



**UMA NOVA ABORDAGEM DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES**

ALEXSANDRO DA SILVA SANTOS FERNANDES

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

UMA NOVA ABORDAGEM DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES

ALEXSANDRO DA SILVA SANTOS FERNANDES

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Larissa Marques Peres, M.Sc (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, Dezembro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, ALEXSANDRO DA SILVA SANTOS

Uma Nova Abordagem da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases. [Distrito Federal] 2016.

xiii, 77p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Comparação de Fases

3. Linha de Transmissão

I. ENE/FT/UnB

2. Detecção de faltas

4. ATP

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, A. S. S. (2016). Uma Nova Abordagem da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alexsandro da Silva Santos Fernandes

TÍTULO: Uma Nova Abordagem da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2016

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

Alexsandro da Silva Santos Fernandes

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me abençoado, me dado forças e sabedoria para vencer as adversidades e concluir mais essa etapa de estudos na minha vida.

Aos meus pais Andrea e José Carlos, que apesar das dificuldades, sempre me proporcionaram ótimas condições para que eu me dedicasse exclusivamente aos estudos, me incentivando nos momentos difíceis e sempre acreditando que eu seria capaz de realizar meus sonhos.

À minha irmã Aline, pelo seu incentivo, carinho, proteção e palavras amigas, as quais, sem dúvidas, foram e sempre serão importantes para mim.

À minha avó Neide, que durante toda a minha vida, junto com meus pais, me deu condições para que eu pudesse ter bons estudos, sempre me apoiando e me dando seu infinito amor.

À minha namorada Dayane, que desde o momento em que começou a fazer parte da minha vida, vem me dando total apoio e carinho, sendo não só uma namorada excepcional, mas também uma amiga que me incentivou em todos os momentos.

À todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial ao professor Felipe Vigolvino Lopes, pela orientação e ensinamentos, que apesar das dificuldades, nunca deixou de me dar apoio.

Aos meus queridos amigos Roberto Diógenes, Samyr e Demetrius que muito me ajudaram com seus sábios conselhos e orações.

Agradeço a todos os amigos da UnB, pelas valiosas amizades e por inúmeras contribuições durante a minha caminhada acadêmica na UnB.

RESUMO

A detecção de faltas em linhas de transmissão (LTs) se destaca como uma das funções mais importantes entre os vários algoritmos empregados no diagnóstico de distúrbios em sistemas elétricos de potência. Neste trabalho, apresenta-se uma nova proposta de proteção de LTs por comparação de fases baseada na Transformada de Park (TDQ), que é capaz de identificar faltas e atuar de forma rápida, segura e eficaz. Uma análise comparativa é realizada entre quatro métodos de proteção, capazes de detectar faltas em LTs e enviar o sinal de *trip* aos disjuntores associados. O primeiro método consiste na versão clássica do algoritmo de comparação de fases e é chamado de função PC do termo em inglês *Phase Comparison*. O segundo método é uma adaptação da função PC tradicional, o qual inclui a análise de valores instantâneos positivos e negativos das correntes medidas. A terceira abordagem consiste na versão proposta baseada na TDQ e considera apenas os valores instantâneos dos sinais. Por fim, a quarta e mais completa abordagem, também se baseia na TDQ, porém analisa em sua lógica de operação valores instantâneos positivos e negativos das correntes avaliadas. Os estudos se baseiam na análise de diferentes características dos sistemas de aquisição de dados (número de amostras por ciclo e frequência de corte dos filtros *anti-aliasing*) e de diversas condições de faltas (localização da falta, resistência de falta, ângulo de incidência e carregamento). Para tanto, o software *Alternative Transients Program* (ATP) é utilizado para simular faltas em uma LT de 230 kV/60Hz de 200 km de comprimento. Para cada caso, realiza-se a comparação do tempo de *trip* da proteção quando utilizados os quatro métodos, evidenciando as vantagens do novo método.

Palavras-chave: ATP, comparação de fases, transformada de Park, sistemas de proteção, linhas de transmissão.

ABSTRACT

The transmission line fault detection stands out as one of the most important functions among the various algorithms used to diagnose disturbances in electrical power systems. In this work, it is proposed a new transmission line phase comparison protection algorithm based on the Park's Transformation (TDQ), which is able to identify faults and operate quickly, safely and effectively. A comparative analysis between four protection methods able to detect faults and to send the trip signal to the associated circuit breakers is performed. The first method consists on the classical version of the phase comparison algorithm, being called PC (phase comparison) function. The second method is an adaptation of the traditional PC function, which includes the analysis of positive and negative values of the measured currents. The third approach consists in the proposed TDQ-based technique and considers only the positive current values. Finally, the fourth and most complete approach consists also in the TDQ-based proposed technique, but it considers positive and negative values of measured currents on its tripping logic. The studies are based on the analysis of different characteristics of the data acquisition systems (number of samples per cycle and cut-off frequency of anti-aliasing filters) and various fault conditions (fault location, fault resistance, inception angle and system loading). To do so, the software *Alternative Transients Program* (ATP) is used to simulate faults in a 230 kV/60 Hz transmission line 200 km long. For each case, the tripping time of the protection is compared when the four methods are used, highlighting the advantages of the new method.

Keywords: ATP, phase comparison, Park's transformation, protection systems, transmission lines.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Glossário	xi
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Organização do Texto	4
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	5
2.1 Curtos-circuitos em Sistemas Elétricos de Potência	5
2.2 Componentes Simétricas	6
2.3 Faltas Assimétricas	8
2.3.1 Falta Monofásica	9
2.3.2 Falta Bifásica	10
2.3.3 Falta Bifásica-terra	12
2.4 Falta Simétrica	13
2.4.1 Falta Trifásica	13
2.5 Contribuição das Barras ao Curto-circuito	14
2.6 <i>Outfeed</i>	16
2.7 Síntese do Capítulo	16
Capítulo 3 – Breve Revisão Bibliográfica e Fundamentos de Algoritmos de Proteção de LT Baseados na Comparação de Fases	18
3.1 Fundamentos da Comparação de Fases	19

3.2	Método Baseado nas Correntes Instantâneas	19
3.3	Uso de Componentes Incrementais de Sequência com Correção da Corrente Capacitiva	22
3.4	Aplicação Fasorial da Proteção PC	24
3.5	Síntese do Capítulo	25
Capítulo 4 – Descrição e Implementação do Algoritmo Proposto		27
4.1	Transformada de Park para Detecção de Falhas	27
4.1.1	Sistema Equilibrado Sem Desvio de Frequência	31
4.1.2	Sistema Desequilibrado Sem Desvio de Frequência	32
4.2	Pré-Processamento dos Sinais de Corrente de Entrada	32
4.2.1	Filtro <i>Anti-Aliasing</i> Analógico	33
4.2.2	Amostragem dos Sinais	34
4.3	Processamento das Correntes de Eixo Direto	35
4.3.1	Eliminação da Componente CC da Corrente I_d	37
4.4	Identificação da Falta Utilizando a TDQ	38
Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados		42
5.1	Sistema Analisado	42
5.2	Avaliação do Algoritmo	43
5.2.1	Conjunto de Teste 1: Análise da Variação das Frequências de Amostragem e das Frequências de Corte dos Filtros <i>Anti-Aliasing</i>	45
5.2.2	Conjunto de Teste 2: Influência da Resistência de Falta	50
5.2.3	Conjunto de Teste 3: Influência do Carregamento do Sistema	53
5.2.4	Conjunto de Teste 4: Diferentes Tipos de Falta	55
5.2.5	Faltas Externas, <i>Outfeed</i> e Análise dos Tempos de Atuação das Soluções Avaliadas	58
5.3	Síntese do Capítulo	60
Capítulo 6 – Conclusão e Propostas Futuras		61
Referências Bibliográficas		63

LISTA DE FIGURAS

2.1	Falta AT. (a) LT generalizada; (b) Ligação dos circuitos de sequência (GLOVER <i>et al.</i> , 2011).	9
2.2	Falta BC. (a) LT generalizada; (b) Ligação dos circuitos de sequência (GLOVER <i>et al.</i> , 2011).	11
2.3	Falta BCT. (a) Linha trifásica generalizada (b) Circuito de sequência (GLOVER <i>et al.</i> , 2011).	12
2.4	Falta ABC. (a) Linha trifásica generalizada (b) Circuito de sequência (GLOVER <i>et al.</i> , 2011).	14
2.5	Contribuição das barras ao curto-circuito em uma LT (LOPES <i>et al.</i> , 2016). . .	15
3.1	Sistema de potência analisado. (LOPES <i>et al.</i> , 2016).	19
3.2	Princípios da comparação de fase. (a) Falta interna (figura à esquerda) e externa (figura à direita) (b) Sinais instantâneos (c) Sinais modulados (d) Saída da porta AND (e) Contagem da largura do pulso (LEITE <i>et al.</i> , 2016).	20
3.3	Modelo II equivalente de uma LT (HINGE; DAMBHARE, 2015).	24
4.1	Uso da TDQ no estudo de máquinas elétricas (KRAUSE, 1984).	28
4.2	Uso da TDQ no monitoramento de sistema elétrico de potência trifásico (KRAUSE, 2002).	28
4.3	Deteção de transitórios em um registro real via TDQ. (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto V_d (LOPES <i>et al.</i> , 2012).	29
4.4	Filtro analógico. (a) Resposta em frequência (b) Sinais antes e depois da aplicação do filtro.	34

4.5	Sinal de corrente. (a) Original (b) Digitalizado.	34
4.6	Processamento das componentes de eixo direto (a) sinal trifásico de corrente; (b) componente de eixo direto da corrente (I_d); (c) coeficiente c_{dif} da corrente; (d) energia ξ_{dif} da corrente (LOPES, 2014b).	36
4.7	Sinais de corrente de eixo direito antes e depois da derivada.	37
4.8	Correntes de eixo direito derivadas para: (a) Faltas internas; (b) Faltas externas.	38
4.9	Modulação da corrente de eixo direito para (a) valores positivos; (b) valores negativos.	39
4.10	Parte do esquema do circuito do módulo identificador de faltas.	39
4.11	Sinal modulado na saída da porta AND para (a) valores positivos; (b) valores negativos.	39
4.12	Contagem da largura dos pulsos dos sinais modulados na saída da porta AND para (a) valores positivos; (b) valores negativos.	41
4.13	Esquema do circuito do módulo de identificação de <i>trip</i>	41
5.1	Sistema simulado.	42
5.2	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=8 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	46
5.3	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=16 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	46
5.4	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=32 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	47
5.5	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=64 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	47
5.6	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=128 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	48
5.7	Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de N=256 para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.	48

5.8	Sinal de corrente de eixo direto para altas frequências (a) antes da derivada (b) após a derivada.	49
5.9	Ampliação do sinal corrente de eixo direto derivado para observação dos transitórios	50
5.10	Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 0° para resistências de falta iguais a: (a) 0Ω ; (b) 20Ω ; (c) 50Ω ; (d) 100Ω	52
5.11	Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 90° para resistências de falta iguais a: (a) 0Ω ; (b) 20Ω ; (c) 50Ω ; (d) 100Ω	53
5.12	Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 0° para carregamentos provenientes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45°	54
5.13	Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 90° para carregamentos provenientes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45°	55
5.14	Resultados do tempo de atuação para falta do tipo AB para carregamentos decorrentes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° . . .	56
5.15	Resultados do tempo de atuação para falta do tipo ABC para carregamentos decorrentes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° . . .	57
5.16	Tempos de atuação das soluções avaliadas.	59

LISTA DE TABELAS

4.1	Tabela verdade para o circuito do módulo identificador de faltas.	40
4.2	Tabela verdade para o circuito do módulo identificador de <i>trip</i>	41
5.1	Dados da LT de 230 kV modelada no ATP.	43
5.2	Dados dos equivalentes de Thévenin do sistema de 230 kV modelado.	43
5.3	Variações dos parâmetros utilizados para os testes 1.	45
5.4	Variações dos parâmetros utilizados para os testes 2.	51
5.5	Variações dos parâmetros utilizados para os testes 3.	54
5.6	Variações dos parâmetros utilizados para os testes 4.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Operador matemático complexo usado na transformação entre componentes de fase e de sequência.
A_{abc}	Componente trifásica no domínio de fases.
A_a	Componente da fase A.
A_b	Componente da fase B.
A_c	Componente da fase C.
A_d	Componente de eixo direto no domínio de Park.
A_{dq}	Componente de eixo direto ou em quadratura.
A_q	Componente de eixo em quadratura no domínio de Park.
B_S	Unidade de auto susceptância.
B_m	Unidade de susceptância mutua.
$c_{dif}(k)$	Grandezas diferenciais das componentes de eixo direto.
$\xi_{dif}(k)$	k -ésima amostra da energia janelada.
I_d	Corrente de eixo direto.
I_q	Corrente de eixo em quadratura.
I_d^a	Corrente de eixo direto com referência na fase A.
I_d^b	Corrente de eixo direto com referência na fase B.
I_d^c	Corrente de eixo direto com referência na fase C.
\hat{I}_0	Fasor da corrente de sequência zero.

\widehat{I}_1	Fasor da corrente de sequência positiva.
\widehat{I}_2	Fasor da corrente de sequência negativa.
\widehat{I}_n	Fasor da corrente de neutro.
i_{AND}	Corrente modulada.
i_C	Corrente capacitiva.
I_f	Corrente de falta.
\widehat{I}_L	Corrente do terminal Local.
\widehat{I}_R	Corrente do terminal Remoto.
$i_{mod(L)}$	Corrente modulada local.
$i_{mod(R)}$	Corrente modulada remoto.
$i_{ser,L}$	Corrente série do terminal local.
$i_{ser,R}$	Corrente série do terminal remoto.
i_L	Corrente do terminal local.
i_R	Corrente do terminal remoto.
$i_{S,S}$	Corrente no terminal local sem a corrente capacitiva.
$i_{S,1}$	Corrente no terminal local de sequência positiva.
$i_{S,2}$	Corrente no terminal local de sequência negativa.
$i_{S,12}$	Corrente no terminal local de componente misto.
i_{12}	Corrente de componente misto.
$\widehat{i}_{S,R}$	Corrente no terminal remoto sem a corrente capacitiva.
$I_{pos/neg,local}$	Corrente de eixo direto modulada para valores positivos ou negativos do terminal local.
$I_{pos/neg,remoto}$	Corrente de eixo direto modulada para valores positivos ou negativos do terminal remoto.
$I_{pos/neg}$	Corrente de saída da porta lógica AND .

$Trip, pos$	Sinal de trip de valores positivos.
$Trip, neg$	Sinal de trip de valores negativos.
$Trip$	Sinal de trip final de saída da porta lógica OR .
\widehat{V}_a	Fasor da tensão na fase A.
\widehat{V}_{ag}	Fasor da tensão entre a fase A e a terra.
\widehat{V}_b	Fasor da tensão na fase B.
\widehat{V}_{bg}	Fasor da tensão entre a fase B e a terra.
\widehat{V}_c	Fasor da tensão na fase C.
\widehat{V}_{cg}	Fasor da tensão entre a fase C e a terra.
\widehat{V}_i	Tensão no terminal local.
\widehat{V}_j	Tensão no terminal remoto.
\widehat{V}_0	Fasor da tensão de sequência zero.
\widehat{V}_1	Fasor da tensão de sequência positiva.
\widehat{V}_2	Fasor da tensão de sequência negativa.
Z_{AB}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases A e B do sistema.
Z_{AT}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolva a fase A e a terra.
Z_{BC}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases B e C do sistema.
Z_{BT}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolva a fase B e a terra.
Z_{CA}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases C e A do sistema.
Z_{CG}	Unidade de impedância do relé para faltas que envolva a fase C e a terra.
Z_F	Unidade de impedância de falta.
Z_{LT}	Impedância da linha de transmissão.
Z_{L0}	Impedância de sequência zero da linha de transmissão.
Z_{L1}	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.

Z_{L2}	Impedância de sequência negativa da linha de transmissão.
Z_m	Unidade de impedância mutua.
Z_s	Unidade de auto impedância.
Z_0	Impedância de sequência zero.
Z_1	Impedância de sequência positiva.
Z_2	Impedância de sequência negativa.

GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>System Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de corrente
TPC	Transformador de potencial capacitivo
TDQ	Transformada de Park
UnB	Universidade de Brasília

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Na história da sociedade, a energia elétrica, desde a sua descoberta, sempre ocupou lugar de destaque, tendo em vista a dependência crescente da humanidade em relação aos equipamentos eletroeletrônicos. De fato, para quantificar o crescimento econômico e tecnológico de um país, a energia demandada pode ser utilizada como índice (MAMEDE, 2011). Isto ocorre porque as indústrias correspondem a uma grande parcela da demanda da energia produzida, e a população acompanha esse desenvolvimento, consumindo as tecnologias e, conseqüentemente, demandando ainda mais energia. Desta maneira, os índices obtidos por empresas, órgãos e concessionárias que fazem parte do setor elétrico acabam se tornando indicativos do crescimento do país.

Atualmente, a geração de energia elétrica pode ser obtida por meio de termoeletricas, geração eólica, geração solar, geração hidráulica e outros. Dependendo das condições climáticas, estruturais, financeiras e até mesmo políticas, um país acaba adotando uma forma de geração em detrimento da outra (KINDERMANN, 2008).

Em um país de dimensão continental como o Brasil, onde aproximadamente 68% da produção de energia vem das usinas hidrelétricas (fonte limpa, renovável e econômica)¹, necessita-se utilizar um meio para a transmissão dessa energia, visto que, normalmente, tais usinas se encontram distantes dos centros consumidores. Em consequência disso, há um grande fluxo de energia de uma região do país para a outra com o intuito de que todas as cargas sejam atendidas.

No Brasil, o sistema de produção, transporte e distribuição de energia elétrica tem múltiplas ramificações e conexões. Essa grande rede é chamada de Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. O SIN é formado pelos Sub-sistemas Itaipu, Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, corres-

¹http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS2014_ONS/2_3.html (22/09/2016)

pondendo em 2014 a uma produção de 14,2%, 19,0%, 41,3%, 13,2% e 12,2%, respectivamente². Para coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN, criou-se em 26 de agosto de 1998, pela Lei nº 9.648/98, com as alterações introduzidas pela Lei nº 10.848/04 e regulamentado pelo Decreto nº 5.081/04, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)³. Neste contexto, vale destacar que, devido à grande extensão do SIN, existe uma grande preocupação dos referidos órgãos quanto à proteção do sistema, especialmente em relação aos distúrbios que podem ocorrer na rede de transmissão.

Os sistemas elétricos de potência têm como objetivo gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica, atendendo determinados padrões de qualidade, disponibilidade, confiabilidade e segurança, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal (KINDERMANN, 2008). O sistema de transmissão pode ser considerado como uma das partes mais importantes nesse processo, pois possibilita que a energia gerada possa ser transportada até o consumidor final (MAMEDE, 2011).

No contexto dos sistemas de transmissão, sabe-se que as linhas de transmissão (LTs) podem operar com diferentes tensões nominais e possuir comprimentos significativos. Em geral, quanto maior é a LT, maior o risco de ocorrência de distúrbios devido a causas naturais, como, por exemplo, os curto-circuitos, os quais são chamados de faltas. Com isso, grandes esforços estão concentrados no desenvolvimento de funções de proteção para LTs, os quais têm como foco a eliminação mais rápida, seletiva e segura possível de faltas para evitar desligamentos prolongados e de grandes proporções (STEVENSON, 1983). Esses sistemas de proteção promovem o isolamento de um subsistema em relação aos outros conectados por meio de disjuntores, que são controlados por relés de proteção instalados nos terminais da LT (STEVENSON, 1983). Assim, a rápida detecção da falta pelos relés se torna imprescindível para que o sistema possa atuar de forma a eliminar e restabelecer o seu normal funcionamento o mais rápido possível após a ocorrência de faltas.

Segundo requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações, nos Procedimentos de Rede do ONS, para proteções restritas ou unitárias, foi estabelecido que para as LT com tensão nominal inferior a 345 kV o tempo total de eliminação de faltas, incluindo o tempo

²<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> (22/09/2016)

³<http://www.ons.org.br/institucional.aspx> (23/09/2016)

de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores não deve exceder 150 ms, enquanto, para as LTs com tensão nominal igual ou superior a 345 kV, esse tempo não deve exceder 100 ms (ONS, 2011).

Do exposto, é notória a importância de se desenvolver técnicas e algoritmos que façam o monitoramento do sistema em tempo real e que promovam atuações confiáveis da proteção, a fim de isolar a menor porção possível do sistema sob falta, com boa sensibilidade, seletividade e velocidade, diminuindo as proporções dos danos decorrentes de distúrbios e o tempo total de desligamento do sistema (KINDERMANN, 2008).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é apresentar a implementação de uma nova proteção baseada na comparação de fases, que será chamada ao longo do trabalho como função PC, em decorrência do termo em inglês *Phase Comparison*. Na função proposta, utiliza-se a Transformada de Park (TDQ) no pré-processamento dos sinais analisados, a fim de que a proteção seja capaz de identificar a presença de faltas internas na LT monitorada de forma tão confiável e segura quanto as versões tradicionais da função PC, porém mais rapidamente. Com o intuito de se avaliar a eficácia dessa nova proposta de proteção, análises comparativas dos tempos de atuação de quatro abordagens distintas são realizadas. O primeiro método estudado se fundamenta na função PC tradicional reportada em Kasztenny *et al.* (2006), na qual são considerados os valores instantâneos positivos das correntes medidas na lógica de *trip* da proteção. O segundo método consiste em uma versão adaptada da função PC, na qual são consideradas análises dos valores instantâneos positivos e negativos das correntes medidas na lógica de *trip*, acelerando a atuação da proteção em diversos casos. O terceiro e quarto métodos consistem na abordagem proposta no presente trabalho, a qual faz uso da TDQ para acelerar o processo de detecção da falta. A diferença entre essas duas últimas abordagens é que, na terceira, apenas valores positivos das correntes são considerados, enquanto que na quarta solução avaliada, valores instantâneos positivos e negativos são avaliados. Para as referidas análises, são consideradas diferentes condições de falta e operacionais do sistema de aquisição de dados, viabilizando uma análise mais abrangente do método proposto.

No contexto supracitado, para atingir as metas globais do trabalho, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre faltas em LTs e métodos de proteção baseados na comparação de fases;
- Implementar o algoritmo proposto, incluindo funções para detecção de distúrbio e distinção entre faltas internas e externas;
- Simular diversas condições de falta em uma LT de um sistema elétrico de potência via ATP (*Alternative Transients Program*), considerando também diferentes características do sistema de aquisição de dados como número de amostras por ciclo e frequência de corte do filtro *anti-aliasing*;
- Analisar o comportamento dos algoritmos de identificação de falta e avaliar o tempo de *trip* e os seus desempenhos mediante as condições simuladas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, abordam-se os conceitos teóricos de curto-circuitos e das componentes simétricas;
- No Capítulo 3, apresenta-se uma breve revisão de algoritmos de proteção de linhas por comparação de fases;
- No Capítulo 4, descrevem-se os passos para a implementação da função PC baseada na TDQ;
- No Capítulo 5, apresentam-se os resultados e análises da avaliação dos algoritmos implementados;
- Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros que possam dar continuidade a este estudo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CURTOS-CIRCUITOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Por definição, falta é o termo usado para denotar um acidental afastamento das condições normais de operação. Assim, um curto-circuito ou um condutor interrompido constituem em uma falta (KINDERMANN, 2008).

Uma falta altera de maneira significativa as grandezas elétricas do sistema monitorado, ou seja, tensões e correntes. Logo, os valores instantâneos dessas grandezas devem ser monitorados para detecção das faltas, utilizando as alterações verificadas como meios de identificar a passagem do regime normal de funcionamento do sistema para um cenário operacional perigoso, ou seja, o regime de falta. Dentre as referidas alterações nas grandezas elétricas, destacam-se:

- Desequilíbrios nas correntes de fase, os quais podem ser resultado de elevações ou afundamentos das correntes no sistema, a depender do carregamento do sistema e da amplitude das contribuições de curto-circuito vindas das redes elétricas em torno da LT monitorada (LOPES *et al.*, 2016);
- Aparecimento das componentes de sequência negativa e sequência zero de tensão e/ou corrente no caso de faltas assimétricas. Vale salientar que a falta assimétrica, que promove desequilíbrios, se comporta como um gerador das sequências negativa e/ou zero. Entretanto, deve-se frisar que nem todo desequilíbrio verificado em sistemas elétricos está relacionado a uma falta (KINDERMANN, 2008).

