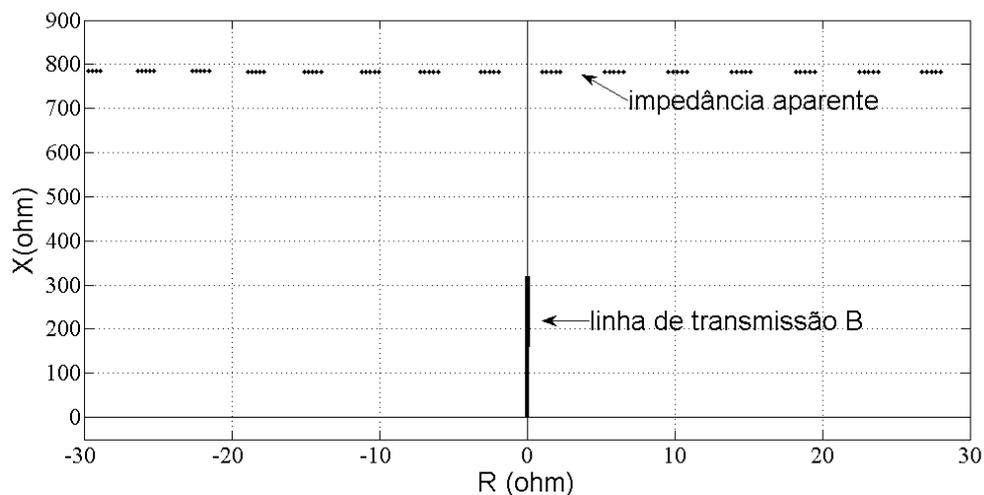


Figura 5.9 – Impedância aparente vista pelo relé de distância B

Somente com estudos baseados na técnica apresentada por Tziouvaras & Hou (2003) e por simulações computacionais não é possível afirmar que a linha de transmissão B não necessita de detector de oscilação de potência. No caso de uma perturbação no sistema ou qualquer outro motivo que ocasione o desligamento de uma dessas linhas de transmissão, o CE do sistema irá mudar e poderá passar a se localizar na linha B. Logo, é necessário uma série de estudos incorporando os diferentes cenários da topologia do sistema, de modo a identificar a possível localização do CE do sistema.

5.3 Métodos Convencionais para Detecção das Oscilações de Potência

Um critério tradicionalmente utilizado para distinguir a oscilação de potência de uma condição de falta é a taxa de variação da impedância aparente de sequência positiva vista pelo relé (HOLBACH, 2006). Durante a operação normal do sistema o relé de distância mede a impedância da carga, que está localizada eletricamente distante da característica operacional do relé. Quando ocorre uma falta na linha de transmissão, a impedância aparente se movimenta rapidamente do local da impedância de carga para o local da falta, isto é, região protegida pelo relé de distância. Por outro lado, durante uma oscilação de potência, a taxa de variação da impedância aparente, governada pela inércia mecânica das unidades geradoras, é lenta.

5.3.1 Método das Características Concêntricas (MCC)

Fundamentado no comportamento do movimento da impedância, surgiu uma das técnicas mais tradicionais para detecção de oscilação de potência. Esse método determina o tempo em que a impedância aparente leva para cruzar uma região pré-determinada, e compara com o seu ajuste de tempo.

A região pré-determinada no plano $R-X$ é restringida por dois limites, um limite externo (LE) e outro limite interno (LI). Uma vez definida a característica do relé de distância da linha (ohm, mho, quadrilateral, poligonal, lente, etc), o LI e o LE consistem em regiões concêntricas à zona mais externa da proteção, separados entre si por um “*offset*” (ΔR), conforme mostra a Figura 5.10. O segmento AB corresponde à linha protegida pelo relé de distância.

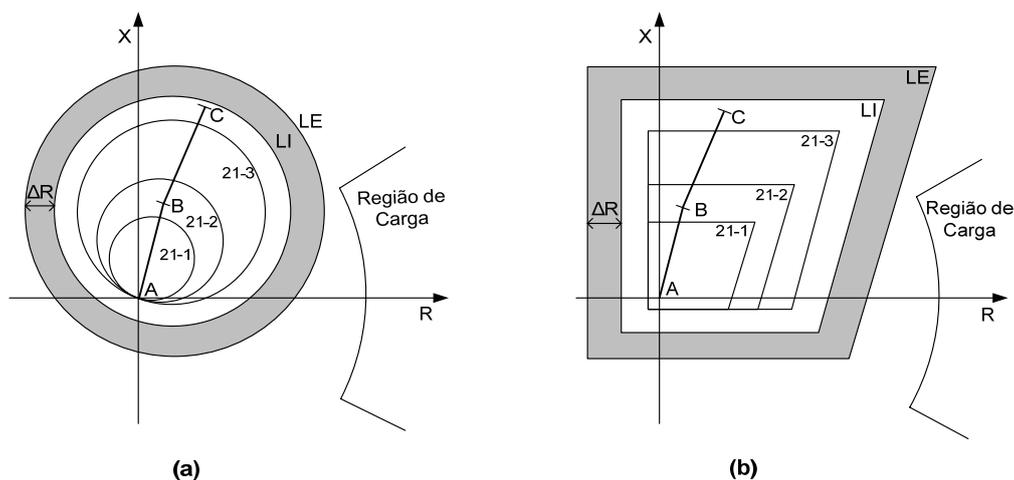


Figura 5.10 – Método características concêntricas aplicado em: (a) relé mho; (b) relé quadrilateral

Geralmente, são utilizadas duas novas áreas, criadas com o objetivo de detectar a oscilação de potência antes que a impedância aparente atinja a zona de atuação da proteção de distância. Porém, algumas implementações utilizam como LI a 3ª zona de proteção do relé de distância, ou a zona mais externa (IEEE PSRC WG D6, 2005).

Quando a impedância aparente cruzar o LE o temporizador é inicializado. Ao cruzar o LI, o temporizador é finalizado. Se o tempo medido for maior ou igual ao tempo ajustado, a condição de oscilação de potência é detectada e o relé de distância da linha é bloqueado. O relé permanece bloqueado até que a impedância saia do interior da região LE. Por outro lado, se a impedância cruzar a região pré-determinada em um tempo menor que o ajustado o relé de distância da linha de transmissão não é bloqueada, caracterizando uma falta.

Uma vez definida a característica operacional da proteção de distância, os ajustes deste método devem respeitar os seguintes critérios:

- I. O LI deve ser maior ou igual ao ajuste da zona de proteção mais externa do relé de distância associado;
- II. O LE deve ser cuidadosamente ajustado de maneira que não atinja a região de máximo carregamento do sistema.

O método depende de um cuidadoso estudo para definir os ajustes dos LE, LI, temporização e da distância entre as regiões concêntricas (ΔR). De acordo com Ziegler (1999), o alcance R_{LE} ilustrado na Figura 5.11 é obtido pela equação (5.10). Essa determina o máximo valor que a resistência do LE pode alcançar em função do ângulo máximo da carga (δ_{MAX}).

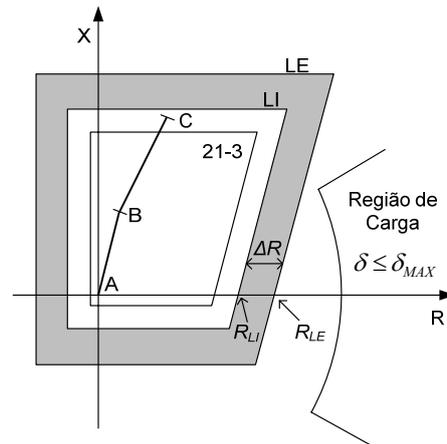


Figura 5.11 – Ajuste das regiões concêntricas.

$$R_{LE} = \frac{\Sigma Z}{2} \cot\left(\frac{\delta_{MAX}}{2}\right) \quad (5.10)$$

Onde:

R_{LE} é o alcance resistivo, em Ω ;

δ_{MAX} é o máximo ângulo de operação, em graus;

ΣZ é o somatório do módulo das impedâncias de sequência positiva da LT e das fontes equivalentes, em Ω .

É possível se determinar a taxa de variação da resistência aparente (Ω/s), para determinada frequência de oscilação ($f_{osc.}$), nos pontos próximos a δ_{MAX} , por meio da equação (5.11).

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\pi}{2} \Sigma Z f_{osc.} \tan\left(\frac{\delta_{MAX}}{2}\right) \quad (5.11)$$

Onde:

dR/dt é a taxa de variação da resistência aparente, em Ω/s ;

ΣZ é o somatório do módulo das impedâncias de sequência positiva da linha e das fontes equivalentes, em Ω ;

$f_{osc.}$ é a frequência de oscilação, em Hz;

δ_{MAX} é o máximo ângulo de operação, em graus.

Deseja-se proteger o sistema em uma determinada frequência máxima de oscilação. Costuma-se denominar de oscilações lentas as que possuem frequência de oscilação de 1 a 3 Hz e rápidas de 4 a 7 Hz (REDDY & MOHANTA, 2008). Considerando que seja conhecida a máxima frequência de oscilação do sistema elétrico,

a taxa de variação calculada pela equação (5.11) será máxima. Uma temporização é então fixada e determina-se o valor de ΔR correspondente a tal temporização através da inequação (5.12).

$$\Delta R \geq t_{MCC} \frac{dR}{dt} \quad (5.12)$$

Onde:

ΔR é a diferença entre a os alcances resistivos do LE e LI, em Ω ;

t_{MCC} é o tempo que a impedância deve permanecer entre LE e LI para ser considerada oscilação, em s;

dR/dt é a taxa de variação da resistência aparente, em Ω/s ;

O valor encontrado para ΔR representa o ajuste mínimo, ou seja, a distância resistiva entre o LE e o LI, para a temporização escolhida, deve ser maior ou igual ao valor encontrado.

O alcance resistivo do LI (R_{LI}) pode ser determinado pela equação (5.13).

$$R_{LI} = R_{LE} - \Delta Z \quad (5.13)$$

Durante uma oscilação de potência a taxa de variação da resistência aparente (dR/dt) aumenta à medida que a impedância aparente se aproxima da linha de transmissão (ZIEGLER, 1999). Este fenômeno pode ser verificado analisando a equação (5.11). Por meio dessa pode-se notar que, à medida que a impedância aparente se aproxima da linha, ou seja, δ aumenta, dR/dt aumenta. Devido a isso, nas proximidades de R_{LI} , a taxa de variação será maior do que nas proximidades de R_{LE} . Assim, após se realizar o cálculo do R_{LI} deve-se aplicar o seu valor na equação (5.10), de modo determinar o δ para o valor de R_{LI} , conforme equação (5.15).

$$\delta = 2 \arctan \left(\frac{\Sigma Z / 2}{R_{LI}} \right) \quad (5.14)$$

Após, calcula-se o novo dR/dt pela equação (5.11). Com a mesma temporização adotada anteriormente (t_{CC}). Por meio da inequação (5.12) é encontrado um novo valor mínimo para ΔR . A equação (5.13) é então utilizada, e o novo alcance resistivo do LI é determinando.

Deve-se verificar se o novo alcance do LI é menor do que o alcance resistivo da região mais externa de proteção do relé, de maneira que o LE e o LI sejam concêntricos e externos a tais regiões.

5.3.2 Método Duplo Blinder (MDB)

Este método utiliza o mesmo princípio de funcionamento que as Características Concêntricas, isto é, a variação da impedância aparente de sequência positiva. O tempo é medido quando a impedância atravessa a região entre dois limites, aqui denominados de “*blindings*”, conforme mostra a Figura 5.12. Estes “*blindings*” são ajustados em paralelo com a impedância da linha AB a fim de otimizar a leitura da taxa de variação da impedância, pois esta geralmente entra nas zonas de proteção com um ângulo próximo ou igual a 90° em relação ao ângulo da impedância da linha (IEEE PSRC WG D6, 2005).

Quando a impedância atravessar o “*blinder*” externo direito (BED) um temporizador é inicializado. A temporização é interrompida quando a impedância atravessar o “*blinder*” interno direito (BID). Se o tempo medido for maior do que aquele previamente ajustado, o relé de distância é bloqueado até que a impedância saia da região entre os dois “*blindings*” externos (BED e BEE). Por outro lado, se o tempo medido for menor que o ajustado, nenhuma ação é tomada e o relé de distância fica habilitado a operar. O método funciona de maneira análoga se a impedância migrar pelo lado esquerdo, sendo definidos o “*blinder*” externo esquerdo (BEE) e “*blinder*” interno esquerdo (BIE).

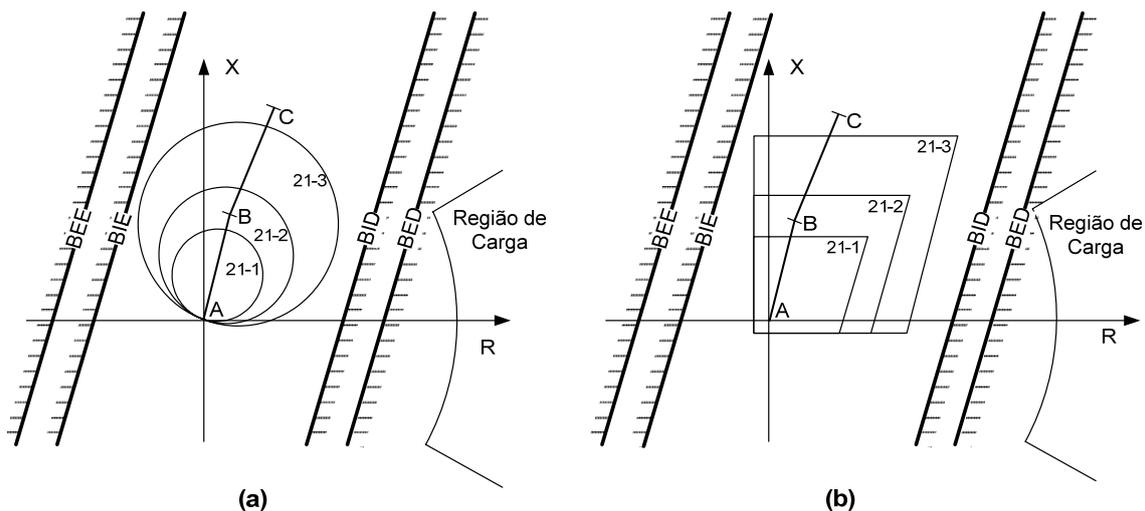


Figura 5.12 – Método duplo “blinder” aplicado em: (a) relé mho; (b) relé quadrilateral.

Segundo Mooney & Fischer (2006), o ajuste do posicionamento de cada “blinder” pode ser determinado por meio de dois critérios:

- I. Os “blindings” internos devem ser ajustados para ficar além da impedância da zona mais distante de proteção do relé de distância. Os “blindings” externos devem ser ajustados de maneira a não atingirem os pontos de carga máxima do sistema. O ajuste de ambos deve obedecer a uma margem de 20% sobre a característica do relé e carga, de modo a garantir uma operação segura;
- II. Utilizar a impedância equivalente do sistema para escolher os ângulos de abertura equivalentes para o posicionamento dos “blindings” internos e externos, conforme mostra a Figura 5.13. A escolha dos ângulos deve obedecer à mesma margem de segurança apresentada no critério I.

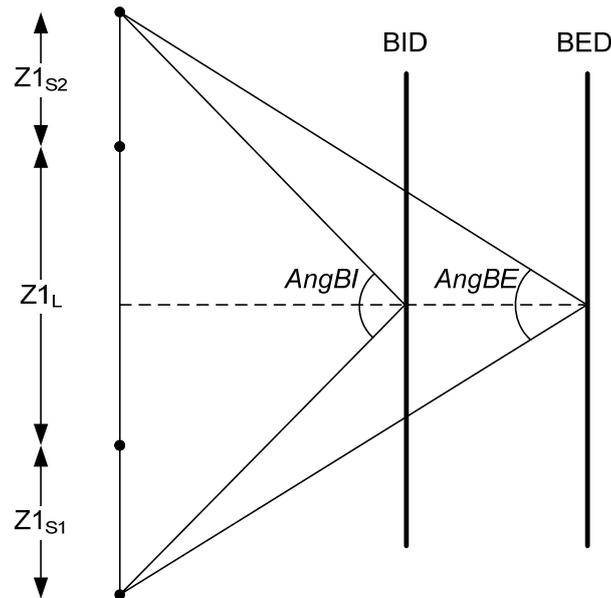


Figura 5.13 – Ângulos de abertura para ajuste dos *blinders*.

Para certificar-se de que o ângulo do “*blinder*” interno atende ao critério I, determina-se o ângulo para o alcance resistivo da terceira zona de proteção, e define-se o ângulo do BI através da inequação (5.15).

$$AngBI \leq AngR_3 - \alpha \quad (5.15)$$

Onde:

$AngBI$ é o ângulo de abertura para o “*blinder*” interno, em graus;

$AngR_3$ é o ângulo de abertura para o alcance resistivo da zona de proteção mais externa do relé de distância, em graus;

α é a margem de segurança, em graus.

Conhecidos os ângulos, a temporização deste método é determinada pela equação (5.16) (MOONEY & FISCHER, 2006).

$$t_{duplo_blinder} = \frac{(AngBI - AngBE)}{360f_{osc.}} \quad (5.16)$$

Onde:

$AngBI$ é o ângulo de abertura para o “*blinder*” interno, em graus;

$AngBE$ é o ângulo de abertura para o “*blinder*” externo, em graus;

$f_{osc.}$ é a máxima frequência de oscilação do sistema, em Hz.

5.4 Métodos Não-convencionais de Detecção de Oscilações de Potência

A filosofia de proteção contra oscilações de potência em linhas de transmissão fundamentada na trajetória da impedância aparente foi muito utilizada ao longo dos anos. O desenvolvimento da tecnologia dos microprocessadores em relés digitais trouxe a possibilidade de se explorar o fenômeno da oscilação de potência por meio de outras técnicas. Além disso, em virtude do aumento do sistema elétrico, tanto em tamanho quanto em complexidade, cada vez mais frequentes são os relatos de operações indevidas da proteção de linhas devido às oscilações de potência. Logo, uma grande variedade de técnicas destinadas a este fim, denominadas neste trabalho de não-convencionais, têm sido apresentadas, sendo as principais abordadas neste trabalho.

5.4.1 Método do Cálculo Contínuo da Impedância (MCI)

Blumschein et al. (2008) apresentaram um método alternativo fundamentado no cálculo contínuo da variação da impedância aparente de sequência positiva.

Primeiramente, é definida uma região no plano $R-X$ denominada região de detecção de oscilação de potência (RDOP), de maneira que todas as regiões de proteção do relé de distância sejam cobertas, conforme Figura 5.14.

Quando a impedância aparente de qualquer uma das fases estiver no interior da RDOP, os seguintes critérios são avaliados:

- a) Critério de Continuidade: A variação entre duas medições consecutivas de resistência ou reatância deve exceder o ajuste, conforme a Figura 5.15. Este critério garante que a impedância não se encontra em estado estacionário (característica de operação estável). O critério da continuidade deve ser satisfeito para seis medições consecutivas para então retornar um sinal verdadeiro (HOLBACH, 2006).

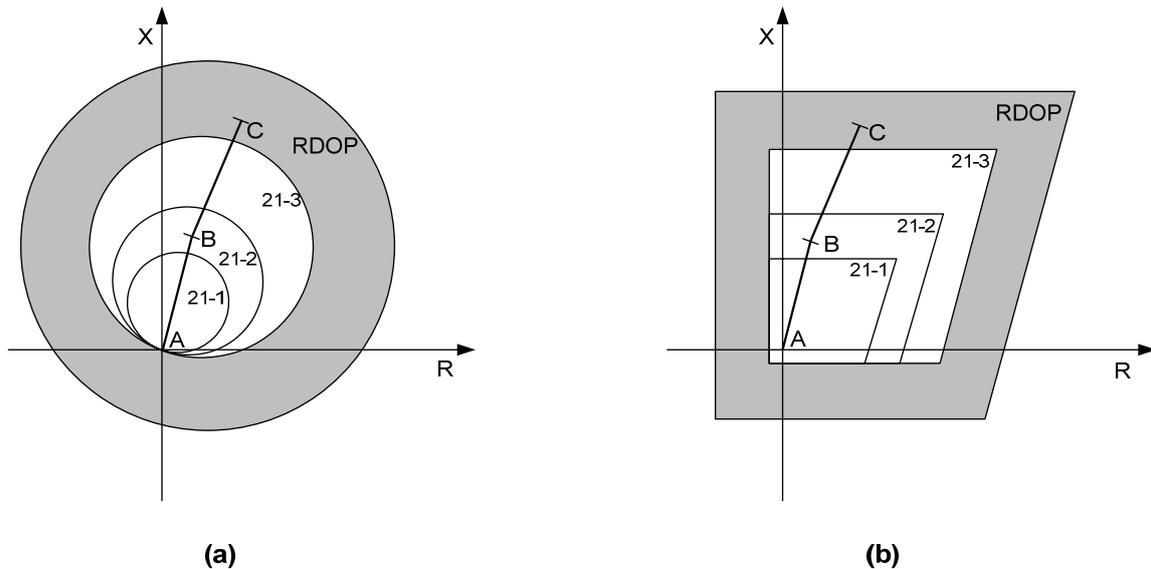


Figura 5.14 – Regiões de Detecção de Oscilação de Potência definidas para: (a) relé mho; (b) relé quadrilateral.

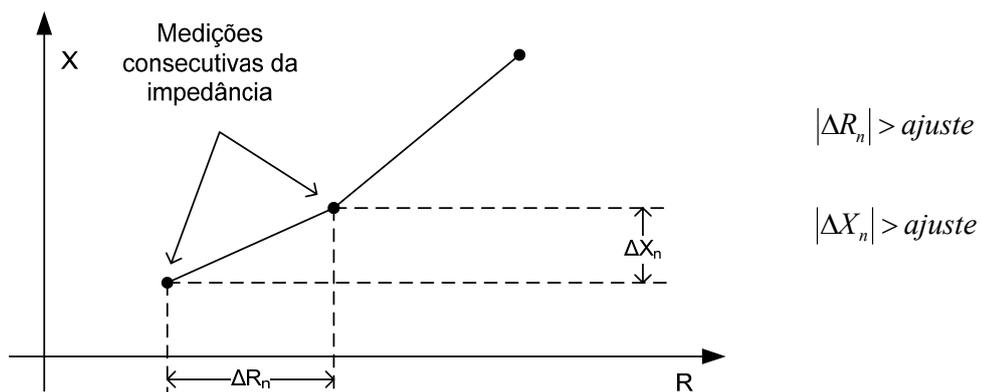


Figura 5.15 – Critério da continuidade.

- b) Critério de Suavidade: A relação entre duas diferenças sucessivas da resistência ou reatância deve estar abaixo de um valor ajustado como mostra a Figura 5.16. Este critério garante um movimento suave da impedância (característica de oscilação de potência), sem variações abruptas (característica de curto-circuito).

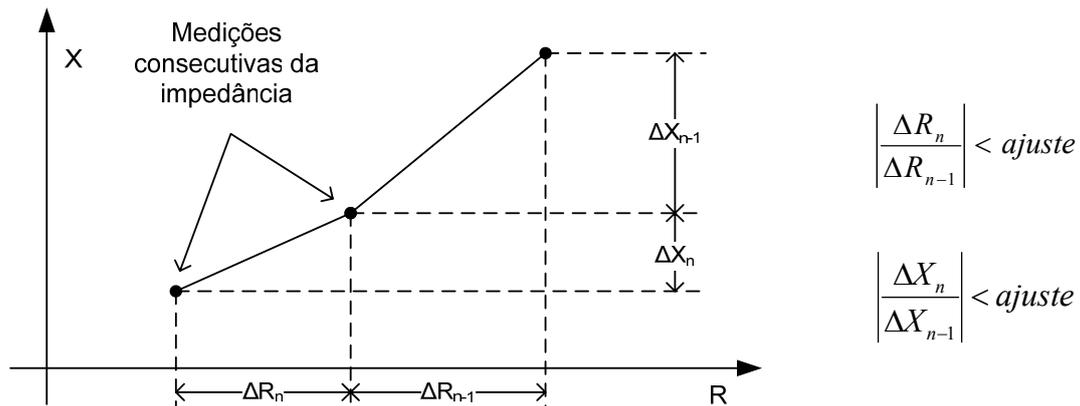


Figura 5.16 – Critério da suavidade.

Tais ajustes devem ser cuidadosamente definidos com base em estudos de estabilidade transitória, de forma a garantir que as oscilações dentro de uma determinada faixa de frequência possam ser detectadas. Deve-se também avaliar o número de amostras por ciclo do sinal, pois uma amostragem menor leva a diferenças maiores entre medições consecutivas da resistência e reatância.

Em condições normais de operação a impedância vista pelo relé será praticamente estática, sem grandes descontinuidades entre medições consecutivas. Dessa forma, para o ajuste do critério da continuidade, a variação da resistência e reatância sob condições de operação normal do sistema deve ser avaliada. O valor ajustado deve ser maior do que a máxima variação da resistência e da reatância em condições normais de operação, satisfazendo as inequações (5.17) e (5.18), respectivamente.

$$\Delta R_{ajuste} > |\Delta R|_{ON_max} \quad (5.17)$$

$$\Delta X_{ajuste} > |\Delta X|_{ON_max} \quad (5.18)$$

Onde:

ΔR_{ajuste} é o valor ajustado para a variação da resistência aparente;

ΔX_{ajuste} é o valor ajustado para a variação da reatância aparente;

$|\Delta R|_{ON_max}$ é a variação da resistência em condições normais de operação;

$|\Delta X|_{ON_max}$ é a variação da reatância em condições normais de operação.

Já o critério da suavidade deve ser ajustado com base no comportamento da impedância durante os curtos-circuitos. Assim, estimam-se as mínimas variações entre duas diferenças sucessivas da resistência ou reatância durante a falta, de maneira que as inequações (5.19) e (5.20) sejam satisfeitas.

$$\Delta dR_{ajuste} < \left| \frac{\Delta R_n}{\Delta R_{n-1}} \right|_{CC_min} \quad (5.19)$$

$$\Delta dX_{ajuste} < \left| \frac{\Delta X_n}{\Delta X_{n-1}} \right|_{CC_min} \quad (5.20)$$

Onde:

ΔdR_{ajuste} é o valor ajustado para duas diferenças sucessivas da resistência aparente;

ΔdX_{ajuste} é o valor ajustado para duas diferenças sucessivas da reatância aparente;

$\left| \frac{\Delta R_n}{\Delta R_{n-1}} \right|_{CC_min}$ é a mínima variação entre duas diferenças sucessivas da resistência aparente durante curtos-circuitos;

$\left| \frac{\Delta X_n}{\Delta X_{n-1}} \right|_{CC_min}$ é a mínima variação entre duas diferenças sucessivas da reatância aparente durante curtos-circuitos.

Os valores ajustados devem ser menores do que as mínimas variações entre duas diferenças sucessivas da resistência ou reatância sob condições de curto-circuito. Estas variações serão mínimas para faltas distantes do relé, pois os valores de capacitância e indutância da linha fornecerão maior inércia às variações bruscas dos sinais de tensão e corrente, respectivamente.

A Figura 5.17 apresenta a lógica operacional deste método que deve ser aplicada separadamente a cada fase.

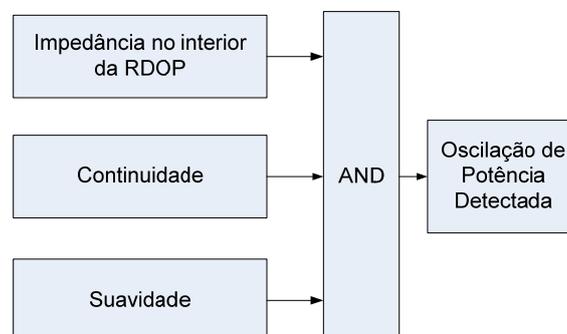


Figura 5.17 – Algoritmo de Detecção de Oscilação de Potência

5.4.2 Método da Taxa de variação da Magnitude da Tensão no Centro Elétrico (MVC)

A Magnitude da Tensão no Centro Elétrico (MTCE) é definida como o módulo do vetor que vai desde o ponto onde a impedância aparente de sequência positiva se encontra até o CE, conforme mostra a Figura 5.18, para o sistema já mostrado na Figura 5.2.

Segundo Benmouyal et al. (2005), durante uma oscilação de potência, o valor instantâneo da magnitude da tensão no CE (MTCE), assumindo que as fontes dos sistemas são iguais, é descrito pela equação (5.21).

$$MTCE(t) = \sqrt{2}E \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\delta(t)}{2}\right) \operatorname{cos}\left(\frac{\delta(t)}{2}\right) \quad (5.21)$$

Onde:

$MTCE(t)$ é o valor instantâneo da Magnitude da Tensão no Centro Elétrico;

E é a magnitude da tensão das fontes;

$\delta(t)$ é a diferença angular entre as fontes, em graus.

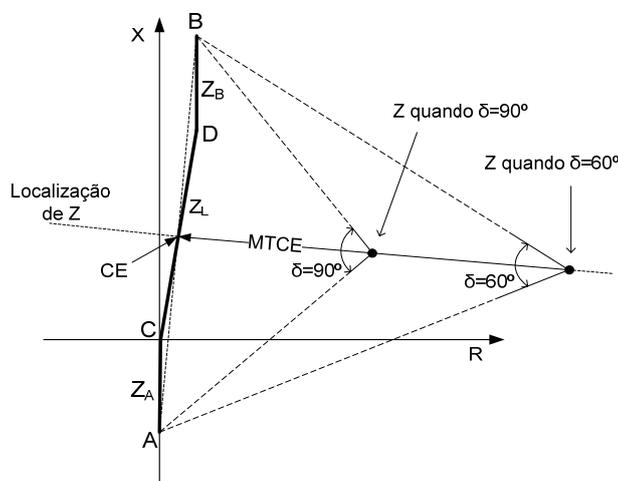


Figura 5.18 – Trajetória da impedância aparente (Z) e sua MTCE, em função de δ , com $E_A=E_B$

Considerando E igual a 1,0 p.u. e analisando a equação (5.21), pode-se verificar que o MCTE é função da frequência de oscilação f_{osc} . ($\omega = 2\pi(f + f_{osc})$) e da diferença angular entre as duas fontes (δ), que por sua vez está relacionada com o carregamento do sistema. A Figura 5.19 mostra a variação do MTCE do sistema teste da Figura 5.2 durante uma oscilação de potência com $\delta = 30^\circ$ e $f_{osc} = 0,1$ Hz. Por meio

dessa figura pode-se verificar que o valor do MTCE em determinados instantes é zero, pois neste exemplo a tensão foi medida no centro elétrico. Em uma condição normal, o MTCE permanece constante.

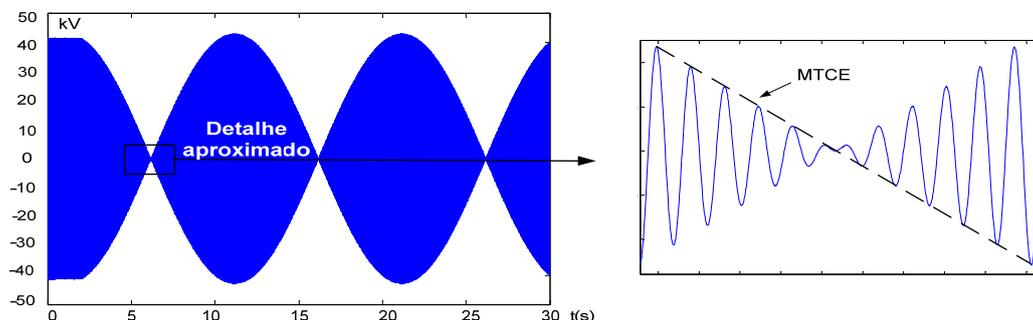


Figura 5.19 – Variação do MTCE durante uma oscilação de potência ($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 0,1\text{Hz}$)

Quando $\delta = 180^\circ$, MTCE é zero. A medida que δ cresce seu valor, até atingir 360° , o MTCE aumenta. No instante que δ alcançar o valor do início da oscilação, um ciclo de oscilação é completado.

