



**APLICAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO DA PROTEÇÃO DE  
LINHAS BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES**

**EDUARDO JORGE SILVA LEITE JUNIOR**

**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 NO DOMÍNIO DO TEMPO DA PROTEÇÃO DE LINHAS  
BASEADA NA COMPARAÇÃO DE FASES

EDUARDO JORGE SILVA LEITE JUNIOR

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.

APROVADA POR:



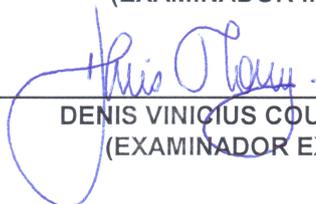
---

FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB  
(ORIENTADOR)



---

FRANCISCO DAMASCENO FREITAS, Dr., ENE/UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

DENIS VINICIUS COURY, Dr., USP  
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 02 de dezembro de 2016.

## FICHA CATALOGRÁFICA

LEITE JUNIOR, EDUARDO JORGE SILVA

Aplicação no Domínio do Tempo da Proteção de Linhas Baseada na Comparação de Fases. [Distrito Federal] 2016.

xvi, 97p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado, 2016).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Comparação de Fase

3. Componente CC de Decaimento Exponencial

I. ENE/FT/UnB

2. Corrente Incremental

4. Proteção no Domínio do Tempo

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEITE JR., E. J. S. (2016). Aplicação no Domínio do Tempo da Proteção de Linhas Baseada na Comparação de Fases. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-650/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Eduardo Jorge Silva Leite Junior

TÍTULO: Aplicação no Domínio do Tempo da Proteção de Linhas Baseada na Comparação de Fases.

GRAU: Mestre ANO: 2016

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. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Eduardo Jorge Silva Leite Junior

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Eng. Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

*Aos meus pais, Eduardo e Patrícia, e aos meus tios,  
Fernando e Luciana, DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares. Em especial a Fernando e Luciana pelo apoio, paciência, carinho e confiança. Sei que não mediram esforços para a realização desse sonho. Sem a presença deles a caminhada seria mais longa e mais difícil.

Ao meu orientador, Professor Dr. Felipe Vigolvinho Lopes, pela confiança em mim depositada, pela amizade, pela orientação, pelo apoio, paciência e pela oportunidade de aprendizado.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Kleber Melo e Silva, por não medir esforços para ajudar, pela orientação durante este trabalho e pela sua amizade.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE), pelo companheirismo durante esse período de Mestrado, pela amizade e apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de Mestrado.

Aos colegas, professores e funcionários da UnB que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

Obrigado.

## RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um estudo da aplicação no domínio do tempo da proteção de linhas de transmissão baseada na comparação de fases. Analisam-se adaptações para a versão tradicional do algoritmo em estudo, verificando quais destas podem tornar a proteção por comparação de fases no domínio do tempo menos influenciada pela componente CC de decaimento exponencial, ângulo de incidência da falta, resistência de falta, força das fontes e carregamento do sistema. Os estudos se baseiam na análise de diversas condições de falta e na comparação das atuações da proteção quando utilizados como sinais de entrada elementos de fase, de sequência e elementos incrementais. Para tanto, utiliza-se o software *Alternative Transients Program* (ATP) para simular faltas em uma linha de transmissão de 500 kV/60Hz de 200 km de comprimento, considerando diferentes valores de carregamento, parâmetros de falta e valores de *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR). Dos resultados obtidos, identificam-se as adaptações que tornam o algoritmo mais rápido e menos sensível à componente CC de decaimento exponencial, ao ângulo de incidência da falta, à resistência de falta e ao carregamento do sistema, sem comprometer a confiabilidade e seletividade de fases da proteção.

**Palavras-chave:** ATP, comparação de fases, componente CC de decaimento exponencial, linhas de transmissão, proteção no domínio do tempo, proteção de linhas de transmissão.

## ABSTRACT

In this work, the time-domain application of the phase comparison transmission line protection is studied. Adaptations to the traditional version of the studied algorithm are evaluated, identifying those that make the phase comparison line protection less influenced by the decaying DC component, fault inception angle, fault resistance, sources' strength and system loading. The presented studies are based on the analysis of several fault conditions and on the comparison of the protection performances when phase, sequence and incremental elements are used. In order to do so, the *Alternative Transients Program* (ATP) is used to simulate faults on a 500 kV/60 Hz transmission line 200 km long, considering different system loading conditions, fault parameters and *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR) values. From the obtained results, one identifies the adaptations that make the time-domain phase comparison line protection faster and less sensitive to the decaying DC component, fault inception angle, fault resistance and system loading, without compromising the protection reliability and phase selectivity.

**Keywords:** ATP, phase comparison, decaying DC component, time-domain protection, transmission line protection.

# SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Glossário	x
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3 Publicações . . . . .	4
1.4 Organização do Texto . . . . .	5
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1 Princípios da Proteção por Comparação de Fase . . . . .	6
2.1.1 Proteção por Comparação de Fases no Domínio da Frequência . . . . .	7
2.1.2 Proteção por Comparação de Fases no Domínio do Tempo . . . . .	9
2.2 Componentes Simétricas Aplicadas na Função PC . . . . .	11
2.3 Fontes de Erros Tradicionais da Função PC . . . . .	15
2.3.1 Corrente Capacitiva . . . . .	15
2.3.2 Ângulo de Incidência e Componente CC de Decaimento Exponencial . . . . .	16
2.3.3 <i>Outfeed</i> . . . . .	18
2.3.4 Saturação de TC . . . . .	19
<b>Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo 4 – Análise do Desempenho da Função PC Baseada no Domínio da Frequência</b>	<b>29</b>

4.1	Sistema Elétrico de Potência Avaliado . . . . .	30
4.2	Condições de Curto-Circuito Simuladas . . . . .	31
4.2.1	Influência da Localização da Falta . . . . .	32
4.2.2	Influência da Resistência de Falta . . . . .	33
4.2.3	Influência do Carregamento do Sistema e do SIR . . . . .	36
4.3	Síntese da Avaliação da Função PC no Domínio da Frequência . . . . .	39
<b>Capítulo 5 – Adaptações da Função PC para Aplicações no Domínio do Tempo</b>		<b>41</b>
5.1	Implementação da Função PC no Domínio do Tempo . . . . .	41
5.2	Remoção do Efeito Capacitivo das Linhas . . . . .	42
5.3	Uso de Grandezas Incrementais do Domínio do Tempo . . . . .	44
5.4	Técnica $+i/-i$ Aplicada à Função PC no Domínio do Tempo . . . . .	47
5.5	Eliminação da Componente CC de Decaimento Exponencial . . . . .	50
5.6	Síntese do Capítulo . . . . .	51
<b>Capítulo 6 – Análise do Desempenho da Função PC Baseada no Domínio do Tempo</b>		<b>52</b>
6.1	Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC) . . . . .	52
6.1.1	Casos ATC1, ATC2 e ATC3: Identificação de Curtos-Circuitos Externos e Internos Com e Sem Remoção do Efeito Capacitivo . . . . .	53
6.1.2	Casos ATC4, ATC5 e ATC6: Avaliação do Uso de Grandezas Incrementais Frente à Influência Combinada do Carregamento, Resistência de Falta e SIR . . . . .	57
6.1.3	Casos ATC7 e ATC8: Avaliação da Técnica $+i/-i$ Frente à Influência do Ângulo de Incidência da Falta . . . . .	61
6.1.4	Casos ATC9 e ATC10: Avaliação do Uso da Corrente Réplica Incremental na Presença da Componente CC de Decaimento Exponencial . . . . .	63
6.1.5	Casos ATC11, ATC12 e ATC13: Análise da Seletividade de Fases para Diferentes Tipos de Falta . . . . .	65
6.1.6	Caso ATC14: Avaliação da Influência da Saturação do TC . . . . .	67
6.2	Simulações em Massa . . . . .	69
<b>Capítulo 7 – Conclusões</b>		<b>74</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Sistema elétrico de potência analisado. . . . .	7
2.2	Correntes nos terminais local e remoto para: (a) Faltas externas ou condições normais de operação; (b) Faltas internas sem considerar o efeito capacitivo da LT; (c) Faltas internas considerando o efeito capacitivo da LT. . . . .	8
2.3	Regiões de <i>trip</i> e restrição usando: (a) $\psi$ e (b) $ \psi $ ; . . . . .	9
2.4	Princípios da comparação de fase: (a) Falta interna (à direita) e externa (à esquerda); (b) Sinais instantâneos; (c) Sinais modulados; (d) Saída da porta lógica AND; (e) Contagem da largura do pulso AND. . . . .	10
2.5	Representação das correntes de fase nos três conjuntos de componentes de sequência: (a) Componentes de sequência zero; (b) Componentes de sequência positiva; (c) Componentes de sequência negativa. . . . .	12
2.6	Circuito $\pi$ -nominal para LTs. . . . .	16
2.7	Atraso imposto pela componente CC de decaimento exponencial negativa: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta AND. . . . .	17
2.8	Função PC durante um caso de <i>outfeed</i> : (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta AND. . . . .	19
2.9	Função PC durante um caso de saturação de TC: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta AND. . . . .	20
4.1	Sistema elétrico de potência considerado nas simulações via ATP. . . . .	30
4.2	Influência de $d$ para $\delta=-5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	33

4.3	Influência de $d$ para $\delta = -25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	34
4.4	Influência de $R_f$ para $\delta = -25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	35
4.5	Influência de $R_f$ para $\delta = -5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	35
4.6	Influência de $\delta$ para $SIR_R = 0, 1$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	36
4.7	Influência de $\delta$ para $SIR_R = 1, 0$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	37
4.8	Influência do SIR para $\delta = -25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	38
4.9	Influência do SIR para $\delta = -5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo. . . . .	39
5.1	Função PC no domínio do tempo: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta <i>AND</i> ; (d) Contador $\psi(t)$ . . . . .	42
5.2	Sistema de potência simplificado. . . . .	45
5.3	Análise das componentes incrementais: (a) Circuito equivalente com falta; (b) Circuito de pré-falta; (c) Circuito puro de falta. . . . .	46

5.4	Uso da técnica $+i/-i$ : (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados para as correntes medidas; (c) Saída da porta <i>AND</i> considerando as correntes medidas; (d) Contadores para correntes medidas; (e) Correntes medidas invertidas; (f) Sinais modulados para as correntes medidas invertidas; (g) Saída da porta <i>AND</i> considerando as correntes medidas invertidas; (h) Contadores para correntes medidas invertidas. . . . .	48
5.5	Diagrama ilustrativo do funcionamento da lógica de proteção PC com a técnica $+i/ - i$ . . . . .	49
5.6	Correntes sem e com a utilização da corrente réplica incremental. . . . .	50
6.1	Sistema elétrico de potência considerado nas simulações via ATP. . . . .	53
6.2	Caso ATC1 - Curto-circuito externo AT: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo. . . . .	54
6.3	Caso ATC2 - Curto-circuito interno AT no meio da linha: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo. . . . .	55
6.4	Caso ATC3 - Curto-circuito interno AT imediatamente após o TC do terminal local: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo. . . . .	56
6.5	Caso ATC4 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de carregamento pesado: (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência. . . . .	57
6.6	Caso ATC5 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de elevado valor de $SIR_R$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência. . . . .	59

6.7	Caso ATC6 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de elevado valor de $R_f$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência. . . . .	60
6.8	Caso ATC6 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Correntes incrementais da fase A medidas nos terminais local e remoto. . . . .	60
6.9	Caso ATC7 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase negativos; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência negativos. . . . .	61
6.10	Caso ATC8 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo $\theta = 270^\circ$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase negativos; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência negativos. . . . .	62
6.11	Caso ATC8 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Versões negativas das correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto. . . . .	63
6.12	Caso ATC9 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo $\theta = 0^\circ$ : (a) Elementos de fase tradicionais; (b) Elementos réplica incrementais. . . . .	64
6.13	Caso ATC10 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo $\theta = 180^\circ$ : (a) Elementos de fase tradicionais; (b) Elementos réplica incrementais. . . . .	64
6.14	Caso ATC10 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Correntes réplica incrementais da fase A medidas nos terminais local e remoto. . . . .	65
6.15	Caso ATC11 - Curto-circuito interno BC no meio da linha com ângulo $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais. . . . .	66
6.16	Caso ATC12 - Curto-circuito interno CAT no meio da linha com ângulo $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais. . . . .	66
6.17	Caso ATC13 - Curto-circuito interno ABC no meio da linha com ângulo $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais. . . . .	67
6.18	Correntes primária e secundária referida ao circuito primário durante a saturação de TC. . . . .	68

---

6.19	Caso ATC14 - Curto-circuito interno AT com saturação do TC: (a) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de corrente réplica incremental. . . . .	69
6.20	Análise de sensibilidade paramétrica da função PC. . . . .	71
6.21	Resultados comparativos entre os elementos baseados em: (a) Correntes de fases com e sem o efeito capacitivo; (b) Correntes de sequência com e sem o efeito capacitivo. . . . .	71
6.22	Resultados comparativos entre os elementos baseados em: (a) Correntes de fases e correntes incrementais de fases; (b) Correntes de fases e corrente réplica incremental. . . . .	73
6.23	Resultados comparativos entre os elementos baseado em: (a) Correntes incrementais de fase sem e com a técnica $+i/ - i$ ; (b) Corrente réplica incremental sem e com a técnica $+i/ - i$ . . . . .	73

## LISTA DE TABELAS

4.1	Atrasos dos canais de comunicação em função do comprimento do canal. . . . .	31
6.1	Curto-circuitos simulados nas análises transitórias e suas características. . . . .	53
6.2	Variáveis analisadas na ASP. . . . .	70

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i_L$	Sinais instantâneos de corrente medidos no terminal local.
$i_R$	Sinais instantâneos de corrente medidos no terminal remoto.
$\hat{I}_L$	Fasores correspondentes às correntes medidas no terminal local.
$\hat{I}_R$	Fasores correspondentes às correntes medidas no terminal remoto.
$i_{mod}$	Sinais lógicos referentes às correntes moduladas.
$i_{AND}$	Sinais lógicos de saída da porta <i>AND</i> .
$v_L$	Sinais instantâneos de tensão medidos no terminal local.
$v_R$	Sinais instantâneos de tensão medidos no terminal remoto.
$i_s$	Correntes instantâneas com a remoção do efeito capacitivo.
$i_{neg}$	Correntes instantâneas com o sinal invertido.
$\Delta i$	Corrente incremental no domínio do tempo.
$\Delta \hat{I}$	Corrente incremental no domínio da frequência.
$SIR_L$	Valor de <i>SIR</i> para o terminal local.
$SIR_R$	Valor de <i>SIR</i> para o terminal remoto.
$\delta$	Abertura angular entre as tensões nas barras local e remota da LT.
$t_{falta}$	Instante de aplicação das faltas.
$R_f$	Resistência da falta.
$\theta$	Ângulo de incidência da falta com relação a tensão na fase A.
$d$	Distância de aplicação da falta com relação ao terminal local.

## GLOSSÁRIO

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CC	Corrente Constante
GE	<i>General Electric</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PC	<i>Phase Comparison</i>
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source Impedance Ratios</i>
TC	Transformador de corrente
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Em um sistema elétrico de potência, as linhas de transmissão (LTs) consistem em uma das partes mais importantes, pois permitem a transmissão de energia elétrica das usinas de geração até os consumidores, mesmo quando ambos se encontram distantes entre si (ANDERSON, 1999). No Brasil, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a transmissão da energia requerida pelos centros consumidores é predominantemente realizada por meio das instalações do Sistema Interligado Nacional (SIN), ficando apenas 1,7 % da energia transmitida associada a sistemas de transmissão não pertencentes ao SIN, que consistem em pequenas redes elétricas isoladas, situadas principalmente na região amazônica<sup>1</sup>.

Em decorrência do aumento da demanda por energia elétrica nas últimas décadas, os sistemas de transmissão têm sido requisitados a transmitir potências cada vez maiores e com boa continuidade de serviço (SCHWEITZER *et al.*, 2015b). Além disso, tem-se verificado um aumento do número e extensão das LTs em operação, culminando em uma maior susceptibilidade das redes elétricas a distúrbios de diferentes naturezas (SAHA *et al.*, 2010). De fato, no contexto dos sistemas de transmissão, sabe-se que quão maior for a linha, maior será sua susceptibilidade à ocorrência de faltas, pois cresce a exposição dos condutores às intempéries climáticas e ambientais (SAHA *et al.*, 2010). Por este motivo, relés de proteção têm sido utilizados por décadas para proteger as LTs, desempenhando funções capazes de identificar faltas e de reconhecer de forma confiável situações nas quais as LTs devem ser desligadas ou não (ANDERSON, 1999).

No que se refere aos sistemas interligados de transmissão, sabe-se que os distúrbios podem se propagar rapidamente, podendo ocasionar a interrupção do fornecimento de energia em grandes áreas ou até mesmo o desligamento total de suas instalações (ANDERSON, 1999). Para evitar

---

<sup>1</sup>Informação extraída do site [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), no dia 14/10/2016.

tais situações, pesquisas têm focado cada vez mais no desenvolvimento de esquemas de proteção capazes de isolar defeitos com o menor tempo possível e com boa confiabilidade, assegurando uma operação segura e rápida do sistema como um todo. Neste contexto, é importante ressaltar que o tempo de operação da proteção influencia diretamente as margens de estabilidade do sistema, de modo que, quanto menor o tempo de operação da proteção, maior a margem de estabilidade da rede elétrica. Em consequência desse fato, têm sido realizados vários estudos e desenvolvimentos relacionados a funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, as quais possuem um tempo de operação intrinsecamente menor do que o das funções tradicionais baseadas em fasores fundamentais (SCHWEITZER *et al.*, 2015a).

Além da problemática da estabilidade do sistema, algumas questões econômicas também têm motivado o desenvolvimento de algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo. Em 1976, por exemplo, no trabalho intitulado "*The Need for Ultra-Fast Clearing*", demonstrou-se que, para uma determinada linha da *Bonneville Power Administration* (BPA), uma redução de um ciclo fundamental no tempo de eliminação da falta aumentaria a transferência de potência em 250 MW, ou seja, cerca de 15 MW/ms (SCHWEITZER *et al.*, 2015a; EASTVEDT, 1976). Neste cenário, conclui-se que, na hipótese de existir a garantia de atuação rápida e confiável das funções de proteção, a redução do tempo de operação implicaria na possibilidade de aumentar a potência transferida nas LTs, o que seria economicamente atrativo, visto que reduziria despesas com a instalação de novas linhas (EASTVEDT, 1976). Adicionalmente, ainda que não exista a garantia total de atuações rápidas das funções de proteção no domínio do tempo para condições de falta mais críticas, a redução do tempo de operação permanece atrativa, visto que diminui a probabilidade de desligamentos de grandes proporções, os quais, em geral, também implicam em penalidades onerosas para as concessionárias.

Nos sistemas elétricos atuais, a grande maioria dos relés de proteção trabalham com funções no domínio da frequência, ou seja, utilizando como base os fasores fundamentais das tensões e correntes (SCHWEITZER *et al.*, 2015a). Deve-se destacar que, uma vez que é apenas após a passagem completa das janelas de dados do período de pré-falta para o período de falta (fase de transição) que se tem a estimativa correta dos fasores de interesse (SCHWEITZER; D., 1993; PHADKE; THORP, 2009), as atuações dos algoritmos baseados em componentes fundamentais possuem atrasos intrínsecos, os quais podem variar de meio ciclo até um ciclo e meio na frequên-

cia fundamental, a depender do tamanho da janela de dados utilizada (SCHWEITZER *et al.*, 2015a; SCHWEITZER; D., 1993). Por isso, o desenvolvimento de funções de proteção passíveis de aplicação no domínio do tempo e que não dependam da estimação de fasores tem atraído cada vez mais a atenção das concessionárias e dos fabricantes de relés de proteção, motivando uma série de estudos que têm sido publicados recorrentemente na literatura especializada.

Dentre as funções baseadas em fasores que são comumente utilizadas para a proteção de LTs, destacam-se as proteções de distância e a proteção diferencial (ZIEGLER, 2005; ZIEGLER, 2010). Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia digital e dos estudos relacionados às funções no domínio do tempo, novos algoritmos de proteção baseados na análise de valores instantâneos dos sinais medidos têm sido incorporados em relés numéricos, a exemplo das proteções de distância, direcional e por comparação de fases (SCHWEITZER *et al.*, 2015b; ALTUVE; SCHWEITZER, 2010; KASZTENNY *et al.*, 2006). Neste trabalho, os estudos se voltam para a proteção por comparação de fases, denominada de função PC, sigla esta proveniente do termo em inglês *Phase Comparison*.

A proteção PC foi muito utilizada nos relés eletromecânicos e eletrostáticos (FITZGERALD, 1928; HALMAN *et al.*, 1944). Com o aumento dos recursos tecnológicos, essa função ressurgiu como uma aplicação potencial para os relés microprocessados (KASZTENNY *et al.*, 2006), retomando o seu espaço no mercado em anos recentes. Embora existam aplicações dessa função de proteção no domínio da frequência, ou seja, utilizando fasores fundamentais, sua aplicação no domínio do tempo resulta em atuações rápidas na ordem de um quarto de ciclo, mantendo níveis satisfatórios de confiabilidade e segurança (KASZTENNY *et al.*, 2006). Entretanto, das versões da função PC reportadas na literatura, percebe-se que ainda existem dificuldades na identificação rápida e seletiva de faltas em LTs para alguns cenários específicos, problemas estes que são estudados neste trabalho com o objetivo de avaliar o custo-benefício de adaptações para o referido algoritmo, visando melhorias em seu desempenho.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Busca-se neste trabalho avaliar a aplicação da função PC na proteção de LTs no domínio do tempo, com o objetivo de identificar seus limites operacionais de sensibilidade e, consequen-

temente, avaliar adaptações que possam promover melhorias no desempenho da função. Neste cenário, adaptações da função PC no domínio do tempo são estudadas e testadas, viabilizando a identificação das mais adequadas para a função do ponto de vista de sua confiabilidade, segurança, simplicidade, aplicabilidade, velocidade de atuação e seletividade de fases. Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão dos fundamentos da proteção de LTs por comparação de fases;
- Realizar análises de sensibilidade paramétrica da função de proteção PC no domínio da frequência e do tempo;
- Avaliar o desempenho da função PC tradicional, comparando-o com o de versões adaptadas do algoritmo;
- Analisar diversos cenários de curto-circuito utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP), de modo a avaliar a atuação da proteção e o desempenho do algoritmo com e sem as adaptações analisadas;
- Identificar os cenários para os quais as adaptações analisadas melhor se adequam.

### 1.3 PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado possibilitaram a publicação dos seguintes artigos em anais de conferências internacionais e nacionais:

- LEITE JR., E. J. S.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Performance Evaluation of the Phase Comparison Transmission Line Protection. In: *2016 IEEE/PES GENERAL MEETING*. Boston, Estados Unidos, Julho, 2016.
- LEITE JR., E. J. S.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Proteção de Linhas Baseada na Comparação de Fases: Uma Análise da Aplicação no Domínio do Tempo. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VI SBSE)*. Natal-RN, Brasil, Maio, 2016.
- LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S.; RIBEIRO, J. P. G. Avaliação de Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VI SBSE)*. Natal-RN, Brasil, Maio, 2016.

- RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S. Influência da Componente CC de Decaimento Exponencial sobre o Desempenho de Elementos Direcionais Aplicados no Domínio do Tempo. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VI SBSE)*. Natal-RN, Brasil, Maio, 2016.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; LEITE JR., E. J. S.; OLIVEIRA, A. E. Análise de Sensibilidade Paramétrica da Proteção Diferencial de Linhas Baseada em Ondas Viajantes. In: *Seminário Técnico de Proteção e Controle (XIII STPC)*. Brasília-DF, Brasil, Outubro, 2016.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica relacionada à proteção de linhas por comparação de fases, incluindo explicações sobre algumas versões tradicionais da função aplicadas no domínio da frequência e do tempo.
- No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado, na qual a função PC é contextualizada historicamente, destacando-se as suas principais evoluções, limitações e aplicações mais modernas dessa função.
- No Capítulo 4, por meio de simulações no ATP em regime permanente, apresentam-se os resultados obtidos de uma análise de sensibilidade paramétrica da função PC aplicada no domínio da frequência, os quais são utilizados como referência para a seleção das adaptações avaliadas.
- No Capítulo 5, apresentam-se os fundamentos das adaptações da função PC a serem avaliadas durante a etapa de testes.
- No Capítulo 6, por meio de simulações no ATP em regime transitório, analisam-se cenários de faltas para fins de comparação do desempenho das versões adaptadas da função PC.
- Por fim, no Capítulo 7, são listadas as conclusões sobre os resultados obtidos, destacando as propostas para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao estudo realizado.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica de tópicos considerados importantes para o entendimento dos estudos e análises desenvolvidos ao longo do presente trabalho. Mais especificamente, abordam-se conceitos relacionados às versões tradicionais da função PC, bem como às fontes de erro típicas e soluções clássicas para otimização do algoritmo.

## 2.1 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO POR COMPARAÇÃO DE FASE

Os princípios básicos da proteção PC são conhecidos desde o final da década de 1920 (FITZGERALD, 1928). Cabe ressaltar que, diferentemente da proteção diferencial, a proteção PC não correlaciona informações dos módulos das correntes medidas nos terminais da LT monitorada, baseando-se basicamente na análise de suas fases.

Tratando-se de uma função de proteção, espera-se que a função PC seja capaz de: detectar defeitos sem atrasos adicionais, isolar a parte afetada com o mínimo de desligamentos e ser sensível aos menores indicadores de problemas, matendo a segurança para não atuar indevidamente (MOLAS, 2014). A seguir, listam-se alguns dos atributos esperados para um sistema de proteção que também devem ser atendidos pela função PC (ANDERSON, 1999):

- *Sensibilidade*: capacidade de identificar as faltas para as quais foi projetado.
- *Confiabilidade*: habilidade de atuar corretamente quando necessário.
- *Segurança*: capacidade de evitar a atuação indevida.
- *Seletividade*: habilidade de prover máxima continuidade no serviço com um mínimo de desconexões necessárias para isolar uma falta.
- *Velocidade*: capacidade de atuar rapidamente, de maneira a reduzir o tempo de duração das faltas, minimizando os danos ao sistema protegido.
- *Simplicidade*: utilização mínima de equipamentos e ajustes para efetuar a proteção.

Com o objetivo de atender à maioria dos atributos apresentados, a função PC em suas versões clássicas alia a necessidade de poucos ajustes com a capacidade de prover a proteção unitária de LTs, garantindo, em geral, atuações confiáveis e seletivas, sem requerer a utilização de algoritmos complexos. Neste contexto, cabe ressaltar que, dentre as versões da função PC, destacam-se as abordagens baseadas em análises no domínio da frequência e no domínio do tempo, as quais são explicadas a seguir.

### 2.1.1 Proteção por Comparação de Fases no Domínio da Frequência

A explicação da proteção PC quando aplicada no domínio da frequência serve também para o entendimento das implementações baseadas no domínio do tempo que serão explicadas posteriormente. Para um melhor entendimento dos princípios da proteção PC, considera-se o sistema elétrico de potência ilustrado na Figura 2.1. Para as devidas análises, avalia-se a defasagem angular  $\psi$  entre as correntes local e remota, a qual é obtida usando:  $\psi = \angle \hat{I}_L - \angle \hat{I}_R$ .

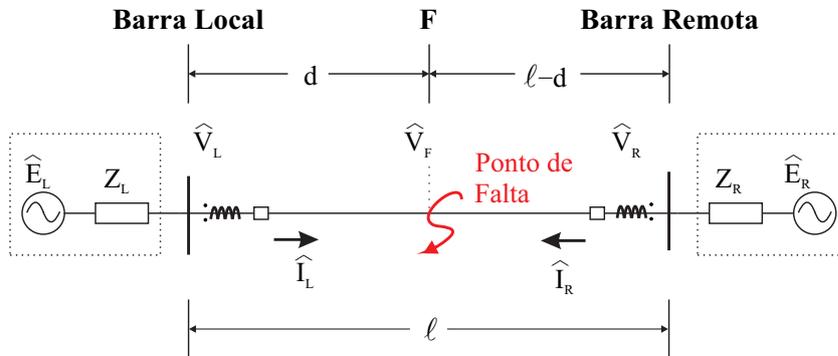
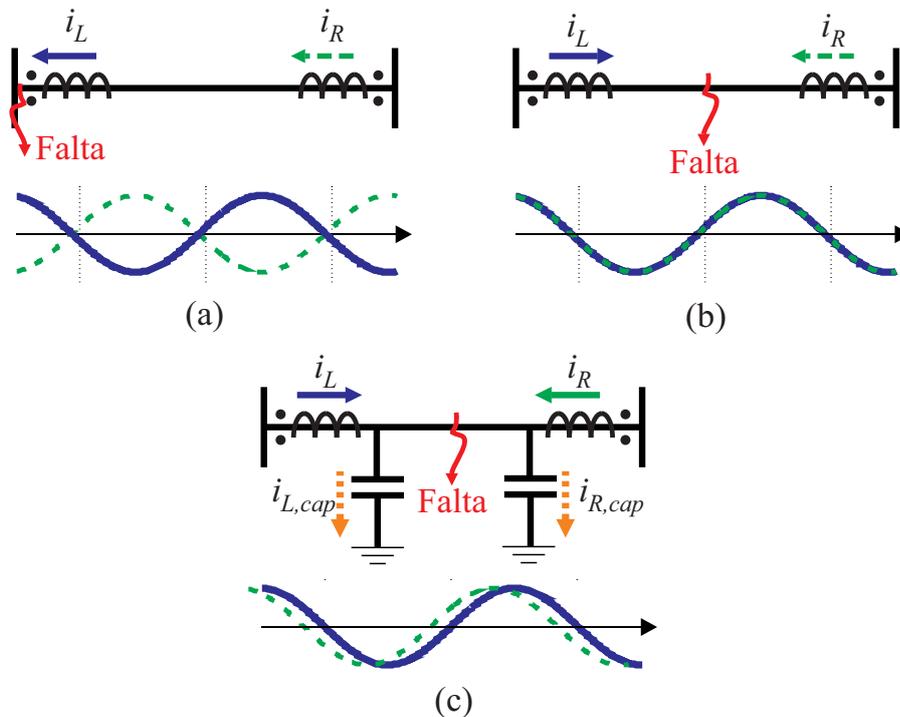


Figura 2.1. Sistema elétrico de potência analisado.

