



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS BASEADA NA
POTÊNCIA INSTANTÂNEA**

FRANCIS ARODY MORENO VÁSQUEZ

**TESE DE DOUTORADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

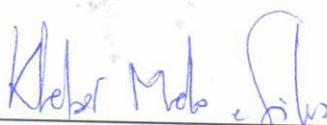
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS BASEADA
NA POTÊNCIA INSTANTÂNEA

FRANCIS ARODY MORENO VÁSQUEZ

TESE DE DOUTORADO 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 DOUTOR.

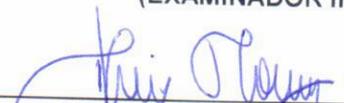
APROVADA POR:



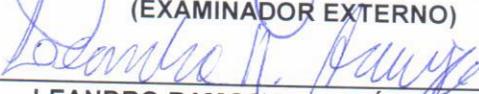
KLBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



DENIS VINÍCIUS COURY, Dr., USP/EESC
(EXAMINADOR EXTERNO)



LEANDRO RAMOS DE ARAÚJO, Dr., UFJF
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 09 de julho de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

VÁSQUEZ, FRANCIS ARODY MORENO

Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Potência Instantânea. [Distrito Federal] 2019. xii, 92p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Engenharia Elétrica, 2019).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Barramentos

2. Potência Instantânea

3. Proteção Diferencial

4. Zonas de Proteção

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VÁSQUEZ, F. A. M. (2019). Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Potência Instantânea, Tese de Doutorado, Publicação PPGEE-145/2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Francis Arody Moreno Vásquez

TÍTULO: Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Potência Instantânea.

GRAU: Doutor ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de 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 dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Francis Arody Moreno Vásquez

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

DEDICATÓRIA

Ao meu querido pai no céu
pela herança que me deixou:
uma forma simples de viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por ter me trazido ao Brasil e por ter me dado a oportunidade de conhecer pessoas excepcionais aqui.

Agradeço à minha amada esposa Jessyka, mulher da minha vida, pela paciência, por ser sempre incondicional e por rir junto comigo nos momentos mais incertos. Também, ao meu pequeno filho, Bernardo, por ser capaz de alegrar meus dias com um abraço sincero e ser a maior motivação da minha vida.

À minha querida e eterna mãe pelo seu incansável sacrifício, por ter aguentado firme e me mostrar como ser forte nos momentos mais difíceis da vida.

Ao meu irmão Luigui, por ter compartilhado comigo momentos inesquecíveis durante o tempo que tivemos que morar sozinhos.

Agradeço ao professor Kleber, por ter me dado a oportunidade de aprender com ele, não apenas tecnicamente, mas também na forma de como conduzir a vida, preservando a honestidade em todo momento. Ter trabalhado com ele foi, de fato, a maior honra da minha vida.

Não posso deixar de agradecer também ao meu orientador de mestrado, o professor Taygoara, assim como ao professor Antônio Brasil, por terem aberto as portas do Brasil para mim.

Finalmente, agradeço aos colegas do *LAPSE* pelo compartilhamento de ideias, experiências e aprendizados.

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se um algoritmo de proteção diferencial de barramentos baseado no conceito de potência instantânea. Com esta nova abordagem, a comparação das potências de operação e restrição pode oferecer tempos reduzidos de decisão, uma vez que o sinal a ser utilizado oscila com duas vezes o valor da frequência fundamental e está baseada nas lógicas de proteção diferencial tradicional, 1-de-1 e 2-de-2, comumente implementadas em relés comerciais. Por outro lado, para lidar de forma adequada com a saturação dos transformadores de corrente (TCs), causada por faltas externas severas, o método prevê a ativação de um reforço no sinal de restrição através da estimação de uma potência harmônica de segunda ordem. Para testar o algoritmo proposto, diversas faltas foram simuladas em um sistema de barra dupla de 230 kV, modelado no *Alternative Transients Program* (ATP), caracterizado principalmente por sua flexibilidade e reconfiguração dinâmica. Os resultados mostram que o tempo necessário para a nova função enviar o comando de *trip* diante de faltas internas, assim como para enviar um sinal de bloqueio diante de faltas externas, pode ser de fato reduzido pela metade, se comparada com a função de proteção tradicional, baseada em sinais de corrente. Também, ela mostra capacidade para ainda atuar diante de faltas evolutivas, externas para internas, através da lógica 2-de-2, o que torna o método mais confiável. Estas características sugerem que a técnica apresentada oferece aos TCs uma margem de operação em relação ao tempo mínimo de saturação, assim como a capacidade de se adaptar caso a natureza da falta mude. Finalmente, a proposta deste trabalho poderia ser vista como uma função de fácil implementação em relés comerciais, pela sua formulação simples, e sem a necessidade de um *hardware* muito sofisticado.

Palavras-chave: Barramentos; potência instantânea; proteção diferencial; zonas de proteção.

ABSTRACT

In this work, a busbar differential protection algorithm based on the instantaneous power concept is proposed. With this new approach, the comparison between the operating and restriction powers leads to reduced decision times, since the signal to be used oscillates with twice the fundamental frequency value and it is based by the traditional 1-out-of-1 and 2-out-of-2 differential protection logics, commonly implemented in commercial relays. On the other hand, to suitably deal with the saturation of current transformers (CTs), caused by severe external faults, the method provides the activation of a reinforcement in the restraint signal by adding a second order harmonic power. In order to test the proposed algorithm, several faults were simulated in a 230 kV double busbar system, modeled in the *Alternative Transient Program (ATPdraw)*, characterized mainly by its flexibility and dynamic reconfiguration. The results show that the time required for the new function to issue the trip command in case of internal faults, as well as to send a blocking signal to 1-out-of-1 logic in front of external faults, can be reduced by one half if compared with the traditional protection function. Also, the proposed method can operate in front of evolving, external to internal, faults through 2-out-of-2 logic, which makes the method more reliable. These characteristics suggest that the presented technique offers to the CTs a margin of operation in relation to the minimum time to saturate, as well as the ability to be adaptive in case of changing of the fault nature. Finally, the proposal of this work could be interpreted as a function of easy implementation in commercial relays, due to its simple formulation, and without needing a very sophisticated hardware.

Keywords: Busbars, instantaneous power, differential protection, protection zones.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Glossário	xii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos e Contribuições	6
1.4 Organização do texto	7
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	9
2.1 Síntese do Capítulo	16
Capítulo 3 – Fundamentos da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos	22
3.1 Aspectos Gerais da Proteção diferencial de barramentos de baixa impedância . .	23
3.1.1 Saturação de TCs	23
3.1.2 Resistência de falta	24
3.1.3 Ângulo de incidência da falta	25
3.2 Princípio de funcionamento da proteção diferencial de barramentos	26
3.3 Zonas de Proteção	30
3.3.1 Formação de uma lógica de zonas de proteção	30
3.3.2 Transferência da proteção	34
3.4 Síntese do Capítulo	36

Capítulo 4 – Algoritmo Proposto	37
4.1 Conceito da potência instantânea	37
4.2 Descrição Geral do Algoritmo Proposto	42
4.3 Descrição Detalhada do Algoritmo Proposto	43
4.3.1 Normalização das amostras	43
4.3.2 Filtro Mímico	44
4.3.3 Memória de Tensão	47
4.3.4 Cálculo da potência instantânea	49
4.3.5 Remoção da potência CC	49
4.3.6 Determinação das potências de restrição e operação	49
4.3.7 Restrição por harmônicas	50
4.4 Lógica de <i>Trip</i>	54
4.5 Síntese do Capítulo	56
Capítulo 5 – Análise dos Resultados	57
5.1 Descrição do Sistema de Potência Analisado	57
5.2 Simulações e Resultados	59
5.2.1 Curto-circuito trifásico	60
5.2.2 Curto-circuito bifásico	62
5.2.3 Curtos-circuitos externos	63
5.2.4 Falta <i>Cross-Country</i>	65
5.2.5 Curto-circuito evolutivo	66
5.2.6 Curto-circuito no vão de interligação entre as barras B1 e B2	68
5.2.7 Curto-circuito Interno Durante a Substituição de um Disjuntor	68
5.2.8 Energização de Transformador	71
5.2.9 Influência da taxa de amostragem	73
5.2.10 Influência do instante de falta em curtos-circuitos internos	74
5.2.11 Influência da resistência de falta em curtos-circuitos internos	76
5.2.12 Análise de sensibilidade paramétrica geral	79
5.2.13 Síntese do Capítulo	82
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros	83
6.1 Publicações	85
Referências Bibliográficas	86
Apêndice A – Lógica de zonas de proteção do sistema elétrico no ATPdraw	91

LISTA DE FIGURAS

1.1	Número de atuações corretas e incorretas dos sistemas de proteção instalados na rede operacional do Sistema Interligado (ONS, 2017b),(ONS, 2017c).	2
3.1	Sentido das correntes diante de uma falta no barramento.	26
3.2	Sentido das correntes diante de uma falta em um circuito conectado no barramento.	27
3.3	i_{op} e \bar{i}_{res} diante de uma falta interna.	28
3.4	i_{op} e \bar{i}_{res} diante de uma falta externa sem saturação de TC.	28
3.5	i_{op} e \bar{i}_{res} para uma falta externa com saturação de TC.	29
3.6	Lóbulos de operação baseada na corrente para a falta interna ilustrada na Fig. 3.3.	29
3.7	Lóbulos de operação baseada na corrente para a falta externa ilustrada na Fig. 3.5.	29
3.8	Zonas de proteção para um arranjo barra dupla e disjuntor simples a cinco chaves.	31
3.9	Procedimento para a retirada de disjuntor e transferência da proteção: Transferência de todos os vãos para a barra <i>B2</i>	34
3.10	Procedimento para a retirada de disjuntor e transferência da proteção do circuito <i>L4</i> conectado na barra <i>B1</i> : Fechamento de by-pass, liberação do disjuntor e transferência da proteção para o disjuntor <i>DJAMR</i>	35
4.1	Potência instantânea de um circuito com carga predominantemente indutiva. . .	38
4.2	Circuito elétrico com carga predominantemente indutiva	39
4.3	Sinais de tensão e corrente durante o chaveamento da carga no circuito da Figura 4.2.	39

4.4	Extração da potência ativa, $p(t)$ sem eliminação da componente DC do sinal de corrente.	40
4.5	Extração da potência ativa, $p(t)$ após a eliminação da componente CC do sinal de corrente.	41
4.6	Potência diferencial w_{dif} obtida com e sem a eliminação da componente CC do sinal de corrente.	41
4.7	Diagrama de blocos do algoritmo proposto.	43
4.8	Estimação fasorial da corrente de falta com e sem o filtro mímico.	46
4.9	Comparação dos sinais de saída do filtro mímico aplicado nas amostras e no fasor da corrente.	47
4.10	Atuação do filtro de memória de tensão diante de uma falta franca.	48
4.11	Sinal de corrente com TC saturado e projeção da corrente sem a saturação.	50
4.12	Procedimento de extração de $p(t)$ com o TC saturado.	51
4.13	Potência de operação e potência de restrição com e sem reforço com a segunda harmônica.	51
4.14	Lóbulos de operação diante da saturação do TC com e sem reforço do sinal de restrição.	52
4.15	Lógica de <i>trip</i> do algoritmo proposto.	54
4.16	Plotagem de w_{op} e \bar{w}_{res} diante de uma falta interna.	55
4.17	Lóbulos de operação obtidos a partir dos sinais de potência instantânea mostrado na Figura 4.16.	55
5.1	Sistema de potência modelo no programa ATPdraw: barra dupla, disjuntor simples a 5 chaves.	58
5.2	ω_{op}^* e i_{op}^* na fase A para uma falta trifásica.	61
5.3	ω_{op}^* e i_{op}^* na fase B para uma falta trifásica.	61
5.4	ω_{op}^* e i_{op}^* na fase C para uma falta trifásica.	61

5.5	Lóbulos e <i>flags</i> de operação da fase B em um curto-circuito interno bifásico BCT.	62
5.6	Lóbulos e <i>flags</i> de operação da fase C em um curto-circuito interno bifásico BCT	63
5.7	Curto-circuito externo sem saturação de TC. a) Função 87B; b) Função 87BP.	64
5.8	Curto-circuito externo com saturação leve. a) Função 87B; b) Função 87BP.	64
5.9	Curto-circuito externo com saturação severa. a) Função 87B; b) Função 87BP.	64
5.10	Operação diante de um curto-circuito externo sem saturação de TC	64
5.11	Operação diante de um curto-circuito externo com saturação moderada de TC	65
5.12	Operação de operação diante de um curto-circuito externo com saturação severa de TC	65
5.13	Lóbulos e <i>flags</i> de operação das funções 87BP e 87B na fase A.	66
5.14	Lóbulos e <i>flags</i> de operação das funções 87BP e 87B na fase B.	66
5.15	ω_{op}^* e i_{op}^* na fase A para uma falta AT com saturação de TC, que evolui para uma falta ABT interna.	67
5.16	ω_{op}^* and i_{op}^* na fase B para uma falta AT com saturação de TC, que evolui para uma falta ABT interna.	67
5.17	Curto-circuito no vão de interligação entre as barras a) Zona 1; b) Zona 2.	68
5.18	<i>Flags</i> de operação e dos detectores de distúrbio das funções 87BP e 87B nas zonas Z1, Z2 e Z12, durante um curto-circuito durante o paralelismo de barras	69
5.19	Lóbulos de operação, <i>flags</i> de operação das e estados lógicos dos disjuntores	70
5.20	Energização de transformador: sinais de potência e corrente das fases A,B e C.	71
5.21	Energização de transformador: variação das potências e correntes de restrição das fases A, B e C.	72
5.22	<i>Flags</i> de operação das funções 87BP e 87B nas três fases.	72
5.23	Resposta do detetor de distúrbio para diversas taxas de amostragem: a) Função 87BP; b) Função 87B.	73
5.24	Análise de sensibilidade paramétrica: variação do ângulo de incidência de falta de um curto monofásico	74

5.25	Lóbulos de operação nos casos 1 e 2 citados na Figura 5.24.	75
5.26	Lóbulos de operação nos casos 3, 4, 5 e 6 citados na Figura 5.24.	75
5.27	Primeiro lóbulo de operação no caso de uma falta interna com diferentes valores de resistência de falta a terra: a) com $SLP=0,3$; b) com $SLP=0,15$	76
5.28	Limite de resistência de falta para envio de <i>trip</i> diante de um curto-circuito AT em 100 ms	77
5.29	Limite de resistência de falta para envio de <i>trip</i> diante de um curto-circuito AT em 97,66 ms	77
5.30	Limite de resistência de falta para envio de <i>trip</i> diante de curtos-circuitos AT e BT em 97.66 ms	78
5.31	Limite de resistência de falta para envio de <i>trip</i> diante de curtos-circuitos ABT, BCT e CAT em 97.66 ms	78
5.32	Gráficos de dispersão dos tempos de operação do algoritmo proposto (t_{prop}) e da função 87B, baseada em nas amostras de corrente (t_{87B}): (a) faltas internas sem ruído; (b) faltas internas com ruído.	81
5.33	Gráficos de dispersão dos tempos de operação do algoritmo proposto (t_{prop}) e da função 87B, baseada em nas amostras de corrente (t_{87B}): (a) faltas evolutivas, externas para internas, sem ruído; (b) faltas evolutivas, externas para internas, com ruído.	81

LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo dos trabalhos de pesquisa: técnica utilizada.	17
2.2	Resumo dos trabalhos de pesquisa: casos avaliados.	18
2.3	Resumo dos trabalhos de pesquisa: aspectos avaliados/fatores influentes.	20
2.4	Resumo dos trabalhos de pesquisa: outras características, tempos de atuação e resistência de falta utilizados.	21
3.1	Valores típicos de resistência de malha de aterramento de subestações elétricas (IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, 2015).	25
3.2	Atribuição dos estados lógicos das zonas de proteção, $Z1$ e $Z2$, com as chaves seletoras.	32
3.3	Lógica de abertura dos disjuntores.	33
5.1	Parâmetros das linhas de transmissão.	58
5.2	Parâmetros dos transformadores de potência.	58
5.3	Parâmetros dos equivalentes remotos.	58
5.4	Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso.	60
5.5	Tempos de operação para uma falta interna trifásica em ms.	60
5.6	Parâmetros de falta usados na análise em massa.	79
5.7	Estatísticas dos tempos de operação em ms.	80
A.1	Atribuição dos estados lógicos das correntes	92

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude da componente de decaimento exponencial.
AMR	Amarre.
b	Barramento.
B_1	Barramento 1.
B_2	Barramento 2.
db	Decibel.
CC	Corrente contínua.
CTR	Relação de transformação de um transformador de corrente.
EFD	Detetor de falta externa.
f_{fund}	Frequência fundamental.
f_r^1	Flag de habilitação do circuito r da zona 1.
f_r^2	Flag de habilitação do circuito r da zona 2.
f_r^{12}	Flag de habilitação do circuito r da zona 12.
FDD	Detetor de distúrbio.
f_s	Frequência de amostragem do sinal
H	Filtro passa-altas.
Hz	Hertz.
i	Corrente instantânea.
i_{AC}	Componente de corrente alternada da corrente.

i_{CC}	Componente CC de decaimento exponencial.
I	Amplitude da corrente instantânea.
I_{dif}	Corrente diferencial
I_{NOM}	Corrente nominal secundária de um transformador de corrente.
i_{min}	Valor da corrente instantânea mínima de operação.
i_{prim}	Valor da corrente instantânea do lado primário do TC.
i_{sec}	Valor da corrente instantânea do lado secundário do TC.
i_{op}	Valor do elemento instantâneo de corrente de operação.
i_{op}^*	Valor da corrente de operação acima da corrente de restrição.
i_{res}	Valor do elemento instantâneo de corrente de restrição.
\bar{i}_{res}	Valor do elemento instantâneo de corrente de restrição suavizada.
i_u	Corrente secundária não normalizada.
I_{2h}	Módulo da corrente de segunda harmônica.
\hat{I}_{2h}	Fasor de corrente de segunda harmônica.
J	Janela de contagem de tempo para extração da potência CC.
k	k-ésimo instante de amostragem.
K_{comp}	Fator multiplicador para reforço do sinal de potência de restrição.
K_m	Ganho do filtro mímico.
k_s	limiar comparação da corrente taxa de variação da corrente de restrição.
M	Constante de decaimento do filtro de tensão.
ms	milissegundo.
N	Número de amostras.
PB	Paralelismo de barras.
PB	Condição de paralelismo de barras.

r	Circuito individual conectado a um barramento.
R	Número total de circuitos conectados a um barramento.
RTC	Relação de transformação do transformador de corrente.
s	Potência instantânea.
SLP_i	Slope, ajuste de sensibilidade da função 87B de corrente.
SLP_p	Slope, ajuste de sensibilidade da função proposta 87BP de potência.
t	Tempo.
T	Período.
TAP	Fator de normalização das correntes dos secundários dos TCs.
TC	Transformador de corrente.
TPC	Transformador de potencial capacitivo.
v	Tensão instantânea.
V	Amplitude da tensão instantânea.
v_{mem}	Tensão memorizada.
V_{NOM}	Tensão secundária de um transformador de potencial.
v_u	Tensão secundária não normalizada.
VTR	Relação de transformação de um transformador de potencial.
w_{op}	Potência de operação.
w_{op}^*	Potência de operação sem potência CC acima da potência de restrição.
w_{res}	Potência de restrição.
\bar{w}_{res}	Potência de restrição suavizada.
z	Zona de proteção.
Z_1	Zona 1.
Z_2	Zona 2.
Z_{12}	Zona 12, check-zone.

$1L$	Contagem em um lóbulo.
$2LC$	Contagem em dois lóbulos consecutivos.
1-de-1	Lógica de atuação 1-de-1.
2-de-2	Lógica de atuação 2-de-2.
87	Função diferencial.
87B	Proteção diferencial de barramento de corrente instantânea.
87BP	Proteção diferencial de barramento de potência instantânea.
α	Fator de desvanecimento da memória de tensão.
δ	Frequência angular digital.
θ_i	Ângulo do sinal de corrente.
θ_v	Ângulo do sinal de tensão.
θ_i	Ângulo do sinal de corrente.
θ_{2h}	Ângulo do sinal da segunda harmônica de corrente.
Φ	Ângulo imposto pelo filtro mímico.
θ_{vi}	Defasagem entre os sinais de tensão e corrente.
φ	Fase A, B ou C.
τ	Constante de tempo de decaimento da componente DC de um sinal.

GLOSSÁRIO

ABB	ASEA Brown Boveri
ANSI	American National Standards Institute
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BP	Chave seccionadora de by-pass.
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CS	Chave seccionadora
DC	<i>Direct Current</i>
DJ	Disjuntor
EMTP	Electromagnetic Transient Program
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HBV	Horário Brasileiro de Verão
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RAP	Relatório de Análise de Perturbação
SE	Subestação elétrica
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories
SIN	Sistema Interligado Nacional

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Nas últimas duas décadas, o acentuado crescimento de demanda elétrica tem propiciado a expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN), de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica. De fato, de acordo com as mais recentes projeções, prevê-se um crescimento anual do consumo com uma taxa de 3,8% até o ano 2022, que certamente deverá ser acompanhado por novos empreendimentos nos segmentos da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (ONS-CCEE-EPE, 2018). Esta tendência representa naturalmente um desafio para os sistemas de proteção, uma vez que eles precisam ser o suficientemente rápidos para evitar a propagação das faltas, seletivos para retirar apenas os elementos defeituosos, e seguros para não operar quando não requeridos.