A maioria dos distúrbios que ocorrem em sistemas de transmissão consistem em faltas, especialmente as assimétricas, sejam estas com conexão entre fases ou entre fases e terra (STEVENSON, 1983). Esses distúrbios merecem atenção especial, pois podem ocasionar desligamentos não programados parciais ou até mesmo totais do sistema, a depender da atuação dos esquemas de proteção utilizados (LOPES, 2014b).

Entre os distúrbios mencionados, os curto-circuitos em sistemas de transmissão podem ser classificados dependendo do número de fases envolvidas na falta (GLOVER *et al.*, 2011):

- Monofásicos (Fase-terra - FT);
- Bifásicos (Fase-fase - FF);
- Bifásicos-terra (Fase-fase-terra - FFT);
- Trifásico (Fase-fase-fase - FFF).

Neste contexto, é importante entender as variações nas grandezas elétricas decorrentes de diferentes tipos de falta, para fins de verificar características que viabilizem a elaboração de técnicas de proteção confiáveis, que operem corretamente independentemente das fases envolvidas no distúrbio. Para tanto, a teoria das componentes simétricas é tipicamente utilizada para analisar situações de faltas, sejam elas simétricas ou assimétricas.

2.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Para uma melhor compreensão dos tipos de falta que serão abordados ao longo do presente trabalho, é importante introduzir o conceito de componentes simétricas, ferramenta esta que será utilizada como base para compreender as alterações verificadas nos sinais de tensão e corrente durante curtos-circuitos.

Em 1918, C. O. Fortescue apresentou no '*American Institute of Electrical Engineers*', uma ferramenta muito útil para estudos com circuitos desequilibrados (FORTESCUE, 1918). No seu trabalho, Fortescue definiu uma transformação linear de componentes de fase para um novo conjunto de componentes denominados por Componentes Simétricas. Uma das vantagens dessa transformada viria a ser a possibilidade de analisar sistemas polifásicos desequilibrados por meio de circuitos equivalentes equilibrados e desacoplados, denominados de circuitos de sequência (GLOVER *et al.*, 2011). Em um sistema trifásico, por exemplo, as componentes simétricas são usadas para calcular as condições de desequilíbrio por meio da análise de circuitos independentes, o que simplifica o processo de cálculo das grandezas de falta nos sistemas de potência (GLOVER *et al.*, 2011).

De acordo com o teorema de Fortescue, os seguintes conjuntos equilibrados de componentes simétricas são obtidos (GLOVER *et al.*, 2011):

- Componente de sequência positiva, que consiste em três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si, e tendo a mesma sequência de fase que os fasores originais;
- Componente de sequência negativa, que consiste em três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si, e tendo a sequência de fase oposta à dos fasores originais;
- Componente de sequência zero, que consiste em três fasores iguais em módulo e com defasagem nula entre si.

Uma característica importante das componentes simétricas está relacionada ao comportamento das sequências positiva, negativa e zero em diferentes situações de desequilíbrio. A sequência positiva, por exemplo, existirá sempre e, idealmente, será a única verificada durante curtos-circuitos trifásicos em sistemas transpostos. Por outro lado, as grandezas de sequência negativa e zero têm relação com o nível de desequilíbrio do sistema monitorado. Sobre essas componentes, cabe ressaltar que a sequência zero surgirá apenas em situações de faltas que envolvem uma conexão para a terra (STEVENSON, 1983). Com base nas referidas características, algumas funções de proteção fazem uso de componentes simétricas, viabilizando a elaboração de funções sensíveis aos desequilíbrios induzidos por faltas (ANDERSON, 1999).

Para apresentar o estudo das componentes simétricas para diferentes tipos de falta, será utilizada apenas a fase A como referência no cálculo das sequências positiva, negativa e zero. Essas componentes serão representadas daqui em diante por: \widehat{I}_0 , \widehat{I}_1 , e \widehat{I}_2 (GLOVER *et al.*, 2011).

Do teorema de Fortescue, sabe-se que as componentes de fase podem ser representadas em função das componentes simétricas usando:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

onde $a = 1 \angle 120^\circ$ é um operador rotacional.

Considerando:

$$\mathbf{I}_f = \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

é possível reescrever (2.1) como:

$$\mathbf{I}_f = A \cdot \mathbf{I}_s. \quad (2.5)$$

Uma vez que a matriz inversa de A é dada por:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

usando (2.5), temos que:

$$\mathbf{I}_s = A^{-1} \cdot \mathbf{I}_f. \quad (2.7)$$

Assim, substituindo (2.2),(2.3) e (2.6) em (2.7), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

De (2.8), nota-se que podem ser obtidas três equações distintas para representação matemática das componentes de sequência:

$$\widehat{I}_0 = \frac{1}{3}(\widehat{I}_a + \widehat{I}_b + \widehat{I}_c), \quad (2.9)$$

$$\widehat{I}_1 = \frac{1}{3}(\widehat{I}_a + a\widehat{I}_b + a^2\widehat{I}_c), \quad (2.10)$$

$$\widehat{I}_2 = \frac{1}{3}(\widehat{I}_a + a^2\widehat{I}_b + a\widehat{I}_c), \quad (2.11)$$

De (2.9) e (2.11), é possível provar que, em sistemas trifásicos equilibrados, não há presença de componentes de sequência zero e negativa, porque os somatórios em ambas as expressões é igual a zero. Por outro lado, o mesmo não ocorre na sequência positiva, corroborando com o exposto anteriormente, no que diz respeito à sua presença mesmo durante faltas simétricas (KINDERMANN, 2005; GLOVER *et al.*, 2011).

2.3 FALTAS ASSIMÉTRICAS

A falta é dita assimétrica quando as impedâncias, tensões e correntes oriundas do curto-circuito não são equilibradas entre si. As faltas monofásicas e bifásicas (com ou sem terra) são os tipos mais frequentes em sistemas de transmissão, chegando um número de aproximadamente 93% dos casos de curtos-circuitos registrados (GLOVER *et al.*, 2011).

2.3.1 Falta Monofásica

O primeiro tipo de falta desequilibrada é a Falta Monofásica, onde apenas uma fase do sistema trifásico é afetada, ou seja, ocorre entre uma das fases e o terra. Por consistir em um curto-circuito desequilibrado e envolver uma conexão para o terra, é possível perceber a presença de todas as componentes de sequência (positiva, negativa e zero). Para exemplificar esse tipo de falta, as Figuras 2.1(a) e 2.1(b) apresentam uma falta na fase A de um sistema trifásico generalizado e a interligação dos circuitos de sequência para análise deste tipo de curto-circuito.

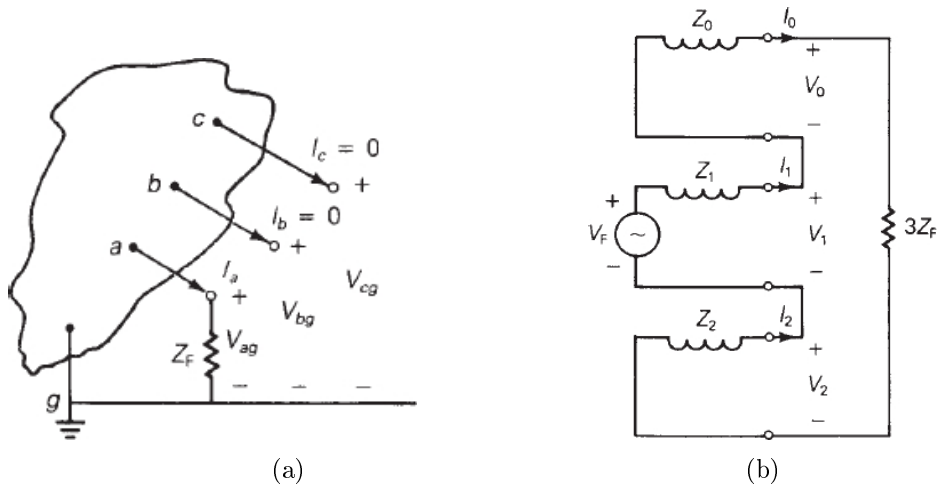


Figura 2.1. Falta AT. (a) LT generalizada; (b) Ligação dos circuitos de sequência (GLOVER *et al.*, 2011).

Da Figura 2.1(a), é possível obter as seguintes relações:

$$\widehat{V}_{ag} = Z_F \widehat{I}_a, \quad (2.12)$$

$$\widehat{I}_b = \widehat{I}_c = 0. \quad (2.13)$$

Na Figura 2.1(b), ilustra-se uma relação em série dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero, podendo-se obter as seguintes relações:

$$\widehat{I}_0 = \widehat{I}_1 = \widehat{I}_2, \quad (2.14)$$

$$(\widehat{V}_0 + \widehat{V}_1 + \widehat{V}_2) = 3Z_F \widehat{I}_1, \quad (2.15)$$

onde os índices 0, 1 e 2 representam, respectivamente, as sequências zero, positiva e negativa, sendo \widehat{V} e \widehat{I} os fasores das tensões e correntes, respectivamente, Z_0 , Z_1 , Z_2 e Z_F as impedâncias

de sequência zero, positiva, negativa e de falta, respectivamente, e \widehat{V}_F é a tensão de no ponto de falta no instante imediatamente anterior ao início do curto-circuito.

Da Figura 2.1(b), nota-se que as correntes de sequência são dadas por:

$$\widehat{I}_0 = \widehat{I}_1 = \widehat{I}_2 = \frac{\widehat{V}_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} . \quad (2.16)$$

Com a transformação de (2.16) para o domínio de fases, temos:

$$\widehat{I}_a = \widehat{I}_0 + \widehat{I}_1 + \widehat{I}_2 = 3\widehat{I}_1 = \frac{3\widehat{V}_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} . \quad (2.17)$$

Como a falta é monofásica, para uma falta na fase A, idealmente, temos então que:

$$\widehat{I}_b = \widehat{I}_c = 0 . \quad (2.18)$$

Portanto, pode-se concluir que, em faltas monofásicas (AT, BT e CT) existe no ramo que sofreu a falta uma corrente de curto-circuito que depende das impedâncias de sequência, da impedância de falta e da tensão de pré-falta no ponto do distúrbio, enquanto que, nas outras fases, a corrente de curto-circuito é igual à zero. Para casos de curto-circuito franco, sem a presença de terra, $Z_F = 0 \Omega$.

2.3.2 Falta Bifásica

A Falta Bifásica ocorre quando duas fases do sistema trifásico são afetadas. Esse tipo de falta pode ocorrer com ou sem terra, mas nessa seção será abordado o tipo sem terra. Como o terra não estará presente na falta, existirão apenas as sequências positiva e negativa, não estando presente a sequência zero. Nas Figuras 2.2(a) e 2.2(b), representa-se uma falta bifásica BC de um sistema trifásico generalizado e a respectiva interligação dos circuitos de sequência.

Da Figura 2.2(a) apresentada, é possível obter as seguintes relações:

$$\widehat{V}_{bg} - \widehat{V}_{cg} = Z_F \widehat{I}_b , \quad (2.19)$$

$$\widehat{I}_c = -\widehat{I}_b , \quad (2.20)$$

$$\widehat{I}_a = 0 . \quad (2.21)$$

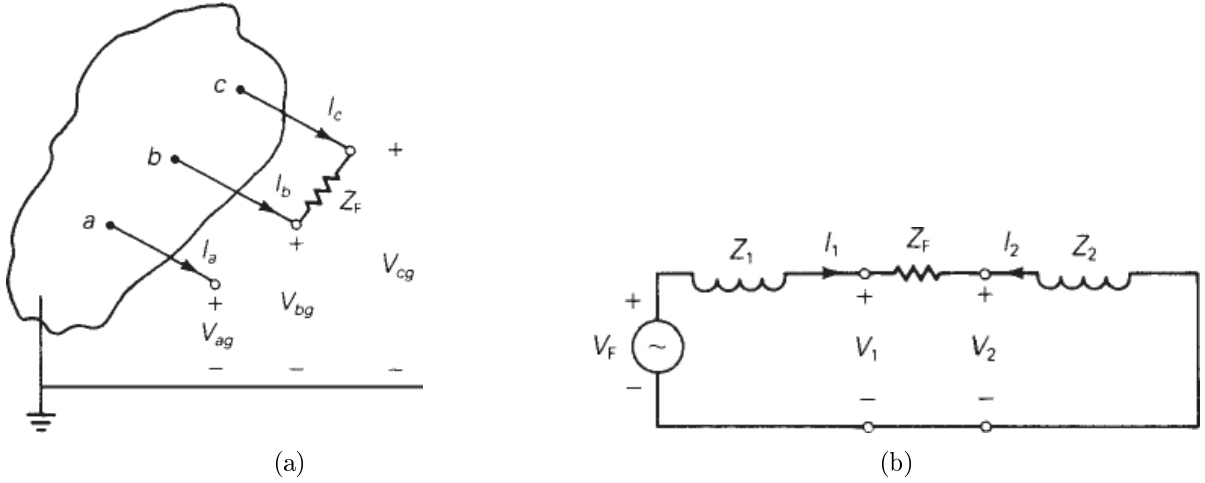


Figura 2.2. Falta BC. (a) LT generalizada; (b) Ligação dos circuitos de sequência (GLOVER *et al.*, 2011).

Transformando (2.19) e (2.20) para o domínio de seqüências, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)\widehat{I}_b \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)\widehat{I}_b \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

De (2.22), as condições da falta bifásica no domínio de seqüência são obtidas:

$$\widehat{I}_0 = 0, \quad (2.23)$$

$$\widehat{I}_2 = -\widehat{I}_1, \quad (2.24)$$

$$\widehat{V}_1 - \widehat{V}_2 = Z_F \widehat{I}_1. \quad (2.25)$$

As relações apresentadas são resultado da ligação em paralelo dos circuitos de seqüência positiva e negativa, como mostra a Figura 2.2(a). Com isso, pode-se concluir que as correntes de falta para o domínio de seqüência são:

$$\widehat{I}_1 = \widehat{I}_2 = \frac{\widehat{V}_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F}. \quad (2.26)$$

Transformando (2.26) para o domínio de fases e lançando mão da identidade $(a^2 - a) = -j\sqrt{3}$, tem-se uma relação para a falta na fase B:

$$\widehat{I}_b = \widehat{I}_0 + a^2 \widehat{I}_1 + a \widehat{I}_2 = (a^2 - a) \widehat{I}_1 = -j\sqrt{3} \widehat{I}_1 = \frac{-j\sqrt{3} \widehat{V}_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F}. \quad (2.27)$$

Analisando (2.27), nota-se novamente a aparição de uma corrente de curto-circuito nas fases com falta, induzindo variações nas correntes e tensões medidas. Cabe ressaltar que,

diferentemente das faltas que envolvem a terra, que podem apresentar resistências de falta com valores da ordem de dezenas de ohms, as faltas francas entre fases possuem tipicamente resistência de falta pequena, geralmente menores que 1Ω (SILVEIRA, 2007).

2.3.3 Falta Bifásica-terra

De maneira similar à seção anterior, mas assumindo agora que a falta bifásica possui uma conexão com a terra, representa-se um curto-circuito BCT, considerando conexão franca entre as fases B e C, e uma ligação com a terra por meio da impedância Z_F . Com a existência da conexão com a terra, passa-se a considerar também a existência da sequência zero.

Na Figura 2.3(a), ilustra-se o referido curto-circuito BCT e a interligação dos circuitos de sequência, a partir dos quais é possível obter as seguintes relações:

$$\hat{I}_a = 0, \quad (2.28)$$

$$\hat{V}_{bg} = \hat{V}_{cg} = Z_F(\hat{I}_b + \hat{I}_c). \quad (2.29)$$

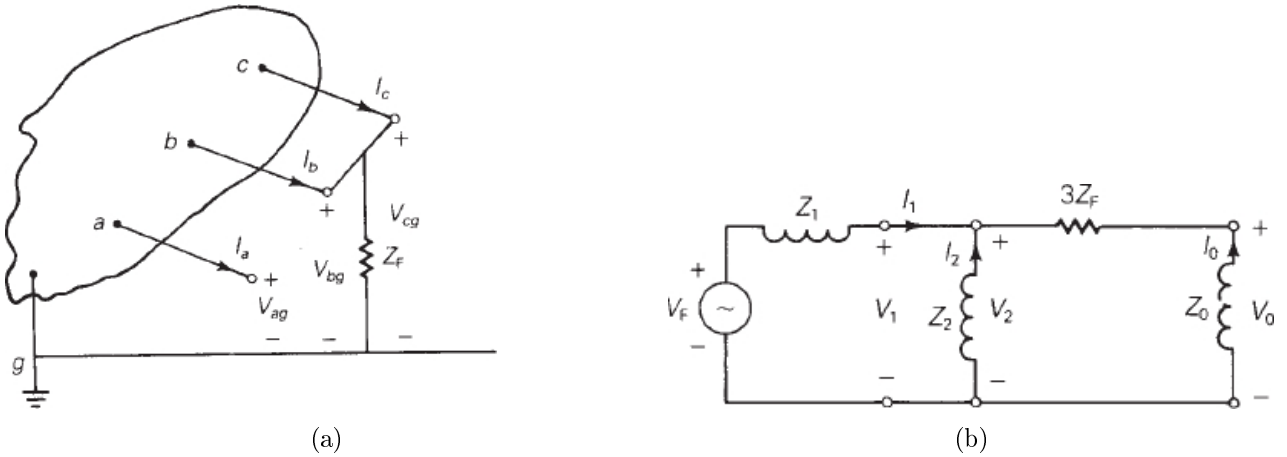


Figura 2.3. Falta BCT. (a) Linha trifásica generalizada (b) Circuito de sequência (GLOVER *et al.*, 2011).

Transformando (2.28) (2.29) para domínio de sequência, obtêm-se as seguintes relações:

$$\hat{I}_a = \hat{I}_0 + \hat{I}_1 + \hat{I}_2 = 0, \quad (2.30)$$

$$\hat{V}_{bg} = (3Z_F)\hat{I}_0. \quad (2.31)$$

Tais relações demonstram a conexão em paralelo dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero, ilustrado pela Figura 2.3(b). Com base nessa interligação, é possível obter a corrente de

falta para as três sequências:

$$\widehat{I}_1 = \frac{\widehat{V}_F}{Z_1 + Z_2 // (Z_0 + 3Z_F)} = \frac{\widehat{V}_F}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 + (Z_0 + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \right]} . \quad (2.32)$$

$$\widehat{I}_2 = (-\widehat{I}_1) \frac{Z_0 + 3Z_F}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} , \quad (2.33)$$

$$\widehat{I}_0 = (-\widehat{I}_1) \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} . \quad (2.34)$$

Do exposto, nota-se que novamente, existirão contribuições de curto-circuito nas fases com falta que provocarão variações nas grandezas elétricas do sistema.

2.4 FALTA SIMÉTRICA

A falta é dita simétrica quando há uma completa simetria ou equilíbrio entre suas fases antes e após a ocorrência do defeito. Neste caso, as impedâncias, os módulos das tensões e das correntes de curto-circuito são praticamente equilibradas entre si. Dentre os tipos de falta, apenas a trifásica é equilibrada, para a qual, idealmente, apenas a sequência positiva existe.

2.4.1 Falta Trifásica

A Falta Trifásica ocorre quando todas as fases do sistema trifásico são afetadas pelo curto-circuito. Conforme mencionado anteriormente, nesse caso, é necessário analisar apenas a sequência positiva, visto que, idealmente, não existirão as sequências negativa e zero (GLOVER *et al.*, 2011).

As Figuras 2.4(a) e 2.4(b) ilustram uma falta trifásica e o circuito de sequência positiva a ser considerado nas análises relacionadas. Da referida figura, as seguintes relações são obtidas:

$$\widehat{V}_a = a\widehat{V}_b = a^2\widehat{V}_c , \quad (2.35)$$

$$\widehat{I}_a = a\widehat{I}_b = a^2\widehat{I}_c , \quad (2.36)$$

$$\widehat{V}_a = Z_F \widehat{I}_a . \quad (2.37)$$

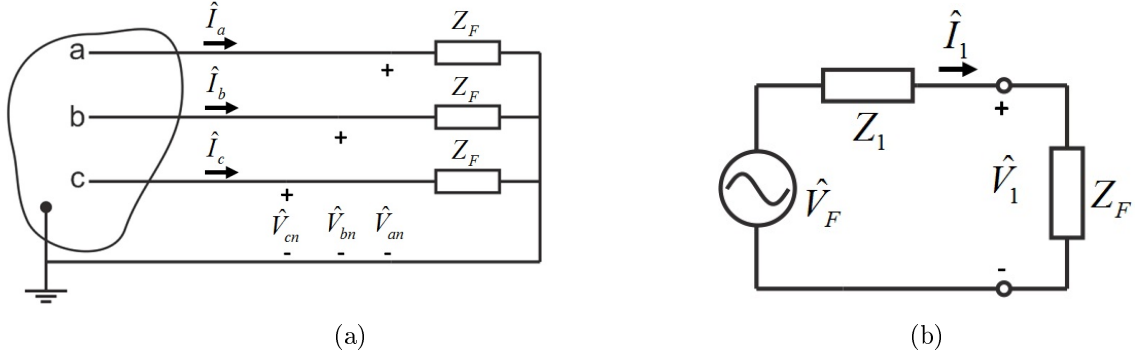


Figura 2.4. Falta ABC. (a) Linha trifásica generalizada (b) Circuito de sequência(GLOVER *et al.*, 2011).

Analisando a Figura 2.4(b) e as equações (2.35), (2.36) e (2.37), obtêm-se:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_F}{Z_1 + Z_F}, \quad (2.38)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0, \quad (2.39)$$

$$\hat{V}_1 = Z_F \hat{I}_1, \quad (2.40)$$

$$\hat{V}_0 = \hat{V}_2. \quad (2.41)$$

Transformando correntes e tensões para o domínio de fases, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{I}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ a^2 \hat{I}_1 \\ a \hat{I}_1 \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ Z_F \hat{I}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F \hat{I}_1 \\ a^2 Z_F \hat{I}_1 \\ a Z_F \hat{I}_1 \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

De (2.42) e (2.43), comprova-se que as correntes e tensões permanecem idealmente equilibradas, mesmo durante o curto-circuito.

2.5 CONTRIBUIÇÃO DAS BARRAS AO CURTO-CIRCUITO

O cálculo da contribuição de curto-circuito que passa pelos terminais da LT monitorada é muito importante para o entendimento do desempenho do algoritmo proposto, visto que serão analisado os sinais de corrente nos terminais da LT. Considere a Figura 2.5, na qual é ilustrada uma LT que conecta duas barras: a Barra Local (Barra L) e a Barra Remota (Barra R) na presença de uma falta interna.

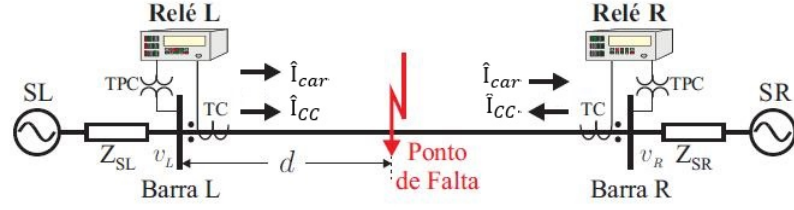


Figura 2.5. Contribuição das barras ao curto-circuito em uma LT (LOPES *et al.*, 2016).