Para entender o funcionamento da função PC, é necessário, antes de mais nada, entender a forma de instalação dos transformadores de corrente (TCs) em LTs, cujas polaridades são tipicamente dispostas conforme ilustrado na Figura 2.1. De fato, os TCs são normalmente instalados de modo a apresentar medições positivas de corrente quando estas entram na linha, o que impacta diretamente na análise das fases das correntes medidas em cada terminal. Com as polaridades nas posições ilustradas, os TCs impõem duas referências direcionais distintas para cada terminal da LT, fato este que deve ser considerado durante a análise de  $\psi$ .

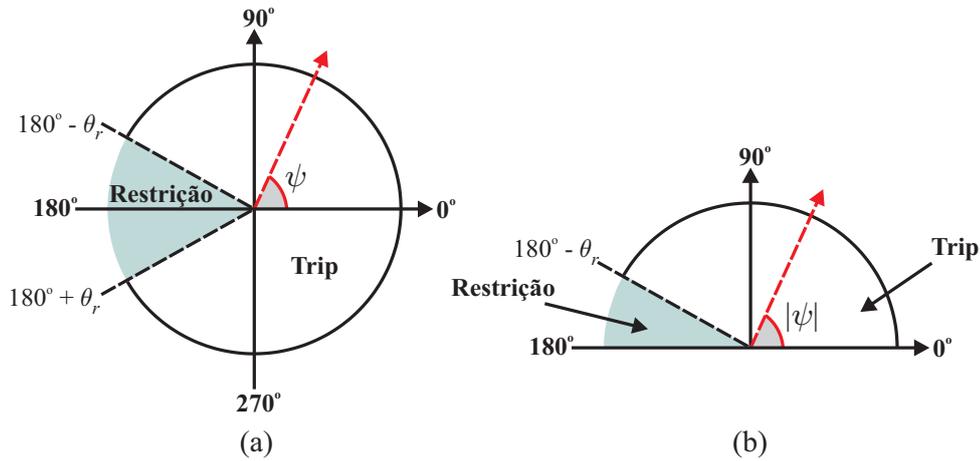
Cientes do comportamento das medições de corrente nos terminais de uma LT, pode-se dizer que em condições normais de operação, idealmente, a corrente que entra em um terminal da LT sai no terminal oposto, de tal forma que a corrente local apresenta polaridade oposta à corrente do terminal remoto. Isso significa que as correntes apresentariam idealmente uma defasagem  $\psi = 180^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 2.2(a). Em contrapartida, durante um curto-circuito interno, idealmente, ambas as correntes entram na linha, possuindo, portanto, a mesma polaridade. Deste modo, pode-se dizer que as correntes estariam idealmente em fase, ou seja, com defasagem  $\psi = 0^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 2.2(b).

Ainda em relação ao comportamento das correntes medidas, é importante destacar que, devido ao efeito capacitivo de LTs longas, conforme ilustrado na Figura 2.2(c), a defasagem entre as correntes local e remota não resultam em valores exatamente iguais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  para os casos de curtos-circuitos externos (ou condição normal de operação) e internos, respectivamente, fazendo-se necessário o uso de limiares para a correta operação da proteção. Esse limiar é aplicado na forma de um ângulo de segurança  $\theta_r$  (HINGE; DAMBHARE, 2015), cujos valores típicos, segundo a literatura especializada, estão entre  $20^\circ$  e  $45^\circ$  (FITZGERALD, 1928; DAMBHARE *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2007).



**Figura 2.2.** Correntes nos terminais local e remoto para: (a) Falta externa ou condições normais de operação; (b) Falta interna sem considerar o efeito capacitivo da LT; (c) Falta interna considerando o efeito capacitivo da LT.

Na Figura 2.3, apresentam-se graficamente as regiões de operação e restrição quando analisados os valores de  $\psi$  ou  $|\psi|$  (HINGE; DAMBHARE, 2015; LEITE JR. *et al.*, 2016a). Neste trabalho, durante a avaliação da função PC em sua versão baseada na análise de fasores fundamentais, utilizar-se-á a abordagem ilustrada na Figura 2.3(b), conforme empregado por LEITE JR. *et al.* (2016a).



**Figura 2.3.** Regiões de *trip* e restrição usando: (a)  $\psi$  e (b)  $|\psi|$ ;

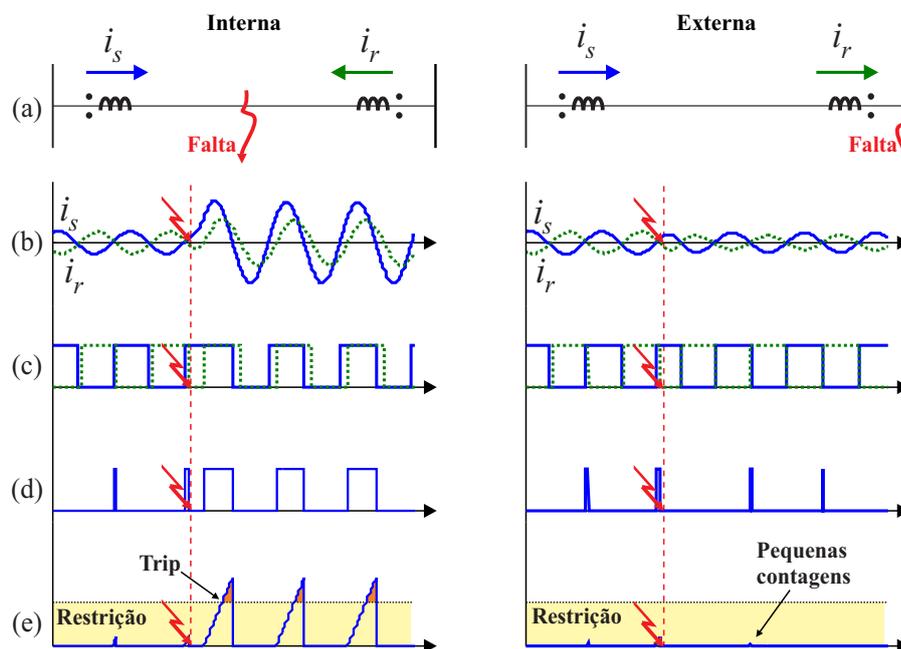
Diante do exposto, nota-se que a análise das fases das correntes local e remota torna a função PC capaz de prover a proteção unitária da LT (KASZTENNY *et al.*, 2006), permitindo a identificação de situações de curtos-circuitos internos e externos à linha monitorada por meio de análises simples, que requerem um número reduzido de ajustes. Em algumas versões tradicionais do algoritmo, os ajustes se limitam ao ângulo de segurança  $\theta_r$ , o que reforça a ideia de simplicidade dos sistemas de proteção.

### 2.1.2 Proteção por Comparação de Fases no Domínio do Tempo

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento do número de trabalhos nos quais se abordam adaptações da função PC (KASZTENNY *et al.*, 2006). Em Hinge & Dambhare (2015), por exemplo, a proteção PC baseada em fasores fundamentais de corrente é aplicada em conjunto com um algoritmo para remoção do efeito capacitivo da LT. Todavia, como mencionado anteriormente, o uso de algoritmos baseados em fasores possui atrasos intrínsecos, o que tem motivado o desenvolvimento de soluções para aplicação da função PC no domínio do tempo, usando apenas valores instantâneos dos sinais medidos.

Diversas têm sido as técnicas utilizadas para extrair informações das fases das correntes de interesse por meio de valores instantâneos dos sinais, a exemplo de técnicas para detecção de passagens pelo zero e modulação de sinais (ROBERTSON; MEIKLE, 1968; KASZTENNY *et al.*, 2006). Neste contexto, cabe ressaltar que já se encontram no mercado dispositivos reais de proteção que possuem a função PC implementada com base em análises no domínio do tempo, a exemplo do relé L60 lançado pela General Electric (GE) em parceria com a Alstom Grid em 2006 (GEK-113029, 2005).

Segundo Kasztenny *et al.* (2006), quando empregada no domínio do tempo, a função PC realiza a análise dos valores modulados das correntes instantâneas por meio de uma porta lógica *AND*. A modulação do sinal é realizada de acordo como a polaridade da amostra dos sinais monitorados, de forma que, para valores positivos, o sinal modulado recebe valor unitário e, para valores negativos, o sinal modulado recebe valor nulo. O referido procedimento, incluindo os valores modulados  $i_{mod_S}(t)$  e  $i_{mod_R}(t)$  das correntes  $i_S$  e  $i_R$ , respectivamente, são ilustrados na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Princípios da comparação de fase: (a) Falta interna (à direita) e externa (à esquerda); (b) Sinais instantâneos; (c) Sinais modulados; (d) Saída da porta lógica *AND*; (e) Contagem da largura do pulso *AND*.

Conforme mencionado anteriormente, a comparação entre os sinais modulados em ambos os terminais é realizada por meio de uma porta lógica *AND*, aplicada por meio da equação (2.1), a qual retorna valores positivos unitários apenas quando ambas as correntes medidas assumirem

valores instantâneos positivos (KASZTENNY *et al.*, 2006; ALTUVE; SCHWEITZER, 2010).

$$i_{\text{AND}}(t) = i_{\text{mod}_S}(t) \text{ AND } i_{\text{mod}_R}(t) . \quad (2.1)$$

Para curtos-circuitos externos ou em condições normais de operação do sistema, as correntes medidas estão idealmente em contra-fase. Dessa forma, ao combinar os valores modulados das correntes por meio da porta lógica *AND*, tem-se uma saída com valor nulo. Por outro lado, quando da ocorrência de um curto-circuito interno à LT, as correntes ficam idealmente em fase, fazendo com que a saída da porta lógica *AND* consista em um conjunto de pulsos largos verificados nos semiciclos positivos das correntes. Neste contexto, deve-se destacar que, ao considerar possíveis defasagens decorrentes do efeito capacitivo da linha, podem ser verificados pequenos desvios de fase entre as correntes medidas, originando na saída da porta *AND* pulsos estreitos durante a operação normal do sistema ou em casos de faltas externas, e, durante curtos-circuitos internos, pulsos com larguras menores que meio ciclo, conforme ilustrado na Figura 2.4(d).

Em (KASZTENNY *et al.*, 2006), propõe-se que, se a saída da porta lógica *AND* permanecer em nível alto ativo durante um período maior ou igual a um quarto de ciclo fundamental, tem-se a indicação de um curto-circuito interno, caso contrário, a proteção permanece estável. Assim, é nítido que a análise da largura do pulso da saída da porta *AND* é crucial para a implementação função PC no domínio do tempo. Neste trabalho, a contagem da referida largura do pulso, chamada de  $\psi(t)$ , é realizada por meio de contadores, cujo comportamento é ilustrado na Figura 2.4(e).

É importante ressaltar que, além das correntes de fase medidas, assim como em outros algoritmos de proteção, algumas versões tradicionais da função PC também consideram como sinais de entrada grandezas de sequência. Por isso, a seguir, apresentam-se os principais fundamentos das componentes simétricas, o que viabilizará uma melhor compreensão de alguns dos resultados obtidos ao longo do presente trabalho.

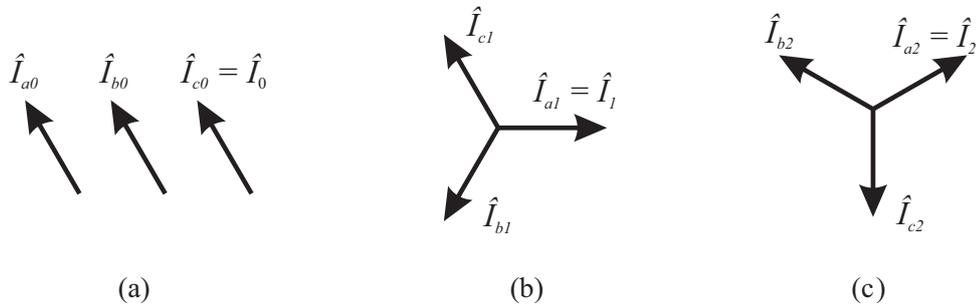
## 2.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS APLICADAS NA FUNÇÃO PC

Embora existam esforços para que os sistemas elétricos de potência operem de forma equilibrada, em situações de curto-circuito, os desequilíbrios são inevitáveis. Devido ao acoplamento

eletromagnético entre as fases de uma rede trifásica, a análise de situações de desequilíbrio no domínio de fases não é fácil. Por isso, utilizam-se normalmente ferramentas matemáticas para facilitar a análise de curto-circuitos, a exemplo das componentes simétricas desenvolvidas por Fortescue em 1918 (FORTESCUE, 1918).

O método de componentes simétricas consiste em representar um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos equilibrados distintos e desacoplados, chamados de sistemas de sequência ou componentes de sequência zero, positiva e negativa. Na Figura 2.5, ilustra-se a representação dos sistemas de sequência, os quais podem ser definidos como (GLOVER *et al.*, 2012; ALMEIDA; FREITAS, 1995):

- **Sequência zero (seq. 0):** consiste em três fasores com igual amplitude e com diferença angular entre si igual a zero;
- **Sequência positiva (seq. 1):** consiste em três fasores com igual amplitude, com  $120^\circ$  de defasagem entre si e sequência de fases igual à do sistema original;
- **Sequência negativa (seq. 2):** consiste em três fasores com igual amplitude, com  $120^\circ$  de defasagem entre si e sequência de fases inversa à do sistema original.



**Figura 2.5.** Representação das correntes de fase nos três conjuntos de componentes de sequência: (a) Componentes de sequência zero; (b) Componentes de sequência positiva; (c) Componentes de sequência negativa.

Para a apresentação dos fundamentos das componentes simétricas, analisam-se apenas as componentes de sequência da fase *A*, ou seja,  $\hat{I}_{A0}$ ,  $\hat{I}_{A1}$  e  $\hat{I}_{A2}$ . Para simplificar a apresentação do conteúdo, ocultar-se-á o subíndice *A*, adotando-se então  $\hat{I}_0$ ,  $\hat{I}_1$  e  $\hat{I}_2$  para representação das componentes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Tradicionalmente, o cálculo das componentes simétricas é realizado no domínio da frequência, com base em fasores fundamentais estimados a partir dos sinais medidos no sistema elétrico monitorado. Nesta abordagem, para um sistema com sequência de fases ABC, utiliza-se o se-

guinte equacionamento para obter as grandezas de fase em função das de sequência:

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

onde  $a$  é um operador rotacional complexo que possui módulo unitário e fase  $120^\circ$ .

Por outro lado, para calcular as componentes simétricas a partir das grandezas de fases, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_A \\ \widehat{I}_B \\ \widehat{I}_C \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Com o objetivo de reduzir os atrasos nas proteções que utilizam informações das grandezas de sequência, algoritmos de janela curta têm sido empregados em abordagens fasoriais da função PC, a exemplo do relé L60 que calcula as componentes de sequência de interesse com base nos valores instantâneos das saídas de filtros ortogonais (GEK-113029, 2005). Adicionalmente, existe ainda a possibilidade de calcular as componentes de sequência no domínio do tempo utilizando apenas amostras do sinal monitorado, ou seja, sem requerer o uso de filtros adicionais, abordagem esta que será considerada neste trabalho. Para tanto, deve-se compreender que as rotações de fase impostas a partir da multiplicação de fasores pelos coeficientes  $a$  e  $a^2$  consistem em atrasos no tempo de  $\frac{2T}{3}$  e  $\frac{T}{3}$ , sendo  $T$  o período fundamental do sinal avaliado (KASZTENNY *et al.*, 2000). Assim, baseando-se neste conceito, ao aplicar os devidos atrasos nos valores instantâneos dos sinais monitorados, (2.3) pode ser reescrita como:

$$i_0(t) = \frac{1}{3} [i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)], \quad (2.4)$$

$$i_1(t) = \frac{1}{3} \left[ i_a(t) + i_b\left(t - \frac{2T}{3}\right) + i_c\left(t - \frac{T}{3}\right) \right], \quad (2.5)$$

$$i_2(t) = \frac{1}{3} \left[ i_a(t) + i_b\left(t - \frac{T}{3}\right) + i_c\left(t - \frac{2T}{3}\right) \right], \quad (2.6)$$

sendo  $i_0$ ,  $i_1$  e  $i_2$  os valores instantâneos das correntes de sequência zero, positiva e negativa obtidas no domínio do tempo.

O comportamento das componentes de sequência em casos de curtos-circuitos é bastante estudado e explorado na área de proteção (ANDERSON, 1999). Neste contexto, sabe-se que dentre os 10 tipos de faltas tradicionais (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC),

enquanto a sequência positiva existe para todos os tipos, a corrente de sequência negativa existe para nove destes, exceto no caso do curto-circuito simétrico ABC.

Embora a sequência positiva seja uma grandeza de conveniente utilização (pois existe para todos os tipos de falta), esta é afetada pelo carregamento do sistema, o que pode comprometer o desempenho da proteção em diversos cenários de falta (MOLAS, 2014). Por isso, a sequência negativa se destaca como uma grandeza de grande utilidade para detecção de curtos-circuitos em situações severas de faltas com alta resistência ou em situações de carregamento pesado. De fato, a sequência negativa apresenta uma sensibilidade teórica infinita, visto que a distribuição das correntes  $i_2$  nos terminais da linha depende apenas das impedâncias do próprio sistema (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010), sendo idealmente imune aos efeitos dos parâmetros de falta e de carregamento. Assim, com o objetivo de obter um sinal que viabilize uma proteção PC com boa sensibilidade e que exista para todos os tipos de falta, Kasztenny *et al.* (2006) implementaram a função PC utilizando uma grandeza de sequência mista, composta de informações da sequência negativa e positiva simultaneamente, chamada neste trabalho de corrente mista  $i_{12}(t)$ , a qual é calculada através da expressão:

$$i_{12}(t) = i_2(t) - K \cdot i_1(t), \quad (2.7)$$

onde  $K$  é o fator correspondente à parcela de sequência positiva do sinal misto que, tipicamente, assume o valor  $K = 0,2$  (KASZTENNY *et al.*, 2006; HINGE; DAMBHARE, 2015; LEITE JR. *et al.*, 2016a).

Embora  $i_{12}$  venha sendo utilizada há anos como sinal de entrada da proteção PC (YAOZHONG *et al.*, 1991), alguns problemas ainda devem ser solucionados no que se refere aos efeitos das características de falta e de carregamento. De fato, sabe-se que a sensibilidade da proteção PC baseada nas correntes mistas é reduzida em casos de elevado carregamento no sistema ou de alta resistência de falta, se comparada à componente de sequência negativa. Esse problema pode ser minimizado reduzindo o valor de  $K$ , o qual determina a parcela de sequência positiva presente no sinal misto. Entretanto, tal ajuste poderia resultar em problemas de sensibilidade da proteção em casos de faltas simétricas, visto que restaria predominantemente o conteúdo da sequência negativa, a qual não existe para faltas ABC. Outro problema a ser reportado é que a componente de sequência mista também é afetada pela corrente capacitiva da LT, principalmente em linhas longas de extra alta tensão, conforme reportado em Yaozhong

*et al.* (1991). Assim, soluções para remoção do efeito capacitivo das LTs também têm sido reportadas.

Ainda sobre as componentes de sequência, cabe ressaltar que ao utilizá-las na implementação da função PC, perde-se a seletividade de fases, o que impossibilita a sua aplicação em esquemas de abertura monopolar dos disjuntores (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Esse tema voltará a ser abordado quando da avaliação das versões adaptadas da função PC nos próximos capítulos.

## 2.3 FONTES DE ERROS TRADICIONAIS DA FUNÇÃO PC

Nas diferentes abordagens da função PC, sejam elas baseadas na análise no domínio da frequência ou no domínio do tempo, busca-se sempre contornar as possíveis fontes de erro para que a proteção seja segura o suficiente em condições adversas de falta. Conforme mencionado anteriormente, sabe-se também que o efeito capacitivo da linha causa uma defasagem entre as correntes local e remota monitoradas, o que pode influenciar no processo de detecção de faltas via proteção PC. No entanto, além do efeito capacitivo da LT e dos parâmetros de falta, existem outras possíveis fontes de erro, tais como a componente CC de decaimento exponencial, saturação de TCs e características operacionais do sistema elétrico monitorado, como carregamento e SIR, do inglês, *Source Impedance Ratios*. Nesta seção serão apresentados os conceitos fundamentais dessas fontes de erro tradicionais, dando o embasamento devido para o entendimento das adaptações aplicadas na função PC que serão avaliadas.

### 2.3.1 Corrente Capacitiva

A existência da corrente capacitiva causa uma mudança de fase nas correntes medidas nos terminais da LT, afetando o princípio da comparação de fases. Por essa razão, as correntes capacitivas podem sensibilizar os algoritmos mesmo sem a ocorrência de faltas em condições de baixos valores de carregamento (LEITE JR. *et al.*, 2016b), pois são observadas como correntes entrando na LT.

Para as aplicações em algoritmos de proteção baseados em grandezas fasoriais, a corrente capacitiva que flui pela linha de transmissão em cada um dos terminais é calcula como (HINGE;

DAMBHARE, 2015; XUE *et al.*, 2012; LEITE JR. *et al.*, 2016a):

$$\widehat{I}_{x,cap} = j \frac{B}{2} \widehat{V}_x, \quad (2.8)$$

onde  $\widehat{I}_{x,cap}$  e  $\widehat{V}_x$  são os fasores fundamentais da corrente capacitiva e da tensão em um dado terminal  $x$ , respectivamente,  $B$  é a matriz de admitâncias da linha e  $j = \sqrt{-1}$ .

Assumindo a modelagem da LT por meio do modelo  $\pi$ -nominal (GLOVER *et al.*, 2012), conforme ilustrado na Figura 2.6, as correntes sem o efeito capacitivo são idealmente calculadas usando (DAMBHARE *et al.*, 2009):

$$\widehat{I}_{x,s} = \widehat{I}_x - \widehat{I}_{x,cap}, \quad (2.9)$$

onde  $\widehat{I}_x$  e  $\widehat{I}_{x,s}$  são os fasores fundamentais das correntes medidas e das correntes sem o efeito capacitivo em um dado terminal  $x$  da LT, respectivamente.

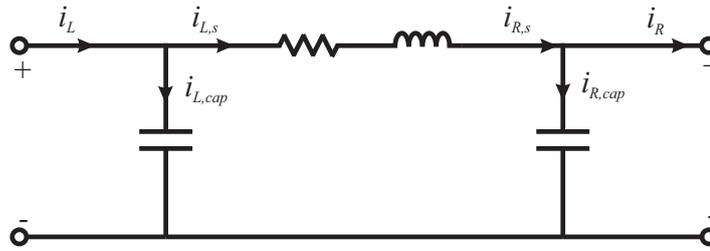


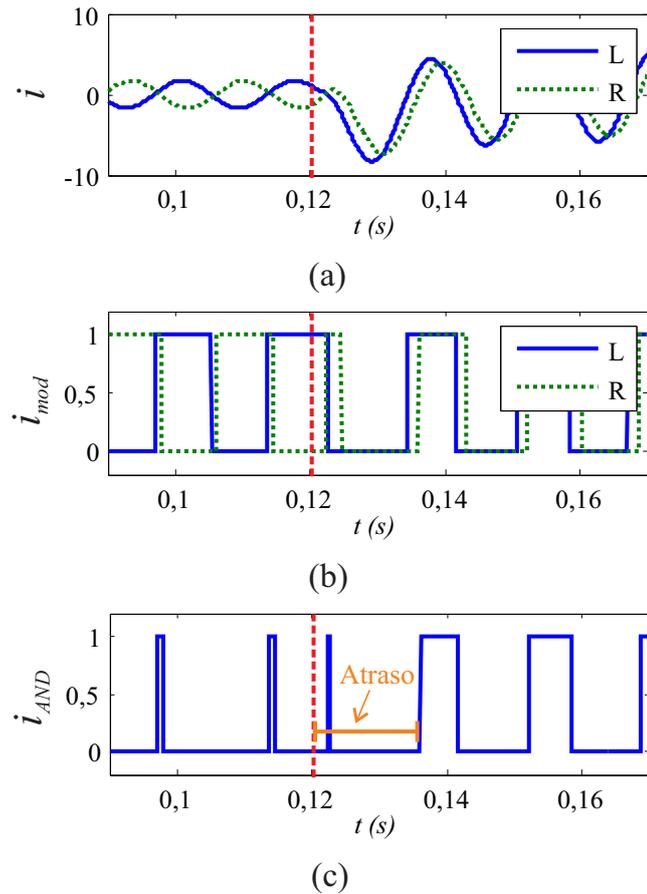
Figura 2.6. Circuito  $\pi$ -nominal para LTs.

### 2.3.2 Ângulo de Incidência e Componente CC de Decaimento Exponencial

O ângulo de incidência de curtos-circuitos consiste em uma característica determinante para os transitórios nos primeiros instantes do distúrbio. A depender do ângulo de incidência, o teor de componentes de alta frequência nos sinais monitorados pode aumentar ou diminuir, assim como a amplitude da componente CC de decaimento exponencial verificada (ANDERSON, 1999).

Do exposto sobre os fundamentos da proteção PC no domínio do tempo, percebe-se que em casos de faltas com ângulos de incidência que resultem em sinais de corrente com polaridade inicialmente negativa, a atuação da função PC pode apresentar atrasos, visto que, para essas polaridades, os sinais modulados assumem valores nulos, bloqueando a contagem dos contadores na sua lógica de *trip*. Esse efeito, pode ser ainda mais adverso se considerada a presença

de uma componente CC de decaimento exponencial de elevada amplitude, visto que os sinais monitorados permaneceriam ainda mais tempo com polaridades negativas, restringindo a operação da função PC (LOPES *et al.*, 2016). De fato, segundo Guo *et al.* (2003a), a presença da componente CC de decaimento exponencial nos sinais de corrente pode ocasionar desvios da ordem de 20% nos seus valores reais de amplitude, fato este que evidencia a necessidade de adaptações que minimizem os efeitos de tal fonte de erros.



**Figura 2.7.** Atraso imposto pela componente CC de decaimento exponencial negativa: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta *AND*.

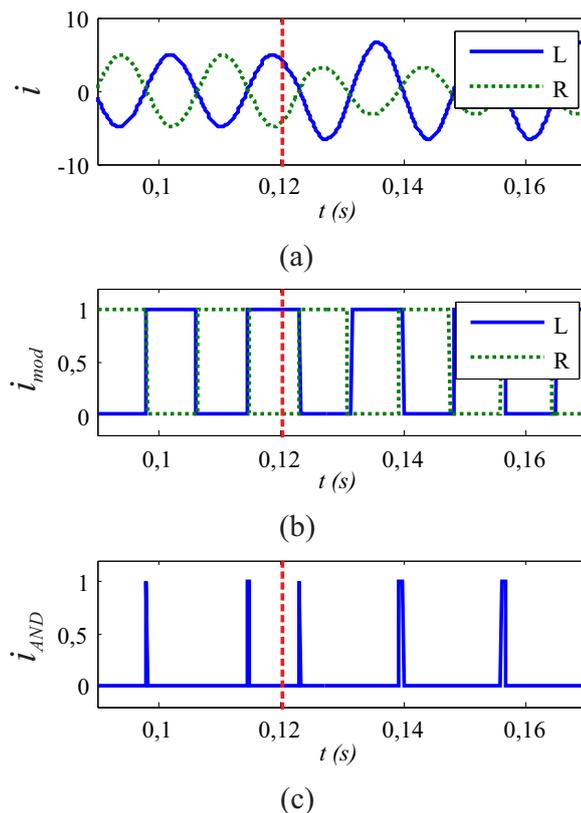
Na Figura 2.7, ilustra-se um caso de falta com ângulo de incidência  $180^\circ$ , que resulta em uma componente CC de decaimento exponencial com polaridade negativa. Observa-se que, por permanecer com polaridade negativa nos primeiros instantes de falta, não são gerados pulsos largos na saída da porta *AND* após a incidência do curto-circuito, resultando em um atraso na atuação da proteção superior a um quarto de ciclo. Para o exemplo ilustrado, percebe-se da Figura 2.7 que as correntes só terão valores positivos mais de meio ciclo após a incidência da falta, fato este que vai de encontro aos interesses de redução do tempo de atuação das proteções.

Obviamente, mesmo quando da não existência da componente CC de decaimento exponencial, as correntes podem ainda assumir valores negativos no início do curto-circuito, o que também promove um atraso na proteção PC em suas versões tradicionais. Neste caso, é importante frisar que a fonte de erros não estaria mais relacionada à componente CC de decaimento exponencial, mas sim, apenas ao ângulo de incidência da falta.

### 2.3.3 *Outfeed*

Durante um curto-circuito em uma LT, a depender do carregamento do sistema, existe a possibilidade de ocorrência de um fenômeno chamado de *outfeed*. Nestes casos, uma das correntes cujo comportamento esperado seria o de estar entrando na LT se encontra, na verdade, saindo, inibindo a atuação da proteção que enxerga o curto-circuito como sendo externo (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Essa condição é observada em casos de elevado carregamento e baixa contribuição de curto-circuito no terminal da LT no qual a corrente de carga e de falta possuem direções opostas. Neste cenário, sabe-se que a baixa contribuição de curto-circuito pode ocorrer em situações de elevada resistência de falta, fontes fracas ou pela combinação desses fatores (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010), evidenciando o efeito combinado das características do sistema e da falta.

Na Figura 2.8(a), ilustra-se a aplicação da função PC em uma situação de *outfeed* para um sistema no qual a corrente de carga flui do terminal L para o terminal R. Para o exemplo, observa-se que o valor da corrente  $i_L$  aumenta após a incidência da falta, não apresentando inversão de seu sentido, conforme esperado, visto que as correntes de contribuição de falta e a corrente de carga estão na mesma direção. No entanto, a corrente medida no terminal remoto  $i_R$  apresenta um afundamento em sua amplitude, devido à interação da corrente de carga com a contribuição de curto-circuito, as quais possuem direções opostas. Para este terminal, não é observada a inversão do sentido de  $i_R$ , evidenciando uma situação de *outfeed*. Como consequência, as correntes não ficam em fase durante o curto-circuito, resultando em pulsos estreitos na saída da porta lógica *AND*, os quais não promovem uma contagem suficiente dos contadores para identificar a condição de falta interna à LT monitorada.

