



**APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE PARK PARA
APRIMORAMENTO DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES**

MARAYANNE CRISTALINO CHAVES DE ALMEIDA

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE PARK PARA
APRIMORAMENTO DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES

MARAYANNE CRISTALINO CHAVES DE ALMEIDA

Dissertação de Mestrado Submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvinho Lopes, DSc. (ENE-UnB)
(Orientador)

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

Prof. Oureste Elias Batista, DSc. (UFES)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, Outubro de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA, MARAYANNE CRISTALINO CHAVES DE

Aplicação da Transformada de Park para Aprimoramento da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases. [Distrito Federal] 2020.

xiv, 73p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre em Engenharia Elétrica, 2020).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção de Linhas de Transmissão

3. Transformada de Park

I. ENE/FT/UnB

2. Comparação de fases

4. ATP

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, M. C. C. (2020). Aplicação da Transformada de Park para Aprimoramento da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-750/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Marayanne Cristalino Chaves de Almeida

TÍTULO: Aplicação da Transformada de Park para Aprimoramento da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases.

GRAU: Mestre ANO: 2020

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

Marayanne Cristalino Chaves de Almeida

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Aos meus pais, Gesanne e Mário, minhas irmãs,
meus avós e meu namorado Lucas, DEDICO!

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de realizar o mestrado e por me fazer seguir o caminho da engenharia.

Agradeço muito à minha família, principalmente aos meus pais, Gesanne e Mário, e aos meus avós Maria e Raimundo pelo carinho e amor sempre dados a mim e às minhas irmãs e por sempre acreditarem na minha capacidade, me dando forças e me apoiando sempre que preciso. Agradeço também às minhas irmãs Andreza, Mayara, Meyre e Brenda por toda parceria.

Agradeço profundamente ao Professor Felipe Lopes, por exercer da melhor maneira o papel de um orientador, pelo apoio, pelas ótimas explicações, pela parceria e por sempre estar disposto a ajudar. Agradeço também ao professor Kleber Melo pelo imenso conhecimento transmitido ao longo desses anos.

Agradeço ao meu namorado, Lucas, por todo apoio e compreensão nos momentos de dificuldade e deveres durante o mestrado. Agradeço por todos os momentos de distração e carinho, pelo ombro amigo, por toda ajuda e por sempre acreditar no meu potencial.

Agradeço a todos os colegas do Lapse que tive o prazer de conviver, em especial ao Eduardo Passos pela imensa ajuda durante o mestrado, ao Jônatas, Suellen, Letícia, Hanni, Fernanda, Gustavo, Pedro, Vitor, João, Tiago, Rodrigo, Eduardo Leite, Nilo, Jorge e aos demais colegas do laboratório pelos aprendizados, pelas inúmeras ajudas, pelo compartilhamento da vida acadêmica e pelos momentos de descontração e risadas.

Agradeço também a todos os meus amigos e amigas de longa data por todos os momentos de descontração e apoio, em especial a minha amiga Sabrina. E a todas as pessoas que de algum modo ajudaram para a elaboração deste trabalho, o meu muito obrigada!

RESUMO

Apresenta-se nesse trabalho uma nova abordagem da função de proteção por comparação de fases no domínio do tempo, conhecida pelo termo em inglês *Phase Comparison*. O algoritmo proposto se baseia na análise de correntes desequilibradas de falta, com o objetivo de prover a proteção unitária de linhas de transmissão (LT) de forma mais rápida e sensível. Para tanto, consideram-se como sinais de entrada da lógica de proteção as correntes de eixo direto i_d dos terminais de uma LT, obtidas por meio da Transformada de Park. Estes sinais de eixo direto i_d são sensíveis ao desequilíbrio das correntes no sistema, oscilam com o dobro da frequência nominal (2ω) e contém informação da direcionalidade das correntes originais. Desse modo, é possível aplicar a filosofia da função PC no domínio do tempo e pelo fato destes sinais oscilarem com o dobro da frequência do sistema, a nova abordagem tem tempo de operação reduzido, sem perda de confiabilidade e segurança. Para a avaliação da solução proposta utilizou-se um *software* do tipo EMTP para obtenção de diferentes cenários de falta através de simulações em uma LT de 230 kV/60 Hz de 200 km de comprimento, variando-se o tipo de falta (monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica), ângulo de incidência, resistência de falta, distância do ponto de falta e carregamento do sistema. Com base nas simulações realizadas, compararam-se os resultados obtidos utilizando-se a função PC tradicional, a função PC baseada em componentes de sequência e a função PC proposta, aqui chamada de função PC-TDQ. Dentre as conclusões, destaca-se a atuação da função PC-TDQ proposta em 100% dos casos simulados, com tempos de atuação menores do que os tempos das outras duas abordagens.

Palavras-chave: ATP, correntes desequilibradas, comparação de fases, proteção de linha, Transformada de Park.

ABSTRACT

This work presents a new approach to the Phase Comparison Protection in the time domain. The proposed algorithm is based on unbalanced fault currents analysis, in order to provide transmission lines unit protection faster and more sensitive. In the proposed approach, are considered as protection logic input signals the direct axis components i_d obtained at both line terminals by applying the Park's transformation. These direct axis signals i_d are sensitive to unbalanced currents in the system, oscillate with double the nominal frequency (2ω) and contains original currents directionality information. Thus, it is possible to apply the PC protection philosophy in the time domain and because these signals oscillate with twice the system frequency, the new approach has reduced tripping time, without loss of reliability and safety. For the proposed solution evaluation, an EMTP software was used to obtain different fault scenarios through simulations on a 230 kV/60 Hz transmission line 200 km long, varying the type of fault (single-phase, two-phase, two-phase-to-ground and three-phase), inception angle, fault resistance, fault location and line loading. Based on simulations, the results obtained by using the traditional PC protection, the PC based on sequence components and the proposed PC protection, here called the PC-TDQ protection, were compared. Among the conclusions, highlights the performance of the PC-TDQ function proposed in 100% of the simulated cases, with shorter operating times compares to the other two approaches.

Keywords: ATP, line protection, phase comparison, Park's transformation, unbalanced currents.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Glossário	ix
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Objetivos do Trabalho	3
1.2 Publicações	3
1.3 Organização do Texto	4
Capítulo 2 – Proteção de LTs por Comparação de Fases	5
2.1 Princípio de funcionamento da Função PC	5
2.2 Função PC no Domínio do Tempo	8
2.3 Componentes Simétricas	12
2.3.1 Função PC Baseada em Componentes Simétricas	14
2.4 Fontes de Erros para Funções de Proteção	15
2.4.1 Corrente Capacitiva	15
2.4.2 Componente CC de Decaimento Exponencial	16
2.4.3 Saturação de TC	17
2.4.4 <i>Outfeed</i>	17
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	20
Capítulo 4 – Transformada de Park para Análise de Desequilíbrios de Falta	26
4.1 Aplicação da Transformada de Park em Sinais Trifásicos	27
4.1.1 Análise em Regime Permanente de Pré-Falta	28
4.1.2 Análise em Sistema Desequilibrado	29
4.1.3 Determinação do ângulo de fase θ_i	30
4.1.4 Processamento das Componentes de Eixo Direto	31
4.2 Função PC-TDQ proposta	32
Capítulo 5 – Análise do Desempenho da Função PC-TDQ	39
5.1 Sistema Elétrico de Potência Analisado	39

5.2	Apresentação e Análise dos Resultados	41
5.2.1	Mudança de Limiar para as Funções PC-TRAD e PC-MIX	45
5.2.2	Utilização de Diferentes Taxas de Amostragem	46
5.3	Análise de Casos Pontuais	47
5.3.1	Caso 1: Falta trifásica franca	47
5.3.2	Caso 2: Saturação do núcleo do TC para uma falta no meio da LT	50
5.3.3	Caso 3: Falta monofásica com ocorrência de saturação em um dos terminais	52
5.3.4	Caso 4: Falta externa com saturação do TC	53
5.3.5	Caso 5: Ocorrência de <i>outfeed</i>	56
5.4	Simulações de Falta externa	60
Capítulo 6 – Conclusões		61
Referências Bibliográficas		63
Apêndice A – Desenvolvimento Matemático da TDQ		67
A.1	Análise em Regime Permanente	71
A.1.1	Sistema Equilibrado	71
A.1.2	Sistema Desequilibrado	72

LISTA DE FIGURAS

2.1	Marcas de polaridade do TC.	6
2.2	Polaridades das correntes em uma LT.	6
2.3	Direcionalidade das correntes durante faltas internas e externas à LT.	7
2.4	Efeito da Corrente capacitiva da LT.	7
2.5	Modulação de sinais instantâneos na ocorrência de falta interna.	9
2.6	Saída da porta AND, na ocorrência de uma falta interna.	10
2.7	Atuação dos contadores na ocorrência de falta interna.	11
2.8	Componentes de sequência: (a)Positiva, (b)Negativa e (c)Zero.	13
2.9	Sistema original desequilibrado demonstrado através da soma das componentes simétricas.	13
2.10	Ocorrência de saturação no núcleo magnético do TC.	18
2.11	Ocorrência de <i>outfeed</i> durante uma falta interna à LT.	19
4.1	Eixos direto e em quadratura.	26
4.2	Componentes de eixo direto local e remota, durante a ocorrência de uma falta interna.	31
4.3	Falta interna à linha de transmissão.	34
4.4	Falta externa à LT.	35
4.5	Lógica de aplicação da função PC no domínio do tempo.	35
4.6	Demonstração do algoritmo, para os ciclos positivo e negativo, da função PC-TDQ no domínio do tempo.	37
4.7	Fluxograma resumindo o algoritmo da função PC-TDQ.	38
5.1	Sistema elétrico de potência analisado.	39
5.2	Gráfico de dispersão e seu zoom.	43
5.3	Diagrama de frequência de <i>trip</i> acumulada.	44

5.4	Diagrama de frequência de <i>trip</i> acumulada para as simulações considerando $\frac{1}{8}$ de período de ciclo fundamental como limiar para todas as 3 funções de proteção analisadas.	45
5.5	Diagrama de frequência de <i>trip</i> acumulado, para diferentes taxas de amostragem.	46
5.6	Caso 1: Sinais trifásicos.	47
5.7	Caso 1: Componentes de sequência.	48
5.8	Caso 1: Componente mista.	49
5.9	Caso 1: Derivada da componente de eixo direto.	50
5.10	Caso 2: Sinais da fase A distorcidos devido a saturação do núcleo do TC, medidos nos terminais local e remoto da LT.	51
5.11	Caso 2: Sinal da derivada da componente de eixo direto, distorcida devido à ocorrência de saturação do TC.	51
5.12	Caso 2: Componente mista distorcida devido à ocorrência de saturação do TC. .	52
5.13	Caso 3: Sinais da fase A para um falta AT no meio da LT, referentes aos terminais local e remoto.	53
5.14	Caso 3: Sinal da derivada da componente de eixo direto, para uma falta AT franca.	54
5.15	Caso 3: Sinal da componente mista, para uma falta AT franca.	54
5.16	Caso 4: Sinais trifásicos medidos na ocorrência de falta externa.	55
5.17	Caso 4: Sinais da derivada da componente de eixo direto, durante uma falta externa.	55
5.18	Caso 4: Componente mista oriunda de uma falta externa à LT.	56
5.19	Caso 5: Sinais de corrente da fase A (ocorrência de outfeed no terminal remoto).	57
5.20	Caso 5: Componentes de sequência.	58
5.21	Caso 5: Componente mista.	59
5.22	Caso 5: Derivada da componente de eixo direto.	59

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo da revisão bibliográfica	25
5.1	Parâmetros da Linha de Transmissão	40
5.2	Parâmetros dos Equivalentes de Thévenin	40
5.3	Variação dos Parâmetro de Falta	41

LISTA DE SÍMBOLOS

ms	Milisegundo(s).
μs	Microsegundo(s).
f	Frequência fundamental.
c_{dif}	Grandeza incremental.
ξ_{dif}	Energia janelada.
δ	Ângulo de carregamento.
L	Terminal local.
R	Terminal remoto.
ω	Frequência angular fundamental do sistema
ω_s	Frequência angular dos eixos direto e em quadratura
A_d	Componente de eixo direto.
A_q	Componente de eixo em quadratura.
i_d	Corrente de eixo direto.
i_q	Corrente de eixo em quadratura.
i_{dd}	Derivada da corrente de eixo direto.
i_{qd}	Derivada da corrente de eixo em quadratura.
i_{Ld}	Corrente de eixo direto referente ao terminal local.
i_{Rd}	Corrente de eixo direto referente ao terminal remoto.
i_{Lq}	Corrente de eixo em quadratura referente ao terminal local.

i_{R_q}	Corrente de eixo em quadratura referente ao terminal remoto.
A_a, A_b e A_c	Sinais trifásicos referentes à Fase A, B e C, respectivamente.
k	Índice da k -ésima amostra.
P	Matriz de Park.
Δt	Período de amostragem.
θ_p	Ângulo de Incidência de Falta.
θ	Ângulo do eixo direto.
θ_i	Ângulo da fase A.
RF	Resistência de Falta.
$\Delta\theta$	Diferença angular
$p.u.$	Por Unidade.
a	Operador rotacional.
d	Distância do ponto de falta.
\angle	Ângulo.
K	Constante de ponderação.
\hat{V}_0, \hat{V}_1 e \hat{V}_2	Fasor de Tensão de Sequência Zero, Positiva e Negativa, respectivamente, tomando a Fase A como referência.
\hat{V}_A, \hat{V}_B e \hat{V}_C	Fasor de tensão nas fases A, B e C, respectivamente.
\hat{I}_0, \hat{I}_1 e \hat{I}_2	Fasor de corrente de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, tomando a Fase A como referência.
i_0, i_1 e i_2	Sinal instantâneo de corrente de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, tomando a Fase A como referência.
i_a, i_b e i_c	Sinal instantâneo de corrente nas fases A, B e C, respectivamente.
i_{aL}, i_{bL} e i_{cL}	Sinal instantâneo de corrente do terminal local nas fases A, B e C, respectivamente.
i_{aR}, i_{bR} e i_{cR}	Sinal instantâneo de corrente do terminal remoto nas fases A, B e C, respectivamente.

i_{mix}	Sinal da corrente mista.
i_{AND}	Sinal da saída da porta lógica AND.
$i_{AND_{neg}}$	Sinal da saída da porta lógica AND, considerando coincidência de polaridade negativa.
i_{mod}	Sinal modulado.
i_{mod_L}	Sinal modulado referente ao terminal local.
i_{mod_R}	Sinal modulado referente ao terminal remoto.
\hat{I}_A, \hat{I}_B e \hat{I}_C	Fasor de corrente nas fases A, B e C, respectivamente.
I_{am}, I_{bm} e I_{cm}	Magnitude dos sinais de corrente nas fases A, B e C, respectivamente.
\hat{I}_p	Fasor de corrente primária do TC.
\hat{I}_s	Fasor de corrente secundária do TC.
\hat{I}_L	Fasor de corrente do terminal local.
\hat{I}_R	Fasor de corrente do terminal remoto.
\hat{I}_{cap}	Fasor de corrente capacitiva da LT.
$\angle \hat{I}_L$	Ângulo do fasor de corrente do terminal local.
$\angle \hat{I}_R$	Ângulo do fasor de corrente do terminal remoto.
X_0	Reatância de sequência zero.
X_1	Reatância de sequência positiva.
R_0	Resistência de sequência zero.
R_1	Resistência de sequência positiva.
Z_L	Impedância do terminal local.
Z_R	Impedância do terminal remoto.
ψ	Contagem da largura dos pulsos.
ψ_T	Limiar de tempo.

GLOSSÁRIO

A/D	Analógico/digital.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	<i>Phase Comparison Protection</i>
PC-TDQ	Função PC baseada na TDQ
PC-TRAD	Função PC tradicional
PC-MIX	Função PC baseada na corrente mista
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TDQ	Transformada de Park
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
UnB	Universidade de Brasília

INTRODUÇÃO

Um sistema de proteção consiste em um conjunto de dispositivos, tais como: relés, transformadores para instrumentos, canais de comunicação, dentre outros, que são destinados a executar uma ou mais funções de proteção específicas, com o objetivo de proteger equipamentos, seres humanos e o próprio sistema elétrico (ZIEGLER, 2012; ANDERSON, 1999). Dentre estes, pode-se citar a linha de transmissão (LT), que tem como propósito transmitir a energia gerada em grandes usinas elétricas até os centros consumidores, que por sua vez encontram-se em sua maioria distantes do ponto de geração. Devido a isto, as LTs aéreas possuem grandes extensões e por estarem ao ar livre, conseqüentemente estão sujeitas a esforços físicos, várias intempéries, queimadas, dentre outras perturbações externas, sendo então o equipamento mais suscetível à ocorrência de defeitos.

No Brasil, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em seu relatório de análise de desligamentos forçados do sistema de transmissão do ano de 2018, no Sistema Interligado Nacional (SIN), 75,6% dos desligamentos forçados ocorreram em LTs, sendo o principal motivo as queimadas ocorridas sob as linhas, seguidas das descargas atmosféricas (ANEEL, 2018).

Este número expressivo demonstra que medidas devem ser tomadas para diminuir o número de ocorrências de faltas ou o tempo de duração destas, pois quanto maior o tempo que a LT fica fora de operação, maior a punição monetária sofrida pelo agente responsável pela mesma. Outro ponto, é o de salvaguardar a LT e os equipamentos elétricos interconectados, reduzindo o tempo em que permanecem em situações anormais de operação, para que não sejam danificados.

Por conta do exposto, o sistema de proteção de uma LT deve compreender dispositivos conectados nos seus terminais, necessários e suficientes para detecção e eliminação das condições anormais de operação (ONS, 2017), o mais rápido possível, de modo a garantir a estabilidade do sistema, bem como evitar danos maiores aos equipamentos interconectados.

Por conseguinte, para que haja um melhor funcionamento do sistema elétrico de potência, diversos equipamentos de proteção são utilizados para zelar pela integridade dos equipamentos, seja LT, transformadores ou qualquer outro que necessite de proteção, bem como manter a estabilidade do sistema após o distúrbio. Diante disso, os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica estão sempre em aperfeiçoamento e evolução.

A troca de equipamentos de proteção antigos por novos, caracteriza-se como um modo de aperfeiçoamento do sistema, tendo como exemplo a troca de relés eletromecânicos e estáticos por relés numéricos microprocessados. Estes são considerados dispositivos eletrônicos inteligentes (IED, do termo em inglês *intelligent electronic devices*), pois possuem diferentes funções de proteção e controle, além de armazenarem dados. Portanto, são mais eficientes e rápidos comparado com os outros tipos.

Na literatura, uma grande quantidade de trabalhos científicos tem focado na área de proteção de sistemas elétricos, a exemplo de trabalhos relacionados a sistemas de proteção de distância e diferencial, sendo esta última uma das funções mais confiáveis e seguras (ZIEGLER, 2012), a qual é capaz de prover proteção unitária de LT. Além destas, a função por comparação de fases (PC) também tem sido empregada para este fim, tendo como característica notável a não necessidade de parâmetros da linha de transmissão para ajustes, eliminando assim possíveis erros de parametrização, bem como a não necessidade de investimentos elevados em canais de comunicação, pois apenas sinais lógicos on/off são transmitidos entre os terminais (KASZTENNY *et al.*, 2006; LEITE *et al.*, 2016).

Fundamentalmente, o princípio de funcionamento da função PC se dá por meio da comparação das fases das correntes elétricas medidas nos terminais local e remoto de uma LT, identificando curto-circuitos internos ou externos, dependendo da relação dos ângulos de fase das correntes mencionadas (ZIEGLER, 2012; KASZTENNY *et al.*, 2006).

As aplicações da função PC no domínio do tempo, fazendo uso dos sinais instantâneos, têm se mostrado atrativas para as concessionárias, pois as mesmas possuem tempos de atuação menores que um ciclo do sinal na frequência fundamental (desconsiderando os efeitos da latência dos canais de comunicação). Isso decorre do fato de não possuírem a etapa de janelamento de dados para estimação dos fasores, como é utilizado nas funções tradicionais baseadas no domínio da frequência (PHADKE; THORP, 2008; SCHWEITZER *et al.*, 2015).

De fato, as funções de proteção no domínio do tempo operam em tempos menores em relação as proteções fasoriais, e ainda assim, formas de acelerar ainda mais o processo de detecção de faltas em LTs são de interesse para as concessionárias, pois pode-se diminuir as despesas com relação a desligamentos forçados, danos em equipamentos, melhorar índices de qualidade da energia elétrica (QEE), aumentar a segurança para os usuários da rede e equipamentos, entre outros benefícios.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho expõe uma solução alternativa para aplicação da função PC no domínio do tempo. Para tanto, o uso da Transformada de Park (TDQ) é feito no pré-processamento dos sinais com o objetivo de diminuir o tempo de atuação da função de proteção e aumentar sua confiabilidade, melhorando assim sua eficiência.

Sucintamente, a aplicação da TDQ nos sinais de corrente possibilita a criação de componentes sensíveis ao desequilíbrio de correntes durante cenários de curto-circuitos, as quais mantêm disponível informação da direcionalidade do curto e oscilam com o dobro da frequência fundamental. Com isso, é possível aplicar a filosofia da função PC e reduzir o tempo de operação da mesma, sem comprometer a simplicidade do esquema de proteção original.

1.2 PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado resultou-se nas publicações dos seguintes artigos científicos em conferências internacionais:

- ALMEIDA, M. C. C. de; LOPES, F. V. Speeding up phase comparison line protection by means of tdq-based current unbalance analysis. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 188, p. 106557, 2020. (ALMEIDA; LOPES, 2020).
- ALMEIDA, M. C. C. de; LOPES, F. V. Evaluation of transmission line phase comparison protection considering the use of mimic filter. In: IEEE. *2019 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.], 2019. p. 1-4. (ALMEIDA; LOPES, 2019)

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, apresenta-se uma fundamentação teórica com os principais conceitos para o entendimento da função de proteção de LT por comparação de fases.
- No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica contendo os principais trabalhos que tratam acerca da função de proteção unitária de LT por comparação de fases.
- No Capítulo 4, apresentam-se as definições acerca da aplicação da Transformada de Park (tradicionalmente conhecida como TDQ) para análise de sinais desequilibrados devido à ocorrência de falta. Apresenta-se também a função de proteção proposta, a qual é baseada na aplicação da TDQ nos sinais de entrada da função PC.
- No Capítulo 5, expõe-se a análise do desempenho da função de proteção proposta, por meio da apresentação e análise dos resultados.
- Por fim, no Capítulo 6 explanam-se as conclusões do trabalho, pontuando as propostas para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao estudo realizado.

PROTEÇÃO DE LTS POR COMPARAÇÃO DE FASES

Este capítulo apresenta os conceitos básicos para entendimento da função de proteção por comparação de fases (função PC), sendo expostas diferentes abordagens, como sua aplicação no domínio da frequência, através do uso de fasores, bem como no domínio do tempo, com o uso dos sinais instantâneos.

Sucintamente, a função PC compara as fases das correntes elétricas medidas em dois terminais opostos de uma LT, identificando a ocorrência de um curto-circuito interno ou externo à mesma, a partir da diferença angular entre esses sinais de corrente (ZIEGLER, 2012; KASZTENNY *et al.*, 2006; LEITE JR. *et al.*, 2018; HINGE; DAMBHARE, 2015). Portanto, a função PC proporciona uma proteção unitária de LTs de modo simples e eficaz, tendo como diferencial, o fato da mesma não necessitar de parâmetros da linha para ajustes, o que poderia ser considerado como uma fonte de erros, nem de grandes investimentos em canais de comunicação, já que é necessário somente a troca de sinais on/off entre os terminais monitorados (KASZTENNY *et al.*, 2006).

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FUNÇÃO PC

O princípio de funcionamento da função PC é antigo e bastante difundido (FITZGERALD, 1928), sendo inicialmente empregado em relés eletromecânicos e atualmente ajustado para os relés numéricos microprocessados. Seu fundamento se baseia na análise da direcionalidade relativa das correntes elétricas medidas nos terminais local e remoto de uma determinada LT. Essas correntes são medidas pelos transformadores de correntes (TCs) instalados em cada terminal da linha monitorada (FITZGERALD, 1928).

As polaridades das correntes elétricas são determinadas pelos TCs de acordo com as marcas de polaridades, como apresentada na Fig.2.1, de modo que neste trabalho são consideradas

correntes positivas as que entram na LT e negativas as que saem da mesma, segundo esquema de polaridade subtrativa (ver Fig.2.2). Portanto, idealmente, os sinais medidos nos terminais local e remoto estarão em fase se ambos estiverem entrando na linha e em contra-fase se um estiver entrando e o outro saindo no terminal oposto.

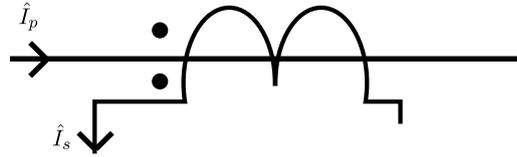


Figura 2.1. Marcas de polaridade do TC.

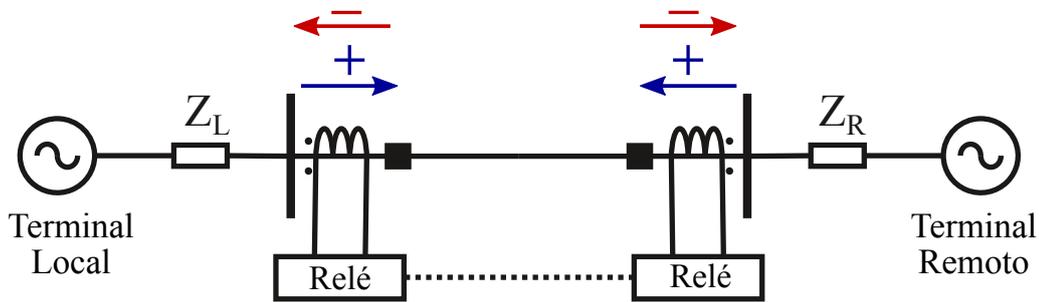


Figura 2.2. Polaridades das correntes em uma LT.