É possível constatar então que as correntes medidas nos terminais L e R da LT são compostas por duas contribuições de corrente, conforme comprovado nas equações (2.44) e (2.45):

$$\hat{I}_{medL} = \hat{I}_{car} + \hat{I}_{CC} , \quad (2.44)$$

$$\hat{I}_{medR} = \hat{I}_{car} - \hat{I}_{CC} , \quad (2.45)$$

onde \hat{I}_{medL} e \hat{I}_{medR} são as correntes medidas nos terminais local e remoto, respectivamente, \hat{I}_{car} a corrente de carregamento do sistema e \hat{I}_{CC} a corrente de contribuição de curto-circuito (contribuição da barra). As correntes de contribuição de curto-circuito sofrem influências de fatores como a resistência de falta, o tipo de falta, SIR e distância do ponto de falta na LT, já as correntes de carregamento do sistema sofrem influência do ângulo de carregamento. De fato, são essas contribuições da barra combinadas às correntes de carregamento do sistema que são medidas e processadas pelos dispositivos de proteção da LT.

Assim, após a determinação das correntes de sequência positiva, negativa e zero para cada tipo de falta, para estimar as contribuições de corrente de curto-circuito nos terminais da LT, procede-se da seguinte forma:

- As fontes de tensão do circuito de sequência positiva são curto-circuitadas;
- As correntes de sequência de curto-circuito são representadas como fontes de corrente nos seus respectivos circuitos;
- Resolvem-se os circuitos de sequência (divisores de corrente), a fim de determinar a contribuição de cada barra do sistema para o curto-circuito.

Conforme mencionado e comprovado pelas equações anteriormente, as contribuições são mais evidentes nas fases com falta, onde vão surgir correntes, que em situações normais de operação do sistema elétrico não existiriam.

2.6 *OUTFEED*

Durante uma falta em uma LT, a depender do carregamento do sistema, existe a possibilidade de ocorrência de um fenômeno chamado de *outfeed*, o qual causa problemas para métodos de proteções baseados na identificação da direcionalidade das correntes. Em uma situação de falta, conforme mencionado anteriormente, as correntes medidas nos terminais são compostas por duas componentes: corrente de carregamento e corrente de curto-circuito.

Como característica de uma falta interna, ilustrado pela Figura 2.5, as correntes de carregamento tem seu fluxo entrando em um terminal e saindo no outro terminal da LT, e por tal motivo, a corrente que entra na LT tem sua medição com valores positivos pelo TC e a corrente que sai da LT tem sua medição com valores negativos pelo TC, já a corrente de curto-circuito, tem sua direção de fluxo em ambos os terminais, entrando na linha de transmissão, sendo então medida com valores de correntes positivas. Nestes casos, quando a corrente de carregamento do sistema supera a contribuição da corrente de curto-circuito, a corrente medida no terminal será caracterizada por um afundamento do seu valor. Essa condição é observada em casos de elevado carregamento e baixa contribuição de curto-circuito no terminal da LT no qual a corrente de carga e de falta possuem direções opostas. Neste cenário, sabe-se que a baixa contribuição de curto-circuito pode ocorrer em situações de elevada resistência de falta, fontes fracas ou pela combinação desses fatores (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010), evidenciando o efeito combinado das características do sistema e da falta. Como consequência de uma situação de *outfeed*, as correntes não ficam em fase durante o curto-circuito, dificultando a análise dos sinais e da atuação do sistema de proteção.

2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Em um primeiro momento, foi possível compreender que um curto-circuito pode ser traduzido por algumas alterações do regime normal de funcionamento, como por exemplo, o desequilíbrio nas correntes das fases envolvidas. Da literatura, sabe-se que, a depender do carregamento do sistema e dos níveis das correntes de curto-circuito, esses desequilíbrios são enxergados nas correntes medidas como elevações ou afundamentos. Esse segundo caso ocorre normalmente em situações de *outfeed*, quando a corrente de carga supera a contribuição de curto-circuito,

promovendo problemas em proteções direcionais tradicionais, conforme reportado na literatura (LEITE *et al.*, 2016).

Como ferramenta útil para estudos com circuitos desequilibrados, foi apresentada a transformação linear de componentes de fase para um novo conjunto de componentes denominadas de Componentes Simétricas. Da fundamentação teórica relacionada às componentes simétricas, destacou-se quais delas existem para cada tipo de falta, demonstrando as possíveis variações nas correntes do sistema a depender das impedâncias da rede elétrica, da resistência de falta e da tensão no ponto de falta no instante imediatamente antes do início do curto-circuito.

Do exposto, destaca-se o fato de em todos os casos de faltas assimétricas existirem desequilíbrios no sistema, com variações de corrente, especialmente nas fases afetadas. Adicionalmente, embora nas faltas trifásicas esses desequilíbrios não existam, as variações nas correntes também são verificadas, comportamento este considerado pelos sistemas de proteção. Assim, evidencia-se a possibilidade de implementar funções de proteção sensíveis a desequilíbrios, que sejam capazes de identificar com segurança curtos-circuitos assimétricos e, por meio da análise de variações nas grandezas elétricas, proteger o sistema também contra faltas simétricas. Embora já existam aplicações baseadas na análise das sequências negativa e zero, novas propostas ainda são de interesse para o setor elétrico, desde que mantenham a confiabilidade das funções tradicionais, porém com maior velocidade de atuação (SCHWEITZER *et al.*, 2015; KASZTENNY *et al.*, 2006). Por isso, no próximo capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica e fundamentos da função PC tradicional, que darão o embasamento necessário para o desenvolvimento da nova solução proposta.

BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO DE LT BASEADOS NA COMPARAÇÃO DE FASES

Conforme mencionado anteriormente, as LTs desempenham um papel importante em sistemas elétricos de potência, consistindo em uma das partes mais susceptíveis à ocorrência de faltas. Por esse motivo, a detecção rápida de faltas é essencial para a proteção do sistema elétrico de potência, fato este que vem motivando estudos voltados para o desenvolvimento de algoritmos de proteção que sejam rápidos, seguros, simples e eficazes.

Segundo a literatura relacionada à proteção de LTs, sabe-se que a proteção diferencial consiste em uma das melhores opções devido à sua simplicidade, sensibilidade, seletividade e confiabilidade (HINGE; DAMBHARE, 2015). Por outro lado, este tipo de proteção requer normalmente investimentos na sincronização de dados e em uma infraestrutura de canais de comunicação que permitam o intercâmbio de dados entre os terminais da LT monitorada (LEITE *et al.*, 2016). Nesse contexto, para reduzir o intercâmbio de informações nos canais de comunicação, a função PC se torna atrativa, visto que não requer a transmissão de dados em demasia e também viabiliza a proteção unitária da LT assim como a proteção diferencial clássica (KASZTENNY *et al.*, 2006). Basicamente, a função PC é implementada de forma a comparar os ângulos de fase das correntes nas extremidades da LT monitorada, permitindo diferenciar situações de curtos-circuitos internos de outras relacionadas a faltas externas ou mesmo à operação normal do sistema.

Muito utilizada em décadas passadas nos relés eletromecânicos e estáticos, atualmente, a função PC ressurgiu como uma boa opção para a proteção de LTs, especialmente pela possibilidade de implementar melhorias de forma simples por meio da estrutura de programação dos relés numéricos microprocessados. Por isso, a função PC tem sido tratada como promissora, principalmente em sua versão aplicada no domínio do tempo, a qual não depende do processo

de estimação de fasores, reduzindo os tempos de operação associados, bem como requerendo um menor investimento no que se refere aos sistemas de comunicação, se comparado a outros esquemas de proteção diferencial (LEITE *et al.*, 2016; KASZTENNY *et al.*, 2006).

3.1 FUNDAMENTOS DA COMPARAÇÃO DE FASES

Para facilitar a compreensão do funcionamento da função PC, apresentam-se inicialmente os fundamentos desse método. Com esse intuito, considere a Figura 3.1, na qual é ilustrada uma LT que conecta duas barras: a Barra Local (Barra L) e a Barra Remota (Barra R).

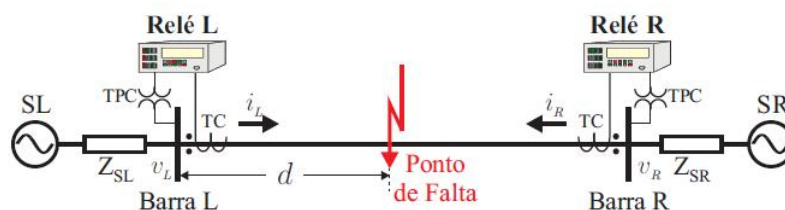


Figura 3.1. Sistema de potência analisado. (LOPES *et al.*, 2016).

Basicamente, a função PC se fundamenta na análise da diferença angular entre as correntes medidas nos terminais L e R, incluindo as polaridades impostas pelos transformadores de corrente (TC) utilizados para a medição das grandezas analisadas. Considerando as polaridades dos TCs conforme ilustrado na Figura 3.1, ou seja, medições positivas para correntes entrando na LT, idealmente, em casos de faltas internas, \hat{I}_L e \hat{I}_R possuem direções opostas (neste caso, entram na LT), resultando, portanto, em $\theta_L - \theta_R = 0^\circ$, onde θ_L e θ_R correspondem respectivamente aos ângulos de fase dos fasores das correntes medidas nas barras L e R. Entretanto, em uma situação normal de operação ou em casos de faltas externas, idealmente, \hat{I}_L e \hat{I}_R terão a mesma direção (uma corrente entra na LT e a outra sai da LT), resultando idealmente em $\theta_L - \theta_R = 180^\circ$. Essas defasagens podem ser observadas na Figura 3.2(b), onde são apresentadas as formas de onda no tempo das correntes \hat{I}_L e \hat{I}_R (LEITE *et al.*, 2016).

3.2 MÉTODO BASEADO NAS CORRENTES INSTANTÂNEAS

É apresentada por Kasztenny *et al.* (2006) uma aplicação da função PC baseada na análise dos valores instantâneos das correntes medidas nas barras L e R da LT monitorada. Vale

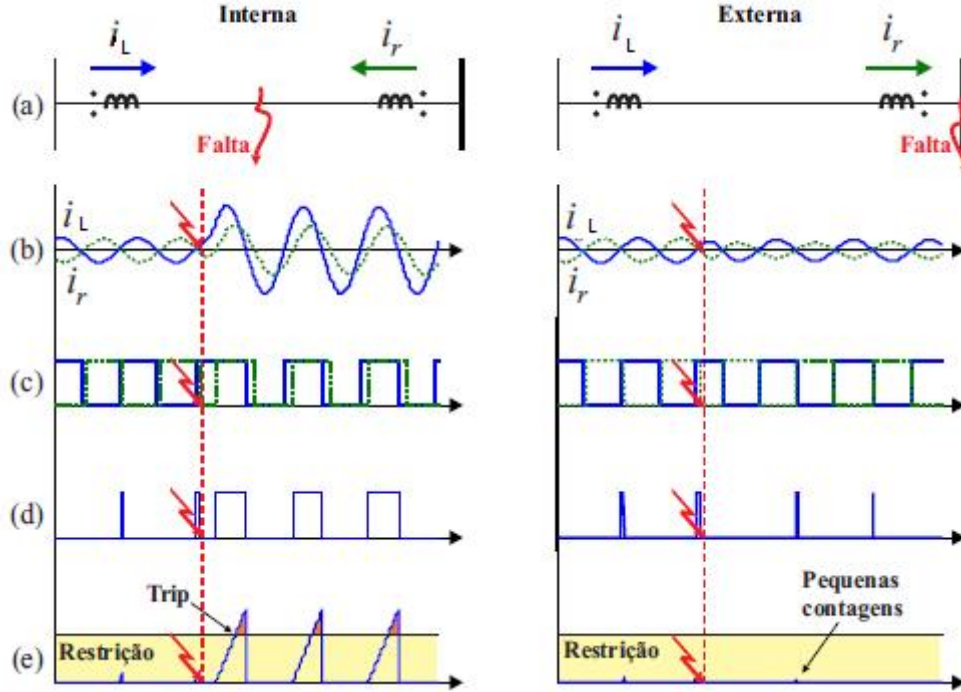


Figura 3.2. Princípios da comparação de fase. (a) Falta interna (figura à esquerda) e externa (figura à direita) (b) Sinais instantâneos (c) Sinais modulados (d) Saída da porta *AND* (e) Contagem da largura do pulso (LEITE *et al.*, 2016).

salientar que esse algoritmo será usado como objeto de estudo do presente trabalho, sendo ele a base para as soluções avaliadas posteriormente.

A função PC, quando aplicada no domínio do tempo, realiza a análise dos valores modulados das correntes instantâneas do sistema por meio da utilização de uma porta lógica *AND*. Na primeira parte do algoritmo, realiza-se a modulação dos sinais no domínio do tempo, i_L e i_R , que é realizada de acordo com a polaridade da amostra dos sinais monitorados, resultando basicamente em um sinal modulado com valores positivos unitários quando os valores instantâneos dos sinais são positivos, e valores nulos quando os valores instantâneos dos sinais são negativos, conforme ilustrado na Figura 3.2(c). Esse procedimento é realizado em todas as fases do sistema elétrico, e assim, a comparação entre os sinais modulados das correntes em ambos os terminais é realizada por meio da comparação de sinais binários apenas. Em um segundo momento, os sinais modulados referentes às correntes locais e remotas, $i_{mod(L)}$ e $i_{mod(R)}$ são associados por meio de uma porta lógica *AND*, cujo sinal de saída é composto por pulsos que permanecem em nível alto apenas quando $i_{mod(L)}$ e $i_{mod(R)}$ são positivos, ficando em nível baixo para os demais casos. Nesta etapa, gera-se então um sinal obtido da seguinte relação:

$$i_{AND}(t) = AND [i_{mod(L)}(t), i_{mod(R)}(t)] \quad . \quad (3.1)$$

Para faltas internas, segundo informações mencionadas anteriormente, i_L e i_R possuem mesma direção e, conseqüentemente, mesma polaridade, resultando em pulsos largos em i_{AND} , conforme apresentado na Figura 3.2(d) no lado esquerdo. Em contrapartida, para faltas externas ou durante a operação normal do sistema, as correntes possuem direções opostas e, conseqüentemente, polaridades diferentes, o que resulta em sinais i_{AND} que permanecem em nível baixo ou na aparição de pulsos estreitos, conforme apresentado na Figura 3.2(d) no lado direito.

A atuação da função PC se baseia na análise da largura dos pulsos do sinal i_{AND} , os quais quando largos, indicam uma situação de falta interna. Para a análise da largura desses pulsos, utilizam-se contadores associados à saída da porta lógica *AND*, os quais contam sempre que i_{AND} estiver em nível lógico alto, conforme ilustrado na Figura 3.2(e). Segundo Kasztenny *et al.* (2006), se i_{AND} permanecer em nível alto ativo durante um período maior que um quarto de ciclo, emite-se um sinal de *trip* aos disjuntores associados, caso contrário, a proteção permanece estável, conforme apresentado na Figura 3.2(e) no lado direito.

Do exposto, percebe-se que o algoritmo é capaz de atuar em tempos de aproximadamente um quarto de ciclo, sendo de um modo geral mais rápido que outras proteção tradicionais baseadas em fasores, as quais possuem atrasos intrínsecos da ordem de 1 a 1,5 ciclo fundamental (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Outro ponto a ser ressaltado é a simplicidade do algoritmo, o qual não requer ajustes em demasia (KASZTENNY *et al.*, 2006). De fato, em aplicações reais, na forma mais simples da função PC, não existem ajustes, visto que o limiar de operação relacionado à largura dos pulsos presentes em i_{AND} é fixado em um quarto de ciclo fundamental. Adicionalmente, cabe ainda destacar que, neste trabalho, os atrasos das proteções estudadas são avaliados em relação ao instante de incidência das faltas simuladas, sem contabilizar o tempo de tráfego de dados no canal de comunicação, o qual deve ser somado aos atrasos nos resultados obtidos.

3.3 USO DE COMPONENTES INCREMENTAIS DE SEQUÊNCIA COM CORREÇÃO DA CORRENTE CAPACITIVA

Em (LEITE *et al.*, 2016), apresenta-se um estudo da aplicação de componentes incrementais na proteção de LTs baseada na função PC, bem como da correção da corrente capacitiva. O trabalho se baseia na análise de diversas condições de faltas e na comparação do tempo de atuação da proteção quando utilizados como sinais de entrada elementos de fase, de sequência e elementos incrementais, com e sem a correção da corrente capacitiva, as quais acarretam desvios de fase nas correntes medidas nos terminais da LT (KASZTENNY *et al.*, 2006).

Conforme reportado por Leite *et al.* (2016), as correntes capacitivas podem sensibilizar a função PC mesmo sem a ocorrência de faltas, especialmente em sistemas com carregamento leve. De fato, as correntes capacitivas são enxergadas como correntes entrando na LT, o que se assemelha a uma situação de curto-circuito interno. Essa defasagem causada pelo efeito capacitivo pode ser amenizada por meio da remoção, no domínio do tempo, da corrente capacitiva i_C que flui pelas capacitâncias do modelo Π -nominal da LT. Segundo Leite *et al.* (2016), essa remoção pode ser realizada usando:

$$i_C = \frac{C}{2} \cdot \frac{du(t)}{dt}, \quad (3.2)$$

onde C é a capacitância da LT e $u(t)$ é a tensão na barra monitorada. Com isso as correntes série $i_{ser}(t)$ nos terminais L e R são calculadas usando:

$$i_{ser,L}(t) = i_L(t) - i_C. \quad (3.3)$$

$$i_{ser,R}(t) = i_R(t) - i_C. \quad (3.4)$$

Portanto, as correntes demonstradas em (3.3) e (3.4) são menos afetadas pelo efeito capacitivo e, por isso, foram consideradas por Leite *et al.* (2016).

Ainda em (LEITE *et al.*, 2016), o uso de elementos incrementais também foi analisado, com o intuito de avaliar possíveis melhorias em relação aos efeitos do carregamento do sistema. Esses elementos são calculados usando (3.5), onde p é o um número arbitrário de ciclos, N é o número de amostra por ciclo e Δt é o período de amostragem.

$$\Delta i(t) = i(t) - i(t - p.N.\Delta t). \quad (3.5)$$

Destaca-se que (3.5) consiste na aplicação do teorema da superposição, no qual o circuito equivalente com falta é decomposto em um de pré-falta e em um puro de falta. Assim, os sinais do circuito puro de falta são obtidos da subtração das grandezas do circuito de pré-falta dos sinais do circuito com falta, minimizando os efeitos do carregamento do sistema.

Analisou-se também a componente de sequência mista i_{12} , conforme descrita por Kasztenny *et al.* (2006). Esse elemento é composto por uma parcela da corrente de sequência positiva e por uma parcela da corrente de sequência negativa, sendo calculado por:

$$i_{12}(t) = i_2(t) - K_1 \cdot i_1(t), \quad (3.6)$$

onde K_1 é o fator de quantidade de sequência positiva no elemento misto, que é, neste trabalho, adotado como $K_1=0,2$.

Do apresentado em relação às componentes simétricas, nota-se que a utilização da componente mista permite a identificação também de faltas simétricas (para as quais só existe sequência positiva), melhorando a atuação da proteção em situações de faltas assimétricas, visto que a sequência negativa não é afetada pelo carregamento do sistema (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010).

Dos resultados reportados por Leite *et al.* (2016), nota-se que elementos incrementais melhoraram a robustez da proteção PC em relação ao carregamento, possibilitando a seleção da fase defeituosa, robustez do algoritmo em cenários severos de carregamento e em elevado valor de SIR, onde o SIR deve ser calculado através da divisão da impedância da fonte e a impedância da linha. Se o valor do SIR for maior que 4 significa uma linha curta cuja fonte é considerada fraca e conseqüente fraca contribuição de corrente de falta, caso contrário, onde o SIR for inferior ou igual a 0,5 caracterizando uma linha longa, cuja fonte é considerada forte e alta contribuição de corrente de falta.

Em resumo, a componente incremental obteve desempenho melhor que as de sequência negativa, evidenciando a possibilidade do uso de elementos incrementais como entrada da função PC de proteção. Porém o ângulo de incidência de falta influenciou consideravelmente, em decorrência dos valores de corrente inicialmente negativos para faltas iniciadas entre 180° e 360° . Por isso, será avaliada também no presente trabalho uma adaptação da versão clássica da função PC, na qual são considerados contadores que atuam de acordo com os valores instantâneos

positivos e negativos dos sinais monitorados.

3.4 APLICAÇÃO FASORIAL DA PROTEÇÃO PC

Em (HINGE; DAMBHARE, 2015), apresenta-se a aplicação da função PC no domínio fasorial. Para tanto, após o processo de estimação dos fasores, comparam-se as fases das correntes em ambos os terminais da LT, viabilizando a identificação de curtos-circuitos internos e externos. Também nessa abordagem, apresentam-se soluções baseadas na análise de fasores fundamentais que permitem a redução de erros na atuação decorrentes do efeito capacitivo das linhas. Para a correção das correntes capacitivas, o modelo II também foi adotado, conforme representado na Figura 3.3.

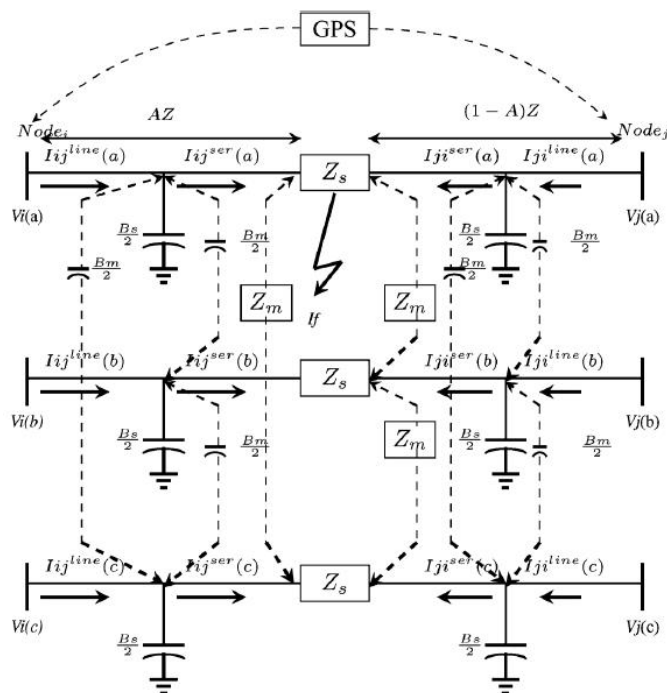


Figura 3.3. Modelo II equivalente de uma LT (HINGE; DAMBHARE, 2015).

Em (HINGE; DAMBHARE, 2015), comparam-se algumas técnicas já existentes, como:

- Função PC convencional com base nas correntes de linha das fase A, B e C, calculando-se a diferença angular $\Phi = \theta_L - \theta_R$. Nesta aplicação, obtém-se $|\Phi| < 180^\circ - \theta_c - \theta_s$ para faltas internas, onde θ_c representa o erro de ângulo devido às correntes capacitivas e θ_s o ângulo de operação que delimita as regiões angulares de operação e restrição;
- Função PC com base nas correntes de sequência positiva, analisando-se novamente a

diferença angular $\Phi_1 = \theta_{L,1} - \theta_{R,1}$;

- Função PC com base nas correntes de sequência mista, analisando-se mais uma vez a diferença angular $\Phi_{12} = \theta_{L,12} - \theta_{R,12}$.

Dos resultados reportados por Hinge & Damhare (2015), nota-se que o uso de componentes de sequência impossibilitam a identificação das fases com falta, perdendo-se a seletividade de fases. Ainda, o desempenho do elemento misto se mostra mais vantajoso em relação ao uso da componente de sequência positiva pura, especialmente em situações de carregamento mais elevado. Entretanto, também para o elemento misto, perde-se a seletividade de fases, o que não ocorre quando da utilização dos elementos de fase. Neste contexto, vale ressaltar que a aplicação da função PC no domínio de fases é confiável e segura, mas requer o processo de estimação de fases, o qual, em geral, introduz atrasos adicionais às funções de proteção. Por isso, neste trabalho, consideram-se estudos para o desenvolvimento de uma função aplicada no domínio do tempo, que seja independente da estimação de fasores e que tenha tempo de atuação menor do que as versões tradicionais da função PC baseadas nos valores instantâneos das correntes medidas.