Dentro da estrutura de um sistema de potência, os barramentos representam os nós nos quais os subsistemas de transmissão e distribuição se encontram para a redistribuição do fluxo de potência. De acordo com um levantamento feito com dados do ano de 2016 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), os sistemas de proteção de barramentos foram alguns dos menos solicitados, como ilustrado na Figura 1.1, sendo que o maior número de atuações aconteceu nas instalações com tensão de 230 kV e 500 kV. Contudo, em termos de porcentagem, o número de atuações incorretas é superior ao de outros elementos, sendo as principais causas os erros humanos, deficiências nas instalações de comando, erros de montagem, defeito na cablagem dos transformadores de corrente (TCs) e testes realizados de forma errada.

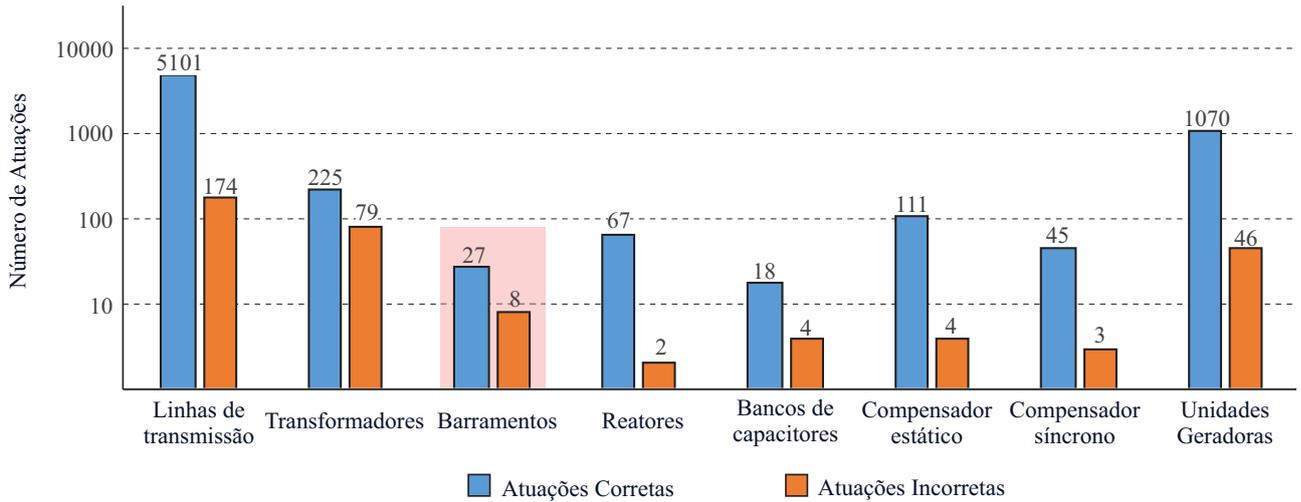


Figura 1.1: Número de atuações corretas e incorretas dos sistemas de proteção instalados na rede operacional do Sistema Interligado (ONS, 2017b),(ONS, 2017c).

Apesar desta estatística aparentemente alentadora, os barramentos são talvez os elementos mais críticos por terem níveis de curto-circuito elevados e porque a saída deles de operação ocasionaria um grande número de desligamentos forçados. Isso representa um enorme risco para a integridade das instalações elétricas, assim como para as pessoas, motivo pelo qual é mandatório que o esquema de proteção seja rápido o suficiente para eliminar o defeito. Ao mesmo tempo, é vital que ele não seja sensibilizado por faltas fora da sua zona de proteção para evitar a desconexão desnecessária dos circuitos conectados nele.

É justamente por estes motivos que a instalação de barramentos com estruturas mais particionadas, assim como a adaptação daquelas já existentes para adquirir esta característica, passaram a ser uma prioridade para melhorar a flexibilidade e, conseqüentemente, reduzir o impacto das faltas nos barramentos no sistema elétrico (ONS, 2015). Nesse contexto da modernização das subestações elétricas, os maiores desafios estão relacionados com o impacto nas instalações eletromecânicas pré-existentes, a facilidade e tempo da implantação, assim como a utilização de novas tecnologias. Inerentemente, estas modificações impactam nos esquemas de medição, proteção, comando, controle e supervisão (FRAGA *et al.*, 2017).

De acordo com o ONS (2017a), um sistema de proteção de barramentos deve ter sensibilidade diante de faltas internas, com ou sem resistência de falta, assim como imunidade para diferentes níveis de saturação dos TCs, decorrente de faltas externas severas. Para isso, requer-se que o esquema possua um elemento diferencial por fase, de baixa ou de alta impedância¹, ou por

¹Esquemas de proteção diferenciados pela impedância conectada nas entradas do relé que as correntes secundárias dos TCs devem percorrer (BEHRENDT *et al.*, 2010).

um elemento direcional, capaz de desligar apenas os disjuntores conectados à seção defeituosa do barramento. Adicionalmente, de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo *IEEE Power System Relaying Committee* (2009), é necessária a introdução de uma lógica de zonas de proteção, capaz de acompanhar as reconfigurações dinâmicas dos arranjos mais complexos.

Nesse contexto, a proteção diferencial de baixa impedância tem ganhado um lugar importante dentro dos esquemas de proteção propostos nos últimos anos. Tal fato deve-se à facilidade de inserir algoritmos de proteção em relés microprocessados, os quais facilitam o uso de TCs com diferentes relações de transformação e o uso direto dos sinais instantâneos no tempo ou em diferentes domínios, como o fasorial, *wavelets* ou das ondas viajantes. Dentro dessas possibilidades, apesar do conceito das ondas viajantes já ser atualmente utilizado nos relés mais modernos para a proteção de linhas de transmissão, como o relé T400L lançado pela empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), e que tenha sido foco de algumas pesquisas no âmbito da proteção de barramentos, ele ainda não tem sido base das lógicas de proteção utilizadas pelos fabricantes para esta aplicação específica. O mesmo acontece com novos algoritmos propostos que utilizam o domínio *wavelet* (SILVA *et al.*, 2018), que também poderiam oferecer tempos reduzidos de atuação, na ordem de microsegundos. Tecnicamente, os equipamentos mais atuais são capazes de funcionar perfeitamente com estes algoritmos, apesar das altas taxas de amostragem necessárias para a implementação deles representar um custo maior em relação aos relés que utilizam simplesmente valores instantâneos ou fasores.

No mercado atual, os fabricantes utilizam tipicamente os sinais de corrente, seja diretamente a partir das amostras ou, também, dos fasores estimados. Por exemplo, o relé fabricado pela ABB (2017) opera com os fasores obtidos a partir da Transformada Discreta de Fourier, aplicada nas amostras de corrente. Por sua vez, os relés dos fabricantes SIEMENS (2017) e TOSHIBA (2017) utilizam uma função baseada nos valores filtrados (fasores) para determinar as correntes de restrição e operação, e outra função utiliza os valores instantâneos para bloquear a primeira função em caso de faltas externas. Por outro lado, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (2018) utiliza os valores filtrados para calcular as grandezas de operação e restrição, assim como para formular o elemento direcional. Os valores instantâneos para este fabricante são apenas utilizados para a detecção rápida do distúrbio. Entretanto, os relés de ZIV APLICACIONES Y TECNOLOGIA (2019) baseiam toda sua operação nas amostras de corrente diretamente. Ou

seja, a lógica de proteção diferencial, o detector de distúrbio e o elemento de bloqueio direcional são feitos utilizando apenas valores instantâneos.

Esta diversidade de opções leva as empresas a se questionarem sobre o relé que deve ser adquirido para cobrir os requerimentos de proteção com um custo menor. Com essa perspectiva, as funções de proteção no domínio do tempo que utilizam diretamente as amostras de corrente podem representar uma melhor alternativa considerando a sua rapidez inerente, se comparados com as técnicas baseadas em fasores. Por outro lado, deve-se mencionar que os relés dos fabricantes citados também utilizam os sinais de tensão para verificar o surgimento de sobretensão ou de subtensão nas barras. Portanto, a partir dessas observações, pode-se formular um algoritmo de proteção baseado no sinal de potência instantânea, obtida a partir das amostras de corrente e de tensão, visto que ele ofereceria menores tempos de operação por possuir o dobro da frequência fundamental da corrente, que poderia ser implementado em relés comerciais devido à facilidade de aquisição de sinais dada pelos equipamentos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Por representarem os nós onde estes subsistemas elétricos são conectados, os barramentos são elementos que requerem especial atenção ao estarem submetidos a altos níveis de corrente e serem peças chave para a estabilidade dos sistemas elétricos. A perda repentina dos circuitos conectados nos barramentos pela atuação correta ou incorreta do sistema de proteção pode levar a sérios prejuízos econômicos, assim como à instabilidade do sistema, causando, no pior dos casos, grandes *blackouts*.

Um claro exemplo da gravidade destas consequências é a perturbação de 2009 que envolveu a subestação Itaberá e a linha de transmissão 765 kV Itabera-Ivaiporã, descrita no *RAP - Relatório ONS-RE-3-252/2009* (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2009), onde se diz:

"A perturbação teve início às 22h13min (Horário Brasileiro de Verão - HBV), com a incidência de um curto-circuito monofásico envolvendo a fase B da LT 765 kV Itaberá/Ivaiporã - Circuito 1, localizado no isolador de pedestal do filtro de ondas do terminal de linha na SE Itaberá. Cerca de 13,5 ms após a primeira falta ocorreu um segundo curto-circuito, também monofásico, envolvendo a fase C da LT 765 kV Itaberá/Ivaiporã - Circuito 2, localizado na

coluna de isoladores do vão de entrada na SE Itaberá. Aproximadamente 3,5 ms após a segunda falta ocorreu um terceiro curto-circuito novamente monofásico, envolvendo a fase A, localizado na barra A de 765 kV da SE Itaberá, incidindo também sobre a coluna de isolador pedestal."

Esta série de curtos-circuitos ocasionou uma sequência de aberturas de disjuntores que desencadeou a perda da linha de transmissão envolvida e desligamentos de 5 unidades geradores de Itaipu - 60 Hz, além de desconexões de outras LTs da interligação de diversas regiões do Brasil devido à sobrecarga e à perda de sincronismo entre unidades geradoras. Esta perturbação severa deixou o sistema em condições de oscilação de potência e ocasionou a interrupção de 24,436 MW de carga do SIN.

É nesse contexto que os algoritmos que são atualmente utilizados nos relés comerciais, além dos que vêm sendo desenvolvidos, que para evitar este tipo de problema, buscam oferecer rapidez, segurança e confiabilidade para enfrentar qualquer tipo de falta. Em particular, uma função de proteção de barramentos precisa uma especial atenção porque são vários circuitos conectados nele e a sua atuação deve cumprir com os requerimentos mencionados para evitar grandes perdas desnecessárias. Por exemplo, no caso acima citado, a mudança da zona onde o curto-circuito acontece, assim como as fases envolvidas, deve ser corretamente reconhecida pelo sistema de proteção do barramento. Isto significa que ele deve garantir segurança e permanecer inoperante durante o intervalo em que o curto-circuito ainda se mantém fora da sua zona de proteção, deve ter rapidez para identificar quando o curto-circuito acontece, de fato, dentro da zona de proteção, e ser seletivo para identificar as fases faltosas e os circuitos que devem ser desligados.

Ainda, cada um desses algoritmos possui certo grau de complexidade na sua formulação, requerimentos técnicos de *hardware* e diferentes tempos de decisão. A introdução de uma nova função de proteção diferencial de barramentos sempre é um desafio porque é necessário ter um conhecimento sólido das particularidades de cada arranjo de barramentos, fenômenos físicos relacionados com aos TCs, transformadores de potencial capacitivos (TPCs), e equipamentos conectados neles, que podem eventualmente sensibilizar o relé de proteção do barramento. Igualmente, é necessário satisfazer os requerimentos da norma (NBR 6856) e conhecer amplamente as diretrizes recomendadas pelo *IEEE Power System Relaying Committee* (2008,2009), pois elas são utilizadas pelos relés comerciais. Dentro deste último quesito, um aspecto de rele-

vância é o tempo mínimo que o relé precisa para garantir o seu correto funcionamento diante da eventual saturação do TC. Por exemplo, o relé 487-B da SEL garante o correto funcionamento do relé sempre que a saturação do TC não aconteça antes de 2 ms, já o relé da SIEMENS (2017) precisa de 3 ms. Logicamente, isto deve ser correspondido pelo correto dimensionamento do TC, o qual deve prever na sua curva de saturação uma tensão de joelho acima da requerida para uma determinada corrente de falta e impedância de carga. Nesse sentido, é importante que a função de proteção elimine a falta antes que o TC entre no intervalo de saturação.

É com esta visão geral que este trabalho está direcionado à formulação de um algoritmo baseado em um conceito ainda não explorado no contexto da proteção de barramentos, mas inspirado em lógicas de proteção amplamente utilizadas pelos fabricantes nos seus relés comerciais. Ao mesmo tempo, esta nova função é construída de forma a ter um desempenho superior se comparado com diferentes métodos já propostos na literatura, no que diz respeito a tempos de atuação para diferentes tipos de falta e diante da mudança de diversos parâmetros.

1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo principal do trabalho é fornecer uma nova função de proteção diferencial de barramentos, que esteja alinhada com as tendências atuais do mercado, respeitando as orientações dadas de instituições nacionais e internacionais e que mostre superioridade em relação a outras propostas nos diferentes aspectos abordados por elas. Para isso, os seguintes objetivos específicos podem ser listados:

- Descrever a lógica de seleção de zonas para arranjos de barramentos reconfiguráveis.
- Validar o desempenho do algoritmo simulando diversos casos pontuais de faltas internas.
- Avaliar o impacto da saturação de TC no algoritmo diante de faltas externas.
- Testar o algoritmo com diversas análises em massa diante de diferentes resistências de falta, ângulos de incidência e tipos de faltas.
- Mostrar uma comparação direta dos tempos de decisão do algoritmo proposto com o algoritmo que usa os valores instantâneos de corrente;
- Realizar uma comparação com outros métodos, de forma a provar que o método proposto pode, de fato, ser considerado como uma real alternativa de função de proteção.

Os resultados obtidos a partir da execução destes objetivos trazem à tona que a primeira contribuição direta deste trabalho é a introdução do conceito da potência instantânea em um algoritmo de proteção diferencial de barramentos. Embora esta ideia tenha sido utilizada em outras áreas da engenharia elétrica, deve-se ressaltar que a forma como o algoritmo proposto foi construído é diferente de qualquer outra proposta apresentada na literatura. Com este método, é possível ter um tempo de atuação duas vezes mais rápido que a função tradicional baseada nos sinais instantâneos de corrente, utilizada em diversos relés comerciais. Ainda, a lógica de operação da função desenvolvida neste trabalho está baseada justamente nas lógicas utilizadas pelos fabricantes. Por outro lado, é apresentado um novo método de reforço da restrição para faltas externas, utilizando uma potência de segunda harmônica. Por outro lado, este algoritmo representa uma garantia para evitar que o TC sature devido ao reduzido tempo de atuação. Isto dá maior margem de segurança para ele e, ao mesmo tempo, pode representar uma oportunidade para reduzir os requerimentos técnicos na sua construção. Ainda, a constante de tempo do sinal de restrição é, nestes casos, alterada para melhorar a confiabilidade do algoritmo diante de faltas evolutivas. Por sinal, a grande maioria dos algoritmos propostos não tem sido testados para este tipo de falta. Finalmente, a proposta desta nova função de proteção diferencial poderia ser considerada, por si mesma, uma contribuição para a pesquisa no cenário nacional pois existe uma escassez de propostas para esta aplicação específica.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado com a seguinte estrutura de capítulos:

- No Capítulo 2, apresenta-se de forma resumida o princípio de operação dos algoritmos de proteção propostos na literatura de alta relevância, assim como uma avaliação concisa delas em relação às suas vantagens e desvantagens.
- No Capítulo 3, aborda-se a fundamentação teórica da proteção diferencial de barramentos, dando ênfase aos diversos fatores que devem ser considerados pelos algoritmos de proteção programados em relés numéricos, o que inclui uma descrição das lógicas de atuação 1-de-1 e 2-de-2, tradicionalmente utilizados pelos relés comerciais.
- No Capítulo 4, descrevem-se os fundamentos da potência instantânea e descreve-se em detalhe o passo a passo do algoritmo proposto para a proteção de barramentos.

- No Capítulo 5, o sistema de potência a ser utilizado é descrito e diversos tipos de faltas são simuladas para a verificação do desempenho da função de proteção proposta.
- No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e as sugestões de trabalhos para o seguimento desta pesquisa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O advento dos relés microprocessados tem inspirado o desenvolvimento de novos algoritmos de proteção de sistemas de potência, capazes de reconhecer a natureza das faltas de forma rápida e de contornar situações adversas relacionadas com limitações técnicas ou fenômenos físicos inerentes aos equipamentos instalados. Nesse contexto, a literatura de alta relevância mostra que as técnicas de proteção de barramentos têm sido alvo de diversas pesquisas, mas ainda são poucas se comparadas com a proteção de linhas de transmissão ou transformadores, por exemplo. Todas estas estratégias propostas podem diferir no princípio de operação, na lógica de *trip*, nos sinais utilizados e na forma como eles são tratados. Por outro lado, a diversidade das faltas simuladas e parâmetros variados para testar estes algoritmos ajudam a obter um panorama geral das principais preocupações dos pesquisadores.

Com o objetivo de ganhar essa visão abrangente e melhor conduzir este trabalho, este capítulo apresenta de forma concisa os algoritmos desenvolvidos para a proteção de barramentos de baixa impedância. Para isso, as técnicas utilizadas são brevemente descritas e os principais resultados são mencionados. Além disso, são feitas algumas observações relacionadas às dificuldades que elas eventualmente poderiam ter para manter o bom desempenho. Adicionalmente, são apresentadas tabelas que servem como resumo para encontrar de forma rápida as principais características dos métodos propostos, assim como dos aspectos por eles avaliados. Vale a pena salientar que, embora este trabalho esteja focado em um novo esquema de proteção diferencial, considera-se conveniente avaliar e conhecer outros princípios de operação, pois eles representam igualmente uma contribuição para esta área.

Em uma das primeiras técnicas digitais deste século, Sachdev *et al.* (2000) utilizou as impedâncias equivalentes de sequências positiva e negativa do circuito equivalente de Thevenin de cada vão conectado no barramento, as quais são calculadas a partir dos fasores de tensão e corrente. Em um plano de impedância complexa, foi observado que diante de faltas internas,

as impedâncias vistas pelos relés sempre estão localizadas no terceiro quadrante. Já diante de faltas externas, a impedância do circuito no qual a falta acontece se posiciona sempre no primeiro quadrante, enquanto as impedâncias dos circuitos não faltosos permanecem no terceiro quadrante, inclusive quando ocorre a saturação do TC. Apesar da ideia trazer benefícios, os tempos de decisão são de aproximadamente $1/2$ ciclo e o algoritmo não apresenta uma forma de lidar com a perda total de informação das tensões. Também, a lógica de operação inclui o envio de um sinal de bloqueio total da operação em caso de faltas externas, o que representaria um sério problema caso a falta externa evoluísse para uma falta interna.

Por sua vez, Eissa (2004) implementou um esquema de proteção distribuída, utilizando uma espécie de funções de potência direcional. Para isso, uma potência incremental, chamada pelo autor como potência normal direcional, é calculada a cada amostra utilizando uma janela de dados de um ciclo. Adicionalmente, para compensar a saturação do TC, foi proposto usar duas funções direcionais capazes de discriminar faltas externas e internas. Elas são construídas a partir das tensões de pré-falta e da adição ou subtração das correntes de pré-falta em relação à amostra atual de corrente. Apesar do algoritmo ter tempos de atuação um pouco acima de $1/8$ de ciclo, ele pode demorar um pouco mais de um $1/4$ de ciclo para reconhecer que uma falta é externa quando a saturação é mais severa. Por outro lado, este esquema prevê a instalação de um relé por circuito e o comando de *trip* é enviado ao disjuntor apenas se a decisão de todos os elementos for a mesma.

Com uma abordagem mais abrangente, Guzman *et al.* (2005) implementou em um relé um elemento diferencial segregado por fase baseado em fasores. Em um plano operacional, uma corrente de operação e uma corrente de restrição são comparadas e um *slope* adaptativo é adotado para lidar melhor com faltas externas severas. Ainda, para dar maior segurança ao funcionamento do relé, um elemento direcional baseado nos mesmos fasores e um elemento diferencial instantâneo são utilizados em paralelo, sendo que uma falta é declarada como interna unicamente quando um destes elementos envia o sinal de *trip* junto com o elemento diferencial principal. No caso da proteção direcional, o vão no qual a corrente ultrapassa um valor predeterminado é definido como a referência e a sua direção é comparada com as dos circuitos restantes. Já o elemento instantâneo utiliza diretamente as amostras para determinar e comparar as variações das correntes de operação e de restrição. Adicionalmente, a lógica avançada

de zonas de proteção foi introduzida para acompanhar o dinamismo de arranjos mais flexíveis.

Kang *et al.* (2005) propôs complementar a proteção diferencial de corrente tradicional no plano operacional com um método de diferenças finitas de terceira ordem, capaz de reconhecer as descontinuidades na forma de onda da corrente secundária dos TCs. Com esta estratégia, é possível detectar os instantes inicial e final da saturação. Considerando que tanto uma falta externa como uma falta interna pode causar a saturação dos TCs, a estratégia consiste em comparar os sinais de *trip* e de bloqueio, sendo que o sinal de *trip* causado por uma falta interna sempre seria enviado antes de um sinal de bloqueio, que é enviado só após o instante inicial da saturação. Já no caso de uma falta externa, o sinal de bloqueio seria enviado, inibindo uma eventual atuação do relé. Uma modificação desta proposta foi feita por Kang *et al.* (2008), sendo que neste caso a mesma técnica de diferenças finitas é utilizada para estimar o fluxo magnético no núcleo e, a partir dele, determinar a corrente de magnetização em conjunto com a curva de magnetização, o que serviria para criar um algoritmo de compensação de corrente nos intervalos em que o transformador satura.