A Fig. 2.3 apresenta uma LT conectada entre equivalentes de Thévenin de dois sistemas adjacentes, de modo a exemplificar como encontram-se dispostas as correntes na ocorrência de curtos-circuitos. Pela Fig. 2.3(a), verifica-se que na ocorrência de um curto-circuito interno, \hat{I}_L e \hat{I}_R possuem mesma polaridade e portanto, estão idealmente em fase, pois entram na LT. Logo, a diferença angular entre estes sinais é idealmente $\Delta\theta = \angle\hat{I}_L - \angle\hat{I}_R = 0^\circ$, onde \hat{I}_L e \hat{I}_R são os fasores de corrente no terminal local e remoto, respectivamente. Por outro lado, na ocorrência de um curto-circuito externo, pela Fig. 2.3(b), nota-se que \hat{I}_R possui polaridade positiva, pois entra na LT, e \hat{I}_L possui polaridade negativa, pois sai da LT, idealmente resultando em $\Delta\theta = \angle\hat{I}_L - \angle\hat{I}_R = 180^\circ$ (ZIEGLER, 2012).

Vale destacar que as diferenças angulares são idealmente 0° e 180° para casos de faltas internas e faltas externas (ou operação normal do sistema), respectivamente. Porém, em sistemas reais não é isto que ocorre, pois existe uma defasagem devido à existência da corrente capacitiva da LT, a qual modifica estes valores teóricos (ZIEGLER, 2012), sendo que quanto maior o comprimento e nível de tensão da linha, mais significativo o efeito capacitivo (KASE *et al.*, 2007).

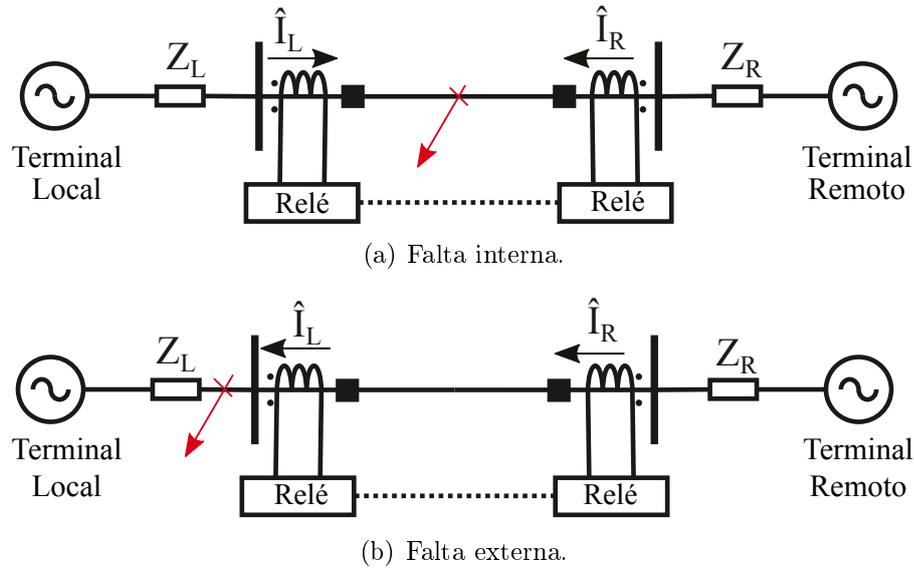


Figura 2.3. Direcionalidade das correntes durante faltas internas e externas à LT.

A Fig. 2.4 demonstra o efeito capacitivo na ocorrência de uma falta interna à LT, de modo que na Fig. 2.4(a) exemplifica-se o cenário real, onde existe uma corrente capacitiva da LT, portanto, nota-se uma defasagem entre os sinais de corrente medidos nos terminais local e remoto. Já na Fig. 2.4(b), exemplifica-se o caso ideal, sem levar em conta o efeito capacitivo da LT. Assim, os sinais estão em fase.

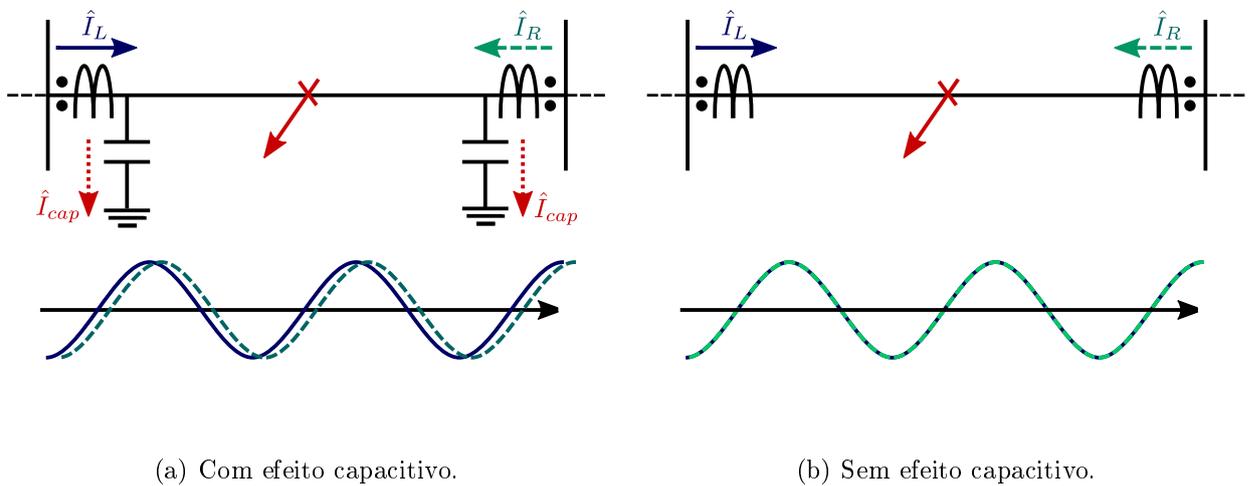


Figura 2.4. Efeito da Corrente capacitiva da LT.

Tendo o exposto como premissa, de modo a não ocorrer atuações indevidas em casos de faltas externas ou em operação normal do sistema, um limiar angular é utilizado, proporcionando uma margem de segurança. Na literatura, os erros de fase são tipicamente considerados em uma faixa de valores entre 20° e 45° (FITZGERALD, 1928; DAMBHARE *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2007).

Conforme mencionado inicialmente, o princípio da função PC é um conhecimento antigo, o qual foi usado em relés eletromecânicos e posteriormente adaptado para dispositivos numéricos em funções de proteção baseadas em fasores e aplicações no domínio do tempo, sendo esta última a de interesse para este trabalho.

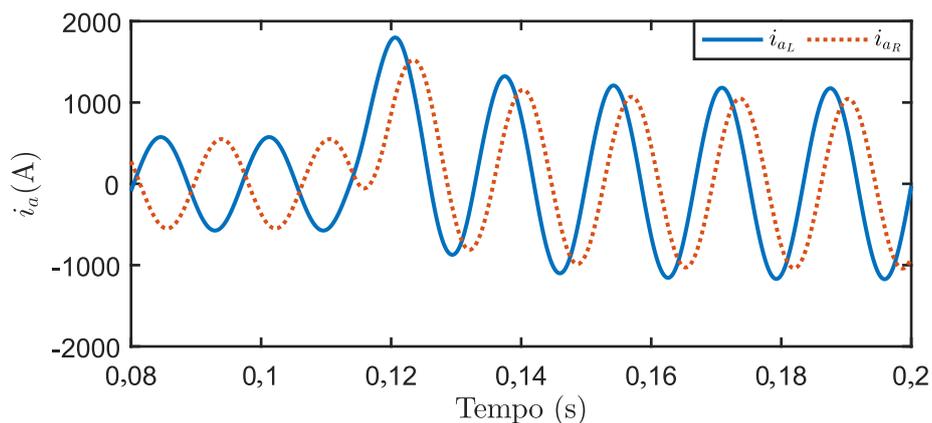
2.2 FUNÇÃO PC NO DOMÍNIO DO TEMPO

As funções de proteção no domínio do tempo possuem tempos de atuações menores se comparado com funções de proteção baseadas em fasores, fato este decorrente do atraso intrínseco desta última abordagem em virtude da filtragem digital necessária para a estimação dos fasores, sendo que as janelas de dados variam entre meio ciclo e um ciclo-e-meio tipicamente, dependendo do método de estimação utilizado (PHADKE; THORP, 2008; SILVA, 2009). Assim, quanto maior a janela, maior é o atraso esperado para a operação da função de proteção.

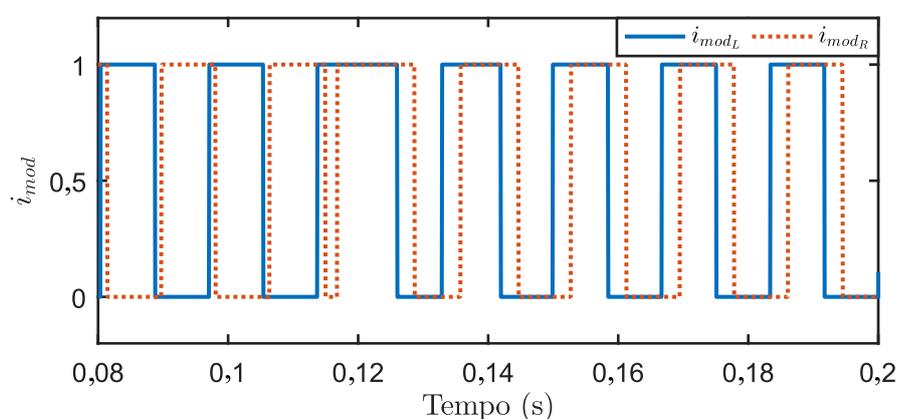
Quando empregada no domínio do tempo, a função PC realiza a análise de valores modulados de sinais de correntes instantâneas por meio de uma porta Lógica AND. Desse modo, após a obtenção dos sinais instantâneos, os mesmos são modulados, criando sinais auxiliares que apresentam valores unitários quando as correntes analisadas possuem valores positivos ou iguais a zero, e valores nulos quando as correntes apresentam valores instantâneos negativos (KASZTENNY *et al.*, 2006). A Fig. 2.5(a) apresenta sinais instantâneos medidos em dois terminais opostos de uma LT e a Fig.2.5(b) seus respectivos sinais modulados, ilustrando o comportamento acima descrito.

Para o caso de modulação de ciclo completo, como relatado em (LEITE JR. *et al.*, 2018; LEITE JR. *et al.*, 2018), adiciona-se à lógica de operação a análise contrária, ou seja, sinais modulados que apresentam valor unitário quando as correntes possuem valores negativos ou iguais a zero, e assumem valor nulo quando as correntes apresentam valores instantâneos positivos. Logo, o uso da modulação de ciclo completo proporciona identificação mais rápida da falta no sistema, independente da polaridade da primeira amostra de corrente no período de distúrbio, ou seja, para faltas iniciadas nos semi-ciclos positivo ou negativo do sinal, deixando o tempo de operação mais estável em relação ao ângulo de incidência da falta.

Portanto, na sequência do algoritmo, a análise dos sinais modulados é realizada por meio de



(a) Sinais instantâneos.



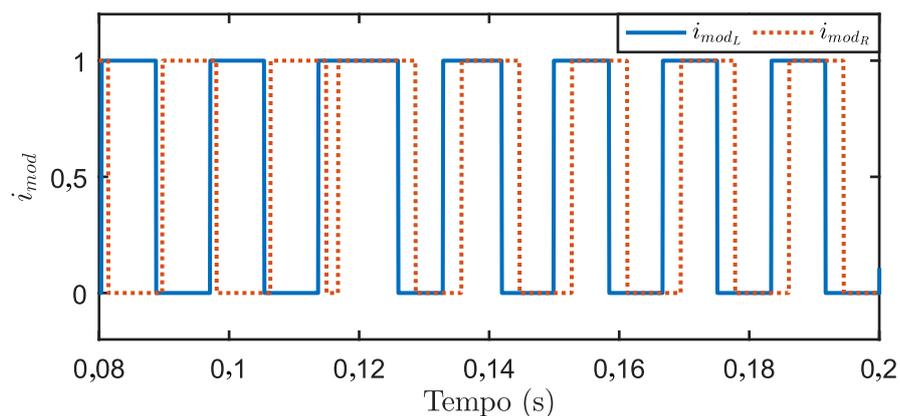
(b) Sinais modulados.

Figura 2.5. Modulação de sinais instantâneos na ocorrência de falta interna.

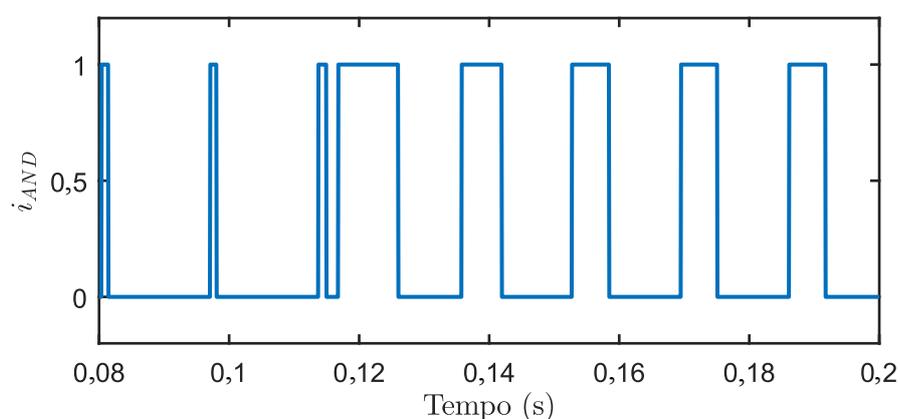
uma porta lógica AND (KASZTENNY *et al.*, 2006), a qual retorna pulsos com valores positivos unitários somente quando houver coincidência de polaridade entre ambos sinais instantâneos de corrente avaliados.

Assumindo as relações angulares comentadas anteriormente em situações de faltas, nota-se que em regime permanente ou em caso de faltas externas à LT os pulsos das saídas da porta AND serão estreitos, pois os sinais medidos nos terminais local e remoto estarão aproximadamente em contra-fase, com pequenos deslocamentos de fase, devido às correntes capacitivas. Entretanto, em casos de faltas internas os pulsos serão largos, pois a coincidência de polaridade entre as correntes local e remota perdura por mais tempo, idealmente igual a meio ciclo, mas na prática com duração um pouco inferior devido ao efeito capacitivo da linha, conforme ilustrado na Fig. 2.6.

Considerando as saídas da porta AND, com o uso de contadores, torna-se possível conta-



(a) Sinais modulados.



(b) Saída da Porta AND.

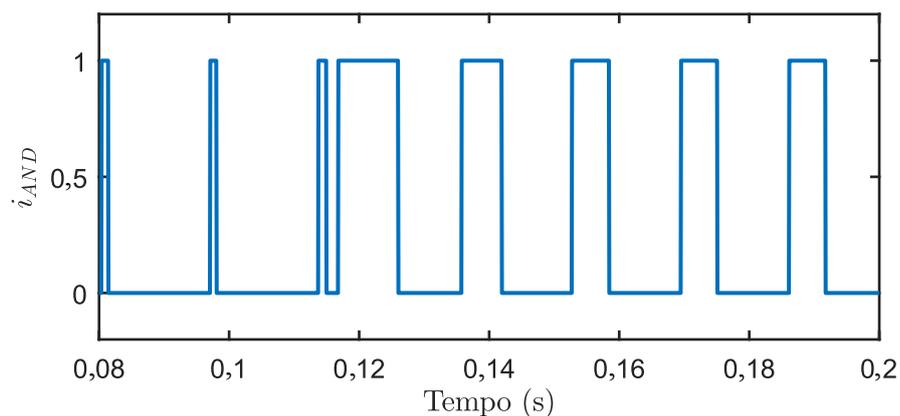
Figura 2.6. Saída da porta AND, na ocorrência de uma falta interna.

bilizar a largura dos pulsos para fins de decisão da proteção, de modo que, caso apresentem largura superior ou igual a um dado limiar ψ_T , fica caracterizada uma situação de curto-circuito interno.

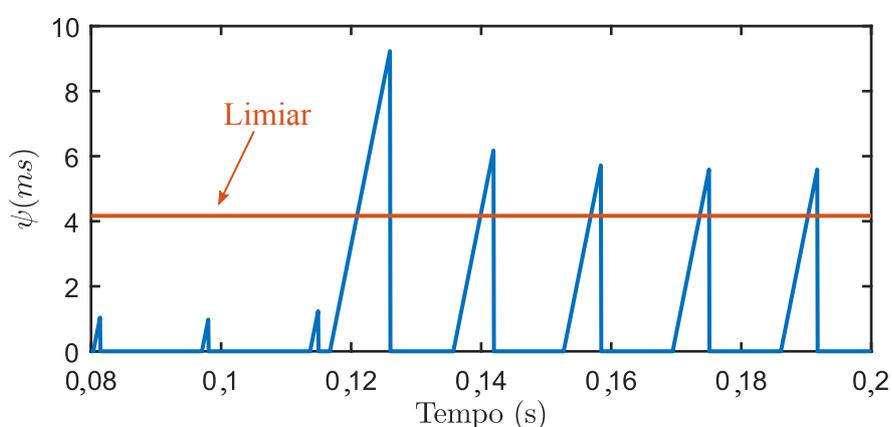
Tal limite mínimo para atuação é utilizado para prevenir que a função de proteção atue indevidamente, devido a pulsos espúrios na saída da porta AND, em regime permanente de pré-falta ou em cenários de faltas externas. Vale destacar que em (KASZTENNY *et al.*, 2006) sugere-se o uso de um limiar de um quarto de ciclo fundamental para a função PC tradicional no domínio do tempo.

Na Fig. 2.7 é demonstrada a atuação dos contadores, os quais são os responsáveis pela contagem da largura dos pulsos, representada por $\psi(t)$, sendo a linha vermelha paralela ao eixo das abscissas o limiar de operação pré-definido.

Até agora falou-se sobre a comparação de fases de sinais medidos em dois terminais opostos,



(a) Saída da porta AND.



(b) Contadores.

Figura 2.7. Atuação dos contadores na ocorrência de falta interna.

porém, convém enfatizar que existem pelo menos três sinais de corrente elétrica em cada terminal. A abordagem tradicional realiza três ou quatro (contando com a corrente residual de falta à terra) comparações em paralelo, com múltiplos canais. Com essas comparações, duas ou mais fornecerão indicações de falta para qualquer tipo de falta (monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica) (KASZTENNY *et al.*, 2006).

Neste contexto, é importante destacar que além das componentes de fase como sinais de entrada da função PC, existem na literatura outras abordagens, a exemplo do uso de uma corrente mista composta por componentes de sequência, a qual proporciona uma melhora significativa no desempenho da função de proteção por comparação de fases, além da necessidade de transmissão de dados de apenas um sinal monitorado ao invés de três ou quatro no caso do uso de sinais de fase.

2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Teoricamente, considera-se o sistema elétrico equilibrado em situação de operação normal. Mesmo na prática, em regime permanente, espera-se a existência de apenas pequenos desequilíbrios, que podem ser decorrentes de diversos fatores. Entretanto, durante a ocorrência de um distúrbio elétrico, o desequilíbrio causado nos sinais não podem ser desconsiderados, resultando em uma análise dos sinais considerada complexa se aplicada no domínio de fases. De modo a simplificar esta análise, técnicas matemáticas são empregadas, a exemplo das componentes simétricas, cujo teorema foi proposto por Fortescue em 1918 (FORTESCUE, 1918), sendo largamente utilizadas desde então.

O método das componentes simétricas pode ser aplicado a qualquer sistema polifásico desequilibrado. No caso de desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico, o uso deste método resulta na combinação de três sistemas trifásicos distintos e desacoplados, compostos pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero (FORTESCUE, 1918):

- Sequência positiva: conjunto de três fasores equilibrados e simétricos (mesmas amplitudes e defasagem de 120° entre si), possuindo sequência de fases do sistema original;
- Sequência negativa: conjunto de três fasores equilibrados e simétricos (mesmas amplitudes e defasagem de 120° entre si), possuindo sequência de fases oposta ao sistema original;
- Sequência zero: conjunto de três fasores simétricos com mesmo módulo e ângulo.

A Fig. 2.8 ilustra os três sistemas trifásicos originados da aplicação do método descrito acima, em um sistema trifásico desequilibrado. A equação matricial (2.1), apresenta o cálculo das componentes de sequência, para correntes elétricas com sequência de fases ABC e tendo como referência a fase A (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

sendo \hat{I}_0 , \hat{I}_1 , \hat{I}_2 os fasores correspondentes às correntes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, \hat{I}_A , \hat{I}_B , \hat{I}_C os fasores correspondentes às correntes de fase e $a = 1 \angle 120^\circ$ um operador rotacional.

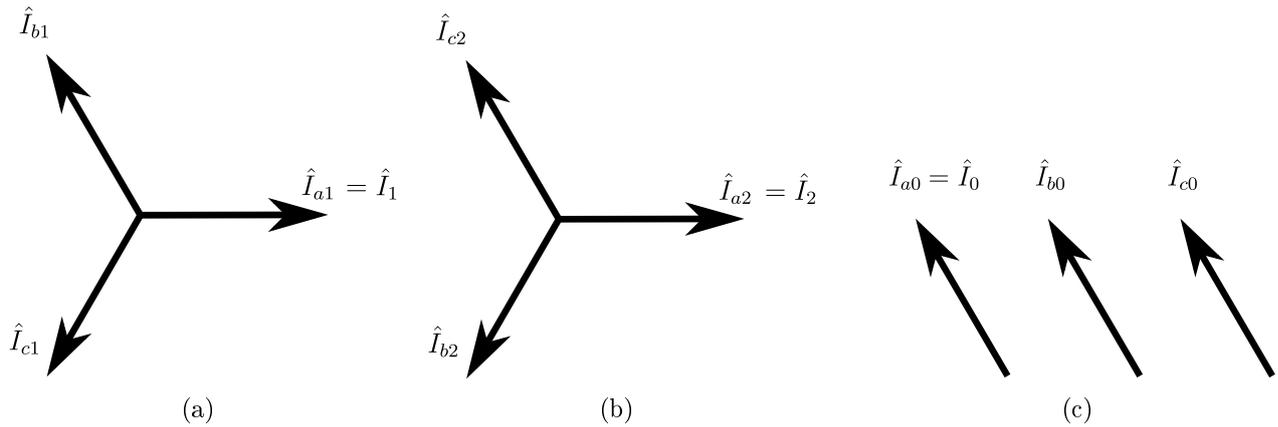


Figura 2.8. Componentes de seqüência: (a)Positiva, (b)Negativa e (c)Zero.

Por outro lado, se as grandezas obtidas forem as de seqüência, para voltar ao domínio de fases basta usar a equação matricial (2.2) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Logo, o uso das componentes de seqüência proposta por Fortescue (1918) permite uma análise de sistemas desequilibrados de modo simples e eficaz. É importante destacar que a soma das componentes simétricas resulta no sistema original desequilibrado, como demonstrado na Fig. 2.9.

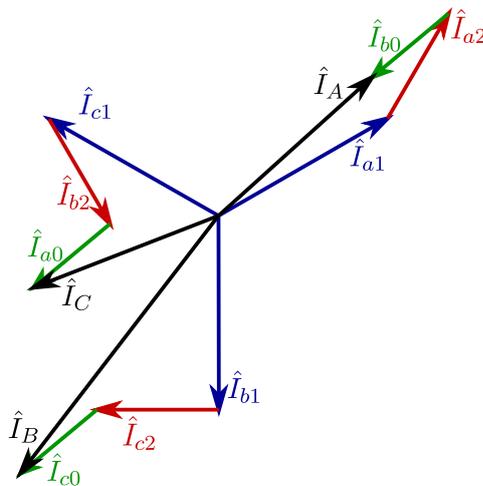


Figura 2.9. Sistema original desequilibrado demonstrado através da soma das componentes simétricas.

2.3.1 Função PC Baseada em Componentes Simétricas

A teoria de componentes simétricas foi proposta em (FORTESCUE, 1918) para aplicação no domínio da frequência, através do uso de fasores, porém, o uso no domínio do tempo também tornou-se possível, apesar de sua operação em sinais instantâneos ser considerada por muito estranha (KARIMI-GHARTEMANI; KARIMI, 2007). Desse modo, existem na literatura diferentes métodos para obtenção dos sinais instantâneos das componentes simétricas, sendo que alguns autores interpretaram o operador rotacional complexo a como um atraso no domínio do tempo igual a $\frac{2\pi}{3}$ rad (KARIMI-GHARTEMANI; KARIMI, 2007).

No presente trabalho, utilizam-se os sinais instantâneos das componentes simétricas calculados como apresentado em (2.3), de modo que os coeficientes a e a^2 consistem em atrasos no tempo de $\frac{2T}{3}$ e $\frac{T}{3}$, respectivamente, sendo T o período fundamental do sinal avaliado (KASZTENNY *et al.*, 2000).

$$i_0(t) = \frac{1}{3}[i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)] ,$$

$$i_1(t) = \frac{1}{3} \left[i_a(t) + i_b \left(t - \frac{2T}{3} \right) + i_c \left(t - \frac{T}{3} \right) \right] , \quad (2.3)$$

$$i_2(t) = \frac{1}{3} \left[i_a(t) + i_b \left(t - \frac{T}{3} \right) + i_c \left(t - \frac{2T}{3} \right) \right] ,$$

sendo $i_1(t)$, $i_2(t)$ e $i_0(t)$ os sinais instantâneos das componentes de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

Com relação à componente de sequência positiva, sabe-se que a mesma está presente em todos os tipos de curtos-circuitos. Por outro lado, a componente de sequência negativa existe em casos de curtos-circuitos assimétricos, ou seja, monofásicos, bifásicos e bifásicos-terra (ALEXANDER; SADIKU, 2013). O uso da sequência positiva tem como desvantagem a influência do carregamento do sistema, o que não é verdade para o uso da componente de sequência negativa, pois a mesma só surge idealmente durante a ocorrência do distúrbio e, portanto, é exclusiva do circuito puro de falta (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Afim de abordar todos os tipos de faltas, e de modo a obter uma influência mínima do carregamento do sistema, em (KASZTENNY *et al.*, 2006) sugere o uso de um sinal misto, o qual é composto pela soma das componentes de sequência negativa e positiva, como apresentado

em (2.4). Entretanto, nessa abordagem a componente de sequência positiva é ponderada através de uma constante multiplicativa, de modo a possuir uma menor influência e conseqüentemente menor impacto das características do sistema.

$$i_{mix}(t) = i_2(t) - K \cdot i_1(t) , \quad (2.4)$$

sendo K uma constante de ponderação para a componente de sequência positiva, sendo usada neste trabalho com o valor de 0,2, como sugerido em (KASZTENNY *et al.*, 2006).