A Figura 5.20 – (a) mostra a composição das tensões para um sistema de duas fontes com uma defasagem angular δ . O ponto C é o local onde estão instalados o TC e TP. A taxa de variação do MTCE é utilizada na detecção de oscilação de potência.

Dessa forma, alguma diferença entre a MTCE do sistema e sua estimativa no local de medição (ponto C) tem pouco impacto na detecção da oscilação. Assim, pode-se assumir que a relação mostrada na equação (5.22) é verdadeira (BENMOUYAL et al., 2005), onde φ é o ângulo entre a tensão e a corrente, medidas no ponto C.

$$\varphi \approx \frac{\delta}{2} \quad (5.22)$$

Sendo V_C a tensão de fase lida no ponto C e considerando que o ângulo da impedância do sistema, θ , se aproxima de 90° para um sistema puramente reativo, a MTCE pode ser aproximada pela equação (5.23), conforme descrito em IEEE PSRC WG D6 (2005).

$$MTCE \approx |V_C| \cos \varphi \quad (5.23)$$

Onde:

$MTCE(t)$ é o a magnitude da tensão no centro elétrico;

V_C é a tensão de fase no ponto de medição;

φ é o ângulo entre a tensão e a corrente medidas no ponto C.

Assim, a MTCE tem valor máximo quando o ângulo entre as duas fontes for 0° e valor nulo quando o ângulo for 180° , conforme Figura 5.20 – (b).

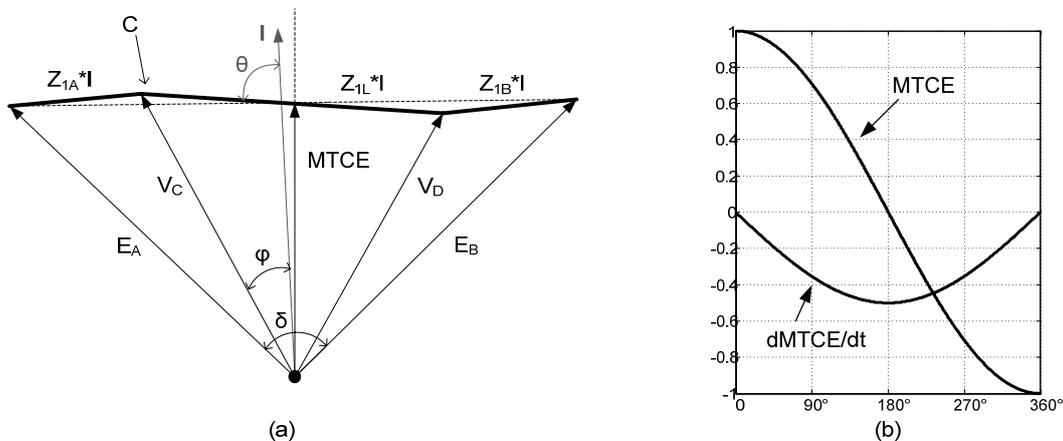


Figura 5.20 – (a) Esquema da composição das tensões e correntes e (b) MTCE em função do ângulo entre as fontes e sua taxa de variação em relação ao tempo ($dMTCE/dt$)

Utilizando a teoria da MTCE, Benmouyal et al. (2005) apresentaram uma lógica de detecção de oscilação de potência que monitora a taxa de variação do MTCE ($dMTCE/dt$). As condições para a lógica devem satisfazer os critérios mostrados na Figura 5.21, ou seja:

1. O valor absoluto da $dMTCE/dt$ deve ser superior a um ajuste mínimo (Min_dMTCE/dt) previamente definido;
2. O valor da MTCE deve ser inferior a um máximo ajuste (Max_{MTCE}) e superior a um mínimo ajuste (Min_{MTCE}) previamente definido;
3. A impedância de sequência positiva deve estar no interior de uma região de detecção de oscilação de potência (RDOP) previamente ajustada no plano $R-X$.

Para o ajuste da RDOP não é necessário ter conhecimentos prévios relativos ao carregamento máximo do sistema, bastando ajustá-la de maneira a envolver todas as regiões de proteção do relé de distância.

A faixa de valores na qual a MTCE deverá permanecer deve ser ajustada em função dos valores máximos da função cosseno, uma vez que a MTCE é aproximada por tal função. Assumindo a igualdade exposta na equação (5.23), e, se δ_{MAX} é o ângulo máximo considerado para o carregamento do sistema, o ajuste deve ser realizado de forma que a inequação (5.24) seja satisfeita.

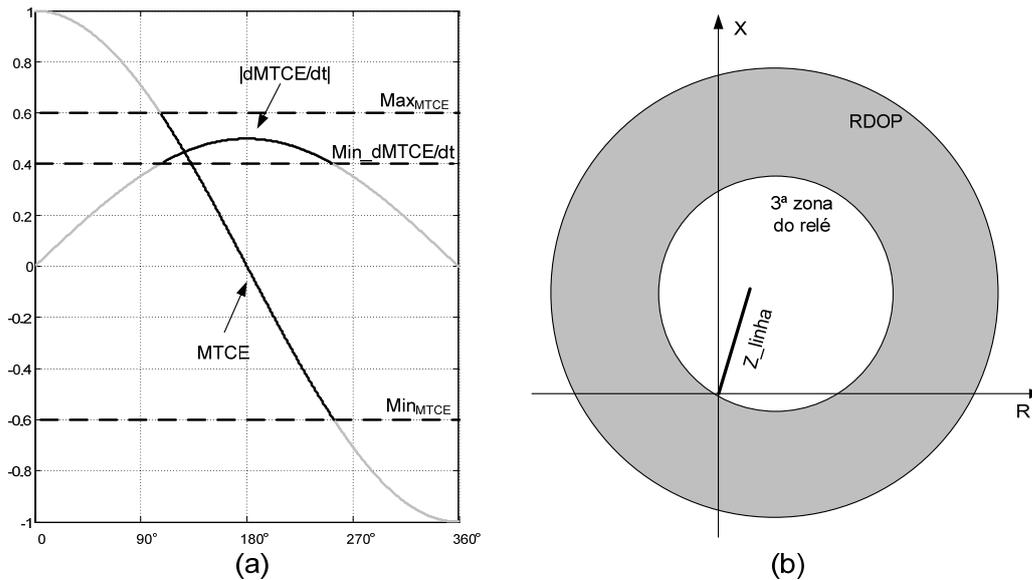


Figura 5.21 – Critérios operacionais de detecção de oscilação de potência: (a) Condições 1 e 2; (b) Condição 3.

$$Max_{MTCE} = -Min_{MTCE} > |V_C| \cos\left(\frac{\delta_{MAX}}{2}\right) \quad (5.24)$$

O alcance mínimo do valor absoluto da $dMTCE/dt$ é encontrado através de análises sobre o sistema. Este valor deve estar acima das máximas taxas de variação durante operação normal do sistema, garantindo que todas as oscilações sejam consideradas.

A lógica operacional do método é mostrada na Figura 5.22, onde PSB é o sinal lógico de saída do relé contra oscilação de potência.

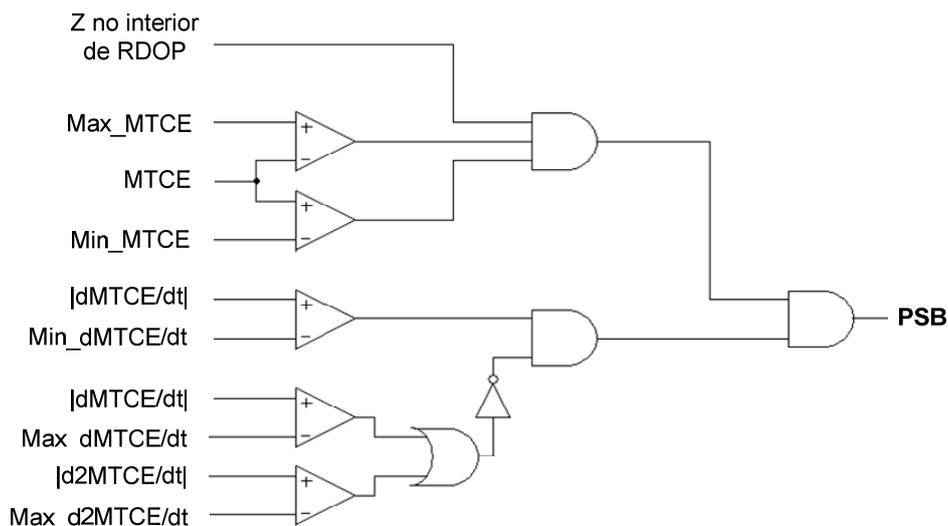


Figura 5.22 – Lógica operacional do método

5.4.3 Método de Detecção de Oscilações de Potência por meio das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente de Sequência Positiva (MCS)

O algoritmo para proteção digital de linhas de transmissão, inicialmente proposto por Jonsson & Daalder (2001) e aprimorado por Bolzan et al. (2009) utiliza o relé de distância e dois critérios adicionais, sem a necessidade de definir novas áreas no plano $R-X$. Neste método, a impedância aparente no interior da zona de atuação do relé de distância por um tempo pré-definido não assegura a operação do mesmo, ou seja, os critérios adicionais devem ser satisfeitos para que a proteção atue. Durante eventos que causam o desequilíbrio do sistema elétrico, a técnica utiliza um critério que avalia a corrente de sequência negativa. Para condições em que o sistema está equilibrado, entre essas a maioria das oscilações de potência, a derivada do ângulo da corrente de sequência positiva é utilizada para distinguir oscilações de curtos-circuitos trifásicos.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 5.23 – (a) mostra a lógica operacional utilizada para a primeira zona de proteção do relé. As variáveis com o subíndice “ aj .” representam os parâmetros de ajuste do algoritmo e as variáveis restantes são continuamente atualizadas.

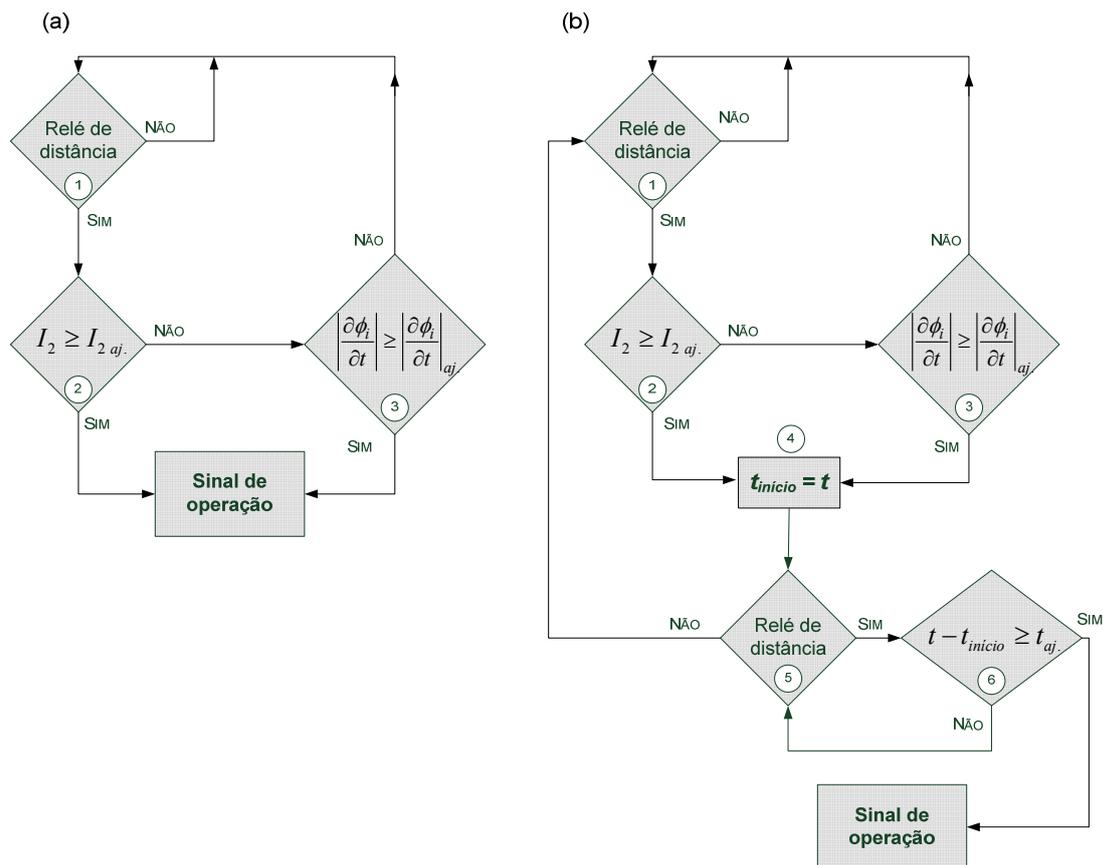


Figura 5.23 – Lógica operacional do relé de distância para: (a) zona 1 e (b) zonas 2 e 3

O bloco 1 incorpora a função tradicional de um relé de distância qualquer (ohm, mho, quadrilateral, etc). Os blocos 2 e 3 verificam se a razão da operação do bloco 1 é devido a um curto-circuito ou a uma oscilação de potência. O bloco 2 determina, por meio da corrente sequência negativa, se o curto-circuito é desequilibrado ($1\Phi g$, 2Φ ou $2\Phi g$). Se não, o bloco 3 é acionado. Esse utiliza a derivada do ângulo da corrente de sequência positiva para verificar se existe uma condição de curto-circuito trifásico ou oscilação de potência. Quando derivada do ângulo da corrente de sequência positiva for maior que o valor ajustado, um sinal de disparo é enviado aos disjuntores. Para a segunda e a terceira zona de proteção do relé é utilizado o algoritmo mostrado na Figura 5.23 – (b), onde por meio dos blocos 4, 5 e 6 é realizada a temporização das zonas do relé de distância.

O critério da corrente de sequência negativa (bloco 2) avalia o grau de desequilíbrio entre as fases, característica comum em faltas desequilibradas. Porém, mesmo durante faltas trifásicas simétricas podem ocorrer alguns desequilíbrios transitórios. Assim, é necessário o ajuste de uma temporização (t_{12}), no qual a corrente

de sequência negativa deve ser maior do que $I_{2\text{ aj.}}$. O critério utilizado para o ajuste do bloco 2 deve satisfazer a relação da inequação (5.25), durante t_{I2} segundos.

$$I_{2\text{ CC}3\emptyset\text{ max.}} \leq kI_{2\text{ aj.}} \leq I_{2\text{ CC}1\emptyset\text{ min.}} \quad (5.25)$$

Onde:

$I_{2\text{ aj.}}$ é o valor a ser ajustado no Bloco 2;

$I_{2\text{ CC}3\emptyset\text{ max.}}$ é a máxima corrente de sequência negativa para um curto-circuito 3 \emptyset ;

$I_{2\text{ CC}1\emptyset\text{ min.}}$ é a mínima corrente de sequência negativa para um curto-circuito 1 \emptyset ;

k é um fator de segurança.

O bloco 3 visa distinguir as faltas trifásicas das oscilações de potência, ambas equilibradas na maioria das situações. Durante um curto-circuito sabe-se que ocorre uma mudança substancial no ângulo da corrente de sequência positiva. Já durante uma oscilação de potência o ângulo da corrente muda de maneira mais suave.

Assim, este bloco utiliza a derivada do ângulo da corrente de fase e compara este valor com um valor de derivada pré-ajustada. Se o valor ajustado for maior que o valor continuamente atualizado, razão da ativação do bloco 1, o algoritmo interpreta o evento como uma oscilação de potência e retorna ao bloco 1. Caso contrário, a razão da ativação do bloco 1 é interpretada como uma falta equilibrada e o algoritmo habilita o bloco 4. O ajuste da derivada deve ser composto por um valor abaixo do menor valor da derivada do ângulo da corrente de sequência positiva de fase, provocado por um curto-circuito trifásico no trecho de linha de transmissão protegido.

5.4.4 Método de Detecção de Oscilação de Potência por meio da Análise de Transitórios (MAT)

Este método é fundamentado na avaliação dos níveis de transitórios durante um curto-circuito, uma vez que estes estão presentes em todas as faltas, para as quais o relé de distância deve operar (MOORE & JOHNS, 1996). Além disso, os efeitos transitórios não estão presentes durante condições de oscilação de potência. Na filosofia proposta por Moore & Johns (1996) o relé de distância apenas é ativado quando for detectada uma condição de falta.

O transitório gerado pela falta é interpretado como um ruído, ou melhor, sinais de frequência diferente e muito mais elevado do que a frequência fundamental. Assim, o

filtro baseado na Transformada Discreta de Hartley atende os objetivos do método, cujos N coeficientes utilizados, $H_h(k)$, são encontrados pela equação (5.26).

$$H_h(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\cos \frac{2\pi k}{N} + \sin \frac{2\pi k}{N} \right), k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (5.26)$$

O filtro é composto pelos coeficientes $H_h(k)$ e $H_{-h}(k)$, os quais possuem a mesma resposta em amplitude e diferente resposta em fase, de maneira que $H_{-h}(k) = H_h(N - k - 1)$.

O algoritmo para detecção de curto-circuito é mostrado na Figura 5.23.

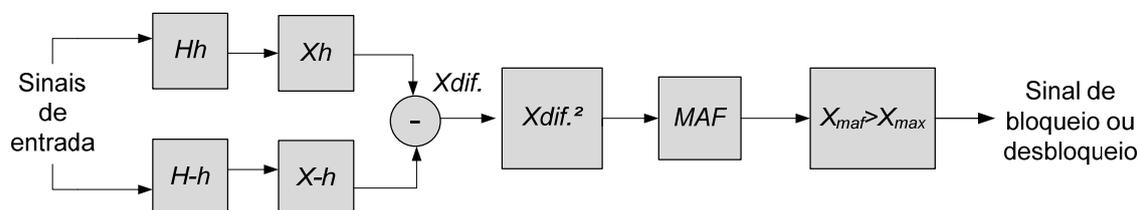


Figura 5.24 – Algoritmo para geração do sinal de detecção de curto-circuito

Os sinais de entrada são sinais de corrente e tensão (I_{mix} e V_{mix} , respectivamente) e consistem na soma das correntes e tensões de cada fase, segundo as relações mostradas nas equações (5.27) e (5.28) (MOORE & JOHNS, 1996).

$$V_{mix} = V_A - 2V_B - 3V_C \quad (5.27)$$

$$I_{mix} = I_A - 2I_B - 3I_C \quad (5.28)$$

Estes são filtrados, em paralelo, utilizando os filtros de coeficientes diretos (H_h) e reversos (H_{-h}). A reatância de cada um dos sinais previamente filtrados é calculada. As reatâncias calculadas apresentam magnitudes iguais e fases diferentes. A diferença entre esses resulta em um sinal ($X_{dif.}$) que só difere de zero no instante da ocorrência de um transitório, conforme mostra Figura 5.25.

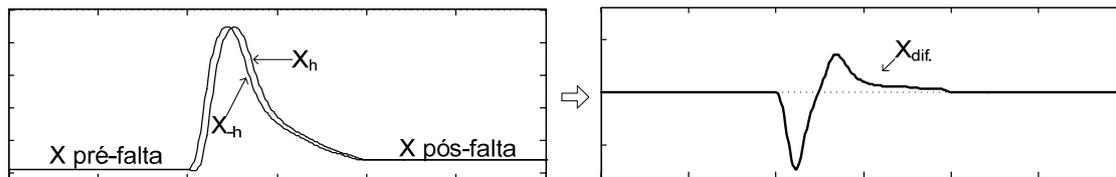


Figura 5.25 – X_h e X_{-h} e sua diferença (X_{dif})

Para facilitar a detecção deste sinal, ele é elevado ao quadrado (X_{dif}^2) e passado através de um Filtro de Médias Móveis (FMM) de N_{FMM} pontos. O tamanho da janela do FMM (N_{FMM}) deve ser escolhido de maneira a garantir uma rápida detecção dos transitórios gerados pela falta. Dessa forma, esta janela deve ser menor que o número de amostras por ciclo dos dados de entrada, conseqüentemente, menor que um ciclo. Com isso, o atraso do sinal devido às médias móveis das amostras passadas não afeta de maneira considerável o tempo de detecção do curto-circuito.

O sinal de bloqueio ou desbloqueio do relé de distância é obtido por meio da comparação entre o sinal filtrado pelo FMM (X_{FMM}) e o ajuste (X_{max}), conforme mostra a Figura 5.26. Se o sinal X_{FMM} for maior que o ajuste X_{max} o algoritmo habilita o disparo do relé.

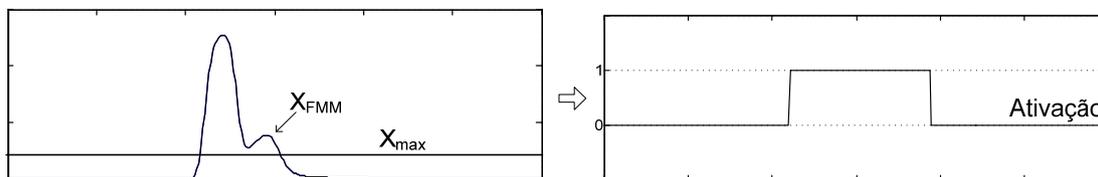


Figura 5.26 – Geração do sinal de ativação a partir de X_{FMM}

O ajuste de X_{max} é realizado através de estudos de transitórios sobre o sistema a que o método será aplicado. Uma vez gerado um sinal de ativação, este deve ser mantido por determinado tempo, pois o deslocamento da impedância aparente para o interior das regiões do relé de distância é veloz, mas não instantâneo.

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os efeitos das oscilações de potência nos relés de distância utilizados em linhas de transmissão. Fica evidente que as oscilações de

potência podem ocasionar atuações indevidas na proteção de linhas de transmissão, principalmente, em linhas com altos valores de impedância, quando comparados com as impedâncias dos equivalentes externos. Nesse tipo de linha, o centro elétrico se encontra no seu interior, fazendo com que a impedância aparente, durante uma oscilação, migre mais facilmente para a primeira zona de proteção. Com o objetivo de minimizar esse efeito, utiliza-se a proteção contra as oscilações de potência. Na tentativa de uma maior confiabilidade em suas respostas, os métodos de detecção de oscilações evoluíram. No entanto, as técnicas não-convencionais ainda exigem detalhados estudos do sistema, demandando muito tempo e conhecimento.

Capítulo 6

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA

6.1 Considerações Gerais

Em um primeiro momento o capítulo, apresenta um exemplo de atuação indevida do relé de distância, obtido por simulação. Sinais típicos de oscilações de potência, provenientes de simulações no ATP são mostrados.

Quando se deseja desenvolver uma nova metodologia de proteção, um pré-requisito essencial é averiguar as vantagens e desvantagens das técnicas existentes. Assim, é realizada uma análise comparativa entre os métodos convencionais e não convencionais de proteção contra oscilações de potência, elucidados no Capítulo 5. Os diversos critérios utilizados nos testes e resultados são apresentados.

6.2 Exemplo de Atuação Indevida do Relé de Distância devido a Oscilação de Potência

No Capítulo 5 foi abordado de forma teórica o assunto das atuações indevidas do relé de distância devido às oscilações de potência. Para exemplificar o problema das atuações indevidas do relé de distância em linhas de transmissão, foram geradas oscilações de potência no Sistema Teste 1, (ROBERTS et al., 1993), implementado no ATP como mostra a Figura 6.1.

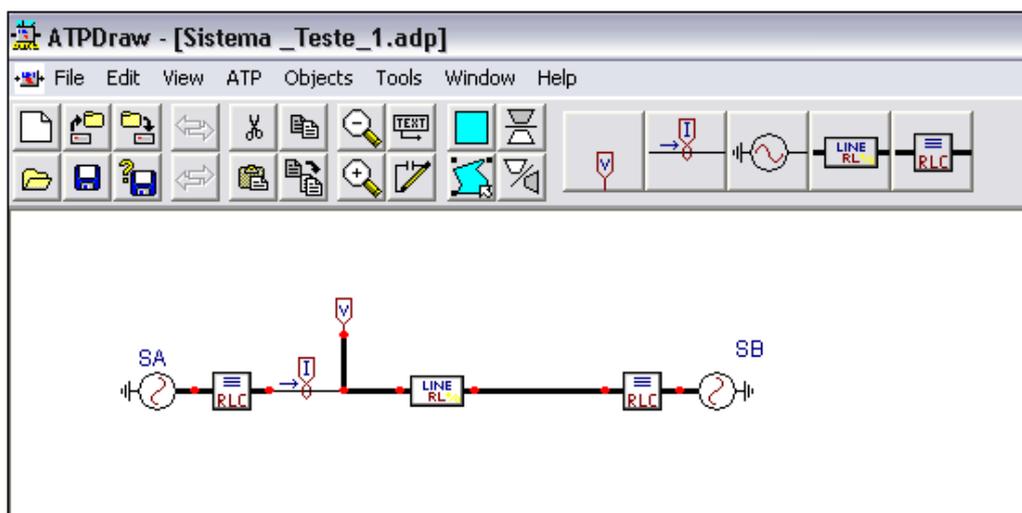


Figura 6.1 – Sistema Teste 1 implementado no ATP

A Figura 6.2 e Figura 6.3 mostram o comportamento da corrente e tensão da fase “a”, respectivamente, provenientes do ATP, durante uma oscilação de potência com $\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 1$ Hz. A Figura 6.4 mostra a trajetória da impedância aparente usando uma polarização direta, sendo os fasores das tensões e correntes obtidos por meio da TDF. Apesar da $f_{osc.}$ ser lenta, nota-se que impedância migra para a zona de atuação do relé de distância. Neste caso, após 0,9 s do início da oscilação de potência ($t = 0,2$ s) a impedância atravessa a linha de transmissão, o que faria o relé de distância atuar indevidamente.

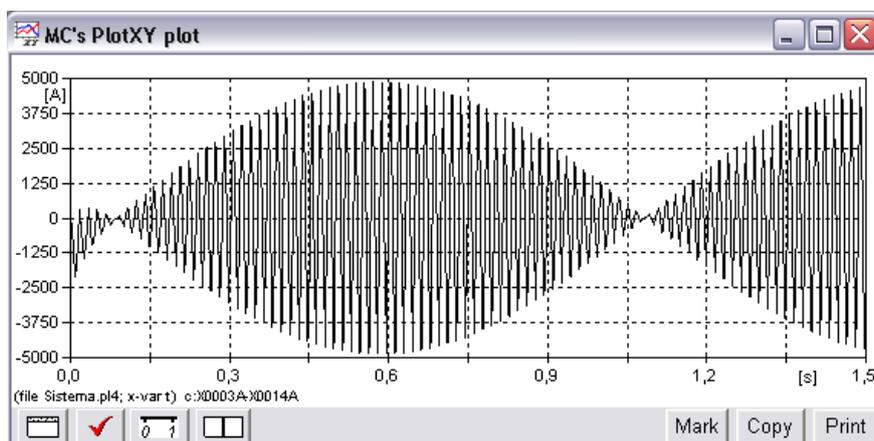


Figura 6.2 – Comportamento da corrente durante a oscilação de potência ($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 1$ Hz)

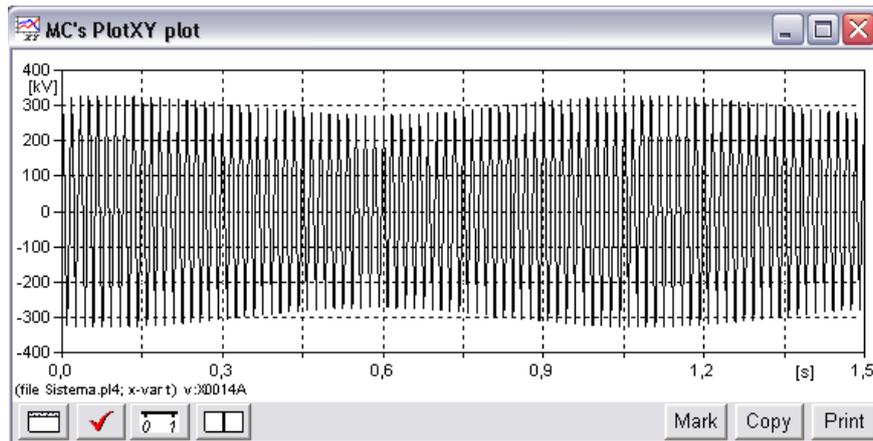


Figura 6.3 – Comportamento da tensão durante a oscilação de potência
($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 1$ Hz)

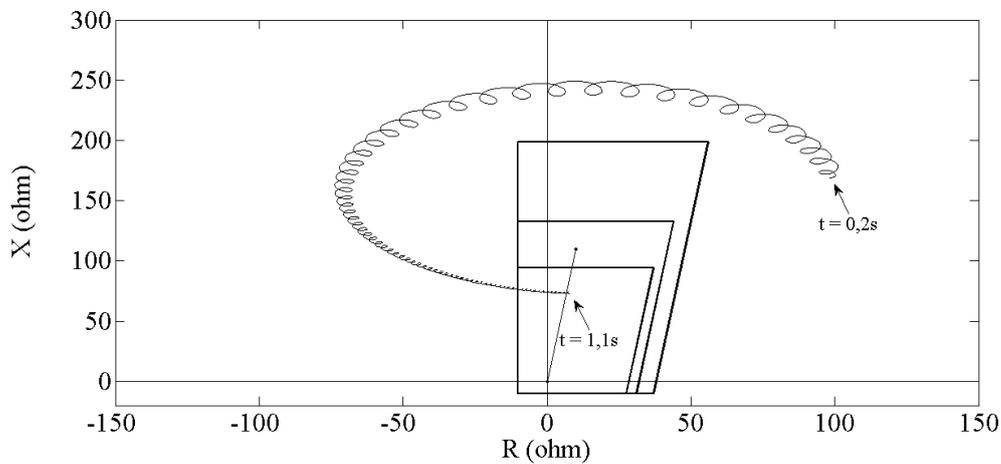


Figura 6.4 – Impedância aparente vista pelo relé de distância
($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 1$ Hz)

A Figura 6.5 e Figura 6.6 mostram o comportamento da corrente e tensão da fase ‘a’, respectivamente, para uma oscilação com $\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 7,0$ Hz. A Figura 6.7 mostra a impedância aparente para este caso. Verifica-se que em aproximadamente 0,4s após o início da oscilação de potência ($t = 0,2$ s) o valor da impedância cruza a linha de transmissão.