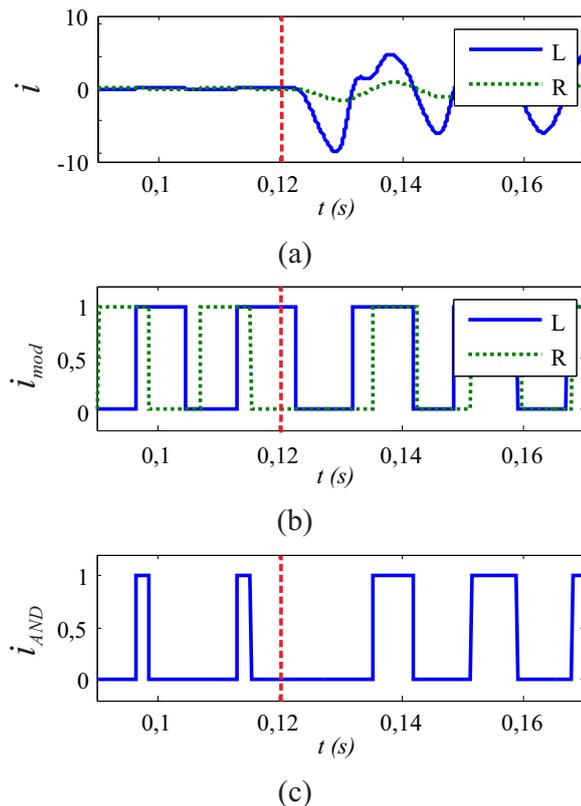


**Figura 2.8.** Função PC durante um caso de *outfeed*: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta *AND*.

### 2.3.4 Saturação de TC

Dentre as fontes de erro tradicionais das funções de proteção que utilizam medições de corrente, destaca-se a saturação dos TCs. Tal fenômeno ocorre quando o TC sai da região linear de sua característica de magnetização, seja por elevada corrente primária ou por elevada componente CC de decaimento exponencial (PAITHANKAR; BHIDE, 2007). A Figura 2.9 ilustra a influência da saturação do TC sobre a proteção PC.

No caso ilustrado, os parâmetros da simulação foram configurados para favorecer a ocorrência de saturação do TC no terminal L. Cabe destacar que as correntes medidas apresentadas na figura são referentes aos sinais de saída do circuito de aquisição de dados modelado, o qual é composto por filtros anti-aliasing e conversores analógico-digital. Observa-se que a forma de onda da corrente no terminal L apresenta deformação, o que, a princípio, poderia afetar a proteção PC. Porém, nota-se ainda que a polaridade dos valores instantâneos dos sinais monitorados permanecem inalterados durante a saturação (ver Figura 2.9(c)), não afetando significativamente o desempenho da função PC.



**Figura 2.9.** Função PC durante um caso de saturação de TC: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta *AND*.

Sabe-se que outros problemas podem afetar o princípio da proteção PC, a exemplo de erros de sincronismo e erros de medição. Porém, nesse trabalho, optou-se por avaliar as fontes de erro relacionadas apenas às características de falta e do sistema monitorado. De fato, a partir dessas fontes de erro, soluções têm sido reportadas na literatura ao longo dos anos para fins de melhorar o desempenho da função PC aplicada no domínio do tempo e da frequência, conforme evidenciado na revisão bibliográfica apresentada no capítulo a seguir.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de melhor entender a evolução da função PC e de outras funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, apresenta-se neste capítulo uma revisão bibliográfica de vários trabalhos reportados na literatura relacionados ao tema. Para tanto, as funções de proteção aplicadas no domínio do tempo são contextualizadas historicamente, destacando-se a evolução de algumas dessas funções ao longo dos anos e informações que serão úteis para o entendimento das adaptações avaliadas nos capítulos seguintes.

O princípio básico da proteção de LTs por comparação de fases é conhecido desde o final da década de 1920 (FITZGERALD, 1928). Por sua simplicidade, a função PC se mostrou adequada para os dispositivos de proteção antigos, os quais requeriam a utilização de técnicas simples, sem ajustes em demasia. Em Fitzgerald (1928), por exemplo, as potencialidades da proteção PC já eram reportadas, com aplicabilidade comprovada por meio de testes em sistemas reais. Entretanto, dentre as limitações da época, destacava-se o custo dos dispositivos de medição necessários para monitoração das correntes nas três fases da rede elétrica, bem como do sistema de comunicação, o qual era baseado predominantemente no *Power Line Carrier* (PLC).

Com o objetivo de utilizar os princípios da função PC de forma mais econômica, Halman *et al.* (1944) apresentaram uma adaptação da abordagem descrita em Fitzgerald (1928). Basicamente, Halman *et al.* (1944) propuseram o uso de componentes simétricas no processo de comparação de fases com o objetivo de reduzir o número de relés em cada terminal da linha. Procedendo desta forma, os seis relés necessários originalmente para monitorar as correntes nos dois terminais de uma LT trifásica foram substituídos por apenas dois relés, sem grandes alterações na sensibilidade da proteção e com custo reduzido (HALMAN *et al.*, 1944). Entretanto, da literatura, sabe-se que o uso de componentes simétricas limita a seletividade de fases em sistemas com abertura monopolar de disjuntores, pois, em sua forma clássica, a análise de componentes de sequência não permite a distinção da fase com defeito.

---

Até então, devido às questões econômicas relacionadas ao custo dos relés, a mescla de diferentes algoritmos em um único dispositivo não era algo trivial, limitando o uso de componentes de fase e de sequência simultaneamente. Neste contexto, pode-se dizer que, historicamente, a evolução dos algoritmos de proteção esteve atrelada aos avanços tecnológicos verificados nos relés de proteção, de forma que, a cada avanço alcançado, mais possibilidades surgiam em termos de funções de proteção, motivando o desenvolvimento de soluções mais sofisticadas e seguras ao longo dos anos.

No final da década de 1940, os princípios de funcionamento dos transistores foram apresentados por Shockley (1949). Desde então, notou-se um crescente interesse na aplicação de transistores em equipamentos elétricos e, especialmente, em relés de proteção. A utilização de transistores nos relés, os quais passaram a ser denominados eletrostáticos, ou seja, sem partes móveis, possibilitou o advento de um dispositivo confiável e mais econômico. Em Dewey & Hodges (1960), por exemplo, apresenta-se uma nova aplicação dos princípios de comparação de fase utilizando relés transistorizados. Embora os autores tenham comprovado melhorias no desempenho da proteção, ainda existiam limitações em termos do número de algoritmos implementados em um único dispositivo, o que impossibilitava a aplicação de esquemas de proteção mais sofisticados.

Após o advento dos relés eletrostáticos, surgiram então pesquisas focadas no desenvolvimento de computadores digitais capazes de realizar cálculos mais complexos, de forma mais rápida e confiável (COURY *et al.*, 2007). Já na década de 1980, as primeiras aplicações de relés digitais para proteção de sistemas elétricos foram reportadas (PHADKE; THORP, 2009). Em Akimoto *et al.* (1981), por exemplo, apresenta-se a aplicação de dois diferentes tipos de relés digitais para proteção de LTs em operação no Japão, na cidade de Tóquio, sendo um baseado em proteção diferencial e outro baseado em elementos de distância. Desde então, analisando a literatura, nota-se que a utilização da função PC perdeu força no mercado, visto que outras funções mais sofisticadas se tornaram viáveis a partir do uso dos relés microprocessados. Assim, os relés de proteção diferencial e de distância se tornaram os dispositivos mais utilizados na proteção de LTs, sendo seguidos por outras funções auxiliares, como a de sobrecorrente (ANDERSON, 1999).

Uma vez atingida uma maturidade satisfatória da tecnologia dos relés digitais, outros mar-

cos tecnológicos vieram a ser decisivos na evolução dos sistemas de proteção, influenciando diretamente no formato dos esquemas hoje em operação. Em Sun & Ray (1983), por exemplo, apresenta-se o uso da fibra ótica em um esquema de proteção diferencial como alternativa viável para os canais de comunicação, substituindo os cabos pilotos. No referido trabalho, apresentam-se as vantagens da imunidade da fibra ótica em relação às interferências eletromagnéticas que podem existir devido aos transitórios induzidos no momento da incidência de faltas ou em casos de descargas atmosféricas (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Assim, com esses avanços, as pesquisas na área de proteção diferencial também se destacaram, pouco se falando sobre a proteção PC nos anos seguintes. Entretanto, ao longo dos últimos anos e com uma maior evolução dos relés microprocessados e sistemas de comunicação, os fabricantes de relés de proteção passaram a reavaliar a utilização de técnicas até então consideradas ultrapassadas, a exemplo da função PC, bem como a possibilidade do emprego de algoritmos mais sofisticados que tiveram aplicação descartada no passado devido a limitações tecnológicas, a exemplo das funções baseadas na análise de elementos incrementais e na teoria das ondas viajantes.

Diante do exposto até então, cabe ressaltar que, na busca por meios de facilitar os ajustes dos dispositivos de proteção e evitar atuações indevidas decorrentes de ajustes imprecisos, técnicas reconhecidamente confiáveis e com um número reduzido de ajustes, a exemplo da função PC, renasceram para o mercado, agora em suas versões digitais implementadas em relés microprocessados. Isso atraiu atenção de concessionárias e pesquisadores, culminando em um aumento relevante de publicações relacionadas à proteção PC nas últimas duas décadas, fato este que figura dentre as principais motivações desta dissertação.

Yaozhong *et al.* (1991) apresentam o desempenho da proteção PC utilizando como sinais de entrada as componentes incrementais de sequência positiva e de fase no domínio da frequência. Cabe ressaltar que, antes dos relés digitais, existia uma grande dificuldade para o cálculo das grandezas incrementais, muito embora se saiba que alguns poucos relés já faziam o uso dessas grandezas, apresentando desempenhos satisfatórios. Dentre esses dispositivos, destaca-se o relé ABB RALDA (ABB RK 617-300 E, 1985), o qual continha funções de proteção direcional. Assim, aliando as potencialidades dos relés microprocessados com as conclusões técnicas obtidas em décadas passadas sobre o desempenho da função PC, Yaozhong *et al.* (1991) constataram que o uso de grandezas incrementais poderia ser benéfico para a função PC, resolvendo problemas

tradicionais, como o de perda de sensibilidade em condições de elevado carregamento.

Em 1998, a empresa Asea Brown Boveri (ABB) lançou o relé REL 352 *Numerical Phase Comparison Transmission Line Protection System*. A aplicação desse relé era indicada inicialmente para linhas curtas e existia a possibilidade de utilizá-lo em situações tipicamente consideradas adversas para a proteção de distância, a exemplo de linhas com ramificações. Porém, além de utilizar grandezas de sequência, o relé REL 352 ainda apresentava um algoritmo opcional para compensação do efeito capacitivo da LT no domínio da frequência (ABB 40-201.9B, 1998), viabilizando a sua aplicação também em linhas longas. Tal fato merece destaque, visto que se relaciona com a problemática da corrente capacitiva das LTs (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010), conforme mencionado no capítulo anterior.

Passados alguns anos, a função PC ressurgiu como uma função promissora, especialmente pelo fato dos relés microprocessados permitirem a inclusão de rotinas auxiliares capazes de melhorar o desempenho da referida proteção. Em Kasztenny *et al.* (2006), trabalho este intitulado "*Rebirth of the phase comparison line protection principle*", apresenta-se um estudo detalhado da aplicação da proteção PC no domínio do tempo, apresentando a robustez da função em condições reconhecidamente problemáticas para as funções de proteção tradicionais. Cabe ressaltar que a aplicação no domínio do tempo da função PC esteve de acordo com as tendências dos últimos anos, nas quais o desenvolvimento de funções independentes da estimação de fasores se mostrou interessante no que se refere ao aumento das margens de estabilidade das redes elétricas modernas.

Ainda em Kasztenny *et al.* (2006), demonstra-se que, em condições de saturação de TC, a segurança da função PC no domínio do tempo não é comprometida, visto que, mesmo durante a saturação, as polaridades dos valores instantâneos das correntes não apresentam variações significativas. Além disso, Kasztenny *et al.* (2006) também demonstram que o uso de componentes simétricas, especialmente a sequência negativa, torna o algoritmo robusto às condições de *outfeed*, de modo que propõe o uso tanto de componentes de fase quanto de componentes de sequência na lógica de operação da função PC.

Em 2005, a General Electric (GE), juntamente com a Alstom Grid, apresentou o relé de proteção de linhas *Multilin L60 Line Phase Comparison System*, o qual possui como parte principal da lógica de proteção esquemas que utilizam os princípios da comparação de fases,

empregando a análise tanto de fasores fundamentais quanto de valores instantâneos dos sinais (GEK-113029, 2005). Adicionalmente, Hinge & Dambhare (2015) apresentaram um estudo da função PC baseada na análise de fasores fundamentais, incluindo a avaliação das melhorias impostas pela correção da corrente capacitiva. Motivados pelo ressurgimento da função PC como uma proteção promissora, LEITE JR. *et al.* (2016a) apresentaram uma análise de sensibilidade paramétrica da função PC baseada em fasores fundamentais, incluindo o estudo dos benefícios da remoção do efeito capacitivo e do uso de componentes simétricas. Além disso, LEITE JR. *et al.* (2016a) apresentaram análises que permitem a identificação dos limites de sensibilidade da função PC para diversos cenários de falta, o que facilita a identificação das potencialidades e limitações da referida proteção.

Analisando os trabalhos mencionados até então, observa-se que os interesses gerais ao longo dos anos estiveram voltados predominantemente para a adaptação da função PC no sentido de se obter uma maior segurança, porém mantendo a simplicidade do algoritmo. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, paralelamente, a busca por algoritmos rápidos de proteção sempre esteve dentre os objetivos dos desenvolvedores, embora não tenha sido abordada por muito tempo em decorrência de limitações dos processadores dos relés microprocessados. Assim, com o advento da tecnologia digital, a implementação de algoritmos de proteção rápidos se tornou viável, o que tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas aplicadas no domínio do tempo. De fato, usando algoritmos mais rápidos, as faltas são isoladas mais rapidamente, reduzindo os riscos de perda de estabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Da literatura, sabe-se que as funções de proteção tradicionais se baseiam na análise de fasores fundamentais, os quais são estimados a partir do processamento digital de conjuntos de amostras contidas em janelas de dados com tamanhos que variam normalmente de 1 a 1,5 ciclo fundamental (SCHWEITZER; D., 1993). Por isso, a maioria dos dispositivos de proteção baseados em componentes fundamentais possui um atraso intrínseco, visto que os fasores estimados só apresentam valores corretos após o período de transição da janela de dados, ou seja, quando esta se encontra totalmente no período de falta (SCHWEITZER *et al.*, 2015a; GUO *et al.*, 2003b).

Por não dependerem do processo de estimação de fasores, funções de proteção aplicadas no domínio do tempo têm ganhado espaço no mercado de relés microprocessados, despertando

---

o interesse tanto das concessionárias quanto da comunidade científica. Em 2015, a empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) apresentou o trabalho intitulado "*Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations?*", no qual são discutidas algumas aplicações de proteção no domínio do tempo (SCHWEITZER *et al.*, 2015a). No trabalho, apresentam-se algoritmos capazes de obter informações relevantes sobre o curto-circuito a partir da análise dos sinais transitórios de corrente e tensão, bem como de suas componentes incrementais, tornando possível a detecção de faltas sem a necessidade de estimar os fasores fundamentais do sistema. Como consequência, torna-se possível obter tempos médios de atuação na ordem de 1 a 4 ms, a depender da função utilizada. Observa-se também que os princípios das proteções de distância, direcional e diferencial são aplicados por meio de técnicas baseadas na análise de valores instantâneos dos sinais medidos, eliminando o processo de estimação de fasores, conforme mencionado anteriormente.

Ainda em Schweitzer *et al.* (2015a), apresenta-se o uso da corrente réplica, que é uma combinação da corrente incremental instantânea e a sua derivada. Este cálculo é equivalente à aplicação do filtro mímico digital reportado em Benmouyal (1995). Neste contexto, cabe ressaltar o impacto da componente CC de decaimento exponencial sobre os algoritmos de proteção (PHADKE *et al.*, 1976), a qual consiste em uma fonte de erros típica. Assim, usando a corrente réplica, elimina-se parcialmente o efeito da componente CC de decaimento exponencial, tornando as atuações da proteção mais seguras (SCHWEITZER *et al.*, 2015a).

Em Schweitzer *et al.* (2015b), apresentam-se funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, as quais consistem em versões melhoradas de alguns dos algoritmos descritos em Schweitzer *et al.* (2015a). Nota-se mais uma vez a utilização de grandezas incrementais e de conceitos relacionados às ondas viajantes para detecção de curtos-circuitos, resultando em tempos de atuação da ordem de poucos milissegundos. As funções baseadas em elementos direcional TD32 e de distância TD21 são funções baseadas na análise grandezas incrementais calculadas no domínio do tempo e, segundo o fabricante, possuem tempos médios de atuação de aproximadamente 4 ms. As funções baseadas na teoria das ondas viajantes, mais especificamente a direcional TW32 e a diferencial TW87 são aplicadas por meio da análise de sinais digitalizados a uma frequência de amostragem de 1 MHz, apresentando atuações em tempos médios da ordem de 1 ms. Comparadas com as suas versões equivalentes no domínio da frequência, as

funções descritas em Schweitzer *et al.* (2015b) apresentam tempos de atuação muito menores, o que resulta no aumento das margens de estabilidade dos sistemas nos quais são aplicadas. Por isso, devido ao interesse crescente das concessionárias por atuações rápidas e seguras, em 2016, a empresa SEL lançou o relé SEL-T400L, o qual foi desenvolvido para promover proteção de LTs no domínio do tempo com tempos de *trip* de poucos milissegundos (SEL-T400L DATA SHEET, 2016). Dentre as funções disponíveis no relé, destacam-se as já comentadas TD21, TD32, TW32 e TW87, além de funções de localização de faltas baseadas na teoria das ondas viajantes (SEL-T400L DATA SHEET, 2016).

De uma forma geral, do exposto em Schweitzer *et al.* (2015b) sobre o relé T400L, é importante frisar que as funções necessitam de alguns ajustes, os quais, embora em número reduzido, requerem a devida atenção dos projetistas para evitar atuações indevidas. Assim, cabe frisar que a simplicidade dos algoritmos tem sido tratada como um ponto crucial nos sistemas modernos, visto que facilita a aplicação das funções em redes elétricas reais, eliminando a necessidade de estudos elétricos minuciosos para cálculo dos ajustes.

Em Lopes *et al.* (2016), apresenta-se um estudo comparativo entre a versão clássica da função PC implementada com elementos de fase e a função TD32 quando aplicada em conjunto com o esquema POTT. Ambos os esquemas de proteção promovem a proteção unitária de LTs e foram avaliados sob diversos cenários de falta. Observou-se que o elemento direcional TD32 apresentou menores tempos de operação, especialmente em casos de *outfeed*. Tal desempenho se deve principalmente ao fato da função TD32 se basear em elementos incrementais, os quais são idealmente imunes ao carregamento do sistema. Motivados por esse resultado, LEITE JR. *et al.* (2016b) apresentaram uma análise comparativa de aplicações no domínio do tempo da função PC quando utilizados como entradas elementos de fase, elementos de sequência positiva, negativa em mista, bem como elementos incrementais de fase. Dos resultados apresentados, comprova-se que os elementos incrementais de fase promovem uma boa sensibilidade da função PC, sendo esta comparável à dos elementos de sequência negativa, porém mantendo a seletividade de fases, a qual é perdida quando utilizadas componentes simétricas.

De um modo geral, com base na evolução tecnológica da função PC aplicada no domínio do tempo, percebe-se que ainda existem desafios a serem superados, dando margem para possíveis melhorias na função PC para fins de torná-la mais segura, confiável e mais rápida. Nota-se que

as adaptações reportadas na literatura são relativamente simples, demonstrando a tendência de se manter a simplicidade dos algoritmos em termos de implementação e ajustes, porém melhorando o desempenho. Por isso, motivados por estas constatações, busca-se nesta dissertação de mestrado dar continuidade ao estudo de adaptações da função PC, avaliando soluções antigas e propondo outras para fins de identificação das vantagens e desvantagens de cada uma delas. Para tanto, o estudo é iniciado com o entendimento do desempenho das versões clássicas da função PC baseadas em elementos de fase e de sequência, com e sem correção do efeito capacitivo da LT, frente a diferentes cenários de curto-circuito e de operação do sistema monitorado, conforme abordado no capítulo a seguir.

## CAPÍTULO 4

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FUNÇÃO PC BASEADA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

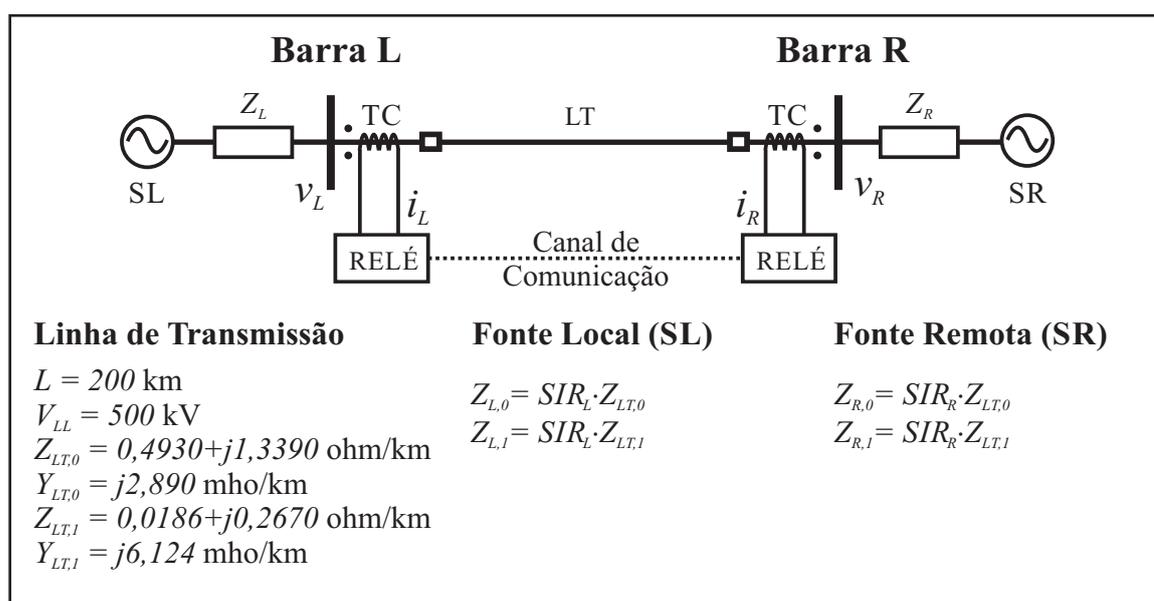
Conforme mencionado nos capítulos anteriores, as versões clássicas da função PC consistem na aplicação do conceito de comparação de fases em elementos de fase e de sequência positiva, negativa e mista no domínio da frequência. O entendimento do desempenho dessas versões é, por sua vez, crucial para a compreensão de adaptações propostas no passado para a função PC, bem como para o desenvolvimento de novas soluções.

Visando analisar o desempenho das versões clássicas supracitadas, avalia-se neste capítulo o comportamento da proteção PC por meio de simulações no ATP em regime permanente de falta, as quais emulam a aplicação da referida proteção quando baseada na análise de fasores fundamentais. Assim, torna-se possível verificar a defasagem assumida pelas correntes nos terminais da LT, isentando as análises da influência dos efeitos transitórios normalmente verificados nos primeiros instantes de falta. Obviamente, esses efeitos transitórios existirão para uma aplicação no domínio do tempo e, por isso, também serão considerados nas análises apresentadas no próximo capítulo. Entretanto, neste momento, o intuito é identificar os limites de sensibilidade da proteção PC tradicional, os quais servirão como referência durante a avaliação de possíveis adaptações da função PC aplicada no domínio do tempo.

Para as análises deste capítulo, considerou-se a aplicação da função PC no domínio da frequência com e sem a remoção do efeito capacitivo (ver Capítulo 2), a qual consiste em uma adaptação consolidada para aplicações baseadas na análise de fasores fundamentais. Incluindo essa análise, torna-se possível avaliar a influência do efeito capacitivo sobre a função PC durante o regime permanente de falta, viabilizando um melhor entendimento do desempenho do algoritmo utilizado para correção da corrente capacitiva aplicada no domínio do tempo a ser avaliado posteriormente.

## 4.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA AVALIADO

Nos testes em regime permanente realizados, considerou-se uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz operando em diversas situações de curtos-circuitos internos. Para essas análises, simulou-se no ATP o sistema elétrico ilustrado na Figura 4.1, considerando como sinais de entrada os fasores fundamentais de tensão e corrente calculados com base nas amostras das grandezas elétricas obtidas das simulações no ATP.



**Figura 4.1.** Sistema elétrico de potência considerado nas simulações via ATP.

No sistema ilustrado na Figura 4.1, os equivalentes de Thévenin local e remoto representam os sistemas elétricos conectados aos terminais da LT monitorada. As fontes de tensão são ideais e passíveis de ajuste para simulação de diferentes situações de carregamento. Adicionalmente, as impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin local e remoto também são ajustáveis, para fins de simulação de diferentes valores de SIR. A LT opera em 500 kV, possui 200 km de extensão e foi modelada como perfeitamente transposta a parâmetros distribuídos constantes na frequência (LEUVEN, 1987). Além disso, as medições de corrente e tensão foram tomadas de Transformadores de Corrente (TCs) e de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs), cujos modelos são reportados em IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004) e Pajuelo *et al.* (2008), respectivamente. Os parâmetros do sistema modelado são os mesmos apresentados em LEITE JR. *et al.* (2016a).

Para tornar as simulações mais realísticas no que se refere aos sistemas de aquisição de dados, foram considerados filtros *anti-aliasing* do tipo *Butterworth* passa-baixas de 3ª ordem com uma frequência de corte em 180 Hz. Cabe ressaltar que esses mesmos filtros serão utilizados durante a avaliação da função PC no domínio do tempo. No que se refere à utilização de canais de comunicação, é importante frisar que os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos sem considerar os atrasos impostos pelos sistemas de comunicação que viabilizam o intercâmbio de dados entre os dois terminais da linha monitorada. Na Tabela 4.1, apresentam-se os atrasos típicos de canais de comunicação baseados em fibra óptica em função do comprimento do canal utilizado (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Para se obter os tempos de atuação da proteção avaliada considerando o uso do canal de comunicação, basta adicionar os atrasos expostos na Tabela 4.1 aos tempos de *trip* calculados nesse trabalho.

**Tabela 4.1.** Atrasos dos canais de comunicação em função do comprimento do canal.

Comprimento do Canal	Atraso Típico para Canal de Fibra Óptica
1 km	4,9 $\mu s$
20 km	97,8 $\mu s$
50 km	244,6 $\mu s$
100 km	489,2 $\mu s$
250 km	1223 $\mu s$
500 km	2446 $\mu s$

## 4.2 CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO SIMULADAS

Dentre as diversas análises de regime permanente realizadas, apresentam-se os resultados obtidos para curtos-circuitos AT, viabilizando o estudo de todos os elementos de fase e de sequência avaliados. Em cada teste, variaram-se as características de curto-circuito e do sistema, tais como: localização da falta ( $d$ ), ângulo de incidência da falta ( $\theta$ ), resistência de falta ( $R_f$ ), força das fontes (simuladas variando o SIR do terminal remoto representado por  $SIR_R$ ) e carregamento do sistema, o qual é simulado por meio da variação da abertura angular  $\delta$  entre as barras L e R, assumindo a barra L com tensão igual a  $1\angle 0^\circ$  pu e a barra R com  $1\angle \delta$  pu.

No total, da combinação das variáveis supracitados, foram gerados e simulados 326 casos de faltas, através dos quais foi avaliada a influência de cada parâmetro em separado. Durante as simulações, considerou-se valor do SIR no terminal local igual a 0,1 e  $R_f \approx 0 \Omega$ , exceto para

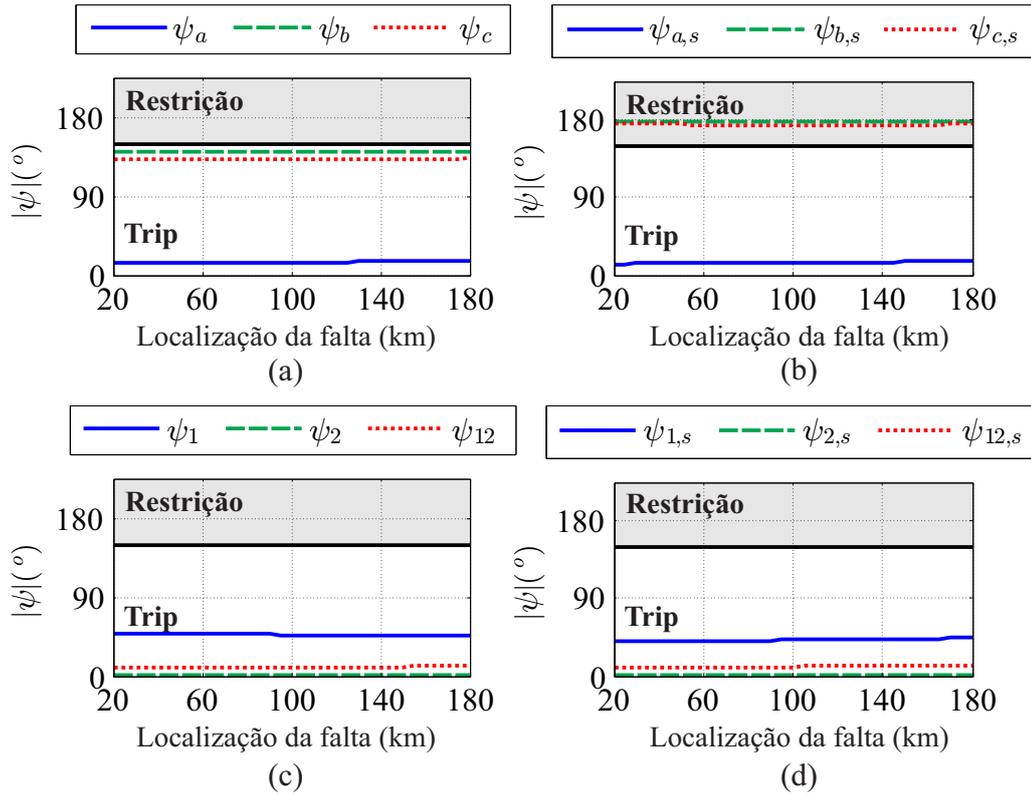
os casos de análise da influência da resistência de falta. Os resultados são apresentados em termos da diferença angular  $|\psi|$  em regime permanente de falta. Em cada cenário, o valor de  $|\psi|$  é comparado com o limiar da zona de restrição, o qual, conforme explicado no Capítulo 2, é dado por  $180^\circ - \theta_r$ , sendo  $\theta_r$  o ângulo de segurança. Nas simulações realizadas neste capítulo, considerou-se  $\theta_r = 30^\circ$ , resultando em um limiar de  $150^\circ$ , e a remoção do efeito capacitivo foi realizada conforme a Equação (2.9).