Uma abordagem totalmente diferente inclui a aplicação da teoria de aprendizado estatístico para construir uma técnica de identificação da zona da falta. Para isso, um conjunto de casos de treinamento é inicialmente criado a partir da combinação de diversos valores da impedância das fontes, ângulos de carga, resistência de falta e tipos de falta, etc. Com essa ideia, alguns pesquisadores têm focado seus esforços para desenvolver uma máquina de suporte vetorial (CHOTHANI *et al.*, 2011), capaz de produzir um modelo que classifica uma falta como interna ou externa dependendo de um treinamento *off-line* realizado previamente. Os resultados mostraram que esta estratégia leva a ter atuações corretas na maioria dos casos, mas a sua implementação em um relé pode se tornar impraticável devido ao esforço computacional requerido.

Para reduzir esta dificuldade, Chothani & Bhalja (2015) desenvolveram uma máquina de relevância vetorial, adotando uma metodologia de aprendizado Bayesiano esparso, a qual reduz o número de parâmetros utilizados durante o processo de diagnóstico. Por sua vez, Jena & Bhalja (2017) desenvolveram um esquema de identificação de zona de falta utilizando um classificador binário de regressão logística. Para isso, o treinamento *off-line* do relé é feito a partir de um detector de falta baseado no método da soma cumulativa, que utiliza neste caso os sinais de

corrente de um ciclo completo pós-falta. Diante de alguma ocorrência, os sinais adquiridos de todos os TCs ao longo de um ciclo completo são utilizados pelo modelo de regressão para definir a probabilidade da falta ser interna ou externa, de acordo com a base de dados de treinamento. Ainda que estas estratégias tenham demonstrado operar corretamente na maioria dos casos, os arranjos mais modernos, dinamicamente reconfiguráveis, podem representar um desafio maior para elas.

Alternativamente, Song & Zou (2015) definiram uma corrente superposta como a diferença entre uma amostra de corrente atual e outra um ciclo antes. Esta corrente estimada por fase é submetida a uma transformação modal antes de ser utilizada pela lógica de proteção. Uma vez conhecido que diante de uma falta interna, todas as correntes possuem a mesma polaridade, diferente de uma falta externa, na qual a polaridade de uma das correntes é contrária à das outras, o esquema de proteção estabelece que uma falta interna será identificada quando o sinal da integral das correntes superpostas transformadas dos circuitos seja igual ao número de circuitos conectados no barramento. Caso contrário, o evento é declarado como falta externa. Diferente das técnicas baseadas em ondas viajantes, este algoritmo precisa de uma frequência de amostragem relativamente baixa e os resultados revelam atuações corretas inclusive para resistências elevadas de falta e ângulo de incidência zero, com tempos de atuação menores de um ciclo, além de uma operação segura em caso de faltas externas severas.

Com o objetivo de evitar atuações indevidas devido à saturação do TC, Allah (2016) propôs adaptar a característica de operação da proteção diferencial tradicional através de uma lógica de detecção de saturação baseada no conceito de alienação. Nesse trabalho, isso significa avaliar o grau de variância entre a corrente secundária distorcida no terminal onde a falta externa aconteceu, ou seja, a corrente saindo do barramento, com a somatória das correntes dos circuitos restantes, ou seja, uma corrente equivalente entrando no barramento. O grau de variância entre ambos os sinais, caracterizado por coeficientes de alienação por fase, indica o grau e período de saturação, sendo que quanto maior a diferença entre os sinais, mais severa é a saturação. Através de simulações usando ATP/EMTP, os resultados mostram uma melhora da proteção diferencial tradicional, garantindo a confiabilidade diante de curto externos severos capazes de causar a saturação do TC. O maior problema deste algoritmo é que o cálculo do coeficiente de correlação pode se tornar inválido durante um ciclo após alguma mudança na topologia do

barramento, o que deixa o sistema desprotegido no caso de uma falta interna acontecer dentro desse intervalo.

Uma perspectiva diferente foi tomada a partir da evolução da tecnologia de processamento de sinais em relação à sua capacidade de captar sinais com frequências da ordem de alguns kHz até MHz. Tal avanço gerou a possibilidade de introduzir o conceito das ondas viajantes nos sistemas de proteção do sistema elétrico, o que representaria uma significativa melhora nos tempos de atuação dos relés, uma vez que elas podem representar a prova imediata de que uma falta ocorreu (PHADKE; THORP, 2009). Nesse contexto, Zou & Gao (2012) propuseram integrar as ondas viajantes, tanto positivas quanto negativas dentro um intervalo imediatamente após o instante da falta e determinar a sua relação para cada vão conectado. Este parâmetro é uma forma mais segura de determinar se a falta é interna ou externa, sendo que em caso de uma falta interna, as correntes captadas pelo relé têm sempre uma direcionalidade positiva, e, diante de uma falta externa, apenas o circuito faltoso possui uma direcionalidade negativa.

Uma das maiores dificuldades da transformada de Fourier no âmbito da proteção de sistemas de potência é a fiel representação dos sinais de correntes e tensões, os quais possuem, além da frequência fundamental, outras frequências que são inerentes às oscilações ou variações abruptas causadas por faltas ou manobras nos equipamentos. A existência destas componentes, junto com o desenvolvimento de relés microprocessados, capazes de trabalhar com altas taxas de amostragem, levou a pensar que se fosse possível caracterizar estes sinais de alta frequência, os tempos de operação poderiam ser bastante reduzidos em comparação aos algoritmos que se baseiam na componente fundamental.

Nesse contexto, a transformada *wavelet* aparece como uma ferramenta poderosa devido à sua capacidade de mostrar as altas frequências que compõem um sinal de corrente faltosa no domínio do tempo. Por exemplo, o trabalho apresentado por Eissa (2004) aplica uma transformada contínua utilizando como função base a wavelet Morlet. Os coeficientes obtidos são utilizados para definir as grandezas de operação e restrição e a partir delas construir uma condição de *trip*. Já o trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2018) contempla a aplicação de uma transformada *wavelet* redundante nos sinais de corrente, de forma a obter as grandezas de operação e restrição usando os coeficientes obtidos. Através da estimação da energia de tais coeficientes, as lógicas 1-de-1 e 2-de-2 são aplicadas de forma similar à proteção diferencial

baseado nas correntes. Assim como estes trabalhos, outras funções *wavelets* contínuas (EISSA, 2012; EISSA, 2013) e discretas (MOHAMMED, 2005; EISSA, 2014; VALSAN; SWARUP, 2007; GAFOOR; RAO, 2011) têm sido também utilizadas.

Com um intuito similar, Gil & Abdoos (2017) propuseram um esquema de proteção diferencial percentual a partir das magnitudes das correntes diferencial e de restrição, mapeadas nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente através da transformada S . Da mesma forma que a transformada *wavelet*, esta matriz S oferece informação completa da amplitude e da fase das componentes harmônicas em cada instante. De acordo com os autores, através deste tratamento, é possível estimar a energia de certas regiões que podem ser separáveis para ajudar a definir se a falta é interna ou externa. Estas observações serviram como base para realizar o treinamento de uma máquina de suporte vetorial com a qual foi possível obter um desempenho superior aos algoritmos propostos por Chothani *et al.* (2011), Chothani & Bhalja (2015).

Apesar de que os métodos que utilizam os transitórios para elaborar uma função de proteção oferecem tempos de decisão bastante reduzidos diante de faltas internas e externas com saturação de TC, o desempenho delas se vê condicionado à existência de informação característica de variações abruptas nos sinais, o que pode nem sempre acontecer tratando-se de faltas muito amortecidas causadas por ângulos de incidência de falta perto do zero. É por esse motivo que os fabricantes não implementam este tipo de função para trabalharem em modo *standalone*, mas sempre acompanhado por um elemento diferencial mais convencional (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC., 2016).

Pensando nessas limitações, Guo *et al.* (2015) aplicou a transformada Hilbert-Huang (HHT) nas ondas viajantes para reduzir o impacto do ângulo de incidência da falta. Diferente da transformada *wavelet*, que utiliza uma função mãe predeterminada, uma função base é gerada de forma adaptativa através de uma decomposição modal empírica e passa pela transformada Hilbert para, no final, obter um espectro tempo-frequência (HUANG; SHEN, 2014). No caso das ondas viajantes, a transformada HHT é utilizada para extrair as amplitudes instantâneas das ondas viajantes de todas as linhas. Dessa forma, estas amplitudes conseguem ser normalizadas, eliminando a influência do ângulo de incidência e da resistência transitória. Apesar do significado deste refinamento para as técnicas baseadas em transitórios, a extração dos sinais pode

ter certas complicações como a geração de informação espúria e o problema de *mode mixing*, causado pela existência de sinais intermitentes e ruídos, causando mistura de modos.

Um tipo de proteção diferencial que tem sido pouco utilizada é a proteção diferencial parcial, na qual um ou mais circuitos não são incluídos na conta interna do relé (*IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009*). Baseado neste princípio, Hossain *et al.* (2018) desenvolveu um esquema de proteção onde as únicas correntes que fazem parte da somatória são aquelas que superarem certo valor mínimo de corrente. Os resultados mostram que o algoritmo é seguro diante de faltas externas com saturação de TC e, apesar de não ser mais um aspecto tão crítico devido ao avanço da tecnologia, ainda possui um esforço computacional menor em relação outros algoritmos que utilizam a comparação direcional. Apesar desses benefícios, este método precisa de um tempo de quase meio ciclo para reconhecer uma falta interna com resistência de falta elevada, e ainda pode precisar de um ciclo inteiro para reconhecer uma falta evolutiva.

Um dos mais recentes trabalhos relacionados à proteção diferencial de barramentos está focado na aplicação do plano alfa generalizado (JENA; BHALJA, 2018), inicialmente formulado para proteção de linhas de transmissão multiterminais (MILLER *et al.*, 2010) e utilizado pela empresa SEL. Nesse método, duas correntes equivalentes, estimadas a partir das correntes reais circulando em cada vão, servem para determinar a corrente diferencial e a corrente de restrição, que devem ser iguais às calculadas da forma convencional. Apesar dos resultados mostrarem resultados interessantes, foi percebido que, devido ao número de circuitos conectados, existe uma grande possibilidade de acontecer uma troca do sinal de referência utilizado para calcular uma das correntes equivalentes, ocasionando um atraso na operação do relé, assim como uma certa instabilidade quando o TC satura no caso de uma falta externa severa.

A grandeza derivada imediatamente dos sinais tradicionais de correntes e tensão, utilizados nos algoritmos de proteção de barramentos e dos outros elementos que compõem um sistema elétrico, é a potência elétrica. Este conceito tem servido como base para a formulação de algoritmos de proteção de diferentes elementos do sistemas de potência. Por exemplo, (Darwish *et al.*, 2005) propôs um método de proteção diferencial segregado por fase para uma linha de transmissão que atua quando a diferença da potência, de natureza ativa ou reativa, entre os terminais local e remoto supera um valor mínimo previamente definido. Por sua vez, Kawady

et al. (2010) utilizou os conceitos de potência instantânea ativa e reativa, para a proteção de um sistema de transmissão com unidades geradoras quando as faltas acontecem durante oscilações de potência. Já, Almeida & Silva (2017) calculou a potência complexa nos terminais de uma linha e os valores incrementais em cada terminal são calculados de modo que a relação entre ambos seja comparada com um valor mínimo de *pick-up*. No que diz respeito à proteção de transformadores, Dantas *et al.* (2018) utilizou um algoritmo de proteção diferencial baseada na potência reativa como complemento de uma função de energia diferencial para cobrir os casos onde os afundamentos de tensão são mais severos. Em outra aplicação, Luo *et al.* (2016) observou que a potência reativa de um linha de transmissão em corrente contínua contém componentes transitórias no caso de um curto-circuito, que resulta em um grande fluxo desse tipo de potência. A partir disso, ele desenvolveu um algoritmo de proteção baseado na direcionalidade da potência reativa, de forma a reconhecer as faltas internas e externas à linha. Entretanto, Zhang *et al.* (2017) apresentou um esquema de proteção de sistemas elétricos com integração de fontes distribuídas com forte penetração utilizando uma potência reversa, baseada nas componentes de sequência de corrente e na direcionalidade da potência.

Este resumo de trabalhos que utilizaram a direcionalidade ou a amplitude da potência elétrica, ativa ou reativa, mostra que este conceito poderia ser utilizado com algum tratamento específico também para implementar um algoritmo de proteção de barramentos.

2.1 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi inicialmente realizada uma descrição dos principais algoritmos propostos na literatura em relação à proteção de barramentos. Cada um deles representa uma contribuição, mas também apresenta alguma dificuldade. Além disso, todos eles abordam diferentes aspectos e, por isso, foram organizadas as Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, que mostram em detalhe as técnicas utilizadas, assim como os casos abordados e os parâmetros que foram utilizados para testar tais algoritmos. A função proposta também foi listada nestas tabelas para compará-la com os demais trabalhos. Após a descrição desses trabalhos, foram citados outros que utilizaram a potência instantânea em diferentes aplicações, e foi constatada a inexistência de propostas no âmbito da proteção de sistemas de potência, e, portanto, de barramentos. Daí a evidente contribuição deste trabalho para esta área.

A Tabela 2.1 menciona a técnica utilizada por cada autor e que tipo de elemento é construído a partir dela, diferencial ou direcional. Aqui, pode-se notar uma leve maioria de algoritmos de proteção do tipo diferencial. As técnicas utilizadas são muito diversas, mas existe uma considerável quantidade de trabalhos que aplicam algum tipo de transformada *wavelet*. O algoritmo proposto é do tipo diferencial mas utiliza um conceito que ainda não foi explorado no contexto da proteção diferencial de barramentos: a potência instantânea.

Tabela 2.1: Resumo dos trabalhos de pesquisa: técnica utilizada.

Referência	Técnica utilizada	Tipo	
		Diferencial	Direcional
Sachdev <i>et al.</i> (2000)	Equivalente de Thevenin de sequencias + e -	✓	
Guzman <i>et al.</i> (2005)	Logicas 1 de 1 e 2 de 2	✓	✓
Eissa (2004)	Potência direcional		✓
Kang <i>et al.</i> (2005)	Diferenças finitas	✓	
Kang <i>et al.</i> (2008)	Diferenças finitas	✓	
Eissa (2004)	Transformada wavelet contínua	✓	
Eissa (2012)	Transformada wavelet contínua	✓	
Eissa (2013)	Transformada wavelet contínua	✓	
Mohammed (2005)	Transformada wavelet discreta	✓	
Eissa (2014)	Transformada wavelet discreta	✓	
Valsan & Swarup (2007)	Transformada wavelet discreta		✓
Gafoor & Rao (2011)	Transformada wavelet discreta	✓	
Silva <i>et al.</i> (2018)	Transformada wavelet discreta	✓	
Chothani <i>et al.</i> (2011)	Máquina de suporte vetorial	–	–
Chothani & Bhalja (2015)	Máquina de relevância vetorial	–	–
Gil & Abdoos (2017)	Máquina de suporte vetorial + transformada S	✓	
Zou & Gao (2012)	Ondas viajantes		✓
Guo <i>et al.</i> (2015)	Ondas viajantes		
Song & Zou (2015)	Correntes superpostas		✓
Allah (2016)	Coefficientes de alienação	✓	
Jena & Bhalja (2017)	Regressão logística		
Hossain <i>et al.</i> (2018)	Corrente de operação parcial	✓	
Jena & Bhalja (2017)	Plano alfa generalizado	✓	
Algoritmo Proposto	Potência Instantânea	✓	

A Tabela 2.2 mostra que todos os autores abordaram o problema das faltas externas com e sem saturação, e apenas um não testou o algoritmo proposto para faltas internas. Um cenário menos comum, como as faltas evolutivas, foi observado apenas por quatro autores. Por outro lado, apenas um trabalho tratou das faltas *cross-country* e outro autor avaliou o impacto da energização de um transformador. Este trabalho aborda todos os cenários mencionados como forma de provar que ele representa uma real alternativa como algoritmo de proteção.

Tabela 2.2: Resumo dos trabalhos de pesquisa: casos avaliados.

Referência	Casos avaliados					
	FI	FESS	FECS	FEV	ET	FCC
Sachdev <i>et al.</i> (2000)	✓	✓	✓			
Guzman <i>et al.</i> (2005)	✓		✓	✓		
Eissa (2004)	✓	✓	✓			
Kang <i>et al.</i> (2005)	✓		✓			
Kang <i>et al.</i> (2008)	✓		✓	✓		
Eissa (2004)	✓	✓	✓			
Eissa (2012)	✓	✓	✓			
Eissa (2013)	✓	✓	✓			
Mohammed (2005)	✓	✓	✓			
Eissa (2014)	✓	✓	✓			
Valsan & Swarup (2007)	✓	✓	✓		✓	
Gafoor & Rao (2011)	✓	✓	✓			
Silva <i>et al.</i> (2018)	✓		✓	✓		
Chothani <i>et al.</i> (2011)	✓	✓	✓			
Chothani & Bhalja (2015)	✓	✓	✓			
Gil & Abdoos (2017)	✓		✓			
Zou & Gao (2012)	✓	✓	✓			
Guo <i>et al.</i> (2015)	✓	✓	✓			
Song & Zou (2015)	✓	✓	✓			
Allah (2016)			✓			
Jena & Bhalja (2017)	✓	✓	✓			
Hossain <i>et al.</i> (2018)	✓	✓	✓	✓		✓
Jena & Bhalja (2017)	✓	✓	✓			
Algoritmo Proposto	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Legenda:

FI: Faltas internas;

FESS: Faltas externas sem saturação de TC;

FECS: Faltas externas com saturação de TC;

FEV: Faltas evolutivas, externas para internas;

ET: Energização de transformador;

FCC: Falta cross-country;

A Tabela 2.3 apresenta os fatores que podem influenciar na resposta dos algoritmos de proteção. Alguns dos trabalhos verificaram o impacto da frequência de amostragem e do ruído. Por outro lado, o instante da falta e a resistência de falta também foram abordados. Ainda, a severidade e o início da saturação de TC foram avaliados. Entretanto, outros autores têm conseguido reproduzir o fluxo residual que o núcleo de um TC pode ter, e observar o impacto dele na função de proteção. O algoritmo proposto foi testado para todas estas situações, mas não para os problemas do fluxo residual, variação de carga e impedância da fonte. O tópico do tamanho da janela não pode ser indicado como uma desvantagem do algoritmo proposto porque ele fez parte da avaliação de um algoritmo que utiliza fasores.

Finalmente, a Tabela 2.4 menciona se o trabalho foi teórico ou experimental, se o algoritmo utilizou os sinais de tensão ou de corrente, e se eles foram tratados no domínio do fasorial, do tempo ou no tempo e frequência simultaneamente. Ainda, na mesma tabela são mostrados os tempos de decisão de cada função, assim como o máximo valor de resistência de falta que foi utilizado para testar os algoritmos. Deve-se ressaltar que o tempo esperado para a atuação de um relé com o algoritmo proposto é menor que vários outros métodos e que pode reconhecer faltas com resistências de falta que, de acordo com as outras propostas, podem ser consideradas muito elevadas. Também, pode ser ressaltado que, utilizando técnicas que se baseiam no espectro tempo-frequência, alguns autores sugerem aproveitar os sinais de alta frequência disponíveis nos períodos transitórios imediatamente após o instante de falta. Eles certamente oferecem tempos muito reduzidos em relação a qualquer outro método baseado em amostras ou fasores. Porém, eles podem sofrer um prejuízo no seu desempenho em caso os transitórios forem muito amortecidos. Por este motivo, estes métodos que trabalham com altas frequências precisariam de qualquer forma de outro algoritmo que operasse em paralelo com ele para dar maior segurança aos elementos protegidos. Além disso, a necessidade de um *hardware* mais sofisticado permitiria a implementação mas encareceria o projeto.

Tabela 2.3: Resumo dos trabalhos de pesquisa: aspectos avaliados/fatores influentes.

Referência	Aspectos avaliados/Fatores influentes										
	FA	SS	TJ	IS	IF	RF	AI	FR	IM	VC	RU
Sachdev <i>et al.</i> (2000)	✓	✓	✓								
Guzman <i>et al.</i> (2005)											
Eissa (2004)	✓	✓		✓	✓	✓					
Kang <i>et al.</i> (2005)		✓						✓			
Kang <i>et al.</i> (2008)		✓		✓				✓	✓		
Eissa (2004)		✓		✓							
Eissa (2012)		✓		✓							
Eissa (2013)		✓		✓							
Mohammed (2005)		✓		✓		✓					
Eissa (2014)		✓		✓							
Valsan & Swarup (2007)		✓								✓	
Gafoor & Rao (2011)						✓	✓				
Silva <i>et al.</i> (2018)						✓	✓				✓
Chothani <i>et al.</i> (2011)					✓	✓	✓			✓	
Chothani & Bhalja (2015)					✓	✓	✓			✓	
Gil & Abdoos (2017)											✓
Zou & Gao (2012)						✓	✓				✓
Guo <i>et al.</i> (2015)						✓	✓				
Song & Zou (2015)		✓				✓	✓				
Allah (2016)		✓									
Jena & Bhalja (2017)		✓			✓	✓	✓				
Hossain <i>et al.</i> (2018)						✓					
Jena & Bhalja (2017)						✓					
Algoritmo Proposto	✓	✓				✓	✓				✓

Legenda:

FA: Frequência de amostragem;

SS: Severidade da saturação;

TJ: Tamanho da janela;

IS: Início da saturação;

IF: Impedância da fonte;

RF: Resistência de falta interna;

AI: Ângulo de incidência da falta;

FR: Fluxo remanescente;

IM: Indutância de magnetização;

VC: Variação de carga, ângulo de carga;

RU: Ruído;

Tabela 2.4: Resumo dos trabalhos de pesquisa: outras características, tempos de atuação e resistência de falta utilizados.