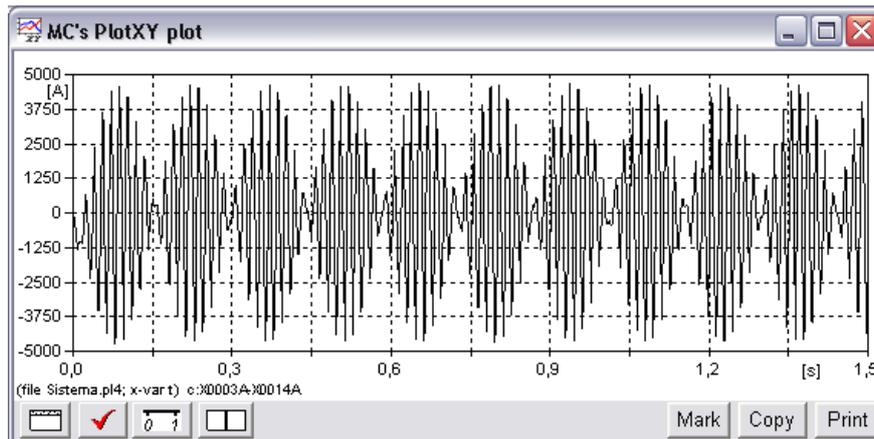


Figura 6.5 – Comportamento da corrente durante a oscilação de potência ($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 7$ Hz)

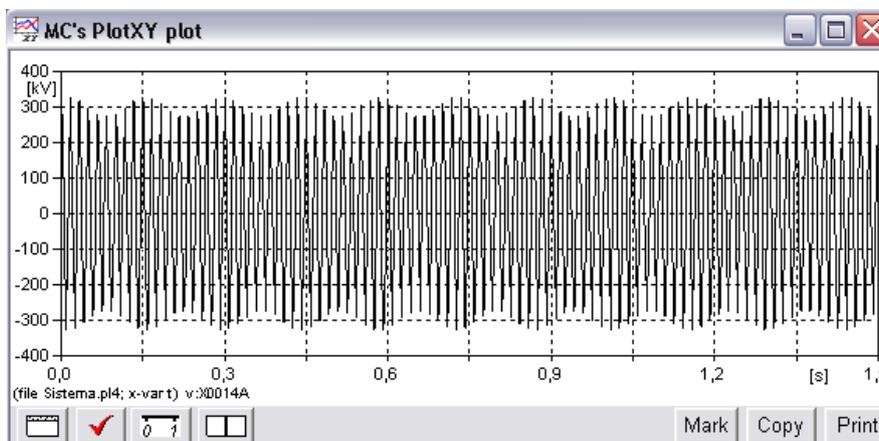


Figura 6.6 – Comportamento da tensão durante a oscilação de potência ($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 7$ Hz)

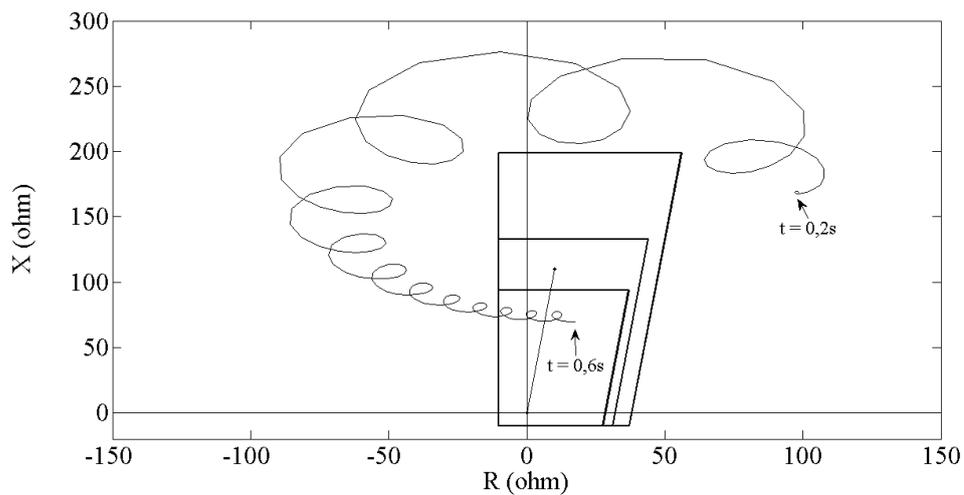


Figura 6.7 – Impedância aparente vista pelo relé de distância ($\delta = 30^\circ$ e $f_{osc.} = 7$ Hz)

O comportamento da impedância aparente durante uma oscilação de potência depende da f_{osc} . Com f_{osc} maiores a impedância aparente se desloca mais rápido, conseqüentemente, fazendo o relé de distância também atuar em tempos inferiores. Além da f_{osc} , o comportamento da impedância também depende do algoritmo utilizado na filtragem digital. Com a evolução dos relés digitais, as pesquisas dos filtros destinados a extração dos componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente têm sido bastante explorada. No entanto, a investigação destes filtros, tais como Fourier, Kalman, seno, cosseno e outros mais modernos, concentra seus esforços na estimação de fasores em regime permanente ou sob condições de falta.

O estudo da filtragem digital sob condições de oscilações de potência, embora extremamente importante do ponto de vista operacional da proteção de linhas, é pouco explorado. A bibliografia técnica atual apresenta os conceitos da impedância aparente durante a oscilação de potência utilizando o tradicional filtro de Fourier. Porém, outros filtros que apresentam um melhor desempenho devem ser investigados sob as condições de oscilação de potência.

Stefanello et al. (2011) analisa o comportamento de dois algoritmos fundamentados na Transformada Discreta de Fourier (TDF) com base em sinais resultantes de uma condição de oscilação de potência. Sendo um deles a TDF de Ciclo Completo (TDFCC) e outro, a TDFCC modificada que elimina a componente *dc* do sinal (LEE et al., 2008). Os resultados apresentados por Stefanello et al. (2011) mostram que o Filtro TDFCC modificado apresenta um comportamento mais lógico entre a frequência de oscilação e o tempo de deslocamento da impedância. Sinais com frequências de oscilação baixas apresentam um tempo de deslocamento maior, ou seja, são mais lentas e vice-versa. Nos casos de curto-circuito os tempos de deslocamento da impedância aparente, utilizando o Filtro TDFCC tradicional, são próximos, ou até superiores, aos casos de oscilação de potência. Tal fato torna a definição do ajuste de tempo uma tarefa difícil. Quando foi utilizado o Filtro TDFCC modificado (LEE et al., 2008) os tempos de deslocamento da impedância para os casos de curto-circuito foram menores que os casos da oscilação de potência. Deste modo, a técnica de Fourier modificada (LEE et al., 2008) é mais recomendada para este tipo de aplicação.

6.3 Análise Comparativa entre Métodos de Proteção Contra Oscilações de Potência

6.3.1 Critérios Utilizados nos Testes

As oscilações de potência podem ser simuladas de duas formas. Uma delas é fixar a frequência fundamental (60 Hz) em uma das fontes e utilizar um valor diferente da frequência fundamental na outra fonte. A segunda maneira é provocar um distúrbio no sistema, curto-circuito, abertura de uma linha, retirada de blocos de carga ou geração, etc. As linhas localizadas próximas ao distúrbio sofrerão oscilações de potência.

Na primeira maneira, se tem domínio da frequência de oscilação. Em análises comparativas isso se torna uma vantagem, pois se pode afirmar que determinada técnica é eficiente até certo valor ou faixa de frequência de oscilação. Usando a segunda alternativa, simula-se uma condição mais próxima da real. Neste caso, não se tem conhecimento da frequência de oscilação, pois esta não será um valor fixo e irá oscilar de acordo com o grau do distúrbio no sistema elétrico, podendo ser uma oscilação do tipo estável ou instável.

Nesta fase de testes as oscilações de potência foram simuladas do primeiro modo, isto é, fixando-se a frequência fundamental no equivalente S_A e variando no equivalente S_B , do sistema mostrado na Figura 6.1. O tempo de simulação utilizado foi de 4 s, sendo o curto-circuito, quando existente, aplicado em 1,35 s, extinguindo-se espontaneamente em 200 ms sem a abertura da linha.

Um relé de distância do tipo quadrilateral foi utilizado durante os estudos. A primeira zona (Z_{1-21}) foi ajustada para proteger 85% da linha em que o relé está instalado. A segunda (Z_{2-21}) e terceira (Z_{3-21}) zonas de proteção do relé de distância foram ajustadas para cobrir 120% e 180% da linha, respectivamente, supondo a existência de outra linha de transmissão conectada no equivalente S_B . As temporizações ajustadas para a Z_{2-21} e Z_{3-21} foram de 0,3 e 1,0 s, respectivamente, enquanto que a Z_{1-21} possui atuação instantânea.

Os seguintes testes foram realizados:

- Oscilações de potência: Segundo Reddy & Mohanta (2008), as oscilações de potência podem ser consideradas lentas ($0 < f_{osc.} < 4 \text{ Hz}$) ou rápidas ($f_{osc.} \geq 4 \text{ Hz}$).

Dessa forma, escolheram-se duas frequências de oscilação para cada classe. A Tabela 6.1 mostra as f_{osc} . e δ utilizados nestes testes.

Tabela 6.1 – Condições de oscilação de potência testadas

Caso	f_{osc} .	δ
Oscilações lentas	0,1 e 1 Hz	30° e 60°
Oscilações rápidas	4 e 7 Hz	30° e 60°

- Curto-circuito durante oscilações de potência: Curtos-circuitos monofásicos ($CC_{1\phi-g}$) e trifásicos ($CC_{3\phi}$), à 5% e 80% do comprimento da linha de transmissão, durante a oscilação de potência e com diferentes ângulo de potência foram testados. A Tabela 6.2 mostra as f_{osc} . e δ utilizados.

Tabela 6.2 – Condições de curto-circuito durante oscilações de potência testadas

Caso		f_{osc} .	δ
5% da linha	$CC_{3\phi}$	0,1; 1; 4 e 7 Hz	30° e 60°
	$CC_{1\phi-g}$	0,1; 1; 4 e 7 Hz	30° e 60°
80% da linha	$CC_{3\phi}$	0,1; 1; 4 e 7 Hz	30° e 60°
	$CC_{1\phi-g}$	0,1; 1; 4 e 7 Hz	30° e 60°

A resistência de falta dificulta ainda mais a detecção do curto-circuito durante a oscilação de potência. Para os casos da Tabela 6.2 considerou-se faltas sem resistência de falta e com resistência de falta igual a 15 Ω .

6.3.2 Resultados dos Testes

6.3.2.1 Oscilações de Potência

Nos testes de oscilação de potência os métodos obtiveram um bom desempenho conforme mostra a Tabela 6.3. Nesta tabela, que mostra a resposta dos métodos para todas as f_{osc} . e δ testados, 1 equivale ao bloqueio do relé de distância, isto é, operação correta, e 0 equivale a operação incorreta, ou seja, quando o relé de distância não foi bloqueado.

Os testes mostraram que todos os métodos bloquearam corretamente o relé de distância para as oscilações lentas ($f_{osc} < 4Hz$). Porém, para as oscilações rápidas, mais especificamente para 7 Hz, algumas técnicas não foram capazes de detectar a oscilação e bloquear o relé de distância, independente do carregamento do sistema.

Tabela 6.3 – Resposta dos métodos para condições de oscilação de potência

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	7	1	0	0	0	1	0
60°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1
	7	1	0	0	0	1	0

1 equivale ao bloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não bloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

A Figura 6.8 ilustra o desempenho dos métodos para a oscilação $f_{osc.} = 1\text{Hz}$ e $\delta = 60^\circ$. Nessa figura são visualizados os sinais de bloqueio (*Bloqueio*) ou, no caso do MAT, o sinal de ativação (*Ativação*). Para o MCS é mostrado o sinal de saída dos blocos 2 e 3 de sua lógica operacional, mostrado na Figura 5.23, para a 1ª zona do relé de distância (*Bloco2-Z1* e *Bloco3-Z1*, respectivamente). São mostrados também a impedância no interior das zonas operacionais do relé (*Z1_21*, *Z2_21* e *Z3_21*) e o sinal de operação enviado pelo relé distância, conforme a zona que atuou (*TripZ1-21*, *TripZ2-21* e *TripZ3-21*, respectivamente), em função do tempo.

Nos casos de oscilações rápidas, como esta, algumas técnicas não obtiveram bons resultados, como mostrado na Tabela 6.4. Entre esses, está o MDB, que devido à trajetória helicoidal da impedância no plano *R-X*, não foi capaz de bloquear as oscilações de 7 Hz em todos os momentos, como ilustra a Figura 6.9. Os ajustes de tempo e distância entre os *blindings* mostraram-se insuficientes para detectar a passagem da impedância quando esta não descreveu nenhum laço no interior dos *blindings*, conforme mostra a Figura 6.10. Por outro lado, quando a impedância apresentou um laço no interior dos *blindings*, a oscilação foi detectada.

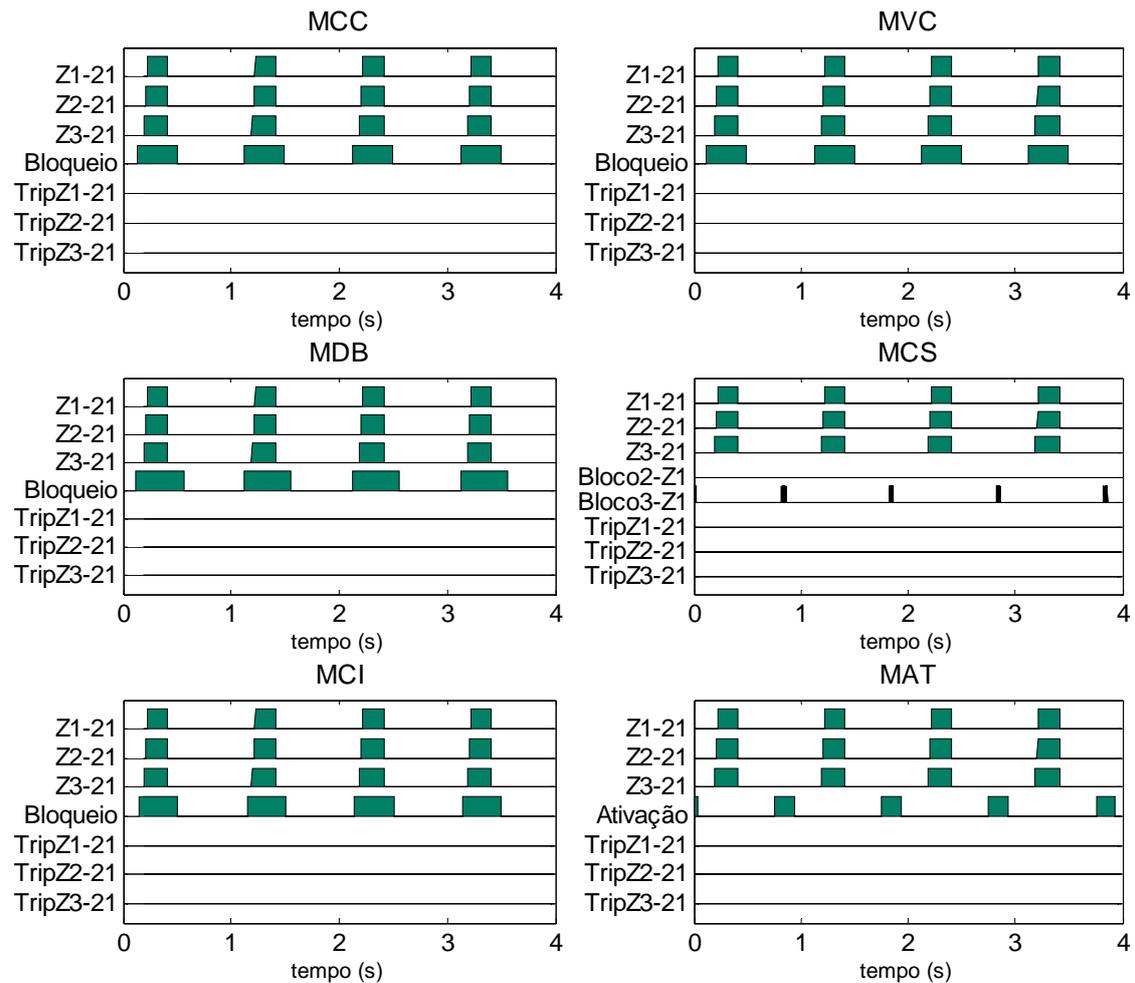


Figura 6.8 - Resposta dos métodos durante a oscilação $f_{osc.} = 1Hz$ e $\delta = 60^\circ$

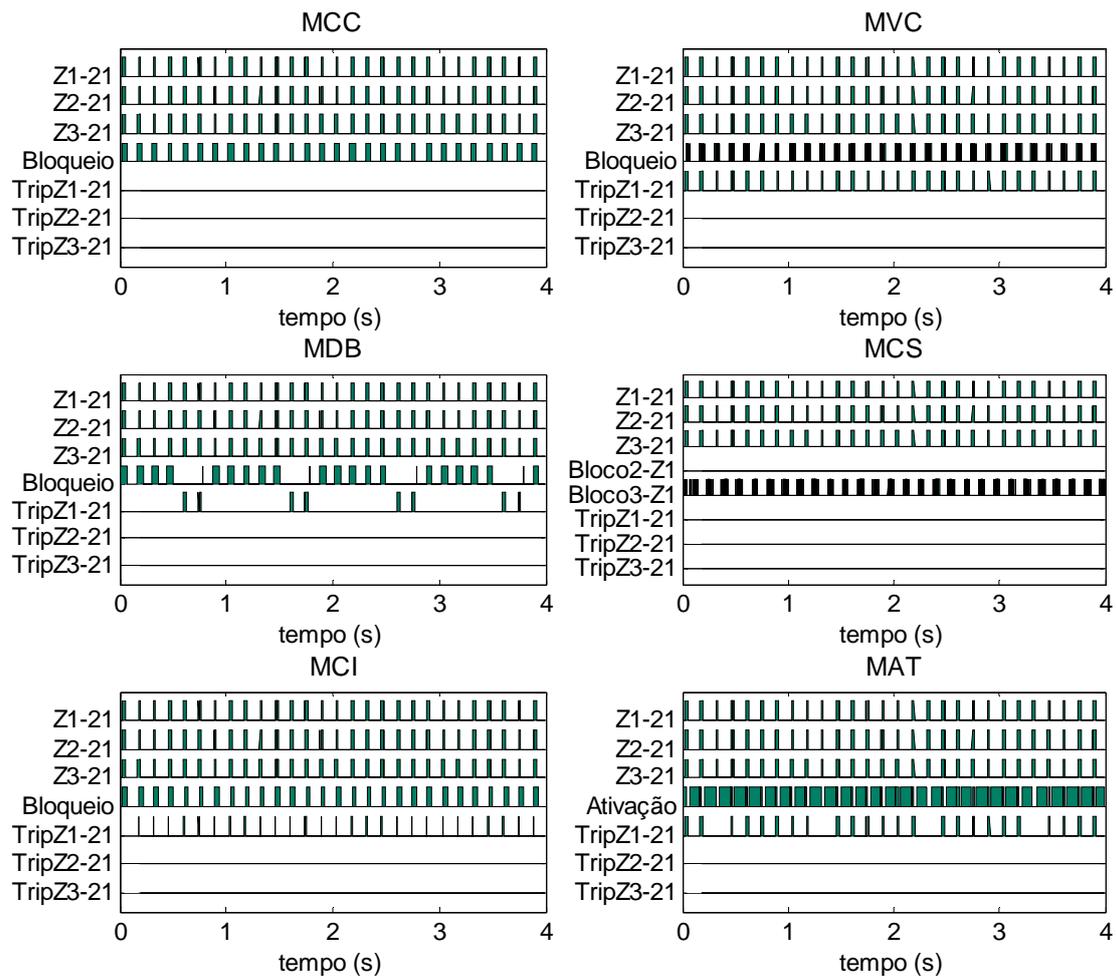


Figura 6.9 - Resposta dos métodos durante a oscilação $f_{osc} = 7\text{Hz}$ e $\delta = 60^\circ$

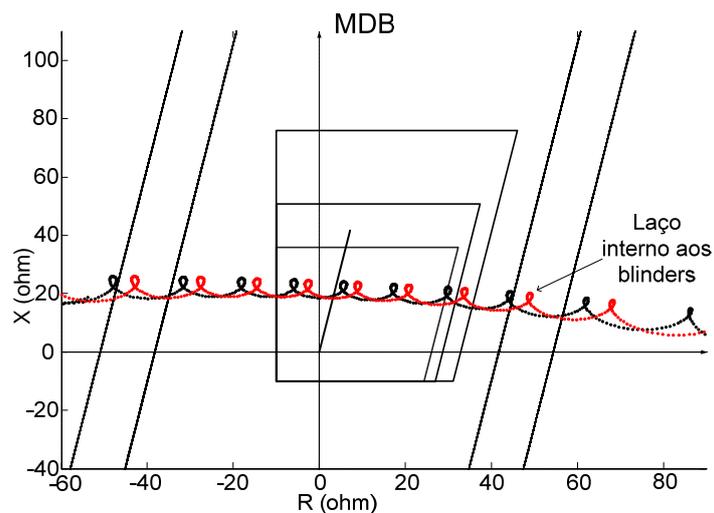


Figura 6.10 – Laços na trajetória da impedância afetando a operação correta do MDB

6.3.2.2 Curtos-circuitos trifásicos durante oscilações de potência

Estes testes avaliam as técnicas por meio de faltas ocorridas durante as oscilações de potência. Vale ressaltar que os métodos devem manter o relé de distância bloqueado durante as oscilações e desbloqueá-lo no momento do curto-circuito. As Tabelas 6.4 e 6.5 mostram os resultados das simulações para curtos-circuitos trifásicos a 5% e 80% do comprimento da linha, respectivamente.

Tabela 6.4 – Resultados para curtos-circuitos trifásicos a 5% da linha, durante oscilações

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	1
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	1
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale desbloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

Tabela 6.5 – Resultados para curtos-circuitos trifásicos a 80% da LT, durante oscilações

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	0	1
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	1
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale ao desbloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

Por meio da Tabela 6.4 e 6.5, pode-se verificar que para curtos-circuitos trifásicos a linha o MCS obteve o melhor desempenho entre todos os métodos. Os métodos convencionais (MCC e MDB) e o método MCI tiveram atuações corretas quando, no momento da ocorrência do curto-circuito, o relé não estava bloqueado. Isto se deve ao fato de que, uma vez gerado um sinal de bloqueio, este é mantido até que a impedância deixe o interior de uma determinada região do plano R - X .

A Figura 6.11 mostra o comportamento da impedância durante a ocorrência de um curto-circuito quando a impedância já se encontrava no interior das características concêntricas definidas para o MCC. Nestas condições o sinal de atuação do relé de distância não é gerado, pois o sinal de bloqueio é mantido. Esta condição que resulta em falha na operação das técnicas MCC e MDB é mostrada na Figura 6.12.

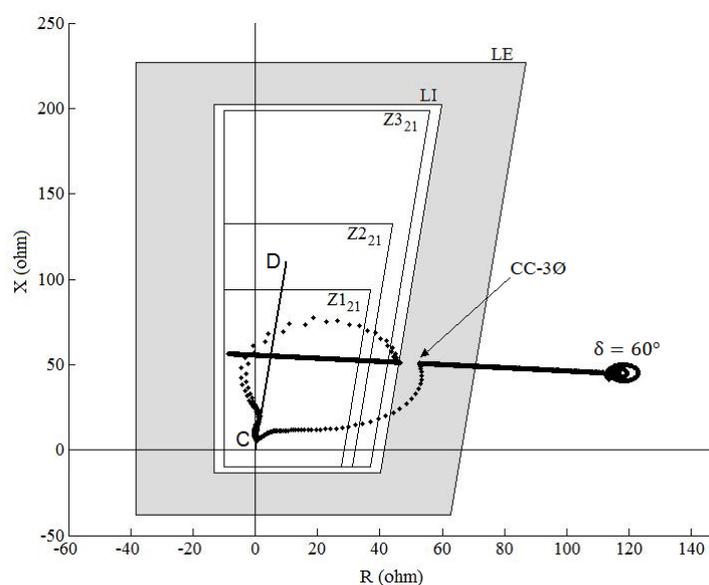


Figura 6.11 – Comportamento da impedância durante uma falta trifásica a 5% da linha ($f_{osc.} = 0,1$ Hz e $\delta = 60^\circ$)

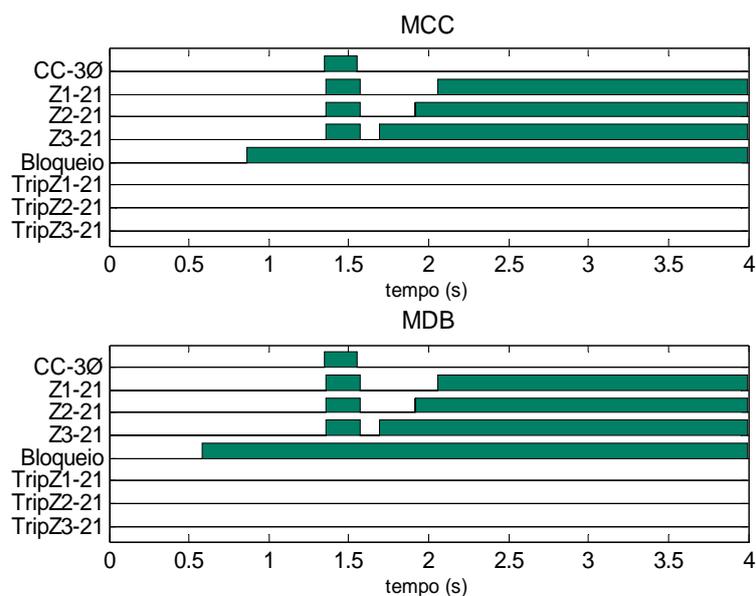


Figura 6.12 – Sinais lógicos do MCC e MDB para falta trifásica a 5% da linha ($f_{osc.} = 0,1$ Hz e $\delta = 60^\circ$)

6.3.2.3 Curtos-circuitos Monofásicos durante Oscilações de Potência

As Tabelas 6.6 e 6.7 mostram os resultados das simulações para curtos-circuitos monofásicos a 5% e 80% do comprimento da linha, respectivamente. Para as faltas monofásicas durante oscilação de potência o MCS também obteve o melhor desempenho. A Figura 6.13 mostra os sinais de saída do método. O Bloco2-Z₁ (detecção de desequilíbrio através da corrente de sequência negativa) atuou corretamente para a ocorrência de um curto-circuito monofásico em $t = 1,3s$, gerando um sinal de atuação.

Tabela 6.6 – Resultados para curtos-circuitos monofásicos a 5% da linha, durante oscilações

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	1	0
	1	0	0	0	1	1	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale ao desbloqueio do relé de distância (operação correta);

Capítulo 6 – Avaliação dos Métodos de Proteção Contra Oscilações de Potência

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

Tabela 6.7 – Resultados para curtos-circuitos monofásicos a 80% da linha, durante oscilações

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	0
	1	0	0	0	1	0	0
	4	0	0	0	1	0	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	1	0
	1	0	0	0	1	0	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale ao desbloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

Pode-se observar que os resultados mostrados nas Tabelas 6.6 e 6.7 são semelhantes aos mostrados nas Tabelas 6.4 e 6.5, respectivamente, ou seja, os métodos possuem comportamento similar, tanto para faltas trifásicas quanto monofásicas.

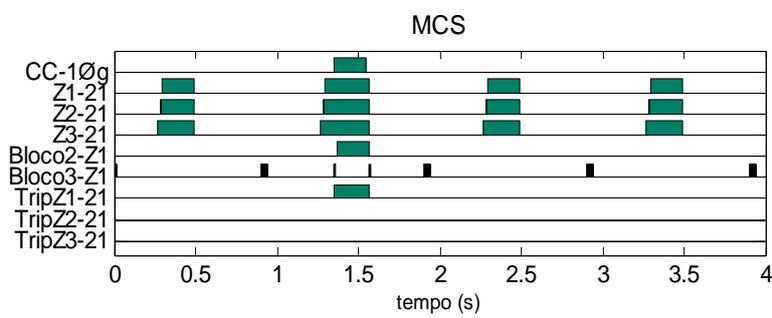


Figura 6.13 – Sinais lógicos do MCS para falta monofásica a 5% da linha ($f_{osc.} = 0,1$ Hz e $\delta = 60^\circ$)

6.3.2.4 Curtos-circuitos Monofásicos com Resistência de Falta durante Oscilações de Potência

Para estas condições, os métodos apresentaram as mesmas peculiaridades que nas condições de curto-circuito franco. Como o método MCS possui sua lógica dependente das zonas do relé de distância, este não foi capaz de detectar o curto-circuito, pois a impedância oscilou na região de imprecisão da reatância, ou seja, nas proximidades do limite da 1ª zona do relé de distância (85% da LT), conforme ilustra a Figura 6.14, na qual Z_A é a impedância aparente da fase A.

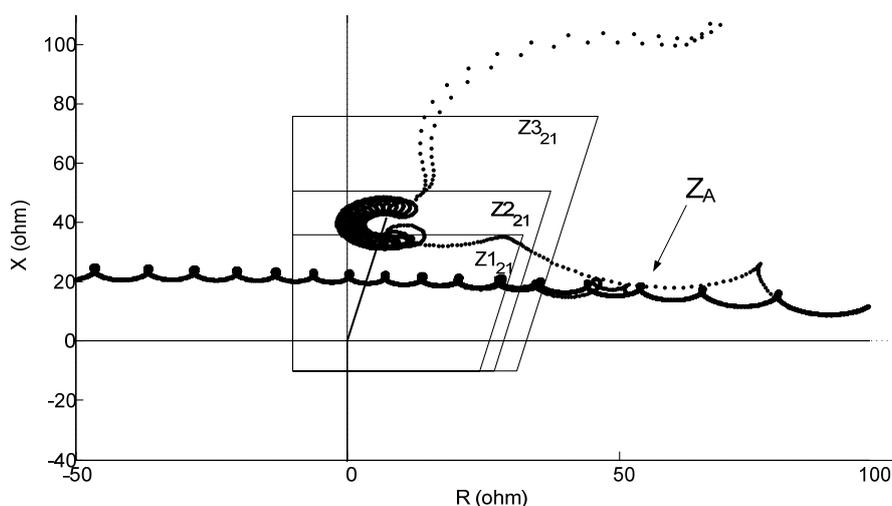


Figura 6.14 – Comportamento da impedância vista pelo relé de fase durante CC_{10g} a 80% da linha ($f_{osc} = 4$ Hz e $\delta = 60^\circ$)

As Tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os resultados dos testes para curtos-circuitos monofásicos, a 5% e 80% do comprimento da linha, respectivamente, com resistência de falta durante oscilações de potência.

Tabela 6.8 – Resultados para curtos-circuitos monofásicos a 5% da linha, durante oscilações

δ	f_{osc} (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	1	0
	1	0	0	0	1	1	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale ao desbloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

Tabela 6.9 – Resultados para curtos-circuitos monofásicos a 80% da linha, durante oscilações

δ	$f_{osc.}$ (Hz)	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
30°	0,1	0	1	1	1	1	0
	1	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*
60°	0,1	0	0	1	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	1	1
	7	0	*	*	*	1	*

* Casos em que o método não bloqueou o relé 21 durante a oscilação de potência.

1 equivale ao desbloqueio do relé de distância (operação correta);

0 equivale ao não desbloqueio do relé de distância (operação incorreta)

MCC = Método das Características Concêntricas; MDB = Método Duplo Blinder; MCI = Método Cálculo Contínuo da Impedância; MVC = Método da Variação da Magnitude de Tensão no Centro Elétrico; MCS = Método das Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente; MAT = Método da Análise de Transitórios.