Apesar das abordagens da função PC no domínio do tempo possuírem uma atuação mais rápida em relação as baseadas em fasores, várias pesquisas têm buscado diminuir ainda mais o tempo de atuação, o que é atrativo para os agentes com ativos na rede básica. Partindo dessa premissa, este trabalho apresenta uma solução alternativa para a aplicação da função PC no domínio do tempo, baseada em componentes oriundas da Transformada de Park (representada classicamente pela sigla TDQ) aplicada nos sinais desequilibrados de correntes, com o intuito de diminuir os tempos de atuação desta função. Ademais, o caso de falta trifásica simétrica também é abordado, cuja demonstração será apresentada posteriormente no presente trabalho.

2.4 FONTES DE ERROS PARA FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

As funções de proteção no domínio do tempo são mais rápidas quando comparadas com as funções baseadas na análise de fasores, porém, fontes de erros podem estar presentes em ambas abordagens, comprometendo a confiabilidade da função de proteção. A seguir, será abordado o conceito de algumas fontes de erros tradicionais que podem impactar no desempenho da função PC.

2.4.1 Corrente Capacitiva

As LTs possuem capacitâncias distribuídas ao longo de sua extensão, porém, a depender do modelo de LT utilizado no desenvolvimento de funções, o efeito capacitivo da mesma é desprezado, como por exemplo, em linhas curtas modeladas a parâmetros concentrados. Para se ter um modelo de representação mais confiável com a realidade, em casos de representação de linhas médias e longas, leva-se em consideração admitâncias em derivação no modelo da LT,

ou seja, contempla-se o efeito capacitivo deste equipamento.

Tal efeito insere erros no desempenho dos esquemas de proteção, sendo maior à medida em que o comprimento e o nível de tensão da LT aumentam. Com relação à função PC, a existência da corrente capacitiva ocasiona uma mudança de fase entre os sinais medidos nos terminais locais e remoto da LT (LEITE JR. *et al.*, 2016; HINGE; DAMBHARE, 2015). Portanto, mesmo em regime permanente, o efeito capacitivo da LT pode sensibilizar o algoritmo, fazendo necessário o uso de um limiar de atuação de modo a oferecer segurança para o esquema de proteção, como dito anteriormente.

2.4.2 Componente CC de Decaimento Exponencial

Da teoria de circuitos polifásicos sabe-se que durante curtos-circuitos, nos primeiros instantes de falta, os sinais de corrente podem ser sobrepostos por uma componente CC de decaimento exponencial (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Esta componente CC pode afetar o desempenho de algumas funções de proteção (ANDERSON, 1999), incluindo a função PC. Devido a isto, funções no domínio do tempo ou baseadas em fasores utilizam algoritmos para eliminação desta componente, a exemplo do filtro mímico digital (BENMOUYAL, 1995; ALMEIDA; LOPES, 2019) e do uso de corrente réplica incremental (SCHWEITZER *et al.*, 2015; LEITE JR. *et al.*, 2018).

A amplitude da componente CC de decaimento exponencial pode variar de acordo com o tipo e o ângulo de incidência da falta. Além disso, o ângulo de incidência do curto-circuito acarreta em maior ou menor conteúdo transitório no sinal medido, nos primeiros instantes da ocorrência do defeito (ANDERSON, 1999). Para contornar isto, geralmente utilizam-se filtros passa baixa para eliminar as componentes de alta frequência do sinal e assim poder melhor avaliá-lo.

Com relação à função PC, em seu modo tradicional, onde utilizam-se somente os semi-ciclos positivos do sinal, a ocorrência de uma falta com ângulo de incidência negativo resultaria em atrasos na função de proteção, sendo maior ainda com a presença de uma componente CC de decaimento exponencial. Porém, como relatado anteriormente, de modo a melhorar o desempenho da função PC, utiliza-se a análise de ciclo completo do sinal, em que é realizada a modulação e

análise de ambos semi-ciclos (positivo e negativo) evitando assim que o desempenho da função PC seja afetado por esta característica do defeito (LEITE JR., 2016).

2.4.3 Saturação de TC

A saturação de um transformador de corrente (TC) ocorre quando o mesmo deixa de operar na sua região linear de característica de magnetização, que acontece após o núcleo de ferro do TC atingir sua a máxima densidade de fluxo magnético (HARGRAVE *et al.*, 2018).

A saturação do núcleo magnético do TC acontece devido à alta magnitude dos sinais de corrente oriundos de uma falta ou devido ao alto nível de componente CC de decaimento exponencial, sendo que tal fenômeno resulta no surgimento de recortes nos sinais medidos, fornecendo informações distorcidas ao relé conectado, o que pode causar um comportamento errôneo do relé. Portanto, ao selecionar um TC para uma aplicação de proteção, é importante verificar se o TC satura para os níveis de corrente de falta que ocorrerão no sistema (HARGRAVE *et al.*, 2018).

De modo a evitar a saturação do núcleo magnético do TC, em aplicações de proteção, o núcleo do TC utilizado possui uma grande área de seção transversal (IEEE, 1996) e, devido ao uso de relés numéricos, a carga no secundário do TC costuma ser pequena, ou seja, não é mais um problema (BLACKBURN; DOMIN, 2015), favorecendo a não saturação do núcleo magnético do TC. Portanto, espera-se que a saturação do TC de uma LT dificilmente ocorra.

A Fig. 2.10 apresenta dois sinais medidos em uma LT, durante uma situação de falta, sendo um caso em que ocorreu a saturação do TC e o outro não. Pela figura percebe-se que durante a ocorrência de saturação, apesar do sinal ficar distorcido, o mesmo permanece com a sua polaridade, portanto, podendo-se aplicar o princípio de funcionamento da função PC no domínio do tempo.

2.4.4 *Outfeed*

Durante uma situação de falta interna em uma LT, a depender dos parâmetros da falta e da característica do sistema, pode-se ocorrer o chamado *outfeed*, no terminal da LT no qual a

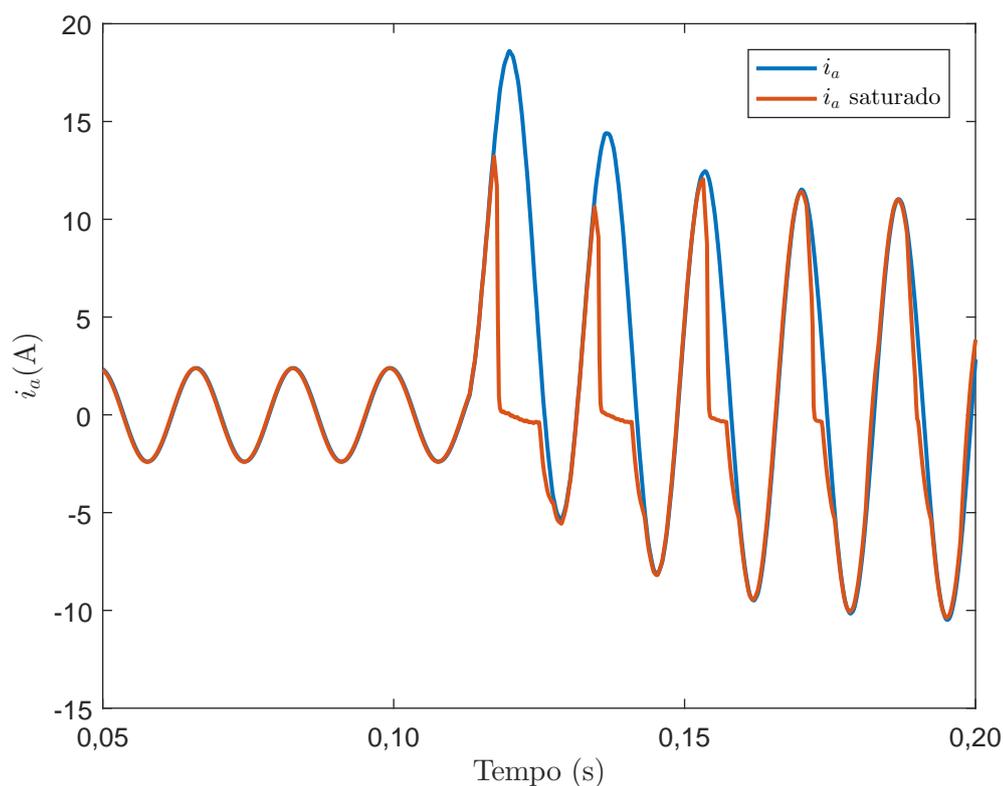


Figura 2.10. Ocorrência de saturação no núcleo magnético do TC.

corrente de carga e de falta possuem direções opostas. Geralmente, tal situação ocorre quando a contribuição de curto-circuito é baixa devido a uma alta resistência de falta e/ou por uma fonte fraca em conjunto com um alto carregamento no sistema (FERRER, 2010).

De fato, em casos de *outfeed*, observa-se uma inversão na direção da resultante entre a corrente de contribuição de falta e a corrente de carregamento em relação à direção esperada para esta corrente. Além disso, nota-se também uma diminuição na magnitude do sinal de corrente medido em relação ao sinal de regime permanente de pré-falta (FERRER, 2010).

De modo a demonstrar o efeito da ocorrência de *outfeed* no sinal de corrente, a Fig. 2.11 apresenta os sinais medidos nos terminais local e remoto de uma LT, durante uma situação de falta interna AT. Simulou-se tal curto-circuito com uma característica de alta resistência de falta e alto carregamento no sistema, resultando, portanto, em um caso de *outfeed*.

Pela Fig. 2.11 percebe-se que o sinal referente ao terminal local teve uma pequena elevação em sua magnitude, pois devido à alta resistência de falta há uma baixa contribuição de curto-circuito, que no terminal local tem mesma direção da corrente de carregamento. Porém, o sinal

do terminal remoto possui uma pequena queda na magnitude em relação ao período de regime permanente de pré-falta. Além disso, o mesmo não possui a inversão do sinal, como esperado em casos de falta interna à LT. Portanto, este é um caso característico onde o desempenho da função PC no domínio do tempo é afetado, pois como a diferença angular entre ambos sinais é de aproximadamente 180° mesmo durante a falta, a função não enxerga o curto-circuito e portanto, não atua.

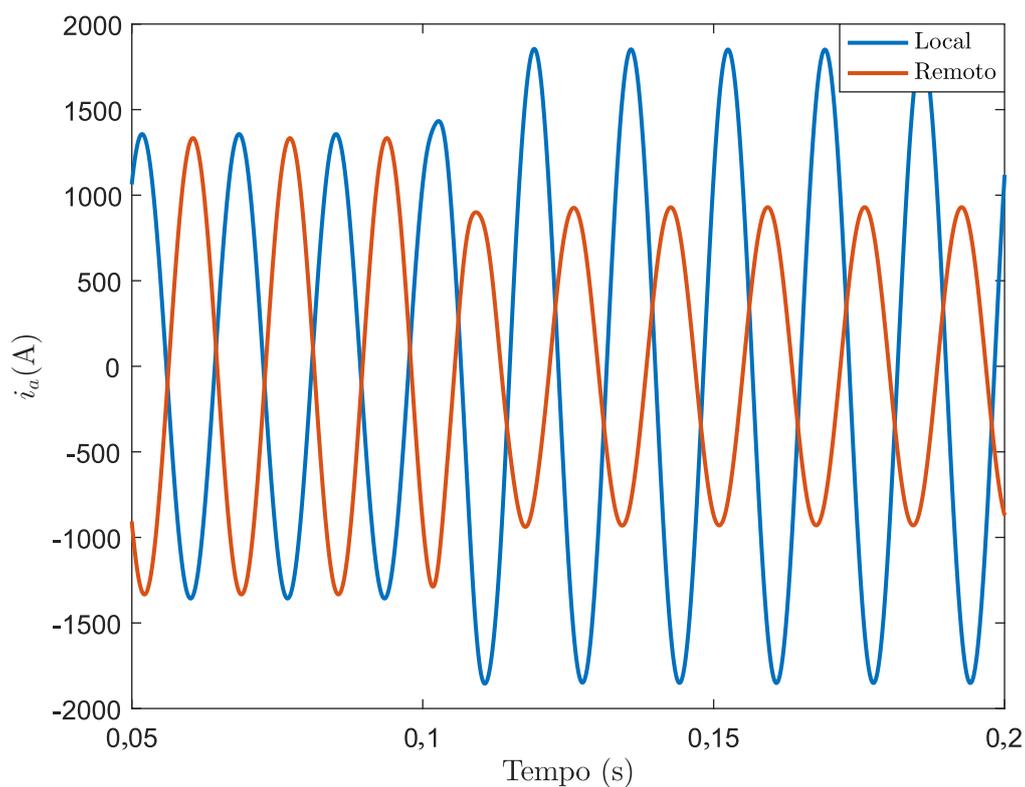


Figura 2.11. Ocorrência de *outfeed* durante uma falta interna à LT.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca da função de proteção unitária de LT por comparação de fases, de modo a apresentar os principais trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos sobre o tema supracitado. O princípio de funcionamento da função de proteção por comparação de fases é bastante conhecido e difundido na literatura, sendo inicialmente aplicado em relés eletromecânicos e posteriormente adaptados para os relés numéricos microprocessados, sendo que neste último surgiu a abordagem da função no domínio da frequência, através do uso de fasores e em seguida no domínio do tempo, com o uso de sinais instantâneos.

Em (FITZGERALD, 1928) relata-se a simplicidade do uso da função por comparação de fases, caracterizando faltas internas e externas, mediante a comparação das fases dos sinais de corrente medidos em cada terminal. Esta função é bastante simples e não necessita dos parâmetros da LT para ajustes, eliminando, portanto, possíveis fontes de erros.

Diferentemente do apresentado em (FITZGERALD, 1928), o qual utiliza sinais de fases como entradas da função PC, em (HALMAN *et al.*, 1944) sugere-se o uso de componentes simétricas, de modo a reduzir economicamente a implementação da função. Destaca-se que ao utilizar elementos de fase são analisados seis sinais (três referentes ao terminal local e três ao remoto) e ao utilizar componentes de sequência, necessita-se da análise de apenas dois sinais e não mais seis. Portanto, simplificando o esquema de proteção e melhorando a performance e sensibilidade da função, frente a versão tradicional.

O uso de sinais de sequência negativa e positiva como entrada da função PC também foi analisado em (DEWEY; HODGES, 1960). Como discutido no capítulo anterior, a componente simétrica de sequência negativa proporciona uma melhora na sensibilidade da proteção, pois a mesma não é afetada pelo carregamento do sistema elétrico. Portanto, proporciona-se uma melhora significativa na detecção de faltas e também uma redução de custos pelo fato de não necessitar analisar três sinais de fases. Porém, um ponto negativo é a não seletividade de fases,

tornando-se inviável em sistemas que possuem abertura monopolar de disjuntor.

Reporta-se em (YAOZHONG *et al.*, 1991) sobre o uso de componentes incrementais como entrada da função de proteção PC baseada em fasores. Neste trabalho conclui-se que o uso de componentes incrementais torna o relé mais confiável e mais estável. De fato, as componentes incrementais só aparecem durante o período de ocorrência da falta, sendo zero no restante do tempo. Portanto, estas componentes não são influenciadas de forma relevante pelas características de carregamento do sistema.

Além do mais, demonstra-se que o uso de componentes incrementais é melhor quando comparado com o uso de sinais de fase e até mesmo com o uso da corrente mista composta pelas componentes de sequência negativa e positiva. De fato, o uso de componentes de sequência além da perda de seletividade de fases, a depender do valor da constante de ponderação da componente de sequência positiva, o relé pode ficar pouco sensível na ocorrência de faltas trifásicas.

Em (HINGE; DAMBHARE, 2015) apresentam-se abordagens da função PC no domínio da frequência, com o uso de fasores, tendo como sinais de entrada sinais de fase, de sequência positiva e corrente mista (composta pela componente de sequência positiva e negativa). Neste trabalho analisa-se o desempenho da função PC com a remoção da corrente capacitiva de uma determinada LT e dos resultados demonstra-se que a correção do ângulo é satisfatória. Assim, a função apresenta um melhor desempenho e se torna mais confiável, principalmente em casos nos quais a corrente de carregamento do sistema é alta e ocorre uma falta com alta resistência, possuindo portanto, um efeito capacitivo grande e uma corrente de falta pequena.

Em (LEITE *et al.*, 2016) é realizada uma análise de desempenho da função PC baseada em fasor seguindo o algoritmo reportado no artigo (HINGE; DAMBHARE, 2015), frente a vários cenários de faltas, com e sem remoção do efeito capacitivo da linha. Neste trabalho, reporta-se que a remoção deste efeito melhora o desempenho da função, porém, não recaindo em melhorias muito significativas. Um ponto negativo se dá pela necessidade de medição de tensão, a qual é realizada com o uso de TPC (Transformadores de Potencial Capacitivo). Porém, estas medições podem ser distorcidas, causando inconsistências na leitura dos sinais.

Com a evolução da tecnologia e conseqüente evolução na capacidade de processamento dos computadores, funções no domínio do tempo, as quais possuem menores tempos de atuação,

bem como maior facilidade de implementação foram desenvolvidas. Estas possuem tempos de atuação menores que um ciclo fundamental, sendo mais rápidas que as funções baseadas em fasores, as quais possuem um atraso intrínseco devido à necessidade de filtragem digital. Sendo assim, quanto mais rápido o defeito for extinto ou detectado, melhor, diminuindo o tempo de desligamentos forçados. Portanto, tal possibilidade melhora os índices de disponibilidade de energia, o tempo de vida útil dos dispositivos da rede, bem como a estabilidade do sistema.

Em (KASZTENNY *et al.*, 2006), aborda-se o desenvolvimento da função PC no domínio do tempo, o qual é realizado através da modulação dos sinais de fase das correntes elétricas, medidas nos terminais local e remoto de uma determinada LT, sendo estes sinais então comparados por uma porta lógica AND. Novamente, demonstra-se que a função PC no domínio do tempo é mais rápida se comparada com a função baseada em fasores, mesmo adicionando o atraso ocasionado pelos canais de comunicação, o tempo de filtragem e processamento dos sinais, pois como dito anteriormente, a função no domínio da frequência possui um atraso intrínseco devido à estimação fasorial.

Este trabalho também aborda o uso da componente mista no domínio do tempo, a qual é composta pelas componentes de sequência positiva e negativa. Devido a isto, como já dito anteriormente, necessita-se somente a análise de um sinal por terminal, facilitando consequentemente a aplicação da metodologia.

Com relação ao tempo de atuação, é apresentado que a lógica de proteção não analisa instantaneamente os pulsos da saída da porta AND, pois utilizam-se elementos de supervisão que consistem em funções de proteção de sobrecorrente ou de distância. No entanto, para uso destes elementos extra, faz-se necessário o uso de mais infraestrutura de comunicação (KASZTENNY *et al.*, 2006).

Kasztenny *et al.* (2006) declaram que o elemento de sobrecorrente é mais favorável pois não necessita de medição de tensão. Já o elemento de distância depende da análise de tensões, aspecto esse que pode ser um problema, devido aos transitórios dos TPC. Portanto, o uso de elemento de sobrecorrente como supervisor tem vantagem frente ao de distância, pelo fato da lógica de proteção funcionar exclusivamente com medições de corrente. Assim, se o elemento de supervisão detectar algo anormal, aciona-se a lógica da função PC de modo a detectar uma falta interna ou externa à LT monitorada.

Uma abordagem da função PC no domínio do tempo, usando elementos incrementais com o objetivo de analisar o circuito puro de falta é avaliada em (LEITE JR. *et al.*, 2016). Tal aplicação tem como resultados sinais que são imunes à característica de carregamento do sistema. Dos resultados, os autores concluíram que a função PC obteve bom desempenho, pois os elementos são mais sensíveis ao distúrbio se comparados com a versão tradicional na qual usam-se elementos de fase e de sequência. O trabalho apresenta que a função atuou em todos os casos simulados, demonstrando então que o uso de elementos incrementais resultam em uma melhoria significativa para a função PC no domínio do tempo.

Em (LEITE JR. *et al.*, 2018) e (LEITE JR. *et al.*, 2018) uma versão melhorada da função PC no domínio do tempo é avaliada, usando-se como entrada valores instantâneos positivos e negativos, ou seja, o ciclo completo do sinal. Tal abordagem resulta em tempos menores quando comparado com a versão de uso somente do ciclo positivo, pois o ângulo de incidência torna-se indiferente com relação à polaridade do primeiro pico do sinal com defeito.

O uso de corrente réplica incremental, como entrada da função PC, também foi analisado em (LEITE JR. *et al.*, 2018) e (LEITE JR. *et al.*, 2018). O desenvolvimento deste sinal réplica é relatado em (SCHWEITZER *et al.*, 2015) para funções do domínio do tempo, o qual trata-se de uma combinação do elemento incremental e sua derivada, fazendo com que tenha uma redução do impacto da componente CC de decaimento exponencial. Dos resultados, os autores concluíram que o uso da corrente réplica, gera bons resultados. Porém, faz-se necessário o uso dos parâmetros da LT, os quais podem apresentar incertezas em aplicações práticas.

O uso do filtro mimico aplicado no pré-processamento dos sinais de entrada da função PC, de modo a eliminar o efeito CC de decaimento exponencial dos sinais avaliados foi analisado em (ALMEIDA; LOPES, 2019). Dos resultados, os autores concluíram que o uso do filtro mimico resulta em tempos de atuação menores se comparados com a função PC tradicional, mas não consistindo em uma melhoria relevante. Levando em conta que assim como o uso da corrente réplica incremental, o uso do filtro mimico requer o conhecimento dos parâmetros da LT, os autores afirmam que a eliminação da componente CC para o funcionamento da função PC no domínio do tempo não é crucial.

Em (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014), a Transformada de Park, tradicionalmente conhecida como TDQ, foi empregada em um algoritmo de detecção de transitórios em LT

visando processos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. No documento, apresenta-se formulação matemática que comprova que as saídas da TDQ possuem informações sobre a direcionalidade das correntes durante faltas, embora esse não tenha sido o foco dos referidos artigos.

Assim, neste trabalho, propõe-se que a TDQ seja aplicada no pré-processamento dos sinais de corrente, originando componentes que oscilam com o dobro da frequência do sistema analisado e possuem informações sobre a direcionalidade do curto-circuito no sistema. Desse modo, uma vez cruzadas as informações de desequilíbrio das correntes nos terminais da LT monitorada, torna-se possível aplicar a filosofia de funcionamento da função de proteção por comparação de fases em casos de faltas, permitindo classificá-las como sendo interna ou externa e possuindo tempos de atuações menores que a abordagem da função PC tradicional (ALMEIDA; LOPES, 2020). Sendo exatamente essa abordagem apresentada como contribuição do presente trabalho.

Tabela 3.1. Resumo da revisão bibliográfica

Referência	Sinais de entrada da Função PC
(FITZGERALD, 1928)	Sinais de fase
(HALMAN <i>et al.</i> , 1944)	Componentes simétricas
(DEWEY; HODGES, 1960)	Componentes simétricas
(YAOZHONG <i>et al.</i> , 1991)	Componente incremental
(HINGE; DAMBHARE, 2015) (LEITE <i>et al.</i> , 2016)	Sinais de fases e Componentes simétricas (com remoção do efeito capacitivo)
(KASZTENNY <i>et al.</i> , 2006)	Sinais de fase e Componentes simétricas Domínio do Tempo
(LEITE JR. <i>et al.</i> , 2016)	Componente incremental Domínio do Tempo
(LEITE JR. <i>et al.</i> , 2018) (LEITE JR. <i>et al.</i> , 2018)	Componente réplica incremental Domínio do Tempo
(ALMEIDA; LOPES, 2019)	Uso do filtro mímico Domínio do Tempo
(ALMEIDA; LOPES, 2020)	Componentes de eixo direto (TDQ) Domínio do Tempo

TRANSFORMADA DE PARK PARA ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS DE FALTA

Proposta por Robert Park em 1929 (PARK, 1929), a TDQ é uma transformada que originalmente foi desenvolvida para estudos de máquinas elétricas síncronas de polos salientes, de modo a analisar reatâncias variantes no tempo. Desde então, tal transformada vem sendo amplamente empregada em outras áreas.

A TDQ permite a análise de elementos variantes no tempo através de eixos referenciais que giram em sincronismo com a frequência angular do sistema monitorado, cujos eixos são chamados de: eixo direto e eixo em quadratura (LOPES, 2014). Para detecção de distúrbios, a aplicação da TDQ pode ser realizada em sinais elétricos de tensão ou corrente, sendo os eixos referenciais sincronizados na frequência angular fundamental do sistema (ω). A Fig. 4.1 ilustra tal utilização, sendo que θ é o ângulo do eixo direto, θ_i o ângulo da fase A e $\Delta\theta$ a diferença angular entre eles.

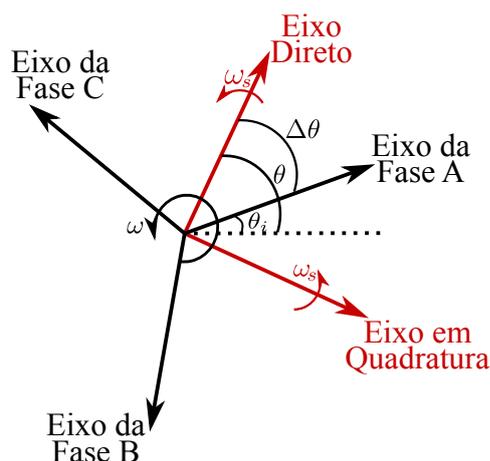


Figura 4.1. Eixos direto e em quadratura.

Durante o regime permanente de operação normal do sistema, as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura são praticamente constantes. Por outro lado, durante a ocorrência de distúrbios, estas componentes possuem variações devido ao surgimento de desequilíbrios

nos sinais elétricos, as quais são passíveis de detecção (LOPES *et al.*, 2013). Para expor tal constatação, considere o cálculo das componentes de eixo direto A_d e em quadratura A_q (PARK, 1929), conforme demonstrado em (4.1).

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

onde,

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

sendo A_a, A_b e A_c os sinais trifásicos, de tensão ou corrente, correspondentes às fases A, B e C, respectivamente, $\varphi = k\omega_s\Delta t + \theta$, onde k é o índice da k -ésima amostra dos sinais, ω_s a frequência angular dos eixos direto e em quadratura, Δt o período de amostragem usado durante a conversão A/D dos sinais monitorado e θ o ângulo de fase da componente de eixo direto A_d .

Avaliando (4.1), nota-se que a análise de amostras em instantes passados no cálculo das componentes de eixo direto e em quadratura não é necessária, evitando a necessidade de *buffers* para armazenamento de amostras, o que facilita a implementação da função em tempo real. Outro benefício da TDQ é o fato de que apenas as amostras de A_d ou de A_q são utilizadas para a detecção da falta, independentemente das fases envolvidas no distúrbio, resultando em um algoritmo mais simples. Assim, frente ao algoritmo da função PC tradicional, o uso da TDQ permite a elaboração de lógicas simples, sem que seja necessário o monitoramento das três fases individualmente.