Referência	Trabalho		Sinais		Domínio			Tempo de decisão (ms)	Resistência de falta (Ω)
	SIM	EXP	TEN	COR	FAS	TEM	TEF		
Sachdev <i>et al.</i> (2000)	✓	✓	✓		✓			7.60	–
Guzman <i>et al.</i> (2005)	✓		✓	✓	✓	✓		–	–
Eissa (2004)	✓	✓	✓			✓		2.50	120
Kang <i>et al.</i> (2005)	✓		✓		✓			1.60	–
Kang <i>et al.</i> (2008)	✓		✓	✓	✓			1.70	–
Eissa (2004)	✓	✓	✓				✓	–	–
Eissa (2012)	✓	✓	✓				✓	–	–
Eissa (2013)	✓	✓	✓				✓	–	–
Mohammed (2005)	✓	✓	✓				✓	1.20	250
Eissa (2014)	✓	✓	✓				✓	–	–
Valsan & Swarup (2007)	✓	✓	✓		✓		✓	0.83	–
Gafoor & Rao (2011)	✓	✓	✓				✓	–	100
Silva <i>et al.</i> (2018)	✓		✓	✓			✓	0.26	–
Chothani <i>et al.</i> (2011)	✓	✓	✓			✓		–	–
Chothani & Bhalja (2015)	✓	✓	✓			✓		–	–
Gil & Abdoos (2017)	✓		✓				✓	5.00	–
Zou & Gao (2012)	✓	✓	✓			✓		3.0	200
Guo <i>et al.</i> (2015)	✓	✓	✓			✓		–	300
Song & Zou (2015)	✓	✓	✓			✓		2.5	500
Allah (2016)			✓			✓		–	–
Jena & Bhalja (2017)	✓	✓	✓			✓		–	15
Hossain <i>et al.</i> (2018)	✓	✓	✓	✓	✓			4.60	18.2
Jena & Bhalja (2017)	✓		✓		✓			5.00	100
Algoritmo Proposto	✓		✓	✓	✓	✓		2.08	383

Legenda:

SIM: Simulação computacional;

EXP: Implementação experimental;

TEN: Sinal de tensão;

COR: Sinal de corrente;

FAS: Fasores;

TEM: Tempo;

TEF: Tempo e frequência;

FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS

A implementação de um esquema de proteção para barramentos sempre representou um motivo de discussão devido ao número e custo dos TCs necessários para a sua implantação, assim como aos eventuais prejuízos que poderiam haver por atuações indevidas. Contudo, por se tratar de um elemento crucial para um sistema de potência, ele não pode ficar desprotegido perante as faltas, embora a probabilidade delas acontecerem seja muito reduzida. Nesse sentido, independente do princípio de operação, o sistema de proteção de barramentos deve ter como principais características (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009):

- Rapidez para extinguir a falta, reduzindo a possibilidade de gerar uma instabilidade no sistema de potência.
- Seletividade para desligar o menor número de elementos conectados no barramento para promover a extinção da falta.
- Segurança para não operar diante de faltas fora da zona de proteção do barramento.
- Sensibilidade para detectar faltas com transitórios amortecidos devido a ângulos de incidência perto do zero ou com resistência de falta elevada.

Contudo, estes objetivos dependem de vários fatores como o grau de flexibilidade do arranjo do barramento, as características técnicas dos TCs, a disponibilidade dos contatos auxiliares das chaves seccionadoras, assim como o custo e complexidade do esquema de proteção. Considerando estes aspectos, a proteção diferencial é o método mais comum pela sua sensibilidade, seletividade e rapidez (ZIEGLER, 2012).

3.1 ASPECTOS GERAIS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS DE BAIXA IMPEDÂNCIA

De acordo com as recomendações do ONS (2011), cada barramento pertencente ao SIN deve ter ao menos um conjunto de proteção unitária por fase, que pode ser baseada no princípio diferencial de alta ou de baixa impedância. Nesse sentido, o desenvolvimento dos relés numéricos tem facilitado a implementação dos esquemas de proteção de baixa impedância através de lógicas de operação, as quais possibilitam a implementação de zonas de proteção de arranjos de barramentos complexos e reconfiguráveis. Adicionalmente, este tipo de proteção permite a instalação distribuída da proteção, o que permite a conexão de novos circuitos sem representar um problema para o sistema de proteção. Também, outra das vantagens sobre a proteção diferencial de alta impedância é a possibilidade de usar TCs com relações de transformação diferentes, devido a uma normalização feita no algoritmo de proteção (ALSTOM GRID, 2011). Além disso, se a polaridade do TC não for respeitada durante a sua instalação física, o relé permite corrigir este inconveniente via *software*. Diferente do esquema de alta impedância, os secundários dos TCs não são conectados em paralelo e a saída deles entra individualmente no relé, o que torna possível o compartilhamento deles com outras funções de proteção e monitoramento. Apesar desses benefícios, a proteção diferencial de baixa impedância tem alguns desafios que podem colocar em risco o correto funcionamento do relé como, por exemplo, a saturação do TC diante de faltas externas, falta de atuação devido a resistências de falta, além de outro fator aleatório como o instante de incidência da falta. A seguir, detalha-se cada um desses aspectos.

3.1.1 Saturação de TCs

A saturação dos TCs é talvez uma ocorrência comum nos sistemas elétricos de potência (HARGRAVE *et al.*, 2018). No caso de barramentos, este tipo de fenômeno acontece durante faltas externas e pode ser considerado até mais severo que em outros componentes do sistema pois a corrente que circula pelo circuito defeituoso recebe a contribuição de todos os outros circuitos conectados no mesmo barramento. Como consequência, a corrente no seu lado secundário é distorcida, o que pode levar a uma atuação indevida da proteção diferencial da barra.

A severidade da saturação está relacionada também com a presença da componente CC de decaimento exponencial. Isto é, os intervalos de saturação vão diminuindo ao longo do tempo junto com a componente CC. Entretanto, o dimensionamento correto de um TC deve garantir que ele seja capaz de fornecer no seu secundário uma réplica fiel da corrente primária durante um tempo mínimo antes de saturar. Este tempo mínimo é calculado em função da amplitude da corrente, da componente CC, da relação X/R, da carga e fluxo remanescente (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2008). Este tempo mínimo para saturar deve corresponder à exigência do relé de proteção de forma a garantir seu correto funcionamento, pois os algoritmos precisam de um tempo mínimo para executar a sua lógica.

Por outro lado, se o espectro de frequências do sinal de corrente secundária de um TC com núcleo saturado fosse visualizado nestas circunstâncias, seria possível perceber a forte presença de uma componente de segunda harmônica (HARGRAVE *et al.*, 2018). A partir desta observação, seria possível melhorar a segurança de sistema de proteção baseado nas correntes através do uso da segunda harmônica de corrente como meio para restringir a operação da função de proteção diferencial (QAIS *et al.*, 2018). Outra estratégia para contornar este problema seria, por exemplo, a reconstrução do sinal de corrente (KANG *et al.*, 2005; KANG *et al.*, 2008). Nas aplicações comerciais, uma prática constante é a aplicação de um *slope* adaptativo do elemento diferencial apenas quando uma falta externa for detetada (BEHRENDT *et al.*, 2010), ou as lógicas de *trip* 1-de-1 e 2-de-2 descritas por Ziegler (2012).

3.1.2 Resistência de falta

Diante de uma falta com uma resistência envolvida, é compreensível imaginar que o relé poderia não enxergar a falta pois a proteção diferencial baseia-se no cálculo da amplitude da corrente diferencial, ou seja, a sensibilidade da função poderia ser prejudicada. Esta resistência de falta pode ser entre fases ou envolvendo a terra. No primeiro caso, a resistência de arco elétrico pode eventualmente reduzir a corrente de falta uma vez que, por exemplo, os isoladores utilizados em uma subestação isolada a ar podem experimentar *flashovers* devido à iminente contaminação e contato com nevoa salina ou umidade. Por outro lado, a existência de elevadas resistências de falta à terra não é muito comum uma vez que a construção de um barramento e todos os disjuntores e chaves seccionadoras devem ser montados em estruturas solidamente

aterradas (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009). De acordo com as diretrizes da IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (2015), é recomendado que o aterramento das subestações tenham um valor pequeno de resistência da sua malha de aterramento. Em condições normais de operação, a corrente que flui pelo aterramento é zero, ou seja, o potencial no aterramento é zero. Já no caso de uma falta que envolva a terra, passa-se a ter um potencial no aterramento que é produto da corrente vezes a resistência da malha. Diante deste último cenário, é importante saber que o projeto da malha de aterramento tem como objetivo atingir um valor baixo de resistência de forma a evitar grandes potenciais elétricos que coloquem em risco as pessoas. Do contrário, de acordo como o relatado por Jinliang *et al.* (2005), um curto-circuito em uma subestação cuja malha tenha uma resistência elevada pode ocasionar a destruição dos cabos de controle e levar esta tensão elevada até a sala de supervisão da subestação, levando ao desgoverno da operação do sistema em geral. Ainda, em IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (2015) foram citados alguns valores reais típicos de malhas de aterramento de subestações, os quais são apresentados na Tabela 3.1. Contudo, apesar de ter estas referências, não existe um consenso sobre o que poderia ser considerada uma resistência de falta baixa ou alta em barramentos, de modo que vários dos algoritmos propostos têm sido testados para casos onde existem faltas a terra envolvendo resistências de até 500Ω (SONG; ZOU, 2015), enquanto outros têm considerado que a resistência de falta é alta já com 18Ω (HOSSAIN *et al.*, 2018), tal como listado na Tabela 2.4.

Tabela 3.1: Valores típicos de resistência de malha de aterramento de subestações elétricas (IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, 2015).

Tipo de solo	Resistência (Ω)
Areia e cascalho	39,0
Limo arenoso	4,10
Areia e argila	3,65
Areia e cascalho	18,20
Solo e argila	0,21

3.1.3 Ângulo de incidência da falta

Este item também pode estar relacionado ao quesito da sensibilidade uma vez que o ângulo de incidência da falta impacta diretamente na amplitude da componente de decaimento exponencial. Quando a falta ocorre em instantes onde a amplitude do sinal de tensão é próximo de

90°, a assimetria que a componente CC de decaimento exponencial introduz no sinal original pode ser desprezível. Entretanto, considerando uma função seno, se a falta ocorrer perto do ângulo zero no sinal de tensão, os sinais de alta frequência que seriam esperados não apareceriam de forma tão consistente como acontece quando a falta ocorre perto de 90°, o que também dificulta a detecção da falta. Por outro lado, os transitórios induzidos pela falta devido às múltiplas reflexões e refrações das ondas viajantes nos terminais de um circuito apresentam um espectro de frequência de algumas centenas de Hz até vários kHz, de acordo com a falta e os parâmetros do sistema (Costa, 2014). De forma geral, os transitórios das faltas que acontecem perto dos 90° são bastante severos, e são significativamente amortecidos quando a falta acontece perto de 0°. Este trabalho não está relacionado com as ondas viajantes, de modo que o foco será avaliar o impacto do instante de falta na componente de decaimento exponencial.

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS

A proteção diferencial está baseada na lei de Kirchhoff das correntes e estabelece que em condições normais de operação a somatória das correntes que entram no barramento deve ser igual à somatória das correntes que saem dele (WARRINGTON, 1962). Nesse caso, a corrente diferencial é zero. Já quando uma falta interna acontece, a corrente de curto-circuito nele será somatória das correntes medidas por todos os TCS, como mostra a Figura 3.1, e o comando de *trip* deve ser enviado pelo relé aos disjuntores dos elementos conectados ao barramento.

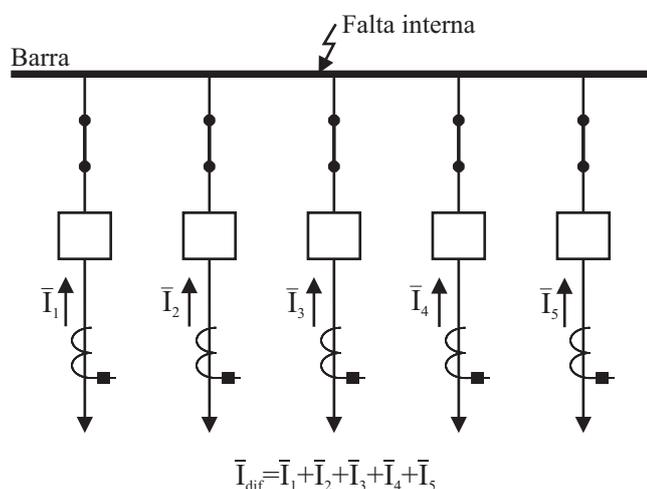


Figura 3.1: Sentido das correntes diante de uma falta no barramento.

No caso de uma falta acontecer fora da região delimitada pelos TCs que protegem o barramento, a corrente total fluindo em direção ao ponto ou circuito onde a falta aconteceu é exatamente igual à somatória de todas as correntes dos outros vãos conectados no barramento.

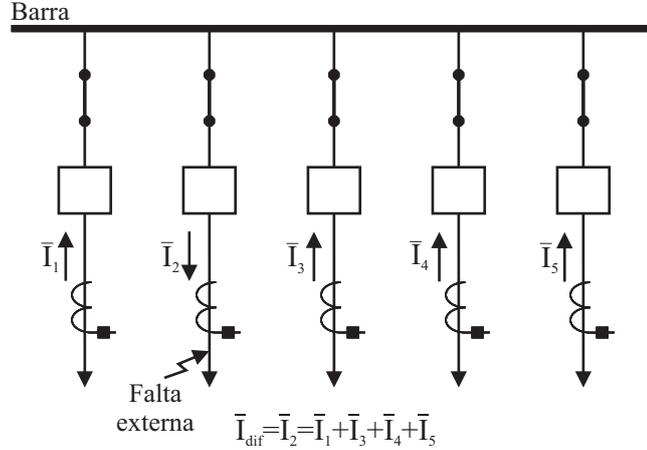


Figura 3.2: Sentido das correntes diante de uma falta em um circuito conectado no barramento.

A função de proteção diferencial tradicional de baixa impedância de barramentos (código ANSI 87B) utiliza os valores instantâneos de corrente para calcular a corrente de operação, i_{op} , e a corrente de restrição, i_{res} , como segue:

$$i_{op} = \left| \sum_{r=1}^R i_r \right| \quad \text{e} \quad i_{res} = \sum_{r=1}^R |i_r|, \quad (3.1)$$

nas quais i_r representa a corrente no elemento r e R o número total de elementos da rede conectados no barramento. A partir disso, o relé verifica constantemente se i_{op} é maior que um valor mínimo de *pickup*, e também maior que um valor porcentual de i_{res} . Porém, i_{res} poderia ser afetado por faltas externas severas, as quais podem eventualmente ocasionar a saturação do TC, levando a instabilidades do algoritmo e erros na operação do relé. Portanto, a sua versão suavizada, \bar{i}_{res} , é obtida através de um processo de filtragem, como descrito por (KUMAR; HANSEN, 1993; ZIEGLER, 2012).

A função tradicional 87B detecta uma falta interna se as condições de operação acima descritas são satisfeitas durante 1/4 de ciclo após a ocorrência da falta, como ilustrado na Figura 3.3. Segundo critérios de dimensionamento, este tempo representa o tempo máximo que o TC leva para entrar na sua região de saturação (ZIEGLER, 2012). Neste caso, o comando de *trip* é enviado através da lógica de operação rápida 1-de-1. Por outro lado, quando uma falta externa acontece, usualmente \bar{i}_{res} cresce bruscamente, enquanto i_{op} permanece perto de zero.

Portanto, uma falta externa poderia ser identificada se i_{op} não exceder i_{res} após a detecção do distúrbio antes do tempo máximo de saturação. Neste caso, o *flag* de falta externa, *EFD*, deve ser habilitado. Nesse cenário, a função 87B ativa o modo seguro de operação por um tempo típico de 150 ms, durante o qual a lógica de operação rápida é bloqueada. Este tempo cobre a duração da corrente fluir até o curto circuito externo ser eliminado (100 ms de acordo (ONS, 2017a)) com uma margem de segurança de 50 ms (ZIEGLER, 2012). Contudo, se o TC saturar, i_{op} incrementa exatamente durante os períodos de saturação (Figura 3.5) até atingir valores maiores que $SLP \cdot \bar{i}_{res}$, o que poderia causar a atuação errada do relé pela lógica 1-de-1. Todavia, o esquema de proteção deve oferecer uma estratégia adicional capaz de detectar faltas evolutivas, externas para internas. Nesse sentido, a lógica de retaguarda 2-de-2 verifica se as condições de *trip* são satisfeitas em dois lóbulos consecutivos, espaçados por um tempo menor ou igual a $N/2$ (Figura 3.3), sendo N o número de amostras por ciclo.

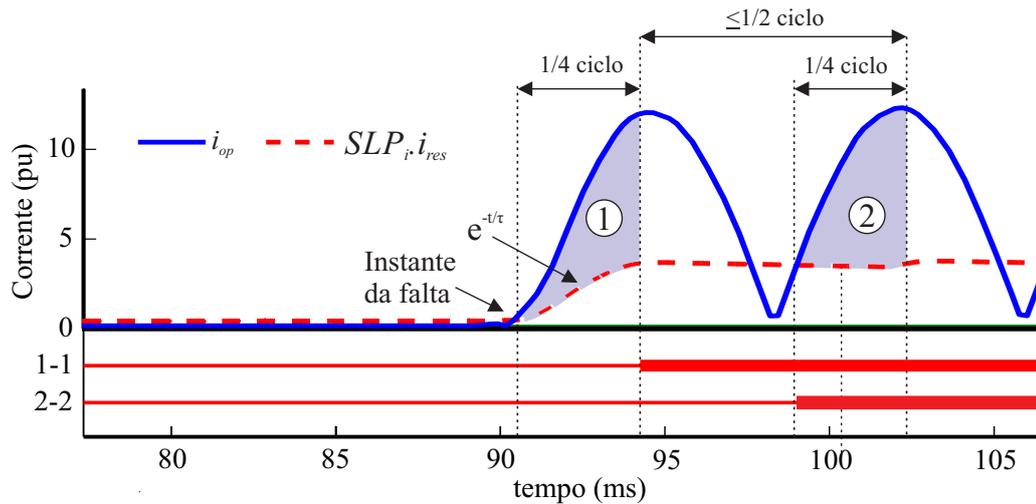


Figura 3.3: i_{op} e \bar{i}_{res} diante de uma falta interna.

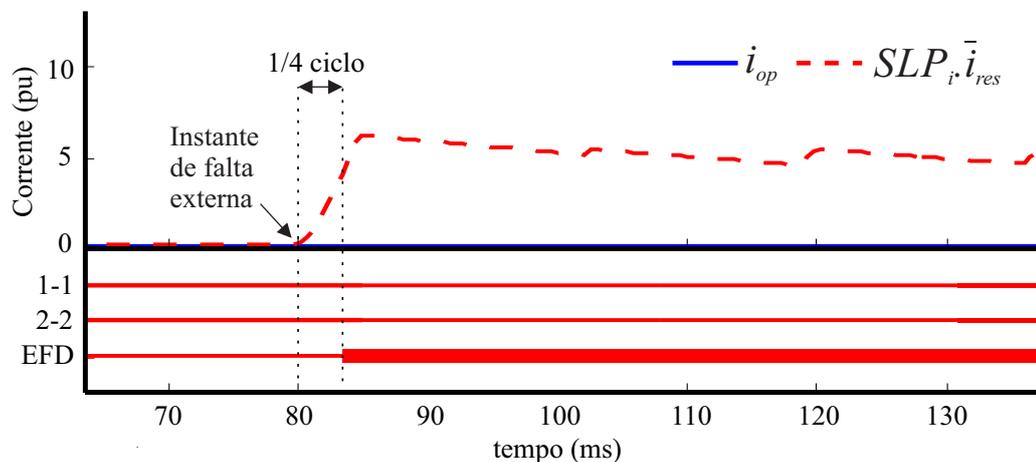


Figura 3.4: i_{op} e \bar{i}_{res} diante de uma falta externa sem saturação de TC.

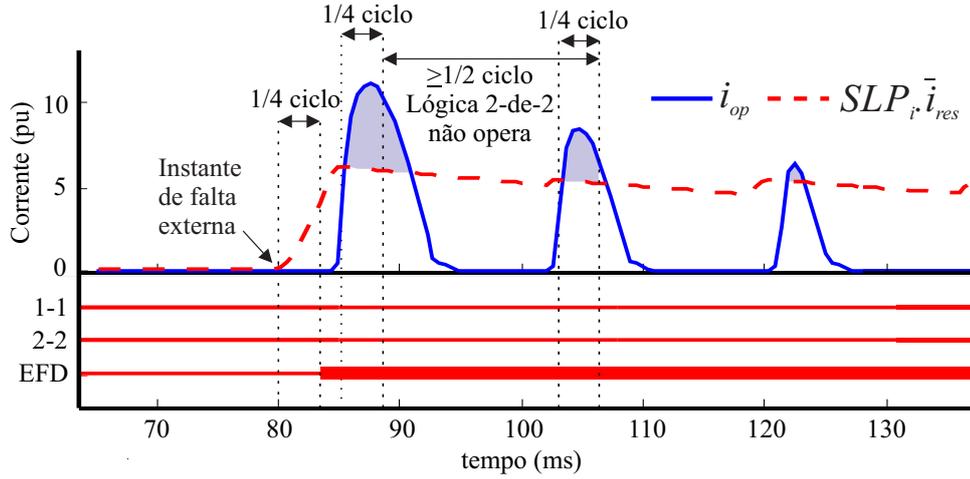


Figura 3.5: i_{op} e \bar{i}_{res} para uma falta externa com saturação de TC.