6.3.3 Análise dos Resultados e Discussões

Todos os métodos apresentaram bons resultados para oscilações lentas, sem a ocorrência de curto-circuito. Para oscilações fortes os métodos MCC e o MCS mostraram-se melhores, bloqueando o relé de distância durante a passagem da impedância pelo interior das zonas de proteção para 100% dos casos testados. Os métodos MDB, MCI, MVC e MAT quando submetidos à f_{osc} de 7 Hz, não enviaram sinal de bloqueio ao relé. O carregamento do sistema não afetou o desempenho dos métodos para essa condição.

Para os casos de curtos-circuitos durante oscilações, os percentuais de atuações corretas de cada método são mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Porcentagem de atuação correta dos métodos quando submetidos a $CC_{3\phi}$ e $CC_{1\phi-g}$, durante oscilações

Condição	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
$CC_{3\phi}$	13%	13%	25%	75%	94%	75%
$CC_{1\phi-g}$	13%	13%	25%	75%	81%	31%

Para os casos de curtos-circuitos do tipo franco, o método MCS apresentou o melhor desempenho, pois permitiu a atuação correta do relé em 94% das faltas trifásicas e 81% das faltas monofásicas. O MVC apresentou o segundo melhor desempenho, sendo capaz de detectar curtos-circuitos durante oscilações, principalmente quando as oscilações foram fracas, independente do carregamento. É interessante ressaltar que as faltas foram realizadas após o sinal de bloqueio já ter sido enviado, pois o objetivo do teste era avaliar a capacidade de desbloqueio da técnica. As técnicas convencionais MCC e o MDB tiveram uma baixa porcentagem de atuações corretas (desbloqueio do relé de distância).

A resistência de falta não alterou significativamente o desempenho das técnicas. Os percentuais de atuação correta para estes casos são mostrados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Porcentagem de atuação correta dos métodos quando submetidos a $CC_{1\phi-g}$ com R_F , durante oscilações

Condição	MCC	MDB	MCI	MVC	MCS	MAT
$CC_{1\phi-g}$ com R_F	6%	13%	25%	63%	81%	31%

6.4 Considerações Finais

No presente capítulo foi apresentado uma variedade de cenários utilizados nos testes com oscilação de potência e curto-circuito. Visando destacar as vantagens e desvantagens das técnicas de proteção contra oscilação de potência em linhas de transmissão, foi realizada uma análise qualitativa e quantitativa. Desta maneira, identificou-se em quais as circunstâncias um método é mais apropriado do que o outro.

Capítulo 7

ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO TOLERANTE A OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA

7.1 Considerações Gerais

No Capítulo 6 diversas técnicas de proteção contra oscilações de potência foram avaliadas. Corroborando com umas das justificativas desta tese, o estudo mostrou que nenhum dos métodos é eficiente em todos os cenários envolvendo oscilações de faltas. O Capítulo 5 apresentou todas as etapas do algoritmo desenvolvido. As etapas de detecção e classificação fazem uso de modernas técnicas fundamentadas em MM. Na etapa do cálculo da impedância aparente vista pelo relé surge à originalidade do algoritmo que é imune as oscilações de potência. Basicamente, a técnica faz uso da diferença entre o comportamento da componente *dc* durante uma falta e uma oscilação de potência. O método é capaz de detectar até mesmo faltas ocorridas durante oscilações. As etapas que compõe o algoritmo são bastante elucidativas, de simples implementação e são descritas a seguir.

7.2 Algoritmo para Proteção de Linhas de Transmissão tolerante as Oscilações de Potência

Atualmente, existem várias técnicas de proteção contra oscilações de potência em linhas de transmissão propostas em publicações técnicas, sendo algumas abordadas no Capítulo 4. Como existem oscilações de potência (frequências de oscilação fortes e fracas), diferentes distúrbios que podem ocorrer durante as oscilações (curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados, abertura monopolar, etc), a maioria das técnicas não são eficientes em todas as condições.

Outra desvantagem da maioria das técnicas atuais está relacionada a possíveis diferenças entre os algoritmos do relé de distância e do relé contra as oscilações de potência. Como alguns bloqueadores de oscilações têm algoritmos independentes, mas

que deve atuar em conjunto com o relé de distância, podem ocorrer problemas relacionados a velocidade dos algoritmos e até incompatibilidade de suas funções. Logo, o algoritmo desenvolvido incorpora os efeitos das oscilações de potência na própria lógica da proteção da linha de transmissão.

A Figura 7.1 ilustra o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

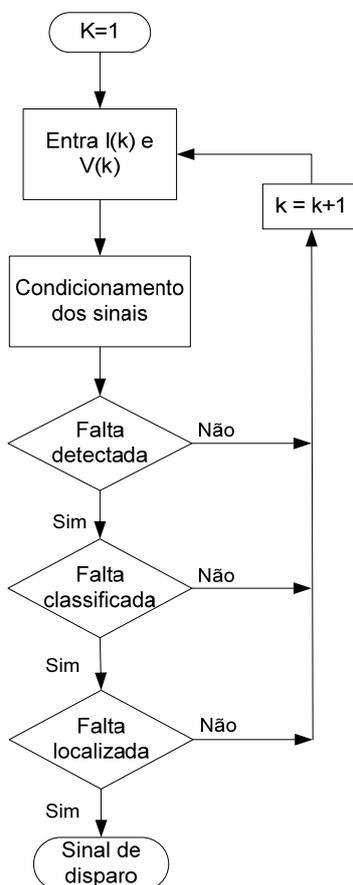


Figura 7.1 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido

7.2.1 Condicionamento do Sinal

O algoritmo possui seis entradas analógicas, isto é, três tensões de fase e três correntes de fase e faz uso do filtro passa-baixa Buterworth (PHADKE & THORP, 2009). A resposta de magnitude do filtro Buterworth é dada por:

$$|H(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (7.1)$$

Onde:

ω_c é a frequência de corte em rad/s ou Hz;

n é a ordem do filtro.

A Figura 7.2 apresenta as respostas de magnitude do filtro Butterworth para ordens de 2, 4, 8 e 10 e frequência de corte de 480 Hz. Observa-se que quanto maior a ordem do filtro, mais próxima a resposta torna-se da ideal. No entanto, essa maior atenuação na banda de corte vem acompanhada de um maior atraso na resposta, como pode ser visto na resposta ao degrau mostrada na Figura 7.3.

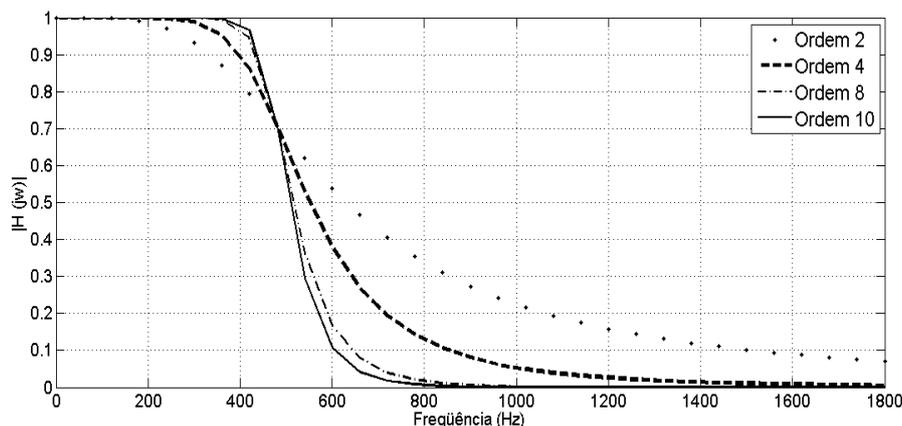


Figura 7.2 – Efeito da ordem na resposta de magnitude do filtro Butterworth

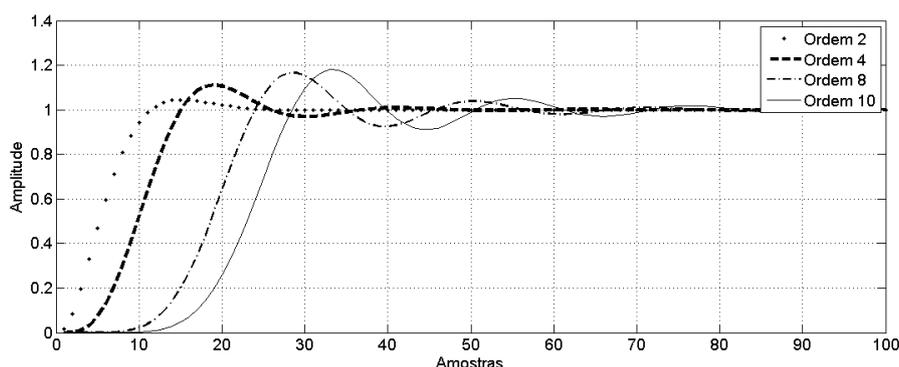


Figura 7.3 - Resposta ao degrau do filtro Butterworth

Dessa forma, existe uma relação inversa entre a exatidão do filtro e o tempo de resposta. De maneira geral, os filtros Butterworth de 2ª ou 3ª ordem satisfazem os requisitos dos relés de proteção numéricos. Neste trabalho utilizou-se um filtro de 2ª ordem com frequência de corte igual a 200 Hz e uma frequência de amostragem igual a 1,92 kHz, que equivale a 32 amostras por ciclo na frequência fundamental de 60 Hz.

7.2.2 Algoritmo Detector de Falta

Por ser uma técnica moderna, de simples implementação e bons resultados, o algoritmo desenvolvido faz uso da MM (WU et al., 2009). O equacionamento do detector, apresentado no Capítulo 3, subseção 3.4.2.1, visa o cálculo da diferença entre a

amostra de corrente $I(k)$ e de seu valor estimado D_n . A saída do detector $\Delta D(k)$, é fundamentada na variação $\Delta I(k)$, conforme na equação (3.13) que foi detalhada no Capítulo 3, ou seja:

$$\Delta D(k) = |\Delta I(k + 1) - \Delta I(k)|$$

Se $\Delta D(k)$ é maior que seu ajuste M , o contador C é inicializado, isto é, C igual a um (1). O valor de C é incrementado de um (1) em um (1) a cada amostra $\Delta D(k) > M$ e decrementado de um (1) em um (1) a cada amostra se $\Delta D(k) \leq M$, desde que $C \geq 1$.

Por fim, a falta é detectada se o contador C é maior que o valor previamente ajustado C_{set} . O algoritmo de detecção de falta, apresentado na Figura 3.10, é aplicado para todas as correntes de fase, de modo a identificar as faltas entre as fases, e para corrente de sequência zero, com a finalidade de detectar as faltas que envolvem a terra.

A Figura 7.4 mostra a saída do detector $\Delta D(k)$ para as quatro correntes, isto é, as fases “a”, “b”, “c” e a sequência “0”, para uma falta monofásica na fase “a”. Conforme pode se verificar nesta figura, apenas as saídas da fase A e sequência zero resultaram em valores superiores aos ajustes de fase, M_1 , e ajuste da sequência “0”, M_2 . A Figura 7.5 mostra o contador C para o mesmo sinal de corrente que resultou a Figura 7.4. O contador C para as correntes da fase “a” e sequência “0” é maior que o ajuste C_{set} , neste caso, habilitando a etapa seguinte do algoritmo, isto é, o processo de classificação da falta.

Faltas na linha próximas ao barramento onde o relé está instalado resultará em elevados valores de $\Delta D(k)$. Para se ajustar os parâmetros M_1 e M_2 , são necessários testes de faltas no ponto mais remoto de alcance da proteção, casos que resultarão em pequenos valores de $\Delta D(k)$. Os ajustes dos parâmetros M_1 e M_2 deverão ser inferiores ao menor valor encontrado nos casos testados.

O ajuste C_{set} visa evitar que ruídos nos sinais de corrente possam vir a serem detectados como falta. Esse ajuste deve ser analisado em conjunto com a taxa de amostragem do sinal utilizada. Uma amostragem baixa requer baixos valores de C_{set} .

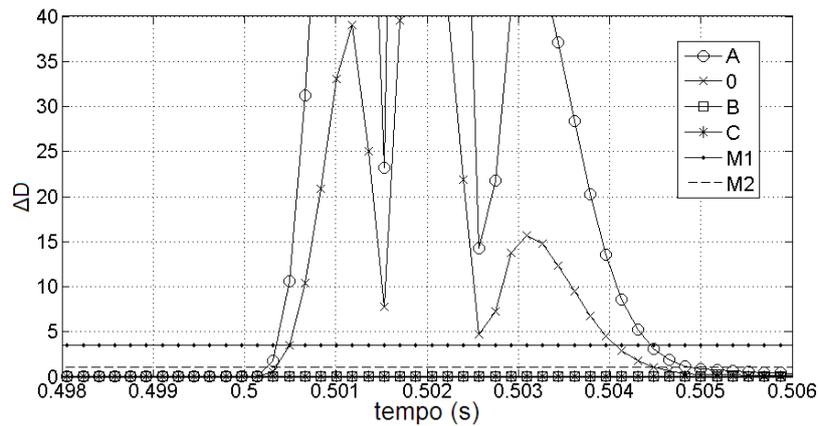


Figura 7.4 – Saída do detector de falta

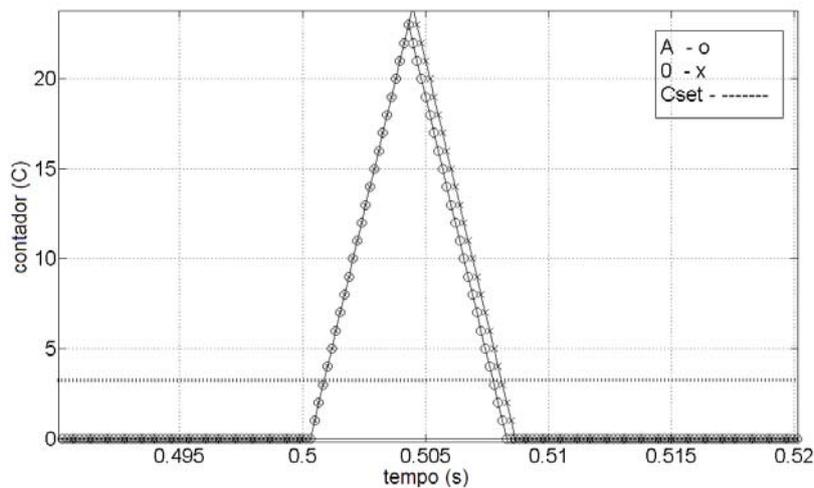


Figura 7.5 – Saída do contador C

7.2.3 Algoritmo Classificador de Falta

A função do classificador é selecionar apropriadamente as fases envolvidas na falta, de modo que o correto algoritmo para estimação da distância ou impedância aparente seja utilizado. O algoritmo classificador, apresentado de forma detalhada no Capítulo 3, subseção 3.4.3.1, foi o utilizado. Este calcula a energia armazenada na saída do detector, $\Delta D(k)$, utilizando para tal a norma Euclidiana, conforme já mostrado no Capítulo 3 equação (3.14) (WU et al., 2009):

$$E_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_D} \Delta D_i^2(k)}, \quad i = 0, 1, 2, 3$$

Onde:

E_i é a norma Euclidiana referente a I_0 , I_A , I_B e I_C que correspondem a $i = 0, 1, 2, 3$, respectivamente;

ΔD é o detector de falta morfológico;

k é a amostra;

N_D é o número de amostras contidas na janela no cálculo de E_i .

A Figura 7.6 mostra a saída do classificador de falta para o mesmo sinal de corrente que originou a saída do detector mostrado na Figuras 7.4. Conforme já comentado, esse sinal é proveniente de uma falta monofásica na fase “a”, logo as saídas da fase e sequência “0” são maiores que o ajuste E_{set} . O ajuste do parâmetro E_{set} deve ser realizado da mesma forma aos ajustes da etapa do detector de falta, ou seja, realizando testes de faltas no ponto mais remoto de alcance do relé de distância.

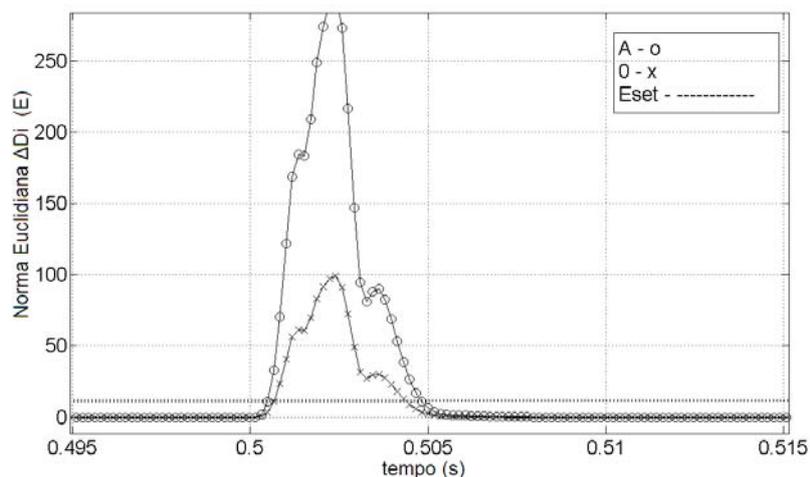


Figura 7.6 – Saída do classificador de falta

7.2.4 Algoritmo para Estimação da Distância da Falta

O algoritmo para a estimação da distância de falta visa calcular a impedância e/ou a distância entre o relé e o ponto da falta, e posteriormente comparar com a zona de proteção previamente ajustada. Se pertinente, ocorre o envio do sinal para abertura dos disjuntores, de modo a isolar eletricamente a falta.

Cada tipo de falta possui o seu algoritmo específico para o correto cálculo da impedância vista pelo relé. Em outras palavras, o correto cálculo da impedância aparente durante uma falta monofásica na fase “a”, por exemplo, ocorrerá somente

quando o algoritmo destinado especificamente para falta monofásica na fase “a” for selecionado, ou seja, o classificador possui papel fundamental nesse processo.

A equação (3.36), apresentada no Capítulo 3, representa o modelo da linha de transmissão utilizando equações diferenciais por meio de um circuito R-L, para uma falta monofásica, isto é:

$$v_a(n) = [H_{1a}(n) \ H_{2a}(n)] \begin{bmatrix} D_f \\ R'_f \end{bmatrix}$$

Onde:

$$H_{1a}(n) = \left[r_1 i_a(n) + l_1 \frac{i_a(n) - i_a(n-1)}{\Delta t} \right] + \left[(r_0 - r_1) i_{a0}(n) + (l_0 - l_1) \frac{i_{a0}(n) - i_{a0}(n-1)}{\Delta t} \right]$$

e

$$H_{2a}(n) = i_0(n)$$

Calculando a distância de falta D_f na equação (3.36), usando a técnica de ajustes de curvas por mínimos quadrados, podemos obter a impedância aparente vista pelo relé. Como a distância é dada em quilômetros, para se obter a impedância aparente vista pelo relé, basta multiplicar o valor da distância pela impedância da linha de transmissão, como mostra a equação (7.2).

$$Z_\varphi = D_{fa} \cdot Z_1 \quad (7.2)$$

Onde:

Z_φ é a impedância vista pelo relé;

D_{fa} é a distância estimada pela equação (5.11);

Z_1 é a impedância de sequência positiva da linha de transmissão (Ω/km).

φ representa as fases “ab”, “bc”, “ca”, para as faltas entre fases e “a”, “b” e “c” para as faltas monofásicas, de acordo com o algoritmo selecionado pelo classificador de falta. Utilizando a equação (7.2) a trajetória da impedância aparente sempre alcançará a sua zona de atuação através da linha, isto é, Z_φ é um número complexo que possui o mesmo ângulo de impedância da linha de transmissão. Deste modo, não é necessário limitar a característica do relé no eixo R, como mostra a Figura 7.6.

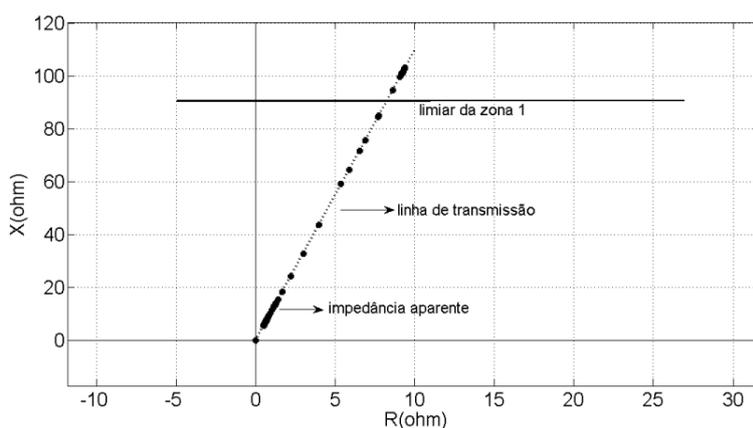


Figura 7.6 – Impedância aparente vista pelo relé no plano R-X

O cálculo da impedância aparente é efetuado apenas se a distância estimada está convergindo para um determinado valor. Para verificar se o valor da impedância é razoavelmente constante a diferença (ε) entre três amostras consecutivas de D_f deve ser menor que 5%, conforme equação (7.3). Se as três diferenças forem menores que 5% inicia-se o cálculo da impedância aparente.

$$\varepsilon_1 = |D_f(k) - D_f(k - 1)| \quad (7.3 - a)$$

$$\varepsilon_2 = |D_f(k) - D_f(k - 2)| \quad (7.3 - b)$$

$$\varepsilon_3 = |D_f(k - 1) - D_f(k - 2)| \quad (7.3 - c)$$

Onde:

$\varepsilon_{1,2,3}$ é a diferença entre duas amostras de D_f ;

D_f é a distância de falta estimada;

k é o valor da amostra atual;

O algoritmo desenvolvido utiliza três zonas de atuação. A primeira zona foi ajustada para proteger 85% da linha em que o relé está instalado, ou seja, $0,85(LT_{CD})$. A segunda e terceira zonas de proteção do relé de distância foram ajustadas para cobrir 100% da LT_{CD} mais 20% da LT_{DE} e 100% de LT_{CD} mais 80% de LT_{DE} , respectivamente, conforme mostra a Figura 7.7.

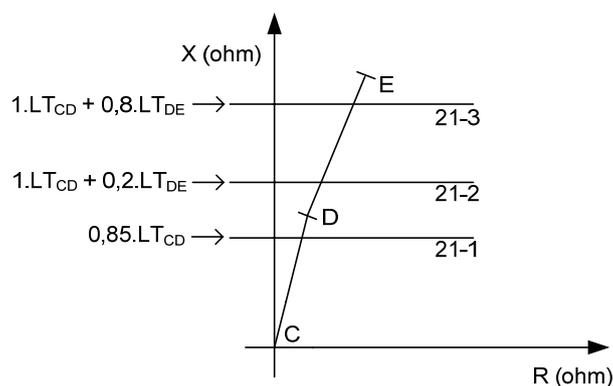


Figura 7.7 – Relé de distância no plano R-X

Os sinais de entrada estão sujeitos a imprecisões em seus valores, seja na medição destes nos transdutores (TCs e TPs), seja na filtragem. Conseqüentemente, o cálculo da distância de falta e impedância vista pelo relé também poderá sofrer imprecisões. De modo a obter uma maior segurança na operação do relé, principalmente na região próxima ao limiar de operação, incorporou-se uma estratégia de contagem (MOORE & JOHNS, 1996). Cada zona do relé possui um contador que inicialmente é ajustado em zero. Quando a impedância entra na zona operacional do relé de distância, o contador é inicializado, e quando ultrapassar um valor previamente ajustado o contador habilita a operação na zona 1 ($t_{z1} = 0$ s) e a temporização nas zonas 2 e 3 ($t_{z2} = 0,3$ s e $t_{z3} = 1,0$ s).

Para as faltas cuja impedância se encontra em até 80% do ajuste reativo da zona ($0,8X_R$), o contador incrementa seu valor em nove. Quando o contador alcançar 45, isto é, cinco amostras consecutivas nesta área, o relé opera. Se a falta for próxima ao limite do alcance do relé, ou seja, em regiões de incerteza das medições, e a impedância se encontrar entre 80 e 90% ou entre 90 e 100% da característica, o valor do contador é reduzido para quatro e um (1) por amostra de impedância, respectivamente. Para valores de impedância que se encontrarem acima dos 100% da característica o contador passa a incrementar valores negativos, conforme ilustra a Figura 7.8. O contador nunca pode ser menor que zero. Após o relé operar, o contador retorna a zero. A estratégia de contagem descrita é utilizada nas três zonas de proteção da linha de transmissão

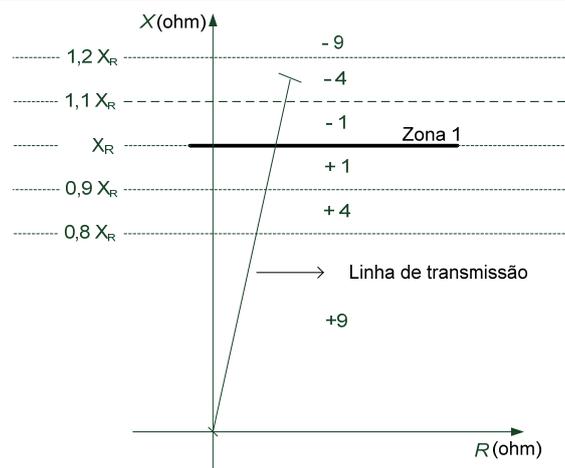


Figura 7.8 – Estratégia de contagem

7.2.5 Detecção e Bloqueio Contra Oscilações de Potência

Até o momento, o algoritmo apresentado foi desenvolvido para detectar faltas na linha de transmissão sem tratar dos efeitos das oscilações de potência. Logo, alguma técnica para eliminar estes efeitos deve ser adicionada no algoritmo.

As equações para o cálculo da distância para as faltas monofásicas são fundamentadas na corrente de sequência “0” (equação 3.29). De modo geral, as oscilações de potência são fenômenos equilibrados. Logo, como não existe sequência “0” durante eventos equilibrados, nenhum critério adicional é necessário nos algoritmos para as faltas monofásicas. No entanto, as equações que calculam a distância para as faltas entre fases utilizam as correntes e tensões envolvidas na falta (equação 3.30), sendo necessário um critério adicional para evitar as atuações indevidas do relé. A técnica desenvolvida é fundamentada na componente dc durante uma falta e utiliza a MM.

O comportamento transitório da corrente de curto-circuito pode ser analisado através de um simples circuito (SAADAT, 1999). Considerando a tensão senoidal da equação (7.4) aplicada em circuito com um resistor (R) e um indutor (L), de valores constantes, como mostra a Figura 7.9.

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (7.4)$$

Onde:

V_m é a máxima tensão;

ω é a frequência angular;

β é o ângulo de fase;

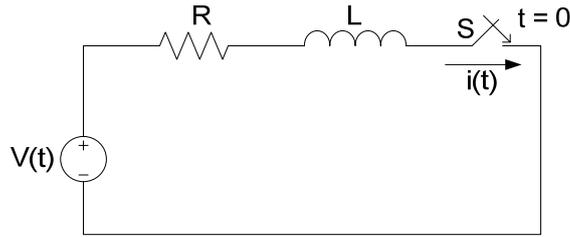


Figura 7.9 – Circuito RL

Com a chave S fechada, a tensão instantânea é dada por:

$$V_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta) = Ri(t) + L \frac{\Delta i(t)}{\Delta t} \quad (7.5)$$

Considerando a corrente no instante inicial nula, a solução da equação acima é:

$$i(t) = I_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta - \gamma) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\beta - \gamma) \quad (7.6)$$

Onde:

I_m é a corrente máxima (V_m/Z);

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\tau = L/R;$$

$$\gamma = \tan^{-1}(\omega L/R).$$

Analisando a equação (7.6) pode-se notar que a corrente total de curto-circuito $i(t)$ é a soma de duas componentes – a corrente simétrica ou simplesmente componente ac (i_{ac}) e a componente dc (i_{dc}). A componente simétrica, primeira parcela da equação (7.6), é a componente senoidal de regime permanente defasada do ângulo do fator de potência do circuito. Já a componente dc , segunda parcela da equação (7.6), é função do ângulo da tensão β no instante do fechamento da chave S e da relação X/R do circuito. Esta componente decai a zero após poucos ciclos e, quanto menor for a relação X/R no ponto da falta, mais rápido a componente dc se extingue.

Analisando a equação (7.6), teoricamente pode-se concluir que:

a) Ponto da onda de tensão em que ocorre a falta

- $(\beta - \gamma) = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi \rightarrow$ sendo n um número inteiro a componente dc não existe na fase que ocorreu a falta. Porém existirá nas fases restantes, se estas estiverem envolvidas na falta.
- $(\beta - \gamma) = \pm n(\pi/2), \rightarrow$ sendo n um número inteiro ímpar a componente dc começa por seu valor máximo.

b) Relação X/R

- $X/R \cong \infty$ a componente dc não se extingue nunca.
- $X/R \cong 0$ a componente dc é nula.

A Figura 7.10 ilustra a forma de onda da corrente de curto-circuito de uma fase de um sistema trifásico gerada no MATLAB por meio da equação (7.6).

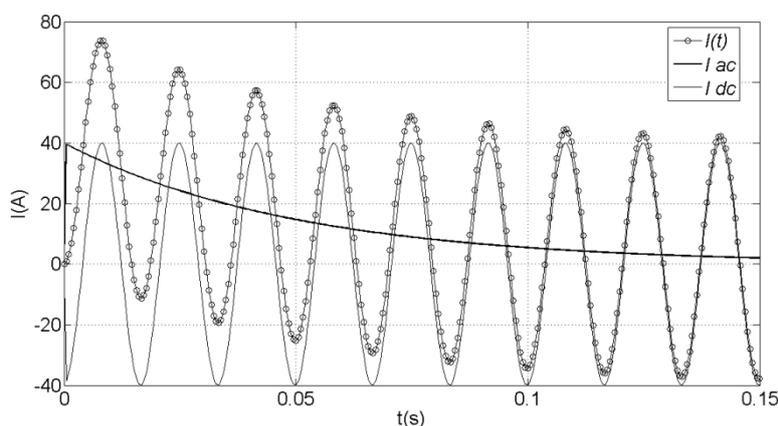


Figura 7.10 – Forma de onda da corrente de falta

A componente dc durante uma falta possui comportamento exponencial decrescente bem definido. Deste modo, a técnica adicional para tornar o algoritmo para proteção de linhas de transmissão tolerante as oscilações de potência é fundamentado na diferença do comportamento da componente dc durante os curtos-circuitos e oscilações de potência. Para estimar a componente dc utilizou-se um filtro morfológico apresentando por Buse et al., (2010). Este filtro utiliza os operadores morfológicos de abertura e fechamento abordados no Capítulo 2, subseção 2.6.1.

De modo a extrair a componente dc , o sinal de falta I é processado pelo seguinte filtro (BUSE et al., 2010):

$$y = \frac{I \circ g + I \cdot g}{2} \quad (7.7)$$

Onde:

y é a saída do filtro morfológico que corresponde a componente dc ;

I é o sinal de corrente processado;

g é o elemento estrutural.

Utilizando as definições dos operadores de abertura e fechamento a equação (7.7) resulta em:

$$y = \frac{(I \ominus g) \oplus g + (I \oplus g) \ominus g}{2} \quad (7.8)$$

A operação de abertura remove os picos positivos de duração menor que o tamanho do elemento estrutural g . De maneira similar, a operação de fechamento remove os picos negativos de duração menor que o tamanho do elemento estrutural g . Assim, se uma operação de abertura, seguida de uma operação de fechamento é realizada, todas as assimetrias do sinal processado são removidas.