#### 4.2.1 Influência da Localização da Falta

Para analisar o desempenho da função PC para diferentes localizações de falta, o parâmetro  $d$  foi variado de 10% até 90% do comprimento da linha. Além disso, duas condições de carregamento foram consideradas,  $\delta = -5^\circ$  e  $\delta = -25^\circ$ , resultando em 66 cenários de faltas diferentes. Os valores de  $SIR_R = 0, 1$  e  $R_f = 0 \Omega$  permaneceram fixos em todos os casos.

Apresentam-se na Figura 4.2 os valores obtidos de  $|\psi|$  considerando  $\delta = -5^\circ$  para os elementos de fase e de sequência. Observa-se que a diferença angular apresenta um perfil uniforme que pouco varia para diferentes localizações da falta. Porém, sem a remoção do efeito capacitivo,  $|\psi_b|$  e  $|\psi_c|$  ficam na região de *trip*. Este comportamento é devido ao fato da corrente capacitiva da LT ser maior que a corrente de carregamento do sistema. Esse problema pode ser resolvido com a remoção do efeito capacitivo como pode ser visualizado na Figura 4.2(b). Além disso, elementos de sequência negativa e positiva, bem como o elemento misto, resultam na indicação correta da falta para todas as localizações simuladas.

Os resultados obtidos para  $\delta = -25^\circ$  são apresentados na Figura 4.3. Pode-se observar que, diferentemente dos comportamento verificado para  $\delta = -5^\circ$ , as fases sem falta permaneceram na região de restrição, independentemente da remoção do efeito capacitivo. Adicionalmente, conforme esperado, verifica-se que os elementos  $|\psi_a|$ ,  $|\psi_{a,s}|$  e todos os elementos de sequência permaneceram na região de *trip*, garantindo a atuação da proteção sem maiores problemas. Ainda assim, comparando com os resultados obtidos para  $\delta = -5^\circ$ , observa-se que houve uma maior aproximação dos elementos da fase com falta, do elemento de sequência positiva e do elemento misto em relação ao limiar da zona de restrição, evidenciando um indício de que, para carregamentos mais elevados, pode não haver a identificação da falta por meio desses elementos.

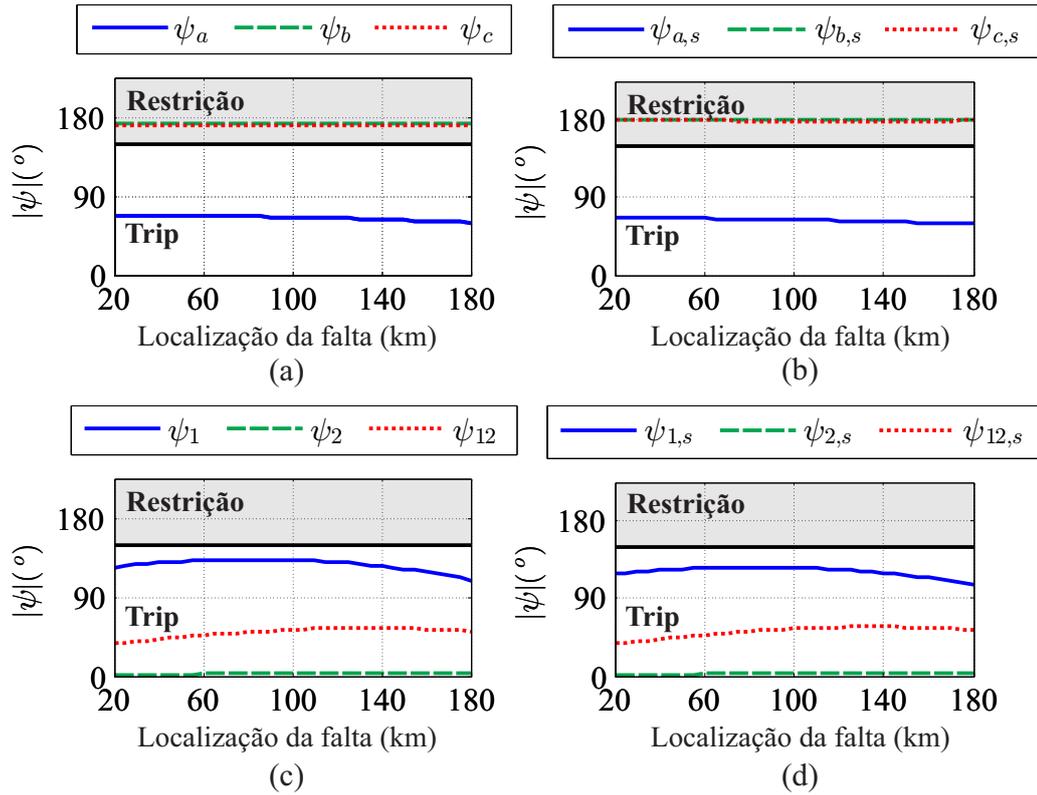


**Figura 4.2.** Influência de  $d$  para  $\delta = -5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

#### 4.2.2 Influência da Resistência de Falta

Para avaliar a influência da resistência de falta  $R_f$ , foram simulados 82 casos nos quais o valor de  $R_f$  foi variado de 0 (faltas francas) até 1000  $\Omega$ . Nas Figuras 4.4 e 4.5, apresentam-se os resultados obtidos considerando  $\delta = -25^\circ$  e  $\delta = -5^\circ$ , respectivamente. Os valores de  $SIR_R = 0, 1$  e  $d = 100$  km permaneceram fixos em todos os 82 casos simulados.

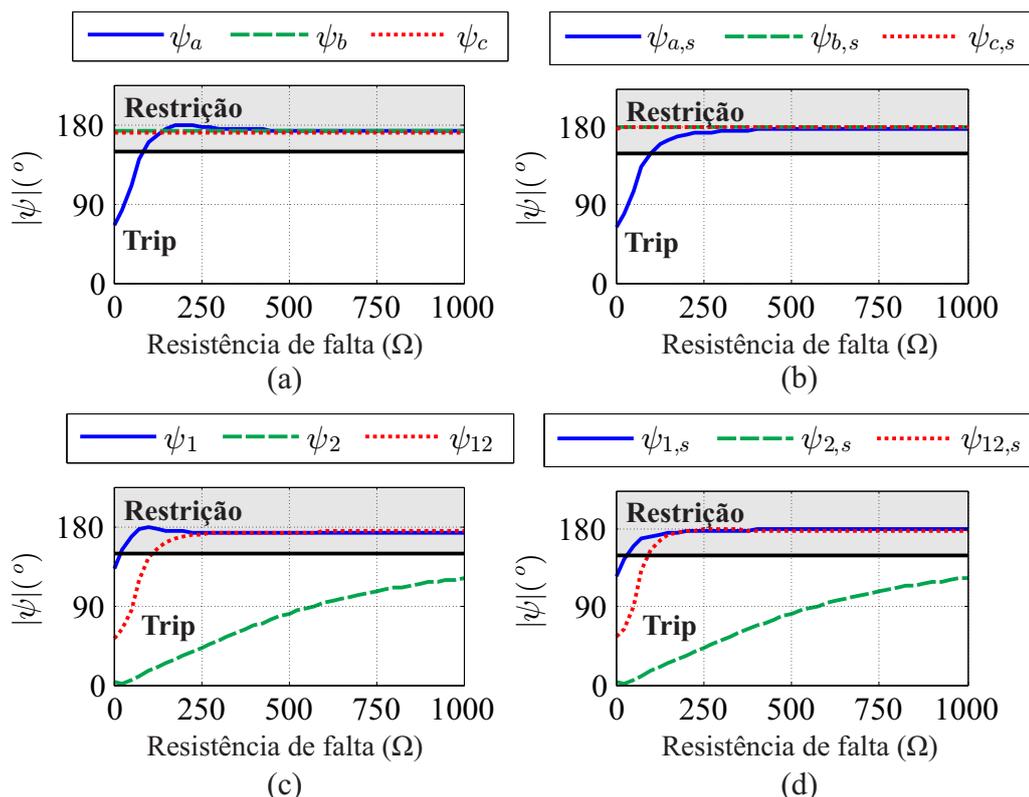
Para  $\delta = -25^\circ$ , as fases sãs permaneceram na região de restrição e apenas os elementos  $|\psi_a|$  e  $|\psi_{a,s}|$  detectaram a condição de falta para valores de  $R_f$  até  $\approx 100 \Omega$ , conforme evidenciado na Figura 4.4. Os elementos de sequência positiva  $|\psi_1|$  e  $|\psi_{1,s}|$  perderam a sensibilidade para  $R_f \approx 30 \Omega$ , e os elementos mistos,  $|\psi_{12}|$  e  $|\psi_{12,s}|$ , para  $R_f \approx 100 \Omega$ . Por outro lado, o elemento de sequência negativa demonstrou ser capaz de detectar corretamente a falta para todos os valores de  $R_f$  avaliados, corroborando com o conceito de sensibilidade teórica infinita mencionada no Capítulo 2. Neste caso, a remoção do efeito capacitivo da linha não resultou em uma melhoria



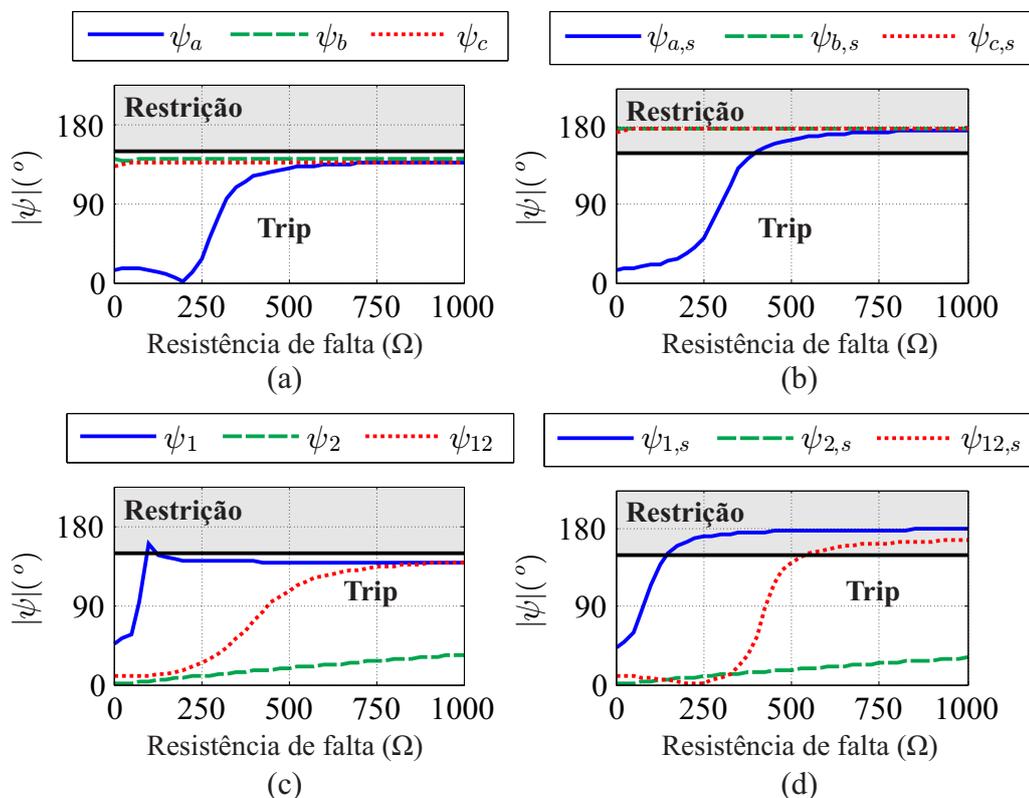
**Figura 4.3.** Influência de  $d$  para  $\delta = -25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

significativa no desempenho da função PC. Por outro lado, para  $\delta = -5^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 4.5, o efeito da corrente capacitiva no desempenho da função PC foi mais evidente, o que já era esperado devido à sua ordem de grandeza em relação à corrente de carga. De fato, a remoção da corrente capacitiva, neste caso, garante que os elementos de fase atuem de forma segura e seletiva, evitando que a proteção enxergue nas fases sãs correntes entrando na LT.

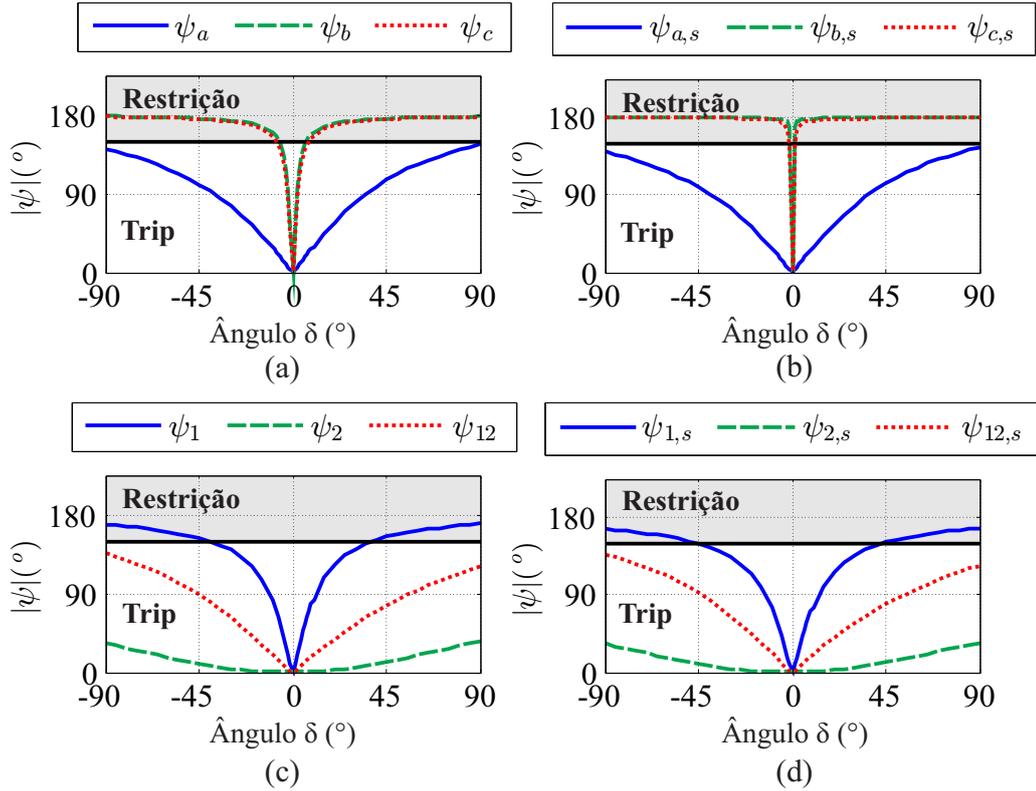
Analisando a Figura 4.5, observa-se que os elementos  $|\psi_a|$ ,  $|\psi_b|$  e  $|\psi_c|$  estão na região de *trip* para todos os valores de  $R_f$  avaliados. Porém, para uma falta monofásica na fase A, espera-se que  $|\psi_b|$  e  $|\psi_c|$  permaneçam na região de restrição, garantindo a seletividade de fases. Com a remoção da corrente capacitiva da linha,  $|\psi_{a,s}|$  perde sua sensibilidade para valores de  $R_f$  maiores que  $300 \Omega$  trazendo uma falsa impressão que a remoção do efeito capacitivo não é benéfica para o algoritmo. Todavia, deve-se ter em mente que a compensação de corrente capacitiva faz com que a função PC seja sensibilizada apenas para as fases com falta, evitando a operação indevida da proteção devido às correntes capacitivas para níveis de carga baixos nas fases sãs. Em resumo, pode-se dizer que a remoção do efeito capacitivo garantiu a seletividade de fases, mesmo reduzindo a sensibilidade dos elementos de fase.



**Figura 4.4.** Influência de  $R_f$  para  $\delta=-25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.



**Figura 4.5.** Influência de  $R_f$  para  $\delta=-5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

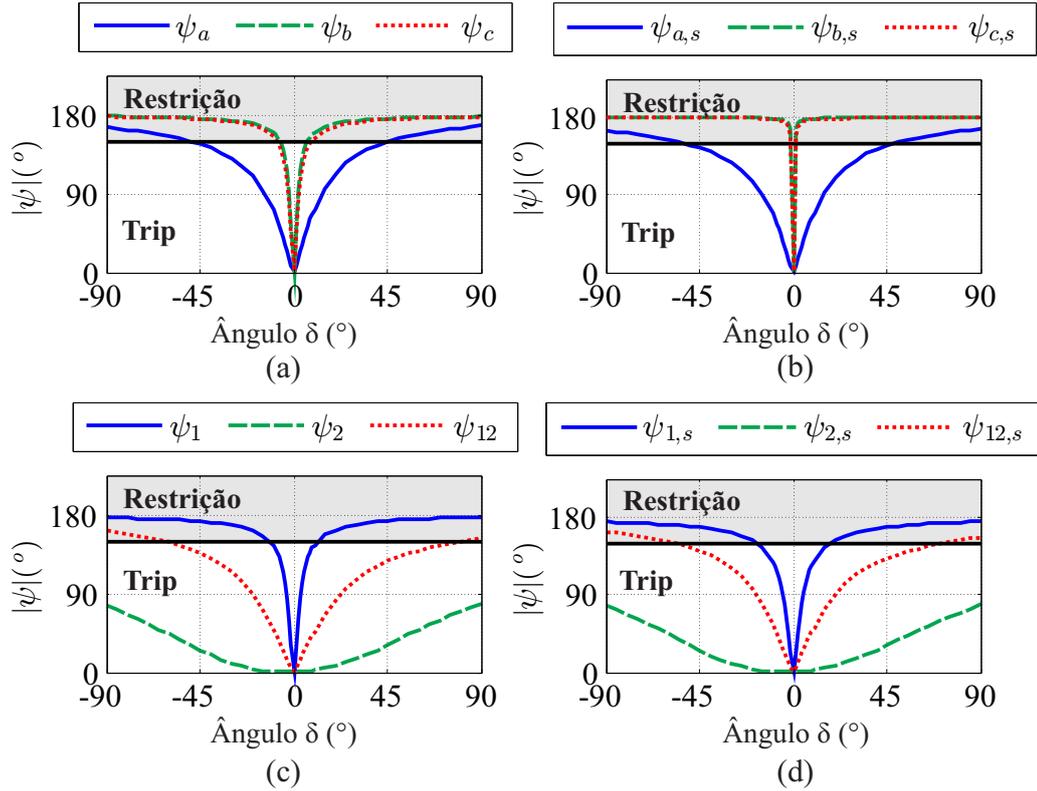


**Figura 4.6.** Influência de  $\delta$  para  $SIR_R = 0, 1$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

Ainda analisando o caso de  $\delta = -5^\circ$ , nota-se que a corrente capacitiva pode ser maior que a corrente de carga, fazendo com que os elementos das fases sem falta sejam sensibilizados. Adicionalmente, pode-se observar que  $|\psi_2|$  e  $|\psi_{2,s}|$  detectam corretamente a condição de falta para todos os valores de  $R_f$  avaliados, muito embora  $|\psi_1|$  e  $|\psi_{1,s}|$  tenham perdido sensibilidade para  $R_f \approx 100 \Omega$ , e os elementos mistos,  $|\psi_{12}|$  e  $|\psi_{12,s}|$  para  $R_f \approx 380 \Omega$ . Pode-se observar também que a remoção da corrente capacitiva diminui a sensibilidade dos elementos de sequência positiva e dos elementos mistos para valores elevados de  $R_f$ , evidenciando a influência da corrente capacitiva também nos elementos de sequência.

### 4.2.3 Influência do Carregamento do Sistema e do SIR

Para avaliar a influência do carregamento do sistema, foram simulados 106 casos para os quais se variou o ângulo de carregamento  $\delta$  de  $-90^\circ$  até  $90^\circ$ . Para cada conjunto de simulações, consideraram-se valores de  $SIR_R = 0, 1$  e  $1, 0$ , cujos resultados são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente. Nos cenários avaliados, a resistência e localização da falta permaneceram

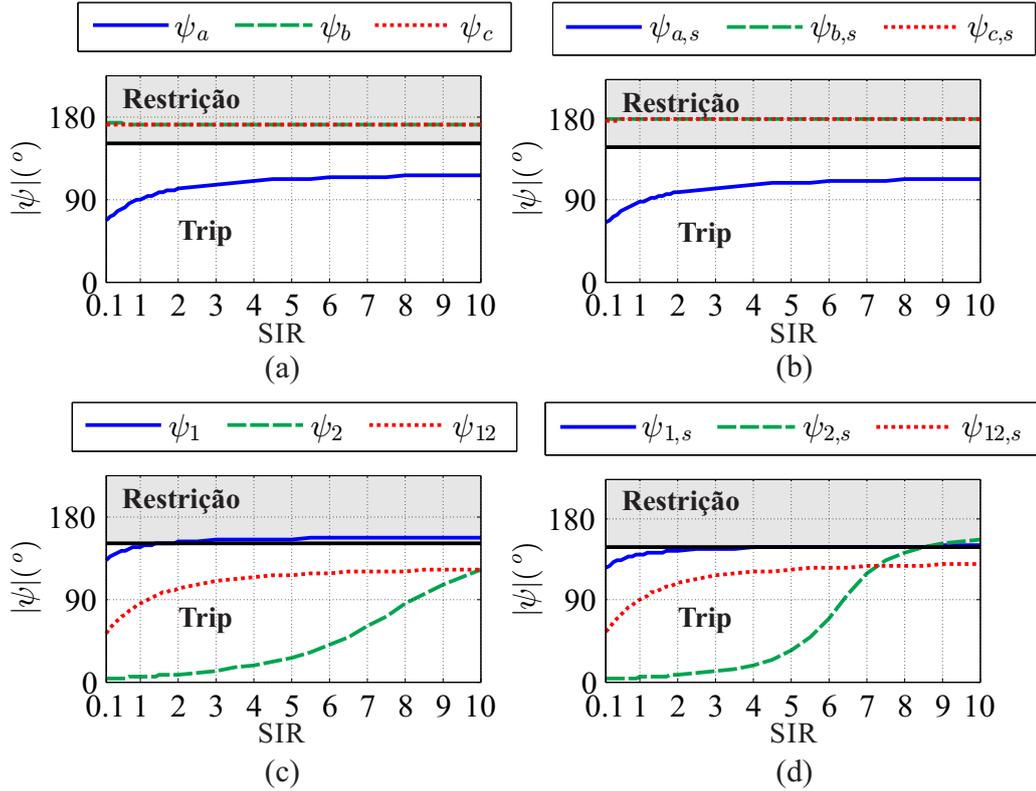


**Figura 4.7.** Influência de  $\delta$  para  $SIR_R = 1, 0$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

fixos com valores  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 100$  km, respectivamente.

Para  $SIR_R = 0, 1$ , considera-se que a fonte remota é forte (THOMPSON; SOMANI, 2015), resultando em uma contribuição de curto-circuito elevada. Assim, a corrente de falta predomina sobre a corrente de carregamento resultando na atuação correta da função PC mesmo para valores elevados de  $\delta$ , conforme ilustrado na Figura 4.6. No entanto, para  $SIR_R = 1, 0$ , observa-se uma condição *weak-infeed* quando os valores de  $\delta$ , em módulo, são maiores que  $45^\circ$ . Nesse caso, tem-se uma fonte remota relativamente fraca, resultando em uma corrente de carregamento que predomina sobre a corrente de falta, resultando na perda de sensibilidade da função PC, conforme demonstrado na Figura 4.7. Este comportamento pode ser observado tanto no elemento de sequência positiva como no elemento misto.

Deve-se ressaltar que os elementos das fases sem falta operaram indevidamente em situações nas quais o ângulo de carregamento  $\delta$  assumiu valores muito pequenos. Nesse caso, assim como verificado nas análises anteriores, percebe-se que é a corrente capacitiva que induz a proteção PC a enxergar nas fases sãs correntes entrando na linha. Dos resultados obtidos, nota-se que esse comportamento é reduzido sobremaneira com a remoção do efeito capacitivo

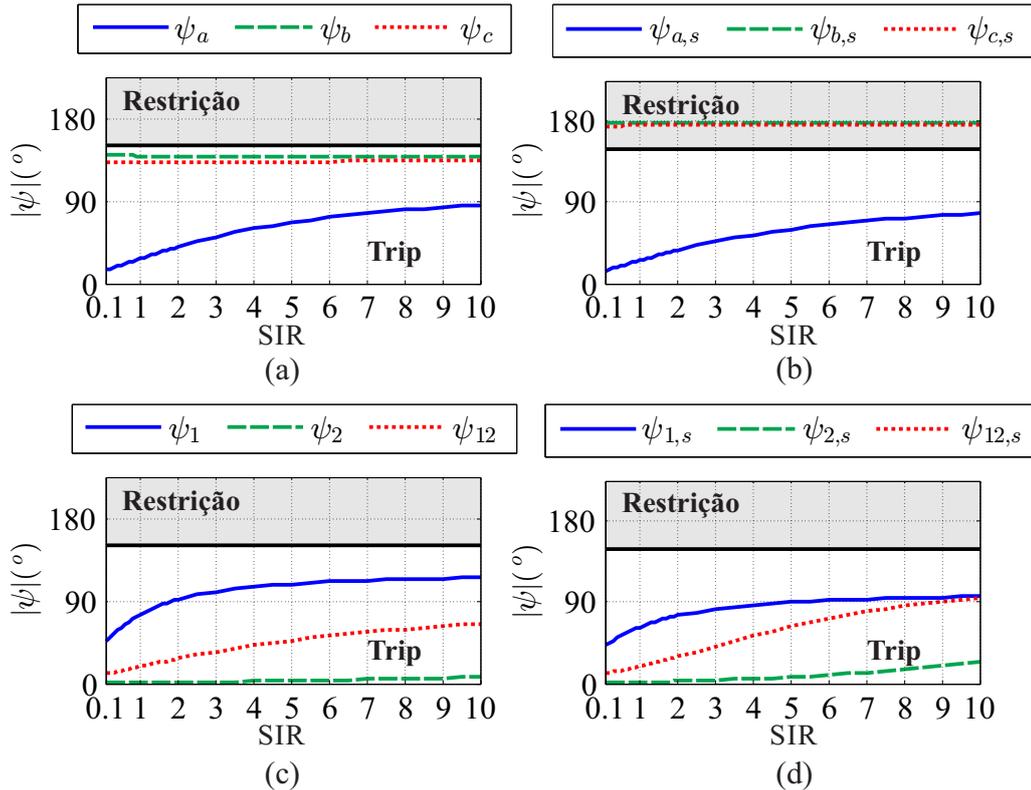


**Figura 4.8.** Influência do SIR para  $\delta = -25^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

da LT, muito embora não seja totalmente mitigado. Uma das razões para essa problemática consiste no fato de que o cálculo da corrente capacitiva não é exato, de modo que seu efeito não é completamente removido das correntes medidas. Assim, a utilização de um *pick-up* de corrente surge como uma boa alternativa para resolver a referida problemática, especialmente em situações de carregamento leve quando  $\delta \approx 0^\circ$ .

Com o intuito de melhor avaliar a influência do SIR no desempenho da função PC, apresentam-se nas Figuras 4.8 e 4.9 as análises quando considerados os valores  $SIR_R$  de 0,1 até 1,0, considerando  $\delta = -25^\circ$  e  $\delta = -5^\circ$ , respectivamente. No total, 72 casos foram gerados e simulados, assumindo  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 100$  km.

Dos resultados apresentados, pode-se observar que o elemento de sequência negativa e o elemento misto operam corretamente para todos os valores de SIR avaliados. Para  $\delta = -25^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 4.8, os elementos de fases com e sem falta operaram corretamente mesmo sem a remoção do efeito capacitivo. Por outro lado, para o ângulo de carregamento  $\delta = -5^\circ$ , conforme apresentado na Figura 4.9, a remoção da corrente capacitiva corrigiu a operação dos elementos das fases sãs, assegurando a segurança e seletividade da função PC.



**Figura 4.9.** Influência do SIR para  $\delta = -5^\circ$ : Elementos de fase (a) com efeito capacitivo; (b) sem efeito capacitivo; Elementos de sequência (c) com efeito capacitivo; (d) sem efeito capacitivo.

### 4.3 SÍNTESE DA AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO PC NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Neste capítulo, apresentou-se uma análise de sensibilidade paramétrica das versões tradicionais da função PC aplicadas no domínio da frequência, nas quais são considerados elementos de fase e de sequência (positiva, negativa e mista). Além disso, considerou-se uma das adaptações já consolidadas para aplicações baseadas na análise de fasores, a qual consiste da remoção do efeito capacitivo da LT.

Dos resultados, nota-se que a função PC aplicada no domínio da frequência é bastante afetada em casos nos quais a corrente de carga e as correntes capacitivas predominam sobre as contribuições de falta. Foi possível identificar uma relação cruzada entre  $\delta$ , SIR e  $R_f$ , de modo que os casos podem ser mais ou menos adversos a depender da combinação destas variáveis.

No que se refere à remoção do efeito capacitivo, constatou-se que esta adaptação garante a segurança e seletividade de fases para os elementos de fase, muito embora diminua a sensibilidade da proteção PC em algumas situações. Ainda assim, de um modo geral, pode-se dizer que a remoção do efeito capacitivo foi benéfica para aplicações no domínio da frequência, embora

introduza a necessidade de monitoração também dos sinais de tensão.

Sobre os elementos de sequência, constatou-se que o de sequência positiva é pouco confiável, sendo bastante afetado por  $\delta$ , SIR e  $R_f$ . Por outro lado, conforme esperado, os elementos de sequência negativa e mista apresentaram melhores desempenhos. Indiscutivelmente, o elemento de sequência negativa apresentou a melhor sensibilidade, se mostrando confiável mesmo nas situações mais adversas. Por outro lado, o elemento de sequência mista apresentou um desempenho pior do que o de sequência negativa, mas melhorou a função PC em relação ao elemento de sequência positiva.

Dos resultados, comprova-se a necessidade de adaptações que garantam desempenhos iguais ou melhores da função PC quando aplicada no domínio do tempo, especialmente no que se refere à influência do efeito capacitivo das LTs e do efeito combinado entre  $\delta$ , SIR e  $R_f$ . Além disso, por se tratar de uma aplicação no domínio do tempo, torna-se também necessária a análise de adaptações que garantam um bom desempenho da proteção quando da variação do ângulo de incidência de falta (o qual se relaciona com a componente CC de decaimento exponencial), variável esta que não é passível de análise em simulações de regime permanente de falta.