4.1 APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE PARK EM SINAIS TRIFÁSICOS

Para melhor entender o uso da TDQ em situações de desequilíbrio do sistema, inicialmente considere as seguintes componentes de fase de um sistema trifásico, sequência de fases ABC, 60 Hz, frequência angular fundamental $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência fundamental:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{am} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_i), \\ i_b &= I_{bm} \cdot \text{sen}\left(\omega t + \theta_i - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c &= I_{cm} \cdot \text{sen}\left(\omega t + \theta_i + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde I_{am} , I_{bm} e I_{cm} são as magnitudes dos sinais de correntes e θ_i o ângulo de fase da corrente na fase A (i_a).

Assumindo que os eixos direto e em quadratura da TDQ giram na frequência ω_s , ao aplicar a transformada nos sinais de corrente por meio de (4.1), as expressões (4.4) e (4.5) são obtidas para as componentes de eixo direto e em quadratura (LOPES *et al.*, 2013). Vale salientar que no Apêndice A, apresenta-se a formulação matemática completa da aplicação da TDQ em sinais elétricos trifásicos e como a aplicação da TDQ será realizada em sinais de corrente, as componentes A_d e A_q serão chamadas a partir daqui de i_d e i_q , respectivamente:

$$\begin{aligned} i_d = & \frac{1}{3} \left\{ \left[I_{am} - \frac{1}{2}(I_{bm} + I_{cm}) \right] \text{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{bm} - I_{cm}) \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\ & \left. - [I_{am} + I_{bm} + I_{cm}] \text{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} i_q = & \frac{1}{3} \left\{ \left[I_{am} - \frac{1}{2}(I_{bm} + I_{cm}) \right] \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\ & - \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{bm} - I_{cm}) \text{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\ & \left. - [I_{am} + I_{bm} + I_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} . \end{aligned} \quad (4.5)$$

Nota-se das equações (4.4) e (4.5), que ocorrendo igualdade entre as amplitudes das grandezas de fases, surgirão oscilações nas componentes i_d e i_q com frequência igual a $\omega_s - \omega$. Já para casos de diferenças entre as amplitudes das grandezas de fases, surgirão componentes com frequência igual à $\omega_s + \omega$.

4.1.1 Análise em Regime Permanente de Pré-Falta

Em caso de regime permanente de pré-falta, onde o sistema encontra-se equilibrado, tem-se $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_m$ e sincronizando os eixos de referência na frequência do sistema elétrico ω , ou seja, $\omega_s = \omega$, ao aplicar a TDQ obtém-se:

$$i_d = -I_m \text{sen}(\theta - \theta_i), \quad (4.6)$$

$$i_q = -I_m \cos(\theta - \theta_i) . \quad (4.7)$$

De (4.6) e (4.7) observa-se que as componentes de eixo direto e em quadratura resultantes são constantes e a amplitude depende da diferença angular $\Delta\theta = \theta - \theta_i$.

4.1.2 Análise em Sistema Desequilibrado

Uma vez que nesse trabalho o interesse maior está nas análises referentes aos desequilíbrios de corrente ocasionados por curtos-circuitos, assume-se uma situação de sistema desequilibrado com sincronização da frequência dos eixos referenciais com a frequência do sistema, ou seja, $\omega = \omega_s$ e $I_{am} \neq I_{bm} \neq I_{cm}$. Nesse caso, ao aplicar a TDQ, obtém-se:

$$\begin{aligned} i_d = & \frac{1}{3} \left\{ [I_{am} - \frac{1}{2}(I_{bm} + I_{cm})] \text{sen}[2\omega t + \theta + \theta_i] \right. \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{bm} - I_{cm}) \cos[2\omega t + \theta + \theta_i] \\ & \left. - [I_{am} + I_{bm} + I_{cm}] \text{sen}(\theta - \theta_i) \right\}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} i_q = & \frac{1}{3} \left\{ [I_{am} - \frac{1}{2}(I_{bm} + I_{cm})] \cos[2\omega t + \theta + \theta_i] \right. \\ & - \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{bm} - I_{cm}) \text{sen}[2\omega t + \theta + \theta_i] \\ & \left. - [I_{am} + I_{bm} + I_{cm}] \cos(\theta - \theta_i) \right\}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

De (4.8) e (4.9), nota-se que as componentes não são constantes como no caso de regime permanente de pré-falta, mas sim, oscilantes, com frequência equivalente ao dobro da frequência fundamental do sistema, ou seja, 2ω . Nesse contexto, ressalta-se que essas componentes permitem a identificação do início do distúrbio e a direcionalidade dos sinais referentes aos terminais local e remoto é mantida, permitindo a identificação de faltas internas e externas à LT via função PC.

Considerando o exposto, quando se aplica a TDQ em sinais elétricos trifásicos desequilibrados, tem-se como saída sinais que oscilam com o dobro da frequência fundamental do sistema (2ω). Assim, o desenvolvimento da função PC aplicando-se a TDQ permite que a proteção tome decisões em tempos reduzidos em comparação com a função PC tradicional baseada na análise de sinais alternados na frequência fundamental, sendo esta uma vantagem da função proposta nesse trabalho, a qual será chamada daqui em diante de função PC-TDQ.

É ainda importante reforçar que mesmo em casos de faltas simétricas, apesar de não existir desequilíbrio das correntes em regime permanente de falta, verificam-se tipicamente transitórios logo após a incidência do distúrbio, que são enxergados pela TDQ como desequilíbrios. Desse modo, a classificação da falta como interna ou externa ainda é garantida, embora possa

ser realizada em tempos diferentes em relação aos casos de faltas assimétricas, conforme será detalhado na análise de resultados apresentada no próximo capítulo.

4.1.3 Determinação do ângulo de fase θ_i

No algoritmo proposto, seguindo procedimento reportado em (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014), fez-se o alinhamento entre os eixos da fase A e do eixo direto, de modo a obter valores de i_d em regime permanente em torno de zero. Para tanto, partindo do caso em que o sistema elétrico esteja em regime permanente e com fases equilibradas, são obtidas componentes ortogonais i_d e i_q equivalentes a níveis CC, como provado pelas equações (4.6) e (4.7). Logo, é possível processá-las trigonometricamente com o intuito de determinar o ângulo de fase θ_i da corrente i_a .

Considerando-se a razão entre as componentes i_d e i_q , obtém-se:

$$\begin{aligned}\frac{i_d}{i_q} &= \frac{-i_m \operatorname{sen}(\theta - \theta_i)}{-i_m \operatorname{cos}(\theta - \theta_i)}, \\ \frac{i_d}{i_q} &= \tan(\theta - \theta_i).\end{aligned}\tag{4.10}$$

Consequentemente:

$$\begin{aligned}\tan(\theta - \theta_i) &= \frac{i_d}{i_q}, \\ \theta - \theta_i &= \arctan\left(\frac{i_d}{i_q}\right), \\ \theta_i &= \theta - \arctan\left(\frac{i_d}{i_q}\right).\end{aligned}\tag{4.11}$$

Portanto, deve-se empregar uma estimativa aleatória θ_0 do ângulo θ na primeira aplicação da TDQ, obtendo-se as componentes $i_d(\theta_0)$ e $i_q(\theta_0)$. Em seguida, com estas componentes, obtém-se θ_i , de modo que nas próximas aplicações da TDQ utiliza-se $\theta = \theta_i$, logo, $\Delta\theta = \theta - \theta_i = 0^\circ$. Com isso, o alinhamento das componentes i_d e i_a é realizado, obtendo valores de i_d em torno de zero, durante regime permanente de pré-falta (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014). Tal constatação é exemplificada na Fig. 4.2, onde nota-se o sinal constante e nulo durante o

regime permanente de pré-falta e oscilante, com o dobro da frequência do sistema (2ω), durante o período de falta.

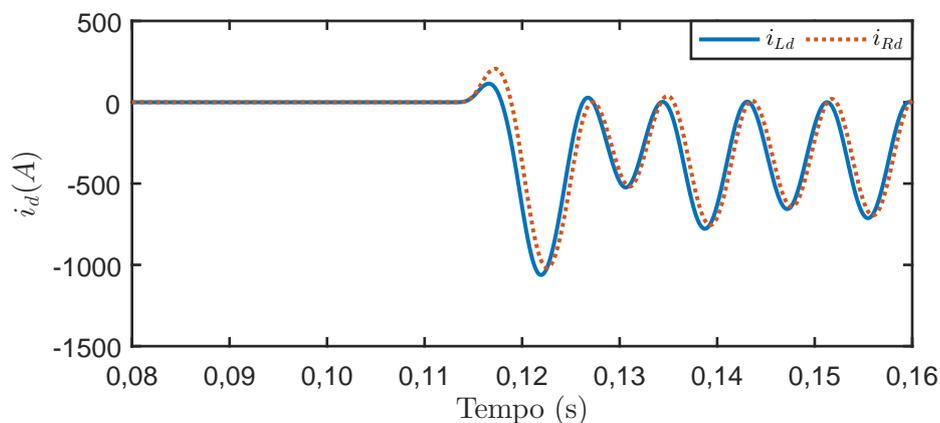


Figura 4.2. Componentes de eixo direto local e remota, durante a ocorrência de uma falta interna.

4.1.4 Processamento das Componentes de Eixo Direto

O uso das componentes oriundas da TDQ como sinais de entrada da função PC é atrativo, pois como dito anteriormente, proporciona uma atuação mais rápida frente ao desempenho da função PC tradicional. Além disso, a TDQ detecta rapidamente o desequilíbrio nos sinais de tensão e corrente do sistema elétrico, aprimorando também o processo de identificação de distúrbios.

Em alguns casos, nos quais os transitórios oriundos da ocorrência de falta se encontram significativamente atenuados, devido a altas resistências de faltas, fonte fraca no sistema ou outras adversidades, a detecção do distúrbio pode se tornar difícil. Portanto, com o intuito de minimizar este efeito e tornar o algoritmo mais robusto, propõe-se a utilização de grandezas incrementais c_{dif} dos sinais de eixo direto e de suas energias ξ_{dif} , assim como utilizado por (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014), para detecção de transitórios. Vale destacar que este processamento é algo a parte da aplicação da filosofia da função PC usando-se as componentes de eixo direto, sendo utilizado apenas para a rápida detecção do defeito.

Os referidos artigos possuíam o objetivo de análises de transitórios para detecção de localização de faltas por meio de ondas viajantes, e aqui o objetivo é a detecção da falta de modo a sensibilizar o algoritmo e conseqüentemente resultar em tempos de *trip* inferiores ao verificado

quando do uso de soluções tradicionais.

As energias ξ_{dif} dos coeficientes incrementais c_{dif} , são calculadas utilizando uma janela de dados móvel no tempo que desliza sobre os coeficientes, atualizando suas amostras a cada conversão A/D. Os coeficientes c_{dif} e as energias ξ_{dif} são calculados como segue (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014):

$$c_{dif}(k) = i_d(k) - i_d(k - 1) , \quad (4.12)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k [c_{dif}(n)]^2 , \quad (4.13)$$

onde $i_d(k)$ é a k -ésima amostra da componente de eixo direto, $c_{dif}(k)$ é a k -ésima amostra da grandeza incremental, $\xi_{dif}(k)$ é a energia da k -ésima janela de dados onde se encontram armazenados valores de $c_{dif}(k)$ e Δk_{EN} é o tamanho da janela, em número de amostras, utilizada para cálculo das energias $\xi_{dif}(k)$ janeladas, neste trabalho com o tamanho igual a meio ciclo fundamental, como sugerido em (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014; LOPES, 2014).

Visto que o coeficiente incremental c_{dif} é bastante sensível a variações nos sinais monitorados, as energias janeladas oriundas dessas grandezas incrementais crescem mais rapidamente nos momentos iniciais de uma falta do que se fossem calculadas considerando as componentes de eixo direto apenas. Assim, ao calcular c_{dif} a partir dos coeficientes de eixo direto obtidos da TDQ, o algoritmo se torna bastante sensível na detecção de transitórios de perturbações (LOPES *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014; LOPES, 2014).

4.2 FUNÇÃO PC-TDQ PROPOSTA

Conforme mencionado anteriormente, as componentes de eixo direto e em quadratura possuem informações acerca da direcionalidade das correntes elétricas, sendo portanto passíveis de utilização na filosofia da função PC. É importante destacar que apesar do eixo direto ser alinhado com o eixo da fase A em regime permanente do sistema, após a ocorrência de uma falta, as posições angulares relativas entre ambos mudam, resultando em um nível CC sobreposto à componente oscilante com frequência 2ω . Assim, em se tratando de uma aplicação no domínio do tempo, é importante que os sinais apresentem cruzamentos por zero para fins de verificação das relações angulares (ROBERTSON; MEIKLE, 1968).

Portanto, propõe-se o cálculo das derivadas das componentes de eixo direto com a finalidade de eliminar a componente CC, sem comprometimento das relações angulares de interesse. Assim, considera-se que:

$$i_{dd}(k) = \frac{di_d}{dt}(k) = \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{\Delta t} \quad (4.14)$$

$$i_{qd}(k) = \frac{di_q}{dt}(k) = \frac{i_q(k) - i_q(k-1)}{\Delta t} \quad (4.15)$$

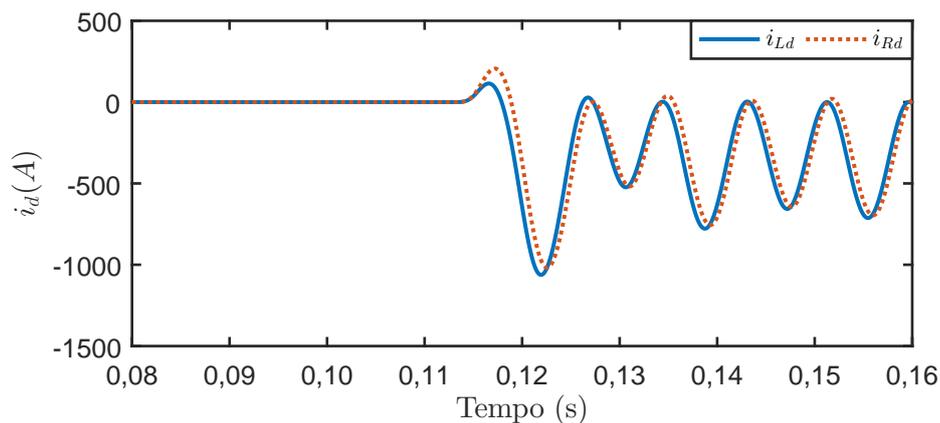
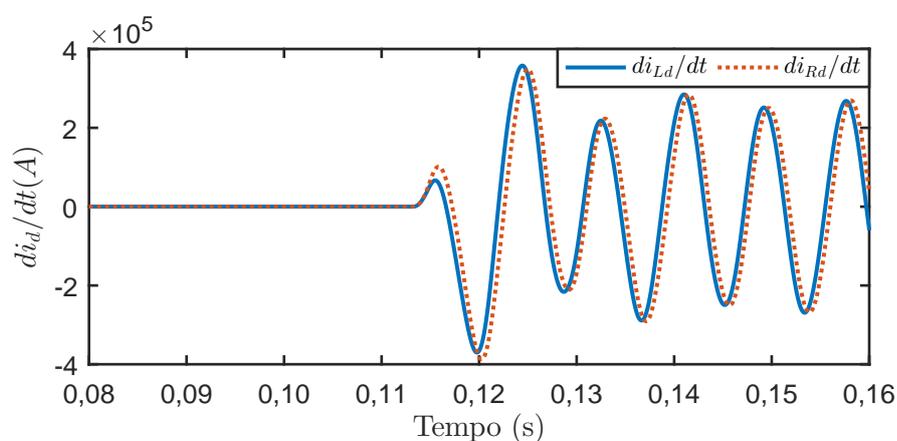
onde $i_d(k)$ e $i_q(k)$ são as k -ésimas amostras das componentes de eixo direto e em quadratura, respectivamente, $i_{dd}(k)$ e $i_{qd}(k)$ seus respectivos sinais derivados e Δt o período de amostragem dos sinais.

De modo a exemplificar a aplicação da derivada nos sinais oriundos da TDQ, a Fig. 4.3 apresenta um caso de falta interna, sendo que em Fig. 4.3(a) ilustra-se os sinais das componentes de eixo direto de corrente nos terminais local e remoto (i_{Ld} e i_{Rd} , respectivamente) oriundas da TDQ, enquanto que na Fig. 4.3(b) demonstra-se os sinais das derivadas das componentes de eixo direto nos terminais local e remoto (di_{Ld}/dt e di_{Rd}/dt , respectivamente). Além disso, apresenta-se na Fig.4.4(a) e (b), os sinais de eixo direto referentes a ambos terminais da LT e a derivada destes sinais, respectivamente, para um cenário de falta externa à LT. Logo, verifica-se que após a derivação dos sinais, de fato os mesmos apresentam cruzamento pelo zero.

Deve-se notar que, apesar das relações angulares das correntes i_{Ld} e i_{Rd} serem visualmente identificadas como coerentes, estas seriam de difícil análise computacionalmente por meio da avaliação de cruzamentos por zero do sinais, em virtude do deslocamento CC imposto pela mudança de θ_i no período de falta em relação ao regime permanente de pré-falta.

Por outro lado, conforme esperado, observa-se que os sinais derivados apresentam coincidência de polaridade para faltas internas à LT e polaridades opostas para faltas externas à LT, apresentando cruzamentos por zero que permitem a avaliação das relações angulares das correntes no domínio do tempo de uma forma simples e confiável.

Com o pré-processamento dos sinais e, portanto, a obtenção das derivadas das correntes de eixo direto (i_{dd}) e em quadratura (i_{qd}), aplica-se então o princípio de funcionamento da função por comparação de fases no domínio do tempo, tendo como sinais de entrada as derivadas das componentes de eixo direto. Vale destacar que para o estudo aqui realizado utilizou-se

(a) Componente de Eixo Direto i_d , nos terminais local e remoto

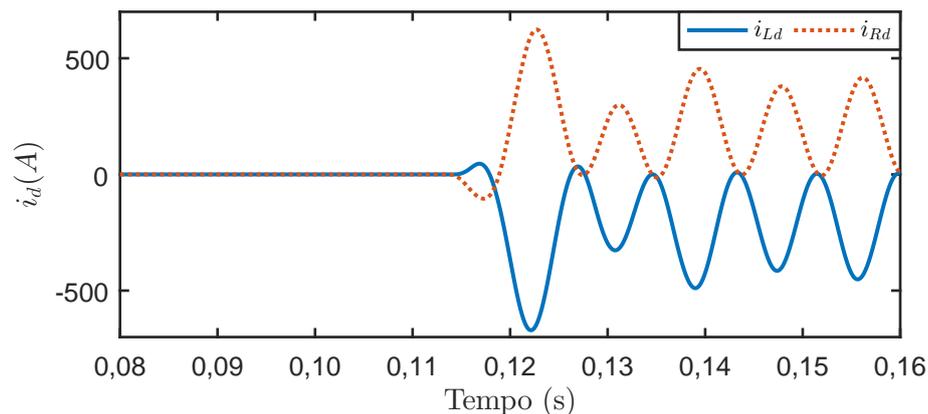
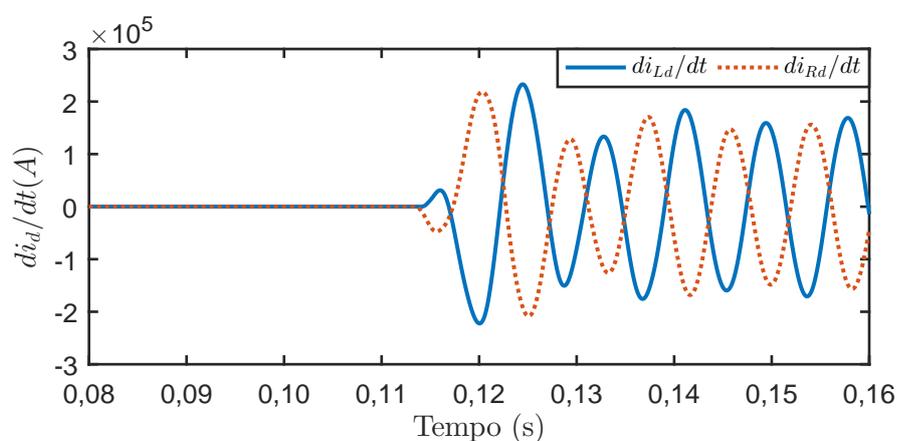
(b) Derivada da componente de Eixo Direto, nos terminais local e remoto

Figura 4.3. Falta interna à linha de transmissão.

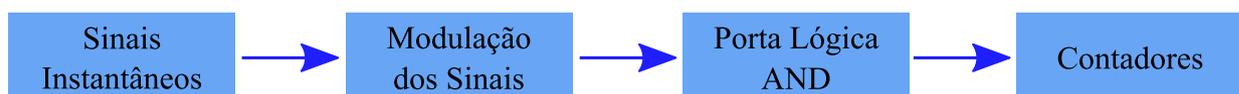
somente o sinal de eixo direto, pois o uso do sinal de eixo em quadratura resultaria nas mesmas conclusões do ponto de vista da operação da proteção.

Assim, o princípio de funcionamento da função de proteção por comparação de fases no domínio do tempo, como dito no capítulo 2, se resume em: obtenção dos sinais instantâneos oriundos dos terminais local e remoto, modulação destes sinais, aplicação de uma porta lógica AND e por fim a atuação dos contadores, como apresentado no fluxograma da Fig. 4.5.

Uma vez obtidos os sinais i_{dd} oriundos dos terminais local e remoto da LT monitorada, realiza-se a modulação de ciclo completo destes sinais instantâneos, como reportado em (LEITE JR. *et al.*, 2018). Assim, para o semi-ciclo positivo do sinal, valores instantâneos positivos ou nulos resultam em saídas unitárias e valores negativos em saídas nulas. Já para o semi-ciclo negativo, o contrário é verdadeiro, ou seja, valores instantâneos negativos ou nulos resultam em saídas unitárias e valores positivos em saídas nulas, como apresentado nas Figs. 4.6(c) e 4.6(d).

(a) Componente de Eixo Direto i_d , nos terminais local e remoto.

(b) Derivada da componente de Eixo Direto, nos terminais local e remoto.

Figura 4.4. Falta externa à LT.**Figura 4.5.** Lógica de aplicação da função PC no domínio do tempo.

Em seguida, faz-se o processamento dos sinais modulados por uma porta lógica AND, resultando em pulsos com alto nível lógico, em casos onde os sinais possuem polaridades coincidentes e baixo nível lógico caso contrário, como apresentado nas Figs. 4.6(e) e 4.6(f).

Considerando a análise de ciclo completo do sinal, realiza-se o processamento destes pulsos por meio de duas portas lógicas AND, aplicadas através das equações (4.16) e (4.17), as quais retornam pulsos com valores positivos unitários somente quando houver coincidência de polaridade entre ambos sinais instantâneos de corrente avaliados:

$$i_{AND}(t) = \text{AND}[i_{mod_L}(t), i_{mod_R}(t)], \quad (4.16)$$

$$i_{AND_{neg}}(t) = \text{AND}[-i_{mod_L}(t), -i_{mod_R}(t)], \quad (4.17)$$

sendo $i_{AND}(t)$ a saída da porta AND que considera coincidência de polaridade positiva e $i_{AND_{neg}}(t)$ coincidência de polaridade negativa, $i_{mod_L}(t)$ e $i_{mod_R}(t)$ as componentes de eixo direto moduladas pertencentes aos terminais local e remoto da LT, respectivamente.

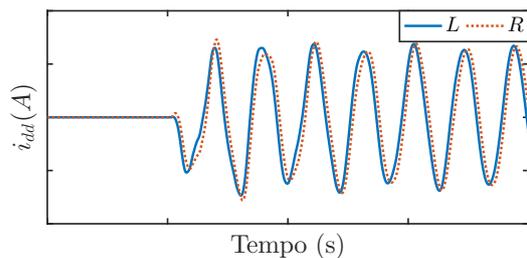
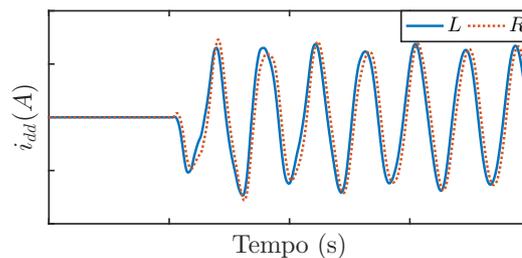
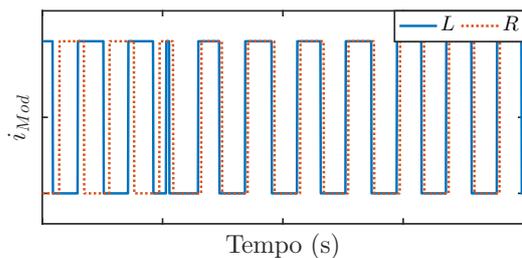
Portanto, as saídas das portas lógicas AND externam a largura dos pulsos, de modo a permitir sua contagem pelos contadores, como demonstrado nas Figs. 4.6(g) e 4.6(h). Como resultado, se as saídas das portas AND possuírem uma largura maior ou igual a um determinado limiar, uma situação de curto-circuito interno será caracterizada.

Nesse contexto, é importante ressaltar que para a função PC tradicional no domínio do tempo, (KASZTENNY *et al.*, 2006) sugerem um limiar de $\frac{1}{4}$ de ciclo fundamental, ou seja, $\psi_T = \frac{1}{4} \cdot T \approx 4.2$ ms, para análise de grandezas em 60 Hz, sendo T o período fundamental. Entretanto, como as componentes de eixo direto oriundas da TDQ são harmônicas de segunda ordem em casos de desequilíbrios, ou seja, possuem o dobro da frequência angular fundamental (2ω), dividiu-se pela metade o limiar definido para a função PC tradicional. Assim, um limiar de $\frac{1}{8}$ de ciclo fundamental foi utilizado para a função PC-TDQ proposta, ou seja, $\psi_T = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot T \approx 2.1$ ms, para 60 Hz, viabilizando atuações em tempo reduzido, sem perda de confiabilidade e segurança.