O tamanho da função do elemento estrutural g foi de um ciclo e uma amostra, ou seja, 33. Esta função possui origem no centro e vale zero para todas as amostras, ou seja: $g(-16) = g(-15) \dots g(-1) = g(0) = g(1) = g(15) \dots g(16)$.

A Figura 7.11 ilustra as operações de abertura e fechamento de um sinal de corrente senoidal simétrico. No processo de inicialização do filtro surge uma componente dc , mesmo para um sinal senoidal simétrico. No entanto, assim que tamanho do sinal atinge $3/4$ de ciclo a componente dc passa a ser zero para todo o restante do sinal.

Para um sinal que apresenta assimetria, como por exemplo, um sinal de corrente com componente dc , o resultado da equação (7.7) é a própria assimetria do sinal, ou seja, neste caso a própria componente dc . A Figura 7.12 ilustra os resultados dos operadores de abertura, fechamento e componente dc para uma corrente de falta utilizando a equação (7.6) com os seguintes parâmetros: $I_m = 40 A$; $\omega = 377 \text{ rad/s}$; $\beta = 1,9^\circ$; $\gamma = 88,1^\circ$; $\tau = 0,02 \text{ s}$.

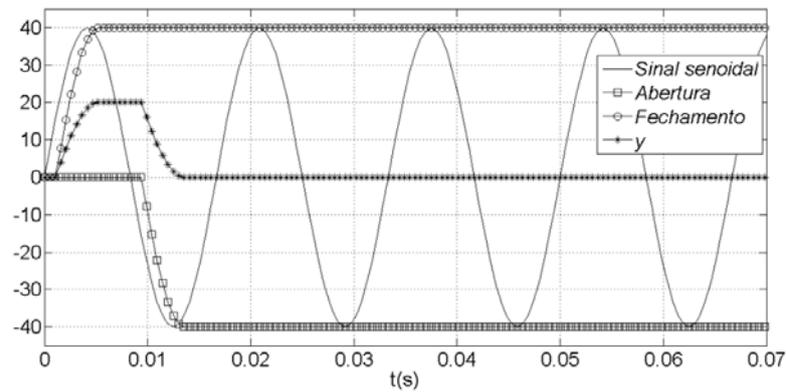


Figura 7.11 – Operações de abertura, fechamento e componente dc para um sinal senoidal simétrico

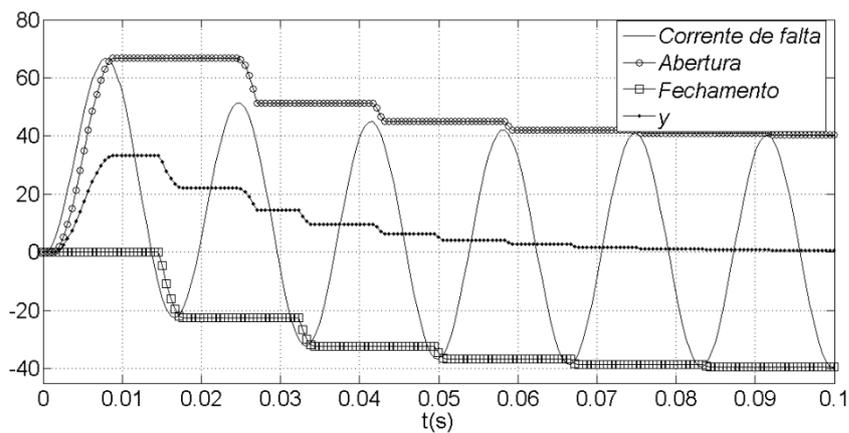


Figura 7.12 – Operações de abertura, fechamento e componente dc para uma corrente de falta assimétrica

A componente dc estimada sempre decairá de forma exponencial mesmo se a falta ocorrer durante uma oscilação de potência. Durante uma oscilação de potência em um sistema com dois equivalentes externos interligados por uma linha de transmissão, a corrente na linha é composta pela soma de duas componentes senoidais, isto é, $\text{sen}(x) + \text{sen}(y)$.

Partindo das identidades trigonométricas:

$$\text{sen}(A + B) = \text{sen}(A) \cos(B) + \text{sen}(B) \cos(A) \quad (7.9)$$

$$\text{sen}(A - B) = \text{sen}(A) \cos(B) - \text{sen}(B) \cos(A) \quad (7.10)$$

Se adicionarmos, membro a membro as duas equações do sistema chega-se na equação (7.11):

$$+ \begin{cases} \text{sen}(A + B) = \text{sen}(A) \cos(B) + \text{sen}(B) \cos(A) \\ \text{sen}(A - B) = \text{sen}(A) \cos(B) - \text{sen}(B) \cos(A) \end{cases}$$

$$\text{sen}(A + B) + \text{sen}(A - B) = \text{sen}(A) \cos(B) + \text{sen}(A) \cos(B)$$

$$\text{sen}(A + B) + \text{sen}(A - B) = 2\text{sen}(A) \cos(B) \quad (7.11)$$

Fazendo:

$$x = A + B \quad (7.12)$$

e

$$y = A - B \quad (7.13)$$

Isolando os termos A e B nas equações (7.12) e (7.13), respectivamente:

$$A = x - B \quad (7.14)$$

$$B = A - y \quad (7.15)$$

Reescrevendo a equação (7.14) em termos da equação (7.15):

$$A = x - A + y \quad (7.16 - a)$$

$$2A = x + y \quad (7.16 - b)$$

$$A = \frac{x + y}{2} \quad (7.16 - c)$$

Agora reescrevendo a equação (7.15) em termos da equação (7.16 - c):

$$B = \frac{x + y}{2} - y \quad (7.17 - a)$$

$$B = \frac{x - y}{2} \quad (7.17 - b)$$

Ou seja, a soma de dois sinais senoidais é obtida substituindo-se as equações (7.16 - c) e (7.17 - b) na equação (7.11):

$$\text{sen}(x) + \text{sen}(y) = 2\text{sen}\left(\frac{x + y}{2}\right) \cos\left(\frac{x - y}{2}\right) \quad (7.18)$$

Considerando os sinais de corrente I_1 e I_2 representados por:

$$I_1(t) = I_{m1} \text{sen}(2\pi f_1 t + \beta_1) \quad (7.19)$$

$$I_2(t) = I_{m2} \text{sen}(2\pi f_2 t + \beta_2) \quad (7.20)$$

Onde:

I_{m1} e I_{m2} são as máximas correntes dos sinais I_1 e I_2 , respectivamente;

f_1 e f_2 são as duas frequências dos sinais de corrente I_1 e I_2 , respectivamente;

β_1 e β_2 são os ângulos de iniciais de fase dos sinais de corrente I_1 e I_2 , respectivamente.

Fazendo $I_{m1} = I_{m2}$, nas equações (7.19) e (7.20) e adequando-as na equação (7.18), resulta na equação (7.21).

$$i(t) = 2I_m \text{sen} \left(\frac{2\pi f_1 t + \beta_1 + 2\pi f_2 t + \beta_2}{2} \right) \cos \left(\frac{2\pi f_1 t + \beta_1 - 2\pi f_2 t - \beta_2}{2} \right) \quad (7.21)$$

Organizando os termos da equação (7.21) resulta na equação (7.22) que descreve o comportamento da corrente instantânea em uma linha que conecta dois sistemas durante uma oscilação de potência.

$$i(t) = 2I_m \text{sen} \left[2\pi t \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) + \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right) \right] \cos \left[2\pi t \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2} \right) \right] \quad (7.22)$$

Verifica-se por meio da equação (7.22) quando os dois sistemas operarem com frequências diferentes, isto é, $f_1 \neq f_2$, o sinal de corrente será oscilante. A Figura 7.13 ilustra o sinal de corrente resultante usando a equação (7.22) com os seguintes parâmetros: $I_m = 40 \text{ A}$; $f_1 = 60 \text{ Hz}$; $f_2 = 61 \text{ Hz}$; $\beta_1 = 88,1^\circ$; $\beta_2 = 1,9^\circ$.

A diferença de frequência entre os dois sistemas é conhecida como frequência de oscilação ($f_{osc.}$), ou seja, o sinal mostrado na Figura 7.13 possui $f_{osc.}$ igual a 1 Hz. Quanto maior for a $f_{osc.}$, maior a chance do relé de distância operar indevidamente. Além disso, elevados valores de $f_{osc.}$ tendem a tornar a oscilação do tipo instável, sendo necessário alguma rápida ação corretiva para que os sistemas não continuem a operar fora do sincronismo. A Figura 7.14 mostra um sinal de corrente, gerado pela equação (7.22) com $f_{osc.}$ igual a 5 Hz ($f_1 = 60 \text{ Hz}$ e $f_2 = 65 \text{ Hz}$).

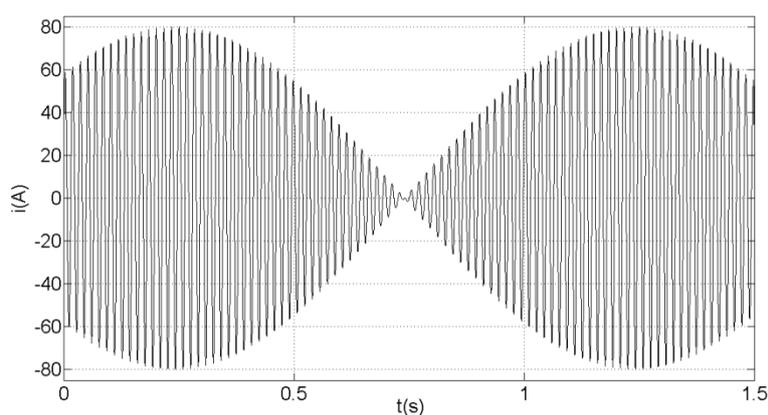


Figura 7.13 – Formato típico de um sinal de corrente durante uma oscilação de potência com $f_{osc.}$ igual a 1 Hz

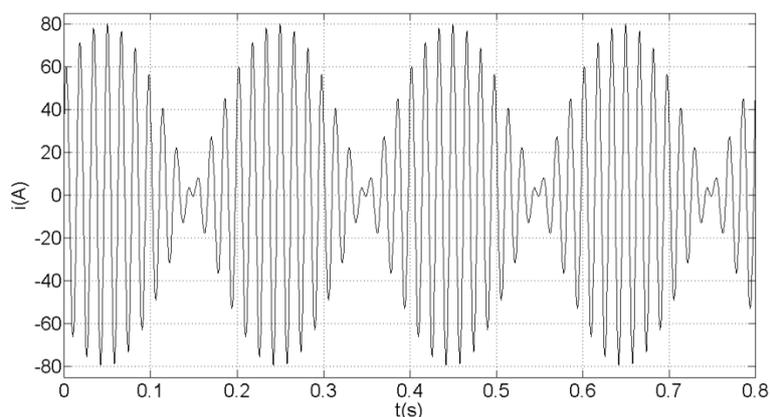


Figura 7.14 – Formato típico de um sinal de corrente durante uma oscilação de potência com f_{osc} igual a 5 Hz

O filtro morfológico da equação (7.7) permite estimar a componente dc para sinais de correntes provenientes de oscilações de potência. A Figura 7.15 mostra a componente dc calculada para o sinal de corrente apresentado na Figura 7.13. Já a Figura 7.16 mostra a componente dc para sinal da Figura 7.14.

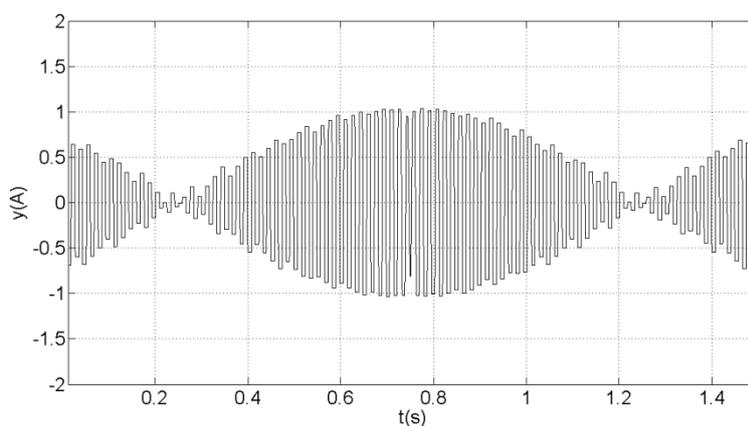


Figura 7.15 – Componente dc calculada durante uma oscilação de potência com f_{osc} igual a 1 Hz

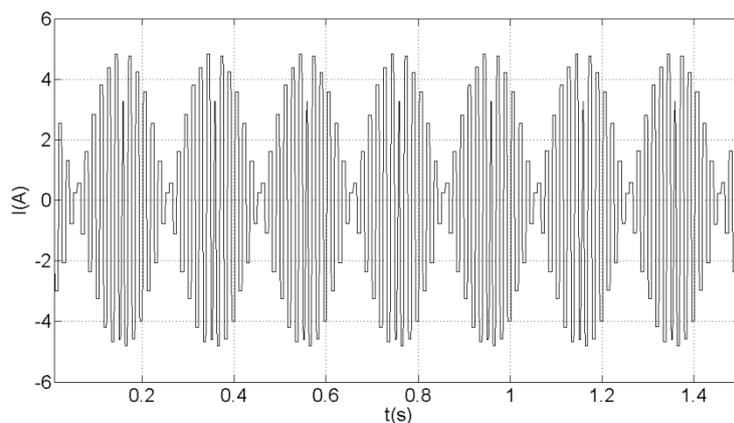


Figura 7.16 – Componente dc calculada durante uma oscilação de potência com f_{osc} igual a 5 Hz

Analisando a componente dc estimada pelo filtro morfológico durante uma falta (Figura 7.13) e durante uma oscilação de potência (Figuras 7.15 e 7.16) verifica-se uma evidente diferença de comportamento entre os dois tipos de sinais. Durante uma falta a componente dc possui comportamento exponencial decrescente bem definido. Enquanto que, durante uma oscilação de potência a componente dc oscila de acordo com a frequência de oscilação. Assim, para detectar o comportamento exponencial decrescente da componente dc a inequação (7.23) ou inequação (7.24) devem ser satisfeitas.

$$y(k) > 0 \text{ E } y(k) \leq y(k - 1:N) \text{ E } y(k - 1:N) > 0 \quad (7.23)$$

$$y(k) < 0 \text{ E } y(k) \leq y(k - 1:N) \text{ E } y(k - 1:N) < 0 \quad (7.24)$$

Onde:

y é a componente dc estimada;

k é a amostra atual;

N é o número de amostras por ciclo.

As inequações (7.23) e (7.24) comparam o valor atual k da componente dc estimada y , com outros N valores anteriores de y . Se a condição expressa pelas inequações (7.23) ou (7.24) forem satisfeitas para as N amostras, a componente dc é detectada, resultando em um sinal lógico unitário .

A inequação (7.23) é destinada para detectar as faltas que originam componentes dc positivas. Já a inequação (7.24) visa detectar as faltas que originam componentes dc negativas. A Figura 7.17 – (a) mostra o sinal de corrente assimétrico e a componente dc estimada. A Figura 7.17 – (b) mostra o sinal lógico da detecção da componente dc para o sinal mostrado na Figura 7.17 – (a).

As Figuras 7.18 e 7.19 mostram a componente dc e o sinal lógico de sua detecção para sinais de corrente com f_{osc} . igual a 1 Hz e 5 Hz, respectivamente. As Figuras 7.18 e 7.19 mostram que, ao contrário do que ocorre com as correntes de falta, para componentes dc oscilantes o sinal lógico do detector de dc é nulo.

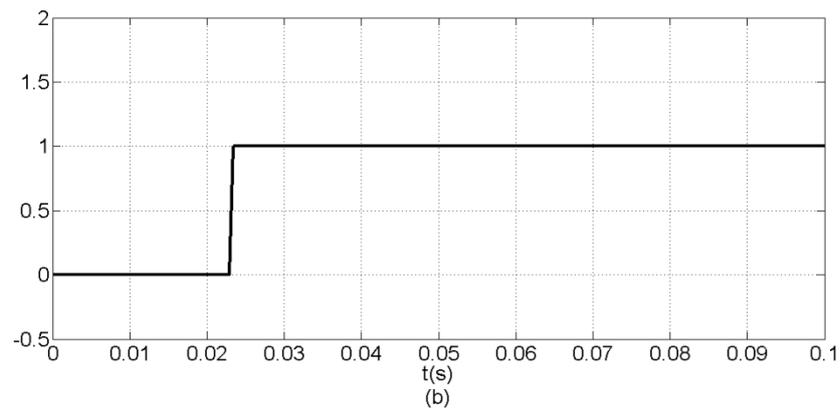
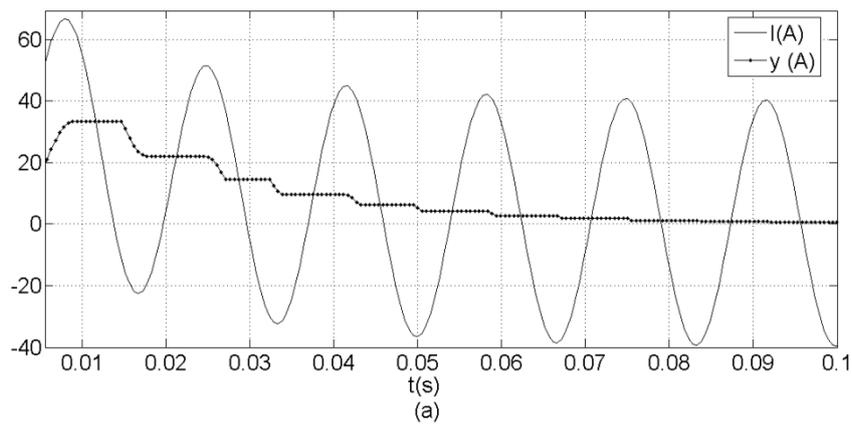


Figura 7.17 – (a) Corrente de falta assimétrica e componente dc estimada y ; (b) sinal lógico do detector da componente dc

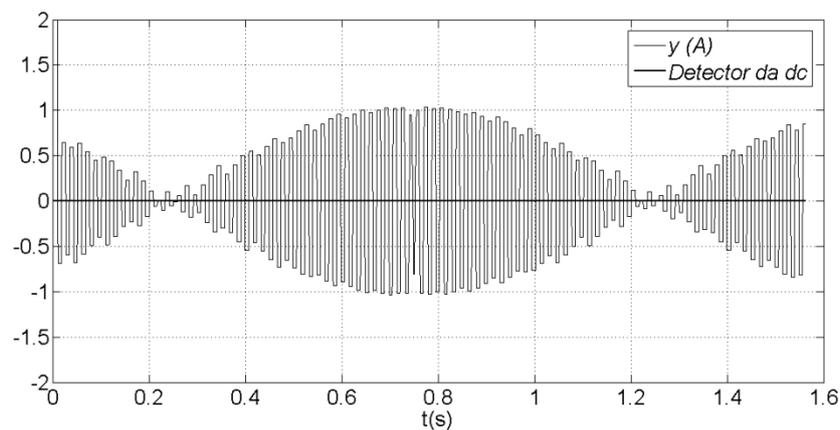


Figura 7.18 – Componente dc estimada y para sinal de corrente com f_{osc} igual a 1 Hz e sinal lógico de sua detecção

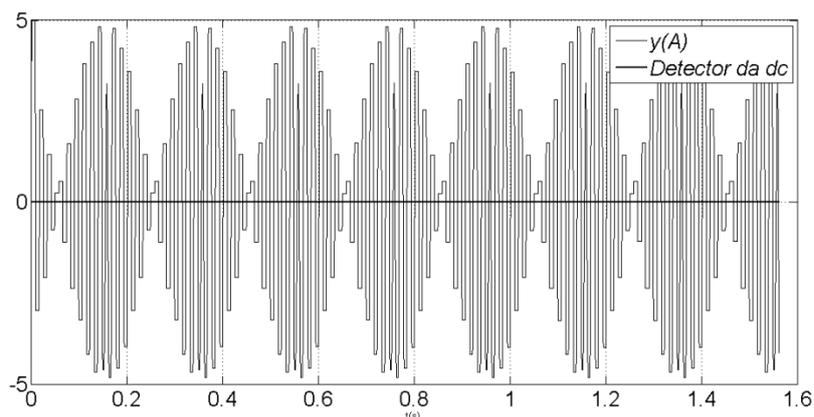


Figura 7.19 – Componente dc estimada y para sinal de corrente com f_{osc} igual a 5 Hz e sinal lógico de sua detecção

O fluxograma do algoritmo que estima a distância de falta com tolerância aos efeitos das oscilações de potência é mostrado na Figura 7.20. Os blocos 1 e 2 são de inicialização das variáveis. O bloco 3 recebe os sinais de entrada das tensões de fase e correntes de fase e sequência “0” utilizados no processo. Já o bloco 4 realiza primeiramente o cálculo da distância de falta e da componente dc . Se a diferença entre três amostras consecutivas da distância forem menores que 5%, conforme apresentado na equação (7.3), inicia-se o cálculo da impedância aparente vista pelo relé. O bloco 5 consiste no relé de distância com a estratégia de contagem (MOORE & JOHNS, 1996).

A lógica que faz a distinção entre faltas e oscilações de potência são os blocos internos a linha pontilhada. O bloco 6 verifica se a componente dc é maior que zero. Caso verdadeiro, a variável x é inicializada no bloco 7. O bloco 8 verifica se a variável x é maior que o número de amostras por ciclo ($N_{set} = 32$). Se não for maior, o bloco 9 analisa se o valor da componente dc da amostra atual k é menor ou igual que o valor da amostra anterior. Se a condição do bloco 9 for satisfeita para as N amostras, a componente dc é detectada. Se para a mesma amostra k , os critérios estabelecidos pelo contador do relé de distância (bloco 5), e pela componente dc , forem satisfeitos o relé envia o seu sinal de disparo. Os blocos 11, 12, 13 e 14 tratam as componentes dc negativas e possuem funções análogas aos blocos 7, 8, 9 e 10, respectivamente.

O fluxograma apresentado na Figura 7.20 é de um algoritmo para faltas entre fases dentro da zona 1 do relé de distância desenvolvido. O processo de seleção entre os algoritmos disponíveis, isto é, a-b, b-c, c-a, a-g, b-g, c-g, é realizado pelo algoritmo classificador de falta. Vale ressaltar, que os algoritmos para faltas monofásica não utilizam o critério da componente dc , conforme mostra a Figura 7.21.

Nas zonas 2 e 3 é acrescentado uma temporarização no relé de distância. Quando a impedância entra na zona operacional do relé de distância, o contador do bloco 5 é inicializado, conforme mostra a Figura 7.22. Quando este contador ultrapassar o valor previamente ajustado (45) e a componente dc é detectada, o bloco 16 inicia a temporização nas zonas 2 ($t_{Z2} = 0,3$ s) e zona 3 ($t_{Z3} = 1,0$ s). O sinal de disparo só é enviado se o valor do contador se mantiver maior que 45 durante a temporização atribuída. Esta condição é imposta nos blocos 17 e 18 da Figura 7.22.

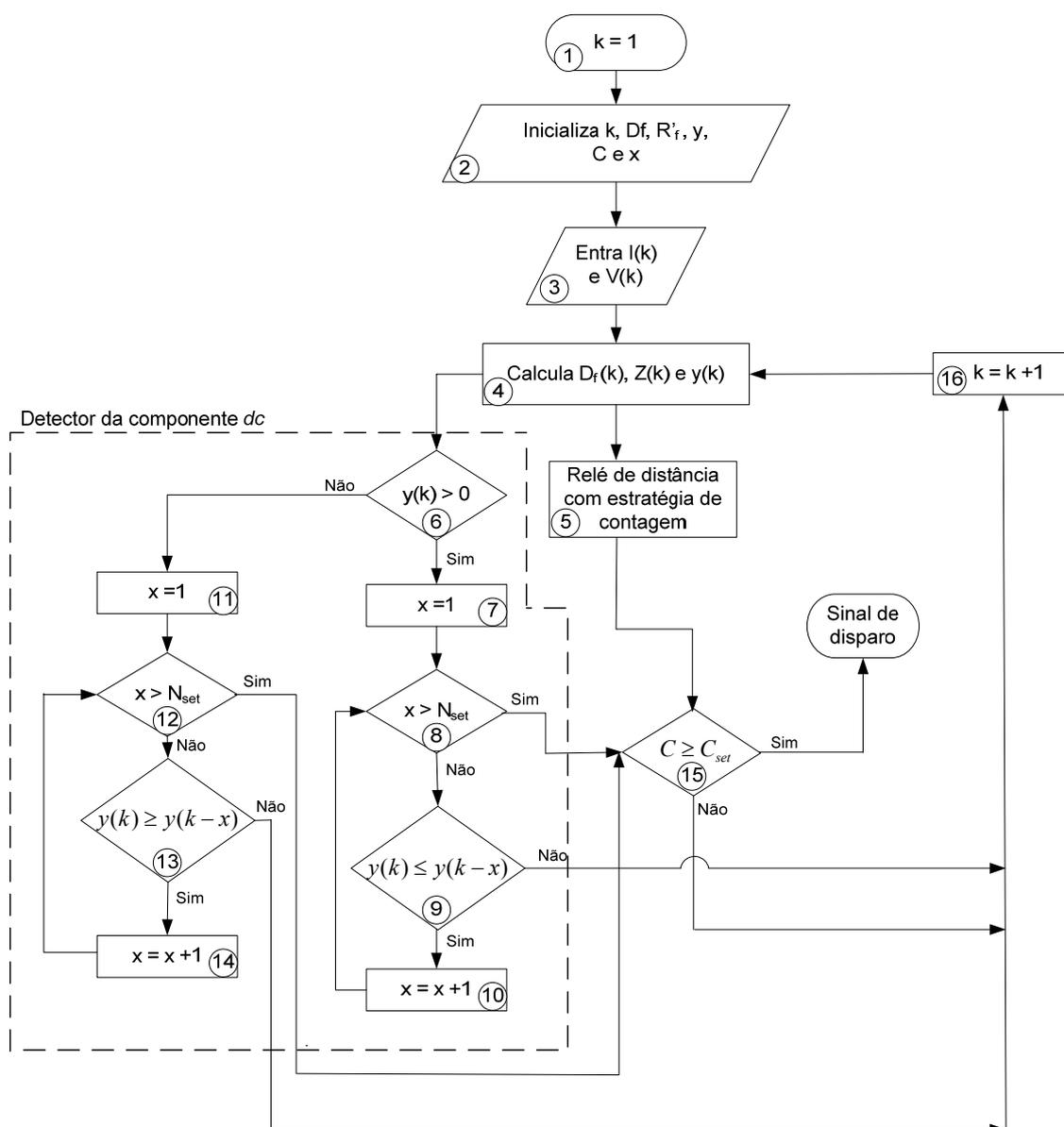


Figura 7.20 – Fluxograma do algoritmo estimador de distância de falta entre fases para a zona 1

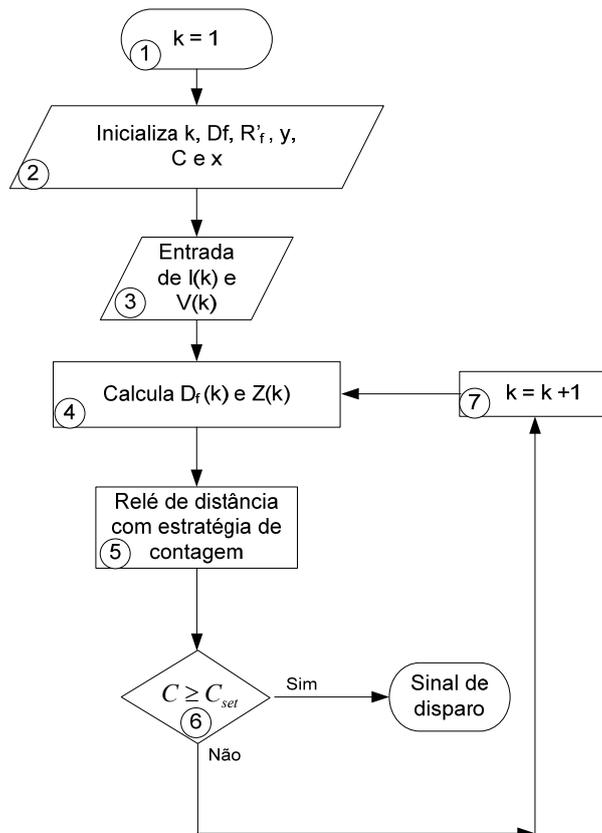
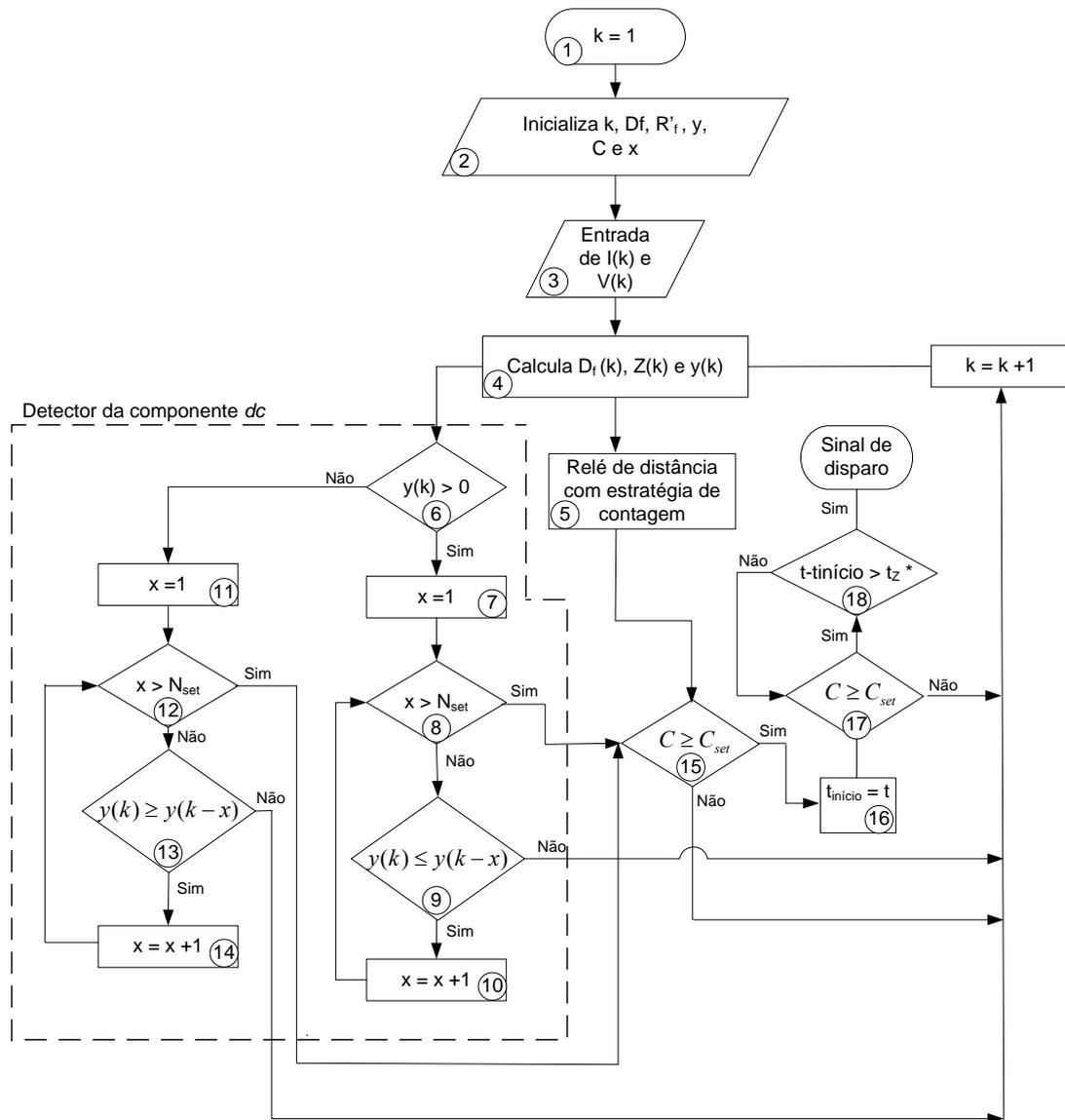


Figura 7.21 – Fluxograma do algoritmo estimador de distância de falta monofásica para a zona 1



* corresponde a temporização da zona 2 ou zona 3

Figura 7.22 – Fluxograma do algoritmo estimador de distância de falta entre fases para as zonas 2 e 3

7.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o algoritmo desenvolvido para a proteção de distância de linhas de transmissão tolerante as oscilações de potência. A equação que rege o comportamento da corrente instantânea durante uma oscilação de potência foi apresentada. A partir desta equação verificou-se que a componente *dc* calculada durante uma oscilação possui característica oscilante. A partir da diferença entre o

comportamento da componente dc durante uma falta e oscilação de potência surgiu a principal inovação do algoritmo proposto. Vale ressaltar que o critério da componente dc não é utilizado para faltas monofásica. Pois, para essas faltas, dependendo do ângulo de fase no momento da falta, a componente dc poderá não surgir. Logo, a componente dc não é um bom critério para detectar faltas monofásicas.