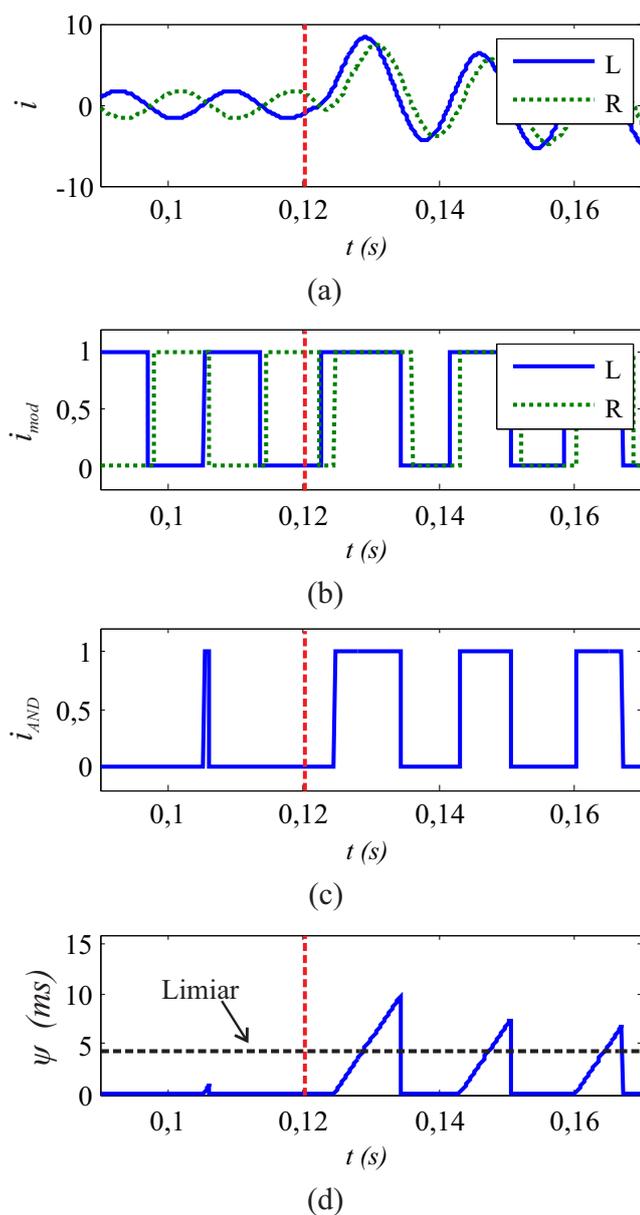
# ADAPTAÇÕES DA FUNÇÃO PC PARA APLICAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste capítulo, apresentam-se adaptações clássicas e propostas para aplicações da função PC no domínio do tempo. Os fundamentos e motivações de cada adaptação são inicialmente apresentados, sendo seguidos da avaliação de cada solução frente a diversos cenários de falta e de operação do sistema monitorado.

## 5.1 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO PC NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste trabalho, a função PC foi implementada no domínio do tempo seguindo diretrizes apresentadas em Kasztenny *et al.* (2006). Para tanto, conforme explicado no Capítulo 2, as análises não mais são realizadas por meio da avaliação de  $|\psi|$ , mas sim, de sua versão no domínio do tempo  $\psi(t)$ , a qual se refere à contagem dos contadores empregados na estimação da largura dos pulsos da saída da porta lógica *AND* utilizada pela função PC (ver Capítulo 2, Seção 2.1.2). Basicamente,  $\psi(t)$  guarda a informação da contagem dos contadores durante os períodos em que o pulso da saída da porta *AND* permanece em nível alto, zerando seu valor sempre que  $i_{AND}$  assume valor nulo. Assim, um sinal de *trip* é emitido aos disjuntores associados quando  $\frac{\psi(t)}{f_s}$  atinge um valor equivalente ao período de um quarto de ciclo fundamental (KASZTENNY *et al.*, 2006), sendo  $f_s$  a frequência de amostragem utilizada.

Na Figura 5.1, apresenta-se um exemplo de aplicação da função PC no domínio do tempo, evidenciando nas Figuras 5.1(b), 5.1(c) e 5.1(d) o comportamento dos sinais modulados nos terminais local (Barra L) e remoto (Barra R) de uma LT, a saída da porta lógica *AND* e os valores assumidos por  $\psi(t)$ , respectivamente. Além disso, nas figuras, o limiar de operação também é ilustrado. Nesse caso, uma vez que este limiar corresponde a um quarto de ciclo do período fundamental, para sistemas em 60 Hz, adotou-se um valor de 4,17 ms.



**Figura 5.1.** Função PC no domínio do tempo: (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados; (c) Saída da porta *AND*; (d) Contador  $\psi(t)$ .

A seguir, apresentam-se os fundamentos das adaptações clássicas e propostas, explicando as motivações de cada uma delas e o embasamento matemático associado.

## 5.2 REMOÇÃO DO EFEITO CAPACITIVO DAS LINHAS

Conforme evidenciado nos capítulos anteriores, a remoção do efeito capacitivo de LTs consiste em uma adaptação clássica da função PC, a qual garante uma melhor seletividade de fases para a proteção quando considerados elementos de fase. Para aplicações no domínio do tempo,

o procedimento para remoção do efeito capacitivo de LTs descrito no Capítulo 2 por meio das expressões (2.8) e (2.9) é adaptado, de forma que são utilizados apenas valores instantâneos dos sinais medidos, evitando a necessidade do processo de estimação fasorial.

Da teoria de análise de circuitos lineares, sabe-se que o equacionamento que relaciona a tensão  $u(t)$  nos terminais de um capacitor à corrente  $i_{cap}$  que por ele flui é dado por:

$$i_{cap} = C \cdot \frac{du}{dt}, \quad (5.1)$$

onde  $C$  é o valor da capacitância em farad (GLOVER *et al.*, 2012; ALEXANDER; SADIKU, 2009).

Para o cálculo da corrente capacitiva em um sistema trifásico, definem-se os vetores  $i_{cap,ABC}$  e  $\frac{du_{ABC}}{dt}$ , bem como a matriz  $C_{ABC}$  como sendo (MILLER *et al.*, 2010):

$$i_{cap,ABC} = \begin{bmatrix} i_{cap,A} \\ i_{cap,B} \\ i_{cap,C} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

$$\frac{du_{ABC}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{du_A}{dt} \\ \frac{du_B}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$$C_{ABC} = \begin{bmatrix} C_p & C_m & C_m \\ C_m & C_p & C_m \\ C_m & C_m & C_p \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

onde  $i_{cap,ABC}(t)$  é o vetor coluna das correntes de cada fase que fluem pela capacitância da linha,  $\frac{du_{ABC}}{dt}$  vetor coluna das derivadas das tensões em cada fase e  $C_{ABC}$  a matriz de capacitâncias próprias  $C_p$  e mútuas  $C_m$  da LT, calculadas a partir de:

$$C_p = \frac{(2C_1 + C_0)}{3}, \quad (5.5)$$

$$C_m = \frac{(C_0 - C_1)}{3}, \quad (5.6)$$

onde  $C_1 = \frac{Y_1}{\omega}$  e  $C_0 = \frac{Y_0}{\omega}$  são as capacitâncias em farads de sequência positiva e negativa da LT, respectivamente. Assim, em um sistema trifásico, (5.1) toma a seguinte forma:

$$i_{cap,ABC}(t) = C_{ABC} \cdot \frac{du_{ABC}(t)}{dt}. \quad (5.7)$$

Analisando o modelo  $\pi$ -nominal de uma LT, nota-se que a característica capacitiva dos condutores é representada por dois capacitores, um em cada terminal. Assim, para reduzir a

influência do efeito capacitivo da LT sobre a proteção PC, em um dado terminal  $x$ , calcula-se normalmente a corrente  $i_{x_{cap}}$ , usando (MILLER *et al.*, 2010):

$$i_{x_{cap},ABC}(t) = \frac{C_{ABC}}{2} \left[ \frac{du_{x_{ABC}}(t)}{dt} \right]. \quad (5.8)$$

Ao considerar os terminais L e R de uma linha, ou seja,  $x = L$  e  $R$ , são obtidas as correntes  $i_{L_{cap},ABC}$  e  $i_{R_{cap},ABC}$ . Cabe ressaltar que essas correntes não correspondem exatamente à contribuição capacitiva real em cada terminal da LT, mas consistem em boas aproximações passíveis de utilização em LTs longas (GLOVER *et al.*, 2012; DAMBHARE *et al.*, 2009; DENG *et al.*, 2015; WEN *et al.*, 2012; LEITE JR. *et al.*, 2016b; LOPES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2016). Assim, ao invés das correntes de fase medidas, é possível utilizar, nos terminais L e R, as correntes com a remoção do efeito capacitivo  $i_{L_s}(t)$  e  $i_{R_s}(t)$ , respectivamente, calculadas usando:

$$i_{L_s,ABC}(t) = i_{L_{ABC}}(t) - i_{L_{cap},ABC}(t), \quad (5.9)$$

$$i_{R_s,ABC}(t) = i_{R_{ABC}}(t) - i_{R_{cap},ABC}(t). \quad (5.10)$$

Por meio das expressões apresentadas, reduz-se a defasagem entre as correntes devido ao efeito capacitivo da linha, aproximando o comportamento das variáveis da proteção PC no domínio do tempo ao esperado idealmente. Por outro lado, passa-se a depender de medições precisas dos sinais de tensão, as quais nem sempre se encontram disponíveis devido às distorções inseridas pelos TPCs (BAINY *et al.*, 2014).

### 5.3 USO DE GRANDEZAS INCREMENTAIS DO DOMÍNIO DO TEMPO

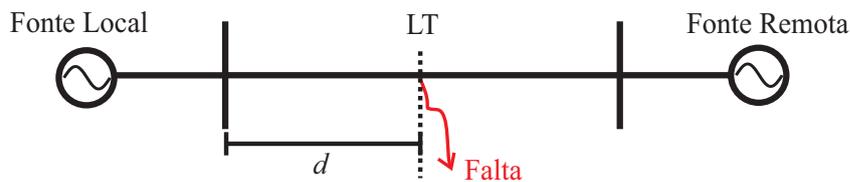
Yaozhong *et al.* (1991) apresentam a utilização das correntes incrementais de fase no domínio da frequência, comprovando melhorias no desempenho da função PC em relação às condições operacionais do sistema, mais especificamente à combinação do carregamento e das contribuições de curto-circuito. Entretanto, embora a utilização de elementos incrementais seja uma aplicação consolidada no âmbito da análise de curtos-circuitos no domínio da frequência, o uso desses elementos na função PC no domínio do tempo não é comum.

Da literatura, percebe-se que o uso de grandezas incrementais tem se popularizado no âmbito das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo (SCHWEITZER *et al.*, 2015a). Em

Schweitzer *et al.* (2015b), por exemplo, apresentam-se funções de proteção no domínio do tempo baseadas na análise de grandezas incrementais, as quais estão disponíveis no relé SEL-T400L lançado recentemente no mercado. Tratando-se de funções implementadas em um relé moderno disponível no mercado, nota-se que o uso de grandezas incrementais tem se tornado uma tendência para funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, fato este que motivou os estudos apresentados em LEITE JR. *et al.* (2016b), onde foram avaliados os benefícios do uso de grandezas incrementais na proteção PC quando baseada na análise de valores instantâneos dos sinais monitorados.

Os resultados apresentados em LEITE JR. *et al.* (2016b) são animadores do ponto de vista do uso de grandezas incrementais na função PC aplicada no domínio do tempo. Por isso, propõe-se como adaptação a ser avaliada o uso de elementos incrementais na proteção PC, acompanhada de um valor de um ajuste de *pick-up* para evitar atuações indevidas. De fato, durante a operação normal dos sistemas, idealmente, os elementos incrementais assumem valores nulos. Porém, em sistemas reais, esses valores podem ser não nulos de baixa amplitude, requerendo, portanto, o referido ajuste de *pick-up*.

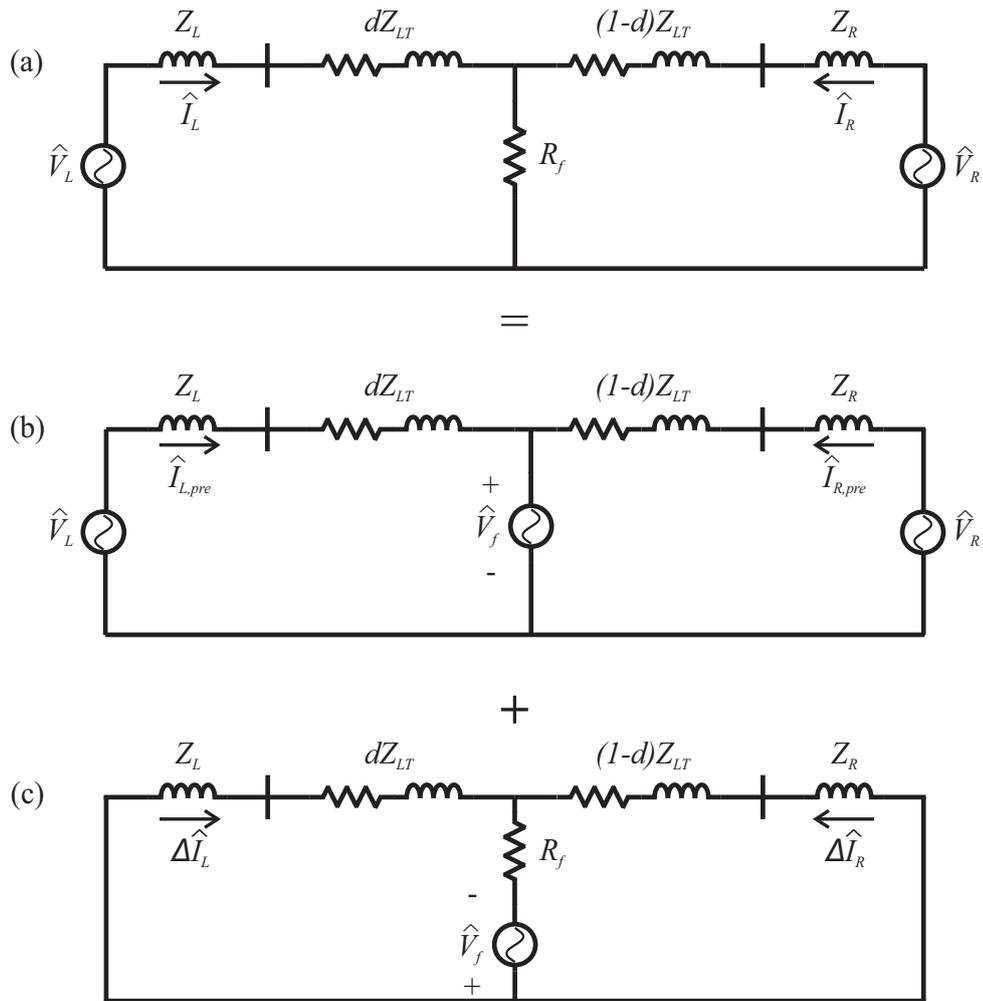
Para explicar o fundamento das componentes incrementais, considera-se inicialmente o sistema simplificado apresentado na Figura 5.2, onde uma LT de impedância  $Z_{LT}$  conecta dois circuitos equivalentes de Thévenin com impedâncias  $Z_L$  e  $Z_R$  nos terminais L e R, respectivamente. Para as análises, assumir-se-á que uma falta ocorreu a uma distância  $d$  (em pu) do terminal L.



**Figura 5.2.** Sistema de potência simplificado.

O circuito ilustrado, durante um curto-circuito, pode ser representado conforme demonstrado na Figura 5.3(a). Este circuito é denominado tipicamente de circuito equivalente com falta, podendo ser representado como a soma de outros dois circuitos distintos: o circuito de pré-falta, ilustrado na Figura 5.3(b) e o circuito puro de falta, ilustrado na Figura 5.3(c).

Dos circuitos apresentados, pode-se concluir que o circuito de pré-falta representa o sistema



**Figura 5.3.** Análise das componentes incrementais: (a) Circuito equivalente com falta; (b) Circuito de pré-falta; (c) Circuito puro de falta.

antes da ocorrência do distúrbio, enquanto que o circuito puro de falta representa apenas as variações no sistema decorrentes do curto-circuito, o que justifica o fato de ser tratado também como circuito incremental. Dessa maneira, tensões e correntes incrementais representam apenas os incrementos verificados nas tensões e correntes medidas após a incidência da falta, sendo, idealmente, isentas do efeito do carregamento (BENMOUYAL; ROBERTS, 1999a). Neste contexto, cabe ressaltar que, para funções mais lentas, as componentes incrementais podem apresentar erros em decorrência da variação do carregamento durante o curto-circuito que ocorre devido às oscilações das máquinas rotativas. Entretanto, devido à inércia das máquinas, essas variações ocorrem em tempos muito maiores do que os tempos de atuação esperados para funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, reduzindo as imprecisões no cálculo das grandezas incrementais.

No domínio da frequência, da análise dos circuitos ilustrados na Figura 5.3, conclui-se que as grandezas incrementais podem ser calculadas no domínio do tempo em um dado terminal  $x$  usando (BENMOUYAL; ROBERTS, 1999b; SIRISHA; BHIDE, 2014):

$$\Delta \widehat{I}_x = \widehat{I}_x - \widehat{I}_{x,pre} , \quad (5.11)$$

onde  $\Delta I_x$  é a corrente incremental no terminal  $x$  de medição.

Para aplicações no domínio do tempo, (5.11) é adaptada para utilizar apenas valores instantâneos dos sinais monitorados, sendo reescrita por (SCHWEITZER *et al.*, 2015a):

$$\Delta i_m(t) = i_m(t) - i_m(t - p \cdot N \cdot \Delta t) , \quad (5.12)$$

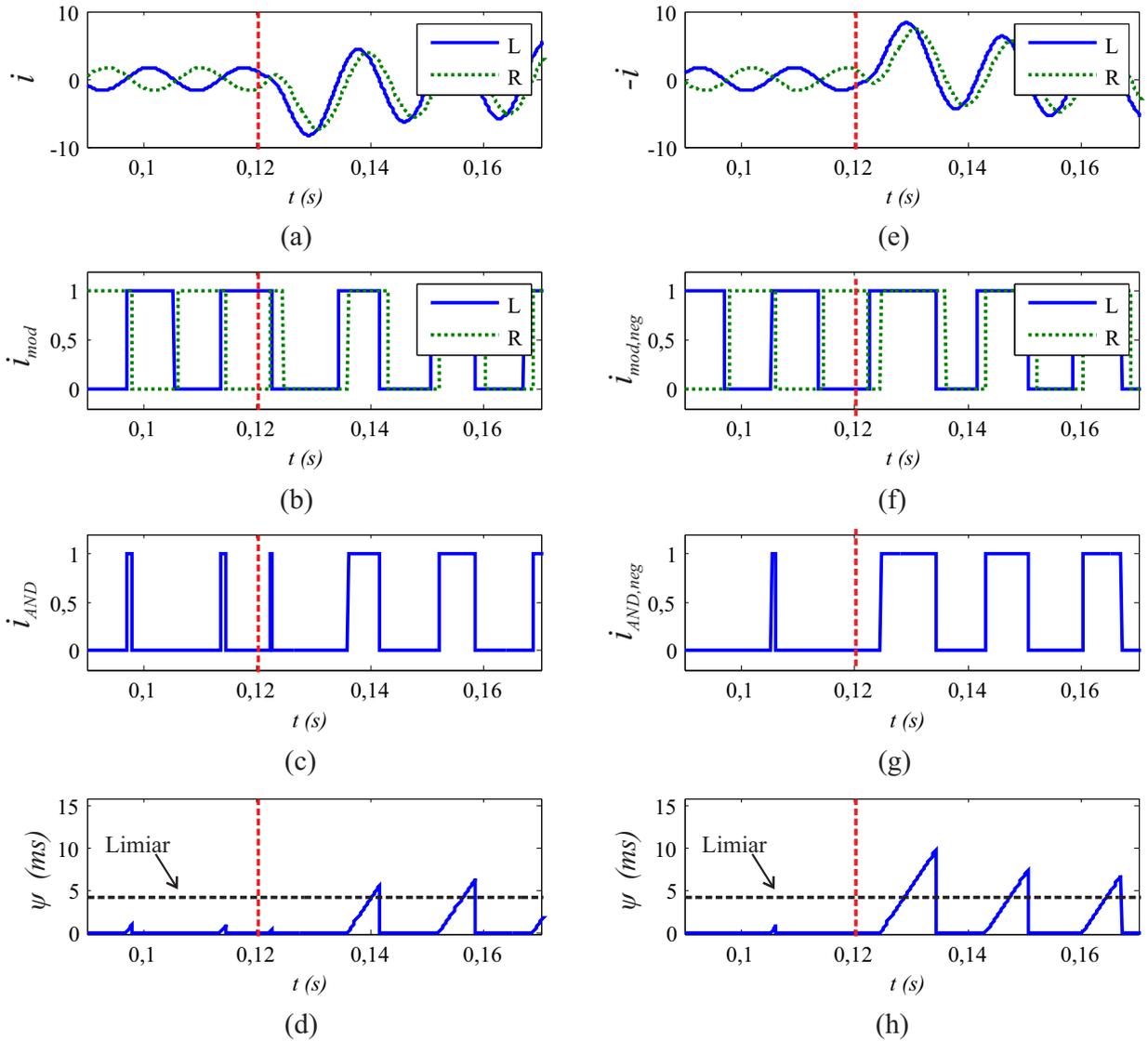
onde  $p$  é o um número arbitrário de ciclos,  $N$  é o número de amostras por ciclo e  $\Delta t$  é o período de amostragem.

Em teoria, a utilização de elementos incrementais torna a função PC mais robusto às características operacionais do sistema monitorado, principalmente no que se refere ao carregamento e SIR, aproximando seu comportamento ao esperado para a componente de sequência negativa, porém mantendo a seletividade de fases, o que não é possível quando grandezas de sequência são utilizadas (LEITE JR. *et al.*, 2016b).

Ainda em relação ao uso de elementos incrementais no domínio do tempo, cabe frisar que, para fins de aplicação prática da função PC, deve-se assegurar que sua atuação ocorra dentro da janela de tempo utilizada para o cálculo das correntes incrementais. Após esse tempo, não se tem mais informações corretas dos elementos incrementais, de modo que a função deve ser bloqueada, deixando a proteção a cargo de outras funções (SCHWEITZER *et al.*, 2015a). Neste trabalho, considerou-se  $p = 2$ , ou seja, uma janela de cálculo de dois ciclos fundamentais.

## 5.4 TÉCNICA $+I/-I$ APLICADA À FUNÇÃO PC NO DOMÍNIO DO TEMPO

Conforme apresentado no Capítulo 2, Seção 2.3, sabe-se que o ângulo de incidência da falta pode resultar em valores inicialmente negativos das correntes, o que culmina em um atraso adicional da função PC. De fato, neste tipo de situação, os contadores da lógica de operação da função PC não seriam ativados imediatamente após a incidência do distúrbio, promovendo a aparição de pulsos estreitos na saída da porta *AND* nos primeiros instantes de curto-circuito.



**Figura 5.4.** Uso da técnica  $+i/-i$ : (a) Correntes medidas; (b) Sinais modulados para as correntes medidas; (c) Saída da porta *AND* considerando as correntes medidas; (d) Contadores para correntes medidas; (e) Correntes medidas invertidas; (f) Sinais modulados para as correntes medidas invertidas; (g) Saída da porta *AND* considerando as correntes medidas invertidas; (h) Contadores para correntes medidas invertidas.

Com o objetivo de tornar o algoritmo menos influenciado pelo ângulo de incidência, propõe-se como adaptação a ser avaliada o uso da técnica  $+i/i$ , na qual são considerados simultaneamente como sinais de entrada as corrente medidas e suas versões invertidas, ou seja, multiplicadas por  $-1$ . Na Figura 5.4, ilustra-se um caso onde para o qual o ângulo de incidência foi de aproximadamente  $180^\circ$ , resultando em valores negativos de corrente nos primeiros momentos do distúrbio.

Na situação ilustrada, ambos os valores de  $i_L$  e  $i_R$  possuem sinais negativos no primeiro meio ciclo do distúrbio, condição esta que não resulta numa saída positiva da porta *AND* (Figura

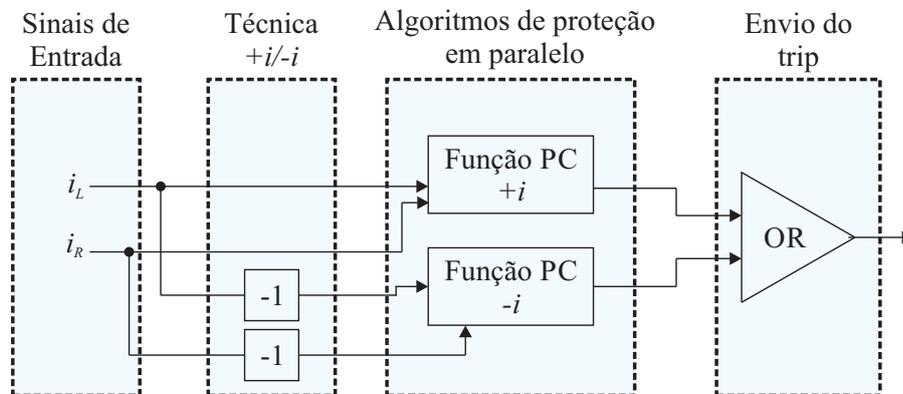
5.4(c)). Assim, para aplicar a técnica  $+i/i$  proposta, define-se:

$$\begin{aligned} i_{L,neg} &= (-1) \cdot i_L, \\ i_{R,neg} &= (-1) \cdot i_R, \end{aligned} \quad (5.13)$$

onde  $i_{L,neg}$  e  $i_{R,neg}$  são as correntes com os sentidos invertidos das correntes medidas nos terminais local e remoto, respectivamente.

Analisando  $i_{L,neg}$  e  $i_{R,neg}$ , percebe-se que ambas as correntes possuem sinais positivos logo após o instante de falta, conforme ilustrado na Figura 5.4(e). Assim, associando a análise de  $i_{L,neg}$  e  $i_{R,neg}$  em conjunto com a análise de  $i_L$  e  $i_R$ , os contadores são ativados logo após a incidência do curto-circuito, independentemente do ângulo de incidência, resultando em atuações mais rápidas. Contudo, cabe ressaltar que a utilização das correntes invertidas não altera o princípio básico da comparação de fases. De fato, quando há a ocorrência de uma falta interna à LT, as correntes medidas tendem a ficar em fase e, caso contrário, em contra-fase. Esse comportamento se repete para as correntes invertidas, não implicando em perdas na segurança da proteção.

Por fim, visando a aplicação da proteção PC no domínio do tempo, propõe-se a utilização de dois algoritmos em paralelo, um utilizando as correntes originalmente medidas nos terminais da LT e outro utilizando as correntes invertidas. Desta forma, o sinal de *trip* é enviado pelo relé quando algum dos dois algoritmos é sensibilizado, conforme ilustrado na Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Diagrama ilustrativo do funcionamento da lógica de proteção PC com a técnica  $+i/-i$ .

## 5.5 ELIMINAÇÃO DA COMPONENTE CC DE DECAIMENTO EXPONENCIAL

Da literatura, sabe-se que, a depender do ângulo de incidência da falta, pode existir um conteúdo maior ou menor da componente CC de decaimento exponencial nos sinais de corrente medidos (RIBEIRO *et al.*, 2016). Dessa maneira, é notável que para casos de elevada componente CC, a problemática dos sinais de corrente inicialmente negativos pode ser agravada. De fato, a técnica  $+i/-i$  minimiza sobremaneira este problema, mas não completamente quando a componente CC de decaimento exponencial é relevante.

Em Schweitzer *et al.* (2015a), propõe-se a utilização de uma corrente chamada de corrente réplica incremental  $\Delta i_z$ , a qual é calculada usando:

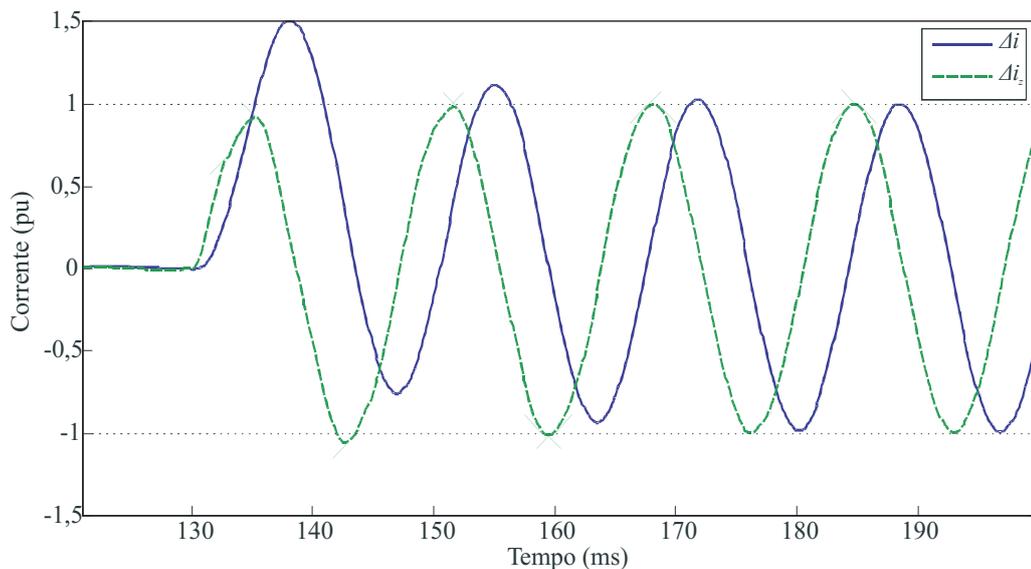
$$\Delta i_z(t) = D_m \cdot \Delta i(t) + D_n \cdot \frac{d}{dt} \Delta i(t) , \quad (5.14)$$

onde:

$$D_m = \frac{R_L}{|Z_L|}, \quad D_n = \frac{L_L}{|Z_L|} , \quad (5.15)$$

sendo  $Z_L$ ,  $R_L$  e  $L_L$  a impedância, resistência e indutância da LT monitorada, respectivamente.

A corrente  $\Delta i_z$  consiste em uma combinação da componente incremental de corrente e a sua derivada, a qual pode ser numericamente calculada sem grande esforço computacional (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010). Além disso, nota-se que o conhecimento dos parâmetros da



**Figura 5.6.** Correntes sem e com a utilização da corrente réplica incremental.

LT monitorada passam a ser necessários, o que não ocorre para as versões mais simplificadas da função PC. É importante destacar que o cálculo de  $\Delta i_Z$  se assemelha à aplicação do filtro mímico digital reportado em Benmouyal (1995). Com isso, conforme ilustrado na Figura 5.6, promove-se a atenuação da componente CC de decaimento exponencial (RIBEIRO *et al.*, 2016), o que pode reduzir sua influência sobre a função PC, especialmente em situações de ângulos de incidência que resultam em sinais negativos das correntes nos primeiros instantes de falta. Portanto, do exposto, propõe-se como adaptação a ser avaliada o uso da corrente réplica incremental ao invés das correntes medidas diretamente dos TCs, aplicação esta que pode ser combinada ou não com a técnica  $+i/-i$  apresentada anteriormente.