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se uma breve revisão bibliográfica e a apresentação dos fundamentos da proteção PC de LTs. Foi possível constatar que a técnica PC é simples, podendo ser implementada no domínio do tempo e no domínio fasorial. Apresentou-se ainda que, idealmente, a diferença angular das correntes nos terminais local e remoto de uma LT sinaliza a presença de faltas internas (ângulo resultante de $\approx 0^\circ$), ou de faltas externas (ângulo resultante de $\approx 180^\circ$), fatos estes que embasam as aplicações no domínio do tempo e da frequência.

O uso de elementos de fase, elementos incrementais e de elementos de sequência, com e sem correção da corrente capacitiva também foram comentados. Em resumo, pode-se dizer que os elementos incrementais são benéficos em relação à redução dos efeitos do carregamento do sistema e a remoção da corrente capacitiva é benéfica em relação ao efeito capacitivo das LTs. O uso de elementos de sequência, incluindo o elemento misto, também pode trazer melhorias para a função PC, muito embora elimine a seletividade de fases por parte da proteção.

Do exposto e sabendo que, atualmente, a função PC tem atraído a atenção de concessionárias de energia elétrica por sua simplicidade e confiabilidade, apresenta-se no próximo capítulo uma nova abordagem da proteção PC que analisa os sinais de saída da TDQ. Por se tratar de um estudo inicial, apenas correntes de fase foram analisadas, sem incorporar procedimentos para cálculo de grandezas incrementais e para a remoção do efeito capacitivo de LTs.

DESCRIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Neste capítulo, apresenta-se um desenvolvimento alternativo da função PC para identificação de falta em LTs. Trata-se de um método que se baseia na comparação de fases aplicando a TDQ para fins de identificação de desequilíbrios nos sinais de corrente.

Na solução apresentada, a TDQ é utilizada não apenas para realizar o pré-processamento dos sinais de entrada da função PC, mas também, para detectar o início de distúrbios em LTs, servindo como um algoritmo de ativação da proteção. Para tanto, utiliza-se como referência o algoritmo proposto por Lopes *et al.* (2013b) e Lopes (2014b). Este algoritmo permite uma rápida detecção de faltas por meio da identificação de desequilíbrios das correntes monitoradas, garantindo detecções rápidas mesmo em casos nos quais as contribuições de curto-circuito não são relevantes.

Nas próximas seções, apresentam-se fundamentos da TDQ, bem como detalhes da implementação da solução proposta.

4.1 TRANSFORMADA DE PARK PARA DETECÇÃO DE FALTAS

Proposta em 1929 por Robert Park (PARK, 1929), a Transformada de Park, também conhecida como TDQ, tem sido importante no estudo de máquinas elétricas síncronas de polos salientes. De fato, a TDQ permite que indutâncias normalmente variantes no tempo, que são obtidas a partir de um sistema de referencia fixo, comecem a ser consideradas com valores constantes, sob um sistema referencial girante (LOPES *et al.*, 2012). Em resumo, no estudo de máquinas elétricas, a TDQ viabiliza a análise de tensões e correntes por meio de eixos referenciais girantes, denominados de eixo direto e eixo em quadratura, que giram em sincronismo com o rotor da máquina a uma frequência angular ω_s , como demonstrado na Figura 4.1.

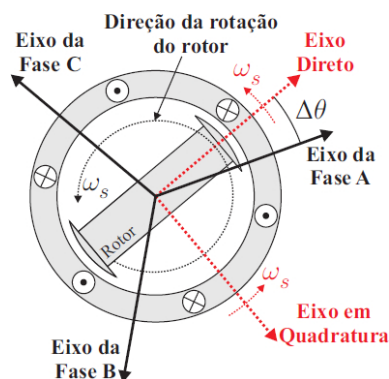


Figura 4.1. Uso da TDQ no estudo de máquinas elétricas (KRAUSE, 1984).

Como a TDQ veio a simplificar de maneira considerável os procedimentos matemáticos dessas análises, ela tem se tornando uma ferramenta muito difundida e adotada pela engenharia elétrica, não só para estudo de máquinas elétricas, mas também na análise de componentes de alta frequência, análise de registros oscilográficos, detecção de faltas em LT e dentre outras aplicações que constam na literatura (LOPES, 2014b).

No caso em particular da detecção de faltas em LT, a TDQ pode ser aplicada de forma similar, produzindo eixos referenciais que iram girar na mesma frequência angular do sistema elétrico, sincronizados com os fasores de tensão e corrente, como mostrado na Figura 4.2 (LOPES *et al.*, 2012).

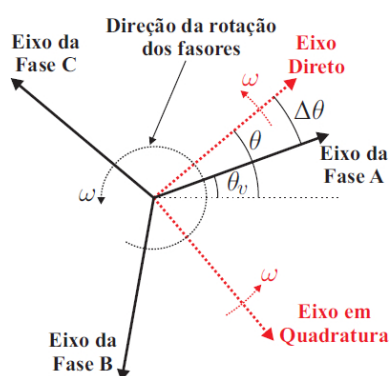


Figura 4.2. Uso da TDQ no monitoramento de sistema elétrico de potência trifásico (KRAUSE, 2002).

Do exposto, uma vez que os eixos direto e em quadratura giram em sincronismo com as grandezas elétricas do sistema monitorado, pode-se concluir que tensões e correntes em regime permanente, em situações nas quais predomina apenas a frequência fundamental, as grandezas de eixo direto e quadratura tendem a permanecer com valores praticamente constantes, enquanto que, durante desequilíbrios, a exemplo dos causados por distúrbios no sistema, são

verificadas variações passíveis de detecção (LOPES, 2014b). Para exemplificar o referido comportamento das saídas da TDQ, considera-se um caso reportado por Lopes *et al.* (2012), através do qual é possível observar uma aplicação da TDQ para um registro oscilográfico real referente a uma falta monofásica iniciada em uma amostra k_1 e que é eliminada na amostra k_2 , conforme ilustrado na Figura 4.3.

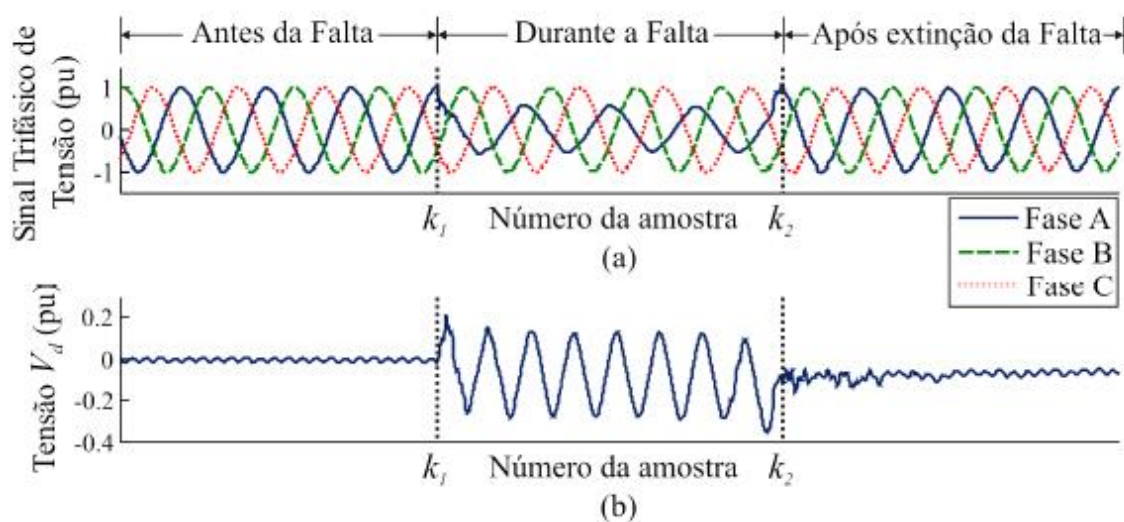


Figura 4.3. Detecção de transitórios em um registro real via TDQ. (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto V_d (LOPES *et al.*, 2012).

Do exposto, nota-se que a componente de eixo direto obtida usando TDQ é de fato aproximadamente constante durante o regime permanente do sistema e apresenta oscilação durante o distúrbio, a qual esta associada ao desequilíbrio das grandezas de fase da rede elétrica (LOPES, 2014b). O comportamento da grandeza de eixo em quadratura é similar, exceto da inclusão de um nível CC em seus valores.

Uma característica importante da TDQ diz respeito à sua sensibilidade a desequilíbrios, o que se assemelha à análise da sequência negativa e zero. Entretanto, as oscilações nas saídas da TDQ decorrentes do desequilíbrio do sistema apresentam frequência igual ao dobro da frequência fundamental (LOPES, 2014b), diferentemente da sequência negativa, por exemplo, que oscila na própria frequência fundamental. Com isso, percebe-se a possibilidade de desenvolver uma proteção PC mais rápida, porém com sensibilidade similar aos elementos de sequência mista, negativa e/ou zero.

No presente trabalho, o algoritmo proposto se baseia na análise das correntes de eixo direto e em quadratura, I_d e I_q respectivamente, que são obtidas após a aplicação da TDQ nos sinais

trifásicos monitorados. As componentes de eixo direto e em quadratura obtidas a partir da TDQ serão referenciadas daqui em diante por A_d e A_q , respectivamente. Para calcular essas componentes, utiliza-se:

$$\begin{bmatrix} A_d(k) \\ A_q(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{dq} \begin{bmatrix} A_a(k) \\ A_b(k) \\ A_c(k) \end{bmatrix} \iff \mathbf{A}_{dq} = \mathbf{P}_{dq} \cdot \mathbf{A}_{abc} , \quad (4.1)$$

onde,

$$\mathbf{P}_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\phi) & \text{sen}(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\phi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} , \quad (4.2)$$

sendo k o índice da k -ésima amostra dos sinais, \mathbf{A}_{abc} os sinais trifásicos de tensão ou de corrente do sistema, \mathbf{A}_{dq} as componentes de eixo direto (V_d e I_d) e em quadratura (V_q e I_q), $\phi = k\omega\Delta t + \theta$, ω é a frequência angular nominal do sistema, Δt é o período de amostragem dos sinais usado durante a conversão A/D dos sinais monitorados, θ é o ângulo de fase da componente A_d e $\Delta\theta = \theta - \theta_a$ (ângulo de defasagem entre A_d e A_a) (PARK, 1929).

De (4.1), é possível comprovar que não é necessária à utilização de amostras de instantes passados ou posteriores no cálculo das componentes \mathbf{A}_{dq} , o que simplifica a aplicação da TDQ e evita a necessidade de conhecer o registro oscilográfico completo, viabilizando aplicações em tempo real.

Para compreender as oscilações presentes nas componentes da TDQ, necessita-se entender o comportamento das grandezas de eixo direto e em quadratura em situações de desequilíbrio. Por isso, apresentam-se a seguir expressões que auxiliam no referido entendimento, considerando como sinais de entrada da TDQ componentes de fase A_a , A_b e A_c de um sistema trifásico equilibrado, sequência ABC:

$$A_a = A_{am} \text{sen}(\omega_s t + \theta_v) , \quad (4.3)$$

$$A_b = A_{bm} \text{sen}(\omega_s t + \theta_v - 120^\circ) , \quad (4.4)$$

$$A_c = A_{cm} \text{sen}(\omega_s t + \theta_v + 120^\circ) , \quad (4.5)$$

onde A_{am} , A_{bm} e A_{cm} representam as amplitudes das tensões ou correntes, θ_v é o ângulo de fase da componente A_a (sinal monitorado da fase A) e ω_s a frequência angular do sistema elétrico (incluindo a frequência fundamental e as frequências não-nominais), a qual, no regime permanente, é igual a $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência nominal do sistema, que neste trabalho vai ser considerado 60 Hz) (LOPES, 2014b).

Seguindo o desenvolvimento, aplica-se a TDQ por meio de (4.1), sintonizando os eixos referenciais síncronos na frequência ω . Como resultado, após aplicar as devidas simplificações trigonométricas, são obtidas as componentes de eixo direto e em quadratura, A_d e A_q , respectivamente (LOPES, 2014b):

$$\begin{aligned} A_d = & \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{sen}[(\omega + \omega_s)t + \theta + \theta_v] \right. \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{cos}[(\omega + \omega_s)t + \theta + \theta_v] \\ & \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{sen}[(\omega - \omega_s)t + \theta - \theta_v] \right\} , \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} A_q = & \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{cos}[(\omega + \omega_s)t + \theta + \theta_v] \right. \\ & - \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}[(\omega + \omega_s)t + \theta + \theta_v] \\ & \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{cos}[(\omega - \omega_s)t + \theta - \theta_v] \right\} . \end{aligned} \quad (4.7)$$

Analisando (4.6) e (4.7), nota-se que as saídas da TDQ são compostas por componentes nas frequências: $(\omega + \omega_s)$, decorrentes de desequilíbrios entre as grandezas de fase; e $(\omega - \omega_s)$ quando da ocorrência de desvio de frequência. Neste trabalho, uma vez que as componentes de eixo direto e em quadratura apresentam comportamentos similares, opta-se pela utilização apenas das correntes de eixo direto nos terminais L e R da LT monitorada.

4.1.1 Sistema Equilibrado Sem Desvio de Frequência

Considerando-se um sistema trifásico equilibrado, tem-se que $A_{am} = A_{bm} = A_{cm} = A_m$ e $\omega = \omega_s$. Aplicando essa condição em (4.6) e (4.7), obtém-se (LOPES, 2014b):

$$A_d = -A_m \text{sen}(\theta - \theta_v) , \quad (4.8)$$

$$A_q = -A_m \text{cos}(\theta - \theta_v) . \quad (4.9)$$

Do exposto, comprova-se que, nessa situação, são geradas componentes aproximadamente constantes durante o regime permanente, com amplitude aproximadamente nula quando $\theta = \theta_v$, conforme ilustrado na Figura 4.3 anteriormente.

4.1.2 Sistema Desequilibrado Sem Desvio de Frequência

Considerando-se um sistema trifásico desequilibrado, tem-se que $A_{am} \neq A_{bm} \neq A_{cm}$ e $\omega = \omega_s$. Aplicando essa condição em (4.6) e (4.7), obtém-se (LOPES, 2014b) :

$$\begin{aligned} A_d = & \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{sen}(2\omega t + \theta + \theta_v) \right. \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{cos}(2\omega t + \theta + \theta_v) \\ & \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{sen}(\theta - \theta_v) \right\}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} A_q = & \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{cos}(2\omega t + \theta + \theta_v) \right. \\ & - \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}(2\omega t + \theta + \theta_v) \\ & \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{cos}(\theta - \theta_v) \right\}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

De (4.10) e (4.11) é possível notar que em casos nos quais existe desequilíbrio entre as fases, surgirão duas componentes: uma constante e uma com o dobro da frequência nominal (2ω), cujas amplitudes dependem da diferença entre as amplitudes dos sinais de fase avaliados (LOPES, 2014b).

No algoritmo proposto para o trabalho, usando θ_0 (usado no trabalho $\theta_0 = 0$) como uma estimativa aleatória inicial de θ no regime permanente, e com o objetivo de fazer com que os valores durante o regime permanente sejam aproximadamente nulos, o alinhamento entre os eixos da fase A e do eixo direto foram realizados por meio da expressão a seguir (LOPES, 2014b):

$$\theta_v = \theta_0 - \tan^{-1} \left[\frac{A_d(\theta_0)}{A_q(\theta_0)} \right]. \quad (4.12)$$

Com isso, nas iterações sucessivas da TDQ, utiliza-se $\theta = \theta_v$, o que promove a compensação da diferença entre os eixos da fase A e do eixo direto, fazendo com que os valores de eixo direto no regime permanente fiquem em torno de zero.

4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE CORRENTE DE ENTRADA

Para uma correta digitalização dos sinais analógicos, é necessário o processamento dos sinais de entrada dos algoritmos de proteção implementados em dispositivos microprocessados (ANDERSON, 1999). Dentre essas etapas, destaca-se a aplicação de filtros *anti-aliasing* para

eliminação de frequências superiores à de Nyquist (PHADKE; THORP, 2009), procedimento este que antecede o processo de digitalização dos sinais monitorados. Fundamentos dessas etapas são apresentados a seguir, visto que a influência de cada uma será considerada na etapa de avaliação do algoritmo proposto.

4.2.1 Filtro *Anti-Aliasing* Analógico

Pelo Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada de frequência de amostragem f_s , deve ser maior que o dobro da maior frequência f_{max} a ser analisada no sinal monitorado. Só assim, torna-se possível reproduzir sem erro as componentes de frequência de interesse após o processo de digitalização (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Em termos matemáticos, tem-se então que:

$$f_s > 2f_{max} . \quad (4.13)$$

Em consequência do exposto, a metade da frequência de amostragem é chamada frequência de Nyquist f_N , a qual corresponde ao limite máximo de frequência do sinal que pode ser reproduzido após o processo de digitalização, ou seja:

$$f_N \approx f_{max} > \frac{f_s}{2} . \quad (4.14)$$

Portanto, antes do processamento digital que se inicia na saída de cada conversor digital, é necessário eliminar frequências superiores à de Nyquist dos sinais a serem digitalizados, evitando-se a sobreposição de espectros (efeito *aliasing*). De fato, essas componentes de alta frequência estão tipicamente presentes no período de falta devido aos transitórios decorrentes da mudança abrupta do ponto de operação do sistema (LOPES *et al.*, 2013a). Por isso, utilizam-se normalmente filtro analógicos passa-baixa Butterworth, os quais são tipicamente de 1ª a 3ª ordem, para evitar maiores atrasos de fase dos sinais digitalizados (PHADKE; THORP, 2009). Adicionalmente, em termos práticos, sabe-se que a frequência de corte f_c dos filtros *anti-aliasing* deve ser menor que a frequência de Nyquist, seguindo a relação:

$$f_c < f_N . \quad (4.15)$$

Na Figura 4.4(a), exemplifica-se a resposta em frequência de módulo do filtro *anti-aliasing*, demonstrando a atenuação de frequências mais elevadas. Adicionalmente, na Figura 4.4(b),

ilustra-se o comportamento dos sinais antes e depois da aplicação do filtro *anti-aliasing* no tempo, comprovando a atenuação dos transitórios originalmente presentes no sinal monitorado.

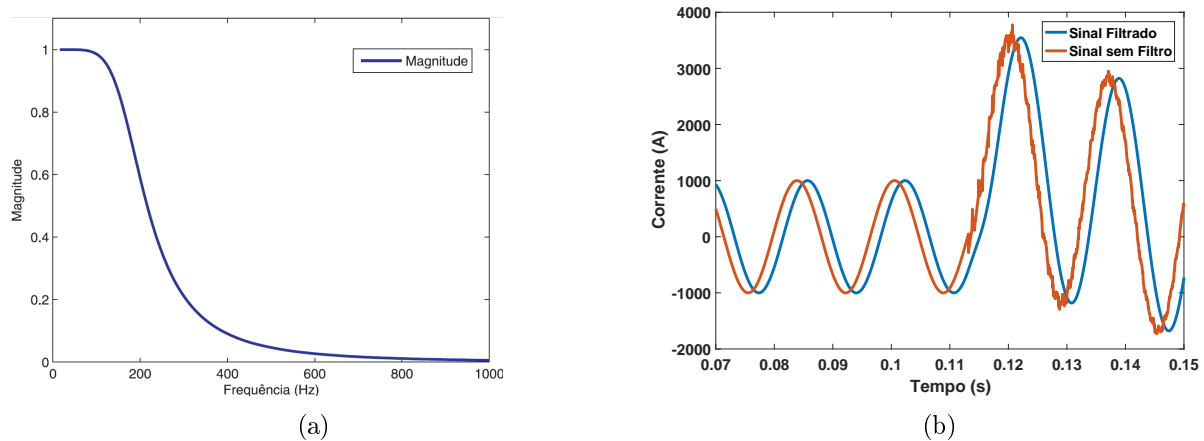


Figura 4.4. Filtro analógico. (a) Resposta em frequência (b) Sinais antes e depois da aplicação do filtro.

4.2.2 Amostragem dos Sinais

O processo de amostragem consiste na aquisição de amostras de um sinal analógico em intervalos de tempo bem definidos, ou seja, com uma determinada frequência de amostragem f_s , transformando os sinais analógicos em suas versões discretizadas.

Nas Figuras 4.5(a) 4.5(b), apresenta-se um sinal de corrente em suas versões analógica e digitalizada. Cabe ressaltar que, neste trabalho, considerou-se uma resolução ideal do conversor A/D.

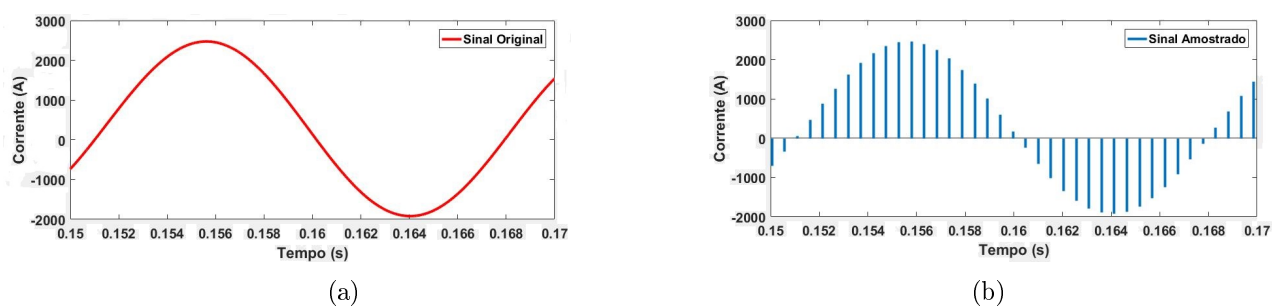


Figura 4.5. Sinal de corrente. (a) Original (b) Digitalizado.

4.3 PROCESSAMENTO DAS CORRENTES DE EIXO DIRETO

Existem algumas situações em que a detecção do instante inicial do distúrbio nos pontos monitorados se torna difícil e isso faz com que o sistema se torne vulnerável a falsas identificações de distúrbios, onde o *trip* é acionado de forma incorreta, como em casos onde a combinação do tipo de falta, do ângulo de incidência e da impedância de falta resulta em variações suaves dos sinais de corrente. Conseqüentemente, a amplitude da componente de eixo direto A_d nos instantes iniciais da falta pode não apresentar variações consideráveis em comparação aos valores de regime permanente, o que pode comprometer a precisão da estimativa calculada do instante inicial do transitório (LOPES, 2014b).

É importante frisar que, na proteção PC baseada na TDQ, o processo de detecção do instante inicial do curto-circuito é crucial, visto que, durante o regime permanente, a característica não-oscilatória dos sinais de eixo direto não permite a aplicação dos fundamentos da comparação de fases. Essa detecção deve ser confiável e sensível, visto que é a partir dela que a nova função PC inicia o processamento das correntes medidas na LT.

Com o intuito de tornar o algoritmo de detecção do instante inicial de faltas mais robusto em relação a ruídos elétricos presentes dos sinais analisados e reduzir os efeitos da atenuação das variações verificadas nos primeiros instantes de falta, utiliza-se o equacionamento proposto por Lopes *et al.* (2013b), onde se propõe a utilização de grandezas diferenciais $c_{dif}(k)$ das componentes de eixo direto e de suas energias janeladas ξ_{dif} , respectivamente. Essas energias são calculadas por meio de uma janela de dados móvel no tempo que desliza sobre os coeficientes $c_{dif}(k)$, atualizando suas amostras a cada conversão A/D. Os coeficientes e energias são calculadas usando:

$$c_{dif}(k) = A_d(k) - A_d(k - 1) , \quad (4.16)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-N_e+1}^k [c_{dif}(n)]^2 , \quad (4.17)$$

onde $A_d(k)$ é a k -ésima amostra da componente A_d , $c_{dif}(k)$ é a k -ésima amostra das grandezas incrementais, $\xi_{dif}(k)$ é a energia da k -ésima janela de dados onde se encontram armazenados valores de $c_{dif}(k)$ e N_e é o tamanho da janela, em número de amostras, utilizada para cálculo das energias ξ_{dif} janeladas. Neste trabalho, o tamanho desta janela é adotado como sendo igual ao ciclo fundamental, ou seja, $N_e = \frac{N}{2}$.