Capítulo 8

RESULTADOS

8.1 Considerações Gerais

No Capítulo 7 o critério da componente dc , responsável por diferenciar as faltas das oscilações de potência, foi elucidado e fundamentado de forma ideal, isto é, baseado nas equações matemáticas de curto-circuito e oscilação de potência. No presente capítulo o critério da componente dc , bem como todo o algoritmo são avaliados sob diversas condições de falta em dois sistemas testes. A primeira etapa de testes visa investigar o desempenho da técnica, em um sistema teste simplificado, diante de diferentes tipos de faltas sem oscilação e, posteriormente com a presença das oscilações de potência. Por fim, de modo a verificar o desempenho do algoritmo desenvolvido em linhas longas, o mesmo é testado em um sistema teste mais complexo.

8.2 Sistema Teste 1

8.2.1 Testes sem Oscilação de Potência

O principal aspecto positivo do algoritmo desenvolvido é a sua tolerância as oscilações de potência. Porém, é evidente que a técnica também deve ser eficiente frente a eventos sem oscilações de potência. Sendo assim, na primeira etapa dos testes, buscou-se investigar o desempenho da técnica frente à faltas sem a presença de oscilação de potência. O algoritmo utilizou-se o Sistema Teste 1, apresentado no Capítulo 4. Os testes consideraram diferentes tipos de falta, distância de falta, carregamento e resistência de falta.

8.2.1.1 Tipo de Falta

O algoritmo numérico foi avaliado para curto-circuitos trifásicos ($CC_{3\phi}$), monofásicos ($CC_{1\phi-g}$), bifásicos ($CC_{2\phi}$) e bifásicos-terra ($CC_{2\phi-g}$). As faltas monofásicas não utilizam o critério da componente dc no seu algoritmo, e por isso foram detectadas de forma mais rápida que as outras. A Figura 8.1 – (a) mostra a

impedância aparente para uma falta monofásica a 5% do comprimento da linha com resistência de falta de 100Ω e $\delta = -15^\circ$. Como a impedância excursiona pela a linha de transmissão, visualmente fica difícil de distinguir a linha e a impedância aparente. A Figura 8.1 – (b) mostra o detalhe da impedância aparente se aproximando do local da falta, isto é, 5 km.

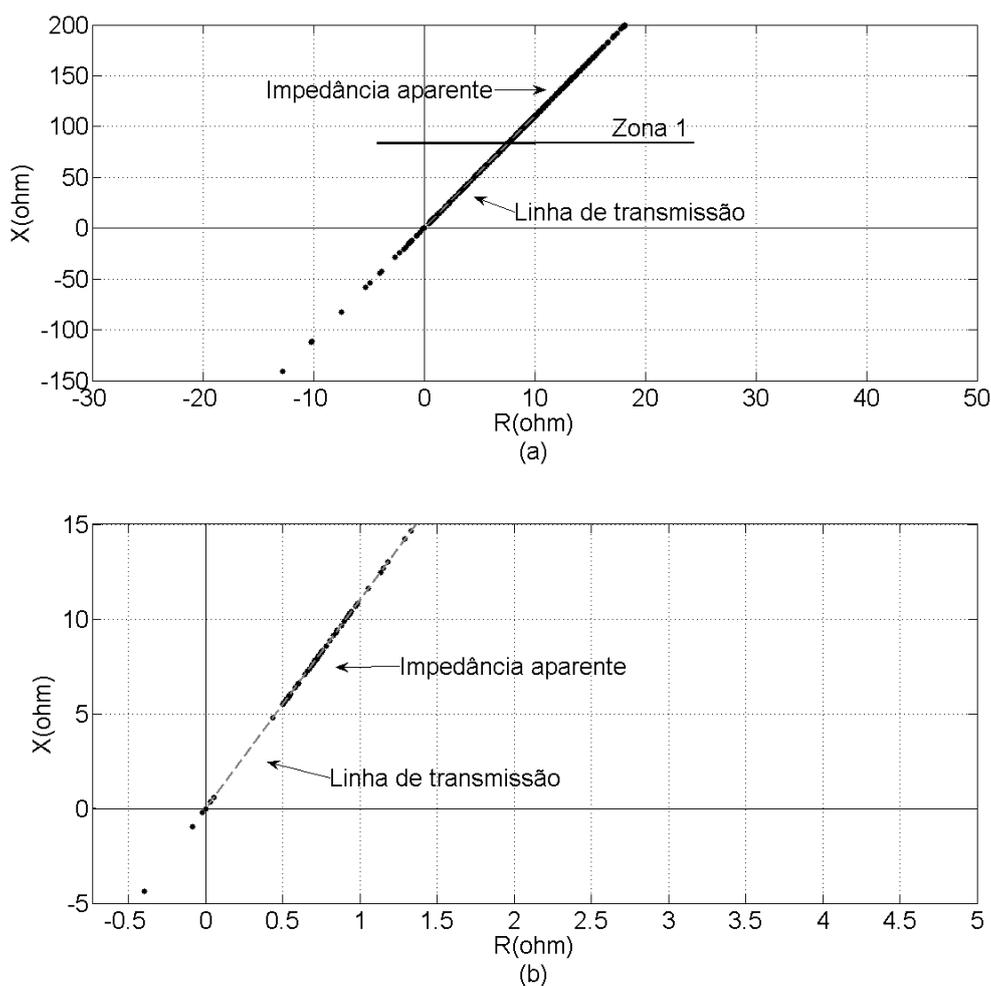


Figura 8.1 – (a) Impedância aparente vista pelo relé de distância durante uma falta monofásica (5% da linha, $R_f = 100 \Omega$ e $\delta = -15^\circ$); (b) detalhe da impedância aparente

8.2.1.2 Localização da Falta

A técnica foi testada para faltas localizadas na primeira zona (5% e 80% do comprimento da linha) e na segunda zona (90% do comprimento da linha). A Figura 8.2 ilustra a característica do relé e a impedância para uma falta trifásica localizada em 80% da linha e a Figura 8.3 mostra a saída lógica das principais etapas que compõem o algoritmo para este tipo de falta. A falta trifásica foi aplicada em 500 ms com duração

de 200 ms. O sinal lógico do relé de distância (21) incorpora todas as etapas do relé de distância com a estratégia de contagem. Quando o contador assumir um valor maior que 45, o sinal lógico passa a ser um (1). O sinal de disparo somente é enviado quando o sinal lógico 21 e da componente *dc* (dc) são detectados ao mesmo instante. No caso exemplificado, o algoritmo das fases ‘c-a’ da zona 1 enviou o sinal de operação ao disjuntor em 23,4 ms após a ocorrência da falta. Neste instante de tempo a distância estimada foi de 79,26 km, conforme pode ser visto na Figura 8.4.

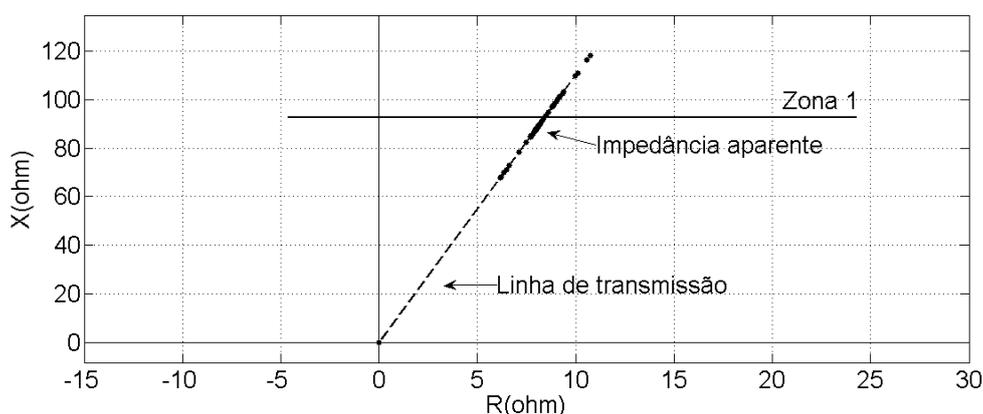


Figura 8.2 – Impedância aparente vista pelo relé de distância durante uma falta trifásica (80% da linha e $\delta = -15^\circ$)

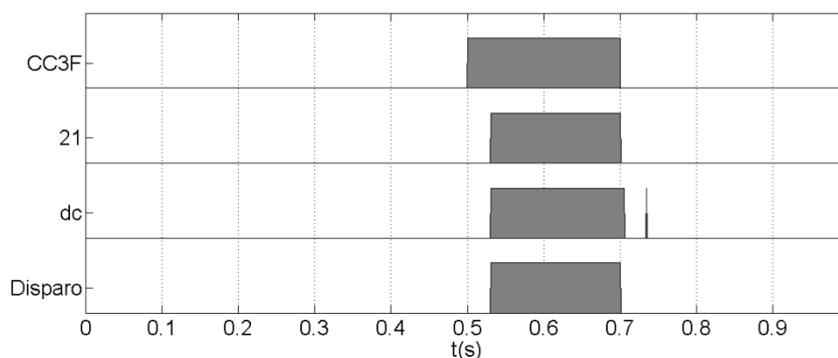


Figura 8.3 – Sinais lógicos das principais etapas que compõem o algoritmo (fases ‘c-a’) durante uma falta trifásica (80% da linha e $\delta = -15^\circ$)

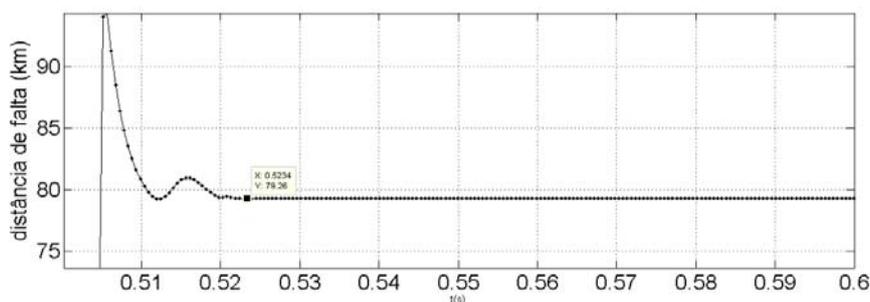


Figura 8.4 – Distância estimada pelo localizador de falta (fases ‘c-a’) durante uma falta trifásica (80% da linha e $\delta = -15^\circ$)

8.2.1.3 Carregamento (δ) e Resistência de Falta (R_f)

Três ângulos de carga foram considerados nos testes, isto é, $\delta = 0^\circ$, -15° e -30° . A variação do ângulo de carga apresentou pouca influência nos resultados. Nas faltas monofásicas e bifásicas-terra foram inseridos diferentes valores de resistência de falta. Os valores considerados foram 0Ω , 100Ω , 150Ω e 200Ω . A Figura 8.5 mostra os sinais lógicos das etapas que compõem o algoritmo para uma falta bifásica. Para essa, o sinal de disparo ao disjuntor foi de 29,1 ms após a ocorrência. Já a Figura 8.6 mostra os sinais lógicos para uma falta bifásica-terra com R_f igual 200Ω , que resultou em um tempo de operação igual a 28,1 ms após a ocorrência da falta.

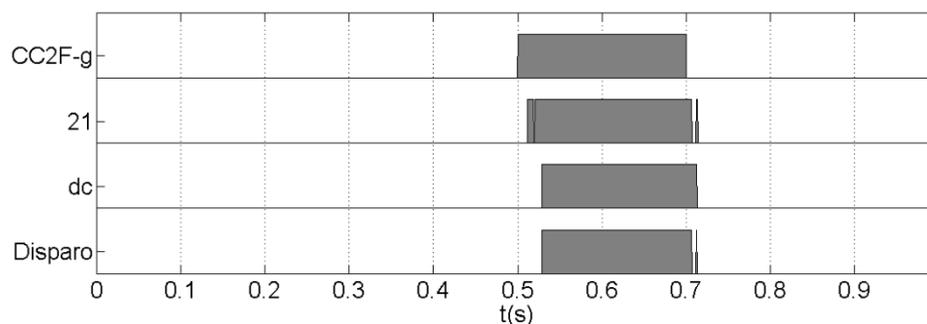


Figura 8.5 – Sinais lógicos das principais etapas que compõem o algoritmo (fases 'a-b') durante uma falta bifásica (5% da linha e $\delta = -15^\circ$)

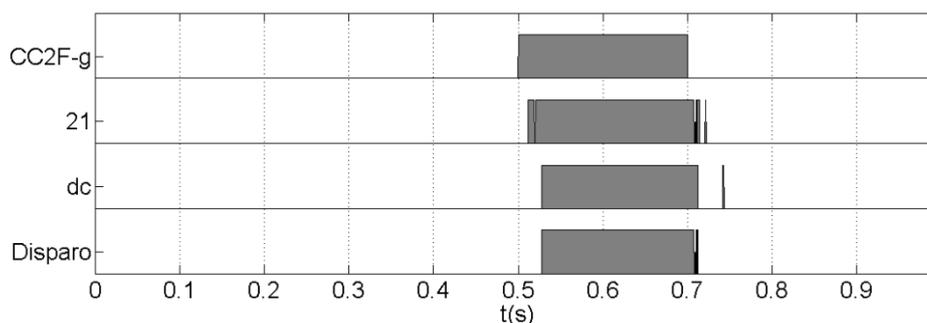


Figura 8.6 – Sinais lógicos das principais etapas que compõem o algoritmo (fases 'c-a') durante uma falta bifásica-terra (5% da linha, $R_f = 200 \Omega$ e $\delta = -15^\circ$)

A Tabela 8.1 e Tabela 8.2 mostram os resultados dos testes de curto-circuito entre fases e monofásicos, respectivamente, sem considerar as oscilações de potência no sistema elétrico. Os resultados mostram que o algoritmo desenvolvido é confiável e robusto, pois conseguiu enviar o sinal de disparo para todas as condições de falta, inclusive com elevados valores de resistência de falta.

Tabela 8.1 – Resultados dos testes de curto-circuito entre fases sem oscilação de potência

Tipo de falta	Distância da falta (%)	δ°	$R_f(\Omega)$	Operação	Tempo de operação (ms)	Resultado da operação	
$CC_{3\phi}$	5	-15	0	S	22,9	\checkmark	
		-30	0	S	22,9	\checkmark	
		0	0	S	23,4	\checkmark	
	80	-15	0	S	23,4	\checkmark	
		-30	0	S	23,4	\checkmark	
		0	0	S	323,4	\checkmark	
	90*	-15	0	S	331,2	\checkmark	
		0	0	S	29,1	\checkmark	
	$CC_{2\phi}$	5	-15	0	S	20,8	\checkmark
			-30	0	S	29,1	\checkmark
			0	0	S	30,7	\checkmark
		80	-15	0	S	30,7	\checkmark
-30			0	S	27,0	\checkmark	
-15			0	S	325,5	\checkmark	
90*		-30	0	S	334,3	\checkmark	
		-15	100	S	28,1	\checkmark	
$CC_{2\phi-g}$		5	-30	200	S	28,1	\checkmark
			-15	150	S	28,6	\checkmark
		80	-30	100	S	30,7	\checkmark
			-30	100	S	329,6	\checkmark

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

 \checkmark significa uma operação correta, \mathcal{X} significa uma operação indevida.

O principal fator que afeta o tempo de operação do algoritmo é a distância da falta. Para as faltas monofásicas a 5% do comprimento da linha o algoritmo envia o sinal de disparo ainda mais rápido, pois não possui o atraso do cálculo da componente *dc*. Já nas faltas localizadas a 80% e 90% da linha, os resultados foram muito semelhantes para todas as condições testadas, mesmo para as faltas monofásicas.

Para as faltas localizadas até a primeira zona de atuação do relé, o algoritmo enviou o sinal de disparo em até 2 ciclos. Para as faltas localizadas na segunda zona o maior tempo de operação foi 334,3 ms, considerando a temporização da segunda zona (300 ms).

Tabela 8.2 – Resultados dos testes de curto-circuito monofásicos sem oscilação de potência

<i>Tipo de falta</i>	<i>Distância da falta (%)</i>	δ°	$R_f(\Omega)$	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
<i>CC_{1φ-g}</i>	5	0	0	S	4.7	✓
		0	150	S	8.8	✓
		-15	100	S	9.3	✓
		-15	150	S	8.8	✓
		-30	0	S	11.4	✓
		-30	200	S	5.2	✓
	80	0	0	S	37.5	✓
		-15	0	S	30.7	✓
		-15	100	S	31.2	✓
		-15	150	S	34.9	✓
		-30	150	S	29.7	✓
		-30	200	S	28.6	✓
	90*	0	100	S	310.9	✓
		-15	150	S	308.3	✓
		-30	200	S	307.8	✓

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

✓ significa uma operação correta, ✗ significa uma operação indevida.

8.2.2 Testes com Oscilações de Potência

8.2.2.1 Oscilações de Potência sem Falhas

Durante uma oscilação de potência a magnitude das tensões nas barras e as correntes nas linhas do sistema elétrico variam substancialmente. Estas condições estressam ao limite os equipamentos do sistema, aumentando a probabilidade de falhas e colapsos no sistema.

De modo a verificar o desempenho do algoritmo frente as oscilações de potência, sem a presença de faltas, foram simuladas oscilações com $f_{osc.}$ lentas (0,5 Hz, 1 Hz e 3 Hz) e rápidas (5 Hz e 7 Hz). Os ângulos δ utilizados nos testes foram -10° e -30° . Para simular as condições de oscilação de potência, fixou-se a frequência fundamental em uma das fontes e variou-se a frequência na outra fonte.

Conforme mostra os resultados na Tabela 8.3, o algoritmo desenvolvido obteve excelente desempenho nestes testes, ou seja, em todos os casos não ocorreu a operação indevida do relé de distância. Em alguns casos de oscilações com frequências de oscilação rápidas, o algoritmo de detecção pode interpretar erroneamente o sinal de corrente, com oscilação presente, como uma falta. No entanto, a combinação do critério de contagem e da componente dc discrimina as reais faltas das oscilações de potência. A Figura 8.7 exemplifica esta situação. Esta figura mostra a impedância aparente oscilando pela linha de transmissão para um caso com $f_{osc.}$ igual 5 Hz e $\delta = -30^\circ$. Neste caso o detector e o classificador de falta habilitaram os critérios da estratégia de contagem e da componente dc , porém estes não foram satisfeitos, como mostra a Figura 8.8, e o algoritmo, corretamente, não enviou o sinal de disparo ao disjuntor.

Tabela 8.3 – Resultados dos testes com oscilações de potência sem falta

δ°	$f_{osc.}$ (Hz)	Operação	Resultado da operação	δ°	$f_{osc.}$ (Hz)	Operação	Resultado da operação
	0,5	N	\mathcal{V}		0,5	N	\mathcal{V}
	1	N	\mathcal{V}		1	N	\mathcal{V}
-10	3	N	\mathcal{V}	-30	3	N	\mathcal{V}
	5	N	\mathcal{V}		5	N	\mathcal{V}
	7	N	\mathcal{V}		7	N	\mathcal{V}

S significa operação, N significa não operação.

\mathcal{V} significa uma operação correta, \mathcal{X} significa uma operação indevida.

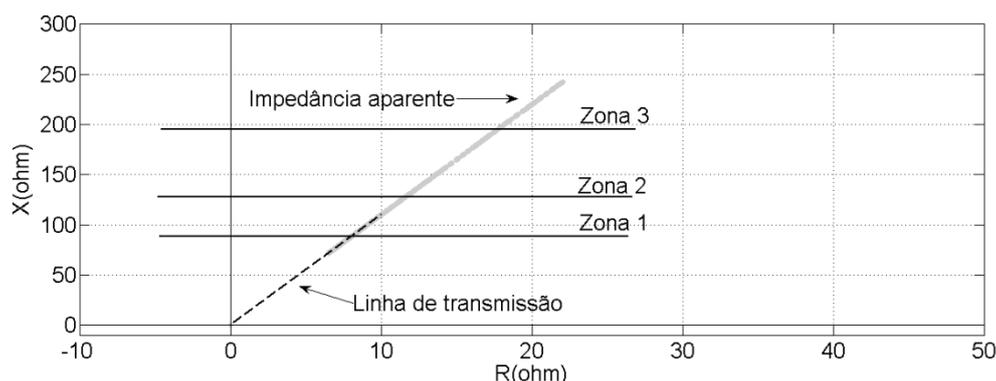


Figura 8.7 – Impedância aparente vista pelo relé de distância durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 5 \text{ Hz}$ e $\delta = -15^\circ$)

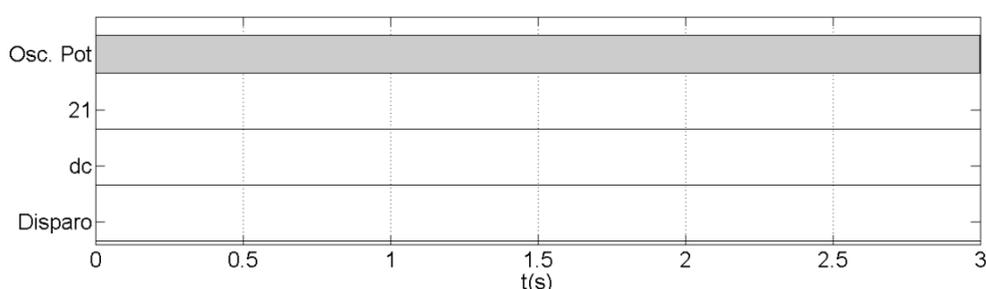


Figura 8.8– Sinais lógicos das principais etapas que compõem o algoritmo (fases 'a-c') durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 5 \text{ Hz}$ e $\delta = -30^\circ$)

8.2.2.2 Oscilações de Potência com Falhas

Faltas durante oscilações de potência não são eventos muito comuns de ocorrer. No entanto, é extremamente importante a correta operação do relé de distância nesta condição de modo a assegurar a correta separação do sistema elétrico e a contínua operação do restante do sistema (TZIOUVARAS & HOU, 2003).

De modo a verificar o desempenho do algoritmo frente às oscilações de potência e curtos-circuitos, diversos cenários de falta durante oscilações de potência foram testados. Em outras palavras, foi simulada uma condição pré-existente de oscilação de potência seguida de um curto-circuito, considerando diferentes valores de resistência de falta, ângulo de carga e localização da falta. Nesta condição, o algoritmo deve manter o relé de distância bloqueado durante a oscilação e operar somente após a ocorrência da falta. As faltas foram aplicadas em 2 s após o início da oscilação e foram eliminadas após 350 ms.

8.2.2.2.1 Faltas monofásicas durante oscilações de potência

Estes testes consideram diferentes cenários de distância de falta (5%, 80% e 90% do comprimento da linha de transmissão), ângulo de potência ($\delta = -10^\circ$ e -30°), resistência de falta ($R_f = 0 \Omega, 100 \Omega, 200 \Omega$) e frequência de oscilação ($f_{osc.} = 0,5 \text{ Hz}, 1 \text{ Hz}, 3 \text{ Hz}, 5 \text{ Hz}$ e 7 Hz)

Oscilações de potência são em geral fenômenos trifásicos equilibrados, conseqüentemente não há sequência “0” durante a oscilação. O algoritmo localizador de falta monofásica utiliza uma equação que calcula a distância de falta baseada na sequência “0” da corrente. Logo, todas as faltas monofásicas durante oscilações de potência foram corretamente identificadas.

Em todos os casos o relé operou após a ocorrência da falta, isto é, a metodologia desenvolvida é tolerante as oscilações lentas e rápidas. Como o algoritmo para faltas monofásicas não utiliza o critério da componente dc , o relé enviou o sinal de disparo em menos de um (1) ciclo em todas as faltas localizadas em 5% da linha. A Tabela 8.4 mostra os resultados dos testes envolvendo as faltas monofásicas localizadas a 5% do comprimento da linha durante as oscilações de potência.

A Tabela 8.5 mostra os resultados das faltas monofásicas localizadas em 80% e 90% da linha de transmissão. Conforme esperado, os tempos de operação para faltas distantes da barra local onde o relé foi instalado foram maiores que para as faltas próximas ao relé. O maior tempo de operação da zona 1 foi de 49,3 ms após a ocorrência da falta, isto é, aproximadamente três ciclos.

Os resultados da técnica de ajustes de curvas por mínimos quadrados, apresentada no Capítulo 4, que calcula a distância de falta, mostra que as faltas mais distantes apresentam erros maiores. Conseqüentemente, os valores da impedância aparente também apresentaram maiores erros para faltas mais afastadas do local onde o relé está instalado. Um caso de curto-circuito na zona 2, com elevado valor de resistência de falta, durante uma condição de oscilação rápida, foi equivocadamente (\times) detectado na zona 1, como mostra a Tabela 8.5. No entanto, este problema pode ser solucionado colocando outro relé na barra remota que conecta a linha de transmissão.

Tabela 8.4 – Resultados dos testes com oscilações de potência e faltas monofásicas a 5% da linha de transmissão

δ°	$f_{osc.}$ (Hz)	$R_f(\Omega)$	Operação	Tempo de operação (ms)	Resultado da operação
-10	1	0	S	9,8	✓
	3	0	S	9,8	✓
	0,5	50	S	9,2	✓
	5	50	S	8,7	✓
	7	50	S	8,7	✓
	0,5	100	S	9,2	✓
	7	100	S	8,7	✓
	1	200	S	8,2	✓
	7	200	S	8,7	✓
	3	0	S	9,8	✓
	0,5	50	S	8,7	✓
	5	50	S	8,7	✓
	7	50	S	8,7	✓
	1	100	S	8,2	✓
-30	3	100	S	8,2	✓
	5	100	S	8,2	✓
	7	100	S	8,2	✓
	0,5	200	S	9,2	✓
	1	200	S	7,7	✓
	3	200	S	7,7	✓
	7	200	S	8,2	✓

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

✓significa uma operação correta, ✗significa uma operação indevida.

Tabela 8.5 – Resultados dos testes com oscilações de potência e faltas monofásicas a 80% e 90% da linha de transmissão

Distância da falta (%)	δ°	$f_{osc.}$ (Hz)	$R_f(\Omega)$	Operação	Tempo de operação (ms)	Resultado da operação
80	-10	1	0	S	23,8	V
		3	0	S	29,6	V
		5	50	S	21,2	V
		7	50	S	21,2	V
		0,5	100	S	26,4	V
		5	100	S	49,3	V
		3	200	S	41,0	V
80	-30	3	0	S	21,2	V
		5	0	S	21,2	V
		7	0	S	21,2	V
		0,5	50	S	12,9	V
		1	50	S	28,0	V
		3	100	S	49,3	V
		5	100	S	47,8	V
90	-10	1	200	S	311,3	V
	-30	7	200	S	55,7	X

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

V significa uma operação correta, X significa uma operação indevida.

8.2.2.2.2 Faltas entre fases durante oscilações de potência

Os cenários de falta (distância de falta, δ , R_f e $f_{osc.}$) considerados nestes testes foram os mesmos das faltas monofásicas. Porém, nestes casos foram testadas faltas trifásicas ($CC_{3\phi}$), bifásicas ($CC_{2\phi}$) e bifásicas-terra ($CC_{2\phi-g}$). Para faltas envolvendo

mais de uma fase o sinal de operação só é enviado ao disjuntor se os critérios da estratégia de contagem no plano $R-X$ e da componente dc são satisfeitos.

As figuras a seguir detalham as etapas do algoritmo para um caso de oscilação de potência de 7 Hz seguida de uma falta bifásica em 5% do comprimento da linha aplicada em 2 s. O caso elucida o que acontece quando a oscilação de potência é detectada como falta. A Figura 8.9 mostra que a oscilação de potência de 7 Hz gera um sinal de detecção de falta $\Delta D(k)$ maior que o ajuste M (15). Logo, neste caso o algoritmo de localização de falta e o cálculo da componente dc são habilitados. A distância estimada pelo localizador durante a oscilação de potência varia conforme a frequência de oscilação como mostra a Figura 8.10. Porém, durante a falta a distância calculada se mantém praticamente constante. Como a impedância aparente vista pelo relé é função da distância estimada, se nenhum critério adicional tivesse sido incorporado no algoritmo, ocorreria uma atuação indevida do relé de distância.

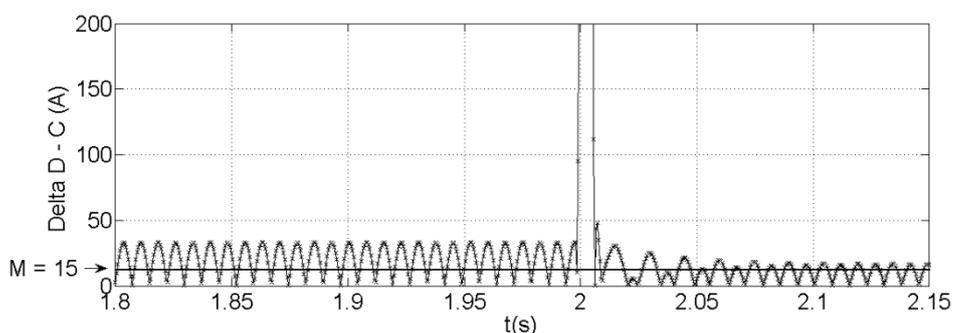


Figura 8.9– Detector de falta $\Delta D(k)$ da fase ‘c’ durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 7$ Hz e $\delta = -10^\circ$) seguida de uma falta bifásica (5% da linha) aplicada em 2 s

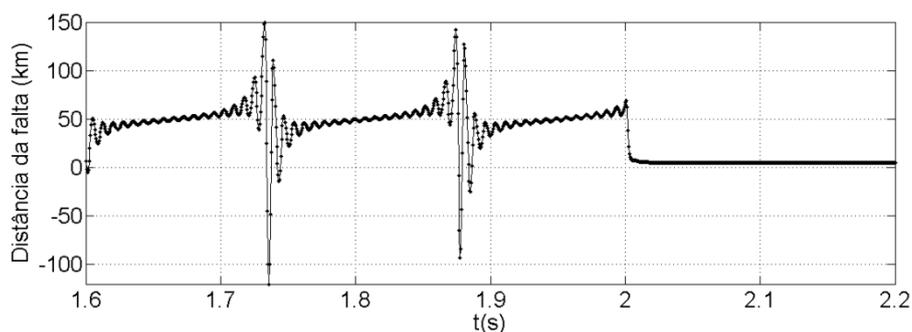


Figura 8.10– Distância de falta estimada durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 7$ Hz e $\delta = -10^\circ$) seguida de uma falta bifásica (5% da linha) aplicada em 2 s

A Figura 8.11 mostra a componente dc da fase ‘c’ durante este caso. Através desta figura percebe-se o comportamento oscilante da componente dc até o momento da falta. Nos instantes iniciais da falta a componente dc adquire um comportamento

exponencial decrescente. Os sinais lógicos das principais etapas do algoritmo são mostrados na Figura 8.12.