## 5.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentaram-se as adaptações sugeridas para a função PC, com o intuito de avalia-las, identificando o custo-benefício de cada uma. Dentre as adaptações, destaca-se a remoção do efeito capacitivo, a qual já é consolidada para aplicações no domínio da frequência, o uso de grandezas incrementais, de forma a reduzir os efeitos combinados do carregamento, SIR e resistência de falta, a técnica  $+i/-i$ , através da qual se torna possível minimizar atrasos na atuação da proteção devido ao ângulo de incidência, bem como o uso da corrente réplica incremental, por meio da qual é possível diminuir a influência da componente CC de decaimento exponencial sobre a proteção PC. De uma forma geral, nota-se que as referidas adaptações não recaem em grandes aumentos de complexidade na implementação da função PC, mantendo a tendência de simplicidade e número de ajustes reduzido dos sistemas modernos de proteção. No próximo capítulo, apresentam-se as análises de cada uma das adaptações listadas, avaliando o desempenho destas frente a diversos cenários de falta.

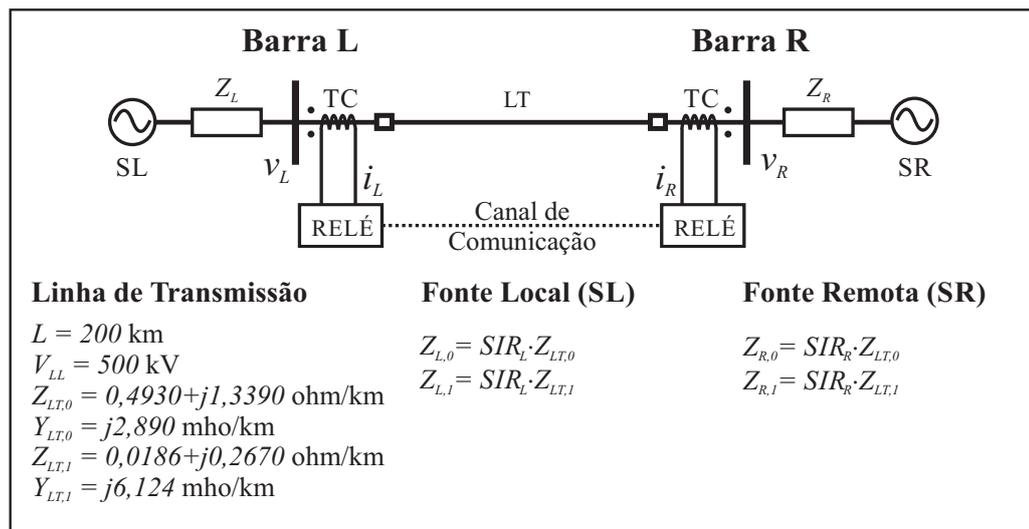
# ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FUNÇÃO PC BASEADA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos da avaliação da função PC aplicada no domínio do tempo, considerando as adaptações descritas no capítulo anterior. Para tanto, realizaram-se simulações de curtos-circuitos em uma LT modelada considerando os parâmetros de uma linha real, utilizando o programa ATP, através do qual foram gerados registros oscilográficos que viabilizaram a realização de análises transitórias e de sensibilidade paramétrica.

## 6.1 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO (ATC)

Como uma primeira etapa da avaliação das adaptações da função PC para aplicações no domínio do tempo, realizaram-se análises transitórias de curto-circuito (ATCs) do desempenho da referida proteção frente a diversos cenários de falta. Para tanto, foram escolhidos casos pontuais de faltas de acordo com as problemáticas identificadas no Capítulo 4.

Na Tabela 6.1, apresenta-se a lista de casos de ATC analisados, nos quais  $P$  representa o ponto de aplicação da falta,  $\delta$  o ângulo de carregamento e  $\theta$  o ângulo de incidência da falta. O sistema avaliado é o mesmo utilizado nas análises anteriores, o qual é novamente ilustrado na Figura 6.1. Três pontos de aplicação de faltas foram considerados: pontos P1, P2 e P3. O ponto P1 está localizado na barra L imediatamente antes do TC, caracterizando uma região externa à LT protegida. P2 está localizado imediatamente após o TC do terminal L, caracterizando uma situação de *close-in fault*. Por fim, P3 está localizado no centro da LT, simulando uma falta mais distante dos locais de medição. No total, 14 casos de ATC foram analisados, dentre os quais foram escolhidos conjuntos específicos para avaliar diferentes aspectos da proteção PC e das adaptações descritas no capítulo anterior. Nos referidos casos, adotou-se  $SIR_L = 0,1$  e as tensões dos terminais L e R iguais a  $1\angle 0^\circ$  e  $1\angle \delta$ , respectivamente.



**Figura 6.1.** Sistema elétrico de potência considerado nas simulações via ATP.

**Tabela 6.1.** Curtos-circuitos simulados nas análises transitórias e suas características.

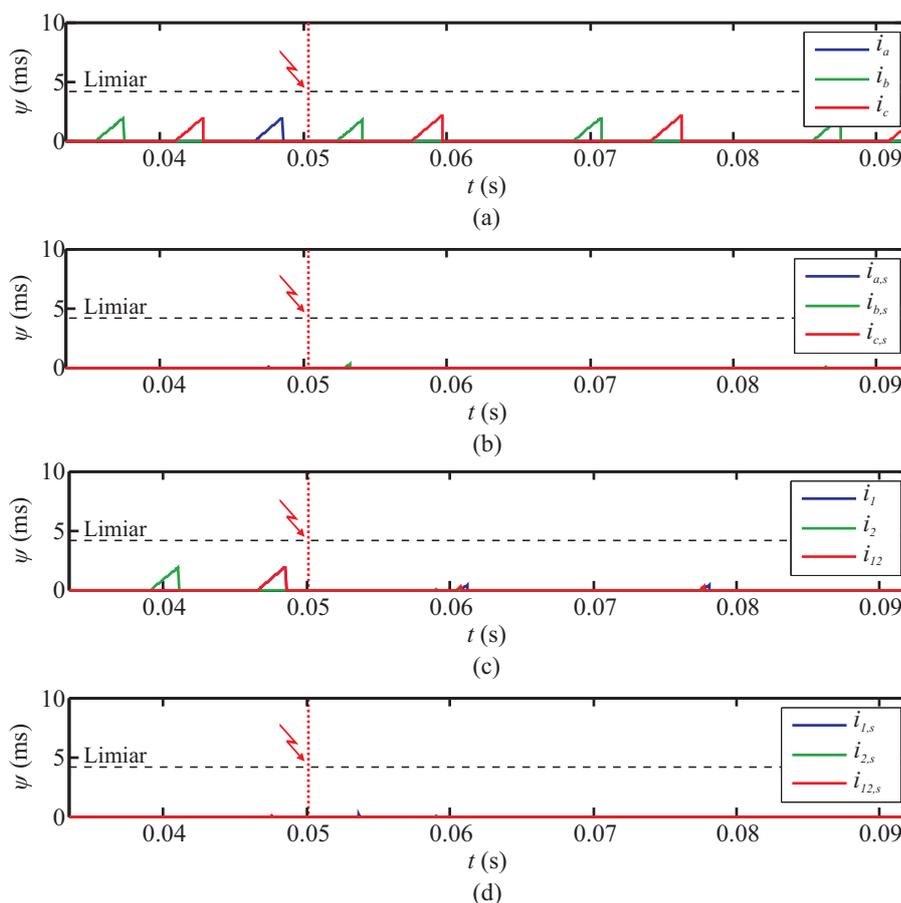
Caso	Tipo de Falta	P	$R_f(\Omega)$	$SIR_R$	$\delta(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	Saturação do TC	Foco da Avaliação
ATC1	AT	P1	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	Remoção
ATC2	AT	P3	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	do efeito
ATC3	AT	P2	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	capacitivo
ATC4	AT	P3	0,0	0,1	-30,0	90,0	Não	Uso das
ATC5	AT	P3	0,0	2,0	-5,0	90,0	Não	grandezas
ATC6	AT	P3	100,0	0,1	-30,0	90,0	Não	incrementais
ATC7	AT	P3	0,0	0,1	-5,0	90	Não	Técnica
ATC8	AT	P3	0,0	0,1	-5,0	270,0	Não	$+i/ - i$
ATC9	AT	P3	0,0	0,1	-5,0	0,0	Não	Corrente
ATC10	AT	P3	0,0	0,1	-5,0	180,0	Não	Réplica $\Delta i_Z$
ATC11	BC	P3	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	Seletividade
ATC12	CAT	P3	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	de Fases
ATC13	ABC	P3	0,0	0,1	-5,0	90,0	Não	
ATC14	AT	P2	0,0	0,1	-5,0	0,0	Sim	Sat. TC

### 6.1.1 Casos ATC1, ATC2 e ATC3: Identificação de Curtos-Circuitos Externos e Internos Com e Sem Remoção do Efeito Capacitivo

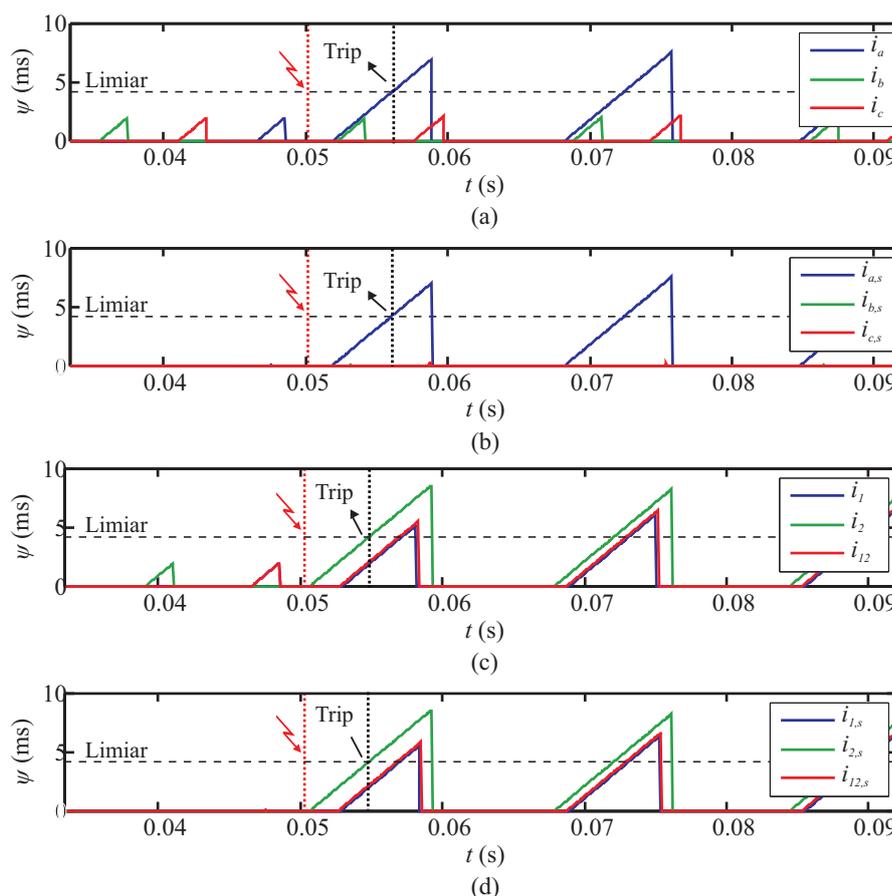
Durante a análise dos casos ATC1, ATC2 e ATC3, apresentam-se os resultados obtidos para os elementos de fase e de sequência quando a função PC é aplicada com e sem a remoção do efeito capacitivo. Com isso, demonstram-se os benefícios dessa adaptação quando de sua

aplicação na função PC no domínio do tempo.

Na Figura 6.2 são ilustrados os resultados obtidos para o caso ATC1. De acordo com a Tabela 6.1, esta é uma falta externa e, portanto, espera-se que os contadores não ultrapassem o limiar de operação. As pequenas contagens observadas nas Figuras 6.2(a) e (c), mesmo antes da incidência da falta, são decorrentes da defasagem angular imposta pelo efeito capacitivo da LT, provocando, conseqüentemente, a aparição de pulsos estreitos na saída da porta *AND* da lógica de operação da função PC. Por outro lado, com a remoção da corrente capacitiva, as correntes ficam praticamente em contra-fase, de modo que os contadores não realizam contagens significativas, conforme ilustrado nas Figuras 6.2(b) e (d). Este resultado corrobora com os apresentados no Capítulo 4, através dos quais ficou comprovado que a remoção do efeito capacitivo melhora a segurança da proteção PC.



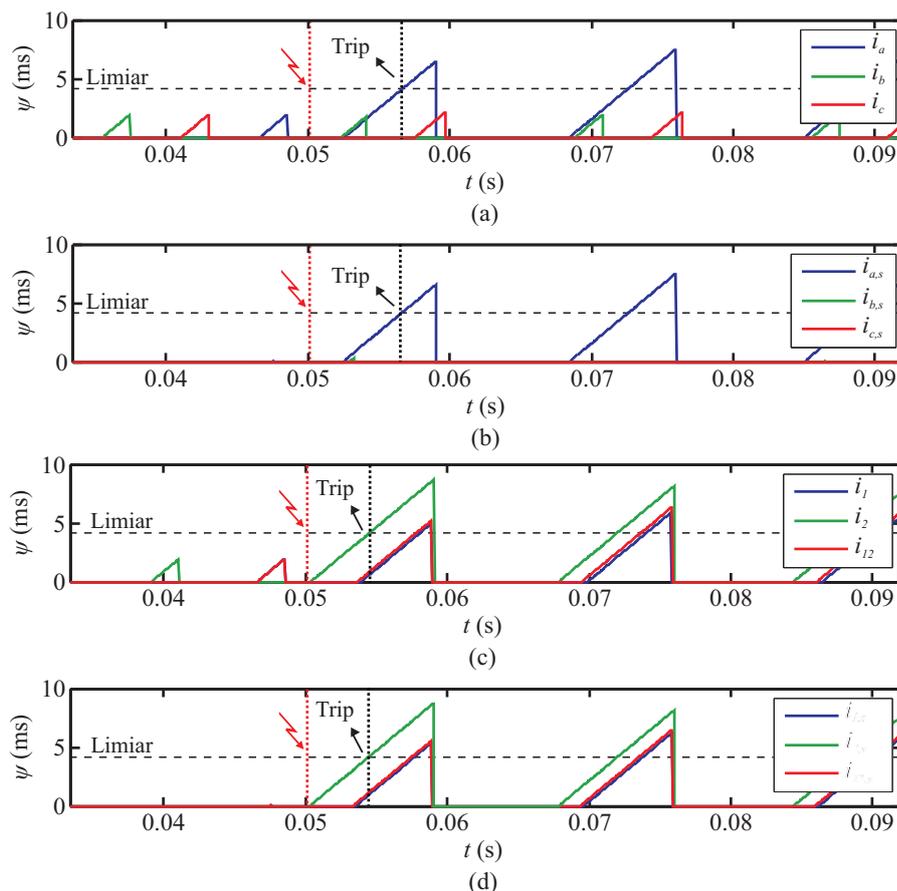
**Figura 6.2.** Caso ATC1 - Curto-circuito externo AT: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo.



**Figura 6.3.** Caso ATC2 - Curto-circuito interno AT no meio da linha: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo.

De acordo com a Tabela 6.1, os casos ATC2 e ATC3 consistem em curtos-circuitos AT em um ponto imediatamente após o TC do terminal L e no centro da LT protegida, respectivamente. Sendo assim, espera-se que o contador do elemento da fase com falta em cada caso ultrapasse o limiar de operação, ficando os demais contadores abaixo do mesmo. Os resultados para os casos ATC2 e ATC3 são ilustrados nas Figuras 6.3 e 6.4, respectivamente.

Do exposto em ambos os casos, observa-se que, para as fases sãs, conforme esperado, os contadores não ultrapassam o limiar de operação, muito embora apresentem contagens quando da não aplicação do algoritmo de remoção da corrente capacitiva (ver Figuras 6.3(a) e (c) e Figuras 6.4(a) e (c)). Essas contagens espúrias nas fases sãs são eliminadas ao realizar a correção da corrente capacitiva. Mesmo assim, não são verificadas perdas de sensibilidade dos elementos da fase com falta, conforme ilustrado nas Figuras 6.3(b) e (d) e nas Figuras 6.4(b) e (d). De fato, os contadores relacionados à fase defeituosa e os elementos de sequência, em ambos os casos, com e sem remoção do efeito capacitivo, atingem o limiar de operação cerca



**Figura 6.4.** Caso ATC3 - Curto-circuito interno AT imediatamente após o TC do terminal local: (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase com a remoção do efeito capacitivo; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência com a remoção do efeito capacitivo.

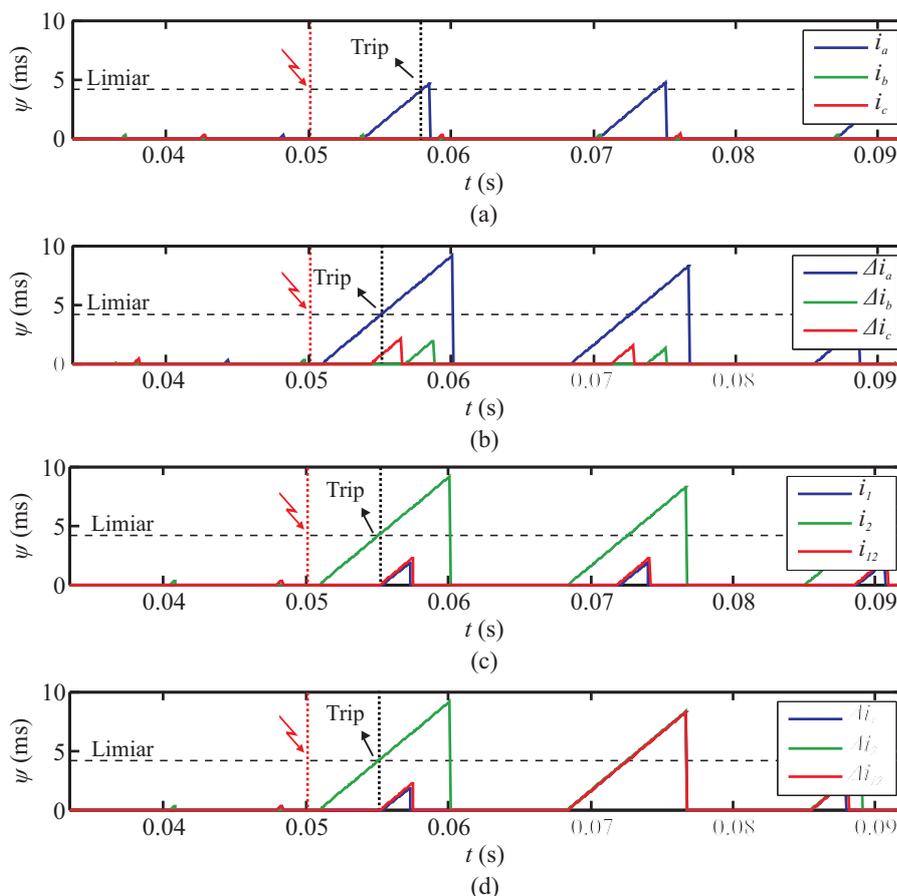
de 6 ms após a incidência da falta, ou seja, menos de meio ciclo fundamental após o início do distúrbio. Com isso, demonstra-se que a remoção da corrente capacitiva colabora de forma mais efetiva para melhorias na segurança da proteção, independentemente do ponto de falta na linha monitorada.

Em detrimento ao exposto sobre os benefícios da correção do efeito capacitivo das LTs, cabe ressaltar que esta aplicação requer a utilização de sinais de tensão medidos em ambos os terminais da linha. Embora a aquisição desses sinais não seja considerada uma problemática, sabe-se que os TPCs não são capazes de representar de forma fidedigna as tensões primárias em seus enrolamentos secundários, o que pode, a depender do espectro de frequências envolvido no distúrbio, comprometer o processo de remoção da corrente capacitiva. Por isso, busca-se neste trabalho o uso de outras adaptações que não requeiram a utilização de sinais de tensão e que sejam ainda assim capazes de melhorar o desempenho da função PC.

### 6.1.2 Casos ATC4, ATC5 e ATC6: Avaliação do Uso de Grandezas Incrementais Frente à Influência Combinada do Carregamento, Resistência de Falta e SIR

Nos casos ATC4, ATC5 e ATC6, avaliam-se os benefícios da utilização de grandezas incrementais frente a diferentes situações de carregamento, resistência de falta e SIR, parâmetros estes que, quando combinados, conforme exposto no Capítulo 4, podem influenciar sobremaneira a função PC. Para as análises, os desempenhos dos elementos tradicionais de fase e de sequência são comparados com os respectivos elementos incrementais. Cabe ressaltar que os elementos incremental de sequência negativa e de sequência negativa são equivalentes, sendo apresentados em separado apenas por questões de padronização das figuras.

No caso ATC4, analisa-se uma condição de carregamento pesado, considerando  $\delta = -30^\circ$ . Nas Figuras 6.5(a) e (c), ilustram-se os contadores de fase e de sequência, respectivamente. Neste caso, nota-se que, embora a falta seja identificada, o contador da fase A pouco ultrapassa



**Figura 6.5.** Caso ATC4 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de carregamento pesado: (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência.

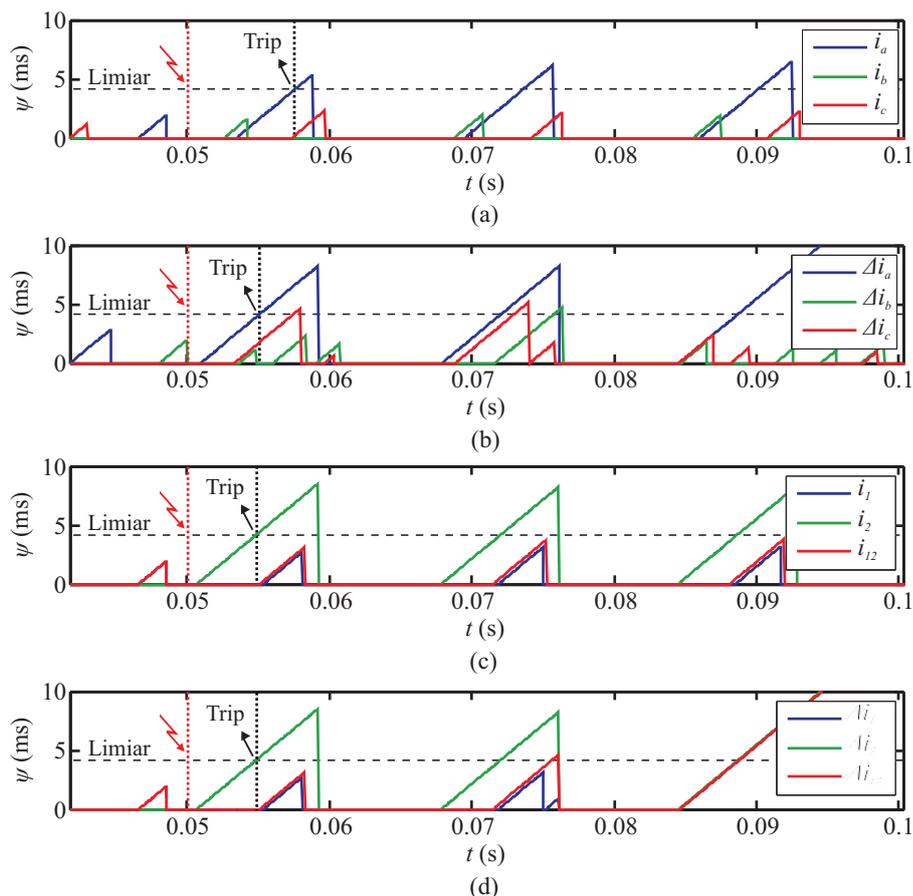
o limiar de operação, dando o indício de possível perda de sensibilidade em casos mais adversos. Por outro lado, a componente de sequência negativa permanece quase inalterada e continua atuando com uma boa margem de segurança.

Ao aplicar as grandezas incrementais no domínio do tempo, conforme ilustrado nas Figuras 6.5(b) e (d), observa-se que o contador relativo à fase A torna-se mais sensível e também detecta o curto-circuito. De fato, seu desempenho se aproxima do verificado para o elemento de sequência negativa, sem comprometer a segurança dos elementos das fases sãs.

O caso ATC5 representa uma situação de curto-circuito em um sistema com fonte fraca no terminal R. Para tanto, adotou-se  $SIR_R = 2,0$ , o qual, para a LT modelada de 200 km, é considerado um valor elevado (THOMPSON; SOMANI, 2015). De maneira semelhante ao que se verificou no caso de corrente de carga elevada, a fonte fraca na barra R reduz a contribuição de falta no referido terminal, o que, no caso ATC5, resultou em uma menor defasagem entre as correntes nos terminais L e R. Conforme ilustrado nas Figuras 6.6(a) e (c), embora o elemento da fase tenha atuado, este apresentou um atraso em relação à sequência negativa, novamente indicando um indício de possível perda de sensibilidade em casos mais adversos. Entretanto, ao empregar os elementos incrementais, conforme ilustrado nas Figuras 6.6(b) e (d), o atraso supracitado foi corrigido, promovendo uma detecção tão rápida quanto a de sequência negativa, porém com seletividade de fases.

No caso ATC6, avalia-se a influência da resistência de falta, a qual foi adotada como sendo  $R_f = 100 \Omega$  em conjunto com um elevado carregamento. De maneira semelhante ao que ocorre quando a corrente de carga é elevada, uma alta resistência de falta reduz ainda mais as contribuições de curto-circuito, podendo não ter a inversão da corrente em um dos terminais e resultar em um caso de *outfeed*.

Analisando a Figura 6.7, nota-se que os elementos de fase não foram sensibilizados, ficando a detecção da falta a cargo da sequência negativa. Percebe-se também que o elemento de sequência mista não foi sensibilizado, demonstrando sua susceptibilidade a erros decorrente da parcela do sinal relacionada à sequência positiva. Porém, ao empregar as grandezas incrementais, mesmo com contribuição de curto-circuito muito pequena, o elemento incremental da fase com falta é sensibilizado, mantendo os contadores das demais fases abaixo do limiar de operação.

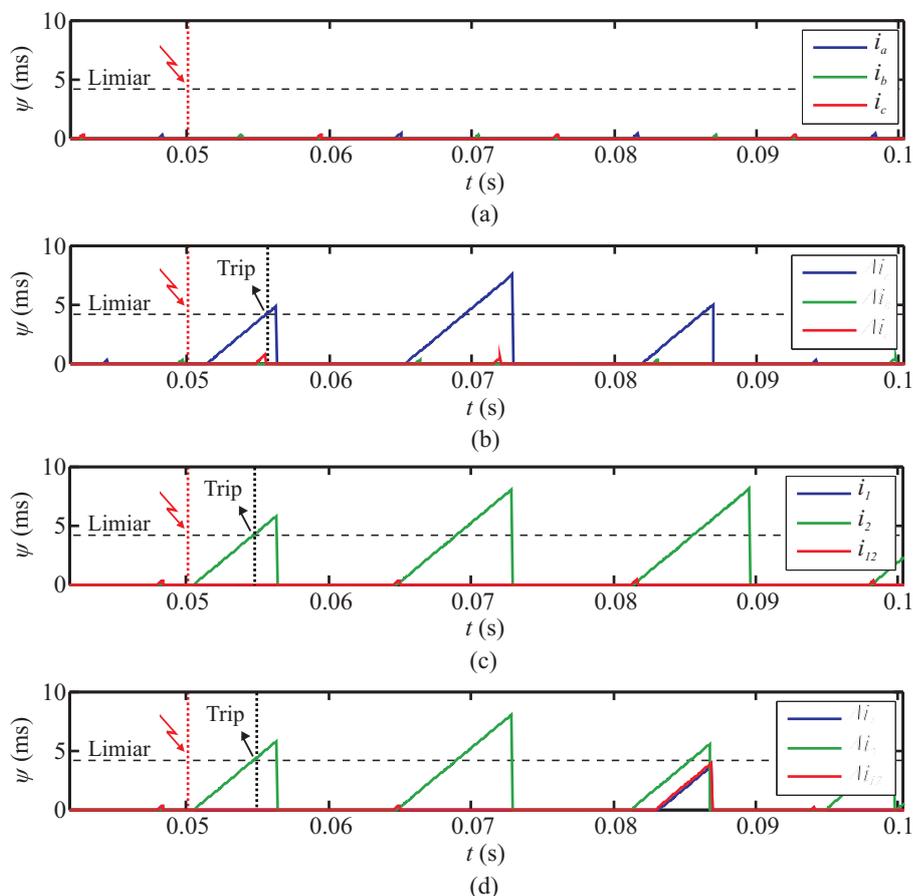


**Figura 6.6.** Caso ATC5 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de elevado valor de  $SIR_R$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência.

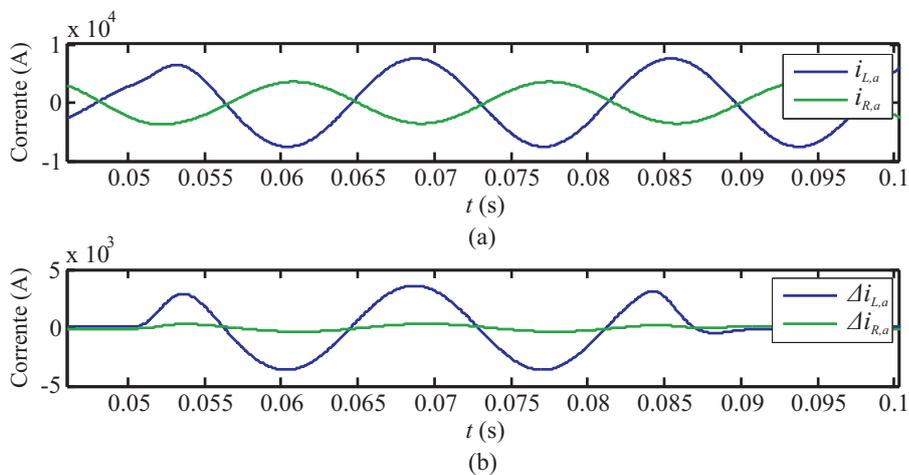
Na Figura 6.8(a) são ilustradas as correntes da fase A em ambos os terminais da linha em estudo. É possível observar que realmente há a ocorrência de *outfeed* neste caso, pois a corrente no terminal remoto não tem seu sentido invertido, ao contrário do esperado. Porém, para as correntes incrementais da fase A, conforme ilustrado na Figura 6.8(b), embora que com valores pequenos, a corrente no terminal remoto inverteu seu sentido ficando praticamente em fase com a corrente do terminal local. O baixo valor da corrente incremental no terminal remoto indica que não foi verificada uma variação significativa na corrente medida. Ainda assim, a pequena variação foi suficiente para garantir a correta atuação da proteção, visto que esta depende apenas das polaridades das amostras e não do valor instantâneo dos sinais.