De forma a exemplificar esta etapa de processamento das componentes de eixo direto, considera-se o exemplo reportado por Lopes (2014b) que é ilustrado na Figura 4.6, através do qual é possível observar as formas de onda de A_d , c_{dif} e ξ_{dif} calculadas para correntes de um registo oscilográfico real de uma falta transitória monofásica, auto-extinta alguns ciclos após seu início.

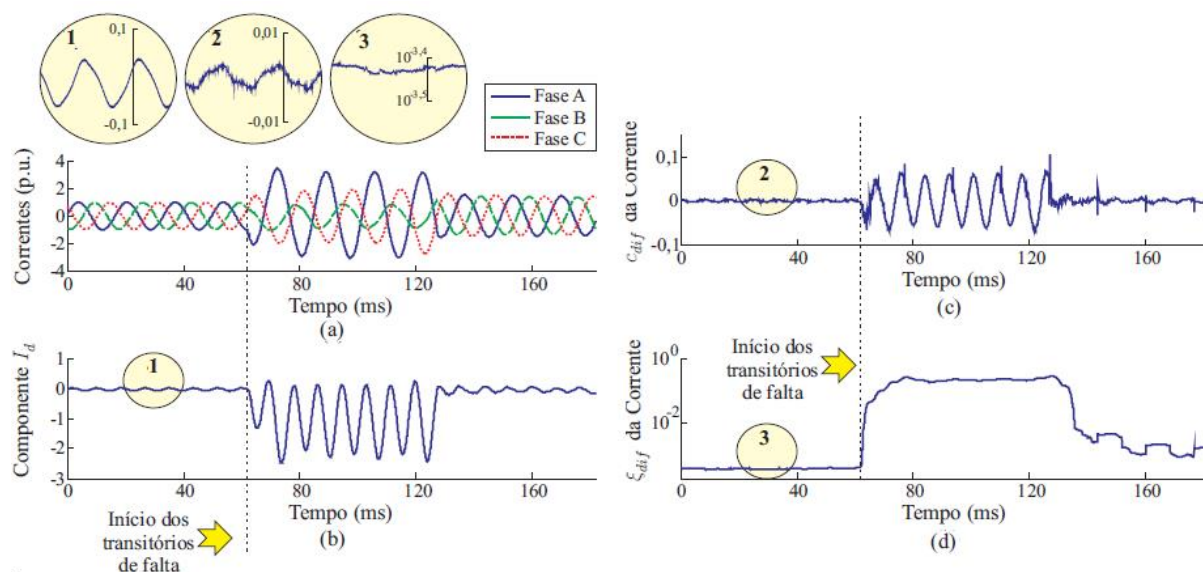


Figura 4.6. Processamento das componentes de eixo direto (a) sinal trifásico de corrente; (b) componente de eixo direto da corrente (I_d); (c) coeficiente c_{dif} da corrente; (d) energia ξ_{dif} da corrente (LOPES, 2014b).

É possível então observar através das Figuras 4.6 algumas características importantes de I_d , c_{dif} e ξ_{dif} em um sistema elétrico de potência na presença de um distúrbio. Como pode ser observado nas áreas ampliadas numeradas de 1 a 3, durante o regime permanente, as componentes de eixo direto e o coeficiente c_{dif} apresentam pequenas alterações, que podem ser provenientes de pequenos desequilíbrios do sistema elétrico ou também de ruídos. Já em relação à energia ξ_{dif} , é possível observar que as variações são mais suaves no regime permanente quando são comparadas às oscilações presentes na grandeza incremental c_{dif} e também na componente de eixo direto, o que evita detecções indevidas durante a operação normal do sistema. Além disso, ξ_{dif} varia rapidamente após o início da falta, viabilizando a detecção rápida do distúrbio. Para tanto, o mesmo processo de detecção proposto por Lopes (2014b) foi utilizado no presente trabalho.

4.3.1 Eliminação da Componente CC da Corrente I_d

Na Figura 4.2, foi possível observar que θ é o ângulo de fase da componente A_d , θ_v é o ângulo de fase da componente A_a (sinal monitorado da fase A) e $\Delta\theta = \theta - \theta_v$ (ângulo de defasagem entre A_d e A_a). Do exposto anteriormente, sabe-se que, utilizando (4.12) durante o regime permanente, pode-se calcular θ_v , cujo valor é utilizado para alinhar o eixo direto com o eixo da fase A. Desse modo, faz-se $\Delta\theta = 0^\circ$, resultando em correntes de eixo direto aproximadamente nulas.

Em detrimento ao procedimento supracitado, sabe-se também que, durante uma falta, ocorrem variações de fase nas correntes do sistema monitorado, de tal modo que o alinhamento de eixos realizados ainda no regime permanente é perdido. Como consequência, aparece uma componente CC no sinal de corrente de eixo direto, a qual deve ser eliminada antes da aplicação dos fundamentos da proteção PC.

No algoritmo proposto, as componentes CC presentes nos sinais de corrente de eixo direito calculados para as barras L e R são removidos por meio da aplicação da primeira derivada dos referidos sinais. Por meio deste procedimento, a componente CC é eliminada sem grandes acréscimos na carga computacional do algoritmo proposto. Na Figura 4.7, apresenta-se um sinal de corrente de eixo direito antes e depois da aplicação da derivada.

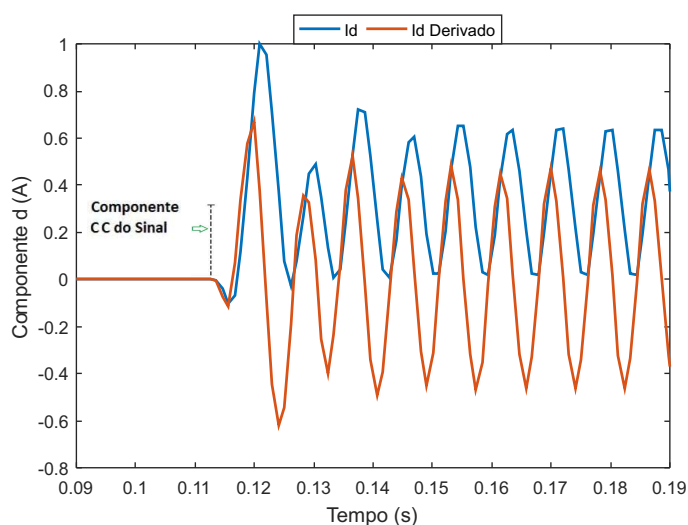


Figura 4.7. Sinais de corrente de eixo direito antes e depois da derivada.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DA FALTA UTILIZANDO A TDQ

O método proposto para identificação de faltas se baseia na formulação da função PC, porém considerando como sinais de entrada as correntes de eixo direto nos terminais L e R obtidas a partir da TDQ. Embora sejam representadas no domínio TDQ, essas correntes guardam informação da direcionalidade das correntes nos terminais da LT, permitindo a aplicação dos fundamentos da proteção PC. Nas Figuras 4.8(a) e 4.8(b), são apresentadas as correntes de eixo direto derivadas tomadas das barras L e R em situações de faltas internas e externas, respectivamente, considerando uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo. Nota-se que, conforme esperado, para curtos-circuitos internos, as correntes das barras L e R ficam em fase, enquanto que, para curtos-circuitos externos, ficam praticamente em contrafase.

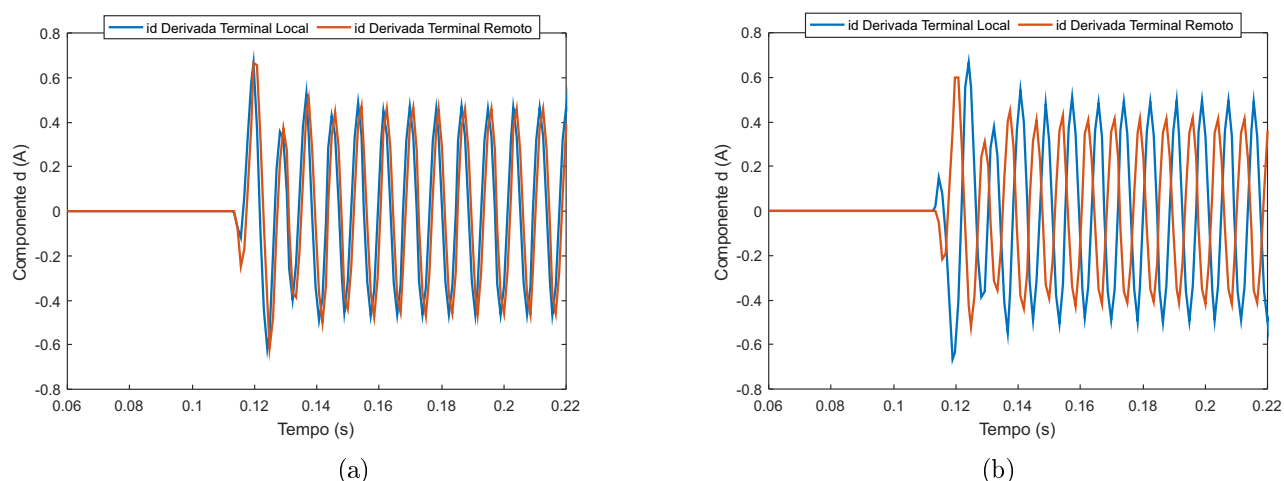


Figura 4.8. Correntes de eixo direto derivadas para: (a) Faltas internas; (b) Faltas externas.

Basicamente, depois de realizado todo o pré-processamento dos sinais monitorados, as correntes de eixo direto derivadas são moduladas, conforme ilustrado nas Figuras 4.9(a) e 4.9(b). Cabe ressaltar que, nessa aplicação, são construídos os sinais modulados para as correntes de eixo direto derivadas e também de suas versões negativas, o que acelera a atuação da proteção em casos nos quais os valores instantâneos das correntes assumem polaridades negativas nos primeiros instantes de falta.

Com a realização do procedimento de modulação para os sinais de corrente de eixo direto dos terminais L e R, o algoritmo realiza em seguida o processamento dos sinais modulados por meio de uma porta *AND*, conforme ilustrado na Figura 4.10, sendo $I_{pos/neg,local}$ a corrente de eixo direto modulada para valores positivos ou negativos do terminal local, $I_{pos/neg,remoto}$ a

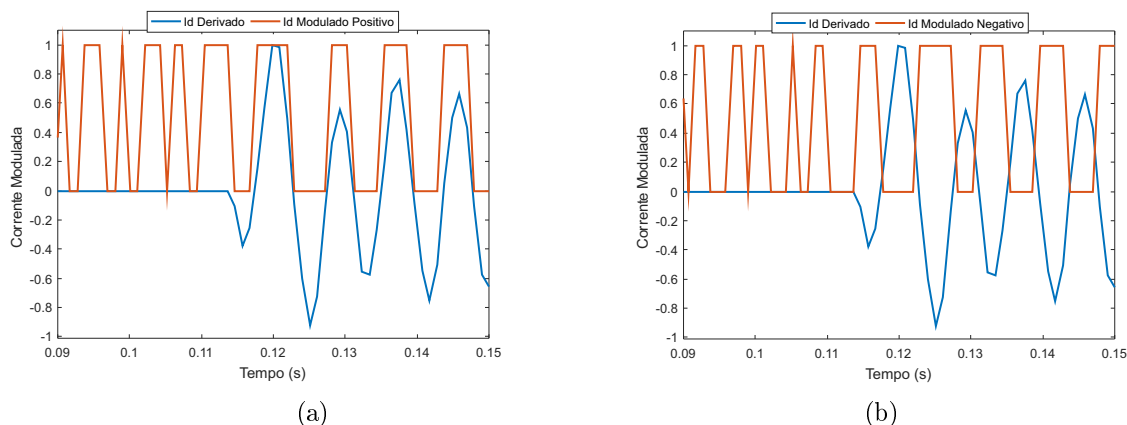


Figura 4.9. Modulação da corrente de eixo direto para (a) valores positivos; (b) valores negativos.

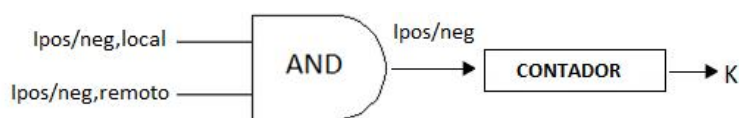


Figura 4.10. Parte do esquema do circuito do módulo identificador de faltas.

corrente de eixo direto modulada da para valores positivos ou negativos do terminal remoto, $I_{pos/neg}$ a corrente resultante da saída da porta *AND* e K é a saída do contador. As Figuras 4.11(a) e 4.11(b) ilustram o sinal da saída da porta *AND* para análises dos valores positivos e negativos dos sinais.

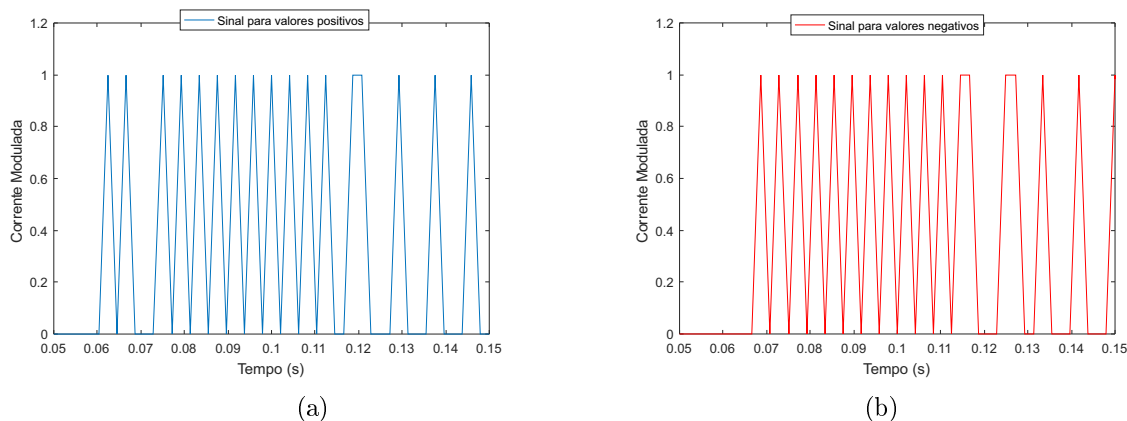


Figura 4.11. Sinal modulado na saída da porta *AND* para (a) valores positivos; (b) valores negativos.

Deve-se lembrar que esse esquema é exatamente o mesmo da versão clássica da função *PC*, exceto da consideração dos sinais com polaridades positiva e negativa, bem como da aplicação da *TDQ* aos sinais de corrente monitorados. Na Tabela 4.1, apresenta-se a tabela verdade para a saída da porta *AND*, onde são comparados os níveis lógicos dos sinais modulados, bem como a ação que o contador deve tomar a diferentes entradas.

Tabela 4.1. Tabela verdade para o circuito do módulo identificador de faltas.

$I_{pos/neg,local}$	$I_{pos/neg,remoto}$	Ação
0	0	Não Incremente o Contador
0	1	Não Incremente o Contador
1	0	Não Incremente -*o Contador
1	1	Incremente o Contador

Assim como para a versão tradicional da função PC, na qual faltas internas à LT monitorada são identificadas quando da detecção de pulsos na saída da porta *AND* com larguras iguais ou maiores que um quarto de ciclo, também é necessária a criação de um limiar de operação para a nova função PC proposta. Neste contexto, é importante lembrar que na versão clássica da função PC, utiliza-se um limiar de $\frac{1}{4}$ de ciclo para a análise de grandezas em 60 Hz. Assim, sabendo que a frequência dos sinais é inversamente proporcional aos seus respectivos períodos e que para sinais oscilatórios em 60 Hz se considera um limiar de $\frac{1}{4}$ de ciclo, uma vez que as correntes de eixo direto oscilam com aproximadamente 120 Hz, o limiar de operação deve ser igual à metade do valor tradicional, ou seja, de $\frac{1}{8}$ de ciclo, e portanto, no algoritmo proposto é utilizado um limiar de $\frac{1}{8}$ do ciclo fundamental. Assim, a proteção identificará uma situação de curto-circuito interno sempre que o contador atingir um valor igual ou maior que $\frac{1}{8}$ de ciclo, ficando estável em caso contrário. Adicionalmente, nota-se que na sua versão clássica, a função PC detecta faltas em tempos de aproximadamente $\frac{1}{60} \cdot \frac{1}{4} \approx 4$ ms, enquanto que a versão baseada na TDQ, é capaz de detectar faltas mais rapidamente, em tempos da ordem de $\frac{1}{60} \cdot \frac{1}{8} \approx 2$ ms. As Figuras 4.12(a) e 4.12(b) ilustram a contagem da largura dos pulsos dos sinais da saída da porta AND para análises dos valores positivos e negativos dos sinais, assim como o limiar de operação definido.

Como última etapa do algoritmo de identificação de faltas baseado na comparação de fases aplicado a TDQ, é necessário definir todas as condições para que o sinal de *trip* ocorra. Na lógica de *trip* do algoritmo proposto, consideram-se os resultados das versões positivas e negativas dos sinais de corrente de eixo direto derivados, apenas após a detecção do distúrbio por meio da análise de crescimentos abruptos da energia ξ_{dif} . Para tanto, utiliza-se uma porta lógica *OR* para tomada de decisão final, conforme ilustrado na Figura 4.13, onde $T_{rip,pos}$ e $T_{rip,neg}$ representam os sinais de *trip* gerados a partir da análise das versões positiva e negativa das correntes de eixo direto derivadas, respectivamente, e T_{rip} representa o sinal de *trip* final.

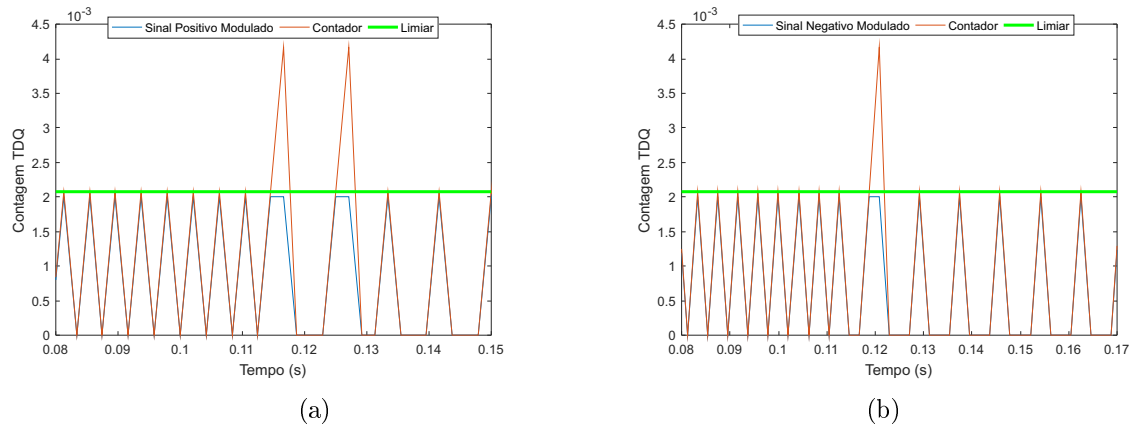


Figura 4.12. Contagem da largura dos pulsos dos sinais modulados na saída da porta AND para (a) valores positivos; (b) valores negativos.

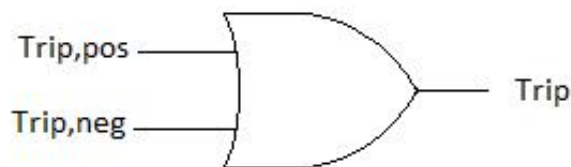


Figura 4.13. Esquema do circuito do módulo de identificação de *trip*.

Na Tabela 4.2, apresenta-se a tabela da verdade para a saída da porta lógica *OR*, onde são comparados os níveis lógicos dos sinais de *trip*, bem como a ação que o algoritmo deve tomar para diferentes valores de $T_{rip,pos}$ e $T_{rip,neg}$.

Tabela 4.2. Tabela verdade para o circuito do módulo identificador de *trip*.

$T_{rip,pos}$	$T_{rip,neg}$	Ação
0	0	Não Envia Trip
0	1	Trip
1	0	Trip
1	1	Trip

No próximo capítulo, apresentam-se os resultados obtidos e as devidas análises quando consideradas a versão clássica da função PC, uma adaptação da versão clássica da função PC e o algoritmo proposto.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados comparativos do tempo de *trip* entre a versão tradicional da função PC, da versão adaptada da função PC e do algoritmo proposto baseado na TDQ frente à variação de parâmetros de falta e dos sistemas de aquisição de dados, como frequência de corte dos filtros *anti-aliasing* e frequência de amostragem. Em resumo, o ATP é utilizado para simular diferentes cenários de falta, viabilizando os testes das versões estudadas da função PC.

5.1 SISTEMA ANALISADO

Na Figura 5.1, apresenta-se o sistema teste analisado, o qual é composto por uma LT de 230 kV/60 Hz com 200 km de extensão. Os circuitos equivalentes de Thévenin, que representam os sistemas conectados em torno das linhas ilustradas, foram configurados de forma a simular valores de *Source Impedance Ratio* (SIR) de 0.2, valor esse escolhido para condição de fonte forte. Para este valor de SIR, consideraram-se as linhas adjacentes às barras 1 e 2, e a LT monitorada, a qual foi equivalente modelada a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. Os dados do sistema são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

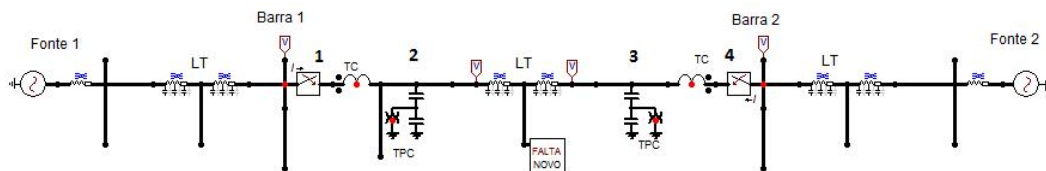


Figura 5.1. Sistema simulado.

Conforme exposto na Tabela 5.2, nota-se que foram adotados diferentes valores para a fase da fonte de tensão S2. Tais valores foram simulados para avaliar diferentes condições de carregamento da LT monitorada. Entre os nós 1 – 2 e 3 – 4 são ligados modelos de TC, cuja

Tabela 5.1. Dados da LT de 230 kV modelada no ATP.

Tensão nominal: 230 kV			
Comprimento da LT: 200 km			
Frequência nominal: 60 Hz			
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$
0,4177	1,5248	0,0346	0,3005
0,4177	1,5248	0,0346	0,3005

Tabela 5.2. Dados dos equivalentes de Thévenin do sistema de 230 kV modelado.

Fonte	Tensão (kV)	Fase (°)	Frequência (Hz)
S1	230	0°	60
S2	230.40	-10; -15; -30 e -45	60

relação de transformação é de 1200 – 5 A. Os transformadores de potencial capacitivos (TPCs), embora modelados, não foram utilizados, visto que não foram realizadas análises dos sinais de tensão nas soluções avaliadas. De fato, as aplicações analisadas não contemplaram a correção da corrente capacitiva da LT¹, se voltando para aplicações baseadas unicamente na análise de sinais de corrente. Adicionalmente, o bloco de falta utilizado é composto por resistências entre as fases e entre cada fase e a terra, além de chaves controladas pelo tempo. Desse modo, torna-se possível simular diversos cenários críticos, variando-se a resistência, tipo e ângulo de incidência do curto-circuito, bem como o local da falta.

5.2 AVALIAÇÃO DO ALGORITMO

Conforme mencionado anteriormente, para avaliar os benefícios do algoritmo proposto em comparação à função PC tradicional, quatro versões da referida proteção foram avaliadas, as quais serão referenciadas daqui em diante como solução tradicional, solução 1, solução 2 e solução 3. As descrições dessas soluções são apresentadas a seguir:

- **Solução Tradicional:** Baseada no método implementado por Kasztenny *et al.* (2006), analisa elementos de fase e considera em sua lógica de *trip* apenas os valores instantâneos positivos das correntes monitoradas;

¹Conforme apresentado no Capítulo 3, o processo de remoção da corrente capacitiva requer medições de tensão.