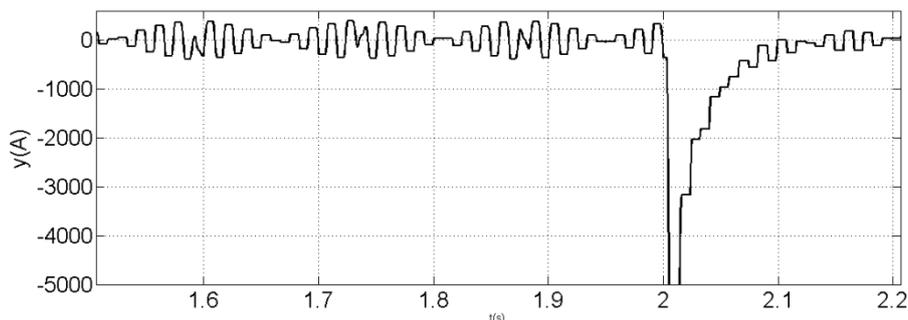


Figura 8.11– Componente dc estimada durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 7$ Hz e $\delta = -10^\circ$) seguida de uma falta bifásica (5% da linha) aplicada em 2 s

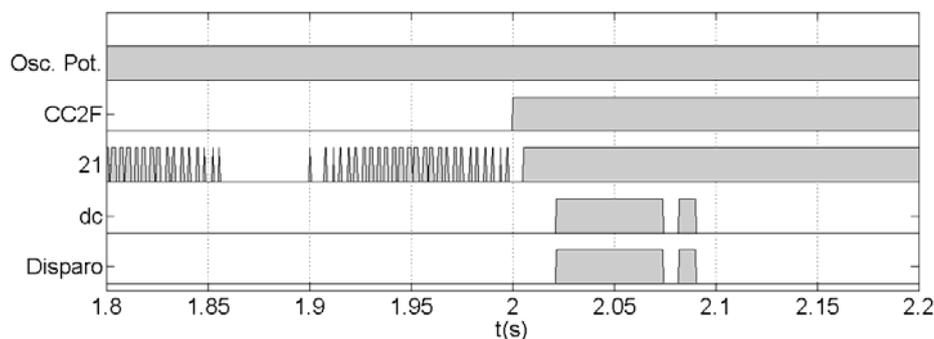


Figura 8.12– Sinais lógicos do algoritmo durante uma oscilação de potência ($f_{osc.} = 7$ Hz e $\delta = -10^\circ$) seguida de uma falta bifásica (5% da linha) aplicada em 2 s

Analisando a Figura 8.12 conclui-se que neste caso a impedância aparente migrou inúmeras vezes para a área operacional no plano $R-X$ durante a oscilação de potência, pois o sinal lógico 21 é ativado e desativado diversas vezes durante a oscilação de potência. A partir do instante da falta (2 s), o sinal 21 permanece ativo. Já o critério da componente dc , fundamentado no seu comportamento exponencial decrescente, é ativo somente após o início da falta. Ainda nesta figura, verifica-se que o sinal de disparo do relé ao disjuntor só ocorre após o critério da componente dc ser satisfeito, mostrando a sua importância na lógica do algoritmo. O tempo de operação do algoritmo neste caso foi 21,7 ms após a ocorrência do curto-circuito.

A Tabela 8.6 mostra os resultados para esses testes. Todas as faltas entre fases durante as oscilações foram identificadas pelo algoritmo. Os tempos de atuação do relé para faltas envolvendo mais de uma fase não variaram muito entre os diferentes cenários de falta. Em nenhum caso o tempo de operação ultrapassou dois ciclos, mesmo para faltas localizadas em 80% da linha. Todas as faltas na segunda zona também foram corretamente identificadas.

Tabela 8.6 – Resultados dos testes com oscilações de potência e faltas entre fases

Tipo de falta	Distância de falta (%)	δ°	f_{osc} (Hz)	R_f (Ω)	Operação	Tempo de operação (ms)	Resultado da operação	
$CC_{3\phi}$	5	-10	0,5	-	S	23,3	\checkmark	
			3	-	S	23,3	\checkmark	
		-30	1	-	S	23,3	\checkmark	
			5	-	S	23,3	\checkmark	
		80	-10	5	-	S	20,7	\checkmark
			-10	7	-	S	20,7	\checkmark
	90*	-30	3	-	S	24,5	\checkmark	
		-30	7	-	S	27,5	\checkmark	
	$CC_{2\phi}$	5	-10	1	-	S	21,2	\checkmark
			-10	5	-	S	21,7	\checkmark
			-30	7	-	S	21,7	\checkmark
		80	-10	0,5	-	S	27,5	\checkmark
-30			3	-	S	23,3	\checkmark	
90*		-10	7	-	S	327,5	\checkmark	
$CC_{2\phi} - g$		5	-10	1	100	S	21,5	\checkmark
			-30	3	50	S	28,5	\checkmark
		80	-10	5	200	S	29,0	\checkmark
			-10	1	100	S	329,0	\checkmark
		90*	-10	7	200	S	330,1	\checkmark

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

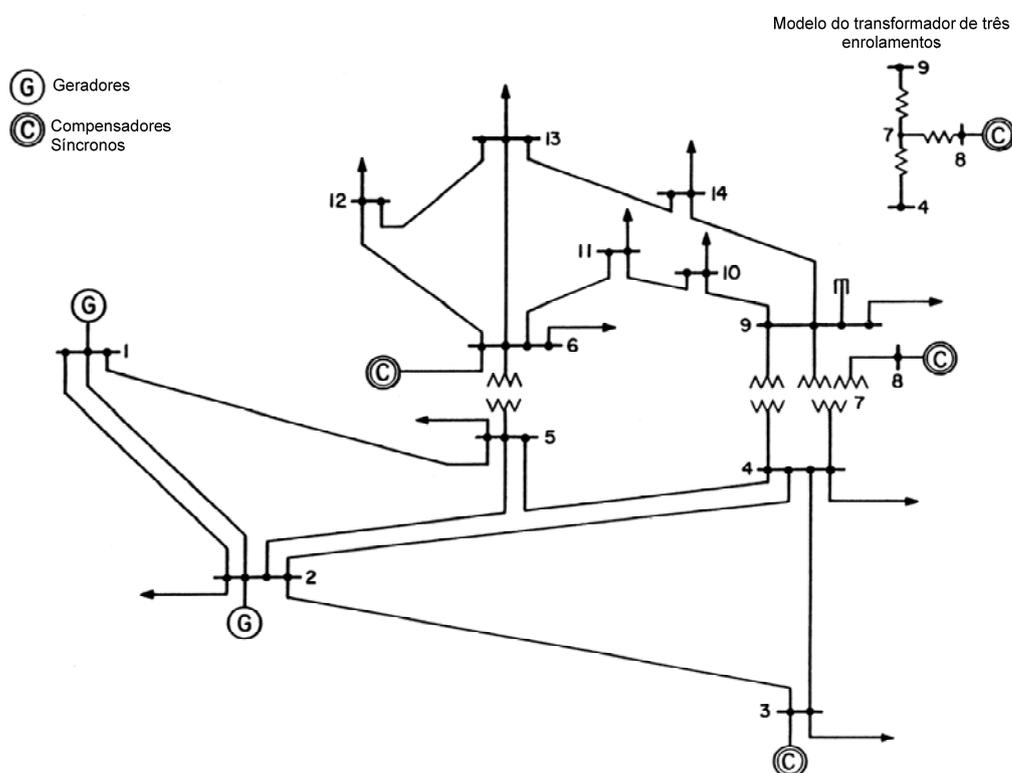
 \checkmark significa uma operação correta, \times significa uma operação indevida.

Idealmente, o desempenho do relé de distância durante oscilações de potência deve ser idêntico a condição normal de operação, em termos de velocidade, seletividade, disponibilidade e sensibilidade. Entretanto, devido a variação do módulo e ângulo dos fasores de corrente e tensão durante a oscilação de potência, é quase impossível isso ocorrer. Os resultados mostram que a velocidade foi a única característica que foi alterada com a presença das oscilações de potência.

8.3 Sistema Teste 2

O algoritmo desenvolvido é fundamentado no modelo R-L de equações diferenciais da linha de transmissão. O Sistema Teste 1, utilizado até o momento (ROBERTS et al., 1993), também faz uso de um modelo de linha R-L série.

A segunda etapa de testes do algoritmo desenvolvido visa analisar o seu comportamento em um sistema elétrico com algumas linhas de transmissão modeladas considerando as capacitâncias *shunt* (modelo *pi* distribuído). O Sistema Teste 2 (IEEE 14 barras), usado nesta análise, é mostrado na Figura 8.13. Os dados do sistema e as condições iniciais de simulação são apresentadas no Anexo A. A linha de transmissão 2 – 4 foi a escolhida para realização dos testes, ou seja, o relé com o algoritmo desenvolvido foi aplicado na linha 2 – 4.



Figura

8.13 – Sistema Teste 2 (IEEE 14 barras)

8.3.1 Faltas sem Oscilação de Potência

Nestes testes diferentes tipos de faltas, sem oscilações de potência foram realizadas na linha de transmissão 2 – 4. O tempo de permanência do curto-circuito foi de 350 ms para todas os tipos de falta. Após este tempo a linha foi retirada do sistema.

A Tabela 8.7 mostra os resultados das faltas monofásicas com diferentes distâncias e resistência de falta. Os resultados mostram que todas as faltas foram detectadas. Porém, em um caso de falta (87 % do comprimento da linha) localizada na segunda zona de atuação do relé foi detectada pela zona 1 do relé. Isto se deve ao erro na estimativa da distância de falta, causado pela capacitância *shunt* da linha que não está incluída no modelo da linha utilizado. Para faltas monofásicas a 90% e 95% do comprimento da linha, o algoritmo de estimação de localização de falta consegue estimar corretamente a distância de falta na segunda zona de atuação do relé, mostrando que a capacitância *shunt* da linha apresenta pouca influência no cálculo da distância da falta.

Tabela 8.7 – Resultados dos testes sem oscilações de potência e faltas monofásicas

<i>Distância de falta (%)</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
5	10	S	14,1	✓
20	20	S	12,5	✓
40	10	S	14,6	✓
50	120	S	9,4	✓
70	80	S	14,1	✓
80	170	S	11,5	✓
87*	30	S	28,8	✗
90*	100	S	322,0	✓
95*	50	S	323,5	✓

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

✓ significa uma operação correta, ✗ significa uma operação indevida.

A Tabela 8.8 mostra os resultados das faltas entre fases realizadas na linha 2 – 4, sem a presença de oscilação de potência. As capacitâncias *shunt* da linha não influenciaram nos resultados das faltas trifásicas e bifásicas. Nestes casos todas as faltas foram corretamente detectadas. Assim como nas faltas monofásicas, os curtos-circuitos do tipo bifásico-terra, localizados no final da linha, apresentaram erros para faltas no limiar de operação da primeira zona do relé.

Tabela 8.8 – Resultados dos testes sem oscilações de potência e faltas entre fases

<i>Tipo de falta</i>	<i>Distância de falta (%)</i>	$R_f (\Omega)$	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
$CC_{2\phi}$	25	-	S	29,1	✓
	47	-	S	29,2	✓
	78	-	S	29,2	✓
	90*	-	S	329,2	✓
	92*	-	S	329,5	✓
$CC_{2\phi-g}$	10	60	S	5,7	✓
	35	110	S	9,4	✓
	70	50	S	8,9	✓
	88	50	S	30,8	✗
	95*	80	S	325,2	✓
$CC_{3\phi}$	12	-	S	21,4	✓
	35	-	S	22,4	✓
	65	-	S	24,5	✓
	80	-	S	26,6	✓
	90	-	S	326,6	✓
	95	-	S	323,5	✓

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

✓ significa uma operação correta, ✗ significa uma operação indevida.

8.3.2 Oscilações de Potência sem Falhas

No Capítulo 6 foi mencionado que as oscilações de potência podem ser simuladas de duas formas. Uma delas é fixar frequência fundamental (60 Hz) em uma das fontes e utilizar um valor diferente da frequência fundamental na outra fonte. A segunda maneira é provocar uma perturbação no sistema. No Sistema Teste 1 as oscilações foram simuladas variando a frequência em uma das fontes. No Sistema Teste 2 optou-se por realizar perturbações no sistema elétrico (faltas, aberturas de linhas e retirada/entrada de cargas) e analisar os fasores de corrente e tensão na linha 2 – 4. Neste tipo de simulação a frequência de oscilação não é constante e varia de acordo com o grau do distúrbio, inércia dos geradores e reguladores de tensão e velocidade. Fazendo este tipo de simulação não se tem o domínio da frequência de oscilação, porém é uma situação mais próxima a real.

8.3.2.1 Oscilação de Potência I

A primeira oscilação de potência foi gerada após uma falta trifásica seguida da abertura dos disjuntores da linha. A falta trifásica foi aplicada em 300 ms em 50% do comprimento de uma das linhas 1 – 2. Após 200 ms da ocorrência da falta os disjuntores da linha transmissão 1 – 2 sob falta foram abertos. Essa sequência de eventos gerou uma oscilação de potência que foi analisada na linha 2 – 4. A Figura 8.14 mostra o Sistema Teste 2 (IEEE 14 barras) implementado no ATP.

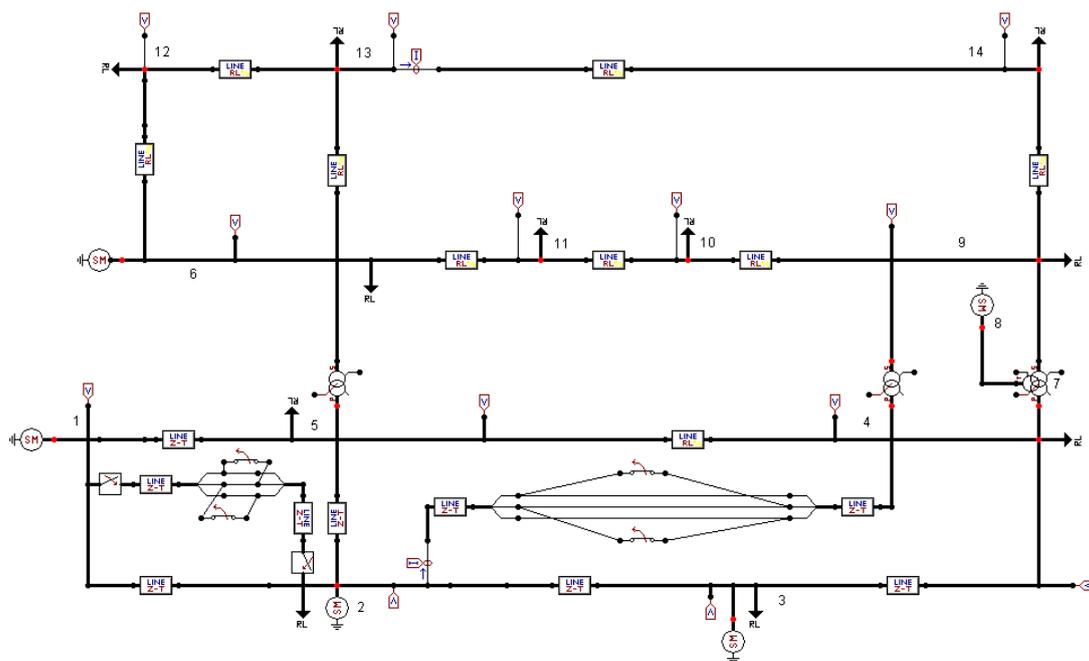


Figura 8.14 – Sistema Teste 2 (IEEE 14 barras)

As Figuras 8.15 e 8.16 mostram os sinais instantâneos da corrente e tensão medidos na linha 2 – 4, respectivamente, para a oscilação de potência I. Como o sistema em estudo está interligado, as linhas de transmissão mais afastadas da linha 1 – 2, local do distúrbio, também sofrerão oscilações de potência conforme mostra as Figuras 8.17 e 8.18.

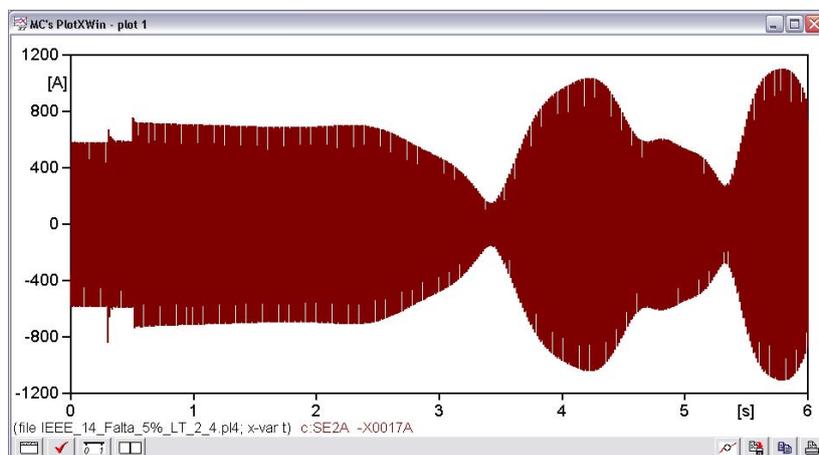


Figura 8.15 – Corrente na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência I

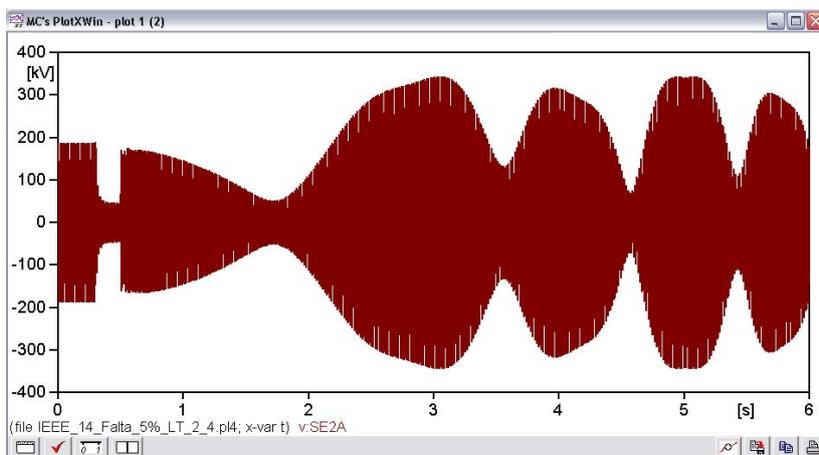


Figura 8.16 – Tensão na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência I

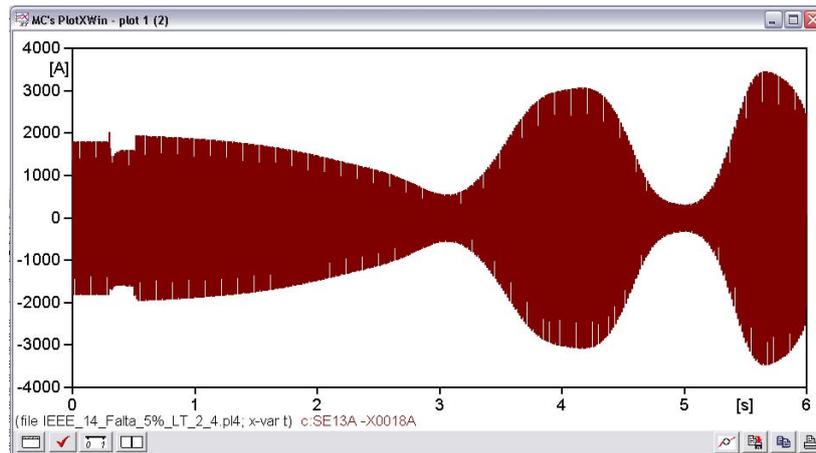


Figura 8.17 – Corrente na fase ‘a’ na linha 13 – 14 durante a oscilação de potência I

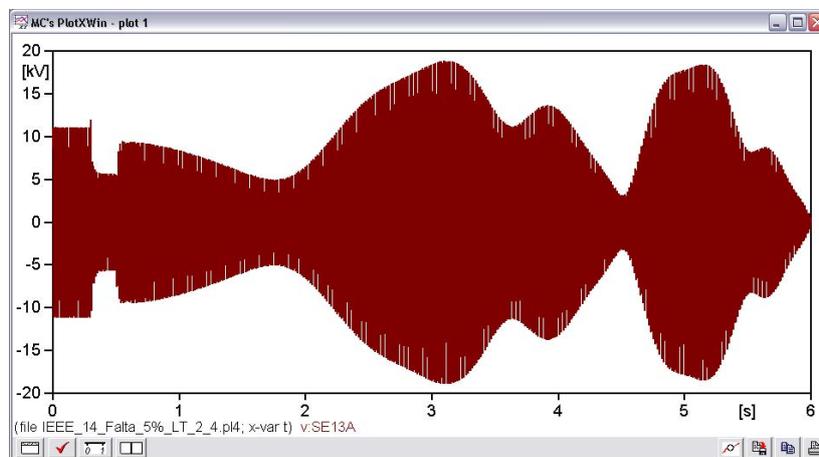


Figura 8.18 – Tensão na fase ‘a’ na linha 13 – 14 durante a oscilação de potência I

8.3.2.2 Oscilação de Potência II

A oscilação de potência II foi gerada por meio de uma retirada de carga do sistema. A carga 3, que possui potência ativa igual 94,2 MW e potência reativa de 19 MVAR, foi retirada do sistema no instante de tempo igual a 500 ms. As Figuras 8.19 e 8.20 mostram os sinais instantâneos da corrente e tensão medidos na linha 2 – 4, respectivamente, durante a oscilação de potência II.

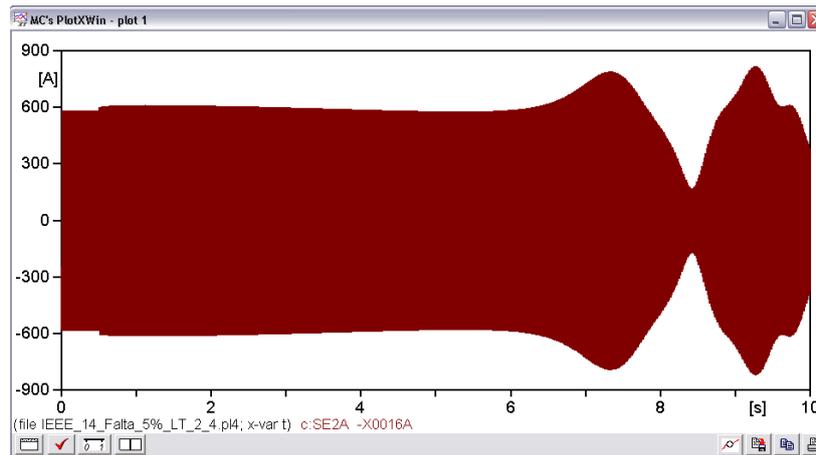


Figura 8.19 – Corrente na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência II

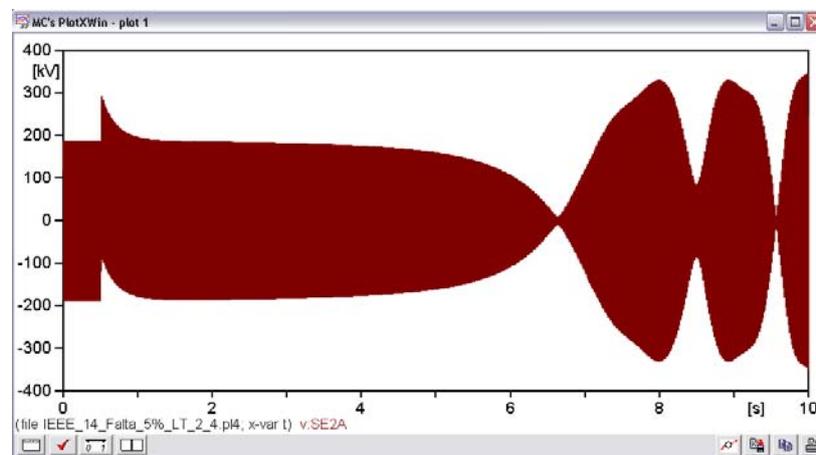


Figura 8.20 – Tensão na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência II

8.3.2.3 Oscilação de Potência III

A oscilação de potência II foi realizada através de uma entrada de carga no sistema. A carga 2, que possui potência ativa igual a 21,7 MW e 12,7 MVAR de potência reativa, entrou no sistema no instante de tempo igual a 500 ms. As Figuras 8.21 e 8.22 mostram os sinais instantâneos da corrente e tensão medidos na linha 2 – 4, respectivamente, durante a oscilação de potência III.

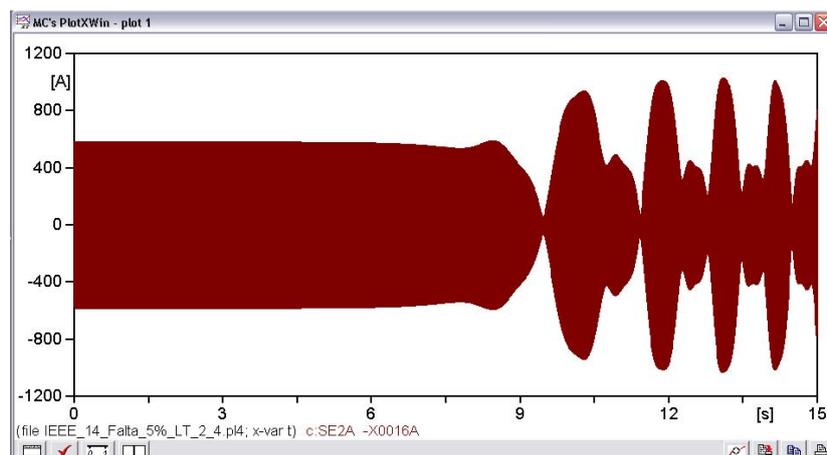


Figura 8.21 – Corrente na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência III

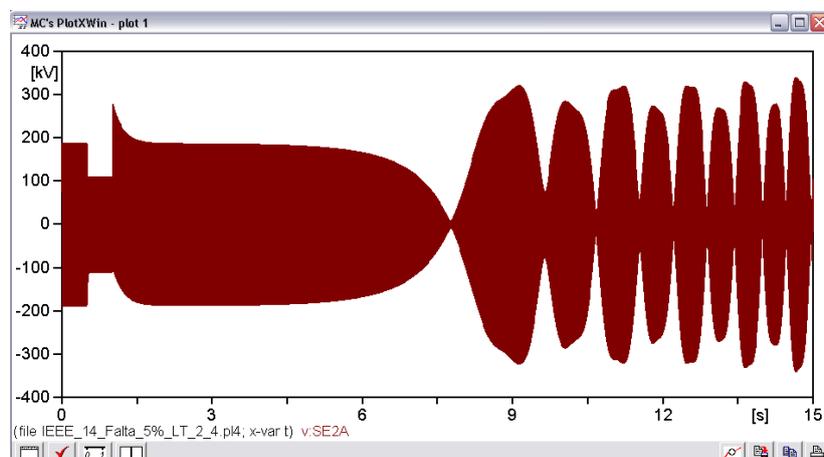


Figura 8.22 – Tensão na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência III

A Tabela 8.9 mostra os resultados dos testes. Nos três casos o algoritmo desenvolvido não operou, isto é, não detectou a oscilação de potência como falta, mostrando ser eficiente neste tipo de simulação também.

Tabela 8.9 – Resultados dos testes com oscilações de potência

<i>Oscilação de potência</i>	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
1	<i>N</i>	-	<i>✓</i>
2	<i>N</i>	-	<i>✓</i>
3	<i>N</i>	-	<i>✓</i>

S significa operação, *N* significa não operação.

✓ significa uma operação correta, *✗* significa uma operação indevida.

8.3.3 Oscilações de Potência com Falhas

Este teste visa verificar se o algoritmo é capaz de detectar faltas durante uma condição de oscilação de potência. O teste é composto pela oscilação de potência I, descrita da subseção 8.3.2.1, seguida de um curto-circuito na linha de transmissão 2 – 4, no instante de tempo de 5 s. Os tipos de falta, local da falta e resistência de falta foram os mesmos realizados nos testes sem a presença de oscilação de potência, apresentados nas Tabelas 8.7 e 8.8. As Figuras 8.23 e 8.24 mostram os sinais instantâneos da corrente e tensão da fase ‘a’, respectivamente, para uma falta trifásica, localizada a 65 % do comprimento da linha 2 – 4, durante a oscilação de potência I.

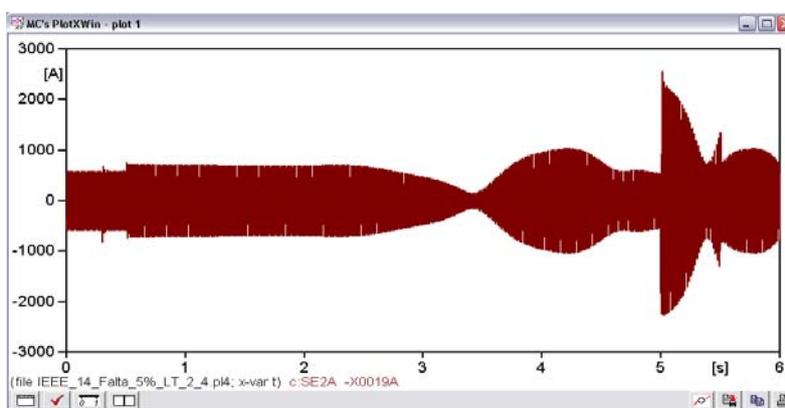


Figura 8.23 – Corrente na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência I seguida de uma falta na linha 2 – 4

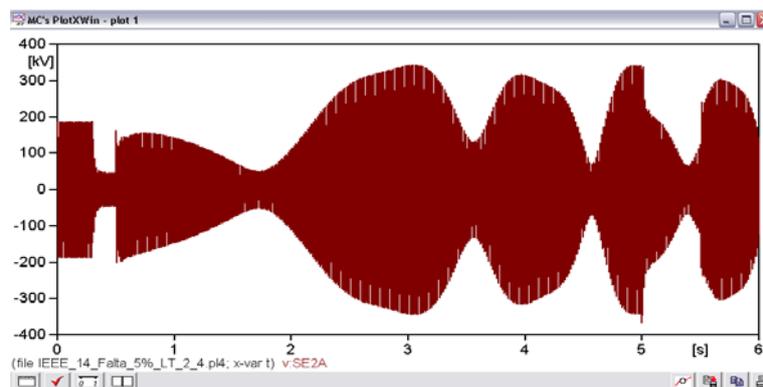


Figura 8.24 – Tensão na fase ‘a’ na linha 2 – 4 durante a oscilação de potência I seguida de uma falta na linha 2 – 4

A Tabela 8.10 mostra os resultados dos testes das oscilações de potência seguidas de faltas monofásicas. Comparando estes resultados, com aqueles mostrados na Tabela 8.7, isto é, faltas monofásicas sem oscilação, verifica-se uma pequena diferença nos tempos de operação. Nos casos com oscilação de potência os tempos de operação são um pouco superiores.