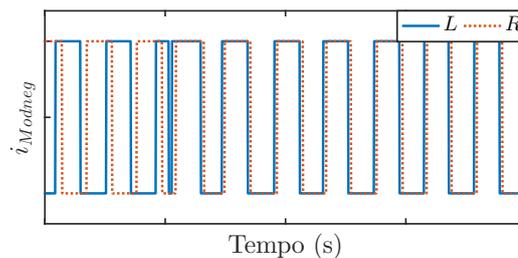
Por fim, vale destacar que a utilização de dois algoritmos em paralelo foi utilizada, um utilizando o semi-ciclo positivo do sinal e o outro o semi-ciclo negativo, ou seja, empregando $i_{AND}(t)$ e $i_{AND_{neg}}(t)$, por meio de uma porta lógica OR, como apresentado em (4.18).

$$\text{Porta Lógica OR} = \text{OR}[i_{AND}(t), i_{AND_{neg}}(t)] . \quad (4.18)$$

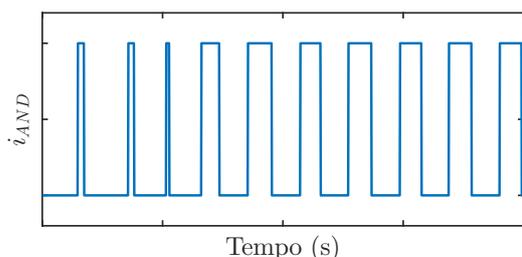
Assim, o sinal de *trip* é enviado pelo relé quando algum dos dois algoritmos é sensibilizado e quando houver detecção do distúrbio pelas energias dos coeficientes incrementais c_{dif} , como explicado anteriormente. A Figura 4.7 apresenta um resumo do algoritmo da função PC-TDQ através de um fluxograma, de modo a melhor entender a função de proteção proposta.

(a) Sinais instantâneo i_{dd} (b) Sinais instantâneo i_{dd} 

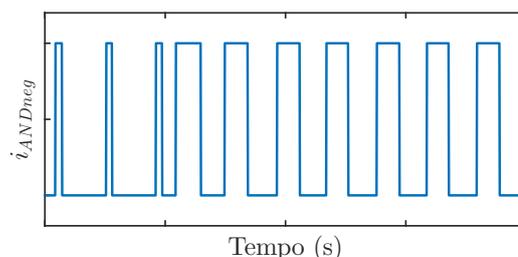
(c) Modulação do semi-ciclo positivo.



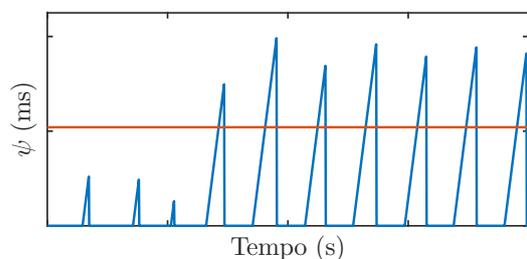
(d) Modulação do semi-ciclo negativo.



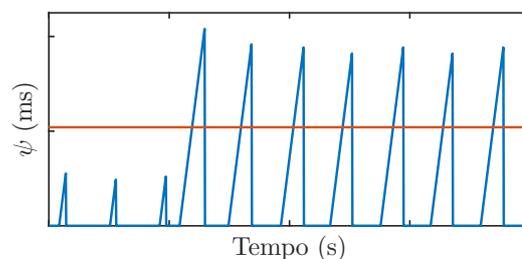
(e) Saída da porta AND.



(f) Saída da porta AND.



(g) Contadores para o semi-ciclo positivo.



(h) Contadores para o semi-ciclo negativo.

Figura 4.6. Demonstração do algoritmo, para os ciclos positivo e negativo, da função PC-TDQ no domínio do tempo.

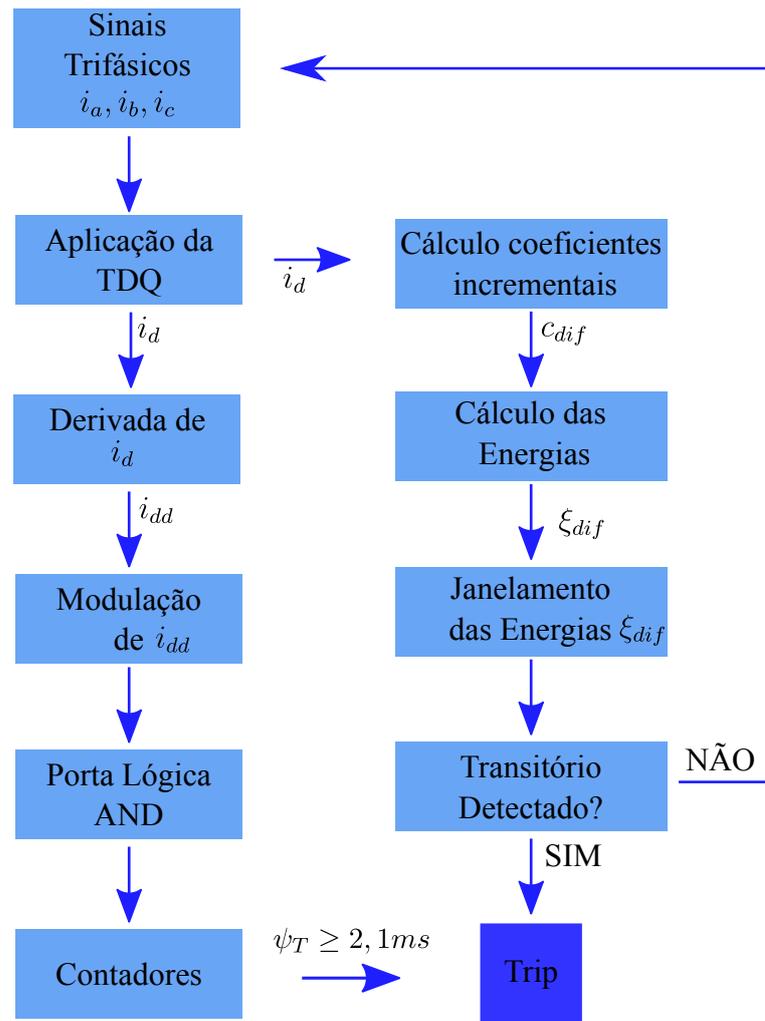


Figura 4.7. Fluxograma resumindo o algoritmo da função PC-TDQ.

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FUNÇÃO PC-TDQ

Conforme apresentado ao longo deste trabalho, a função PC compara as fases das correntes medidas nos terminais de uma LT, identificando curto-circuitos internos ou externos, a depender da relação dos ângulos de fase das referidas correntes. Na literatura atual relata-se a evolução do desempenho da função PC ao longo dos anos, a qual pode ter sua implementação baseada em fasores ou no domínio do tempo, tendo como sinais de entrada: sinais de fases, de sequência, sinais incrementais e réplicas incrementais.

No capítulo anterior, apresentou-se uma nova abordagem para esta função a qual se baseia na aplicação da TDQ nos sinais fase, de modo a obter uma componente de eixo direto que oscila com o dobro da frequência angular do sistema. Portanto, tal característica proporciona uma diminuição no tempo de atuação e um desempenho superior às versões anteriores da referida função PC. Assim, neste capítulo avalia-se o desempenho da função de proteção PC-TDQ proposta, comprovando sua eficiência em relação a outras abordagens da função PC.

5.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ANALISADO

O sistema elétrico de potência analisado é ilustrado na Fig. 5.1, o qual se constitui de uma LT de 230 kV/60 Hz e 200 km de comprimento. Dois equivalentes de Thévenin são conectados aos terminais da LT e representam os sistemas elétricos adjacentes.



Figura 5.1. Sistema elétrico de potência analisado.

Os parâmetros da LT, que foi modelada a parâmetros distribuídos e constantes na frequência,

bem como os dados dos equivalentes de Thévenin são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. As tensões das duas fontes equivalentes foram consideradas como $1\angle 0^\circ$ pu e $1\angle \delta^\circ$ pu, para o terminal local e remoto, respectivamente, onde δ é o ângulo de carregamento do sistema, sendo portanto, passível de ajuste para diferentes cenários de carregamento.

Tabela 5.1. Parâmetros da Linha de Transmissão

Dados Gerais			
Tensão: 230 kV / 60 Hz / Comprimento da Linha l : 200 km			
Parâmetros Elétricos da Linha			
Sequência	R(Ω /km)	X(Ω /km)	ω C(μ S/km)
Zero	0,4177	1,5238	2,8648
Positiva	0,0346	0,3005	5,5106

Tabela 5.2. Parâmetros dos Equivalentes de Thévenin

Parâmetro	Variável	Valor(Ω)
Impedância	$R_0 + jX_0$	(16,708 + j60,952)
Z_L	$R_1 + jX_1$	(1,384 + j12,02)
Impedância	$R_0 + jX_0$	(16,708 + j60,952)
Z_R	$R_1 + jX_1$	(1,384 + j12,02)

O software Alternative Transients Program (ATP) foi utilizado para modelagem da LT e realização das simulações. Foram simulados diferentes cenários de faltas na LT, assumindo passo de integração igual a 1μ s, de modo a obter os sinais de corrente necessários para avaliação do algoritmo proposto. Para medição dos sinais de corrente, considerou-se a modelagem de transformadores de corrente (TC) do tipo C800/1200-5A.

No que se refere ao processamento dos sinais de corrente medidos nos terminais local e remoto, utilizou-se uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo. Adicionalmente, uma vez que a função PC-TDQ proposta requer a análise apenas de desequilíbrios nas componentes fundamentais, considerou-se um filtro *anti-aliasing* passa-baixas de 3ª ordem do tipo Butterworth

com frequência de corte em 180 Hz.

5.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

De modo a melhor apresentar os benefícios da função PC-TDQ proposta, realizou-se a comparação do seu tempo de atuação com o da função PC tradicional, a qual possui sinais de fase como entrada do algoritmo de proteção. Adicionalmente, realizou-se também a comparação com os tempos de atuação da função PC, a qual possui a componente $i_{mix}(t)$ como sinal de entrada do algoritmo, ou seja, baseada em componentes de sequência (ver seção 2.3).

Deve-se enfatizar que os tempos de atuação aqui apresentados não incluem o atraso do canal de comunicação, o qual sempre deve ser considerado em casos reais. Porém, este atraso afetaria de maneira semelhante todas as abordagens avaliadas, de modo que a comparação entre as mesmas não é afetada. De modo a facilitar o entendimento no decorrer do trabalho, a função PC tradicional será chamada daqui em diante por PC-TRAD e a função PC baseada em componentes de sequência de PC-MIX.

Nesta etapa, apresentam-se os resultados das simulações em massa, sendo que para a realização dos diversos cenários de faltas, variou-se o tipo de falta, ângulo de incidência θ_p , resistência de falta RF , distância do ponto de falta d e ângulo de carregamento δ , como pode-se observar na Tabela 5.3, resultando-se em um total de 3240 casos simulados de falta interna. Vale salientar que mais adiante também serão avaliados cenários de faltas externas.

Tabela 5.3. Variação dos Parâmetro de Falta

Variável	Valores
Tipo de falta	AT, BC, BCT, ABC
θ_p	20° até 360°, com passo de 20°
RF	0 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 150 Ω , 200 Ω e 300 Ω
d	20%, 50% e 80% da LT
δ	-10°, -20°, -30° e -40°

Para melhor apresentar os resultados gerais obtidos do ponto de vista do desempenho das

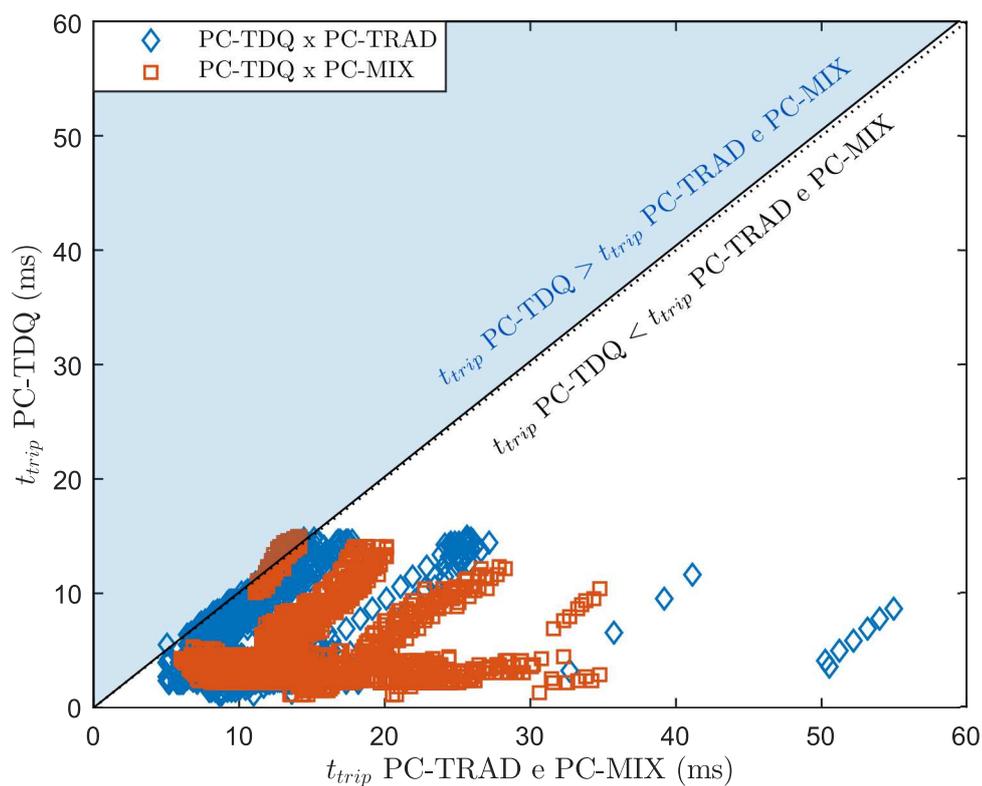
abordagens analisadas, a Fig. 5.2 apresenta um gráfico de dispersão para os casos em que as proteções atuaram, comparando os tempos de atuação da função PC-TDQ com os da PC-TRAD e PC-MIX. Deve-se destacar que todas as 3 abordagens foram realizadas considerando a análise de ciclo completo do sinal.

No gráfico de dispersão, plotou-se uma linha reta com 45° de angulação, de modo a dividir o plano em dois e assim melhor analisar os dados em termos de comparação de desempenho. Logo, os pontos acima desta linha recaem em uma área na qual considera-se que os tempos de atuações foram maiores para a função PC-TDQ e pontos abaixo desta linha significam tempos de atuação maiores para as funções PC-TRAD e PC-MIX, uma vez que as mesmas estão no eixo das abcissas.

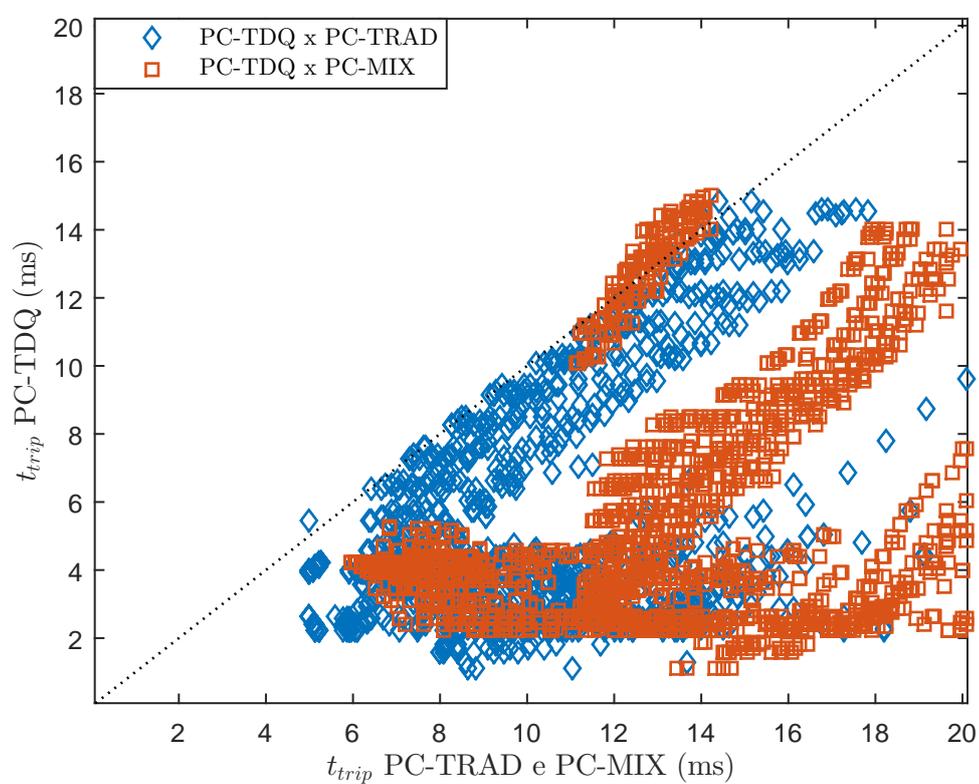
Pela Fig. 5.2 é possível identificar que todos os pontos encontram-se abaixo ou na linha de 45° , quando considerada a comparação dos algoritmos PC-TDQ versus PC-TRAD, e quase todos os pontos encontram-se abaixo da linha de 45° quando avaliados os resultados da função PC-TDQ versus PC-MIX, o que significa que os tempos de atuação da função PC-TDQ proposta foram menores do que os das outras funções avaliadas.

Pelo zoom do gráfico de dispersão, percebe-se que os valores mais altos dos tempos de *trip* da proteção PC-TDQ não excederam 16 ms, sendo portanto, menores que um período fundamental em 60 Hz. Por outro lado, a função PC-TRAD possui tempos de *trip* que chegam a quase 60 ms, a função PC-MIX possui tempos de operação maiores que 30 ms e alguns pontos sequer puderam ser apresentados, pois nenhuma operação foi verificada. No entanto, a não atuação dessas funções para determinados casos, pode ser observada no gráfico de polígono de frequência acumulada, apresentado na Fig. 5.3, a partir do qual é possível analisar a porcentagem de casos que ocorreram para cada tempo de *trip* específico.

Observa-se pela Fig. 5.3 que a curva referente à função de proteção PC-TDQ cresce mais rapidamente, quando comparada com as demais funções, pois a função proposta possui tempos de *trip* menores (5,1 ms em média), conforme comprovado anteriormente na Fig. 5.2. Assim, atinge rapidamente 100% dos casos com tempos de *trip* de até 16 ms, demonstrando um ótimo desempenho, e atuando para todos os 3240 casos simulados.



(a)



(b) Zoom

Figura 5.2. Gráfico de dispersão e seu zoom.

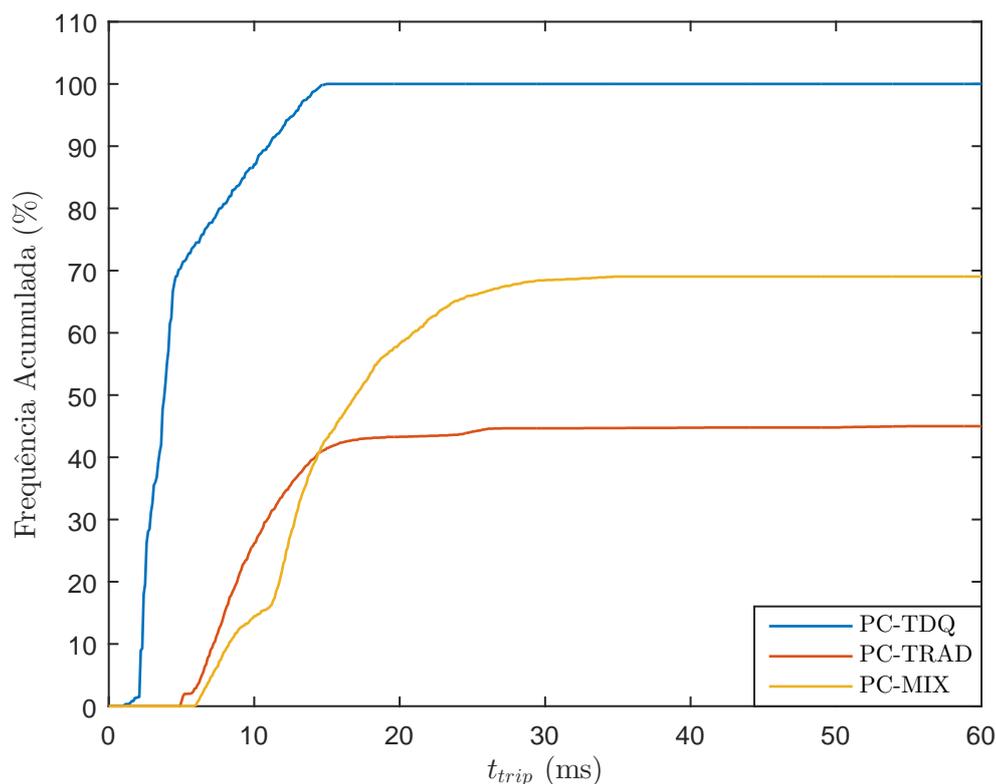


Figura 5.3. Diagrama de frequência de *trip* acumulada.

Por outro lado, as curvas referentes as funções PC-TRAD e PC-MIX tiveram um crescimento mais lento, pois estas funções apresentam tempos de *trip* maiores em comparação à função PC-TDQ. Além disso, as curvas não atingem 100% (sendo 45% para PC-TRAD e 69% para PC-MIX), indicando que há casos em que as proteções não atuaram. Como exemplos, destacam-se casos de alta resistência de falta, bem como cenários de *outfeed*.

Percebe-se ainda que a função PC baseada em componentes de sequência tem um melhor desempenho em comparação com a função tradicional, porém, não é melhor que a função PC-TDQ proposta. Assim, as Figs. 5.2 e 5.3 comprovam que a função PC-TDQ proposta atuou para todos os casos simulados e que obteve tempos de *trip* menores ou iguais aos obtidos pelas funções de proteção PC-TRAD e PC-MIX, demonstrando sua eficácia e segurança e portanto, destacando que o uso da TDQ nos sinais de entrada da função PC de fato traz uma melhora significativa no desempenho da função.

5.2.1 Mudança de Limiar para as Funções PC-TRAD e PC-MIX

A implementação das funções PC-TRAD e PC-MIX foi realizada utilizando um limiar de um quarto do período fundamental em 60 Hz, assim como reportado em (KASZTENNY *et al.*, 2006; LEITE JR. *et al.*, 2018; LEITE JR. *et al.*, 2018). Porém, como as componentes de eixo direto oriundas da TDQ oscilam com o dobro da frequência angular do sistema elétrico 2ω , o limiar da função PC tradicional foi dividido por dois, utilizando, portanto, um limiar de $\frac{1}{8}$ de um ciclo fundamental para a função PC-TDQ proposta, conforme explicado anteriormente.

No entanto, para comparar o desempenho das funções em uma mesma condição de ajuste, para os mesmos 3240 casos, também foram realizadas simulações com um limiar de $\frac{1}{8}$ do período fundamental em 60 Hz para todas as abordagens analisadas. Assim, a Fig. 5.4 apresenta os resultados para esta mudança de limiar para as funções PC-TRAD e PC-MIX.

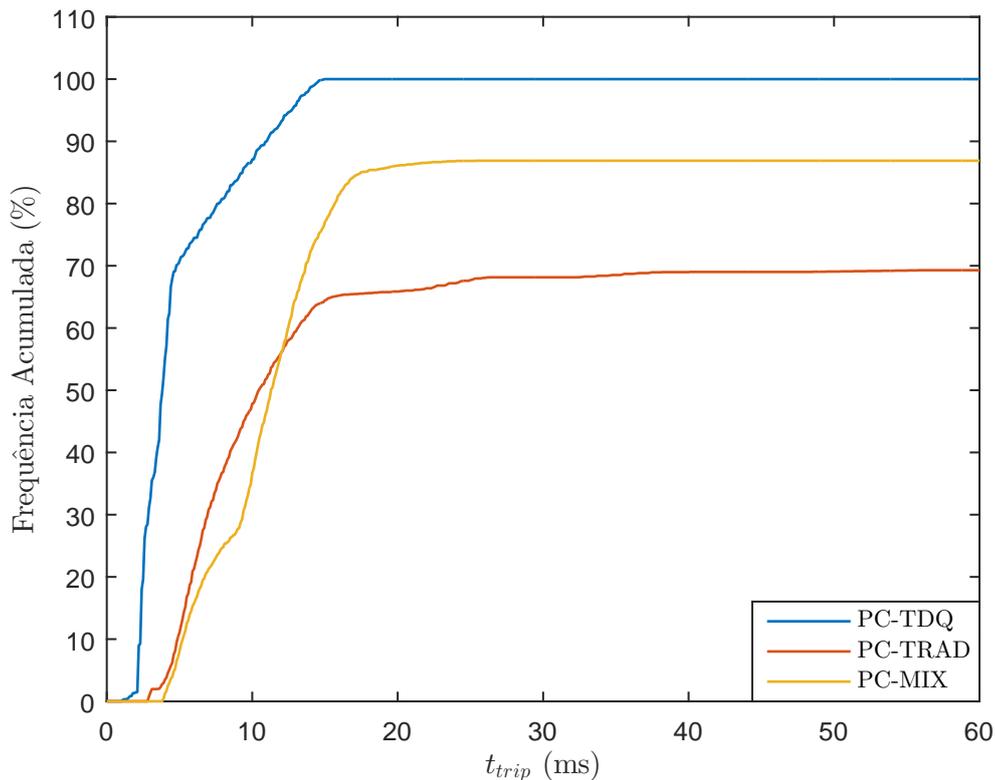


Figura 5.4. Diagrama de frequência de *trip* acumulada para as simulações considerando $\frac{1}{8}$ de período de ciclo fundamental como limiar para todas as 3 funções de proteção analisadas.

Pelos resultados, percebe-se que as funções PC-TRAD e PC-MIX obtiveram uma maior taxa de atuação com um menor limiar, sendo 69% e 87%, respectivamente, porém em (KASZTENNY

et al., 2006) sugere-se o uso de um quarto de ciclo fundamental para que a função funcione com segurança, evitando operação inadequada, como em situações de falta externa ou em regime permanente em casos onde se tem uma elevada corrente capacitiva da LT.

5.2.2 Utilização de Diferentes Taxas de Amostragem

Como dito anteriormente, o algoritmo foi inicialmente simulado de forma a utilizar uma taxa de amostragem de $N = 256$ amostras/ciclo, porém, outras taxas podem ser empregadas. Para demonstrar tal aspecto, os mesmos 3240 casos foram simulados com o uso de diferentes taxas de amostragem ($N = 16, 32, 64, 128$ e 256 amostras por ciclo) e o resultado pode ser visto na Fig. 5.5.