- **Solução 1:** Baseada também nos fundamentos da Solução Tradicional e considera em sua lógica de *trip* valores positivos e negativos do sinal de corrente analisados;
- **Solução 2:** Baseada na aplicação da TDQ e considera em sua lógica de *trip* apenas os valores instantâneos positivos das correntes avaliadas;
- **Solução 3:** Baseada na aplicação da TDQ e considera em sua lógica de *trip* valores instantâneos positivos e negativos das correntes avaliadas.

No presente trabalho, à princípio, o intuito foi de observar o comportamento dos algoritmos de proteção PC avaliados em relação ao impacto das altas frequências presentes nos sinais monitorados e, por isso, variou-se o valor f_c durante a análise de diferentes situações de falta. Em um segundo momento, decidiu-se optar por uma frequência de corte de aproximadamente 80% da frequência de Nyquist, mantendo-se uma taxa de amostragem fixa de 16 amostras/ciclo ($f_s = 960$ Hz) e considerando filtros *anti-aliasing* de 3ª ordem.

Já no processo de amostragem, para um sistema operando em 60 Hz, considerou-se para análise, taxas de $N = 8, 16, 32, 64, 128$ e 256 amostras/ciclo, resultando nas respectivas frequências de amostragem $f_s = 480$ Hz, 960 Hz, 1920 Hz, 3840 Hz, 7680 Hz e $15,3$ kHz. O objetivo dessa análise foi avaliar o impacto do uso de diferentes taxas de amostragem, as quais resultam em diferentes conteúdos harmônicos. Em um segundo momento, também considerando um sistema com frequência fundamental de 60 Hz, considerou-se uma taxa de $N = 16$ amostras/ciclo, resultando em uma frequência de amostragem $f_s = 960$ Hz.

No total, foram avaliadas diversos cenários de falta e diferentes características do sistema de aquisição de dados simulado, provenientes das variações da frequência de corte dos filtro *anti-aliasing* e do número de amostras por ciclo considerado na digitalização dos sinais, bem como do tipo de falta, dos valores de resistência de falta R_F , do ângulo de incidência θ da falta, da abertura angular entre as fontes δ , para simular diferentes situações de carregamento e da localização da falta d . Para todas as simulações realizadas no presente trabalho, considerou-se um passo de integração de $1 \mu s$ no ATP.

5.2.1 Conjunto de Teste 1: Análise da Variação das Frequências de Amostragem e das Frequências de Corte dos Filtros *Anti-Aliasing*

Como parte da solução proposta, usamos a derivada $\frac{d}{dt}$ nos sinais de correntes de eixo direto analisados. Tal proposta visa eliminar ou atenuar ao máximo a componente CC presente nos sinais. Porém, a derivada tem o comportamento de um filtro passa-altas, fazendo-se necessário avaliar o impacto das altas frequências de amostragem e dos filtros *anti-aliasing* nos algoritmos estudados. Para tanto, foram considerados nos testes diferentes números de amostras por ciclo e diferentes frequências de corte dos filtros *anti-aliasing*. Os parâmetros de falta variados durante as referidas são listados na Tabela 5.3.

Para a realização dos testes, foram considerados para as taxa de amostragem $N = 8, 16, 32, 64, 128$ e 256 amostras/ciclo, com frequências de amostragem $f_s = 480$ Hz, 960 Hz, 1920 Hz, 3840 Hz, 7680 Hz e $15,3$ kHz, respectivamente. Para a apresentação dos resultados, as frequências de corte dos filtros *anti-aliasing* foram normalizadas em relação à frequência de Nyquist f_N , e portanto, teve sua variação percentual até 100% , valor este que indica a utilização de frequências de corte iguais à frequência f_N .

Tabela 5.3. Variações dos parâmetros utilizados para os testes 1.

Parâmetros	Variáveis Simuladas
Ângulo de incidência ($^\circ$)	0 e 90
Carregamento ($^\circ$)	-10; -15; -30 e -45
Resistência de falta R_F (Ω)	0; 20; 50 e 100
Distância d da falta (%)	25; 50 e 75
Tipo de falta	AT

Para avaliar detalhadamente os resultados obtidos, os tempos de *trip* calculados para a solução tradicional e soluções 1, 2 e 3 são apresentados em forma de superfícies, onde o eixo x contém os valores percentuais normalizados da frequência de corte dos filtros *anti-aliasing*, o eixo y contém os valores percentuais da distância de falta d e o eixo z contém os valores médios dos tempos de *trip*. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 para as taxas de $N = 8, 16, 32, 64, 128$ e 256 amostras/ciclo, respectivamente

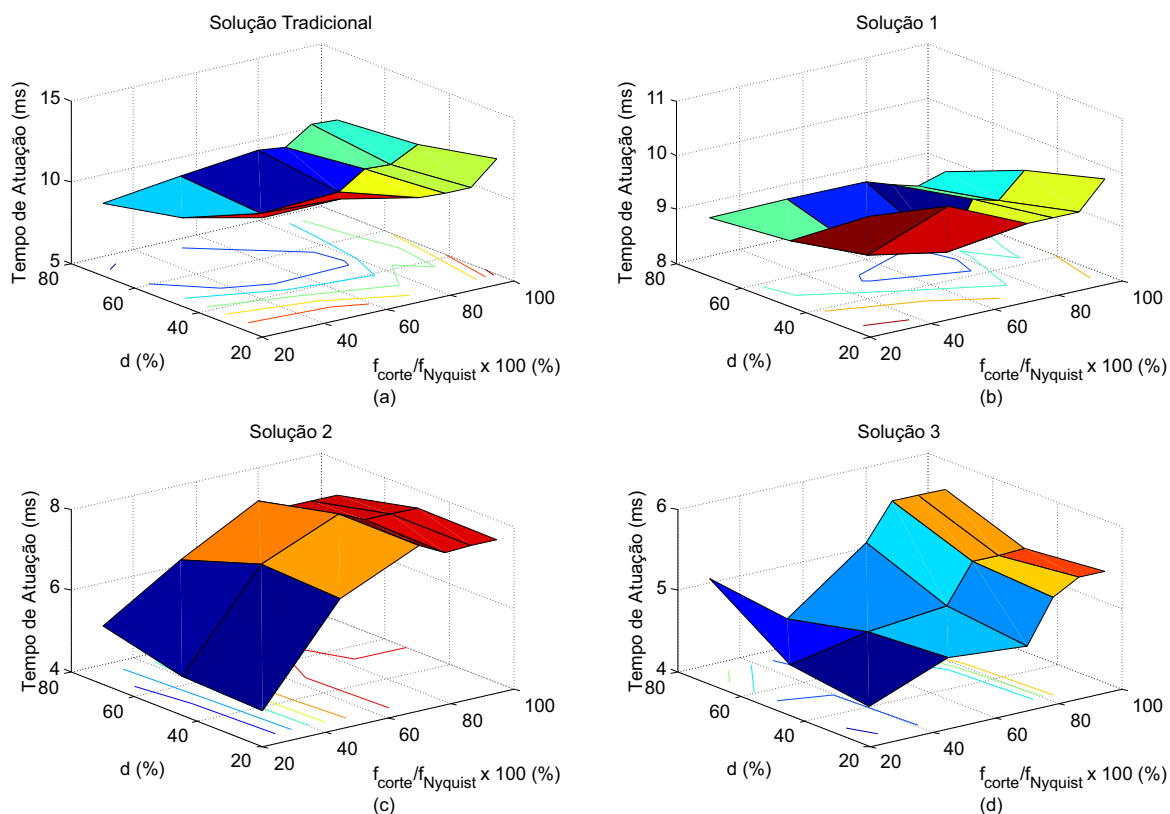


Figura 5.2. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=8$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.

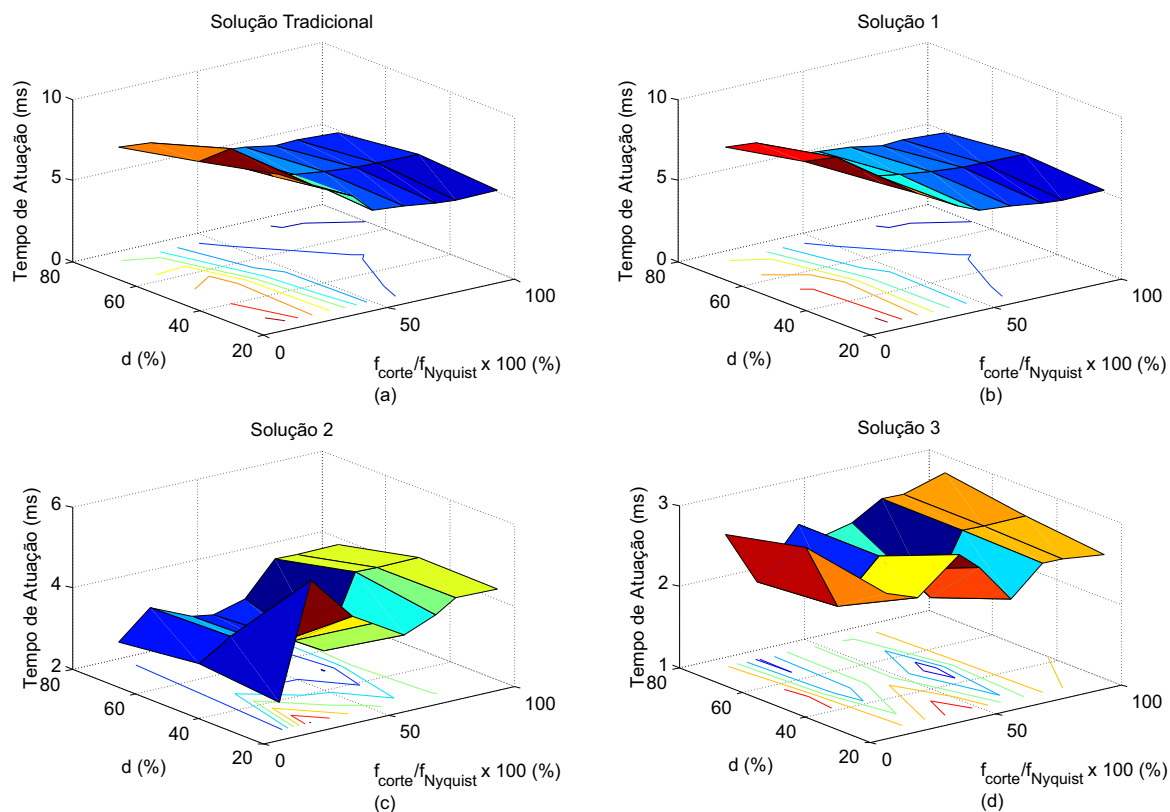


Figura 5.3. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=16$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.

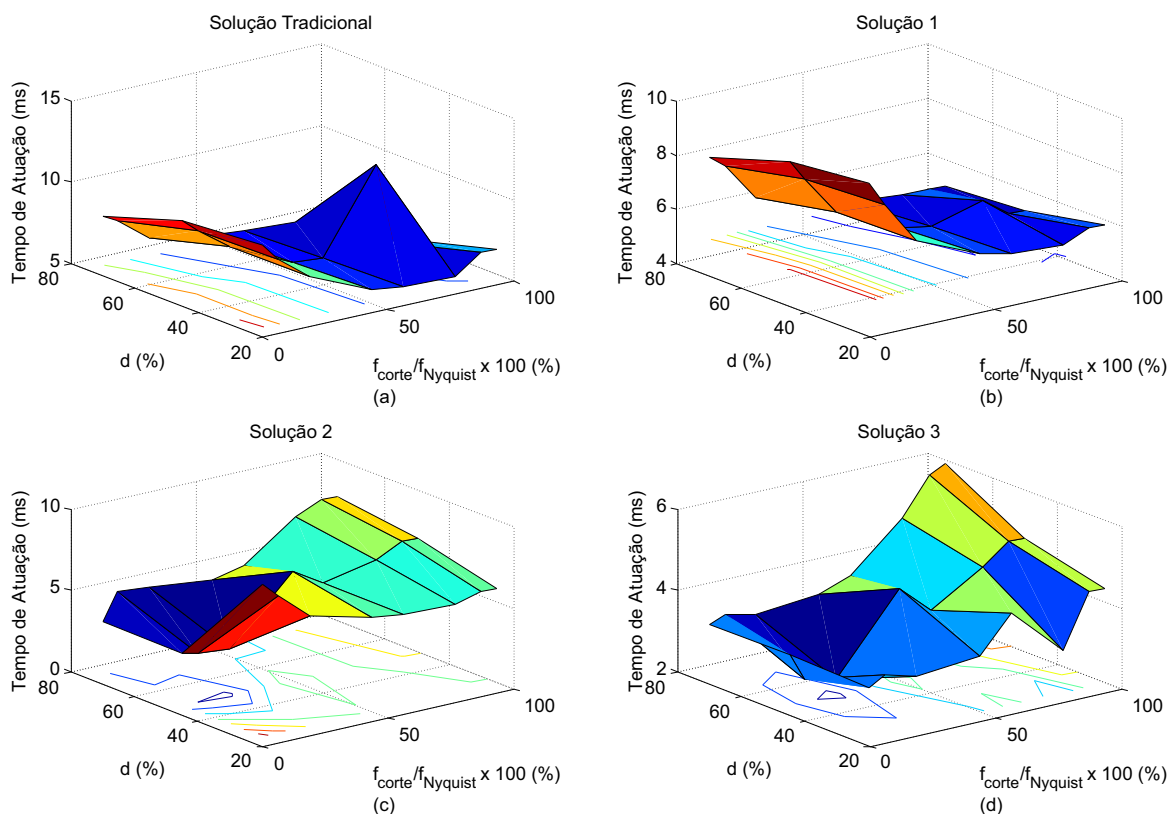


Figura 5.4. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=32$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.

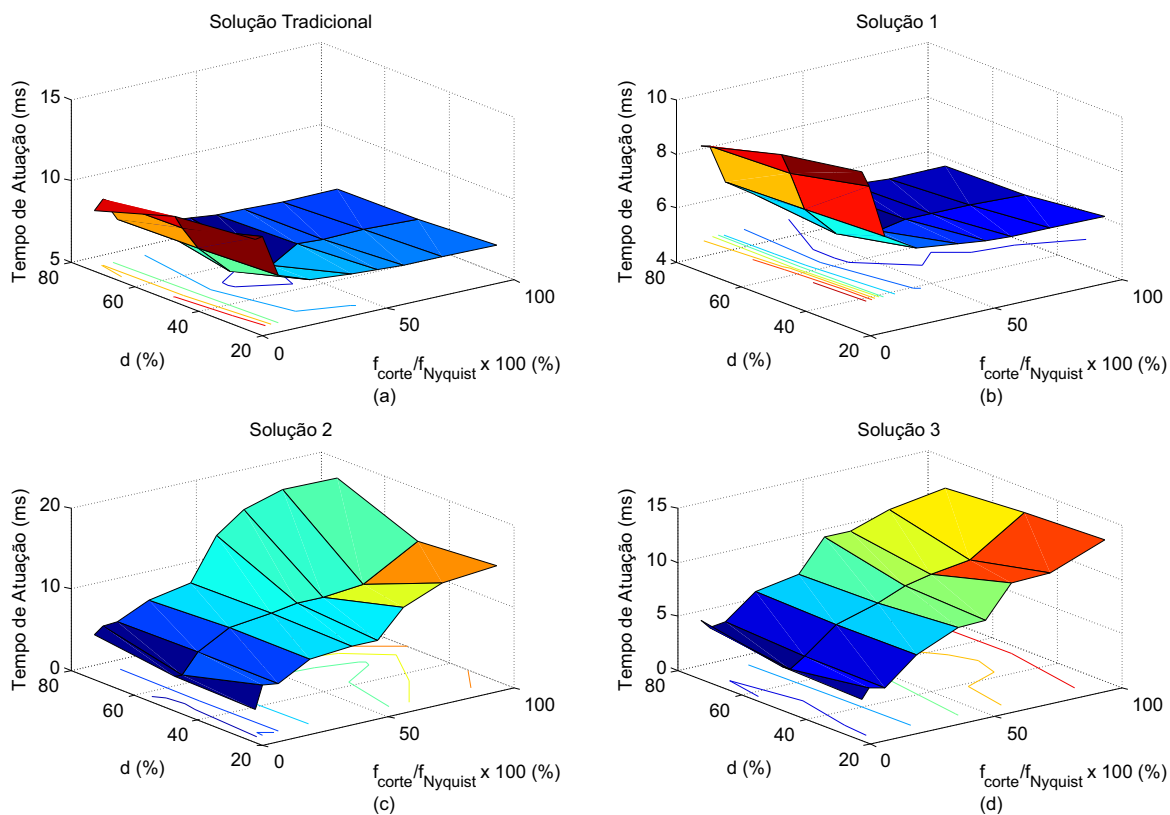


Figura 5.5. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=64$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (b) Solução 3.

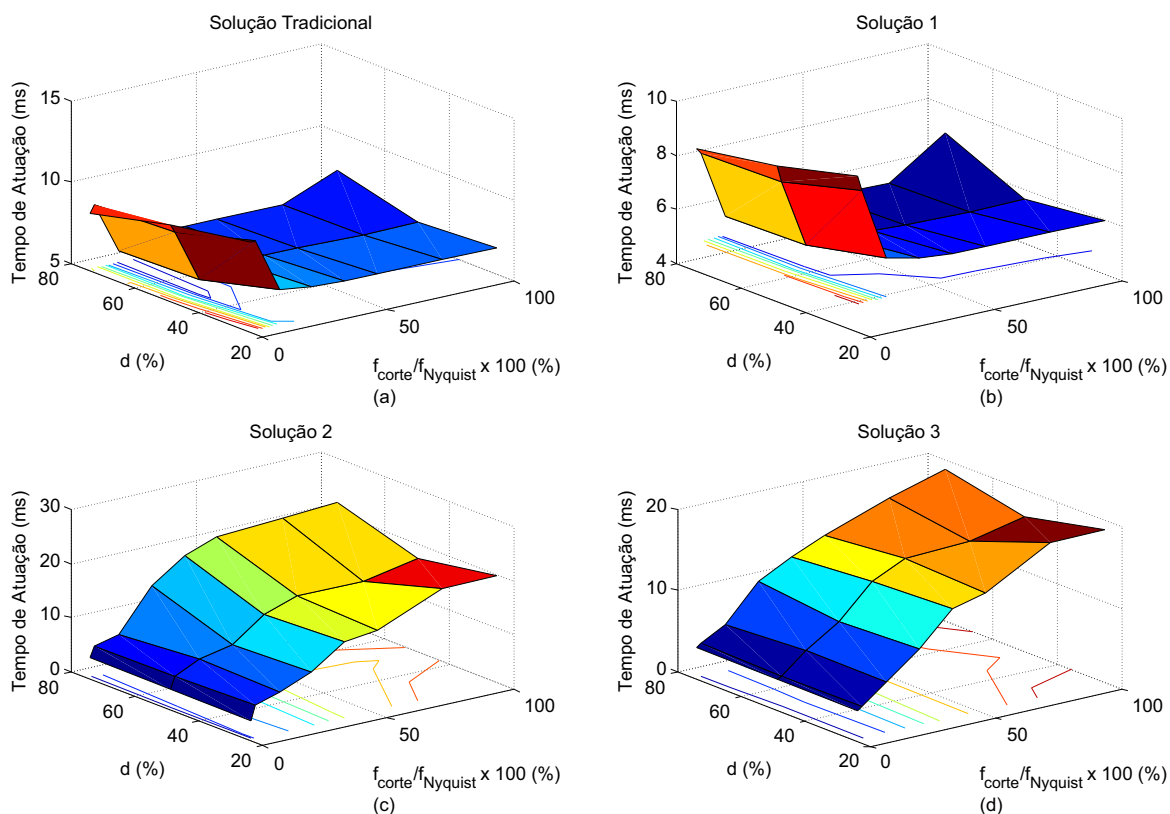


Figura 5.6. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=128$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (d) Solução 3.

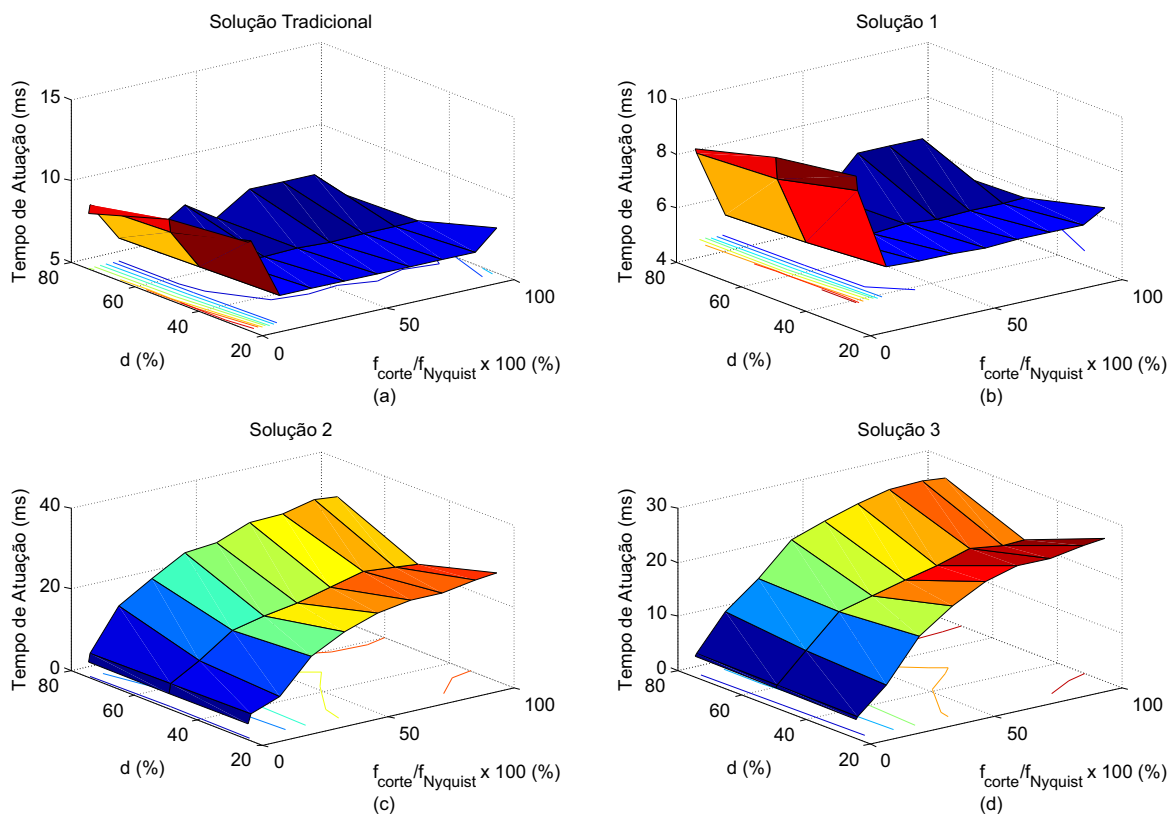


Figura 5.7. Tempos de Atuação para Taxa de Amostragem de $N=256$ para: (a) Solução Tradicional; (b) Solução 1; (c) Solução 2; (d) Solução 3.

Dos resultados obtidos, nota-se que os desempenhos das soluções avaliadas apresentam alterações quando da variação das taxas de amostragem. Nota-se que os melhores desempenhos foram obtidos para $N = 8, 16$ e 32 amostras/ciclo, com destaque para os casos de $N = 16$ nos quais as soluções resultaram nos menores tempos de atuação da função PC e em superfícies relativamente planas. De fato, para $N = 16$, por exemplo, a solução 3 resultou em tempos médios de atuação menores que 3 ms, sendo mais rápida do que a solução tradicional e a solução 1, que atuaram em tempos médios da ordem de 6 ms, e da solução 2, que atingiu tempos médios de atuação da ordem de 5 ms. Adicionalmente, nota-se que a solução tradicional e a solução 1 foram pouco afetadas pela variação das taxas de amostragem, deixando o indício que a influência dessas taxas está relacionada aos procedimentos propostos para as soluções 2 e 3.