Do exposto, conclui-se que o uso de elementos incrementais é benéfico para a função PC quando aplicada no domínio do tempo, visto que promove melhorias na sensibilidade da função sem comprometer a seletividade de fases da proteção. De fato, dos resultados obtidos, a sen-

sibilidade dos elementos incrementais foi similar à do elemento de sequência negativa, mesmo no caso mais adverso no qual se verificou uma situação de *outfeed*.



**Figura 6.7.** Caso ATC6 - Curto-circuito interno AT no meio da linha em condição de elevado valor de  $R_f$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos incrementais de sequência.

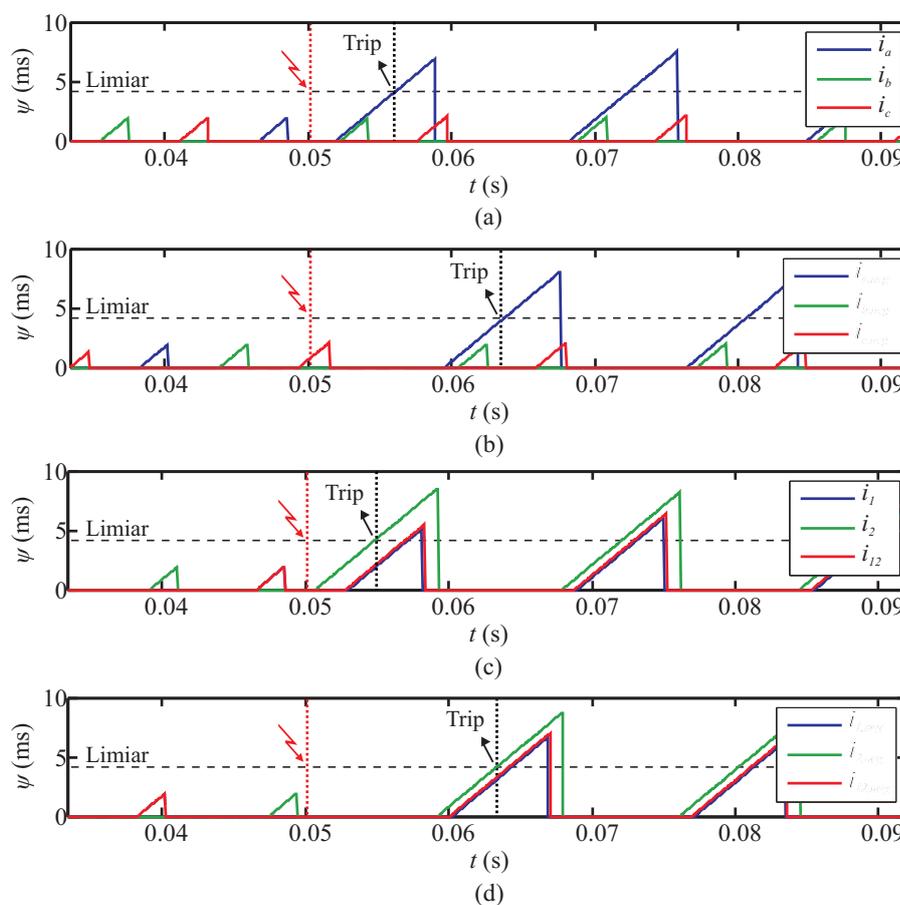


**Figura 6.8.** Caso ATC6 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Correntes incrementais da fase A medidas nos terminais local e remoto.

### 6.1.3 Casos ATC7 e ATC8: Avaliação da Técnica $+i/-i$ Frente à Influência do Ângulo de Incidência da Falta

Nos casos ATC7 e ATC8, avalia-se a aplicação da técnica  $+i/-i$ , conforme descrito no capítulo anterior. Para ambos os casos, são ilustrados os contadores dos elementos de fase e de sequência tradicionais, bem como da versão negativa destes. Assim, para as análises, a atuação da função PC usando a técnica  $+i/-i$  pode ser interpretada como sendo a composição dos elementos originais e negados, resultando em tempos de atuação que consistirão no menor verificado dentre os dois conjuntos de elementos. Nas Figuras 6.9 e 6.10, apresentam-se os resultados obtidos para os casos ATC7 e ATC8, respectivamente.

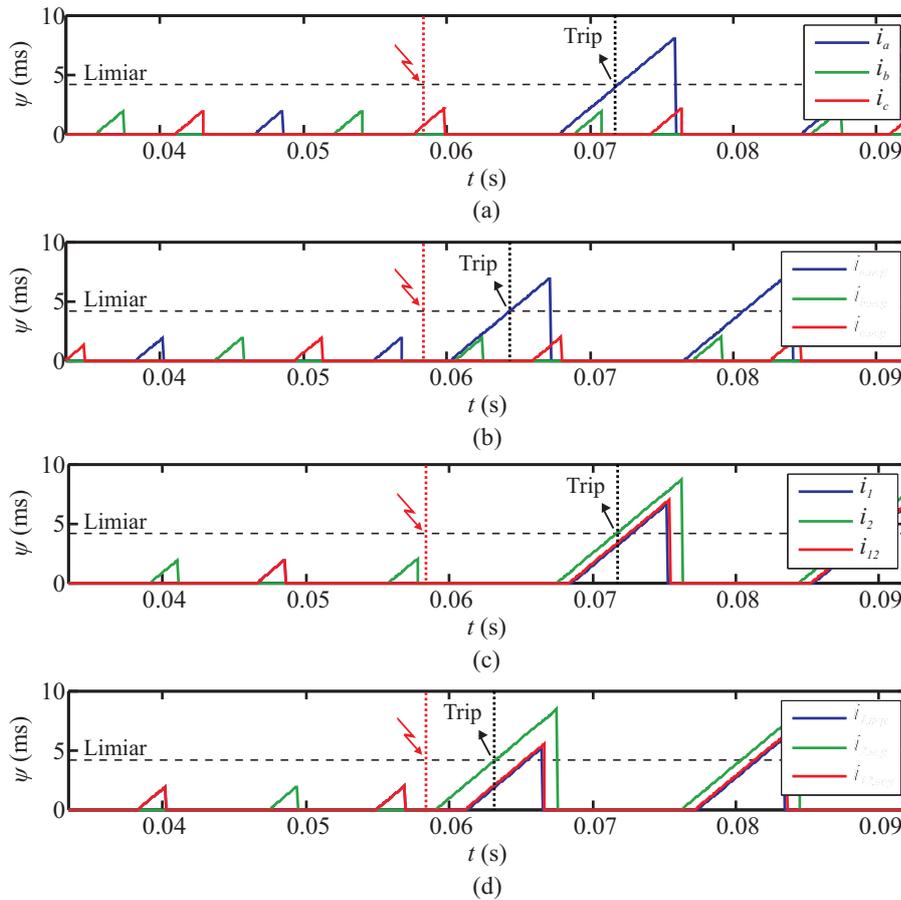
Os casos ATC7 e ATC8 foram escolhidos de forma a simular curtos-circuitos com ângulos de incidência  $\theta$  iguais a  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , respectivamente. Conforme demonstrado por Ribeiro *et al.* (2016), para esses valores de  $\theta$ , a componente CC de decaimento exponencial é bastante



**Figura 6.9.** Caso ATC7 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo  $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase negativos; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência negativos.

atenuada, não implicando em uma grande influência sobre a função PC. Porém, nos casos de  $\theta = 90^\circ$  e  $270^\circ$ , verificam-se situações nas quais os valores instantâneos das correntes medidas assumem polaridades positiva e negativa, respectivamente, nos primeiros instantes do curto-circuito, possibilitando assim analisar os benefícios da técnica  $+i/ -i$ .

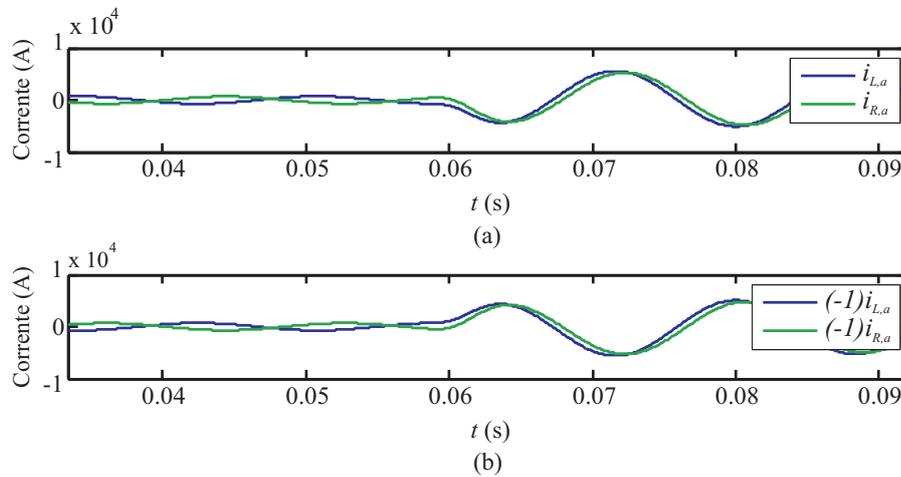
Do caso ATC7, nota-se que os elementos tradicionais atuaram rapidamente, sendo inclusive mais rápidos do que suas versões negativas. Tal comportamento já era esperado, visto que para  $\theta = 90^\circ$ , os valores das correntes nos primeiros instantes de falta são positivos, resultando em pulsos largos na saída da porta *AND* logo no início do distúrbio. Ainda sobre este caso, percebe-se que o uso em paralelo das versões negativas dos elementos não influenciou no tempo de atuação, visto que a proteção operaria de acordo com os elementos mais rápidos. Por outro lado, analisando o caso ATC8, percebe-se que os elementos de fase e de sequência tradicionais apresentam um atraso relevante quando  $\theta = 270^\circ$ . Tal fato é decorrente da polaridade negativa assumida pelas correntes nos primeiros momentos do distúrbio, o que resulta em pulsos estreitos



**Figura 6.10.** Caso ATC8 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo  $\theta = 270^\circ$ : (a) Elementos de fase; (b) Elementos de fase negativos; (c) Elementos de sequência; (d) Elementos de sequência negativos.

ou nulos na saída da porta *AND*, fazendo a proteção atuar com um atraso da ordem de 13 ms. Tal comportamento pode ser observado na Figura 6.11(a), onde são ilustradas as correntes da fase A medidas no terminal local e remoto.

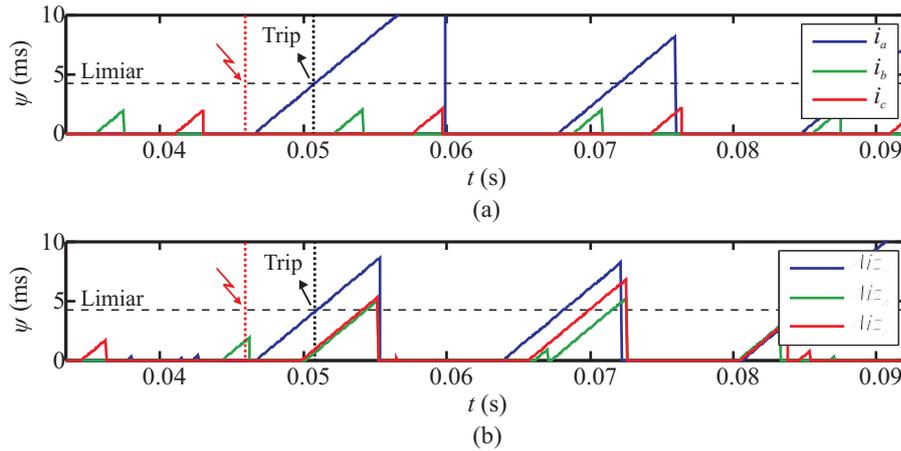
Da análise da versão negativa dos elementos no caso ATC8, nota-se que a atuação é mais rápida, mantendo as fases sãs abaixo do limiar de operação. Conforme demonstrado na Figura 6.11(b), observa-se que a versão negativa das correntes da fase A possui valores positivos nos primeiros instante de falta, resultando em uma atuação mais rápida. Assim, ao considerar o uso em paralelo dos elementos tradicionais e de suas versões negativas, o tempo de atuação é reduzido para aproximadamente 5 ms, sem comprometer a seletividade de fases.



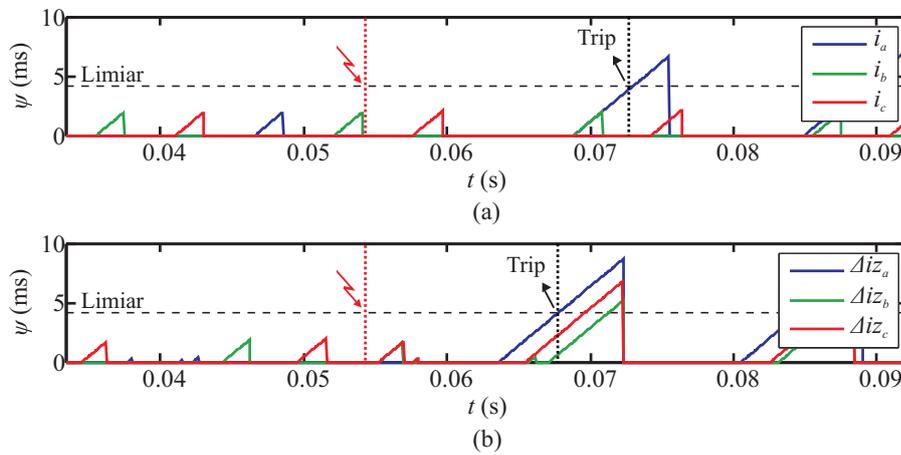
**Figura 6.11.** Caso ATC8 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Versões negativas das correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto.

#### 6.1.4 Casos ATC9 e ATC10: Avaliação do Uso da Corrente Réplica Incremental na Presença da Componente CC de Decaimento Exponencial

Nos casos ATC9 e ATC10, cujos resultados são ilustrados nas Figuras 6.12 e 6.13, respectivamente, avaliam-se casos de curto-circuito com componentes CC de decaimento exponencial, considerando a função PC aplicada por meio da análise das correntes réplica  $\Delta i_Z$ . Para tanto, foram simulados ângulos de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $180^\circ$ , resultando em componentes CC de decaimento exponencial relevantes com polaridades positiva e negativa, respectivamente (RIBEIRO *et al.*, 2016). Além disso, intencionalmente, a técnica  $+i/-i$  não foi aplicada, de modo a permitir a análise dos efeitos relacionados apenas à componente CC de decaimento exponencial.

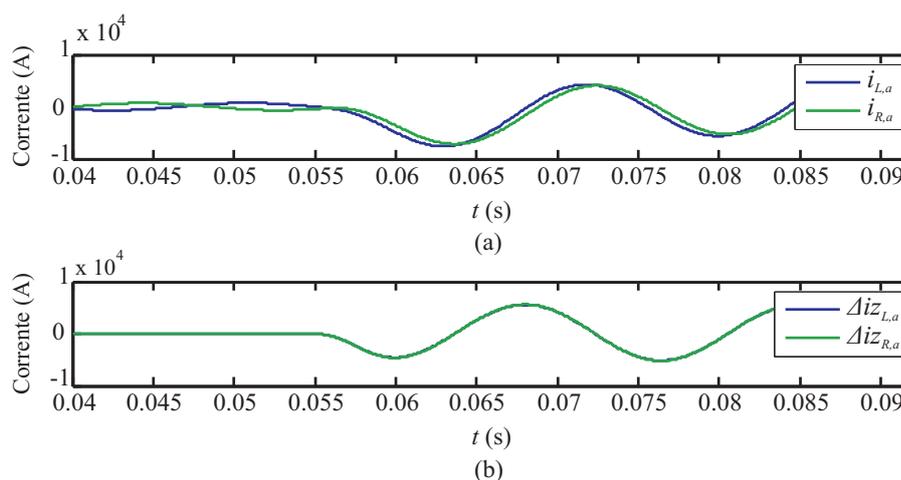


**Figura 6.12.** Caso ATC9 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo  $\theta = 0^\circ$ : (a) Elementos de fase tradicionais; (b) Elementos réplica incrementais.



**Figura 6.13.** Caso ATC10 - Curto-circuito interno AT no meio da linha com ângulo  $\theta = 180^\circ$ : (a) Elementos de fase tradicionais; (b) Elementos réplica incrementais.

No caso ATC9, conforme ilustrado na Figura 6.12, nota-se que, na presença de uma componente CC de decaimento exponencial positiva, não ocorreram alterações no tempo de atuação da proteção PC quando usados os elementos tradicionais e os relacionados às correntes réplica incrementais. De fato, visto que as correntes medidas assumem valores positivos logo após a incidência da falta, pulsos largos são rapidamente formados na saída da porta *AND*, fazendo a função PC atuar sem maiores atrasos. Entretanto, do caso ATC10, verifica-se a presença de uma componente CC de decaimento exponencial negativa conforme ilustrado na Figura 6.14, onde são ilustrados os sinais de correntes da fase A e correntes réplica incrementais da fase A. A existência de uma componente CC de decaimento exponencial negativa resulta em uma atuação dos elementos de fase tradicionais atrasada em relação à atuação dos elementos compostos pelas correntes réplica incrementais conforme a Figura 6.13. Assim, usando  $\Delta i_Z$ , atenua-se a



**Figura 6.14.** Caso ATC10 - (a) Correntes da fase A medidas nos terminais local e remoto; (b) Correntes réplica incrementais da fase A medidas nos terminais local e remoto.

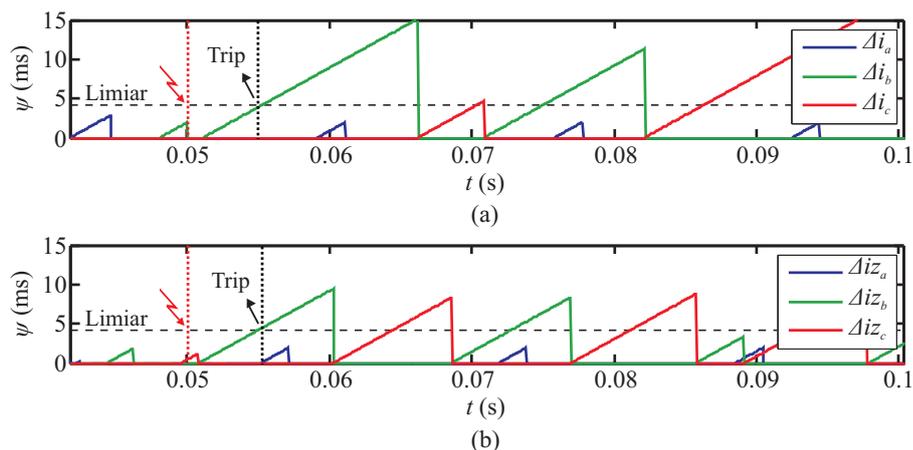
componente CC de decaimento exponencial, diminuindo o atraso na atuação da proteção como pode ser visualizado na Figura 6.14(b).

É importante notar que, ao calcular  $\Delta i_Z$ , necessita-se conhecer os parâmetros de sequência da LT monitorada (ver Capítulo 5). Em sistemas modernos de proteção, esses parâmetros são normalmente conhecidos, de forma que a sua utilização não é considerada uma limitação. Ainda assim, é importante perceber que, existindo imprecisões nos parâmetros da LT, os mesmos atuarão sobre a função PC como fontes de erro, podendo influenciar na atuação da proteção.

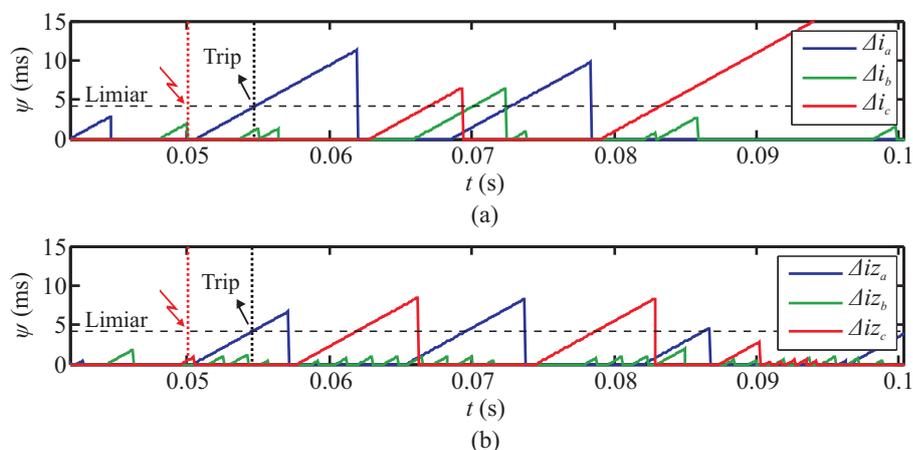
### 6.1.5 Casos ATC11, ATC12 e ATC13: Análise da Seletividade de Fases para Diferentes Tipos de Falta

Até o momento foram avaliados apenas curtos-circuitos monofásicos envolvendo a fase A. Para avaliar outros tipos de falta e, conseqüentemente, verificar a seletividade de fases da função PC, avaliam-se nos casos ATC11, ATC12 e ATC13 situações de curtos-circuitos dos tipos BC, CAT e ABC, respectivamente, considerando os desempenhos dos elementos de fase incrementais e de corrente réplica incremental. Com isso, espera-se comprovar que essas adaptações não comprometem a seletividade de fases da função PC, demonstrando que apenas as fases com falta são sensibilizadas durante os distúrbios.

Os resultados obtidos para os casos ATC11, ATC12 e ATC13 são apresentados nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17, respectivamente. Percebe-se que em todos os casos avaliados, apenas os



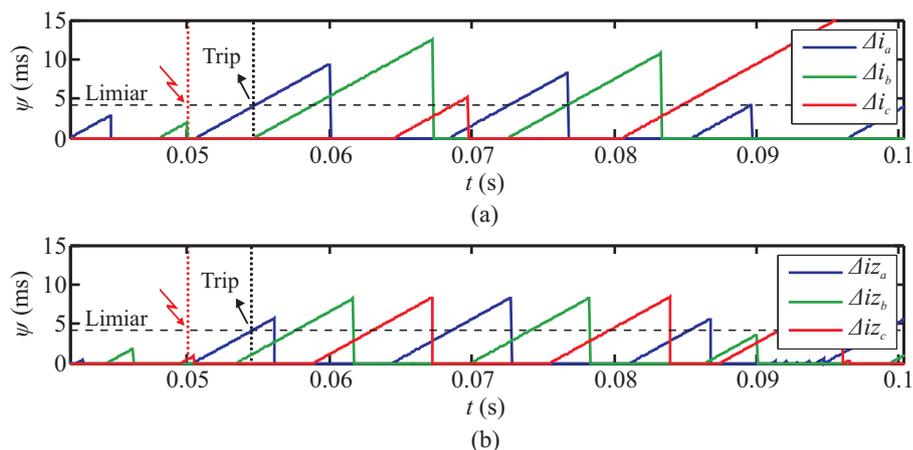
**Figura 6.15.** Caso ATC11 - Curto-circuito interno BC no meio da linha com ângulo  $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais.



**Figura 6.16.** Caso ATC12 - Curto-circuito interno CAT no meio da linha com ângulo  $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais.

elementos relacionados às fases com falta foram sensibilizados, ficando os demais contadores com valores inferiores ao do limiar de operação. Observa-se ainda que os elementos relacionados às fases com falta atuam em tempos diferentes, o que é um comportamento esperado, visto que para um dado ângulo de incidência  $\theta$  especificado tomando como referência a fase A, nas demais fases, o curto-circuito inicia em outros pontos das respectivas senoides, resultando em diferentes desempenhos. Entretanto, essas diferenças podem ser minimizadas usando a técnica  $+i/-i$  demonstrada anteriormente.

Dentre as constatações adicionais tomadas a partir da análise desses casos, é possível notar que existe uma vantagem dos elementos baseados nas correntes réplica incrementais sobre os baseados nos elementos incrementais puros. No caso ATC11, conforme a Figura 6.15, por exemplo, para uma falta BC, o uso de  $\Delta i_z$  apresentou apenas uma leve vantagem em relação ao



**Figura 6.17.** Caso ATC13 - Curto-circuito interno ABC no meio da linha com ângulo  $\theta = 90^\circ$ : (a) Elementos incrementais de fase; (b) Elementos réplica incrementais.

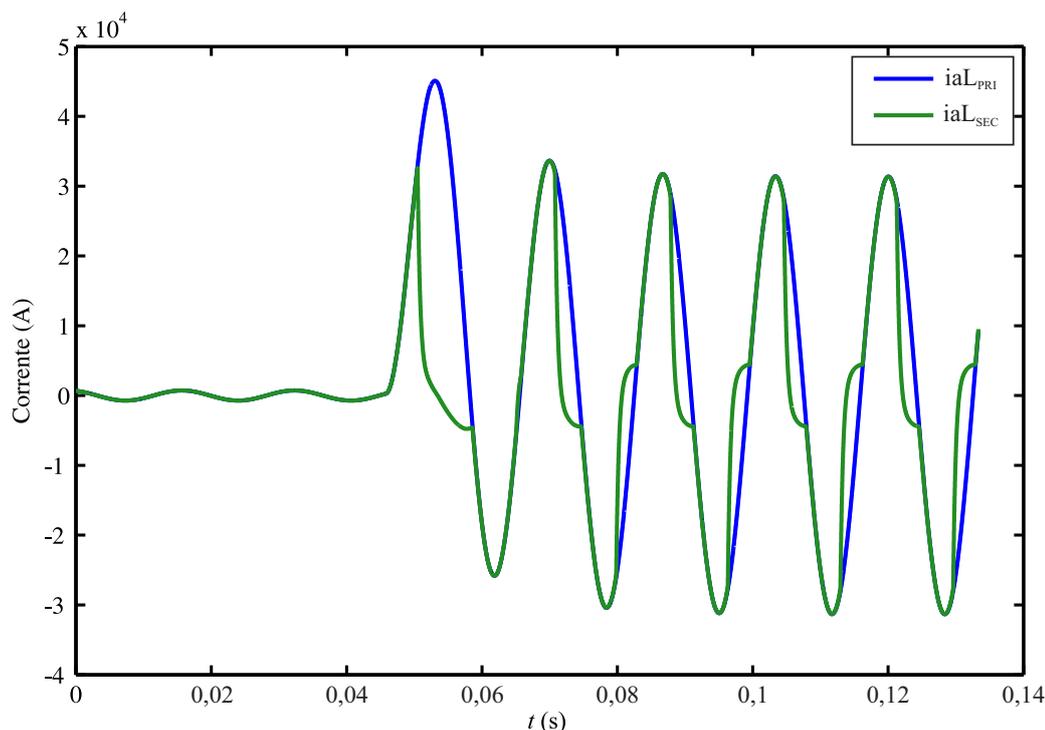
elemento incremental puro da fase B. Entretanto, para a outra fase com falta, ou seja, a fase C, o tempo de sensibilização da proteção reduziu significativamente. Este mesmo comportamento também é verificado nos casos ATC12 (Figura 6.16) e ATC13 (Figura 6.17), nos quais houve redução significativa dos tempos de atuação da proteção em pelo menos uma das fases com falta, mantendo os contadores das demais fases sãs abaixo do limiar de operação. Com isso, evidencia-se mais uma vez que o uso da corrente réplica incremental é benéfico para a função PC, desde que os parâmetros da linha monitorada sejam conhecidos com precisão.

### 6.1.6 Caso ATC14: Avaliação da Influência da Saturação do TC

Com o intuito de comprovar que o efeito da saturação de TCs não compromete o desempenho da função PC, apresenta-se no caso ATC14 uma situação de falta AT interna com saturação do TC instalado no terminal L. Para ilustrar os efeitos da saturação simulada no caso ATC14, apresenta-se na Figura 6.18 a corrente primária e a secundária referida para o circuito primário.

Da figura, nota-se que, embora a saturação do TC insira discontinuidades na corrente secundária, as polaridades verificadas ao longo do tempo não apresentam alterações relevantes, permitindo que a função PC identifique a condição de curto-circuito interno ou externo, se for o caso. Em verdade, em casos mais adversos de saturação durante curtos-circuitos internos, poderia haver um bloqueio da função PC no primeiro semiciclo da corrente após a incidência do distúrbio, o que não evitaria a atuação da proteção no semiciclo posterior.

Durante a avaliação do desempenho da proteção PC no caso ATC14, consideraram-se os

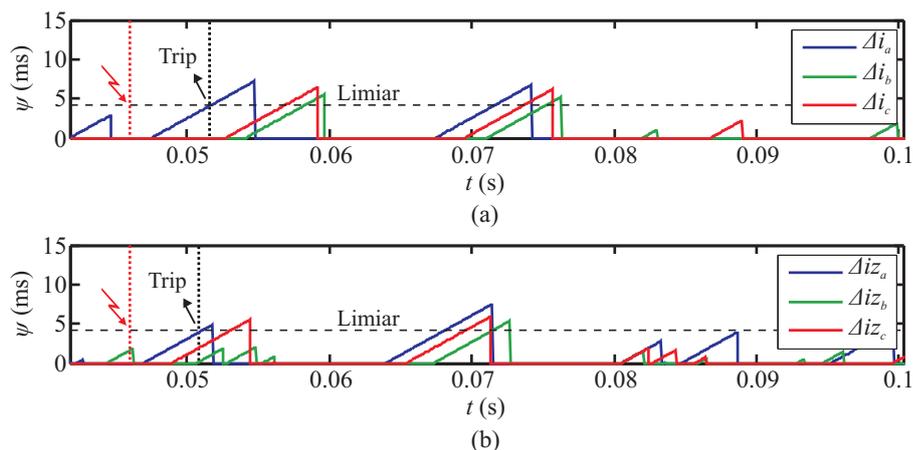


**Figura 6.18.** Correntes primária e secundária referida ao circuito primário durante a saturação de TC.

desempenhos dos elementos incrementais e de corrente réplica incremental, ambos de fase. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.19.