Pela Fig. 5.5 percebe-se que, de fato, diferentes taxas de amostragem podem ser aplicadas, uma vez que a função PC-TDQ proposta requer a análise apenas de desequilíbrios nas componentes fundamentais. Além disso, percebe-se que as funções obtiveram um melhor desempenho para as menores taxas de amostragem ($N=16$ e 32 amostras/ciclo), demonstrando a não necessidade de altas taxas.

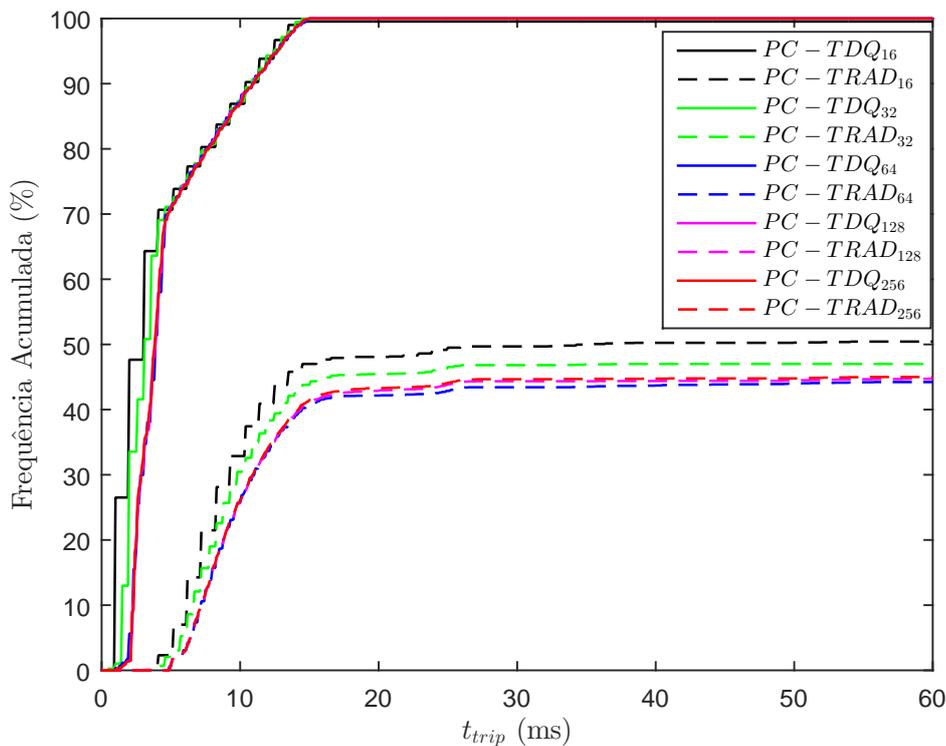


Figura 5.5. Diagrama de frequência de *trip* acumulada, para diferentes taxas de amostragem.

5.3 ANÁLISE DE CASOS PONTUAIS

Com o intuito de destacar ainda mais as vantagens da função de proteção PC-TDQ proposta, apresenta-se nesta seção a análise de casos pontuais adversos, como em cenários de ocorrência de faltas trifásicas, *outfeed*, saturação do núcleo magnético do TC e faltas externas à LT monitorada.

5.3.1 Caso 1: Falta trifásica franca

A função PC-TDQ proposta possui como sinais de entrada as componentes de eixo direto, as quais são constantes em regime permanente de operação normal do sistema e oscilante em casos de sistema desequilibrado, ou seja, na ocorrência de perturbação. Porém, a função PC-TDQ é capaz de atuar para os casos de faltas trifásicas, mesmo estas possuindo característica simétrica. Isto acontece, pois o algoritmo da PC-TDQ consegue identificar a ocorrência da falta pelo período transitório entre o regime permanente de pré-falta e o período de falta, identificando corretamente a direcionalidade do curto-circuito.

A Fig. 5.6 apresenta os três sinais de fase medidos em um terminal da LT representada na Fig. 5.1, a qual possui nível de tensão de 230 kV e 200 km de extensão, durante uma situação de falta trifásica. Pela figura, percebe-se que logo que acontece a falta os sinais ficam

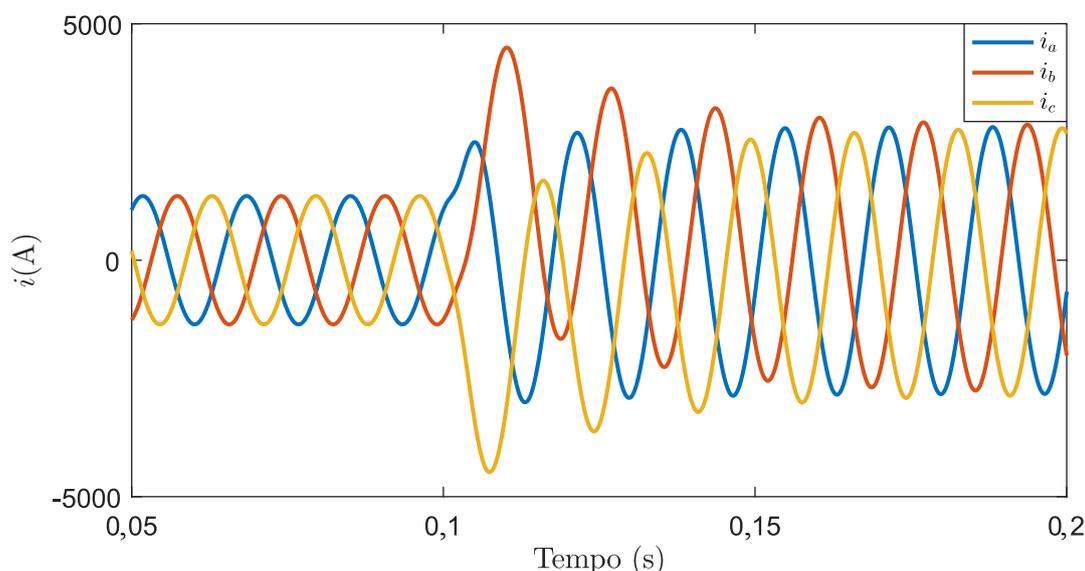
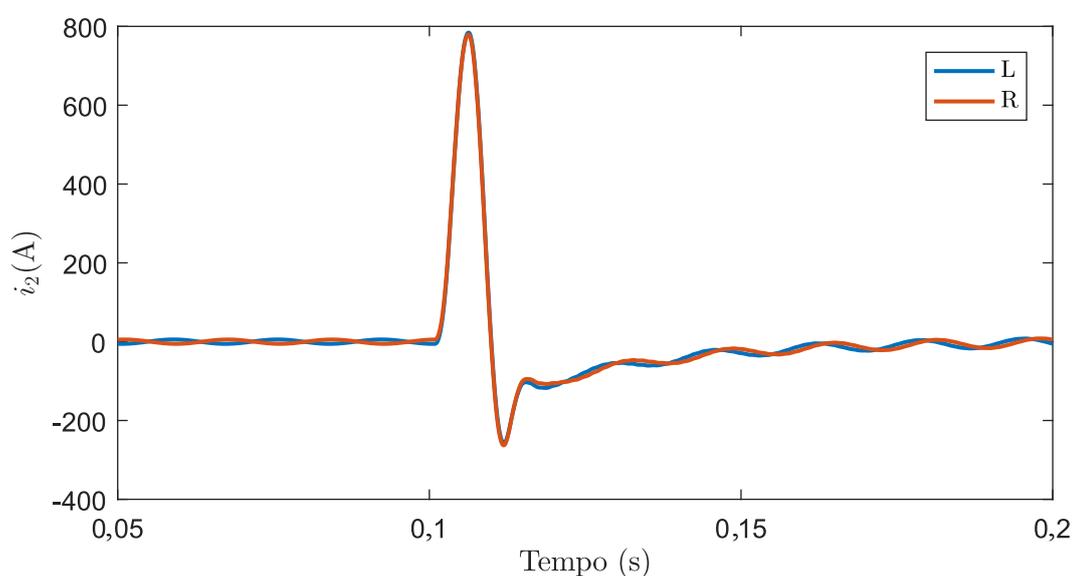


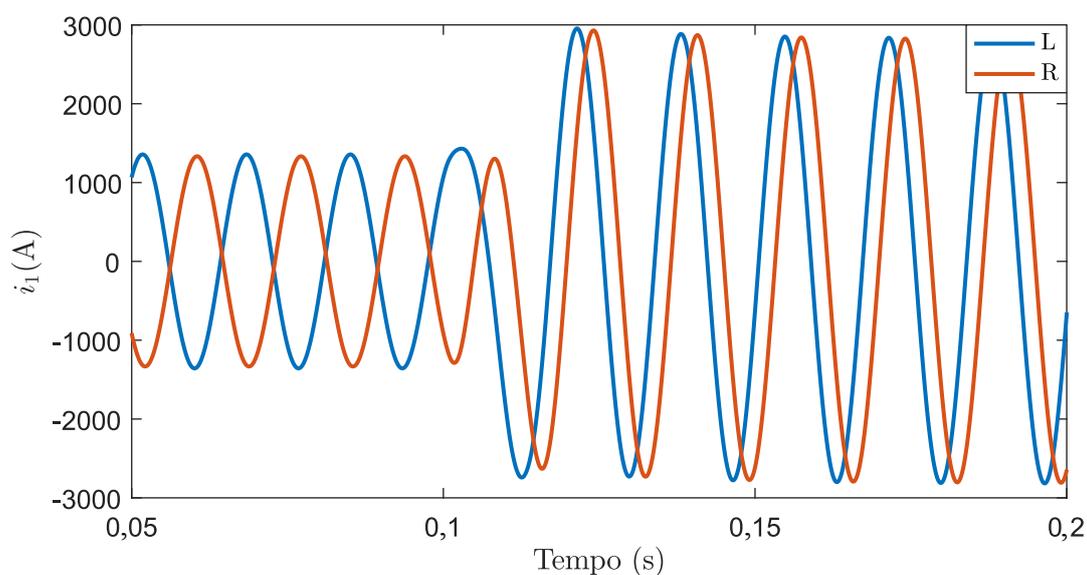
Figura 5.6. Caso 1: Sinais trifásicos.

desequilibrados, pois estão em seu período transitório e logo em seguida entram no regime permanente de falta e portanto, apresentam-se equilibrados.

Da literatura, sabe-se que o curto-circuito trifásico, por ser simétrico, possui apenas a componente de sequência positiva, porém, durante o período transitório surge a componente de sequência negativa em decorrência dos desequilíbrios que se estabelecem. Para demonstrar tal informação, apresenta-se na Fig. 5.7 as componentes de sequência positiva e negativa para este curto-circuito mencionado. Pela Fig. 5.7(a) percebe-se que a componente de sequência negativa



(a) Componente de sequência negativa



(b) Componente de sequência positiva.

Figura 5.7. Caso 1: Componentes de sequência.

é nula em regime permanente de pré-falta, surge durante o período transitório e em seguida é amortecida até ficar nula novamente.

Por outro lado, pela Fig. 5.7(b) nota-se que a componente de sequência positiva sempre esteve presente, e torna-se maior em amplitude depois da incidência da falta. Como consequência, apresenta-se na Fig. 5.8 a componente mista, a qual é constituída pelas componentes de sequência positiva e negativa, sendo o sinal de entrada da função PC-MIX.

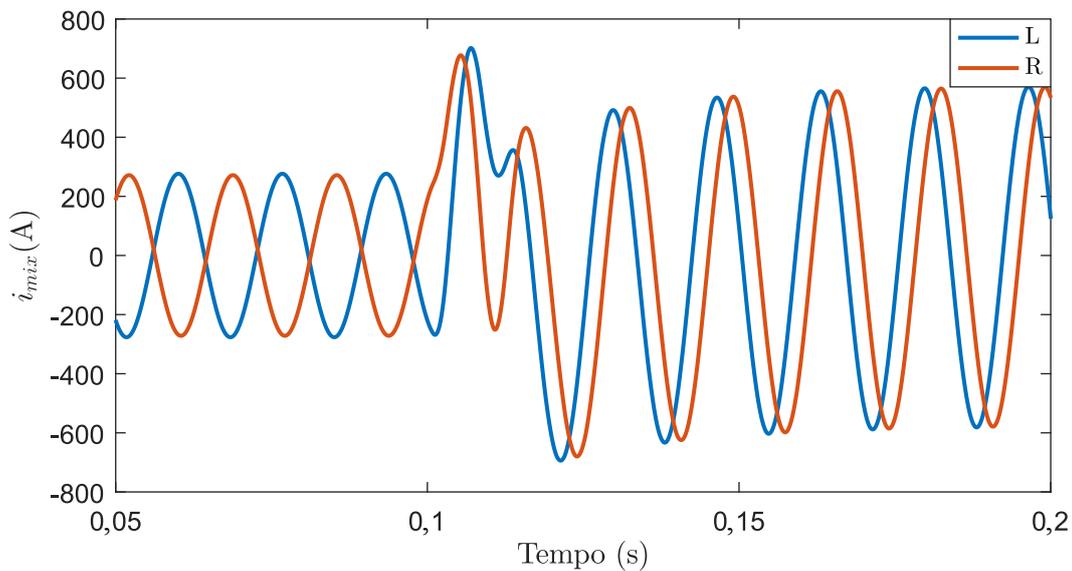


Figura 5.8. Caso 1: Componente mista.

Para este caso específico de falta trifásica franca, no meio da LT, a função PC-MIX obteve um tempo de atuação de 7,02 ms, sendo menor que o tempo de *trip* da função PC tradicional, cujo foi de 7,35 ms. Porém, não sendo inferior ao tempo de atuação da função PC-TDQ, o qual foi 3,84 ms, sendo aproximadamente metade do tempo das outras duas abordagens.

Assim, como já mencionado, a função PC-TDQ apesar de originar componentes que oscilam apenas em situações de desequilíbrio, atua corretamente para faltas trifásicas, que tem como característica serem equilibradas, sendo isto possível devido ao período transitório. A Fig. 5.9 apresenta os sinais de eixo direto referentes aos terminais local e remoto da LT, e percebe-se que durante o regime permanente de pré-falta o sinal é nulo, tornando-se oscilante assim que a falta ocorre e depois vai amortecendo-se até ser nulo novamente. Outro ponto a se destacar, é o fato dos sinais estarem em fase devido à ocorrência do curto-circuito interno à LT.

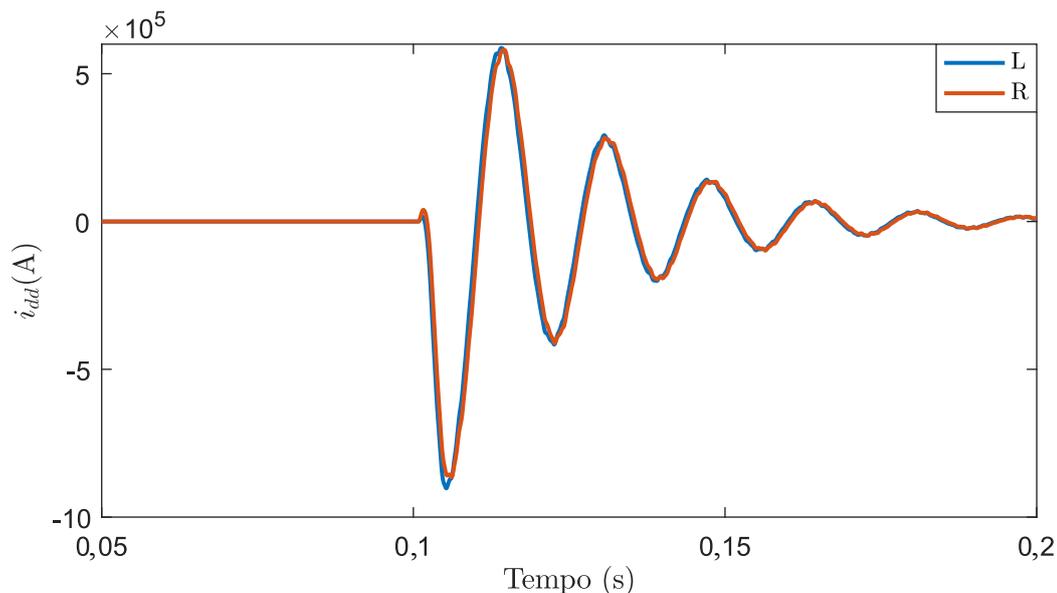


Figura 5.9. Caso 1: Derivada da componente de eixo direto.

5.3.2 Caso 2: Saturação do núcleo do TC para uma falta no meio da LT

Como dito na subseção 2.4.3, na tecnologia atual, a problemática de saturação de TCs devido a elevadas cargas secundárias tem se tornado um problema menos frequente, pois tais cargas se resumem nos relés digitais microprocessados e aos cabos de conexão, os quais apresentam baixa impedância. No entanto, os TCs podem saturar devido a outros fatores, como uma corrente de falta muito elevada ou uma forte componente CC. Porém, de modo a simular uma situação de saturação, forçou-se um valor de alta resistência no secundário do TC, sendo igual a 100Ω .

Neste caso 2, apresenta-se os resultados de uma simulação com cenário de falta trifásica franca, no centro da LT, com ângulo de incidência de 0° e ocorrência de saturação do núcleo do TC.

A Fig. 5.10 apresenta os sinais da fase A, medidos nos terminais local e remoto da LT e nota-se que durante o período de regime permanente de pré-falta os sinais encontram-se em contra-fase, pois possuem polaridades opostas. Assim que ocorre a falta, devido à situação imposta de saturação do TC, os sinais apresentam-se distorcidos, porém, quase em fase (não estão em fase devido ao efeito capacitivo da LT), como esperado. Portanto, durante um cenário de saturação do núcleo do TC, apesar dos sinais ficarem distorcidos a polaridade é mantida e assim as funções baseadas na comparação de fases atuam corretamente.

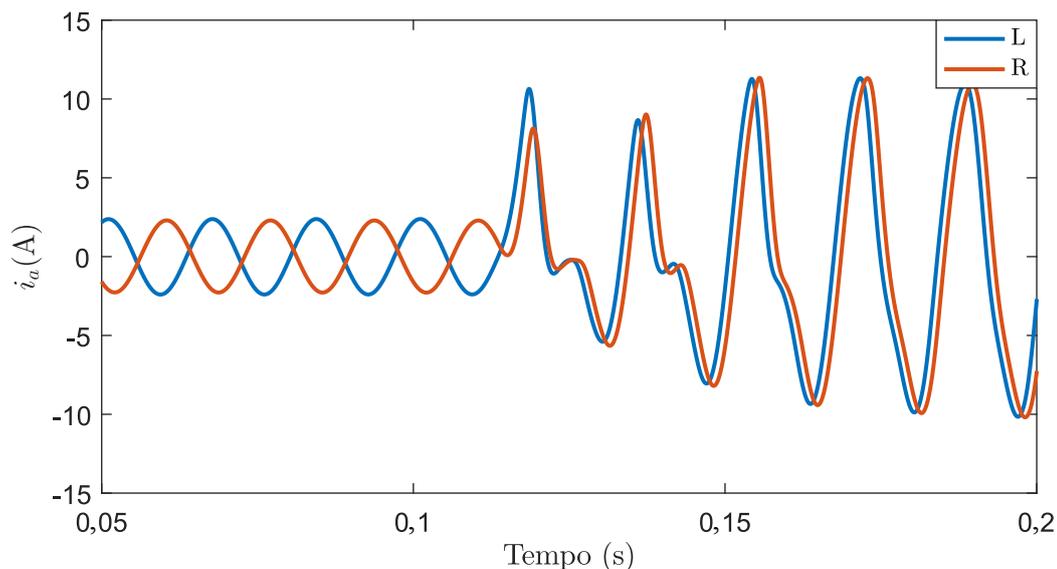


Figura 5.10. Caso 2: Sinais da fase A distorcidos devido a saturação do núcleo do TC, medidos nos terminais local e remoto da LT.

A Fig. 5.11 apresenta os sinais da derivada das componentes de eixo direto, referentes aos terminais local e remoto. Pela figura, nota-se que os sinais são nulos no período de pré-falta e oscilam com o dobro da frequência do sistema depois que acontece a falta, e devido à situação de saturação do TC os sinais encontram-se deformados, porém, em fase.

Em sequência, na Fig. 5.12 apresenta-se os sinais i_{mix} , relativos aos dois terminais da LT e nota-se o mesmo, ou seja, os sinais encontram-se distorcidos após a incidência da falta, porém,

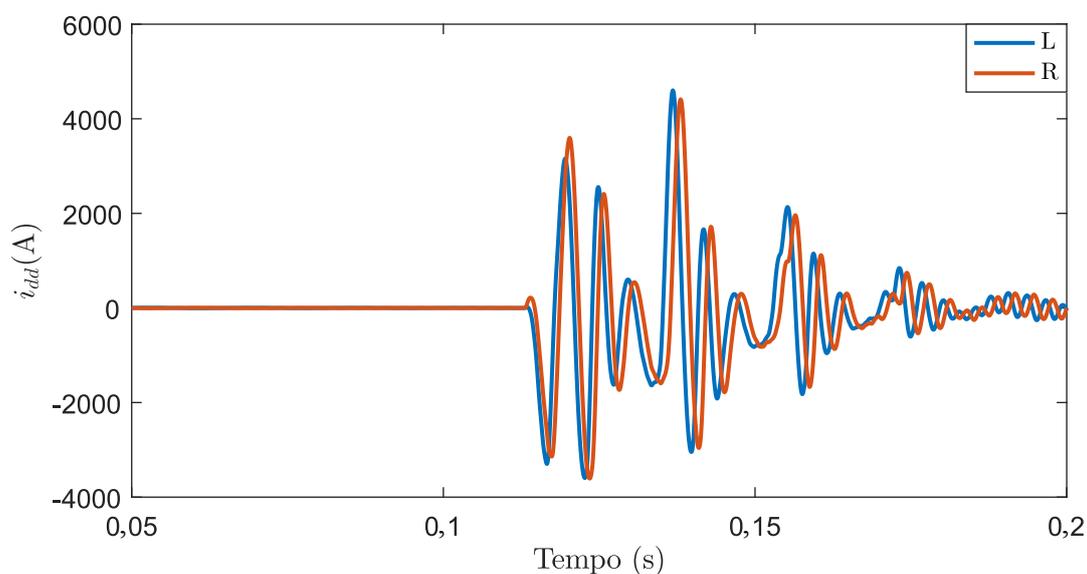


Figura 5.11. Caso 2: Sinal da derivada da componente de eixo direto, distorcida devido à ocorrência de saturação do TC.

em fase. Portanto, as funções atuaram corretamente, possuindo tempos de *trip* iguais a 5,0 ms para a função PC-TRAD, 7,21 ms para a PC-MIX e 3,96 ms para a função PC-TDQ, a qual possui o menor tempo de atuação.

Deve-se destacar que, apesar deste fenômeno de saturação não possuir grande influência na polaridade dos sinais distorcidos, fazendo com que as funções baseadas na comparação de fases continuem atuando, deve-se lembrar que a função de proteção PC-TDQ proposta atua em poucos milissegundos, antes mesmo do núcleo do TC saturar.

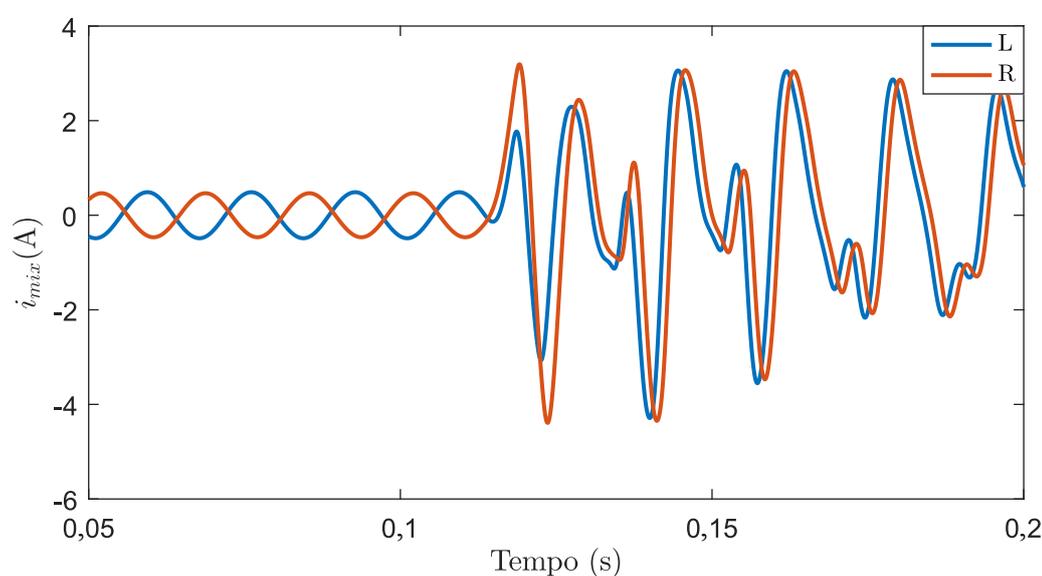


Figura 5.12. Caso 2: Componente mista distorcida devido à ocorrência de saturação do TC.

5.3.3 Caso 3: Falta monofásica com ocorrência de saturação em um dos terminais

Neste caso 3, apresenta-se os resultados de uma simulação com cenário de falta monofásica AT franca, no meio da LT, possuindo ângulo de incidência de 0° . Ao contrário do caso anterior onde ocorreu saturação nos TCs de ambos terminais, este caso apresenta um cenário de falta AT na situação de saturação apenas no núcleo do TC referente ao terminal local. Para obtenção deste fenômeno, forçou-se uma alta resistência no secundário do TC local igual a 100Ω .

A Fig. 5.13 apresenta os sinais da fase A, referentes aos terminais local e remoto da LT e nota-se que durante o período de regime permanente de pré-falta os sinais encontram-se em contra-fase. Assim que ocorre a falta, devido à saturação do TC, o sinal referente ao terminal

local apresenta-se distorcido, o que não é verdade para o sinal referente ao terminal remoto. Porém, apesar de um sinal estar distorcido e o outro não, apresenta-se uma coincidência de polaridade entre eles capaz de sensibilizar a função por comparação de fases.