A Tabela 8.11 mostra os resultados dos testes com oscilação de potência I e faltas entre fases. Analisando esta tabela e a Tabela 8.8, que mostra os resultados das faltas entre fases sem oscilação, verifica-se que os tempos de atuação são muito próximos nos dois casos.

A principal finalidade dos testes com o Sistema Teste 2 é avaliar o algoritmo estimador da distância de falta. De um modo geral, as capacitâncias *shunt* da linha não apresentaram significativos erros na distância estimada pelo algoritmo. Analisando a Figura 8.25, que mostra a distância estimada para uma falta monofásica (40% da linha e $R_f = 10 \Omega$) durante uma oscilação de potência, percebe-se uma boa precisão na estimativa da distância. Para faltas mais próximas a barra remota ao relé, o cálculo da distância não é tão preciso, conforme ilustra a Figura 8.26. Porém, mesmo para faltas localizadas no final da linha, o erro causado pela capacitância *shunt* não gerou significativos danos ao desempenho do algoritmo. Para faltas bifásicas e trifásicas os erros causados pela capacitância *shunt* da linha foram menores ainda. A Figura 8.27 mostra a boa precisão da distância estimada para uma falta trifásica localizada em 95% do comprimento da linha, durante uma oscilação de potência.

Tabela 8.10 – Resultados dos testes com oscilação de potência I e faltas monofásicas

<i>Distância de falta (%)</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
5	10	S	14,3	✓
20	20	S	13,3	✓
40	10	S	14,8	✓
50	120	S	13,3	✓
70	80	S	15,9	✓
80	170	S	21,6	✓
87*	30	S	29,9	✗
90*	100	S	309,1	✓
95*	50	S	325,5	✓

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

✓significa uma operação correta, ✗significa uma operação indevida.

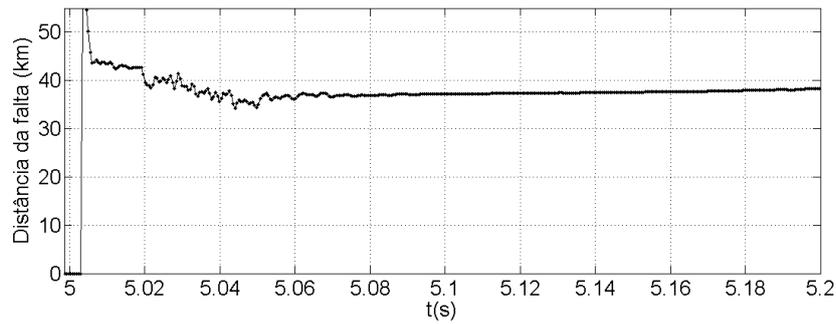


Figura 8.25– Distância de falta estimada durante a oscilação de potência I seguida de uma falta monofásica (40% da linha $R_f = 10 \Omega$)

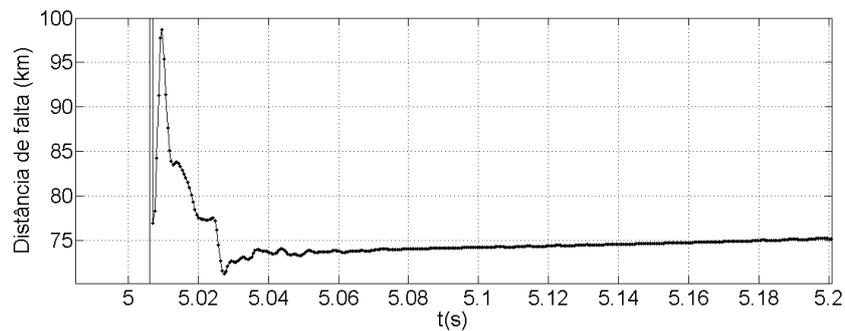


Figura 8.26– Distância de falta estimada durante a oscilação de potência I seguida de uma falta monofásica (80% da linha $R_f = 170 \Omega$)

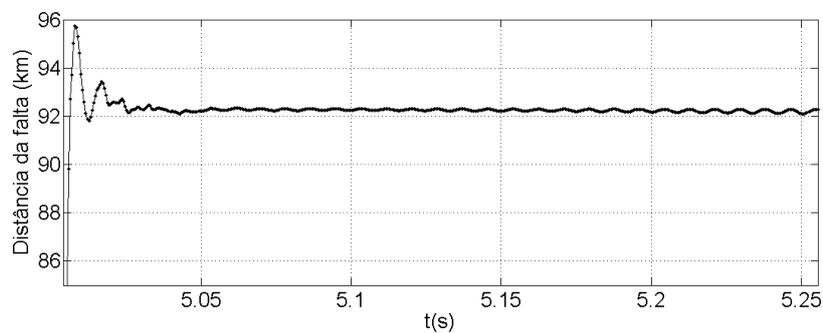


Figura 8.27– Distância de falta estimada durante a oscilação de potência I seguida de uma falta trifásica (95% da linha)

Tabela 8.11 – Resultados dos testes com oscilação de potência I e faltas entre fases

<i>Tipo de falta</i>	<i>Distância de falta (%)</i>	$R_f (\Omega)$	<i>Operação</i>	<i>Tempo de operação (ms)</i>	<i>Resultado da operação</i>
$CC_{2\phi}$	25	-	S	28,9	V
	47	-	S	28,4	V
	78	-	S	28,4	V
	90*	-	S	330,0	V
	92*	-	S	330,0	V
$CC_{2\phi-g}$	10	60	S	29,4	V
	35	110	S	15,9	V
	70	50	S	29,9	V
	88	50	S	30,0	X
	95*	80	S	330,3	V
$CC_{3\phi}$	12	-	S	24,7	V
	35	-	S	23,7	V
	65	-	S	22,7	V
	80	-	S	24,2	V
	90	-	S	324,8	V
	95	-	S	324,8	V

* Falta na zona 2

S significa operação, N significa não operação.

V significa uma operação correta, X significa uma operação indevida.

8.4 Considerações Finais

De modo a avaliar o algoritmo numérico desenvolvido realizou-se uma série de testes em dois sistemas elétricos. Os testes contemplaram diversos cenários de falta incluindo oscilações de potência. Visando validar a técnica de proteção desenvolvida e verificar o seu desempenho, no Sistema Teste 1, que faz uso de um modelo de linha R-

L, foram realizadas diversas simulações. Os resultados mostram que a técnica apresenta velocidade e confiabilidade nas suas atuações.

As simulações no Sistema Teste 2 tiveram como objetivo analisar o comportamento do algoritmo para proteção de linhas, mais especificamente, do algoritmo localizador de falta, em linhas de transmissão longas. Neste sistema as linhas de transmissão foram modeladas com capacitâncias *shunt*. Os resultados mostram que, embora se tenha desprezado as capacitâncias da linha na modelagem do algoritmo, a técnica desenvolvida apresenta um bom desempenho em linhas modeladas com capacitâncias *shunt*.

Capítulo 9

CONCLUSÕES

9.1 Conclusões

A presente tese de doutorado abordou os efeitos das oscilações de potência nos relés de distância de linhas de transmissão. Em um primeiro momento, o trabalho apresenta um algoritmo para estimar a distância da falta, que utiliza a técnica de ajustes de curvas por mínimos quadrados. O método foi comparado com outras duas técnicas, isto é, mínimos quadrados recursivo e rede neural. Além de ser de simples implementação, o algoritmo de localização de falta desenvolvido apresentou bons resultados frente a diversas condições testadas.

Com relação ao detector de oscilações de potência, a literatura técnica apresenta uma série de métodos destinados a bloquear o relé de distância da linha. As principais técnicas foram avaliadas por meio de simulações computacionais realizadas no ATP, sendo a lógica operacional de cada método implementada no MATLAB[®].

Os métodos convencionais (MCC e MDB), fundamentados na taxa de variação da impedância aparente, exigem exaustivos estudos de estabilidade para se encontrar a parametrização correta. Este fato, adicionado a incapacidade de desbloquear a proteção de distância caso ocorra um curto-circuito durante a oscilação de potência, evidenciam suas principais desvantagens.

Já as técnicas não convencionais (MCI, MVC, MCS e MAT) apresentam algumas vantagens. Na parametrização do MCI, por exemplo, não é necessário realizar suposições sobre a frequência de oscilação, máximo carregamento do sistema, nem mesmo ter conhecimento sobre as impedâncias da linha protegida e dos equivalentes externos, o que garante uma maior adaptabilidade do método para diferentes frequências de oscilação. No entanto, determinar os ajustes da técnica não elimina a necessidade de se realizar estudos sobre a continuidade e suavidade da impedância aparente.

O MAT apresentou bons desempenhos para faltas trifásicas, mas obteve os piores resultados para as monofásicas, além de ter seu desempenho afetado pelo

carregamento do sistema e de não responder corretamente para oscilações com frequências elevadas.

Em termos de resultado, o MCS obteve o melhor desempenho entre todos os métodos avaliados. Porém, a análise comparativa entre as técnicas mostra que não existe uma unanimidade quanto ao melhor método. Cada técnica possui suas vantagens e desvantagens.

De modo a solucionar os problemas das técnicas existentes, este trabalho apresenta um algoritmo para proteção numérica de linhas de transmissão imune a oscilações de potência. O algoritmo contempla todas as etapas de um relé numérico, isto é, condicionamento do sinal, detecção, classificação e localização da falta. As etapas de detecção e classificação da falta são fundamentadas na Morfologia Matemática. A originalidade do trabalho evidencia-se no algoritmo de localização de falta. Esta etapa calcula a impedância aparente de um modo diferenciado, isto é, através do produto da distância de falta estimada e a impedância de sequência positiva da linha. Dessa maneira a impedância aparente vista pelo relé, no plano $R-X$, se desloca ao longo da linha de transmissão não havendo a necessidade de se ajustar valores no sentido positivo e negativo de R . Outra característica do relé é sua estratégia de contagem.

Para discriminar as faltas entre fases das oscilações de potência o algoritmo faz uso da componente exponencial decrescente do curto-circuito (componente dc). A componente dc , calculada por meio de um filtro morfológico, possui comportamento exponencial bem definido durante uma falta e movimenta-se alternadamente durante uma oscilação de potência.

O algoritmo foi avaliado em dois sistemas testes e os resultados indicam que o relé numérico opera de forma satisfatória e confiável. A estimativa da distância da falta, essencial para o cálculo da impedância aparente, é verificada, de um modo geral, em menos de um (1) ciclo, o que origina baixos tempos de operação.

Através dos resultados conclui-se que os tempos de operação são maiores à medida que se aumenta a distância da falta. Tempos de operação inferiores aos apresentados podem ser obtidos usando-se um ajuste maior para a diferença entre as amostras de distância, porém resultará em um maior erro da distância estimada.

Outro critério avaliado foi a resistência de falta. Testes com altos valores de resistência de falta foram realizados, e os resultados mostram que a resistência de falta exerce pouca influência sobre o algoritmo.

Embora o equacionamento do algoritmo considere o modelo de linha R-L, o mesmo foi avaliado com base em uma linha de transmissão com capacitâncias *shunt* (Sistema Teste 2). Em virtude dos resultados, verificou-se que o erro no cálculo da distância devido às capacitâncias *shunt* da linha é pequeno e não comprometeu significativamente o desempenho do relé.

9.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com relação ao tema oscilações de potência e proteção de linhas de transmissão, sugere-se:

- Desenvolver um algoritmo para cálculo do centro elétrico do sistema em tempo real;
- Desenvolver uma rotina para priorizar os estudos em linhas que poderão ser afetadas por oscilações de potência;
- Inserir as capacitâncias *shunt* da linha no modelo do estimador de falta.

BIBLIOGRAFIA

ALFUHAID, A. S. & EL-SAYED, M. A. **A Recursive Least-Squares Digital Distance Relaying Algorithm**, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, n^o. 4, pp. 1257–1262, October. 1999.

ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM. **About**. 2010. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>> em 17/04/2012.

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. Ed. IEEE Press Power Engineering Series - McGraw-Hill. 1999.

AKKE, M. & THORP, J. T. **Some Improvements in the Three-Phase Differential Equation Algorithm for Fast Transmission Line Protection**. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, n^o 1, January 1998.

BENMOUYAL, G.; HOU, D.; TZIOUVARAS, D. **Zero-Setting Power-Swing Blocking Protection**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2005. Disponível em: <<http://www.selinc.com/literature/>> em 17/04/2012.

BLUMSCHEIN, J.; YELGIN, Y.; KEREIT, M. **Proper Detection and Treatment of Power Swing to Reduce the Risk of Blackouts**. Technologies International Conference, Nanjing, April 2008.

BOLZAN, R.; MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. Jr.; MARIOTTO, L.; SANTOS, E. M. D. **Análise Crítica dos Métodos de Detecção de Oscilações de Potência**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America – T&D, São Paulo, 2010.

BORNARD, P.; BASTIDE, J.C. **A Prototype of Multiprocessor Based Distance Relay**. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, n^o 2, 1982.

BRAHMA, S. M. **Distance Relay with Out-of-Step Blocking Function using Wavelet Transform**, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22 n^o 3, July 2007.

Buse, J., Shi, D. Y., Ji, T. Y.; Wu, Q. H. **Decaying DC Offset Removal Operator Using Mathematical Morphology for Phasor Measurement**. Proc. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlos: EESC/USP, 2007.

GIRGIS, A.; MAKRAM, E. B. **Application of Adaptive Kalman Filtering in Fault Classification, Distance Protection, and Fault Location using Microprocessors.** IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, no. 1, pp. 301–309, Jan. 1988.

HOLBACH, J. **New Out of Step Blocking Algorithm for Detecting Fast Power Swing Frequencies,** Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources. PS '06. pp. 182 – 199. 14-17 March 2006.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying.** 3th edition, Research Studies Press Limited, John Wiley & Sons Ltd, 2008.

IEEE PSRC WG D6. **Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines.** July 2005. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/>> em 17/04/2012.

IEEE TUTORIAL COURSE. **Computer Relaying.** 1979.

JONSSON, M.; DAALDER, J. **A New Protection Scheme to Prevent Mal-trips Due to Power Swings,** Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES Vol. 2, pp. 724 – 729, 2001.

KINDERMAN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** UFSC – EEL – LABPLAN, 2005.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control.** The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc, New York, 1994.

LATHI, B. P. **Signal processing and Linear Systems.** Berkeley Cambridge Press, California, 1998.

LEE, D.; KANG, S.; NAM, S. **New Modified Fourier Algorithm to Eliminate the Effect of the DC Offset on Phasor Estimation Using DFT.** Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE/PES, April 2008.

MACLAREN, P. G.; & REDFERN, M. A. **Fourier-series Techniques Applied to Distance Protection.** Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 122, pp.1301–1305, 1975.

MACLAREN, P. G.; REDFERN, M. A. **Fourier-series Techniques Applied to Distance Protection.** Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 122, pp.1301–1305, 1975.

MARIOTTO, L.; CARDOSO Jr, G.; PINHEIRO, H.; MURARO, M.; MORAIS, A. P. **Power system transient stability indices: an algorithm based on equivalent clusters of coherent generators.** IET generation, transmission & distribution (Online) v. 4, p. 1223-1235, 2010.

MARTUSCELLO, L.; KRIZAUSKAS, E.; HOLBACH, J., **Tests of distance relay performance on stable and unstable power swings reported using simulated data of the August 14th 2003 system disturbance**. Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference, pp – 236 255, 2009.

MOONEY, J. P. E.; FISCHER, N. **Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems**. IEEE 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, p. 289-298. April 2006.

MOONEY, J. P. E.; FISCHER, N. **Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems**. IEEE 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, p. 289-298. April 2006.

MOORE, P. J.; JOHNS, A. T. **New Method of Power Swing Blocking for Digital Distance Protection**, IEE Proc. - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, pp. 19 – 26, 1996.

MORAIS, A. P.; BOLZAN, R.; CARDOSO, G. JR.; MARIOTTO, L.; MACHADO, T. M. **Uma Contribuição para a Escolha da Filosofia de Proteção a ser Utilizada em Linhas de Transmissão: bloqueio ou desbloqueio do relé de distância durante as oscilações de potência**. 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE, São Paulo – SP, 2009.

MORAIS, A. P.; BOLZAN, R.; CARDOSO, G. JR.; MARIOTTO, SANTOS, E. M., **Análise de Técnicas de Bloqueio da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétrico – SBSE, Belém – PA, 2010.

MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. JR.; MARIOTTO, L.; FERREIRA, G. D. **Numerical distance relaying algorithm based on Mathematical Morphology and Least-Squares Curve Fitting Method**. Electric Power System Research, Vol. 81, Issue 5, pp. 1144-1150, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Conheça o Sistema**. 2012. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>> em 17/04/2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 25.6 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica – frequência e tensão**. 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>> em 17/04/2012.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

OSMAN, A. H.; ABDELAZIM, T.; MALIK, O. P. **Genetic Algorithm Approach for Adaptive Data Window Distance Relaying**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003, Vol. 3, no. 2, pp. 1862–1867, 2003.

OSMAN, A. H.; ABDELAZIM, T.; MALIK, O. P. **Transmission Line Distance Relaying Using On-line Trained Neural Networks**. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, n^o. 2, pp. 1257–1264, 2005.

PAN, J.; VU, K.; HU, Y. **An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects**. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, no 4, October 2004.

PHADKE, A. G.; HIBKA, T.; IBRAHIM, M. AND ADAMIYAK, M. G. **A microprocessor based symmetrical component distance relay**. IEEE Power Industry Computer Applications Conf., Vol. PICA-79, pp. 47–55, 1979.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. Second Edition Research Studies Press Ltd., 2009.

RANSIK, M. P. **Numeric Protective Relay Basics**. Industry Applications Conference, IEEE. October 1998.

REDDY, M. J.; MOHANTA, D. K. **Adaptive-neuro-fuzzy inference system approach for transmission line fault classification and location incorporating effects of power swings**, IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2 pp. 235 – 244, 2008.

ROBERTS, J.; Guzman, A. **Z = V/I Does not make a Distance Relay**. Proc. In 20th Annual Western Protective Relay Conference, Washington, 1993.

SACHDEV M. S.; BARIBEAU, M. A. **A New Algorithm for Digital Impedance Relays**, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, pp. 2232–2240, 1979.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. Editora WCB/McGRAW-Hill, 1999.

SANTOS, E. M.; FARIAS, P. E.; CARDOSO, G. Jr.; MORAIS, A. P.; MARIOTTO, L. **Deteção do Intervalo de Saturação de Transformadores de Corrente através do Cálculo do Desvio Padrão entre Amostras da Corrente Secundária**, International Congress in Electricity Distribution – CIDEL, Buenos Aires, Argentina, 2010.

SEGUI, T. AND BERTRAND, P. **Fundamental Basis for Distance Relaying with Parametrical Estimation**. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, no. 1, pp. 99–104, Jan. 2001.

SENA, C.; FRANCO, R.; GIUSTO, A. **Assessment of Power Swing Blocking Functions of Line Protective Relays for near Scenario of the Uruguayan System**. IEEE T&D LA Conference, Aug. 2008

SERRA, J. **Image Analysis and Mathematical Morphology Volume 2: Theoretical Advances**. Academic Press, New York, 1988.

SERRA, J. **Image Analysis and Mathematical Morphology**. Academic Press, London, 1982.

SIDHU, T. S. et al., **Discrete-Fourier-Transform-based Technique for Removal of Decaying DC Offset from Phasor Estimates**, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol.150, N^o.6; pp. 745-752, November 2003.

STEFANELLO, N.; CARDOSO, G. Jr.; MACHADO, T. M.; MORAIS, A. P.; MARIOTTO, L. **Análise da Análise da Resposta em Regime Transitório e Permanente de Algoritmos para Filtragem Digital utilizados em Relés Numéricos: Velocidade de Convergência, Overshoot e Sensibilidade em Relação a Constante de Tempo**, SBA, Vol. 22, pp 65-78, 2011.

TZIOUVARAS, D. A.; Hou, D. **Out-Of-Step Protection Fundamental and Advancements**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2003. Disponível em: <<http://www.selinc.com/literature/>> em 17/04/2012.

WINDER, S. **Analog and Digital Filter Design**. Elsevier Science, Woburn, 2002.

WU, Q. H.; LU, Z.; JI, T. Y. **Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**. Springer, 2009.

YU, S.; GU, J. **Removal of Decaying DC in Current and Voltage Signals Using a Modified Filter Algorithm**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, N^o.3; pp. 372-379, July 2001.

ZADEH, H. K. **Evaluation and Performance Comparison of Power Swing Detection Algorithms**, Power Engineering Society General Meeting, IEEE. Vol. 2, pp. 1842-1848. June 2005.

ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection: Principles and Application**. Siemens – Erlangen: Publicis-MCD-Verl. 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A- Resultados do método de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados (MQC) para estimar da distância da falta

A.1 - Efeito da componente dc

Segundo Osman et al., (2005), os algoritmos que fazem o uso de equações diferenciais para modelar a linha de transmissão são imunes a componente dc . Para confirmar essa informação realizou-se curto-circuito monofásico com um ângulo de incidência de modo a gerar a máxima dc na fase sob falta (Sistema Teste 1). A Tabela A.1 mostra a resposta da técnica desenvolvida MQC para faltas monofásicas com máxima dc , os resultados são similares aos da Tabela 4.3, apresentados no Capítulo 4, que apresenta os resultados sem considerar a máxima dc .

A.2 - Variação da impedância da fonte

A variação da relação entre a impedância do equivalente da fonte onde o relé está instalado e do equivalente remoto é outro fator importante de ser avaliado, pois diferentes níveis de corrente circularão pelo relé. As Tabelas A.2 (a) e A.2 (b) mostram os resultados dos testes de faltas monofásicas realizadas com o MQC para as duas razões de impedância entre os equivalentes, apresentadas pelas equações (4.1) e (4.2). Para os dois casos extremos de variação de impedância dos equivalentes foram analisados, e os resultados se mantiveram precisos.

Tabela A.1 – Resposta do MQC para faltas com máxima componente *dc*

Distância Falta (%LT)	Fluxo de Potência (δ°)	Resistência Falta (Ω)	Distância estimada (Km)	Erro (%)	Tempo de operação (ms)
5	0	0	5,15	0,15	7,7
		100	5,07	0,07	8,3
		150	4,96	0,04	6,4
		200	5,05	0,05	8,8
	-15	0	5,14	0,14	7,9
		100	5,05	0,05	8,1
		150	5,05	0,05	8,4
		200	4,96	0,04	6,9
	-30	0	5,14	0,14	7,9
		100	5,06	0,06	8,1
		150	5,04	0,04	7,9
		200	5,04	0,04	8,3
80	0	0	80,08	0,08	6,6
		100	80,58	0,58	12,8
		150	80,65	0,65	12,6
		200	80,84	0,84	12,6
	-15	0	79,81	0,19	16,8
		100	80,13	0,13	13,1
		150	80,06	0,06	13,0
		200	80,19	0,19	13,0
	-30	0	80,30	0,3	8,3
		100	79,60	0,4	13,3
		150	79,62	0,38	13,1
		200	79,66	0,34	13,0

Tabela A.2 (a) – Resposta do MQC para faltas monofásicas com $Z_{SA} = 1,3 Z_{SB}$

Distância Falta (%LT)	Fluxo de Potência (δ°)	Resistência Falta (Ω)	Distância estimada (Km)	Erro (%)	Tempo de operação (ms)
80	0	0	80,383	0,383	11,6
		100	79,92	0,08	9,0
		150	79,62	0,38	8,6
		200	78,753	1,247	8,6
	-15	0	79,423	0,577	10,0
		100	79,405	0,595	9,9
		150	79,46	0,54	9,5
		200	79,276	0,724	9,3
	-30	0	78,89	1,11	7,6
		100	79,068	0,932	10,4
		150	79,18	0,82	10,0
		200	79,122	0,878	9,9

Tabela A.2 (b) – Resposta do MQC para faltas monofásicas com $Z_{SA} = 0,1 Z_{SB}$

Distância Falta (%LT)	Fluxo de Potência (δ°)	Resistência Falta (Ω)	Distância estimada (Km)	Erro(%)	Tempo de operação (ms)
80	0	0	80,39	0,39	11,6
		100	79,937	0,063	9,0
		150	80,172	0,172	5,7
		200	78,882	1,118	8,5
	-15	0	79,459	0,541	10,0
		100	79,563	0,437	9,7
		150	79,498	0,502	9,5
		200	79,322	0,678	9,3
	-30	0	78,938	1,062	7,4
		100	79,127	0,873	10,4
		150	79,228	0,772	9,9
		200	79,177	0,823	9,9

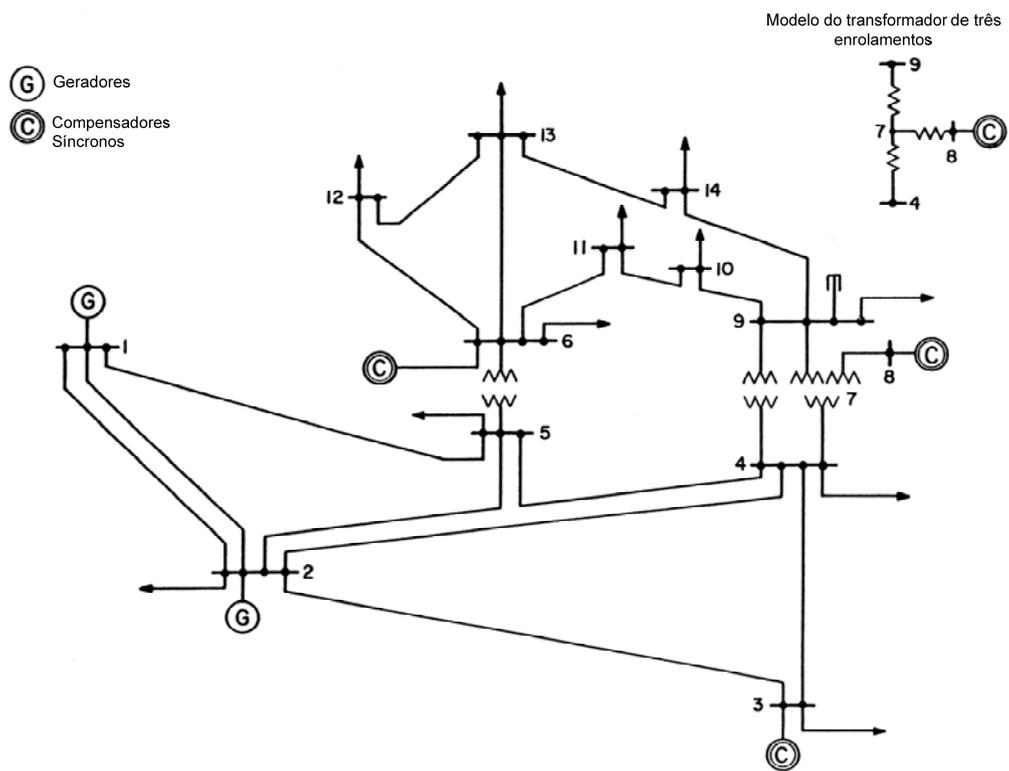
ANEXOS

ANEXO A - Parâmetros do Sistema Teste 2 (IEEE 14 barras)

A.1 – Dados dos Geradores

Tabela A.1 – Dados dos Geradores

Gerador	1	2	3	4	5
S (MVA)	615	60	60	25	25
x_1 (p.u.)	0,2396	0,0	0,0	0,134	0,134
r_a (p.u.)	0,0	0,0031	0,0031	0,0014	0,0014
x_d (p.u.)	0,8979	1,05	1,05	1,25	1,25
x'_d (p.u.)	0,2995	0,1850	0,1850	0,232	0,232
x''_d (p.u.)	0,23	0,13	0,13	0,12	0,12
T'_{d0} (s)	7,4	6,1	6,1	4,75	4,75
T''_{d0} (s)	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06
x_q (p.u.)	0,646	0,98	0,98	1,22	1,22
x'_q (p.u.)	0,646	0,36	0,36	0,715	0,715
x''_q (p.u.)	0,4	0,13	0,13	0,12	0,12
T'_{q0} (s)	0,0	0,3	0,3	1,5	1,5
T''_{q0} (s)	0,033	0,099	0,099	0,21	0,21
H (p.u)	5	6,54	6,54	5,06	5,06
D (p.u)	2	2	2	2	2



A.2 – Dados das Linhas de Transmissão

Tabela A.2 – Dados das Linhas de Transmissão

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528
1	5	0,05403	0,22304	0,0492
2	3	0,04699	0,19797	0,0438
2	4	0,05811	0,17632	0,0340
2	5	0,05695	0,17388	0,0346
3	4	0,06701	0,17103	0,0128
4	5	0,01335	0,04211	0,0
4	7	0,0	0,20912	0,0
4	9	0,0	0,55618	0,0
5	6	0,0	0,25202	0,0
6	11	0,09498	0,19890	0,0
6	12	0,12291	0,25581	0,0
6	13	0,06615	0,13027	0,0
7	8	0,0	0,17615	0,0
7	9	0,0	0,11001	0,0
9	10	0,03181	0,08450	0,0
9	14	0,12711	0,27038	0,0
10	11	0,08205	0,19207	0,0
12	13	0,22092	0,19988	0,0
13	14	0,17093	0,34802	0,0

A.3 – Condições Iniciais do Sistema Teste 2 (Fluxo de Potência)**Tabela A.3 – Condições Iniciais do Sistema Teste 2 (Fluxo de Potência)**

Barra	Tensão nominal (kV)	Tensão (p.u.)	Ângulo da barra (°)	P _{gerado} (W)	Q _{gerado} (VAR)	P _{carga} (W)	Q _{carga} (VAR)	Tipo de barra*
1	230	1,06	0,0	232,4	-16,9	0,0	0,0	2
2	230	1,045	-4,98	40	42,4	21,7	12,7	1
3	230	1,01	-12,72	0,0	23,4	94,2	19	2
4	230	1,019	-10,33	0,0	0,0	47,8	-3,9	3
5	230	1,02	-8,78	0,0	0,0	7,6	1,6	3
6	13,8	1,07	-14,22	0,0	12,2	11,2	7,5	2
7	13,8	1,062	-13,37	0,0	0,0	0,0	0,0	3
8	13,8	1,09	-13,36	0,0	17,4	0,0	0,0	2
9	13,8	1,056	-14,94	0,0	0,0	29,5	16,6	3
10	13,8	1,051	-15,1	0,0	0,0	9,0	5,8	3
11	13,8	1,057	-14,79	0,0	0,0	3,5	1,8	3
12	13,8	1,055	-15,07	0,0	0,0	6,1	1,6	3
13	13,8	1,05	-15,16	0,0	0,0	13,5	5,8	3
14	13,8	1,036	-16,04	0,0	0,0	14,9	5,0	3

* 1 – Barra swing; 2 – Barra PV; 3 – Barra PQ