Ainda com foco na análise da variação das taxas de amostragem, nota-se que, para $N = 64, 128$ e 256 , ocorreu um aumento significativo nos tempos de atuação, especialmente nas soluções 2 e 3 baseadas na TDQ, o que corrobora com os resultados comentados no parágrafo anterior. Uma vez que tais alterações não são evidentes na solução tradicional e na solução 1, confirma-se então o referido impacto nas soluções 2 e 3 se deve, conforme esperado, ao uso da derivada na eliminação da componente CC das correntes de eixo direto. Tal constatação pode ser justificada pela presença de elevado nível de transitórios no sinal de corrente de eixo direto derivado, conforme ilustrado na Figura 5.8.

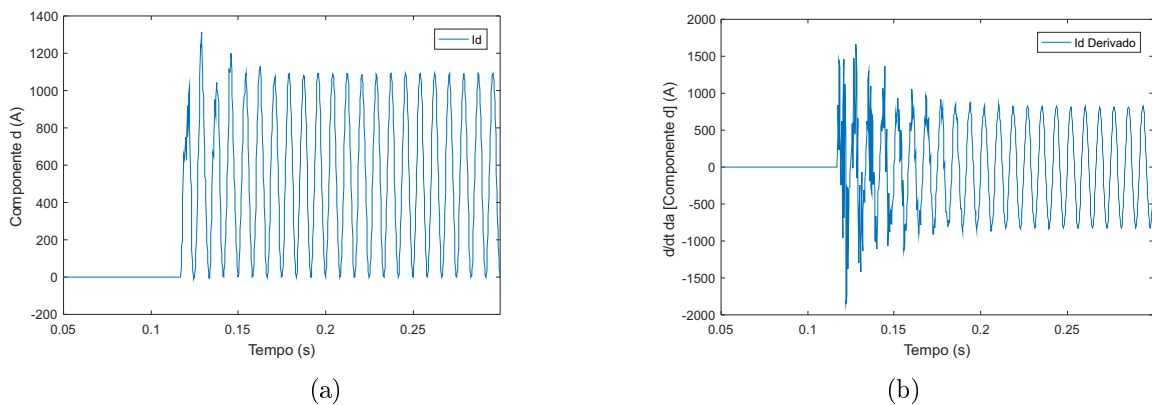


Figura 5.8. Sinal de corrente de eixo direto para altas frequências (a) antes da derivada (b) após a derivada.

Por serem métodos baseados na comparação de fases, a presença de transitórios nos sinais avaliados pela função PC influencia consideravelmente nos tempos de atuação. Conforme ilustrado na Figura 5.9, onde se apresenta a versão ampliada dos transitórios nas correntes de eixo direto derivadas, as sucessivas variações das amplitudes provocam inversões rápidas de

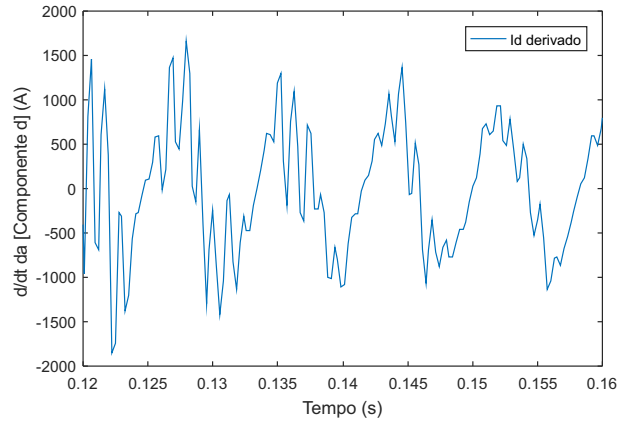


Figura 5.9. Ampliação do sinal corrente de eixo direto derivado para observação dos transitórios

polaridade dos valores instantâneos das correntes analisadas, fazendo com que os contadores sejam resetados indevidamente, resultando em pulsos estreitos nas saída da porta *AND* mesmo durante curtos-circuitos internos. Embora as altas frequências não tenham demonstrado ser decisivas nas análises baseadas em medições das correntes de fase, quando da derivação desses sinais nas análises baseadas na TDQ, as altas frequências ficam mais evidentes, podendo interferir no desempenho da função PC.

Em decorrência do exposto, para os métodos propostos da TDQ, sugere-se a utilização de taxas de amostragem de menor ordem ou mesmo da utilização de filtros digitais passa-baixas aplicados após o processo de derivação das correntes de eixo direto.

5.2.2 Conjunto de Teste 2: Influência da Resistência de Falta

Com base nos resultados obtidos pelo Conjunto de Teste 1, definimos para os testes realizados daqui em diante uma taxa de amostragem $N = 16$ amostras/ciclo, adotando a frequência de corte do filtro *anti-aliasing* como sendo 80% da frequência de Nyquist. Nessa etapa da avaliação, ilustra-se o comportamento das soluções tradicional, 1, 2 e 3 para diferentes valores de resistência de falta R_F . Os parâmetros de falta variados durante as referidas são listados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Variações dos parâmetros utilizados para os testes 2.

Parâmetros	Variáveis Simuladas
Ângulo de incidência ($^{\circ}$)	0 e 90
Carregamento ($^{\circ}$)	-15
Resistência de falta R_F (Ω)	0; 20; 50 e 100
Distância d da falta (%)	25; 50 e 75
Tipo de falta	AT

Para realizar uma avaliação detalhada dos resultados obtidos, os tempos de *trip* calculados para as soluções tradicional, 1, 2 e 3 são apresentados em forma de gráficos de barras, onde o eixo x contém os valores percentuais da localização da falta e o eixo y contém os valores do tempo de atuação de cada solução normalizado pelo tempo de atuação esperado, ou seja, referente a solução tradicional. Por isso, acrescentou-se aos gráficos uma linha horizontal tracejada no valor unitário, a qual marca a relação igualitária entre os tempos de atuação verificados e esperados, de modo que, valores abaixo da linha de referência indicam atuações mais rápidas do que as esperadas originalmente, enquanto que valores acima da linha de referência indicam atuações mais lentas do que a versão tradicional da função PC. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras 5.10 e 5.11, para $\theta = 0^{\circ}$ e $\theta = 90^{\circ}$, respectivamente.

Analisando os resultados obtidos, é possível constatar que as três soluções não sofreram influência significativa nem da localização da falta nem das resistências de falta avaliadas. A solução 1 apresentou desempenho idêntico à solução tradicional, resultando em tempos de atuação normalizados aproximadamente unitários. Por outro lado, as soluções 2 e 3 demonstraram ser vantajosas, resultando em tempos de atuação normalizados de 20%. Para esses casos, a solução tradicional apresentou tempo médio de atuação de aproximadamente 10 ms, permitindo concluir que a atuação das soluções 2 e 3 ocorreu em aproximadamente 2 ms. É possível constatar ainda que as soluções 2 e 3 obtiveram o mesmo desempenho para todos os casos de resistência de falta. Isso demonstra que para os casos avaliados, os valores instantâneos das correntes assumiram valores positivos nos primeiros instantes de falta, não ocasionando diferenças relevantes entre os desempenhos das soluções testadas.

Analisando agora a Figura 5.11, relativa a um ângulo de incidência $\theta = 90^{\circ}$, percebe-se uma maior variação dos resultados obtidos. Nota-se que, novamente, a solução 1 apresentou tempo de atuação normalizado com valor unitário, indicando equivalência com a forma tradicional da

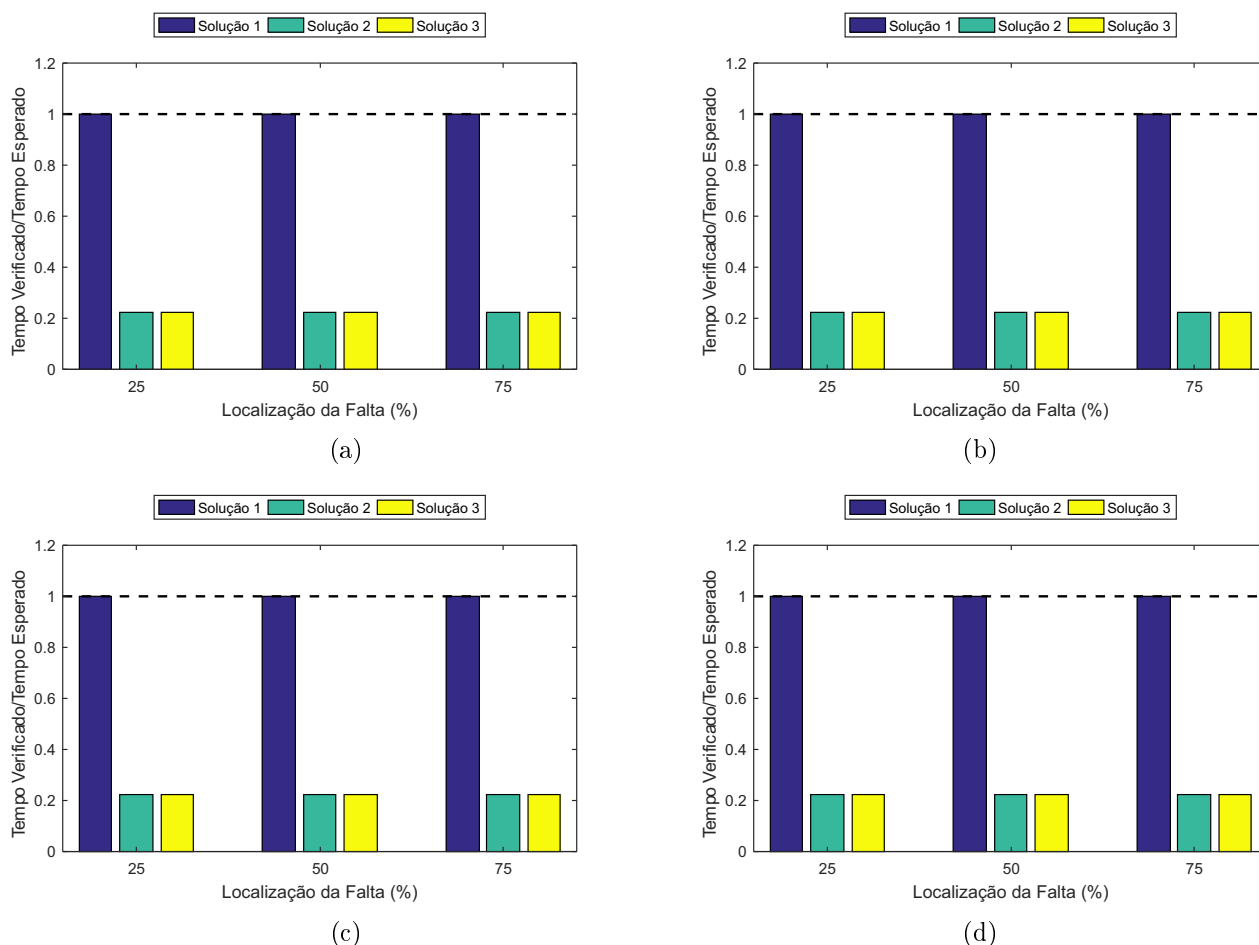


Figura 5.10. Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 0° para resistências de falta iguais a: (a) 0Ω ; (b) 20Ω ; (c) 50Ω ; (d) 100Ω .

função PC. Além disso, a solução 2 apresentou tempos de atuação normalizados acima da linha de referência, demonstrando ter resultado em atuações mais lentas do que o esperado. Por fim, a solução 3 demonstrou ser vantajosa, apresentando tempos de atuação normalizados da ordem de 0,5. Ainda assim percebe-se que o desempenho da solução 3 apresentou uma leve piora em relação ao caso de $\theta = 0^\circ$, o que se deve, conforme explicado anteriormente, à presença de transitórios nas correntes de eixo direto. De fato, para $\theta = 90^\circ$, verifica-se um maior teor de transitórios nos sinais medidos. Ainda assim, comprova-se a vantagem do uso da TDQ, desde que seja considerada a lógica utilizada pela solução 3, na qual são avaliados valores positivos e negativos das correntes analisadas.

Por fim, a variação da resistência de falta dentro da faixa de valores considerados não afetou de forma evidente as soluções em estudo. De fato, embora tenham sido verificadas variações nos tempos de atuação em relação aos da versão tradicional da função PC, esses tempos não excederam muito a linha de referência, demonstrando a robustez das soluções estudadas.

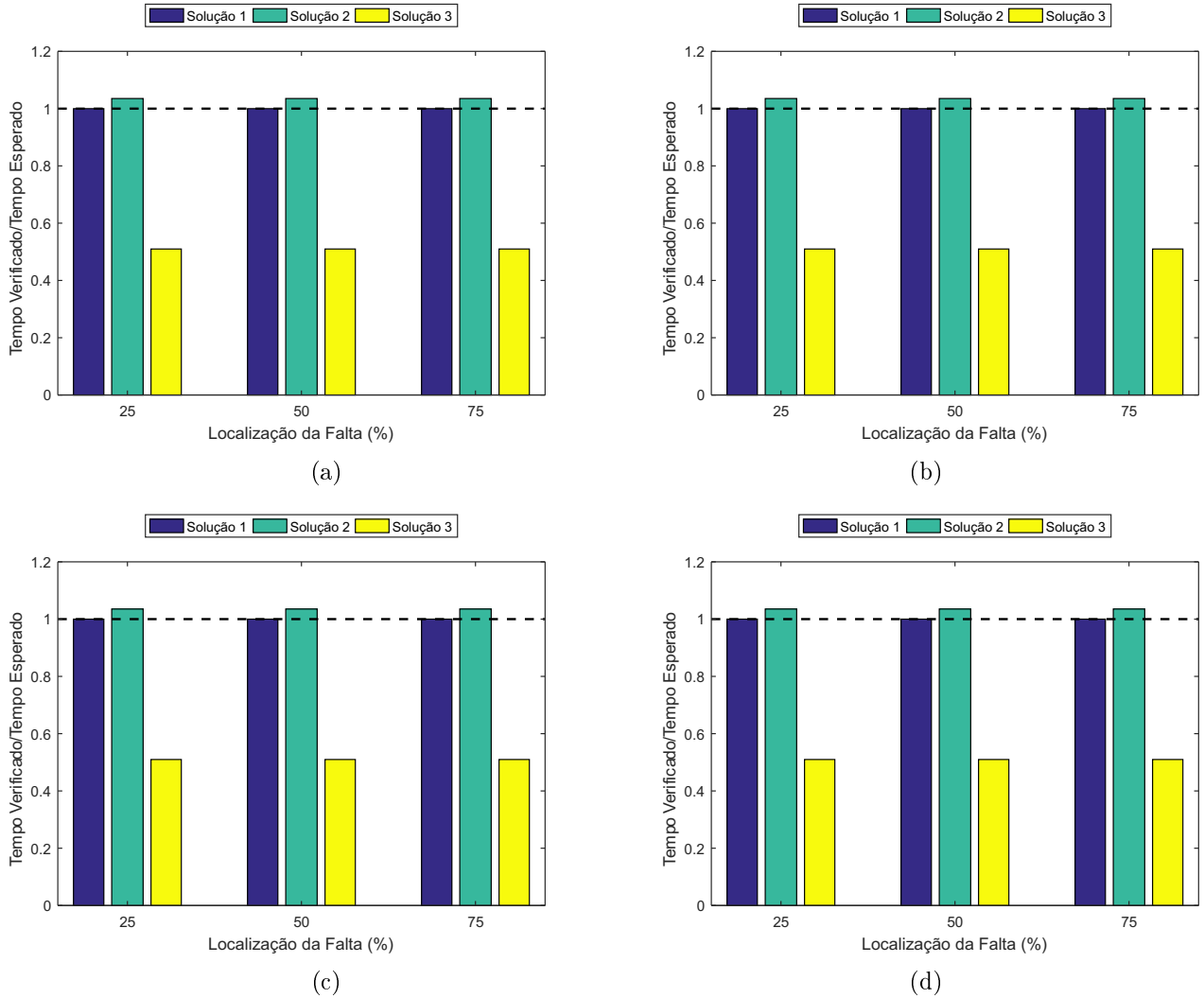


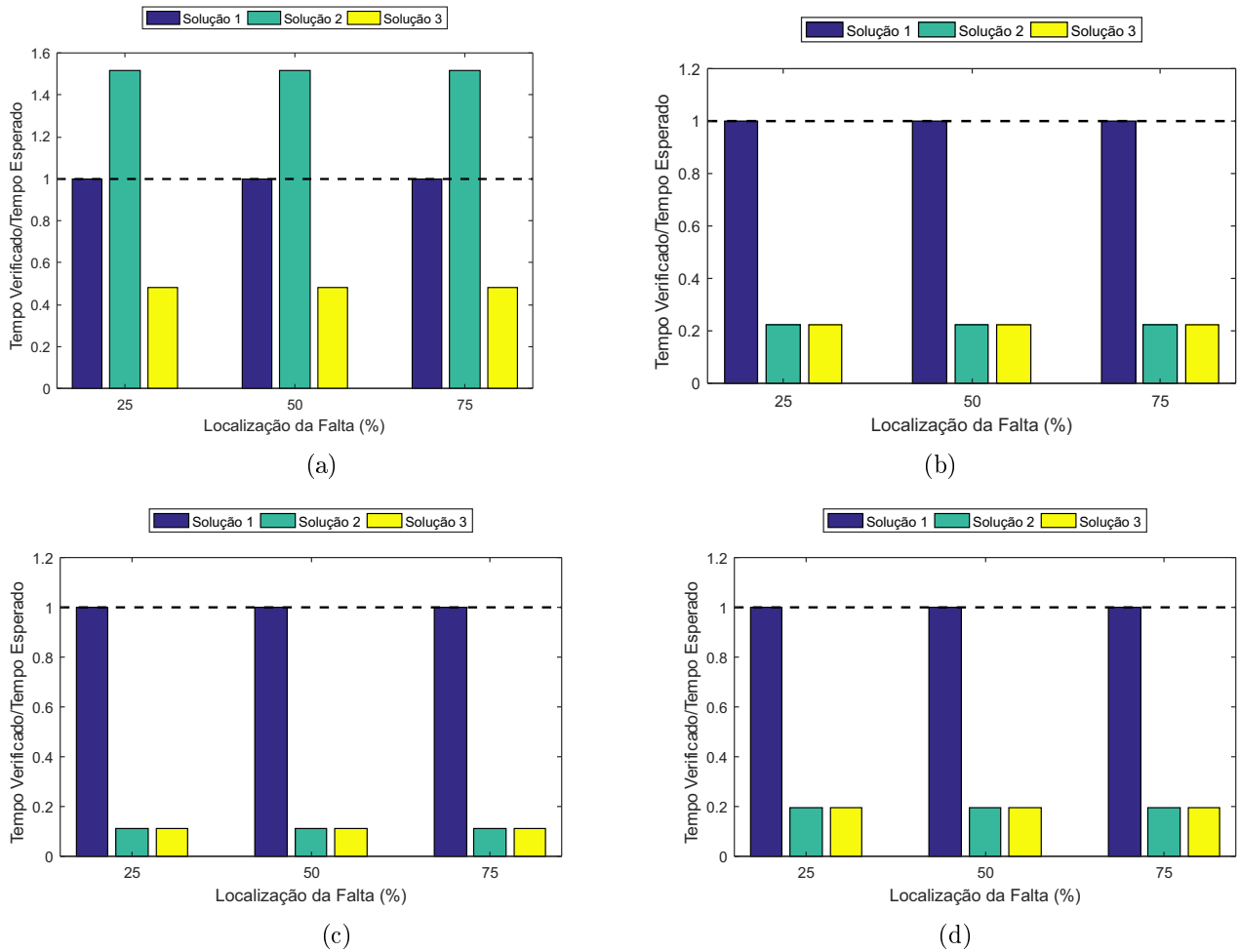
Figura 5.11. Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 90° para resistências de falta iguais a: (a) 0Ω ; (b) 20Ω ; (c) 50Ω ; (d) 100Ω .

5.2.3 Conjunto de Teste 3: Influência do Carregamento do Sistema

Nessa etapa da avaliação, o intuito é de observar a influência do carregamento do sistema para as soluções avaliadas, ilustrando o comportamento dos algoritmos para diferentes valores de carregamento, o qual é simulado por meio da variação da abertura angular δ entre as fontes do sistema. A taxa de amostragem foi mantida em $N = 16$ amostras/ciclo. Os parâmetros de falta variados durante as referidas são listados na Tabela 5.5. As análises são novamente realizadas por meio do estudo de gráficos de barras dos tempos de atuação normalizados em relação à solução tradicional, conforme explicado anteriormente. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, respectivamente.

Tabela 5.5. Variações dos parâmetros utilizados para os testes 3.

Parâmetros	Variáveis Simuladas
Ângulo de incidência ($^\circ$)	0 e 90
Carregamento ($^\circ$)	-10; -15; -30 e -45
Resistência de falta R_F (Ω)	0
Distância d da falta (%)	25; 50 e 75
Tipo de falta	AT

**Figura 5.12.** Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 0° para carregamentos provenientes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° .

Das figuras apresentadas, para $\theta = 0^\circ$, percebe-se que a atuação da solução 1 não diferiu significativamente da solução tradicional, apresentando tempo de atuação normalizado aproximadamente unitário. Para $\delta = -15^\circ$, -30° e -45° , não foram verificadas grandes alterações nas atuações das soluções 2 e 3, as quais diferiram de forma mais relevante apenas para $\delta = -10^\circ$. Entretanto, para $\theta = 90^\circ$, o mesmo não é verificado, comprovando um efeito cruzado entre carregamento e o ângulo de incidência de falta. Ainda assim, para todos os casos, a solução 3

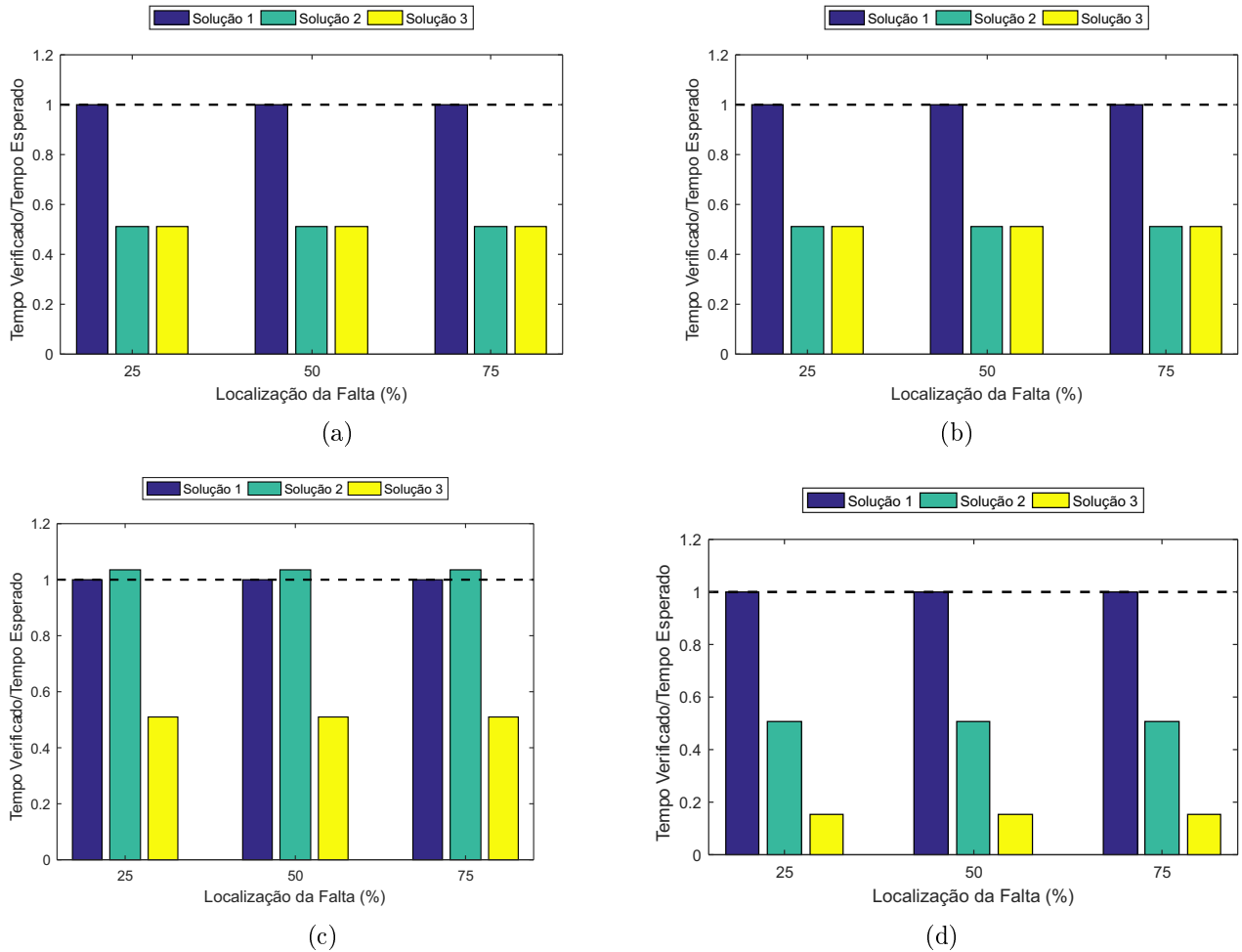


Figura 5.13. Resultados do tempo de atuação com ângulo de incidência de 90° para carregamentos provenientes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° .

demonstrou ser novamente a mais vantajosa, com tempos de atuação sempre menores do que os esperados para a solução tradicional. As atuações mais rápidas foram da ordem de 15% do tempo de atuação da versão clássica da função PC, comprovando a eficácia do uso da TDQ para acelerar a operação da proteção.