Visando mostrar o desempenho dos algoritmos de uma melhor forma, a corrente $i_{op}^*(t) = i_{op}(t) - SLP_i \cdot \bar{i}_{res}(t)$ é analisada em lugar de i_{op} e \bar{i}_{res} individualmente, ou seja, apenas a região dos lóbulos de operação acima de $SLP_i \cdot \bar{i}_{res}$. Por exemplo, na Figura 3.6, é mostrado $i_{op}^*(t)$ calculado para o caso da falta interna da Figura 3.3, enquanto que na Fig. 3.7 é ilustrado $i_{op}^*(t)$, correspondente ao caso de uma falta externa com saturação de TC, da Fig. 3.5.

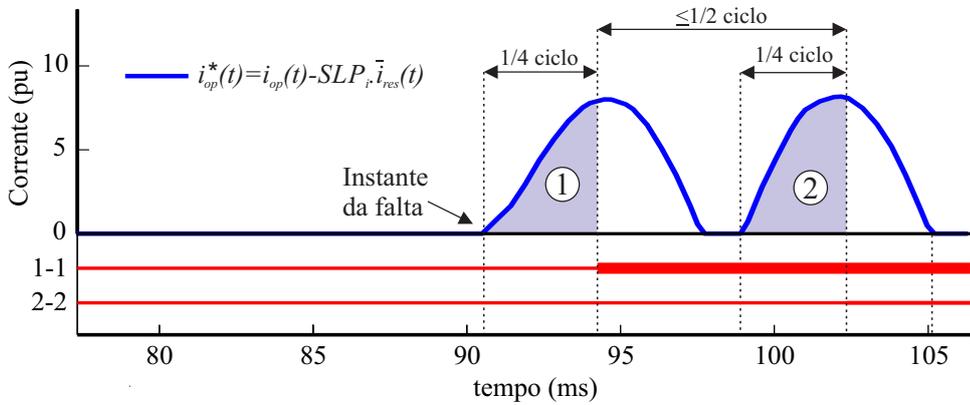


Figura 3.6: Lóbulos de operação baseada na corrente para a falta interna ilustrada na Fig. 3.3.

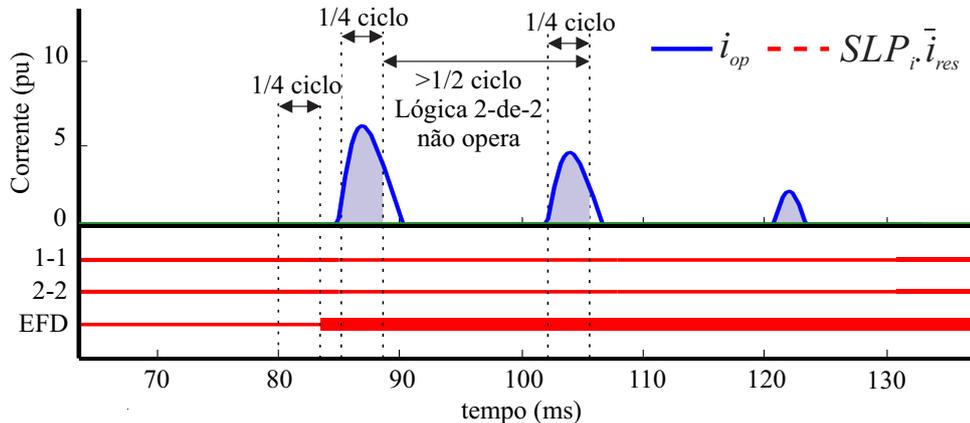


Figura 3.7: Lóbulos de operação baseada na corrente para a falta externa ilustrada na Fig. 3.5.

3.3 ZONAS DE PROTEÇÃO

Com o objetivo de limitar o número de equipamentos a serem desligados pela atuação de um relé de proteção diante de uma falta, o sistema de potência é dividido em certas regiões, chamadas de zonas de proteção (ALSTOM GRID, 2011). Para a proteção de barramentos, o IEEE Power System Relaying Committee (2009), estabelece que uma zona física de proteção é delimitada tanto pela localização física quanto pela polaridade dos TCs de cada elemento conectado ao barramento. A mesma norma estabelece uma zona lógica, ou zona de medição, que pode ser definida não só pela localização física e a polaridade dos TCs, mas também pelo estado lógico dos disjuntores e chaves seccionadoras que definem o barramento onde cada circuito está conectado. São justamente estes estados lógicos que definem os *flags* de habilitação das correntes, f_r^z , de cada circuito, r , conectado a um determinado barramento, b , que faz parte da zona, z , de forma a garantir que o cálculo interno do elemento diferencial segregado por fase, φ , seja feito corretamente. Dessa forma, a expressão (3.1) que descreve as correntes de operação e restrição a cada amostra, k , é agora descrita por (3.2) e (3.3).

$$i_{\varphi,op}^z[k] = \left| \sum_{r=1}^R f_r^z i_{\varphi,r}^b[k] \right| \quad (3.2)$$

$$i_{\varphi,res}^z[k] = \sum_{r=1}^R |f_r^z i_{\varphi,r}^b[k]|. \quad (3.3)$$

3.3.1 Formação de uma lógica de zonas de proteção

Com o objetivo de mostrar a construção de uma lógica de zonas de proteção para um barramento com alto grau de flexibilidade, a topologia de barra dupla e disjuntor simples a cinco chaves, ilustrado na Figura 3.8, é utilizada. Nesta configuração existem duas barras, $B1$ e $B2$, que estão normalmente energizadas e interligadas através do disjuntor de amarre, $DJAMR$ conhecido também como *tie breaker*, e suas respectivas chaves conectoras de barras, $CSAMR1$ e $CSAMR2$. Cada barra gera respectivamente uma zona de proteção, $Z1$ e $Z2$, as quais incluem os circuitos conectados a cada uma delas e estão delimitadas pela localização dos TCs de cada circuito e do vão de interligação ($TCL1$, $TCL2$, $TCL3$, $TCL4$, $TCAMR1$ e $TCAMR2$). Os circuitos estão conectados nos barramentos utilizando individualmente um

único disjuntor ($DJL1$, $DJL2$, $DJL3$, $DJL4$) que está envolvido por duas chaves seccionadoras, uma do lado do barramento e outra do lado do circuito. Em paralelo com os disjuntores de cada circuito, encontram-se as chaves de *by-pass*, ($BPL1$, $BPL2$, $BPL3$, $BPL4$) que são utilizadas durante os procedimentos de substituição ou manutenção dos disjuntores.

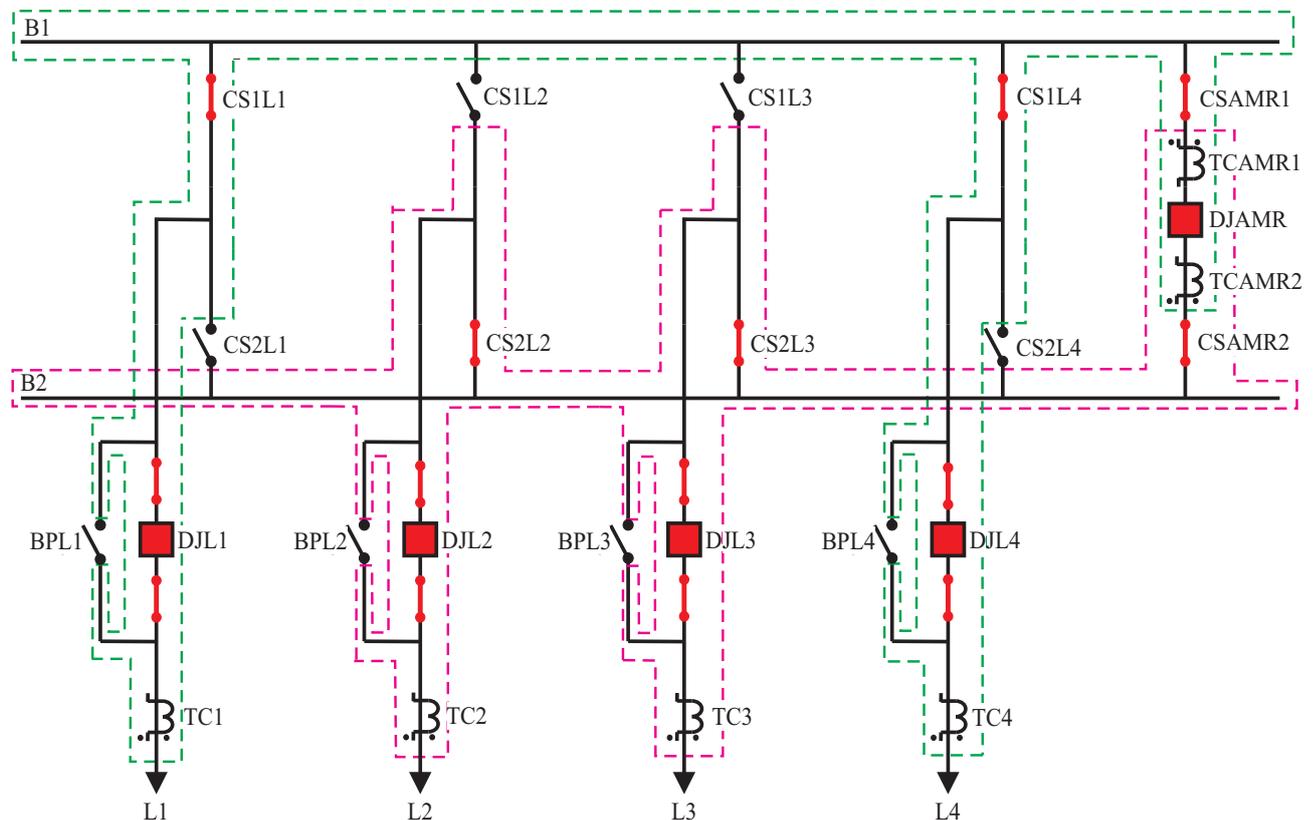


Figura 3.8: Zonas de proteção para um arranjo barra dupla e disjuntor simples a cinco chaves.

Com as barras sempre energizadas e os disjuntores fechados, ou seus respectivos *bypass*, é possível conectar os circuitos na barra $B1$ através das chaves seletoras $CS1L1$, $CS1L2$, $CS1L3$ e $CS1L4$, ou na barra $B2$ utilizando as chaves $CS2L1$, $CS2L2$, $CS2L3$ e $CS2L4$. Por outro lado, durante o processo de transferência da proteção de um determinado circuito, em decorrência da necessidade de retirada do respectivo disjuntor, é inevitável que as duas chaves seletoras dos circuitos que precisam mudar de barra permaneçam fechadas durante um certo período. Durante este intervalo, surge um fluxo de potência entre as barras que eventualmente poderia sensibilizar a proteção do sistema. Portanto, é necessário introduzir uma lógica de paralelismo de barras, descrito pela expressão lógica:

$$PB = (CS1L1 \text{ AND } CS2L1) \text{ OR } (CS1L2 \text{ AND } CS2L2) \text{ OR } (CS1L3 \text{ AND } CS2L3) \text{ OR } (CS1L4 \text{ AND } CS2L4).$$

Um problema adicional vem da possibilidade de um atraso na mudança de estados ou de falha dos contatos auxiliares lógicos das chaves seletoras de barra durante as manobras de transferência de vãos (STEENKAMP *et al.*, 2007). Isso pode modificar algum dos *flags* de habilitação que prejudicará o cálculo interno no elemento diferencial. Uma estratégia comum é a implementação de uma zona de supervisão, *check zone*, que supervisiona o barramento como um todo e considera ele dentro de uma única zona geral, *Z12*. Este novo elemento não considera os estados das chaves seletoras de barra, não considera os TCs do circuito de acoplamento e também não tem o papel de comandar a abertura dos disjuntores. Ele só tem a função de monitorar constantemente as condições de todos os circuitos e permitir o envio de *trip* caso ele também reconheça a falta em alguma das zonas. Por outro lado, um curto-circuito sobre algumas das barras também deverá ser identificado por esta zona. Portanto, os *flags* de habilitação, f_r^1 , f_r^2 e f_r^{12} , servem para determinar a correta atribuição de correntes para os elementos diferenciais das zonas *Z1*, *Z2* e *Z12*, respectivamente, como mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Atribuição dos estados lógicos das zonas de proteção, *Z1* e *Z2*, com as chaves seletoras.

Circuito	TC	f_r^1	f_r^2	f_r^{12}
L1	TC1	CS1L1 OR PB	CS2L1 OR PB	1
L2	TC2	CS1L2 OR PB	CS2L2 OR PB	1
L3	TC3	CS1L3 OR PB	CS2L3 OR PB	1
L4	TC4	CS1L4 OR PB	CS2L4 OR PB	1
Acoplamento	TCAMR1	0	\overline{PB}	0
	TCAMR2	\overline{PB}	0	0

Esta tabela mostra que, por exemplo, o circuito L1 pertence à zona *Z1*, ou seja, que f_r^1 será habilitado, caso a sua chave seletora superior estiver fechada, ou senão, quando as duas chaves seletoras de qualquer vão estiverem fechadas simultaneamente por necessidade de uma mudança de barra. Também, a corrente que flui por este circuito, assim como dos outros, sempre fará parte dos cálculos dentro do elemento diferencial da zona *Z12*, ou seja, o *flag* f_r^{12} sempre estará habilitado.

Por outro lado, no que diz respeito ao circuito de acoplamento, *TCAMR1* e *TCAMR2* medem as correntes da barra *B2* e *B1*, respectivamente, formando uma sobreposição de zonas sobre

DJAMR, o que elimina a existência de uma zona cega (*blind spot*). É por isso que f_r^1 é sempre inabilitado para todos os circuitos conectados na barra 1, e o *flag* o f_r^2 é sempre inabilitado para todos os circuitos conectados na barra 2. Entretanto, todos os circuitos conectados na barra 1, vista por *TCAMR2*, fazem parte da conta apenas se for verificado que não existe uma condição de paralelismo de barras. Isto é justamente para evitar atuações indevidas durante o procedimento de transferência de barra. Finalmente, a zona de supervisão não considera as correntes que fluem neste ramo.

A partir desta informação, um curto-circuito dentro de uma das zonas de proteção deverá causar a abertura dos disjuntores dos circuitos conectados no barramento envolvido na falta, enquanto a outra barra funciona normalmente. Para isso, o elemento de proteção diferencial é o encarregado de reconhecer a presença da falta interna na zona *Z1* ou *Z2*, mas o *trip* que ele envia ao disjuntor ainda deve considerar o estado das chaves seletoras pois um mesmo vão pode estar conectado em qualquer um dos barramentos, como descrito na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Lógica de abertura dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão lógica
DJL1	$(Z1 \text{ AND } CS1L1) \text{ OR } (Z2 \text{ AND } CS2L1) \text{ AND } Z12$
DJL2	$(Z1 \text{ AND } CS1L2) \text{ OR } (Z2 \text{ AND } CS2L2) \text{ AND } Z12$
DJL3	$(Z1 \text{ AND } CS1L3) \text{ OR } (Z2 \text{ AND } CS2L3) \text{ AND } Z12$
DJL4	$(Z1 \text{ AND } CS1L4) \text{ OR } (Z2 \text{ AND } CS2L4) \text{ AND } ZAB$
DJAMR	$(Z1 \text{ OR } Z2) \text{ AND } Z12$

Desta tabela, pode-se dizer que o disjuntor do circuito 1, DJL1, que pode estar conectado na barra 1 ou na barra 2, através das chaves seletoras, CS1L1 ou CS2L1, respectivamente, será aberto quando a falta for detectada dentro da zona *Z1*, e quando a zona de supervisão, *Z12*, também perceber a presença de uma falta no sistema. Por outro lado, o disjuntor de amarre, *DJAMR*, será aberto quando for percebida uma falta em uma das barras, ou seja, o circuito de amarre é desconectado.

3.3.2 Transferência da proteção

Diante da necessidade de manutenção do disjuntor instalado em um dos circuitos, é requerido garantir que tal circuito não fique desprotegido. Utilizando como exemplo o sistema da Figura 3.8, o procedimento para a transferência da proteção do circuito $L4$ quando o disjuntor $DL4$ precisa ser retirado para manutenção é o seguinte:

1. Transferir todos os vãos conectados na barra $B1$ onde o circuito $L4$ está conectado para a outra barra. Neste exemplo, isto se aplicaria apenas ao circuito $L1$. Dessa forma, a barra $B1$ funciona como barra de transferência e a barra $B2$ é a barra principal. Como mencionado anteriormente, é inevitável que durante algum intervalo de tempo as chaves seletoras $CS1L1$ e $CS2L2$ fechem seus contatos simultaneamente, pelo qual, a lógica de paralelismo de barras toma importância. Ainda, é possível que um curto-circuito aconteça em qualquer das barras durante este intervalo. Nesse caso, a falta será percebida por ambas zonas assim como pela *check zone*. Isto provocaria a abertura de todos os disjuntores instalados em ambos os vãos.

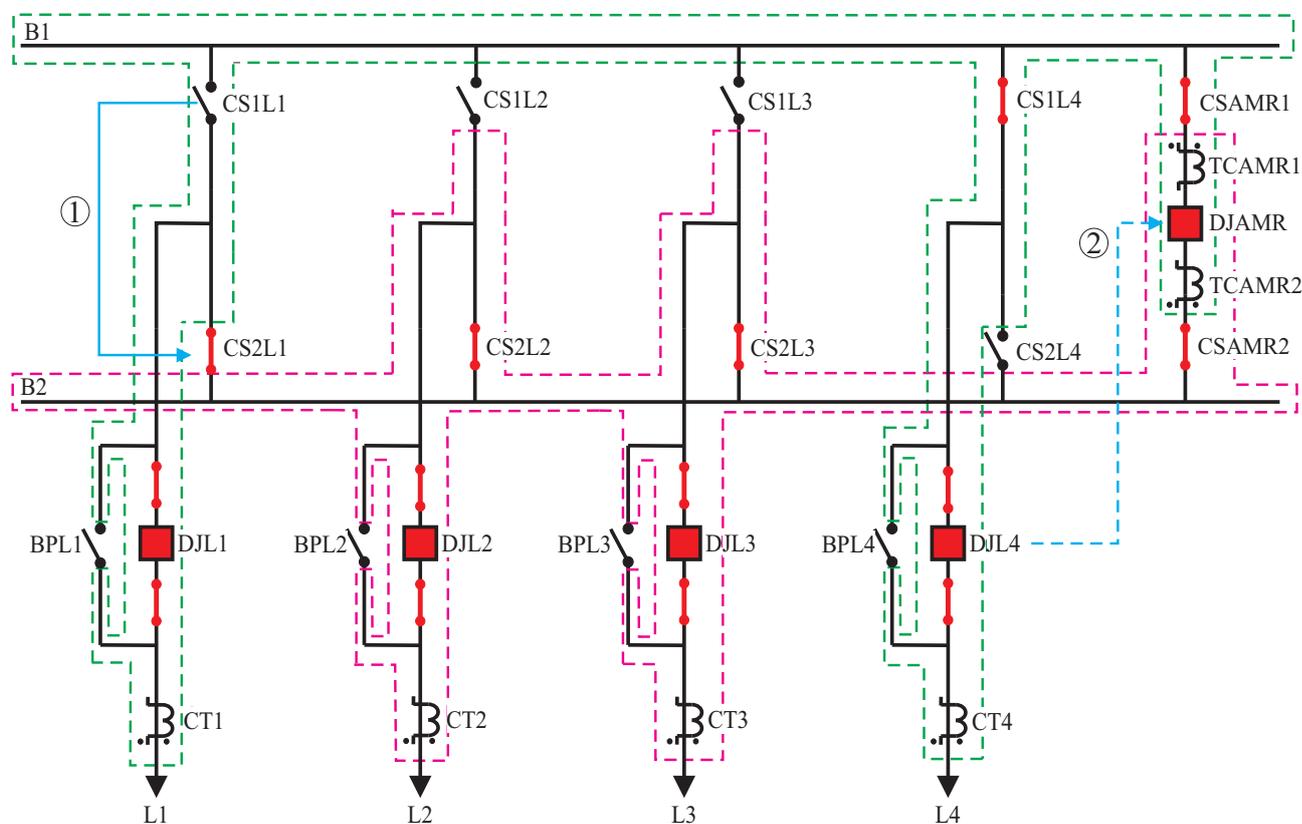


Figura 3.9: Procedimento para a retirada de disjuntor e transferência da proteção: Transferência de todos os vãos para a barra $B2$.