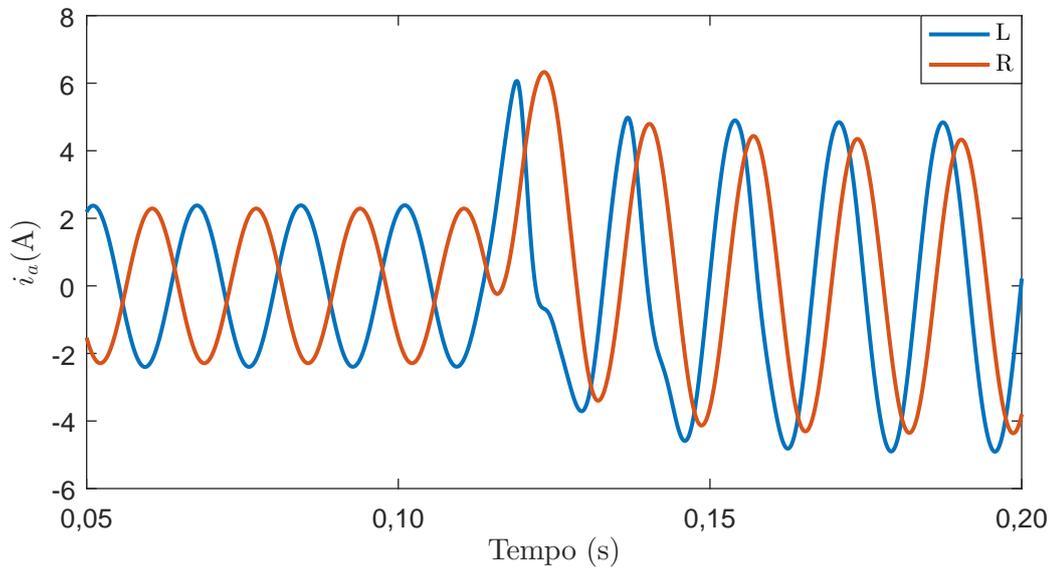


Figura 5.13. Caso 3: Sinais da fase A para um falta AT no meio da LT, referentes aos terminais local e remoto.

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os sinais de entrada para a função PC-TDQ e PC-MIX, respectivamente, referentes aos terminais local e remoto. Pelas figuras, verifica-se que assim como o sinal de fase, os sinais i_{mix} e i_{dd} referentes ao terminal local encontram-se distorcidos, porém, existe uma coincidência de polaridade com o sinal do terminal remoto suficiente para atuação das funções. Logo, apesar da ocorrência de saturação do núcleo do TC em apenas um terminal, as funções atuaram corretamente, possuindo tempos de *trip* iguais a 8,25 ms para a função PC-TRAD, 8,39 ms para a PC-MIX e 2,67 ms para a função PC-TDQ, a qual possui o menor tempo de atuação.

5.3.4 Caso 4: Falta externa com saturação do TC

O caso 4 trata-se de uma situação de falta trifásica franca externa à zona de proteção da LT e assim como o caso anterior, de modo a simular um caso de saturação do núcleo magnético do TC forçou-se uma alta resistência no secundário, com o valor de 100Ω . Por conseguinte, a Fig. 5.16 apresenta os sinais trifásicos resultantes desse cenário, medidos no terminal local, e verifica-se que os mesmos apresentam-se distorcidos devido ao fenômeno de saturação.

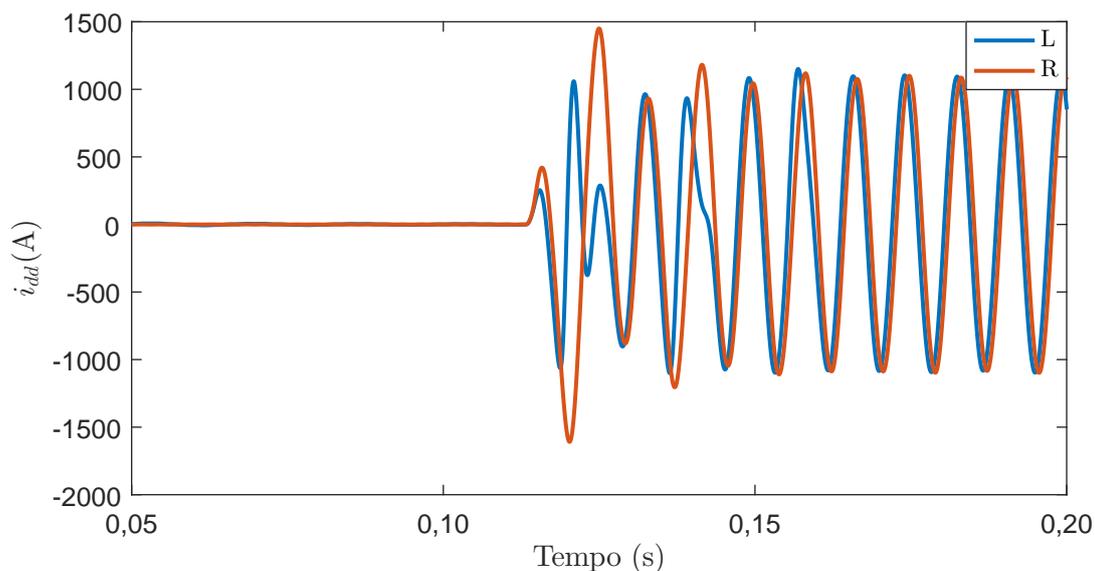


Figura 5.14. Caso 3: Sinal da derivada da componente de eixo direto, para uma falta AT franca.

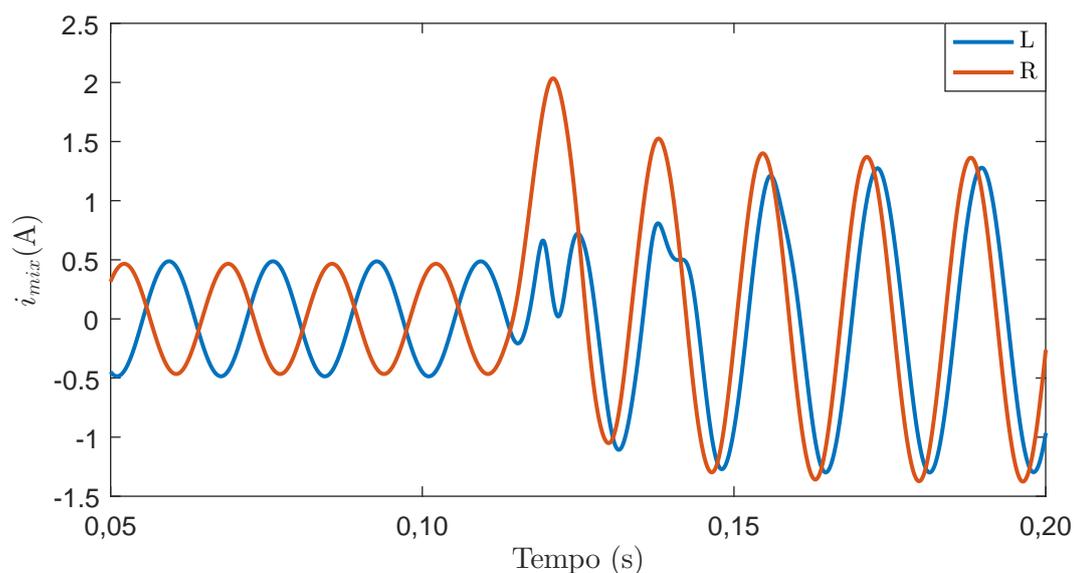


Figura 5.15. Caso 3: Sinal da componente mista, para uma falta AT franca.

Com relação aos sinais de entrada da função PC-TDQ, nota-se da Fig. 5.17 que os sinais da derivada da componente de eixo direto eram nulos no período de pré-falta e após a ocorrência da falta ficaram distorcidos, porém, em contra-fase, caracterizando uma falta externa. Portanto, a função permaneceu estável, sem atuação indevida e assim demonstrando sua segurança para este caso adverso.

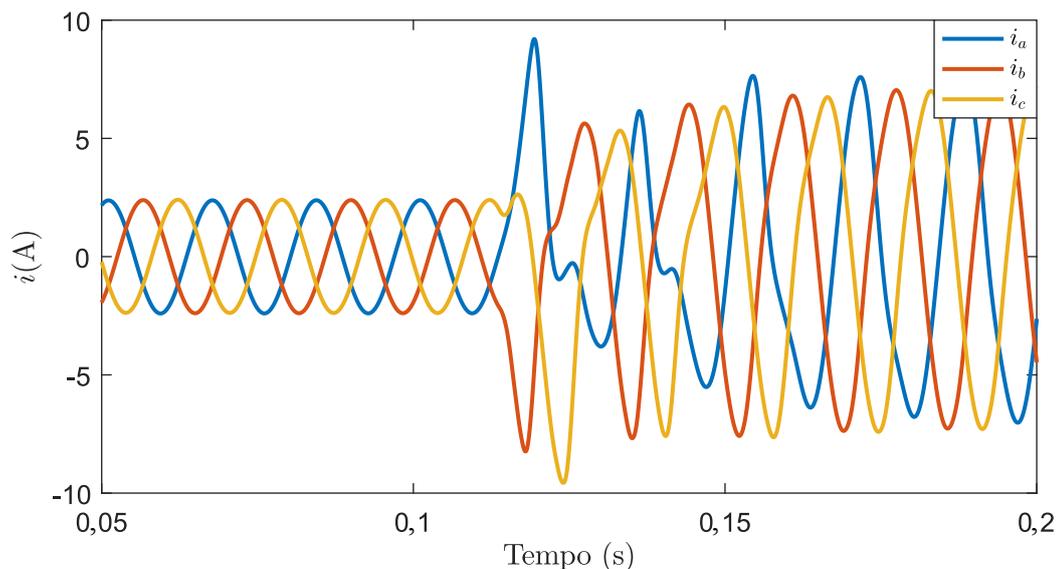


Figura 5.16. Caso 4: Sinais trifásicos medidos na ocorrência de falta externa.

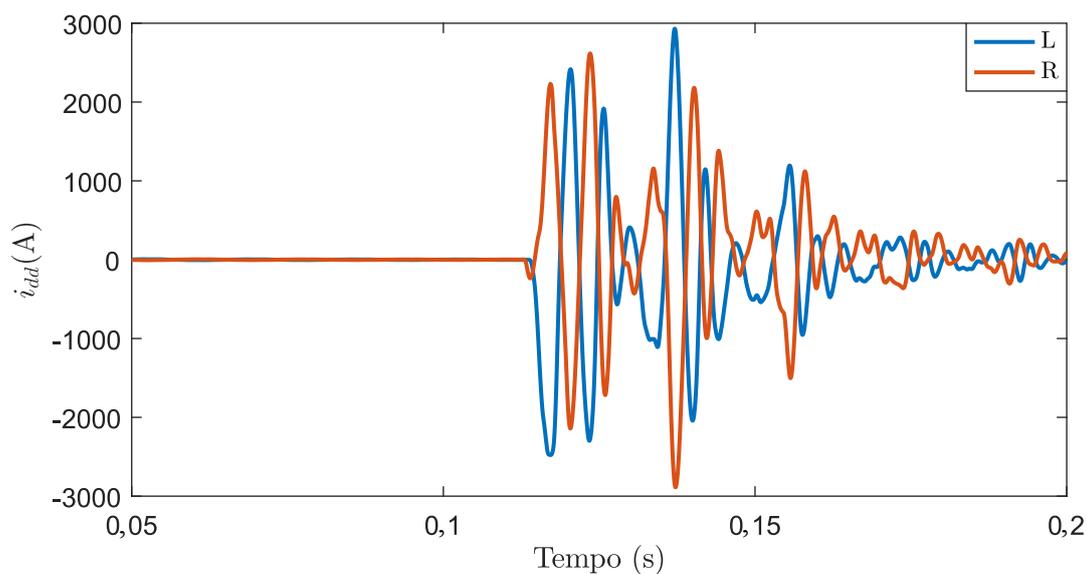


Figura 5.17. Caso 4: Sinais da derivada da componente de eixo direto, durante uma falta externa.

O mesmo foi verificado com as funções de proteção PC-TRAD e PC-MIX, as quais também não atuaram indevidamente. A Fig. 5.18 apresenta os sinais i_{mix} referentes a ambos terminais da LT, local e remoto, e verifica-se que apesar de bastante distorcidos, os sinais permaneceram em contra-fase depois da ocorrência da falta externa à zona de proteção da LT. Portanto, as três funções (PC-TDQ, PC-TRAD e PC-MIX) demonstraram segurança neste caso adverso que pra muitas funções de proteção é um problema.

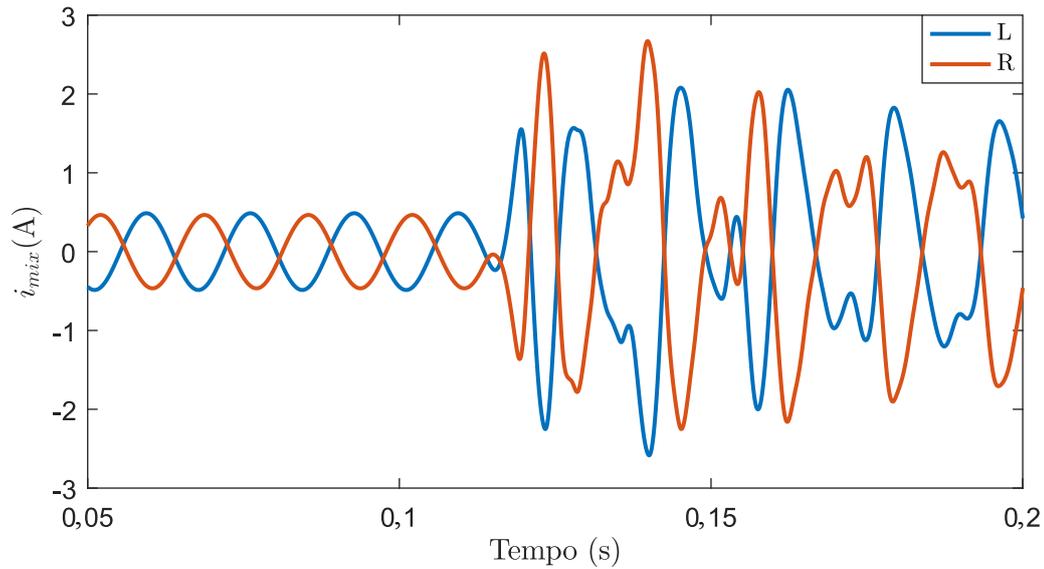


Figura 5.18. Caso 4: Componente mista oriunda de uma falta externa à LT.

5.3.5 Caso 5: Ocorrência de *outfeed*

O caso 5 trata-se de uma falta monofásica AT, a qual possui uma resistência de falta de 100Ω , no meio da linha, com um ângulo de incidência $\theta_p = 90^\circ$ e médio carregamento no sistema, possuindo um ângulo $\delta = -20^\circ$. Assim, este cenário resultou em um fenômeno de *outfeed* no terminal remoto.

A Fig. 5.19 apresenta os sinais da fase A, medidos nos terminais local e remoto, onde verifica-se que o sinal referente ao terminal local apresentou um pequeno aumento em sua amplitude em relação ao período de regime permanente de pré-falta, demonstrando uma contribuição de corrente de curto-circuito na mesma direção do carregamento, mas com baixo valor, devido a alta resistência do defeito.

Percebe-se também que o sinal referente ao terminal remoto apresenta uma diminuição em sua magnitude e não apresenta a inversão de sentido esperada para casos de falta interna à LT. Tal fato se deve à resultante entre a corrente de falta e a corrente de carregamento, que devido a baixa contribuição de curto-circuito e um carregamento relevante não resulta em um sinal com inversão no sentido, caracterizando uma situação de *outfeed* no terminal remoto.

Portanto, por se tratar de uma falta interna à LT, os sinais deveriam estar em fase após a ocorrência da falta, porém, encontram-se em contra-fase e, devido a isto, os desempenhos das

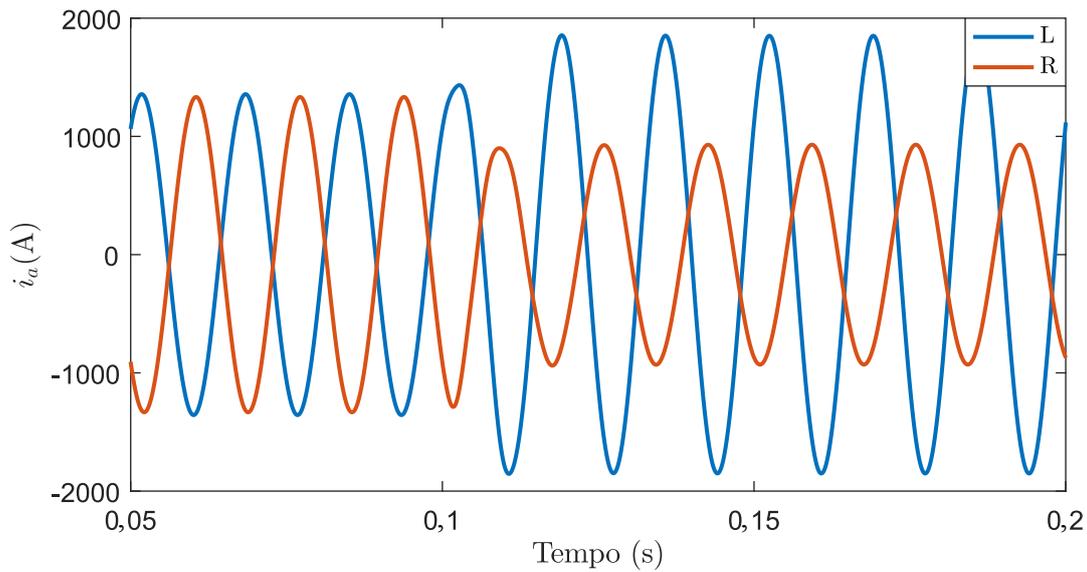


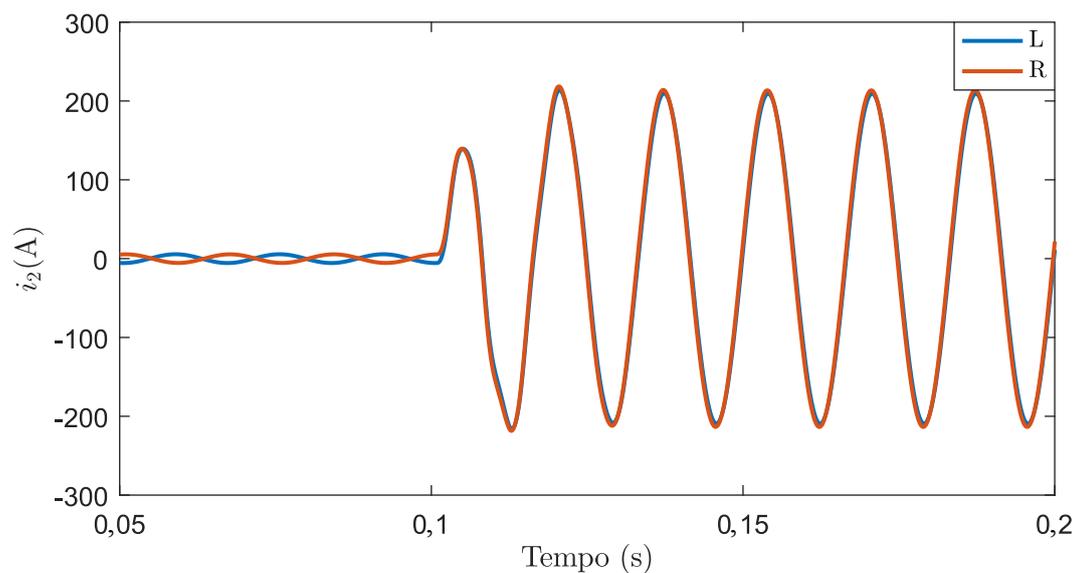
Figura 5.19. Caso 5: Sinais de corrente da fase A (ocorrência de outfeed no terminal remoto).

funções PC-TRAD e PC-MIX ficaram comprometidos. Sendo assim, as funções não enxergaram o defeito e por consequência não atuaram.

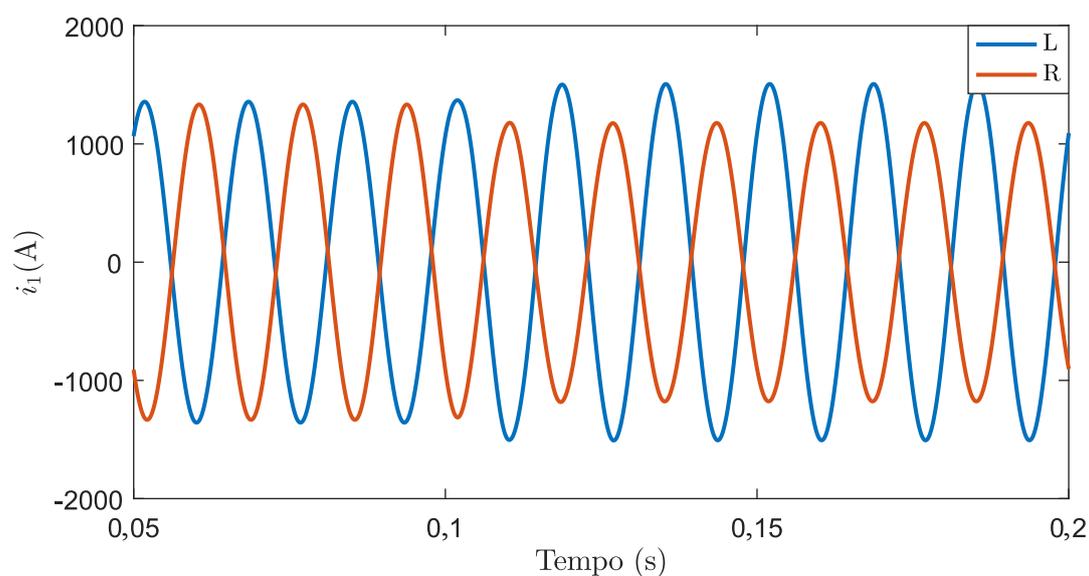
A Fig. 5.20 apresenta os sinais de sequência negativa e positiva referentes a este caso de falta monofásica específico. Verifica-se da Fig. 5.20(a) que a componente de sequência negativa era aproximadamente nula durante o regime permanente de pré-falta e torna-se oscilante e com alta magnitude durante a falta. Apesar de ocorrer a situação de *outfeed*, os sinais referentes aos terminais local e remoto encontram-se em fase, pois esta componente só existe no circuito puro de falta, portanto não possui influência do carregamento do sistema. Entretanto, os sinais da componente de sequência positiva apresentados em Fig. 5.20(b), encontram-se em contra-fase após a falta, caracterizando a situação de *outfeed*.

A componente mista, constituída por essas duas componentes de sequência, é apresentada na Fig. 5.21. Nota-se que os sinais dessa componente i_{mix} apresentam a característica de *outfeed*, pois, apesar da componente de sequência negativa não ter influência do carregamento do sistema, a componente de sequência positiva possui e assim, teve maior presença neste cenário de curto-circuito.

Por conseguinte, verifica-se visualmente que os sinais não estão em contra-fase, porém, a coincidência de polaridade não possui tempo suficiente para gerar pulsos largos na saída da porta lógica AND e consequentemente não possui contagem superior ao limiar de tempo



(a) Componente de sequência negativa



(b) Componente de sequência positiva.

Figura 5.20. Caso 5: Componentes de sequência.

definido. Logo, devido a isto, a função PC-MIX não atuou, assim como a função PC-TRAD, demonstrando não ser completamente confiável para este tipo de cenário.

Ao contrário das funções supracitadas, a função PC-TDQ proposta atuou conforme esperado e em um curto período de tempo, sendo a operação verificada em 3,45 ms, demonstrando possuir um desempenho superior frente às outras abordagens nesse cenário.

A Fig. 5.22 apresenta os sinais da derivada da componente de eixo direto referentes a ambos terminais da LT. Nota-se que durante o regime permanente de pré-falta os sinais eram nulos,

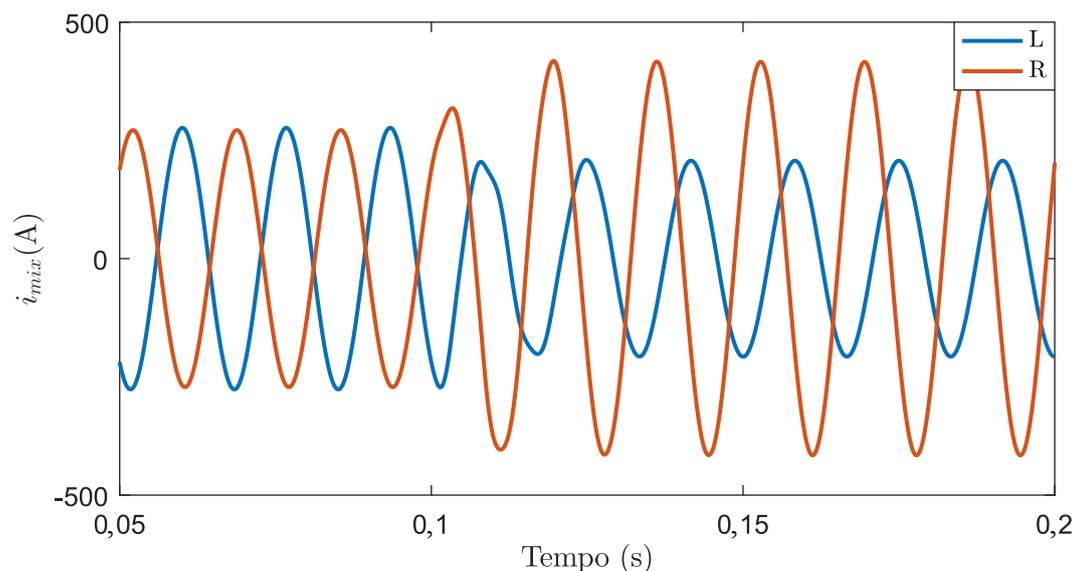


Figura 5.21. Caso 5: Componente mista.

porém, depois da ocorrência do curto-circuito os sinais ficaram em fase. Assim como esperado para uma falta interna à zona de proteção da LT, a função atuou corretamente protegendo a LT de forma apropriada.