5.2.4 Conjunto de Teste 4: Diferentes Tipos de Falta

Até o presente momento, apenas faltas monofásicas do tipo AT foram utilizadas como base para comparação dos desempenhos das soluções em estudo. Portanto, o intuito dessa etapa da avaliação é ilustrar o comportamento das soluções 1, 2 e 3 em relação à solução tradicional, considerando outros tipos de falta. A taxa de amostragem foi mantida em $N = 16$ amostras/ciclo. Os parâmetros de falta variados durante as referidas são listados na Tabela 5.6

Tabela 5.6. Variações dos parâmetros utilizados para os testes 4.

Parâmetros	Variáveis Simuladas
Ângulo de incidência ($^{\circ}$)	0
Carregamento ($^{\circ}$)	-10; -15; -30 e -45
Resistência de falta R_F (Ω)	0
Distância d da falta (%)	25; 50 e 75
Tipo de falta	AB; ABT e ABC

Os resultados obtidos para a falta AB são apresentados na Figura 5.14.

Dos resultados obtidos, foi possível constatar que a variação da localização d resultou em uma pequena variação no tempo de atuação da Solução 3. Já para as outras soluções, as variações nos tempos de atuação foram desprezíveis quando da variação de d , conforme ilustrado

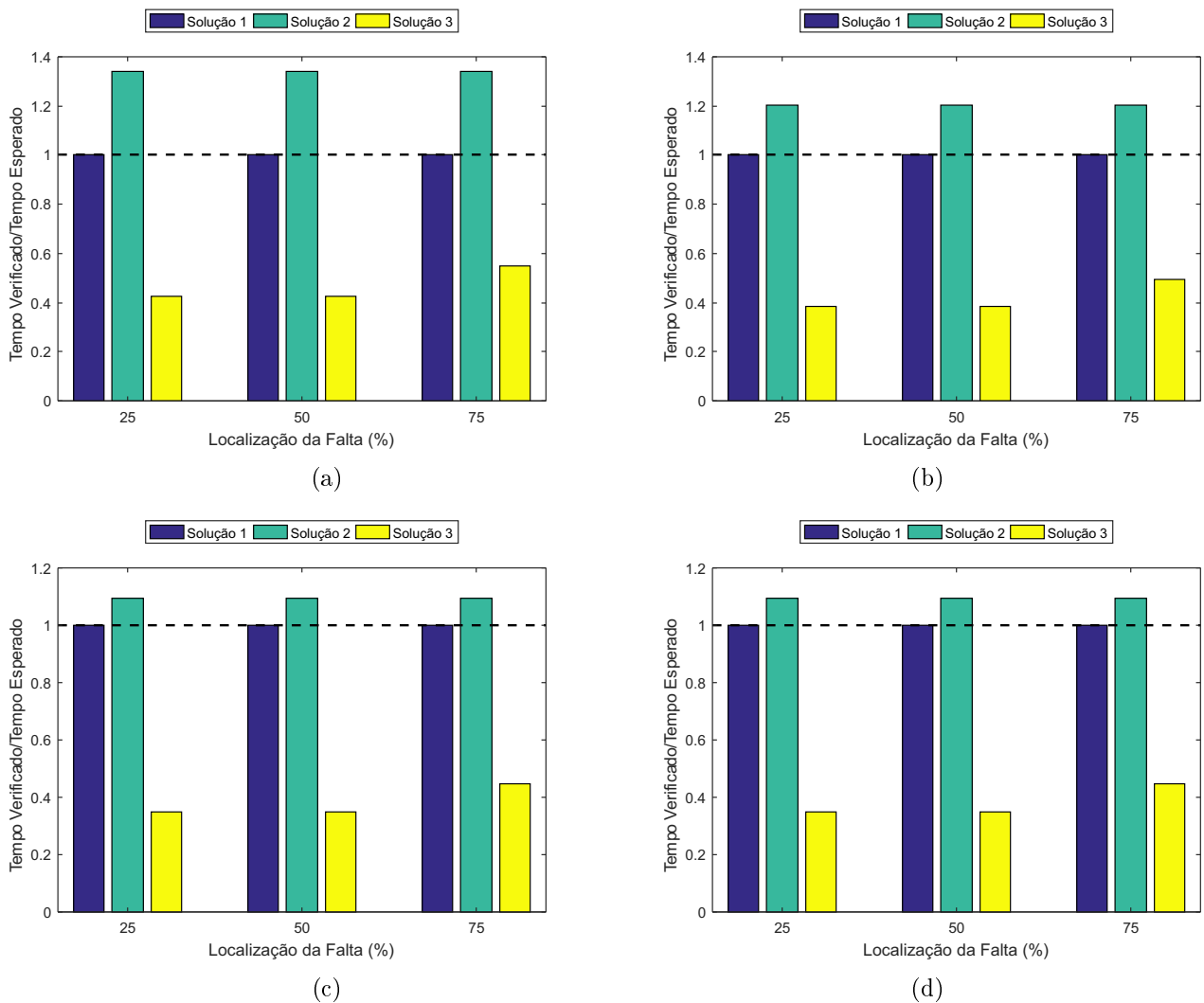


Figura 5.14. Resultados do tempo de atuação para falta do tipo AB para carregamentos decorrentes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° .

na referida Figura 5.14.

Em todas as situações de carregamento, a Solução 2 obteve os piores resultados. Tal fato é justificado pela aparição de amostras negativas da corrente de eixo direto derivada no início da falta, atrasando a Solução 2. Por outro lado, a solução 3 demonstrou ser novamente vantajosa e confiável. Além disso, nota-se que, novamente, a solução 1 apresentou tempo de atuação normalizado aproximadamente unitário, evidenciando um desempenho equivalente ao da solução tradicional. Neste contexto, cabe ressaltar que os resultados obtidos para as faltas ABT foram idênticos, sinalizando que as soluções não são afetadas de forma significativa pela presença do terra na falta. Na Figura 5.15, apresentam-se os resultados obtidos para a falta ABC.

De um modo geral, percebe-se que as soluções 2 e 3 baseadas na TDQ apresentam mais dificuldades na detecção de faltas simétricas. Tal constatação faz sentido, visto que, para esse tipo de curto-circuito, não são verificados desequilíbrios e, portanto, não surgem componentes

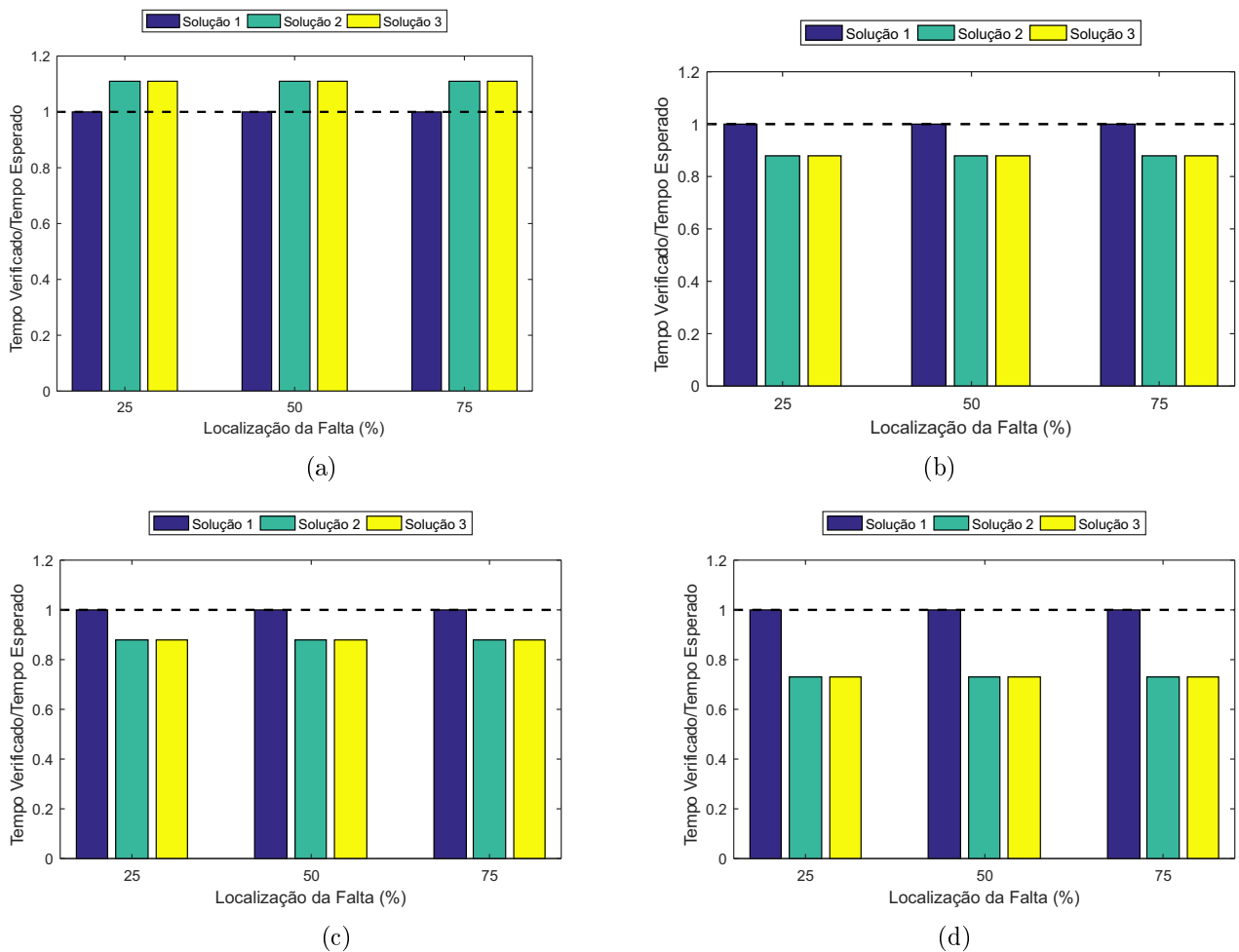


Figura 5.15. Resultados do tempo de atuação para falta do tipo ABC para carregamentos decorrentes de valores de δ iguais a: (a) -10° ; (b) -15° ; (c) -30° ; (d) -45° .

de 120 Hz nas componentes de eixo direto. Assim, ao derivar os sinais, dificulta-se o processo de identificação de faltas internas, podendo resultar, inclusive, na não atuação da proteção. Felizmente, para os casos avaliados, o próprio período de transição do regime permanente para o regime de falta viabilizou a atuação das soluções 2 e 3, com tempos da ordem de 70% dos tempos esperados para a solução tradicional.

5.2.5 Faltas Externas, *Outfeed* e Análise dos Tempos de Atuação das Soluções Avaliadas

Para que uma proteção seja considerada confiável, é necessário que esta atue em casos de curtos-circuitos internos e permaneça estável em casos de faltas externas. Nesse sentido, cabe frisar que várias simulações de faltas externas foram realizadas no sistema teste avaliado e, em todas elas, as funções baseadas na TDQ permaneceram estáveis, conforme esperado. De fato, as correntes de eixo direto derivadas permaneceram com grandes defasagens entre si, evitando que os contadores da lógica de operação das soluções atingissem os limiares de operação.

Também foram analisados no sistema teste avaliado, casos de *outfeed*. Esses casos foram simulados considerando a ocorrência de faltas internas com elevada resistência e altos carregamentos do sistema. Em todos os casos de *outfeed* simulados, tanto a função PC tradicional quanto as suas versões baseadas na TDQ não atuaram, permanecendo estáveis. De fato, a combinação de uma elevada resistência de falta com altos valores de carregamento fez com que as correntes de carga do sistema predominassem sobre as contribuições de curto-circuito. Assim, para a função PC tradicional, a corrente na fase com falta não inverteu o sentido como esperado, e, similarmente, para TDQ, as correntes de eixo direto derivadas ficaram praticamente em contrafase, resultando, na maioria dos casos, na não identificação do curto-circuito interno, conforme desejado. Ainda assim, percebe-se que esta problemática afetou todos os métodos, evidenciando a necessidade de desenvolvimentos que melhorem a sensibilidade das funções PC em casos de *outfeed*.

Outro ponto a ser destacado se relaciona com os tempos de atuação das soluções para os casos avaliados. Até então, apenas resultados em termos de tempos médios de atuação e de tempos de atuação normalizados foram apresentados. Por isso, na Figura 5.16, apresentam-se

os tempos de atuação das soluções tradicional, 1, 2 e 3 em forma de boxplots, tipo este de gráfico que permite a representação da distribuição de um conjunto de dados em formato visual por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam neste trabalho, respectivamente, o tempo de atuação máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados.

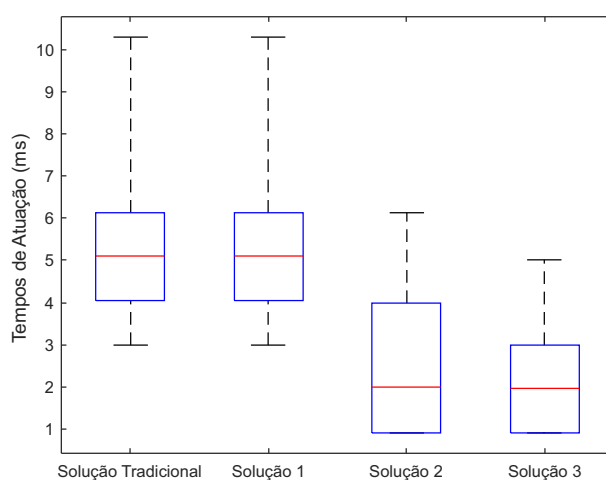


Figura 5.16. Tempos de atuação das soluções avaliadas.

Do exposto, percebe-se que as soluções tradicional e 1 resultaram em tempos de atuação idênticos, como já verificado nas seções anteriores, com tempos de atuação máximos da ordem de 10 ms, e nos melhores casos, com tempos de atuação de aproximadamente 3 ms. Por outro lado, as soluções 2 e 3, apresentaram tempos de atuação um pouco diferentes, demonstrando uma vantagem da solução 3. Nos piores casos, as soluções 2 e 3 atuaram em tempos da ordem de 6 ms e 5 ms, respectivamente. Porém, nos melhores casos, os desempenhos foram semelhantes para ambas as soluções, não excedendo a ordem de 1 ms. Nesse contexto, vale ainda destacar que, da análise dos tempos de atuação máximos para 75% dos casos avaliados (ver quartil superior), percebe-se que as soluções tradicional e 1 apresentaram tempos na ordem de 6 ms, enquanto as soluções 2 e 3 apresentaram tempos na ordem de 4 ms e 3 ms, respectivamente, evidenciando mais uma vez a potencialidade da abordagem proposta na solução 3 para proteção de LTs.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se a análise comparativa de quatro versões da função PC, sendo duas delas baseadas na análise de correntes de fase e outras duas na análise de correntes de eixo direto. Analisaram-se diversos cenários de falta, bem como diferentes taxas de amostragem e frequências de corte dos filtros *anti-aliasing*.

Do exposto, notou-se que o uso da primeira derivada na solução baseada na TDQ amplifica as componentes de alta frequência presentes nos sinais de corrente, podendo, em algumas situações, atrasar as atuações. Esse efeito é mais evidente quando utilizadas altas taxas de amostragem. Entretanto, ao utilizar taxas reduzidas, reduz-se o teor de transitórios nos sinais monitorados, viabilizando atuações das proteções baseadas na TDQ mais rápidas se comparadas com as soluções baseadas na análise de correntes de fase.

Por meio dos resultados, destacou-se que as soluções avaliadas não são influenciadas significativamente pelo carregamento, distância de falta e resistência de falta, embora exista um efeito cruzado dessas variáveis com o ângulo de incidência. Destaca-se também que as soluções baseadas na TDQ demonstraram dificuldades na detecção de faltas simétricas, evidenciando a necessidade de melhorias neste aspecto. Ainda assim, de uma forma geral, a solução 3 baseada na TDQ foi mais rápida que a versão tradicional da função PC, atingindo tempos de atuação da ordem de 20% dos tempos esperados para a solução clássica.

CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho, apresentou-se a proposta de uma nova abordagem dos fundamentos da proteção por comparação de fases aplicada no domínio do tempo. Para tanto, desenvolveu-se uma versão alternativa da função PC que utiliza como sinas de entrada as correntes de eixo direto obtidos da TDQ.

Inicialmente, foi realizado no Capítulo 2 um estudo teórico sobre os conceitos fundamentais de curtos-circuitos em LTs e dos tipos de faltas em sistemas de transmissão. Ademais, apresentou-se uma breve revisão de métodos de proteção de LT por comparação de fases disponíveis na literatura. Do exposto, foi possível justificar o uso da TDQ na elaboração abordagem proposta.

Em seguida, no Capítulo 3, apresentaram-se detalhes da implementação do algoritmo da proteção PC baseado na TDQ, explicando as etapas de seu desenvolvimento, bem como aspectos relacionados ao processamento dos sinais utilizados como entradas do algoritmo. De fato, concluiu-se que as correntes de eixo direto apresentam oscilações com o dobro da frequência fundamental que são decorrentes dos desequilíbrios do sistema monitorado. Assim, uma vez que essas correntes guardam informações sobre a direcionalidade do curto-circuito, viabiliza-se atuações mais rápidas, com aproximadamente a metade do tempo de atuação das versões clássicas da função PC.

No Capítulo 4, apresentou-se a análise comparativa de quatro versões da função PC, sendo uma delas a versão tradicional que analisa correntes de fase, outra uma adaptação da versão tradicional que também analisa correntes de fase, e as outras duas soluções baseadas na TDQ que analisam correntes de eixo direto, com diferenças apenas na lógica de *trip* no que se refere à análise de valores instantâneos positivos e negativos, ou apenas de valores positivos. Neste contexto, foram avaliados os tempos de atuação das quatro soluções frente a diversos cenários de falta simulados no ATP e de diferentes características dos sistemas de aquisição de dados, no

que se refere à taxa de amostragem utilizada e às frequências de corte dos filtros *anti-aliasing*.

Dos resultados obtidos, demonstrou-se que a presença de transitórios nos sinais pode piorar a atuação das funções propostas baseadas na TDQ, visto que estas possuem uma etapa de aplicação da derivada nos sinais de eixo direto. Com isso, sugeriu-se a utilização de taxas reduzidas ou mesmo da aplicação de filtros passa-baixas digitais capazes de reduzir tal influência. Além disso, comprovou-se que, de fato, quando isentas de um elevado teor de transitórios nas correntes, as soluções baseadas na TDQ demonstraram ser mais rápidas que as soluções tradicionais baseadas na análise de correntes de fase. Essas soluções não foram afetadas de forma significativa quando variados os valores de resistência de falta, distância de falta e carregamento, muito embora exista um efeito cruzado dessas variáveis com os ângulos de incidência de falta, assim como para a versão tradicional da função PC. Ainda em relação aos resultados obtidos, foi possível constatar que as versões baseadas na TDQ apresentam dificuldades na detecção de faltas simétricas, visto que, nesses casos, não são geradas componentes de eixo direto oscilatórias. Entretanto, de um modo geral, o uso da TDQ em funções PC foi considerado vantajoso. De fato, percebeu-se que as soluções baseadas na TDQ foram mais rápidas do que a versão tradicional da função PC, evidenciando a potencialidade da abordagem proposta e destacando-a como uma implementação promissora para sistemas de proteção de LTs aplicados no domínio do tempo.

Uma vez que os estudos apresentados nesse trabalho são preliminares em relação à função PC baseada na TDQ, abre-se espaço para pesquisas futuras que possam dar continuidade à pesquisa. Assim, como propostas para trabalhos futuros, destacam-se:

- Avaliar o algoritmo considerando uma maior variedade de condições de falta;
- Desenvolver adaptações da abordagem proposta que viabilizem a detecção de faltas simétricas de forma confiável;
- Analisar técnicas que atenuem os transitórios para casos com altas frequências de amostragem e de corte dos filtros *anti-aliasing*;
- Avaliar o impacto da saturação de TCs sobre a abordagem proposta;
- Avaliar as vantagens da utilização de grandezas incrementais na abordagem proposta;
- Desenvolver soluções que viabilizem a aplicação da abordagem proposta, sem que esta perca a seletividade de fases.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTUVE, H. J.; SCHWEITZER, E. O. *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. Pullman, USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010. Citado 3 vezes nas páginas 16, 23, and 33.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 32.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. In: *34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers*. Atlantic City, New Jersey: [s.n.], 1918. p. 1027–1140. Citado na página 6.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*, 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado 9 vezes nas páginas iii, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, and 14.
- HINGE, T.; DAMBHARE, S. Ieee trans. on power delivery. In: *Secure phase comparison schemes for transmission line protection using synchrophasors*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 4 vezes nas páginas iii, 18, 24, and 25.
- KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; UDREN, E. Rebirth of the phase comparison line protection principle. In: *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 8 vezes nas páginas 3, 17, 18, 19, 21, 22, 23, and 43.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. Santa Catarina: Edição do Autor, 2005. v. 1. Citado na página 8.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 3, and 5.
- KRAUSE, P. C. Transient phenomena in electrical machines. In: *Elsevier Science Publishers*. [S.l.: s.n.], 1984. Citado 2 vezes nas páginas iii and 28.
- KRAUSE, P. C. Analysis of electric machinery and drive systems. In: *IEEE Power Engineering Society*. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas iii and 28.
- LEITE, E. J.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Proteção de linhas baseada na comparação de fases: Uma análise da aplicação de correntes incrementais no domínio do tempo. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Natal, Brasil: [s.n.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas iii, 17, 18, 19, 20, 22, and 23.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014b. Citado 10 vezes nas páginas iv, 5, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, and 36.

- LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. L. A. Influência dos transformadores de potencial capacitivos e filtros anti-aliasing sobre algoritmos de localização de faltas baseado em componentes transitórias. In: *X Conferencia Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 33.
- LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, July 2013. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 35.
- LOPES, F. V.; LEITE, E. J.; G, R. J. P. Avaliação de funções de proteção de linhas de transmissão aplicadas no domínio do tempo. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas iii, 5, 15, and 19.
- LOPES, F. V.; MELO, Y. M. P.; Fernandes Jr., D.; NEVES, W. L. A. Detecção de faltas em linhas de transmissão: Uma abordagem em tempo real via DSP. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Goiania, Brasil: [s.n.], 2012. Citado 4 vezes nas páginas iii, 27, 28, and 29.
- MAMEDE, F. e. D. R. M. João. *Proteção de Sitemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: LTC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 3.
- PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 48, n. 3, p. 716–727, July 1929. ISSN 0096-3860. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 30.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*; 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 2009. Citado na página 33.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 and 21.
- SILVEIRA, E. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistemas Computacional para aplicações Práticas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, abril 2007. Citado na página 12.
- STEVENSON, J. W. D. *Elementos de Análise de Sitemas de Potência*. North Caroline, USA: McGraw-Hill, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5, and 7.