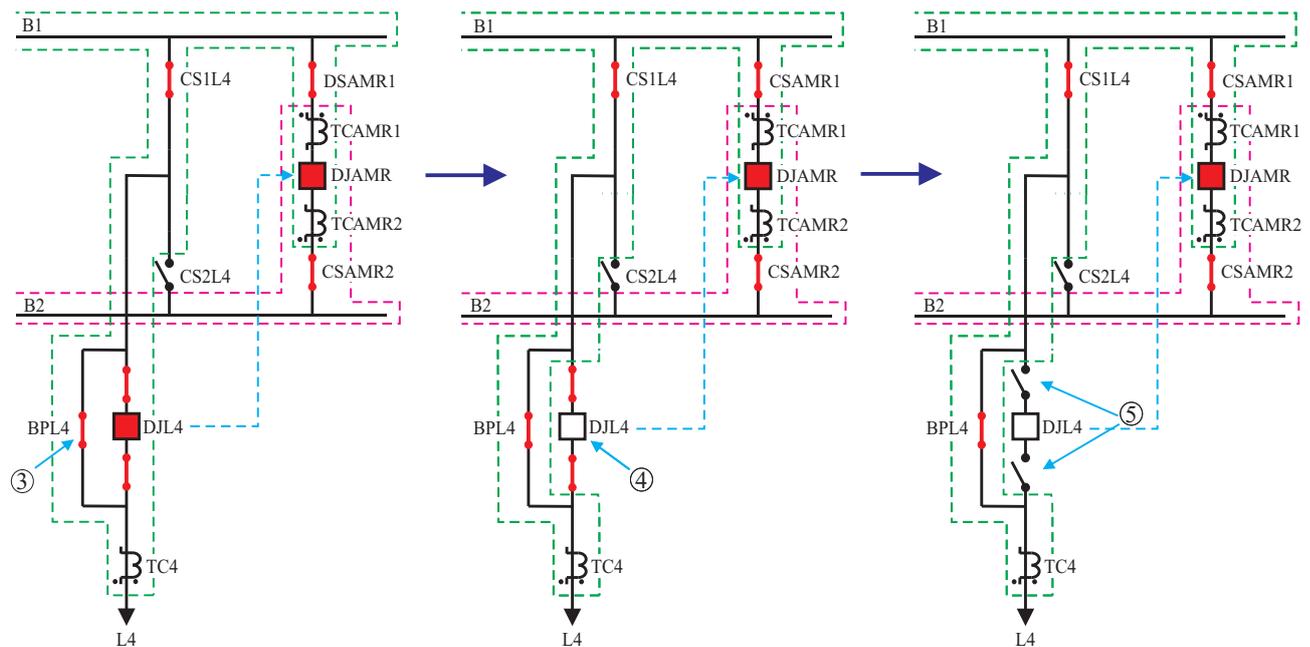


Figura 3.10: Procedimento para a retirada de disjuntor e transferência da proteção do circuito $L4$ conectado na barra $B1$: Fechamento de by-pass, liberação do disjuntor e transferência da proteção para o disjuntor $DJAMR$.

2. Transferir o *trip* da proteção do vão para o disjuntor de amarre, $DJAMR$.
3. Fechar a chave de *bypass*, $BPL4$. Isso garante a continuidade do serviço no circuito $L4$.
4. Abrir o disjuntor
5. As chaves que estão no entorno do disjuntor, tanto do lado da barra quanto do lado do circuito, são abertas para a retirada do disjuntor.

Com esta nova disposição, algumas situações precisam ser avaliadas

1. Um curto-circuito na barra $B1$ certamente será identificado pelo relé de proteção da zona 1, mas a falta só é eliminada abrindo o disjuntor $DJAMR$ e enviando um sinal de transferência direta de disparo (TDD) ao disjuntor remoto do circuito $L4$. Por sua vez, os circuitos conectados na barra principal funcionam normalmente.
2. Um curto-circuito na barra $B2$ será detectado pelo sistema de proteção, o qual envia um comando de *trip* aos disjuntores $DJL1$, $DJL2$, $DJL3$, além do disjuntor $DJAMR$. Dessa forma, a barra $B1$ é desconectada da barra $B2$, mas como ela está conectada ao circuito $L4$ através da chave $BPL4$, ela ainda teria potencial.

- Embora um curto-circuito no elemento $L4$, fora da zona de proteção do barramento, não sensibilize função de proteção da barra, o esquema de proteção próprio do circuito identificará a falta e mandará abrir o disjuntor $DJAMR$ assim como seu disjuntor remoto, mas enquanto este último não execute essa ordem, a Barra 1 ainda terá potencial.

3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou inicialmente os objetivos de um sistema de proteção para barramentos, assim como os principais desafios que devem ser superados considerando a natureza e as características técnicas dos equipamentos envolvidos. De forma mais específica, foi abordada a lógica de proteção diferencial tradicional que usa os valores de corrente para determinar grandezas de operação e de restrição que ajudam a reconhecer a presença e a classificação da falta, ou seja, interna ou externa. Isto é, quando a falta é interna, o *trip* é enviado após a verificação das condições de falta interna durante um determinado intervalo, caso contrário, o elemento de atuação rápida é bloqueado durante um longo intervalo para evitar uma atuação errada por parte do relé. Como forma de proteção de retaguarda, uma lógica adicional é também utilizada simultaneamente para monitorar uma possível evolução de uma falta externa para uma interna e enviar um comando de trip em caso esta ocorrência acontecesse. Além disso, com o intuito de implementar um algoritmo de proteção apropriado para acompanhar as manobras de subestações mais modernas, foi mostrado como uma lógica de zonas de proteção é concebida a partir dos estados das chaves seccionadoras e disjuntores. A importância desta lógica adicional surge devido à necessidade da correta atribuição das correntes para o elemento diferencial.

ALGORITMO PROPOSTO

Este capítulo descreve detalhadamente o algoritmo proposto para a proteção diferencial de barramentos baseado no conceito da potência instantânea, ainda não explorado na literatura para esta aplicação específica. Para isso, o embasamento teórico desta ideia é explicado para o caso em que um sistema elétrico funciona em condições normais de operação, assim como diante da ocorrência de faltas. Posteriormente, descreve-se o procedimento envolvido no algoritmo de proteção, desde a entrada dos sinais amostrados até a implementação da lógica de *trip*. A explicação dada não ilustra apenas o resultado do tratamento correto dos sinais para obter uma técnica adequada de proteção, mas também as consequências de não tomar os devidos cuidados para a sua implementação. É por isso que cada passo da técnica proposta foi inserido justamente para lidar adequadamente com as dificuldades inerentes ao uso de sinais de potência em condições de falta. Além disso, assim como os trabalhos citados na Seção 2, o esquema proposto foi concebido de forma a superar os desafios que os fenômenos físicos próprios dos equipamentos instalados e as suas especificações técnicas representam para qualquer método. Finalmente, são mencionados todos os detalhes que devem ser considerados para a correta adequação das lógicas tradicionais 1-de-1 e 2-de-2 à ideia deste trabalho.

4.1 CONCEITO DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA

Considerando que em um circuito elétrico opera uma fonte ideal de tensão, definida matematicamente por

$$v(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t + \theta_v), \quad (4.1)$$

está conectada a uma determinada carga. A corrente que circula por ela seria

$$i(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \theta_i), \quad (4.2)$$

nas quais V , I , são os valores *rms* da tensão e da corrente, com suas respectivas fases, θ_v e θ_i , e ω é a frequência angular elétrica no circuito. Considerando, sem perda de generalidade, a tensão de referência com fase $\theta_v = 0^\circ$ e que o circuito é, como forma de exemplo, predominantemente indutivo, as expressões podem ser redefinidas como

$$v(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \quad (4.3)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t - \theta_{vi}), \quad (4.4)$$

sendo θ_{vi} a defasagem da corrente em relação à tensão, definida por $\theta_{vi} = \theta_v - \theta_i$. A partir dessas grandezas, a potência instantânea é calculada através de

$$s(t) = v(t)i(t) \quad (4.5)$$

$$s(t) = \underbrace{VI \cos \theta_{vi}}_{p(t)} - \underbrace{VI \cos(2\omega t - \theta_{vi})}_{w(t)}. \quad (4.6)$$

De acordo com esta expressão, pode-se interpretar que o sinal da potência instantânea, $s(t)$, tem uma forma de onda senoidal que oscila com duas vezes a frequência fundamental do circuito, w , com valor médio diferente de zero, representada neste trabalho como $p(t)$, que depende da fase da impedância da carga e é conhecida como potência ativa. Estes sinais são observados na Figura 4.1 durante uma condição normal de operação, na qual a tensão e a corrente ambas possuem um valor pico de 1 p.u.

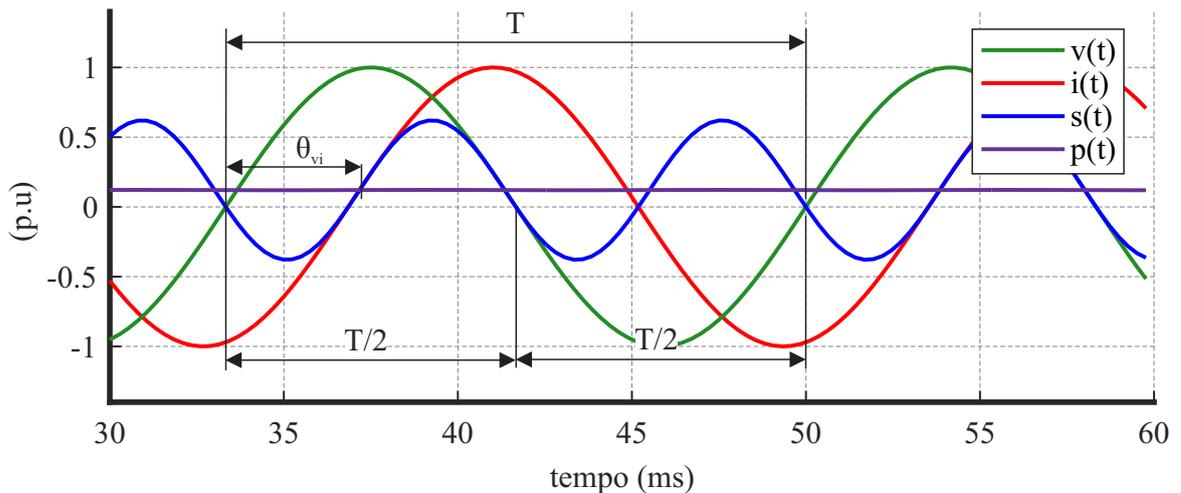


Figura 4.1: Potência instantânea de um circuito com carga predominantemente indutiva.

Uma vez que o presente trabalho se baseia nestes sinais para criar uma função de proteção diferencial, é necessário avaliar o que de fato aconteceria com eles diante de um curto-circuito.

Contudo, uma condição de curto-circuito franco significaria ter uma tensão zero, o que levaria a uma potência instantânea nula. Dessa forma, a formulação do algoritmo baseado neste conceito seria impraticável. Dada essa limitação, o circuito da Figura 4.2 ajuda a mostrar o comportamento da corrente $i(t)$ diante do fechamento da chave no instante t_f . A partir do instante em que a chave é fechada, a resistência total do circuito diminui e a corrente, ilustrada na Figura 4.3 é definida como a soma da sua componente natural, i_{CA} , mais uma componente de decaimento exponencial i_{CC} , com uma constante de tempo τ ,

$$i(t) = \underbrace{\sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta_i)}_{i_{AC}} + \underbrace{Ae^{-t/\tau}}_{i_{CC}}. \quad (4.7)$$

Esta expressão também poderia definir a resposta de um circuito diante de um curto-circuito, com a particularidade de que, neste cenário, a sua componente CC poderia ter amplitudes, A , maiores. Com esta explicação, fica evidente que o primeiro desafio para a implementação desta função de proteção diferencial é garantir que a informação do sinal de tensão não seja perdida diante de um curto-circuito.

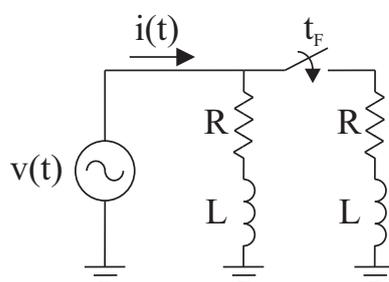


Figura 4.2: Circuito elétrico com carga predominantemente indutiva

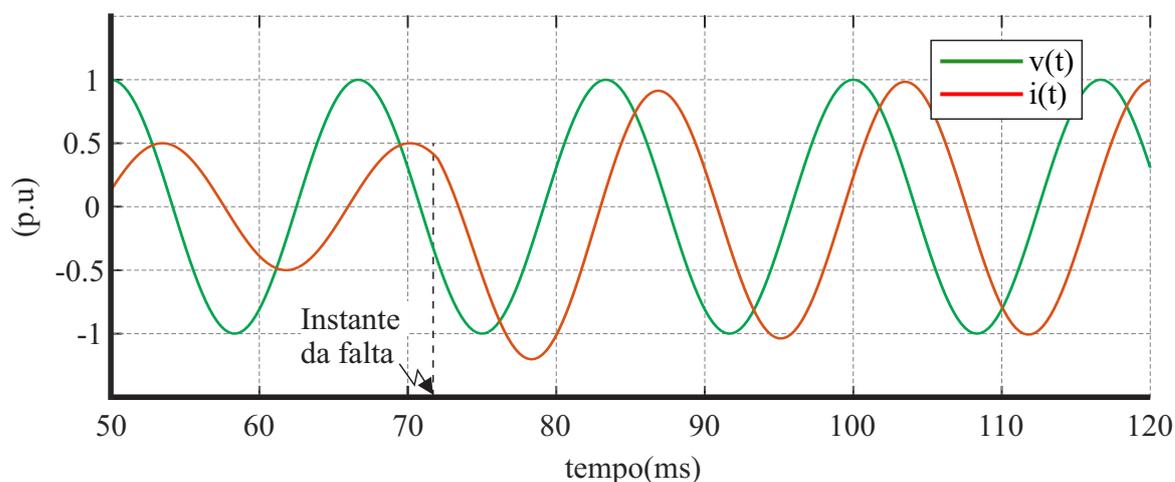


Figura 4.3: Sinais de tensão e corrente durante o chaveamento da carga no circuito da Figura 4.2.

A partir do instante de chaveamento, a onda de $s(t)$ apresenta oscilações de forma assimétrica que vão desaparecendo com o tempo. Isso acontece justamente pela existência da componente de decaimento exponencial de corrente, i_{CC} . Para este sinal estabilizar completamente é necessário um tempo muito maior a um período, como ilustrado na Figura 4.4. Como consequência, o valor estimado de $p(t)$ possui uma resposta similar. Considerando que uma função diferencial precisa de um sinal com valor médio zero para ter idealmente lóbulos de igual amplitude, seria lógico pensar em extrair a potência $p(t)$ do sinal $s(t)$, visando a obtenção de uma potência final $w(t)$ com esta característica e estável. Contudo, sem a eliminação da componente CC de corrente, $w(t)$ possuiria uma aparência instável durante um período considerável e a potência diferencial obtida seria inapropriada para seu uso em uma lógica de proteção, uma vez que haveria alternância entre lóbulos maiores e menores no sinal $w(t)$, como mostrado na Figura 4.4.

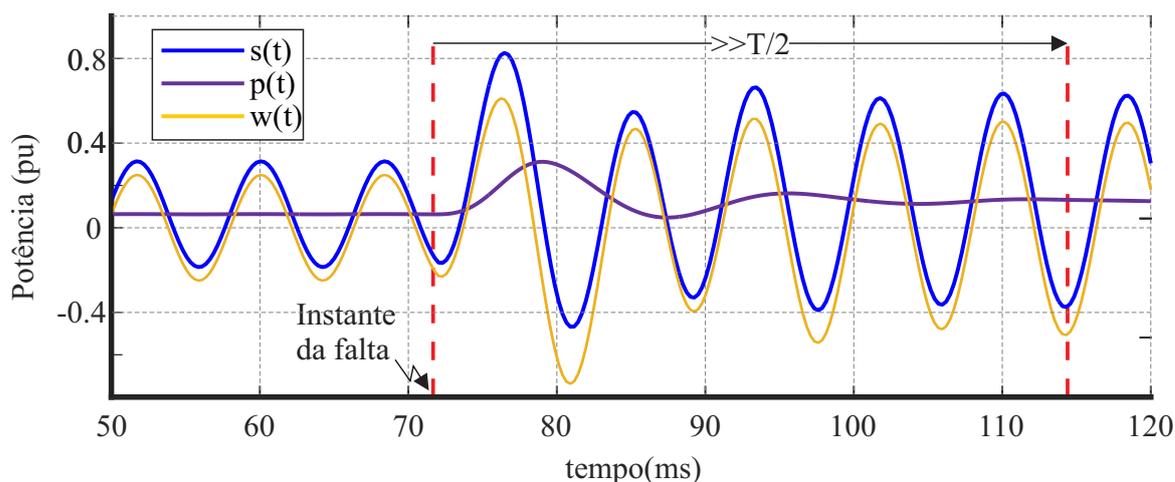


Figura 4.4: Extração da potência ativa, $p(t)$ sem eliminação da componente DC do sinal de corrente.

Agora, se a componente CC de decaimento exponencial de corrente fosse totalmente eliminada, $s(t)$, $p(t)$ e $w(t)$ teriam as suas formas de onda como ilustrado na Figura 4.5. Percebe-se que quando esta filtragem é realizada, a potência instantânea e seu valor médio possuem uma natureza mais estável. Vale a pena comentar que obter o valor médio de qualquer onda senoidal requer um período completo de tal onda. Como a frequência da potência instantânea é o dobro da frequência da corrente, o tempo necessário para extrair $p(t)$ e conseguir um sinal totalmente estável seria idealmente a metade do período da onda de corrente.

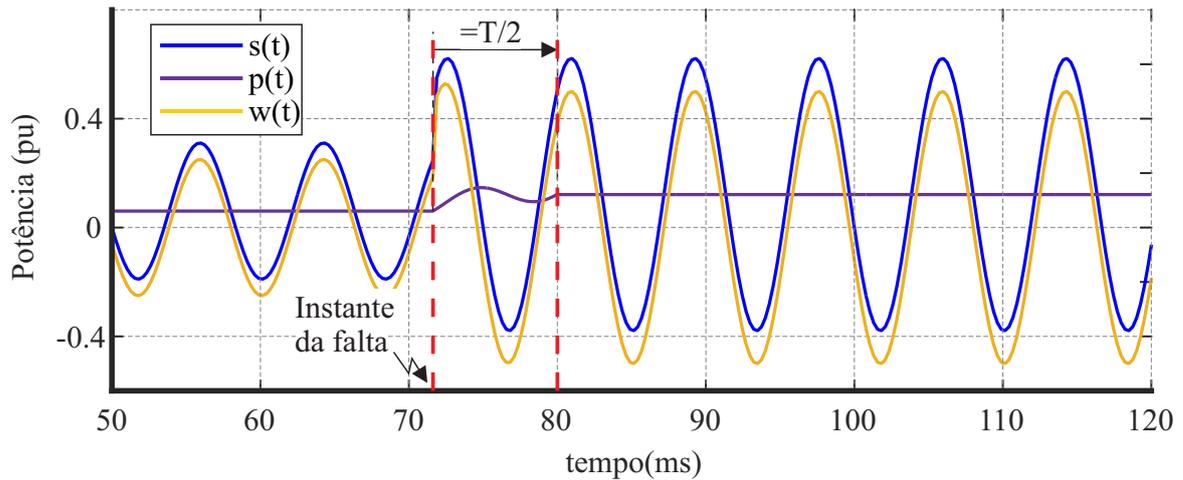


Figura 4.5: Extração da potência ativa, $p(t)$ após a eliminação da componente CC do sinal de corrente.

A partir destes novos sinais, é possível observar na Figura 4.6 que a potência diferencial, w_{dif} , que é calculada como o módulo da potência instantânea, é melhor comportada que aquela obtida quando a componente CC de corrente não é eliminada. Percebe-se, ainda, que o primeiro lóbulo é levemente menor do que os subsequentes, mas isso é justamente consequência do tempo mínimo para a extração de $p(t)$. Com base nesse resultado, conclui-se que o segundo problema de um algoritmo de proteção baseado em sinais de potência instantânea é a eliminação da componente CC de decaimento exponencial da corrente para posteriormente extrair a potência $p(t)$.

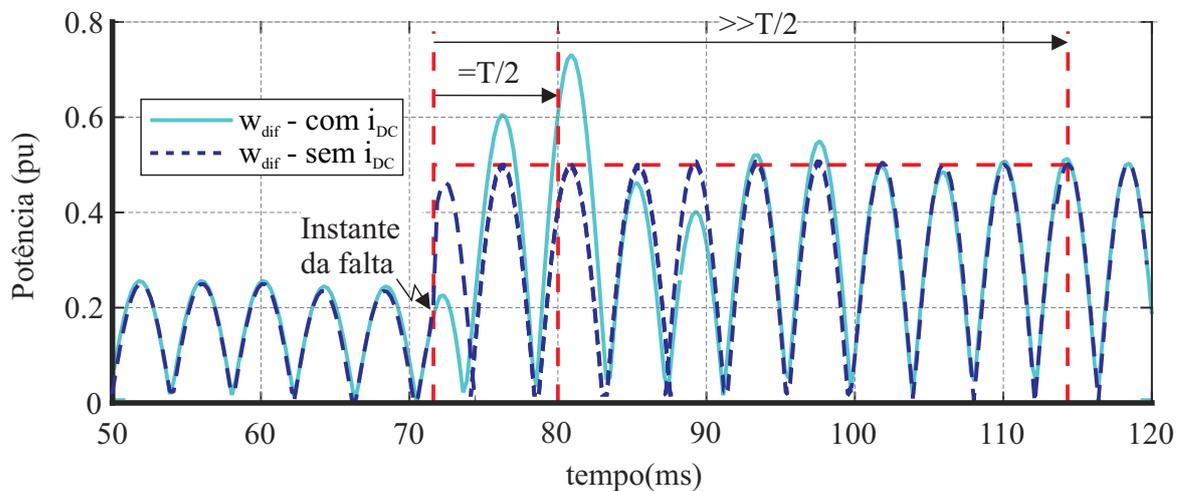


Figura 4.6: Potência diferencial w_{dif} obtida com e sem a eliminação da componente CC do sinal de corrente.