Do exposto, nota-se que todos os elementos atuaram conforme esperado. Cabe ressaltar que, dentre os elementos avaliados, o das correntes réplica incrementais foi o que demonstrou ser menos sensível ao curto-circuito, dando o indício de possibilidade de não atuação em situações de saturação mais adversas. Ainda assim, percebe-se que essa menor sensibilidade ocorre apenas nos primeiros instantes de falta, o que não comprometeria a atuação final da proteção. Ainda assim, pode-se dizer que as atuações foram satisfatórias, evidenciando a confiabilidade da proteção PC e dos elementos incrementais e de corrente réplica incremental mesmo em situações de saturação de TC.

Por fim, com base nos resultados obtidos durante as ATCs realizadas, foi possível concluir preliminarmente que: 1) A remoção do efeito capacitivo é benéfica, mas é limitada pela resposta em frequência dos TPCs; 2) O uso de grandezas incrementais melhora significativamente o desempenho da proteção PC; 3) A técnica  $+i/-i$  melhora sobremaneira o desempenho da proteção PC e não implica em um aumento relevante na complexidade do algoritmo; 4) O uso de correntes réplica incrementais é benéfico, desde que os parâmetros da LT monitorada



**Figura 6.19.** Caso ATC14 - Curto-circuito interno AT com saturação do TC: (a) Elementos incrementais de fase; (c) Elementos de corrente réplica incremental.

sejam conhecidos; 5) Não existe perda de seletividade de fases quando utilizados elementos incrementais e de corrente réplica incremental. Para validar os resultados obtidos, realizam-se também análises de sensibilidade paramétrica, através das quais uma vasta gama de casos de curtos-circuitos são simulados, viabilizando a identificação dos limites de sensibilidade da função PC com e sem as adaptações em estudo.

## 6.2 SIMULAÇÕES EM MASSA

Para melhor visualizar o comportamento da proteção PC frente a diferentes cenários de falta, usando o ATP, realiza-se nesta seção a simulação em massa de curtos-circuitos no sistema ilustrado na Figura 4.1. Durante as análises, a proteção PC será implementada considerando apenas os elementos de fase e sequência tradicionais, bem como alguns dos elementos que demonstraram ter melhor desempenho durante a avaliação dos casos de ATC. O objetivo dessa análise é validar as constatações realizadas até então, elencando as adaptações mais indicadas para aplicações fundamentadas no princípio da comparação de fases.

Para realizar as simulações em massa, construiu-se uma base de dados com arquivos para simulação no ATP que contemplam inúmeros cenários de curto-circuito. Na base criada, considerou-se a variação cruzada de parâmetros como tipo de falta, carregamento, SIR no terminal remoto, localização da falta, ângulo de incidência da falta e resistência da falta, resultando em 13500 cenários distintos. Assim como nos casos pontuais avaliados na seção anterior,

adotou-se  $SIR_L = 0,1$  e as tensões dos terminais L e R iguais a  $1\angle 0^\circ$  pu e  $1\angle \delta$  pu, respectivamente, sendo  $\delta$  o ângulo de carregamento a ser variado. Na Tabela 6.2, apresentam-se os valores adotados para cada um dos parâmetros de simulação que foram variados.

**Tabela 6.2.** Variáveis analisadas na ASP.

Parâmetro	Valores Adotados
$\delta$	$-40^\circ, -30^\circ, -20^\circ, -10^\circ$ e $-5^\circ$
$d$	0,1 pu, 0,2 pu, ... , 0,8 pu e 0,9 pu
$R_f$	0 $\Omega$ , 25 $\Omega$ , 50 $\Omega$ , 75 $\Omega$ e 100 $\Omega$
$SIR_R$	0,1, 0,2, ... , 0,9, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0
$\theta$	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ e $180^\circ$

Visando a avaliação da função PC em termos de desempenho, para cada caso simulado, avaliou-se o tempo de operação da função PC quando utilizados: elementos de fase e de sequência tradicionais, elementos de fase e de sequência com remoção do efeito capacitivo, elementos incrementais de fase com e sem a técnica  $+i/-i$  e elementos de corrente réplica incremental com a técnica  $+i/-i$ . Cabe ressaltar que, quando se fala em elementos de sequência, considera-se a atuação mais rápida dentre a sequência positiva, negativa e mista. Do mesmo modo, ao considerar os elementos aplicados em conjunto com a técnica  $+i/-i$ , conforme explicado anteriormente, considera-se a atuação mais rápida dentre os elementos originais e suas versões negativas. Na Figura 6.20, apresentam-se os resultados obtidos, os quais são ilustrados por meio de um polígono de frequência acumulada, gráfico este que permite relacionar o percentual máximo de casos simulados com o tempos de *trip* da função PC. Adicionalmente, os resultados são analisados por meio de gráficos de dispersão, através dos quais é possível visualizar diferenças nos tempos de operação quando do uso de diferentes elementos na função PC.

Dos resultados obtidos, percebe-se nitidamente que os elementos incrementais de fase com e sem a técnica  $+i/-i$  e os elementos baseados nas correntes réplicas incrementais com a técnica  $+i/-i$  apresentam um desempenho melhor se comparados com os demais elementos avaliados. Nota-se ainda que os elementos de fase tradicionais, com e sem a remoção do efeito capacitivo, apresentam desempenhos muito parecidos conforme pode ser observado no gráfico de dispersão ilustrado na Figura 6.21(a), onde a grande maioria dos pontos estão em cima ou próximos à reta 0 % (operação sem adição nem decréscimo de tempo na atuação). O mesmo é verificado para os elementos de sequência tradicionais, com e sem a remoção do efeito capacitivo, conforme

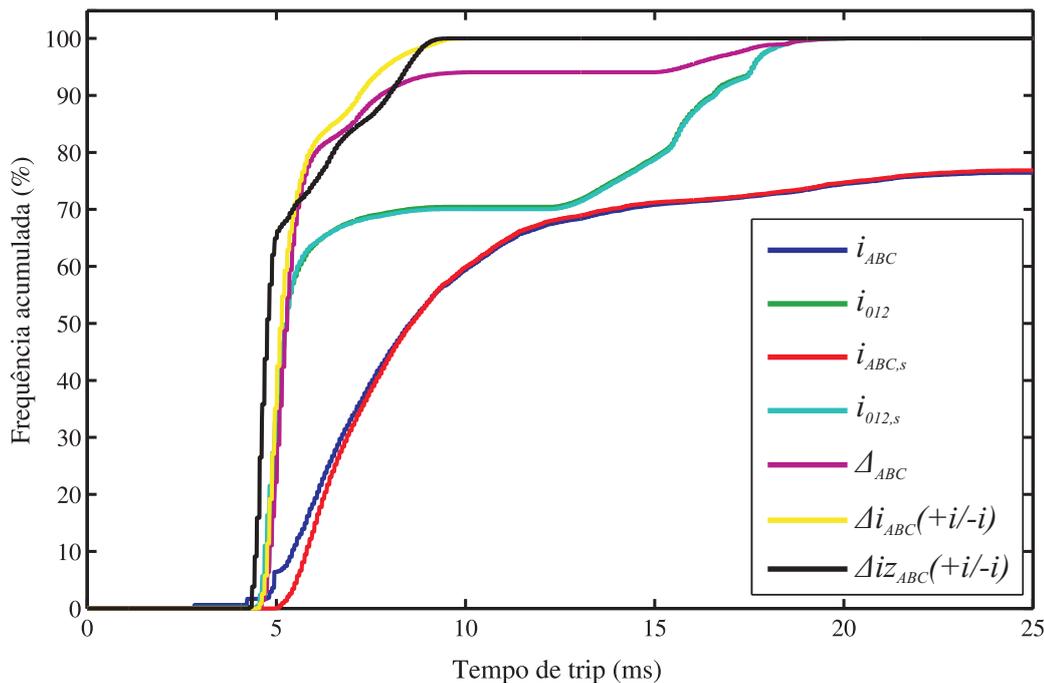


Figura 6.20. Análise de sensibilidade paramétrica da função PC.

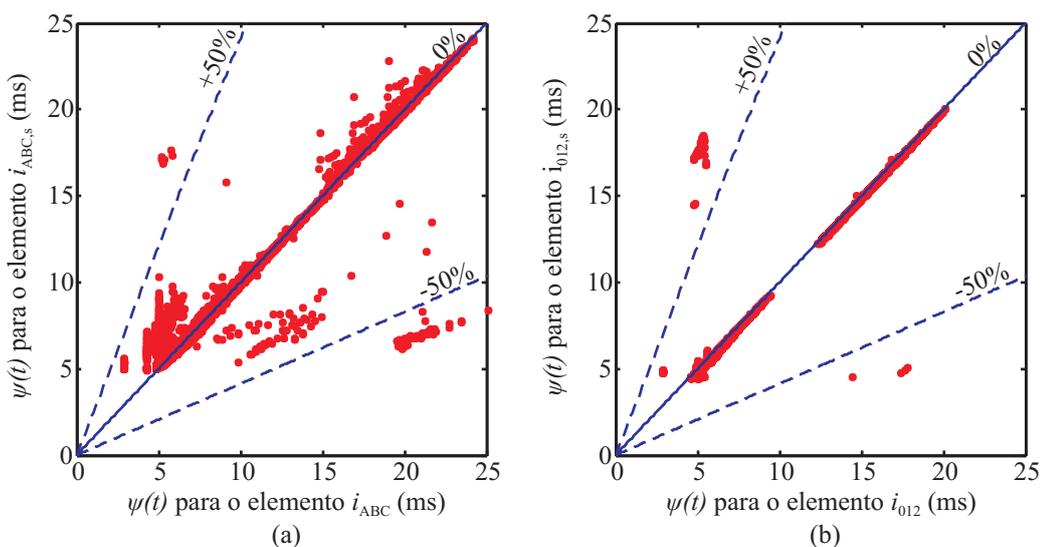


Figura 6.21. Resultados comparativos entre os elementos baseados em: (a) Correntes de fases com e sem o efeito capacitivo; (b) Correntes de sequência com e sem o efeito capacitivo.

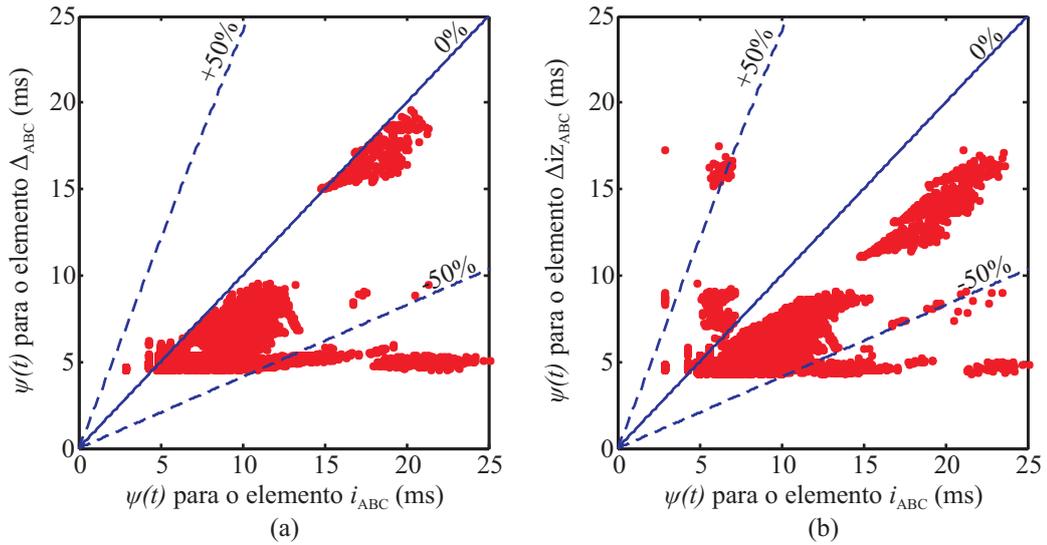
observado na Figura 6.21(b), comprovando que a correção da corrente capacitiva da LT não resulta em grandes ganhos no tempo de atuação quando a proteção PC é aplicada no domínio do tempo, mas sim, na segurança da proteção, conforme explicado nas seções anteriores. Os elementos de fase sem e com a remoção do efeito capacitivo deixaram de atuar em mais de 3000 casos, ou seja, em cerca de 22% do total de casos avaliados, os elementos de fase não foram sensibilizados.

Dentre os elementos com melhor desempenho, verifica-se que o uso das correntes réplica incrementais em conjunto com a técnica  $+i/-i$  apresenta uma ligeira vantagem em relação aos elementos incrementais puros com e sem a técnica  $+i/-i$ . De fato, para 70 % dos casos, os elementos  $\Delta i_{Z(+i/-i)}$  resultaram em tempos de *trip* da ordem de 4,2 ms, enquanto que os elementos  $\Delta i_{ABC}$  e  $\Delta i_{ABC(+i/-i)}$  atuaram em aproximadamente 5 ms para este mesmo percentual, conforme demonstrado na Figura 6.20. Ainda sobre esses elementos, nota-se que  $\Delta i_{Z(+i/-i)}$  e  $\Delta i_{ABC(+i/-i)}$  atingem o percentual de 100 % dos casos para tempos de *trip* de aproximadamente 9 ms, bem antes de  $\Delta i_{ABC}$ , que atinge 100 % dos casos em um tempo de aproximadamente 20 ms. Por meio deste resultado, evidencia-se o benefício da técnica  $+i/-i$  para a função PC. Além disso, é importante observar que os elementos de fase e sequência tradicionais sequer atingem a marca de 100 % dos casos, indicando que não houve atuação desses elementos para alguns dos cenários avaliados, mesmo quando aplicados em conjunto com o algoritmo para correção do efeito capacitivo da LT.

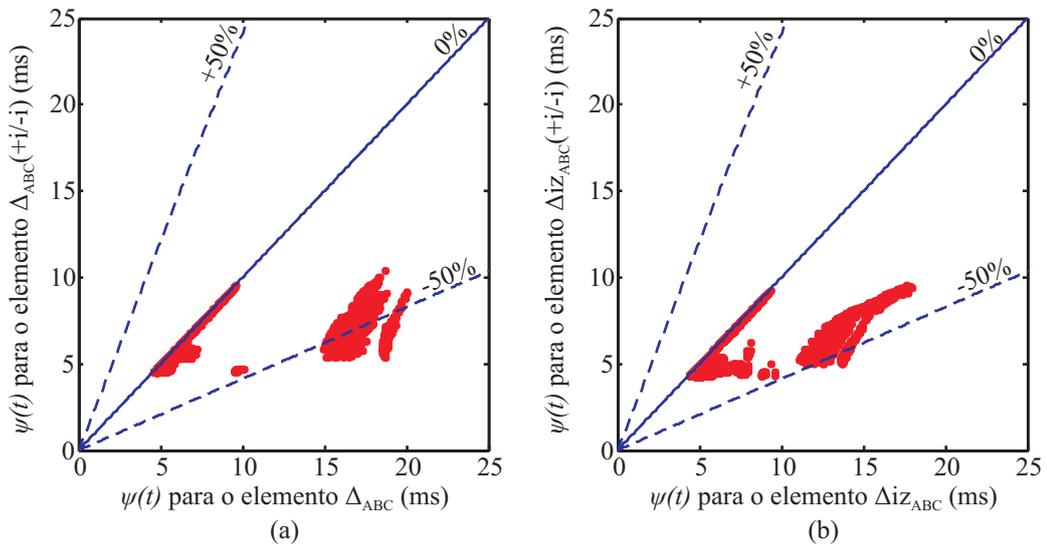
A análise comparativa entre os tempos obtidos usando elementos baseados em correntes incrementais de fase e usando elementos tradicionais de fase, nos casos em que a proteção usando ambos os elementos foi sensibilizada, é apresentada na Figura 6.22(a). Observa-se que a maioria dos pontos ficam na região abaixo da reta 0 % indicando que o uso de componentes incrementais de fase, além de melhorar a segurança da proteção, possui tempos mais rápidos. Além disso, observa-se da Figura 6.22(b) que, ao se utilizar componentes baseadas em corrente réplica incremental, poucos pontos não estão abaixo da reta 0 %, evidenciando a diminuição no tempo de atuação da função PC utilizando grandezas réplica incrementais.

Os resultados obtidos para função PC com o uso da técnica  $+i/-i$  podem ser melhor observados na Figura 6.23, na qual são apresentados os resultados obtidos para os elementos incrementais de fase e corrente réplica incremental sem e com a técnica  $+i/-i$ . Observa-se que em todos os casos os tempos de atuação para função usando  $+i/-i$  foram iguais ou menores que os tempos sem o uso da técnica, o que corrobora com os resultados apresentados na Figura 6.20. Nota-se também que essa redução no tempo se aproxima da reta -50 %, indicando que, para esses pontos, os tempos foram reduzidos para valores de aproximadamente metade dos tempos obtidos sem o uso da técnica  $+i/-i$ .

Por fim, dos resultados apresentados neste capítulo, pode-se concluir que a função PC



**Figura 6.22.** Resultados comparativos entre os elementos baseados em: (a) Correntes de fases e correntes incrementais de fases; (b) Correntes de fases e corrente réplica incremental.



**Figura 6.23.** Resultados comparativos entre os elementos baseado em: (a) Correntes incrementais de fase sem e com a técnica  $+i/-i$ ; (b) Corrente réplica incremental sem e com a técnica  $+i/-i$ .

apresentou o melhor desempenho quando da utilização dos elementos  $\Delta i_{Z(+i/-i)}$ , seguidos dos elementos  $\Delta i_{ABC(+i/-i)}$ . No entanto, no que se refere à aplicação prática das soluções, o uso de elementos incrementais  $\Delta i_{ABC(+i/-i)}$  se torna mais simples, visto que não requer o conhecimento dos parâmetros da linha a ser protegida. De fato, embora tenha sido verificada uma pequena vantagem dos elementos  $\Delta i_{Z(+i/-i)}$ , verifica-se que o desempenho dos elementos  $\Delta i_{ABC(+i/-i)}$  foi muito parecido, de modo que se identifica um melhor custo-benefício desses elementos nos quesitos simplicidade, sensibilidade, confiabilidade e número de ajustes.

# CONCLUSÕES

Nesta dissertação, apresentou-se a avaliação da proteção no domínio do tempo de LTs baseada na comparação de fases. Além disso, adaptações clássicas e propostas desenvolvidas com o objetivo de melhorar o desempenho da referida função também foram estudadas. Conhecida como proteção PC, do termo em inglês *Phase Comparison*, a proteção de LTs baseada na modelagem por comparação de fases foi muito utilizada no passado e ressurgiu como uma função promissora recentemente, especialmente pela sua sensibilidade e simplicidade.

As adaptações avaliadas ao longo do trabalho foram definidas com base na evolução histórica da função PC, analisada por meio de uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao tema, bem como nos resultados obtidos de análises de sensibilidade paramétrica da versão tradicional da referida função no domínio da frequência. Durante as análises, diversos cenários de falta em um sistema de 500 kV/60 Hz foram simulados no ATP, considerando variações nos valores de carregamento do sistema, SIR, localização de falta, ângulo de incidência e resistência de falta. Em seguida, com base nos limites de sensibilidade identificados, soluções voltadas para aplicações no domínio do tempo foram estudadas e avaliadas como possíveis adaptações da função PC, viabilizando a análise do custo-benefício de cada uma delas.

No total, 13500 casos de faltas foram considerados durante a avaliação das versões adaptadas da função PC. Dentre essas adaptações, considerou-se: um algoritmo para correção do efeito capacitivo de LTs; uma técnica para minimização dos efeitos causados pelo ângulo de incidência de falta, denominada técnica  $+i/ - i$ ; uso de correntes réplica incrementais para redução da influência da componente CC de decaimento exponencial; e uso de grandezas incrementais, para fins de redução dos efeitos de carregamento, SIR e resistência de falta, especialmente em situações de pequena contribuição de curto-circuito e em casos de *outfeed*.

Dentre os casos gerados, 14 cenários de falta foram escolhidos para fins de analisar transitoriamente o comportamento da função PC. Dos resultados obtidos nesses casos pontuais,

conclui-se que a função PC não é influenciada de forma significativa pela saturação dos TCs e que a correção do efeito capacitivo de LTs é benéfica mais para a segurança dos elementos de fase e de sequência do que no que se refere aos tempos de atuação da proteção. Além disso, por requerer medições de tensão, a remoção do efeito capacitivo da LT pode ser comprometida devido à resposta em frequência dos TPCs, limitando sua aplicação. Em relação ao uso de grandezas incrementais, pode-se dizer que os resultados foram satisfatórios. De fato, ao empregar elementos incrementais de fase, a função PC se tornou mais robusta a casos de *outfeed*, sem implicar em um aumento significativo da complexidade da implementação da proteção e mantendo a seletividade de fases. Similarmente, a técnica  $+i/-i$ , embora simples, demonstrou ser capaz de reduzir sobremaneira os tempos de atuação da proteção PC, especialmente em situações nas quais os valores instantâneos das correntes medidas assumem valores negativos nos primeiros instantes de falta. Por fim, o uso das correntes réplica incrementais se mostrou benéfico, promovendo, de uma forma geral, os menores tempos de atuação da função PC.

Para validar as constatações realizadas por meio dos casos pontuais, os 13500 casos gerados foram avaliados em conjunto, viabilizando uma análise global das adaptações estudadas. Dos resultados obtidos, conclui-se que o uso das correntes réplica incrementais e dos elementos incrementais em conjunto com a técnica  $+i/-i$  resultam nos melhores desempenhos da função PC. Entretanto, para calcular as correntes réplica incrementais, necessita-se dos parâmetros da LT monitorada, os quais, quando imprecisos, podem consistir em uma fonte de erros. Por isso, como conclusão final, indica-se o uso dos elementos incrementais em conjunto com a técnica  $+i/-i$ , versão esta que demonstrou ser sensível, segura e simples, requerendo apenas dois ajustes: corrente de *pick-up* e limiar de operação.

Como continuação dos estudos realizados neste trabalho, sugerem-se as seguintes atividades:

- Comparar o desempenho da função PC otimizada obtida neste trabalho com outras funções de proteção aplicadas no domínio do tempo;
- Avaliar a influência de diferentes modelos de TPCs sobre o processo de correção da corrente capacitiva de LTs;
- Adaptar a função PC otimizada obtida neste trabalho para aplicação em LTs de múltiplos terminais e em transformadores de potência;
- Desenvolver formas para reduzir ainda mais os tempos de atuação da função PC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB ASEA BROWN BOVERI. *Ultra High Speed Relay Type RALDA for EHV/UHV Transmission Line*. 1985. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/39da94cc0e69a24fc125755f00494dd6/RF617-014E\\_en\\_RALDA\\_Setting\\_calculations\\_for\\_Ultra\\_High-Speed\\_Line\\_Protection.pdf](https://library.e.abb.com/public/39da94cc0e69a24fc125755f00494dd6/RF617-014E_en_RALDA_Setting_calculations_for_Ultra_High-Speed_Line_Protection.pdf)>. Citado na página 23.
- ABB ASEA BROWN BOVERI. *REL 352 Numerical Phase Comparison Transmission Line Protection System*. 1998. Disponível em: <<http://www.abb.com/product/db0003db004281/c12573e70033041985256aa100637bba.aspx>>. Citado na página 24.
- AKIMOTO, Y.; MATSUDA, T.; MATSUZAWA, K.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Microprocessor based digital relays application in tepco. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 5, p. 2390–2398, May 1981. Citado na página 22.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of Electric Circuits*. Mc Graw Hill, 2009. Citado na página 43.
- ALMEIDA, W. G. de; FREITAS, F. D. *Circuitos Polifásicos*. Brasília, Brasil: FinaTec, 1995. Citado na página 12.
- ALTUVE, H. J.; SCHWEITZER, E. O. *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. Pullman, USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010. Citado 9 vezes nas páginas 3, 11, 14, 15, 18, 23, 24, 31, and 50.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado 5 vezes nas páginas 1, 6, 13, 16, and 22.
- BAINY, R. G.; LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A. Benefits of ccvt secondary voltage compensation on traveling wave-based fault locators. In: *2014 IEEE PES General Meeting / Conference Exposition*. 2014. p. 1–5. Citado na página 44.
- BENMOUYAL, G. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 621–630, Apr 1995. Citado 2 vezes nas páginas 26 and 51.
- BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J. Superimposed quantities: Their true nature and application in relays. In: *26th Western Protective Relaying Conference. Spokane Washington*. 1999. Citado na página 46.
- BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J. Superimposed quantities: Their true nature and application in relays. In: *26th Western Protective Relaying Conference. Spokane Washington*. 1999. Citado na página 47.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. São Carlos, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007. Citado na página 22.

- DAMBHARE, S.; SOMAN, S.; CHANDORKAR, M. Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 24, n. 4, p. 1832–1841, Oct 2009. Citado 3 vezes nas páginas 8, 16, and 44.
- DENG, X.; YUAN, R.; LI, T.; LIU, W.; SHEN, Y.; XIAO, Z. Digital differential protection technique of transmission line using instantaneous active current: theory, simulation and experiment. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 9, n. 11, p. 996–1005, 2015. Citado na página 44.
- 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*, v. 79, n. 3, p. 373–381, April 1960. Citado na página 22.
- EASTVEDT, R. The need for ultra-fast fault clearing. In: *Third Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane, WA: [s.n.], 1976. Citado na página 2.
- FITZGERALD, A. S. A carrier-current pilot system of transmission line protection. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 47, n. 1, p. 22–29, Jan 1928. Citado 4 vezes nas páginas 3, 6, 8, and 21.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 37, n. 6, p. 629–716, June 1918. ISSN 0097-2444. Citado na página 12.
- GE GENERAL ELECTRIC. *L60 Line Phase Comparison System*. 2005. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/l60.htm>>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 13, and 25.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. USA: CL - Engineering, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 12, 16, 43, and 44.
- GUO, Y.; KEZUNOVIC, M.; CHEN, D. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 3, p. 711–717, July 2003. Citado na página 17.
- GUO, Y.; KEZUNOVIC, M.; CHEN, D. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 3, p. 711–717, July 2003. Citado na página 25.
- HALMAN, T. R.; GOLDSBOROUGH, S. L.; LENSNER, H. W.; DROMPP, A. F. A new carrier relaying system. *Electrical Engineering*, v. 63, n. 8, p. 568–572, Aug 1944. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 21.
- HINGE, T.; DAMBHARE, S. Secure phase comparison schemes for transmission-line protection using synchrophasors. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 30, n. 4, p. 2045–2054, Aug 2015. Citado 5 vezes nas páginas 8, 9, 14, 16, and 25.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Raley Testing*. 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/>>. Citado na página 30.
- KASZTENNY, B.; SHARPLES, D.; CAMPBELL, B.; POZZUOLI, M. Fast ground directional overcurrent protection - limitations and solutions. In: *27th Western Protective Relaying Conference. Ontario Canada*. 2000. Citado na página 13.

- KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; UDREN, E. Rebirth of the phase comparison line protection principle. In: *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 2006. Citado 7 vezes nas páginas 3, 9, 10, 11, 14, 24, and 41.
- LEITE JR., E. J. S.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Performance evaluation of the phase comparison transmission line protection. In: 2016 IEEE PES GENERAL MEETING. Boston, US, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 9, 14, 16, 25, and 30.
- 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. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (VI SBSE). Natal, Brasil, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 15, 27, 44, 45, and 47.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program: Rule Book*. Herverlee, Belgium, 1987. Citado na página 30.
- LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S.; RIBEIRO, J. P. G. Avaliação de funções de proteção de linhas de transmissão aplicadas no domínio do tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (VI SBSE). Natal, Brasil, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 17, 27, and 44.
- MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: TEXAS A&M CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. Texas, USA, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 43 and 44.
- MOLAS, E. C. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no Plano Alfa: Modelagem e Simulação*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, nov 2014. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 14.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007. Citado na página 19.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 2, 2008. Citado na página 30.
- PHADKE, A.; HLIBKA, T.; IBRAHIM, M. A digital computer system for ehv substations: Analysis and field tests. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. 95, n. 1, p. 291–301, Jan 1976. Citado na página 26.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Inc., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 22.
- RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S. Influência da componente CC de decaimento exponencial sobre o desempenho de elementos direcionais aplicados no domínio do tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (VI SBSE). Natal, Brasil, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 44, 50, 51, 61, and 63.
- ROBERTSON, S. D. T.; MEIKLE, W. N. Solid-state, high-speed phase-comparison relay based on zero crossing theory. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. 87, n. 3, p. 764–770, Mar 1968. Citado na página 10.

- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado na página 1.
- SCHWEITZER, E.; D., H. Filtering for protective relays. In: *47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*. 1993. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3, and 25.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 2015. Citado 7 vezes nas páginas 2, 3, 25, 26, 44, 47, and 50.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: *42nd Annual Western Protective Relay Conference*. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 1, 3, 26, 27, and 45.
- SEL SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*. 2016. Disponível em: <<https://selinc.com/promotional/SEL-T400L/>>. Citado na página 27.
- SHOCKLEY, W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *The Bell System Technical Journal*, v. 28, n. 3, p. 435–489, July 1949. Citado na página 22.
- SIRISHA, A. N. R. L.; BHIDE, S. R. Incremental quantities based relays. In: *Power, Automation and Communication (INPAC), 2014 International Conference on*. 2014. p. 27–32. Citado na página 47.
- SUN, S. C.; RAY, R. E. A current differential relay system using fiber optics communications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 2, p. 410–419, Feb 1983. Citado na página 23.
- THOMPSON, M. J.; SOMANI, A. A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length. In: *Protective Relay Engineers, 2015 68th Annual Conference for*. 2015. p. 833–841. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 58.
- WEN, M.; CHEN, D.; YIN, X. Instantaneous value and equal transfer processes-based current differential protection for long transmission lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 27, n. 1, p. 289–299, Jan 2012. Citado na página 44.
- XUE, Y.; FINNEY, D.; LE, B. Charging current in long lines and high-voltage cables-protection application considerations. In: *39th Annual Western Protective Relay Conference*. 2012. Citado na página 16.
- YAOZHONG, G.; ANDING, W.; HUILIANG, T. Phase-comparison pilot relays using fault superimposed components. In: *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. APSCOM-91., 1991 International Conference on*. 1991. p. 833–838 vol.2. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 23, and 44.
- ZHANG, M.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; KLIMEK, A. A new current differential protection scheme for two-terminal transmission lines. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2007. Citado na página 8.
- ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. Berlin, Germany: Siemens, 2005. Citado na página 3.

---

ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Berlin, Germany: Siemens, 2010. Citado na página 3.