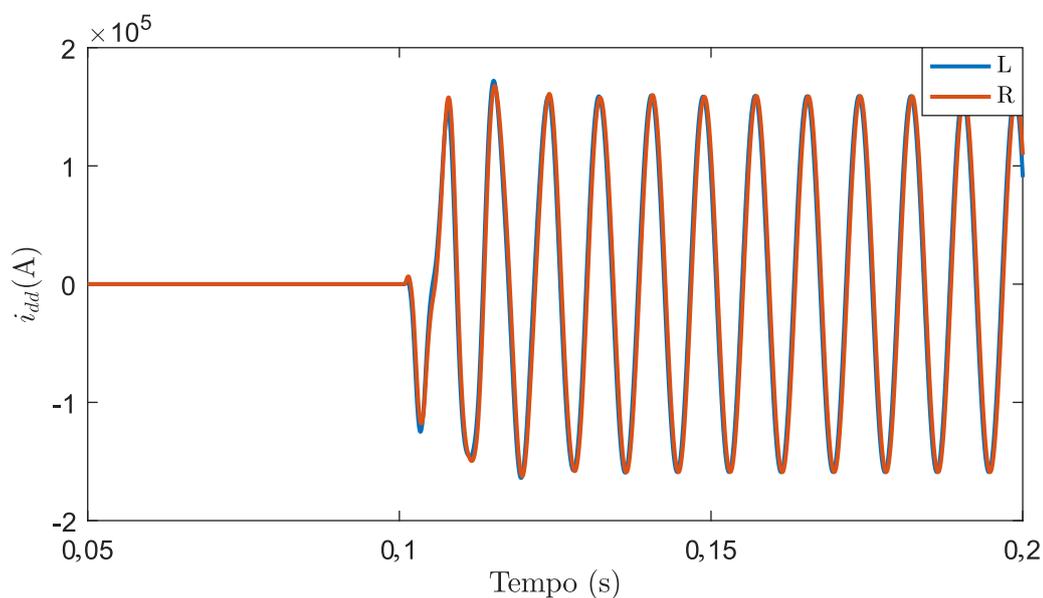


Figura 5.22. Caso 5: Derivada da componente de eixo direto.

Com a análise destes casos pontuais, bem como a análise das simulações em massa por meio dos gráficos de dispersão e de frequência acumulada de *trip*, demonstrou-se o desempenho da função PC-TDQ proposta que, de fato, possui um desempenho superior às outras abordagens da função PC, sendo bastante eficaz, rápida e segura.

5.4 SIMULAÇÕES DE FALTA EXTERNA

Como etapa final de avaliação da função PC-TDQ, realizaram-se simulações em massa para diferentes cenários de faltas externas à LT monitorada, totalizando 876 casos simulados.

Dentre os cenários de faltas externas simulado, incluem-se situações de saturação do núcleo magnético do TC em conjunto com faltas trifásicas, as quais caracterizam-se como as mais severas para o sistema elétrico de potência devido aos altos níveis de curto-circuito.

Conforme mencionado na subseção 2.4.3, sabe-se que o núcleo do TC usado em aplicações de proteção deve possuir uma grande área de seção transversal, para evitar sua saturação (IEEE, 1996). Além do mais, devido ao uso de relés numéricos, a carga no secundário do TC não é mais um problema frequente (BLACKBURN; DOMIN, 2015), favorecendo a não saturação do mesmo. Portanto, espera-se que este fenômeno dificilmente ocorra em um TC de linha.

Logo, assim como para os casos pontuais, para a realização das simulações em massa de falta externa, forçou-se a saturação do núcleo do TC através do aumento manual da resistência de sua carga secundária, levando à possibilidade de análise para esse tipo de cenário. A partir dos resultados, a função PC-TDQ proposta e a função PC tradicional não atuaram em nenhum dos casos, comprovando segurança de todas as abordagens avaliadas.

CONCLUSÕES

Nesta dissertação apresentou-se uma nova abordagem da função de proteção unitária de LTs por comparação de fases no domínio do tempo, na qual empregou-se a Transformada de Park (tradicionalmente conhecida como TDQ) no pré-processamento dos sinais de entrada da função, ou seja, nos sinais de fase de correntes elétricas medidas nos dois terminais de uma LT, local e remoto.

Mostrou-se neste trabalho que a aplicação da TDQ em sinais de fase desequilibrados geram sinais que oscilam com o dobro da frequência do sistema monitorado, chamados de componentes de eixo direto e em quadratura e demonstrou-se também que estas componentes permanecem com a informação de direcionalidade das correntes no sistema elétrico analisado.

Por meio da proposta apresentada, viabilizou-se a aplicação da filosofia da função PC no domínio do tempo, tendo como sinais de entrada as componentes de eixo direto, assim, caracterizando faltas internas e externas à uma LT. Como as componentes oriundas da TDQ oscilam com o dobro da frequência do sistema, a função proposta (chamada de PC-TDQ) tem como característica a redução dos tempos de atuação, promovendo tempos de *trip* mais rápidos do que quando comparados com os tempos da função tradicional.

Afim de demonstrar as vantagens da função PC-TDQ, foram realizadas simulações pontuais e em massa em uma LT de 230 kV/60 Hz no *software* ATP, permitindo avaliar o desempenho da função proposta frente a uma diversa gama de cenários de curto-circuito.

A partir dos resultados obtidos, demonstrou-se que a função PC-TDQ proposta se mostrou rápida e confiável em todos os casos avaliados, apresentando tempos de atuação de até um ciclo fundamental e menores ou iguais à todos os cenários simulados, quando comparada à função PC tradicional e à função PC baseada em componentes de sequência.

Ademais, destaca-se que a função PC-TDQ se mostrou eficaz mesmo em casos de *outfeed*, de elevada resistência de falta e de saturação do núcleo magnético do TC, que são reconhecidamente

situações adversas para os sistemas de proteção. Apesar do princípio de funcionamento da TDQ ser baseado no desequilíbrio das correntes de falta, a mesma também atuou corretamente em casos de curtos trifásicos, mesmo sendo um curto-circuito com características equilibradas, pois a detecção torna-se possível durante o período transitório entre os cenários de pré-falta e de falta.

Por fim, realizaram-se também simulações em massa para cenários de faltas externas e a função PC-TDQ proposta não atuou indevidamente em nenhum dos casos, demonstrando sua segurança e eficácia. Logo, os resultados obtidos provam que a função PC-TDQ proposta é rápida, confiável e segura, e não necessita de complexas implementações computacionais adicionais à função PC tradicional.

Diante do exposto e tendo como objetivo melhorar e diversificar a pesquisa realizada nesta dissertação, propõe-se os seguintes tópicos como continuação do estudo apresentado:

- Analisar o desempenho do algoritmo da função PC-TDQ em linhas com níveis de tensão maiores que 230 kV e comprimentos maiores que 200 km;
- Analisar o desempenho do algoritmo da função PC-TDQ em linhas de transmissão híbridas, ou seja, que compreendem estruturas aéreas com cabos nus e subterrâneas com cabos isolados;
- Adaptar o algoritmo para linhas de transmissão com mais de 2 terminais e analisar o desempenho da função PC-TDQ frente a este cenário;
- Avaliação da metodologia a partir de oscilografias reais;
- Implementação da funcionalidade em dispositivos reais que permitam a programação de funções;
- Analisar o desempenho do algoritmo proposto em cenários de *infeed*; e
- Analisar o desempenho do algoritmo proposto considerando sinais com ruídos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise : Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Brasília, 2018. Citado na página 1.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de circuitos elétricos*. 5nd. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 14 e 16.
- ALMEIDA, M. C. C. d.; LOPES, F. V. Evaluation of transmission line phase comparison protection considering the use of mimic filter. In: IEEE. *2019 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.], 2019. p. 1–4. Citado 4 vezes nas páginas 3, 16, 23 e 25.
- ALMEIDA, M. C. C. de; LOPES, F. V. Speeding up phase comparison line protection by means of tdq-based current unbalance analysis. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 188, p. 106557, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 3, 24 e 25.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 16.
- BENMOUYAL, G. Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 621–630, 1995. Citado na página 16.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. *Protective relaying: principles and applications*. [S.l.]: CRC press, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 60.
- DAMBHARE, S.; SOMAN, S. A.; CHANDORKAR, M. C. Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1832–1841, 2009. Citado na página 7.
- DEWEY, C. G.; HODGES, M. E. Transistorized phase-comparison relaying: principles and circuits. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 79, n. 3, p. 373–381, 1960. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.
- FERRER, H. A. Modern solutions for protection, control, and monitoring of electric power systems. pullman, wa: Schweitzer engineering laboratories. In: *Protection, Control, Systems*. [S.l.]: Pullman, Laboratories, Inc., 2010. Citado na página 18.
- FITZGERALD, A. S. A carrier-current pilot system of transmission line protection. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 47, n. 1, p. 22–29, 1928. Citado 4 vezes nas páginas 5, 7, 20 e 25.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 14.

- HALMAN, T. R.; GOLDSBOROUGH, S. L.; LENSNER, H. W.; DROMPP, A. F. A new carrier relaying system. *Electrical Engineering*, IEEE, v. 63, n. 8, p. 568–572, 1944. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.
- HARGRAVE, A.; THOMPSON, M. J.; HEILMAN, B. Beyond the knee point: A practical guide to ct saturation. In: IEEE. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2018. p. 1–23. Citado na página 17.
- HINGE, T. P.; DAMBHARE, S. S. Secure phase comparison schemes for transmission-line protection using synchrophasors. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 30, n. 4, p. 2045–2054, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 5, 16, 21 e 25.
- IEEE. *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*. [S.l.], 1996. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 60.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *Emt reference models for transmission line relay testing*. 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Nenhuma citação no texto.
- KARIMI-GHARTEMANI, M.; KARIMI, H. Processing of symmetrical components in time-domain. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 572–579, 2007. Citado na página 14.
- KASE, T.; KUROSAWA, Y.; AMO, H. Charging current compensation for distance protection. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 124–131, 2007. Citado na página 6.
- KASZTENNY, B.; SHARPLES, D.; CAMPBELL, B.; POZZUOLI, M. Fast ground directional overcurrent protection—limitations and solutions. In: *Proceedings of the 27th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 24–26. Citado na página 14.
- KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; UDREN, E. A. Rebirth of the phase comparison line protection principle. In: IEEE. *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006*. [S.l.], 2006. p. 60–pp. Citado 13 vezes nas páginas 2, 5, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 22, 25, 36, 45 e 46.
- LEITE, E.; LOPES, F.; SILVA, K. Performance evaluation of the phase comparison transmission line protection. In: IEEE. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.], 2016. p. 1–5. Citado 3 vezes nas páginas 2, 21 e 25.
- LEITE JR., E. Aplicação no domínio do tempo da proteção de linhas baseada na comparação de fases. *Dissertação de Mestrado (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, Brasil*, 2016. Citado na página 17.
- LEITE JR., E.; LOPES, F.; SILVA, K. Using incremental replica current in phase comparison transmission line protection schemes: Advantages and limitations. In: IEEE. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 6 vezes nas páginas 8, 16, 23, 25, 34 e 45.
- LEITE JR., E. J. S.; 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. *Natal, Brasil: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VI SBSE)*, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 16, 23 e 25.

- LEITE JR., E. J. S.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Time-domain application of superimposed quantities in the phase comparison transmission line protection scheme. *The Journal of Engineering*, IET, v. 2018, n. 15, p. 1360–1364, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 5, 8, 23, 25 e 45.
- LOPES, F.; FERNANDES, D.; NEVES, W. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013. Citado 7 vezes nas páginas 23, 27, 28, 30, 31, 32 e 67.
- LOPES, F.; NEVES, W.; FERNANDES, D. A tdq-based fault detector for digital power system relaying. In: IEEE. *2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition*. [S.l.], 2014. p. 1–5. Citado 4 vezes nas páginas 23, 30, 31 e 32.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 26, 32 e 67.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 1.
- PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 48, n. 3, p. 716–727, 1929. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 67.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. New York, USA: Springer, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- ROBERTSON, S. D.; MEIKLE, W. N. Solid-state, high-speed phase-comparison relay based on zero crossings: I-theory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 764–770, 1968. Citado na página 32.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection-can we break free of phasor limitations? In: IEEE. *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2015. p. 448–461. Citado 3 vezes nas páginas 2, 16 e 23.
- SHOCKLEY, W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell System Technical Journal*, Wiley Online Library, v. 28, n. 3, p. 435–489, 1949. Nenhuma citação no texto.
- SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado na página 8.
- YAOZHONG, G.; ANDING, W.; HUILIANG, T. Phase-comparison pilot relays using fault superimposed components. In: IET. *1991 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91*. [S.l.], 1991. p. 833–838. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.

- ZHANG, M.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; KLIMEK, A. A new current differential protection scheme for two-terminal transmission lines. p. 1–6, 2007. Citado na página 7.
- ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2nd. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 5 e 6.

APÊNDICE A

DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DA TDQ

Neste apêndice, apresenta-se o desenvolvimento matemático da TDQ aplicada em sinais elétricos trifásicos, assim como reportado em (LOPES, 2014; LOPES *et al.*, 2013).

Inicialmente apresentam-se nas equações de (A.1) à (A.5) as relações trigonométricas utilizadas para no desenvolvimento matemático de aplicação da TDQ.

$$\cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2}[\cos(A + B) + \cos(A - B)] \quad (\text{A.1})$$

$$\sin A \cdot \cos B = \frac{1}{2}[\sin(A + B) + \sin(A - B)] \quad (\text{A.2})$$

$$\sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2}[\cos(A - B) - \cos(A + B)] \quad (\text{A.3})$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cdot \cos B \mp \sin A \cdot \sin B \quad (\text{A.4})$$

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cdot \cos B \pm \cos A \cdot \sin B \quad (\text{A.5})$$

Considerando um sistema trifásico na sequência ABC, tem-se:

$$A_a = A_{am} \sin(\omega t + \theta_i) , \quad (\text{A.6})$$

$$A_b = A_{bm} \sin(\omega t + \theta_i - 120^\circ) , \quad (\text{A.7})$$

$$A_c = A_{cm} \sin(\omega t + \theta_i + 120^\circ) , \quad (\text{A.8})$$

onde A_a , A_b e A_c são as componentes das fases A, B e C, respectivamente, A_{am} , A_{bm} e A_{cm} são seus respectivos módulos e θ_i o ângulo da fase A.

A equação (A.9) apresenta o cálculo das componentes de eixo direto A_d e em quadratura A_q , da Transformada de Park (PARK, 1929):

$$\begin{bmatrix} A_d(k) \\ A_q(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{dq} \begin{bmatrix} A_a(k) \\ A_b(k) \\ A_c(k) \end{bmatrix} , \quad (\text{A.9})$$

onde \mathbf{P}_{dq} é a matriz de Park, definida como apresentado em (A.10):

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\varphi) & -\sin(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.10})$$

sendo $\varphi = (k\omega_s\Delta t + \theta)$, onde k é o índice da k -ésima amostra dos sinais, ω_s a frequência angular dos eixos direto e em quadratura, Δt o período de amostragem usado durante a conversão A/D dos sinais e θ o ângulo de fase da componente de eixo direto A_d .

Aplicando-se a TDQ por meio da expressão (A.9), obtém-se que as componentes de eixo direto A_d e em quadratura A_q :

$$A_d = \frac{2}{3}[A_a \cos(\omega_s t + \theta) + A_b \cos(\omega_s t + \theta - 120^\circ) + A_c \cos(\omega_s t + \theta + 120^\circ)], \quad (\text{A.11})$$

$$A_q = -\frac{2}{3}[A_a \sin(\omega_s t + \theta) + A_b \sin(\omega_s t + \theta - 120^\circ) + A_c \sin(\omega_s t + \theta + 120^\circ)]. \quad (\text{A.12})$$

De modo a simplificar o desenvolvimento, reescreve-se as expressões (A.11) e (A.12) como:

$$A_d = \frac{2}{3}[A_{da} + A_{db} + A_{dc}], \quad (\text{A.13})$$

$$A_q = -\frac{2}{3}[A_{qa} + A_{qb} + A_{qc}]. \quad (\text{A.14})$$

Desenvolvendo A_{da} , A_{db} e A_{dc} e com o uso da identidade trigonométrica apresentada em (A.2), obtém-se consequentemente:

$$\begin{aligned} A_{da} &= A_a \cos(\omega_s t + \theta) \\ &= A_{am} \sin(\omega t + \theta_i) \cdot \cos(\omega_s t + \theta) \\ &= A_{am} \left[\frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i + \omega_s t + \theta) + \frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i - \omega_s t - \theta) \right], \\ &= A_{am} \left\{ \frac{1}{2} \sin[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta] + \frac{1}{2} \sin[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] \right\}, \\ &= \frac{1}{2} A_{am} \{ \sin[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] - \sin[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \}. \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{aligned} A_{db} &= A_b \cos(\omega_s t + \theta - 120^\circ) \\ &= A_{bm} \sin(\omega t + \theta_i - 120^\circ) \cdot \cos(\omega_s t + \theta - 120^\circ) \\ &= A_{bm} \left[\frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i - 120^\circ + \omega_s t + \theta - 120^\circ) + \frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i - 120^\circ - \omega_s t - \theta + 120^\circ) \right], \\ &= A_{bm} \left\{ \frac{1}{2} \sin[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta - 240^\circ] + \frac{1}{2} \sin[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] \right\}, \\ &= \frac{1}{2} A_{bm} \{ \sin[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i - 240^\circ] - \sin[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \}. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned}
A_{dc} &= A_c \cos(\omega_s t + \theta + 120^\circ) \\
&= A_{cm} \sin(\omega t + \theta_i + 120^\circ) \cdot \cos(\omega_s t + \theta + 120^\circ) \\
&= A_{cm} \left[\frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i + 120^\circ + \omega_s t + \theta + 120^\circ) + \frac{1}{2} \sin(\omega t + \theta_i + 120^\circ - \omega_s t - \theta - 120^\circ) \right], \\
&= A_{cm} \left\{ \frac{1}{2} \sin[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta + 240^\circ] + \frac{1}{2} \sin[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] \right\}, \\
&= \frac{1}{2} A_{cm} \{ \sin[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i + 240^\circ] - \sin[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \}.
\end{aligned} \tag{A.17}$$

Desenvolvendo A_{qa} , A_{qb} e A_{qc} e com o uso da identidade trigonométrica apresentada em (A.3), obtém-se:

$$\begin{aligned}
A_{qa} &= A_a \sin(\omega_s t + \theta) \\
&= A_{am} \sin(\omega t + \theta_i) \cdot \sin(\omega_s t + \theta) \\
&= A_{am} \left[\frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i - \omega_s t - \theta) - \frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i + \omega_s t + \theta) \right], \\
&= A_{am} \left\{ \frac{1}{2} \cos[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] - \frac{1}{2} \cos[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta] \right\}, \\
&= \frac{1}{2} A_{am} \{ \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] - \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \}.
\end{aligned} \tag{A.18}$$

$$\begin{aligned}
A_{qb} &= A_b \sin(\omega_s t + \theta - 120^\circ) \\
&= A_{bm} \sin(\omega t + \theta_i - 120^\circ) \cdot \sin(\omega_s t + \theta - 120^\circ) \\
&= A_{bm} \left[\frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i - 120^\circ - \omega_s t - \theta + 120^\circ) - \frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i - 120^\circ + \omega_s t + \theta - 120^\circ) \right], \\
&= A_{bm} \left\{ \frac{1}{2} \cos[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] - \frac{1}{2} \cos[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta - 240^\circ] \right\}, \\
&= \frac{1}{2} A_{bm} \{ \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] - \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i - 240^\circ] \}.
\end{aligned} \tag{A.19}$$

$$\begin{aligned}
A_{qc} &= A_c \sin(\omega_s t + \theta + 120^\circ) \\
&= A_{cm} \sin(\omega t + \theta_i + 120^\circ) \cdot \sin(\omega_s t + \theta + 120^\circ) \\
&= A_{cm} \left[\frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i + 120^\circ - \omega_s t - \theta - 120^\circ) - \frac{1}{2} \cos(\omega t + \theta_i + 120^\circ + \omega_s t + \theta + 120^\circ) \right], \\
&= A_{cm} \left\{ \frac{1}{2} \cos[(\omega - \omega_s)t + \theta_i - \theta] - \frac{1}{2} \cos[(\omega + \omega_s)t + \theta_i + \theta + 240^\circ] \right\}, \\
&= \frac{1}{2} A_{cm} \{ \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] - \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i + 240^\circ] \}.
\end{aligned} \tag{A.20}$$

Utilizando-se as relações trigonométricas apresentadas em (A.4) e (A.5) e fazendo $x = (\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i$, tem-se:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}(x - 240^\circ) &= \operatorname{sen} x \cos(240^\circ) - \cos x \operatorname{sen}(240^\circ) , \\ &= -0,5 \operatorname{sen} x + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos x . \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}(x + 240^\circ) &= \operatorname{sen} x \cos(240^\circ) + \cos x \operatorname{sen}(240^\circ) , \\ &= -0,5 \operatorname{sen} x - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos x . \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{aligned} \cos(x - 240^\circ) &= \cos x \cos(240^\circ) + \operatorname{sen} x \operatorname{sen}(240^\circ) , \\ &= -0,5 \cos x - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} x . \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned} \cos(x + 240^\circ) &= \cos x \cos(240^\circ) - \operatorname{sen} x \operatorname{sen}(240^\circ) , \\ &= -0,5 \cos x + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} x . \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

Desta forma, substituindo as equações apresentadas em (A.21) e (A.22) a componente de eixo direto A_d é dada por:

$$\begin{aligned} A_d &= \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \{ A_{am} \operatorname{sen} x - A_{am} \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \\ &\quad + A_{bm} \operatorname{sen}(x - 240^\circ) - A_{bm} \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \\ &\quad + A_{cm} \operatorname{sen}(x + 240^\circ) - A_{cm} \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \} , \\ &= \frac{1}{3} \{ A_{am} \operatorname{sen} x - 0,5 A_{bm} \operatorname{sen} x + \frac{\sqrt{3}}{2} A_{bm} \cos x \\ &\quad - 0,5 A_{cm} \operatorname{sen} x - \frac{\sqrt{3}}{2} A_{cm} \cos x \\ &\quad - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \} , \\ &= \frac{1}{3} \{ \operatorname{sen} x [A_{am} - \frac{1}{2} (A_{bm} + A_{cm})] \\ &\quad + \cos x [\frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm})] \\ &\quad - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \} , \\ A_d &= \frac{1}{3} \{ [A_{am} - \frac{1}{2} (A_{bm} + A_{cm})] \operatorname{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\ &\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\ &\quad - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \operatorname{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \} \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Analogamente, substituindo as equações apresentadas em (A.23) e (A.24) na componente de eixo em quadratura, tem-se que:

$$\begin{aligned}
A_q &= -\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \left\{ -A_{am} \cos x + A_{am} \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right. \\
&\quad - A_{bm} \cos(x - 240^\circ) + A_{bm} \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \\
&\quad \left. - A_{cm} \cos(x + 240^\circ) + A_{cm} \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\}, \\
&= -\frac{1}{3} \left\{ -A_{am} \cos x + 0,5A_{bm} \cos x + \frac{\sqrt{3}}{2}A_{bm} \operatorname{sen} x \right. \\
&\quad \left. + 0,5A_{cm} \cos x - \frac{\sqrt{3}}{2}A_{cm} \operatorname{sen} x \right. \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\}, \\
&= -\frac{1}{3} \left\{ \cos x \left[-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm}) \right] \right. \\
&\quad \left. + \operatorname{sen} x \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(A_{bm} - A_{cm}) \right] \right. \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\}, \\
A_q &= -\frac{1}{3} \left\{ \left[-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm}) \right] \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2}(A_{bm} - A_{cm}) \operatorname{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\}.
\end{aligned} \tag{A.26}$$

Nota-se das equações (A.25) e (A.26), conseqüentemente, que durante um cenário de sistema equilibrado, onde as magnitudes dos sinais de fases são iguais, surgirão oscilações nas componentes A_d e A_q com frequência igual a $\omega_s - \omega$, pois os demais termos serão anulados. Já para o caso de desequilíbrio entre fases, surgirão componentes com frequência igual à $\omega_s + \omega$, cuja amplitude resultará das amplitudes dos sinais avaliados.

A.1 ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

A.1.1 Sistema Equilibrado

Considerando um sistema trifásico equilibrado, tem-se que $A_{am} = A_{bm} = A_{cm} = A_m$ e sincronizando a frequência angular dos eixos referenciais com a frequência do sistema, ou seja, fazendo $\omega = \omega_s$, as componentes de eixo direto e em quadratura resumem-se a:

$$\begin{aligned}
A_d &= \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{sen}[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
&= \frac{1}{3} \left\{ [A_m - \frac{1}{2}(A_m + A_m)] \text{sen}[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_m - A_m) \cos[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. - [A_m + A_m + A_m] \text{sen}[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
&= \frac{1}{3} \left\{ -3A_m \text{sen}[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
A_d &= -A_m \text{sen}(\theta - \theta_i) .
\end{aligned} \tag{A.27}$$

$$\begin{aligned}
A_q &= -\frac{1}{3} \left\{ [-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
&= -\frac{1}{3} \left\{ [-A_m + \frac{1}{2}(A_m + A_m)] \cos[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_m - A_m) \text{sen}[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. + [A_m + A_m + A_m] \cos[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
&= -\frac{1}{3} \left\{ 3A_m \cos[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
A_q &= -A_m \cos(\theta - \theta_i) .
\end{aligned} \tag{A.28}$$

A.1.2 Sistema Desequilibrado

Avaliando-se um sistema trifásico desequilibrado e sincronizando a frequência angular dos eixos referenciais com a frequência do sistema, tem-se apenas que $\omega_s = \omega$. Logo, as equações das componentes de eixo direto e em quadratura, tornam-se:

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

$$\begin{aligned}
A_d &= \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{sen}[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \cos[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{sen}[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
A_d &= \frac{1}{3} \left\{ [A_{am} - \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \text{sen}(2\omega t + \theta + \theta_i) \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \cos(2\omega t + \theta + \theta_i) \\
&\quad \left. - [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \text{sen}(\theta - \theta_i) \right\} .
\end{aligned} \tag{A.29}$$

$$\begin{aligned}
A_q &= -\frac{1}{3} \left\{ [-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \cos[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}[(\omega_s + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega_s - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
A_q &= -\frac{1}{3} \left\{ [-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \cos[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}[(\omega + \omega)t + \theta + \theta_i] \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos[(\omega - \omega)t + \theta - \theta_i] \right\} , \\
A_q &= -\frac{1}{3} \left\{ [-A_{am} + \frac{1}{2}(A_{bm} + A_{cm})] \cos(2\omega t + \theta + \theta_i) \right. \\
&\quad + \frac{\sqrt{3}}{2} (A_{bm} - A_{cm}) \text{sen}(2\omega t + \theta + \theta_i) \\
&\quad \left. + [A_{am} + A_{bm} + A_{cm}] \cos(\theta - \theta_i) \right\} .
\end{aligned} \tag{A.30}$$

Nota-se, portanto, das equações (A.27) e (A.28) que durante um cenário de sistema equilibrado as componentes A_d e A_q são constantes. Todavia, verifica-se pelas equações (A.29) e (A.30) que durante um cenário de desequilíbrio, as componentes A_d e A_q oscilam com o dobro da frequência do sistema (2ω), cujas amplitudes dependem das magnitudes dos sinais de fase.