4.2 DESCRIÇÃO GERAL DO ALGORITMO PROPOSTO

Este trabalho propõe a implementação de um esquema de proteção diferencial de barramentos baseado no conceito da potência instantânea, que utiliza os sinais das correntes, que percorrem os circuitos conectados aos barramentos, e das tensões neles. Contudo, a utilização destes sinais como base para a formulação de um algoritmo de proteção precisa considerar os detalhes mencionados na Secção 4.1. Para isso, de acordo com o diagrama de blocos ilustrado na Figura 4.7, um conjunto de entradas é composto pelas correntes secundárias ($i_{u\varphi,1}, i_{u\varphi,2}, \dots, i_{u\varphi,R}$) que vêm dos TCs instalados em cada fase, φ , de cada circuito, r , numerado de 1 até R , sendo R o número total deles. Estes sinais são normalizados na mesma base para eliminar as diferenças de relação de transformação dos TCs. O mesmo procedimento é aplicado nas amostras das tensões secundárias obtidas dos TPs ($v_{u,\varphi}^1, v_{u,\varphi}^2, \dots, v_{u,\varphi}^B$), conectados nos barramentos que são numerados de 1 até B , sendo B é o número total de barramentos. Após esta padronização, os novos sinais de corrente, na forma $i_{\varphi,r}$, são diretamente processados pelo filtro mímico tradicional (KUMAR; HANSEN, 1993) para obter idealmente uma corrente sem componente CC de decaimento exponencial de corrente, $i_{\varphi,R}^{mimic}$. Por sua vez, as tensões de pré-falta normalizadas são utilizadas por uma memória de tensão de forma a garantir os sinais de tensão, ($v_{\varphi,mem}^1, v_{\varphi,mem}^2, \dots, v_{\varphi,mem}^B$), mesmo após a incidência da falta. Dessa forma, as potências instantâneas ($s_{\varphi,1}, s_{\varphi,2}, \dots, s_{\varphi,R}$) que fluem em cada fase dos circuitos conectados ao barramento podem ser adequadamente calculadas. Porém, por terem valor médio diferente de zero, ainda seria necessário extrair esta componente para obter um sinal de potência adequado para a proteção diferencial, na forma $w_{\varphi,R}$. Após este procedimento, da mesma forma como a função diferencial de corrente, a potência de restrição, $w_{\varphi,res}$ e a potência de operação, $w_{\varphi,op}$, são determinadas para cada fase do sistema. Este cálculo leva em consideração a lógica de zonas de proteção construído a partir dos *flags* de habilitação ($f_1^z, f_2^z, \dots, f_R^z$) de cada zona, z , determinados pelo estado dos disjuntores (DJ_1, DJ_2, \dots, DJ_R) e das chaves seccionadoras (CS_1, CS_2, \dots, CS_R). Os sinais de $w_{\varphi,res}$ e $w_{\varphi,op}$ são então utilizados pela lógica de *trip* do elemento diferencial, que está composta pelas lógicas 1-de-1 e 2-de-2, adequadamente modificada para a ideia do presente trabalho. Adicionalmente, a lógica de operação do algoritmo proposto prevê o cálculo de uma potência de restrição de segunda harmônica, multiplicada por um fator, K_{comp} , e pelo estado lógico do *flag* de falta externa, que é adicionada à potência de restrição original. Esta potência

harmônica é calculada em função das correntes harmônicas de segunda ordem, decorrentes da saturação do TC devido à ocorrência de faltas externas.

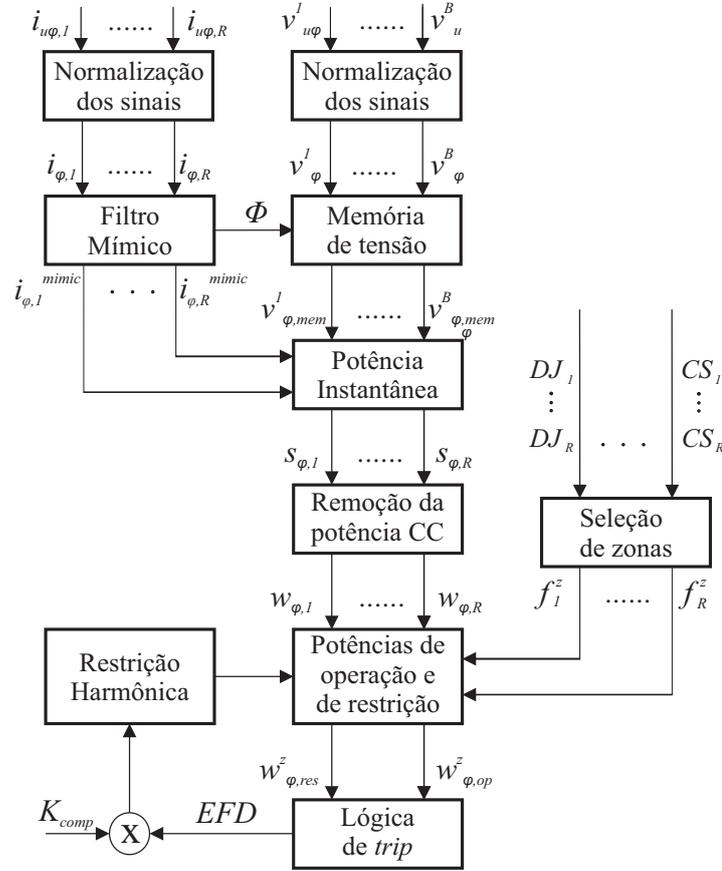


Figura 4.7: Diagrama de blocos do algoritmo proposto.

4.3 DESCRIÇÃO DETALHADA DO ALGORITMO PROPOSTO

4.3.1 Normalização das amostras

Considerando que os TCs instalados em cada circuito conectado ao barramento podem possuir diferentes relações de transformação, é necessário colocar os valores das correntes secundárias obtidas em uma mesma base de referência. Para isso, o fator aplicado $TAP_{i,r}$, utilizado para levar as correntes obtidas em amperes a valores normalizados expressos por unidade, é calculado como

$$TAP_{i,r} = \frac{CTR_{MAX} I_{NOM}}{CTR_r}, \quad (4.8)$$

sendo CTR_{MAX} a maior relação de transformação dentre todos os TCs, I_{NOM} corresponde ao valor da corrente secundária nominal do TC com maior CTR e CTR_r a relação de transformação

de cada TC, respectivamente (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010).

Da mesma forma, o fator utilizado para normalizar as tensões secundárias dos TPs é

$$TAP_v^b = \frac{V_{NOM}}{VTR_b}, \quad (4.9)$$

onde V_{NOM} é a tensão nominal dos barramentos e VTR_b é a relação de transformação dos TPs instalados em cada barramento, b .

4.3.2 Filtro Mímico

Como explicado na Seção 4.1, a componente CC de decaimento exponencial de corrente pode prejudicar severamente o algoritmo proposto se não tratada de forma correta. Para isso, o filtro mímico tradicional, originalmente proposto por Benmouyal (1995), é aplicado diretamente nas amostras de $i_{\varphi,r}$ de forma a eliminar essa componente. Ainda, vale a pena mencionar que apesar da existência de diversas técnicas propostas na literatura para solucionar este problema, o filtro mímico ofereceu respostas bastante aceitáveis, tal como será mostrado posteriormente.

De forma geral, a expressão que define a resposta no tempo de uma carga composta por um resistor e um indutor conectado em série é

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (4.10)$$

Contudo, se fosse imposto que a corrente que circula pelo circuito seja justamente a parcela CC de decaimento exponencial de uma corrente de curto-circuito, $I_0 e^{-t/\tau}$, teria-se que

$$v(t) = RI_0 e^{-t/\tau} - LI_0 \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (4.11)$$

A partir daí, percebe-se que se a constante de tempo, τ , desta corrente fosse exatamente igual à constante de tempo do circuito L/R , a tensão resultante no circuito seria zero. Dessa forma poderia-se afirmar que a componente CC de decaimento exponencial foi completamente removida.

Para a sua implementação digital, ela é formulada da seguinte forma. A Equação (4.10) pode ser expressa da forma discretizada como

$$v[k] = Ri[k] + L \left[\frac{i[k] - i[k-1]}{\Delta t} \right] \quad (4.12)$$

sendo Δt obtido a partir da taxa de amostragem. Aplicando a transformada Z obtêm-se:

$$V(z) = R \left[I(z) + \frac{LI(z)}{R\Delta t} [1 - Z^{-1}] \right]. \quad (4.13)$$

Fazendo $L/R = \tau$ e $\tau_d = \tau/\Delta t$:

$$V(z) = RI(z)\{1 + \tau_d[1 - Z^{-1}]\} \quad (4.14)$$

A partir desta equação, pode-se dizer que a impedância discretizada do circuito representa, na verdade, um filtro passa-altas, com constante de tempo de decaimento $\tau_d = \tau/\Delta t$, que é definido por:

$$H(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = KR\{(1 + \tau_d) - \tau_d Z^{-1}\}. \quad (4.15)$$

Fazendo $KR = K_m$,

$$H(z) = K_m\{(1 + \tau_d) - \tau_d e^{-j2\pi f/f_s}\} \quad (4.16)$$

na qual K_m pode representar um tipo de ganho e f_s é a frequência de amostragem. Dessa forma, o valor de K_m deve ser ajustado de forma a garantir que o ganho do filtro na frequência fundamental, f_{fund} , seja unitário, portanto (BENMOUYAL, 1995):

$$K_m = \sqrt{\frac{1}{(1 + \tau_d) - \tau_d \cos\left(\frac{2\pi f_{fund}}{f_s}\right) + j\tau_d \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi f_{fund}}{f_s}\right)}}. \quad (4.17)$$

Fazendo,

$$\delta = \frac{2\pi f_{fund}}{f_s} = \frac{2\pi}{N}, \quad (4.18)$$

a Equação 4.17 é expressa como

$$K_m = \sqrt{\frac{1}{[(1 + \tau_d) - \tau_d \cos(\delta)]^2 + [\tau_d \operatorname{sen}(\delta)]^2}}, \quad (4.19)$$

na qual δ é a frequência angular digital. Havendo definido esta constante, a corrente de saída do filtro mímico aplicado nas correntes $i_{\varphi,r}$ utilizadas neste trabalho, é definida por

$$i_{\varphi,r}^{mimic}[k] = K_m[(1 + \tau_d)i_{\varphi,r}[k] - \tau_d i_{\varphi,r}[k - 1]] \quad (4.20)$$

A escolha de τ_d deve ser feita de forma reduzir a amplitude das componentes CC de decaimento exponencial, que podem possuir diferentes valores de constante de tempo. Caso o valor de τ_d seja igual a uma delas, a componente CC de decaimento exponencial será completamente

eliminada. Por outro lado, é importante lembrar que por ser um filtro passa-altas, o filtro mímico tende a amplificar qualquer ruído contido na corrente secundária no TC. Ainda, é vital para o método de proteção proposto ressaltar que este algoritmo introduz uma defasagem no sinal de saída, cujo ângulo é calculado como (SILVA; KUSEL, 2012):

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\tau_d \sin \delta}{(1 + \tau_d) - \tau_d \cos \delta} \right]. \quad (4.21)$$

Outro aspecto que precisa ser ressaltado é que neste trabalho o filtro mímico é aplicado diretamente nas amostras de corrente, pelo qual o atraso que ele impõe no sinal de saída é de apenas uma amostra, como descreve a Equação 4.20. Dito isso, embora este trabalho não utilize a estimação fasorial de sinais como método principal, é importante mostrar o que aconteceria se o filtro mímico fosse aplicado nos fasores de corrente. Para isso, a estimação fasorial de um sinal de corrente de falta foi feita utilizando a Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo (FCDFT) como mostrado na Figura 4.8, e posteriormente o filtro mímico foi aplicado neste novo sinal.

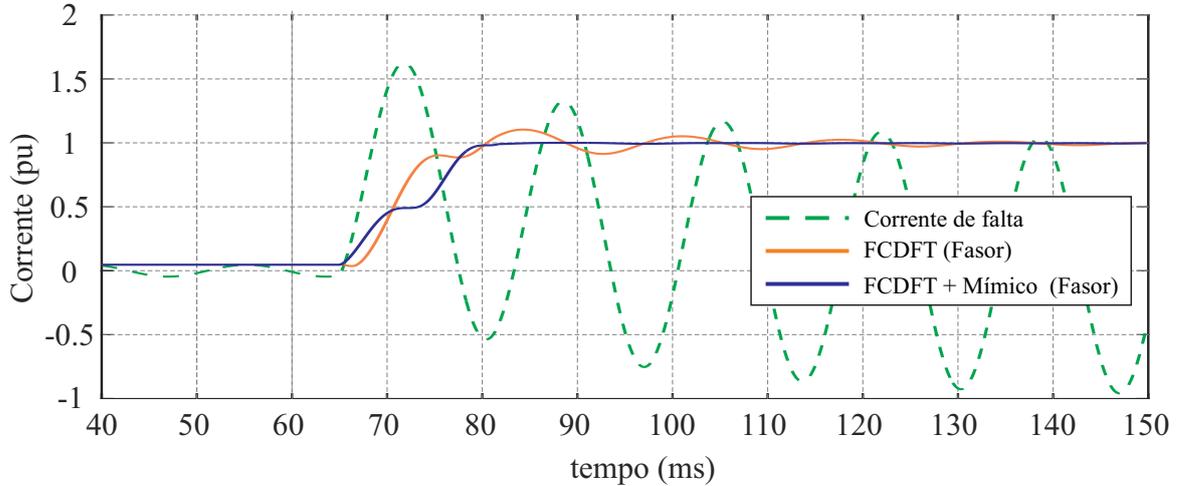


Figura 4.8: Estimação fasorial da corrente de falta com e sem o filtro mímico.

Para realizar uma comparação mais coerente do resultado de se aplicar o filtro mímico diretamente nas amostras e no sinal fasorial estimado, é considerado conveniente em primeiro lugar reconstruir o sinal 'FCDFT + Mímico' no domínio do tempo, como mostrado na Figura 4.9. É fácil visualizar e confirmar que quando o filtro mímico é aplicado diretamente nas amostras de corrente, o processo de filtragem da componente CC é imediato, ou seja, a primeira amostra após o instante da falta já demonstra a execução do filtro mímico. Diferente disso, o regime permanente da corrente é atingido aproximadamente após um ciclo mais uma amostra

para o método de estimação fasorial empregado. Com esta explicação, fica evidente que o algoritmo de proteção sofreria um atraso considerável quando o filtro mímico fosse aplicado em fasores, pois seu efeito seria visível apenas após completar uma janela de amostragem.

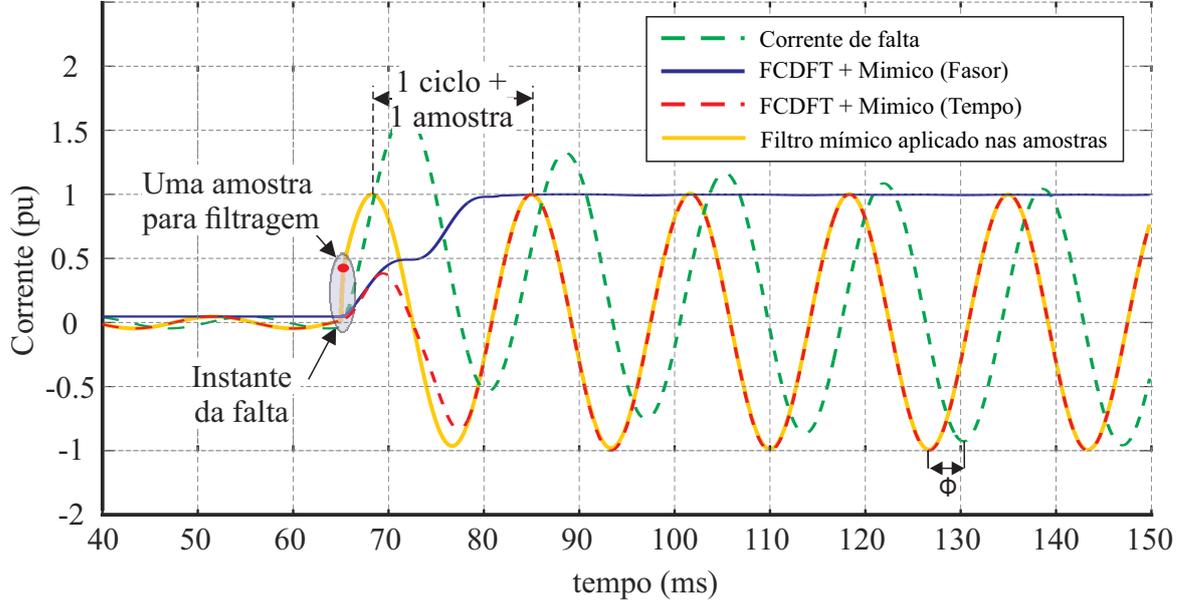


Figura 4.9: Comparação dos sinais de saída do filtro mímico aplicado nas amostras e no fasor da corrente.

4.3.3 Memória de Tensão

Diante do colapso da tensão, v_{ϕ}^b , no barramento onde um curto-circuito acontece, o algoritmo de proteção perde validade uma vez que a potência instantânea calculada pelo relé após o instante da falta tenderá a ser zero. Para implementar o algoritmo proposto é então imprescindível prolongar o tempo de disponibilidade da tensão através de um filtro de tensão. Nesse sentido, o filtro de memória de tensão utilizado neste trabalho é o resultado do mapeamento de um filtro analógico passa-baixas de primeira ordem em um filtro digital de resposta ao impulso infinito através do método de diferenças regressivas. Para isso, os fasores das tensões, \bar{V}_{ϕ}^b , são inicialmente estimados utilizando, neste trabalho, o filtro cosseno modificado (HART *et al.*, 2000). Com isso, o filtro de memória de tensão, é matematicamente expresso por (SILVA; ALMEIDA, 2015)

$$\bar{V}_{\phi,mem}^b[k] = \alpha \bar{V}_{\phi}^b[k] + (1 - \alpha) \bar{V}_{\phi,mem}^b[k - 1], \quad (4.22)$$

na qual a saída do filtro é a tensão memorizada, $\bar{V}_{\phi,mem}^b = V_{\phi,mem}^b \angle \theta_{\phi,mem}^b$, e α é o fator de desvanecimento determinado por

$$\alpha = \frac{1}{MN + 1}, \quad (4.23)$$

sendo M a constante de decaimento do filtro dado em número de ciclos, a qual que define a severidade com a qual a tensão memorizada se desvanece ao longo do tempo. Com o objetivo de apenas ilustrar a função desta ferramenta, a Figura 4.10 mostra como a tensão original, v_ϕ^b , tende a zero a partir do instante em que uma falta franca acontece, assim como sua versão fasorial, $|\bar{V}_\phi^b|$. Então, o filtro de tensão fornece um novo um novo sinal fasorial, $|\bar{V}_{\phi,mem}^b|$, com uma taxa de decaimento definida pelo valor de M . Todavia, esta tensão memorizada precisa ser reconstruída no domínio do tempo, i.e. $v_{\phi,mem}^b(t)$, para ser aplicada no algoritmo proposto.

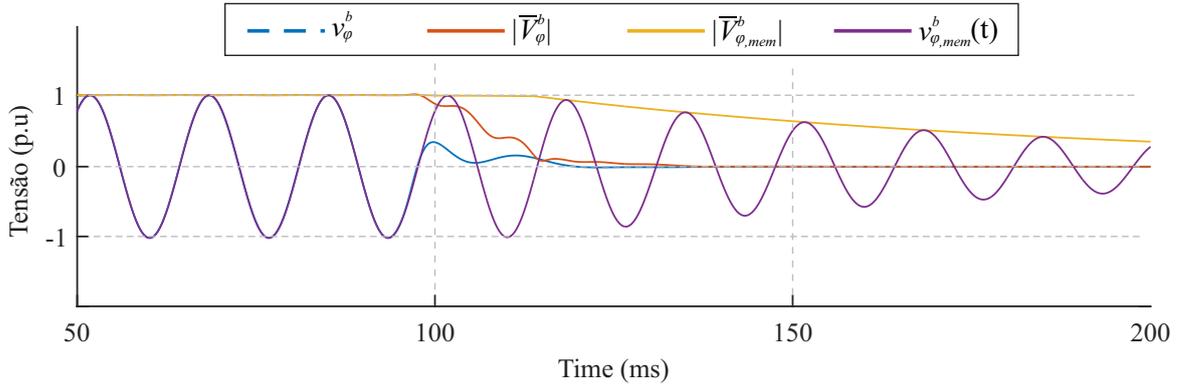


Figura 4.10: Atuação do filtro de memória de tensão diante de uma falta franca.

Diante de condições normais de operação, um valor pequeno de M , i.e. 0,1, leva a um fator de desvanecimento maior e, conseqüentemente, a tensão $\bar{V}_{\phi,mem}^b$ imediatamente se iguala à tensão \bar{V}_ϕ^b . Por outro lado, diante de um curto-circuito franco é recomendado que M adote um valor maior, i.e. 100, para que o desvanecimento da tensão memorizada seja imperceptível e a referência de tensão seja garantida. Adicionalmente, a existência de uma resistência de falta levaria a ter uma tensão menor que a nominal. Nesse caso, o valor de M pode adotar um valor menor daquele adotado para faltas francas.

Após determinar o fasor de tensão após o instante de falta, o algoritmo proposto requer a reconstrução deste sinal no domínio do tempo. Por isso, deve-se considerar que o ângulo introduzido pelo filtro mímico de forma inerente deve ser compensado para a correta determinação da potência instantânea. Levando em conta isso, os valores instantâneos da tensão memorizada são obtidos por

$$v_{\phi,mem}^b[k] = V_{\phi,mem}^b \cos(k\delta + \theta_{\phi,mem}^b + \Phi). \quad (4.24)$$

sendo $k\delta$ a discretização do ângulo instantâneo que seria obtido de uma rotação angular elétrica ao longo de um tempo e Φ é o valor do ângulo introduzido pelo filtro mímico aplicado no sinal

de corrente. Neste caso, este ângulo, Φ , foi introduzido de forma a compensar o deslocamento do sinal de corrente devido a este filtro, pensando no cálculo posterior da potência instantânea de forma correta.

4.3.4 Cálculo da potência instantânea

Utilizando os valores instantâneos da corrente obtida do filtro mímico e da tensão memorizada, a potência instantânea, $s_{\varphi,r}^b$ que flui em cada circuito conectado, r , no barramento, b , é calculada como

$$s_{\varphi,r}^b[k] = v_{\varphi,mem}^b[k] \cdot i_{\varphi,r}^{mimic}[k], \quad (4.25)$$

4.3.5 Remoção da potência CC

Como explicado na Seção 4.1, o sinal original da potência instantânea, $s(t)$, possui um valor médio diferente de zero que deve ser extraído para calcular corretamente as potência de operação e restrição. O valor da potência instantânea que será utilizado pelo relé diferencial é expressada por

$$w_{\varphi,r}^b[k] = s_{\varphi,r}^b[k] - avr [s_{\varphi,r}^b(J)], \quad (4.26)$$

onde o segundo termo representa o valor médio, denotado pela função avr , de $s_{\varphi,r}^b$ dentro uma janela móvel, J , cujo tamanho é $N/2$ correspondente a um período do sinal de potência.

4.3.6 Determinação das potências de restrição e operação

Utilizando os valores da potência instantânea com valor médio zero, as potências de operação, $w_{\varphi,op}^z$, e de restrição, $w_{\varphi,res}^z$ são calculadas com o auxílio dos *flags* de habilitação determinados pela lógica de seleção de zonas:

$$w_{\varphi,op}^z[k] = \left| \sum_{r=1}^R f_r^z w_{\varphi,r}^b[k] \right| \quad (4.27)$$

$$w_{\varphi,res}^z[k] = \sum_{r=1}^R |f_r^z w_{\varphi,r}^b[k]|. \quad (4.28)$$

De forma similar ao algoritmo de proteção utilizando os sinais de corrente, é necessário utilizar um sinal de restrição mais estabilizado para não ocasionar a operação indevida do relé. Para isso, a potência de restrição suavizada é definida por

$$\bar{w}_{\varphi,res}^z[k] = w_{\varphi,res}^z[k] - \frac{w_{\varphi,res}^z[k]}{\tau_{res}}(k - k_0), \quad (4.29)$$

onde k_0 é o instante onde i_{res} é máximo, ou seja, o instante a partir do qual i_{res} começa a decair. Neste caso, a constante de decaimento τ_{res} é considerada como a metade da constante que seria utilizada na proteção tradicional, uma vez que os lóbulos de potência surgem com o dobro da frequência que os lóbulos de corrente.

4.3.7 Restrição por harmônicas

Quando uma falta acontece em um dos circuitos conectados no barramento, ou seja, fora da zona de proteção do barramento, é possível que a corrente secundária do TC instalado neste vão seja bastante distorcida devido à saturação dele, como mostrado na Figura 4.11. Nesta figura, os dois primeiros intervalos nos quais o TC satura estão sinalizados pelas regiões destacadas.

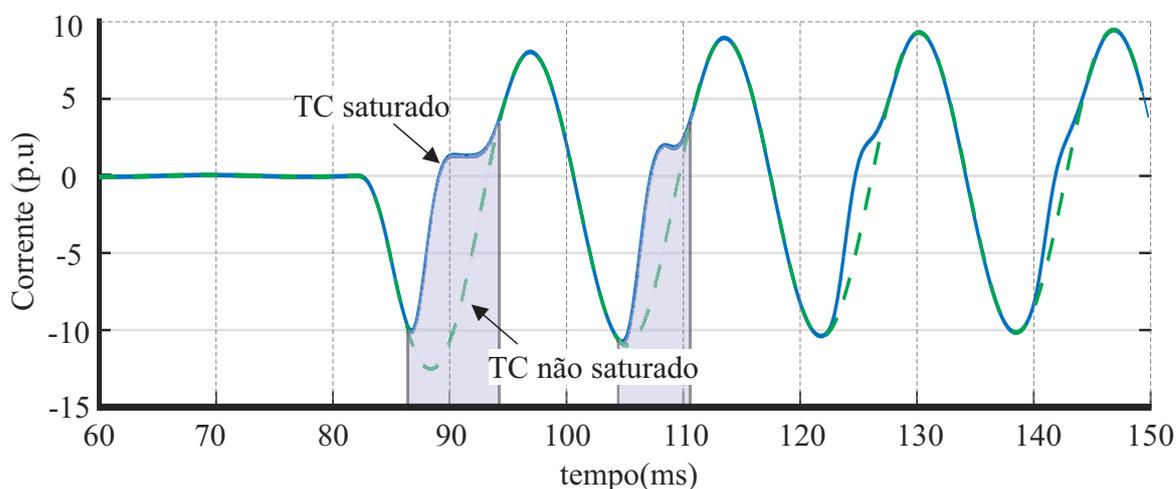


Figura 4.11: Sinal de corrente com TC saturado e projeção da corrente sem a saturação.

Com o algoritmo implementado da forma como foi explicado até agora e se a saturação do TC acontecesse, os sinais $s(t)$, $p(t)$ e $w(t)$ teriam as formas de onda ilustradas na Figura 4.12. É claramente visível que a potência CC estimada e, conseqüentemente, a potência final, $w(t)$, são sinais que não poderiam ser a princípio utilizados para um algoritmo de proteção diferencial porque os lóbulos que surgem nos períodos de saturação são muito grandes e os intervalos entre

dos lóbulos consecutivos são muito curtos, como mostrado na Figura 4.13. Como comentário antecipado, isto poderia ocasionar em alguns casos o envio do comando de disparo através da lógica 2-de-2 que utiliza a potência instantânea quando a lógica 1-de-1 é bloqueada desde o instante em que a falta foi reconhecida como externa.

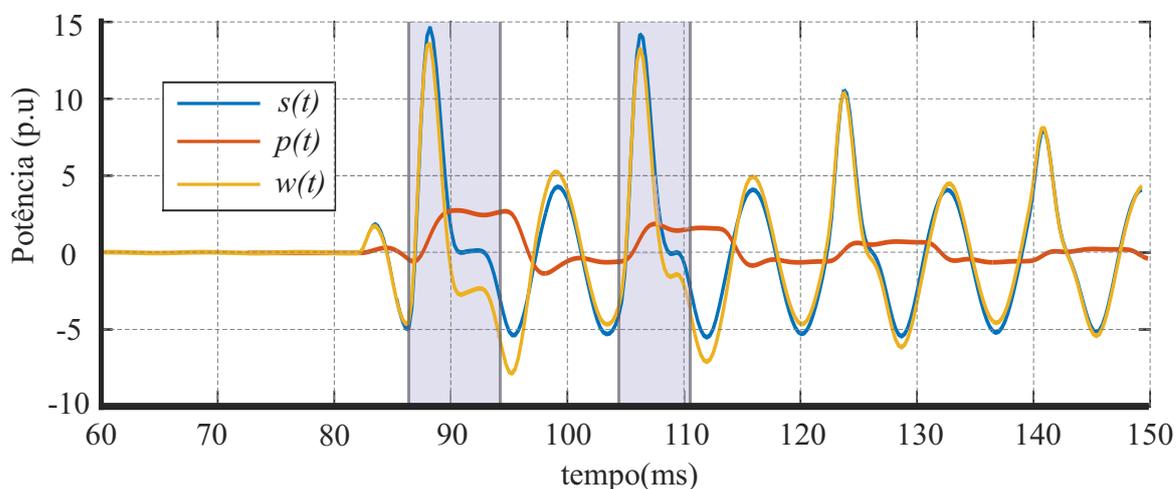


Figura 4.12: Procedimento de extração de $p(t)$ com o TC saturado.

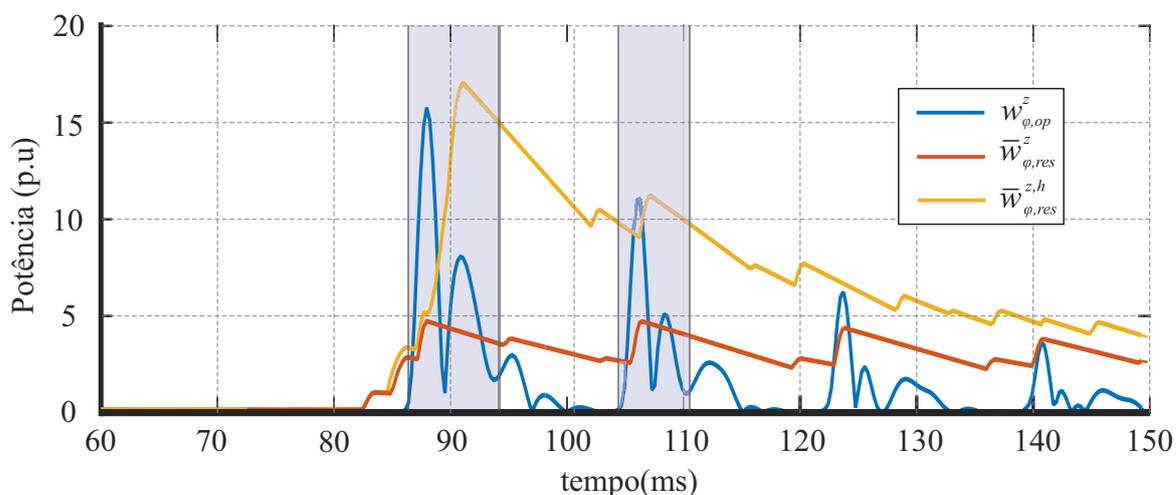


Figura 4.13: Potência de operação e potência de restrição com e sem reforço com a segunda harmônica.

Para solucionar este problema, seria razoável pensar na reconstrução da corrente para eliminar esses períodos de saturação. Assim, estaria-se voltando ao caso em que o único problema a resolver seria a eliminação da componente CC de decaimento exponencial da corrente, de forma a obter a resposta da Figura 4.5. Entretanto, a estratégia adotada no algoritmo proposto é melhorar a segurança da proteção com um reforço no sinal de restrição, como mostra a Figura 4.13, de forma a continuar aproveitando as características da lógica 2-de-2. Com esta perspec-

tiva, a obtenção de um sinal $p(t)$ bem comportado, que inicialmente visa a rápida estabilização de $\omega(t)$, deixa de ser uma prioridade apenas durante a ocorrência de uma falta externa e o objetivo principal passa a ser obter lóbulos de operação de potência, w_{op}^* , com amplitudes reduzidas e maiores intervalos entre eles, como ilustrado na Fig. 4.14. Com esta medida, o envio de *trip* pela lógica 2-de-2 não aconteceria. Para isso, o fasor da segunda harmônica de corrente é estimado a partir do sinal original mas o filtro mímico não é aplicado nesta componente, e um sinal de restrição é construído a partir dele, junto com o fasor da tensão.

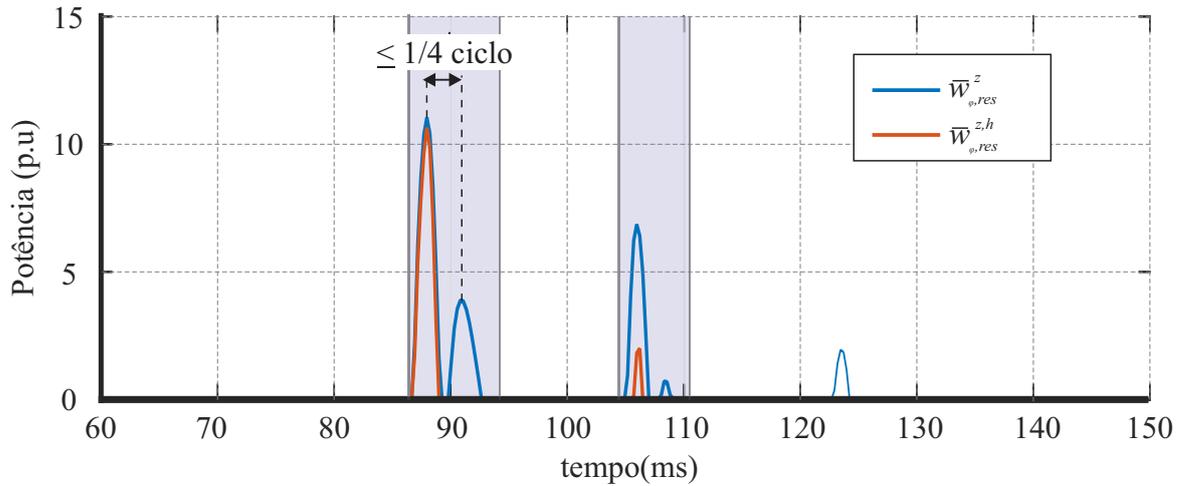


Figura 4.14: Lóbulos de operação diante da saturação do TC com e sem reforço do sinal de restrição.

Uma vez explicada a estratégia para melhorar a segurança da proteção diante de faltas externas com saturação de TC, é necessário tomar os devidos cuidados para a sua correta implementação. O objetivo então é obter lóbulos de potência de restrição harmônica que estejam em fase com os lóbulos de potência de restrição original. Isto significa que a etapa de suavização do sinal de restrição é executado apenas após a somatória dos lóbulos de restrição original e harmônico. Dessa forma, seria garantido que não haveria distorção do sinal de restrição. O procedimento para a implementação é descrito a seguir:

1. A segunda componente harmônica de corrente $\hat{I}_{2h} = I_{2h} \angle \theta_{2h}$ é inicialmente estimada para cada fase dos circuitos conectados no barramento. Neste trabalho, o algoritmo de estimação utilizado é o Filtro Coseno Modificado (HART *et al.*, 2000).
2. O sinal fasorial da corrente de segunda harmônica é reconstruída no tempo. Contudo, não seria coerente fazer isso com a frequência de segunda harmônica e multiplicá-lo pelo

sinal de tensão, que tem a frequência fundamental. Também não faria sentido pensar em utilizar uma corrente reconstruída no tempo com o dobro da frequência fundamental e multiplicá-la por uma tensão que também tenha o dobro da frequência fundamental porque obter-se-ia um sinal com quatro vezes a frequência fundamental. O apropriado para este algoritmo seria então reconstruir o fasor da segunda harmônica de corrente com a frequência fundamental, como expressado na Equação 4.30, e multiplicá-lo pela tensão que também oscila com a mesma frequência.

$$i_{2h}[k] = I_{2h}[k] \cos(k\delta + \theta_{2h}[k]), \quad (4.30)$$

onde k representa a amostra.

Como explicado previamente, o motivo disso é a necessidade de obter lóbulos de potência de restrição harmônica e com a mesma frequência que os lóbulos de potência de restrição original, de forma que elas possam ser idealmente sobrepostas.

3. A potência instantânea de segunda harmônica, s_{2h} , é calculada multiplicando a corrente de segunda harmônica reconstruída no tempo com a frequência fundamental pela tensão memorizada, também reconstruída no tempo.
4. A potência ativa obtida partir de s_{2h} é estimada de forma a ter uma potência final de segunda harmônica com valor médio zero, w_{2h} .
5. A potência de restrição de segunda harmônica, $w_{\varphi,res}^{z,2h}$, é calculada a partir de w_{2h} .
6. Finalmente, a potência de restrição total, utilizada para garantir a segurança do relé diante de faltas externas, é determinada através de

$$w_{\varphi,res}^{z,h}[k] = w_{\varphi,res}^z[k] + \frac{K_{comp}}{SLP_p} w_{\varphi,res}^{z,2h}[k], \quad (4.31)$$

onde K_{comp} é uma porcentagem da segunda harmônica de potência.

7. A potência $w_{\varphi,res}^{z,h}$ é suavizada da mesma forma descrita pela Equação (4.29). Ainda, com o intuito de não prejudicar a sensibilidade da função nos casos de faltas evolutivas, externas para internas, considerou-se conveniente utilizar uma constante de tempo menor no processo de suavização, que decai a partir de cada pico do sinal de restrição original.

4.4 LÓGICA DE *TRIP*

Após a descrição de certas medidas para superar os inconvenientes inerentes a uma função de potência diferencial, é possível utilizar os sinais de restrição e operação dentro da lógica de *trip*, cujo fluxograma é apresentado na Fig. 4.15, que como mencionado desde o início deste trabalho, está inspirada nas lógicas de proteção tradicional 1-de-1 e 2-de-2.

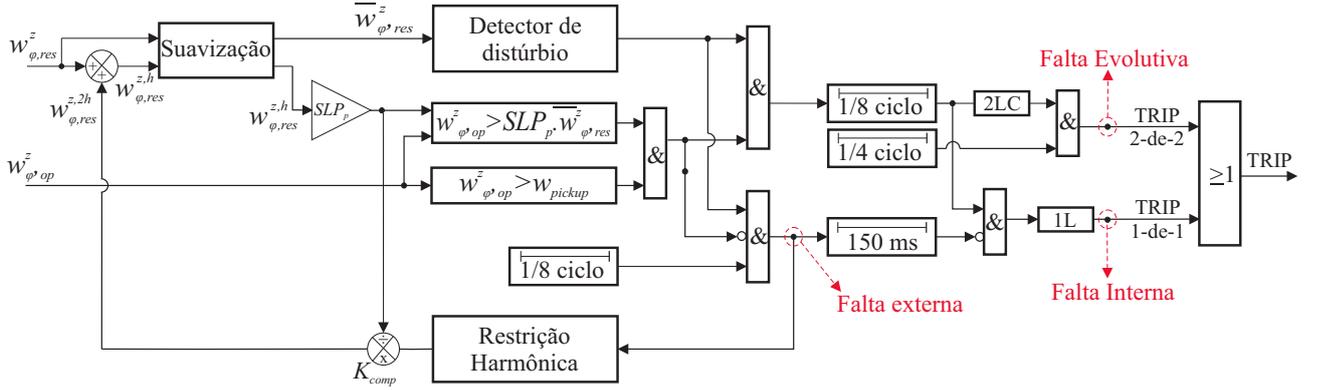


Figura 4.15: Lógica de *trip* do algoritmo proposto.

Aqui, a potência de restrição original, $\bar{w}_{\varphi, res}^z$, utilizada pode ser alterada pelo *flag* de detecção de falta externa. Isto é, $\bar{w}_{\varphi, res}^z$ passa a ser em qualquer caso denominada de $\bar{w}_{\varphi, res}^{z,h}$, sendo h um indicador de que a potência de restrição utilizada depende da inclusão ou não da segunda harmônica. Caso não exista uma falta externa, $\bar{w}_{\varphi, res}^{z,h}$ seria igual ao sinal de restrição original, $\bar{w}_{\varphi, res}^z$. Entretanto, $\bar{w}_{\varphi, res}^{z,h}$ seria a soma de $\bar{w}_{\varphi, res}^z$ mais o reforço harmônico. Apartir deste detalhamento, por um lado, a potência de restrição original, $\bar{w}_{\varphi, res}^z$, sem reforço harmônico, é utilizada em um detector de distúrbio. É mandatório que este elemento reconheça, de fato, a presença de um distúrbio para permitir a ativação das lógicas 1-de-1 e 2-de-2. Isto é realizado calculando a variação de $\bar{w}_{\varphi, res}^z$ da seguinte forma:

$$d\bar{w}_{\varphi, res}^z[k] = \left| \frac{\bar{w}_{\varphi, res}^z[k] - \bar{w}_{\varphi, res}^z[k-1]}{\Delta t} \right|. \quad (4.32)$$

Se tal variação for maior que um valor predeterminado, o distúrbio é detectado e as lógicas de proteção começam a avaliar o tipo de falta que está ocorrendo. Por sua vez, seja qual for o valor do $\bar{w}_{\varphi, res}^{z,h}$ adotado, este valor é multiplicado por um *slope* predeterminado, SLP_p . O resultado deste último cálculo é comparado com a potência de operação, $w_{\varphi, op}^z$. Ao mesmo tempo, $w_{\varphi, op}^z$ é comparado a um valor mínimo de *pickup*, w_{min} , de forma que se

$$w_{\varphi, op}^z > w_{min} \quad \text{e} \quad w_{\varphi, op}^z > SLP_p \cdot \bar{w}_{\varphi, res}^z, \quad (4.33)$$

pode-se dizer que as condições de operação são satisfeitas, o que indicaria a provável presença de uma falta dentro da zona de proteção do barramento. Entretanto, para confirmar esta hipótese, primeiro é necessário que estas condições permaneçam durante $1/8$ de ciclo e também, que o detector de falta externa não tenha sido ativado. Só nessas circunstâncias, a falta seria de fato reconhecida como interna e a lógica de atuação rápida 1-de-1 enviaria o comando de *trip* ao disjuntor, como mostrado na Figura 4.16.

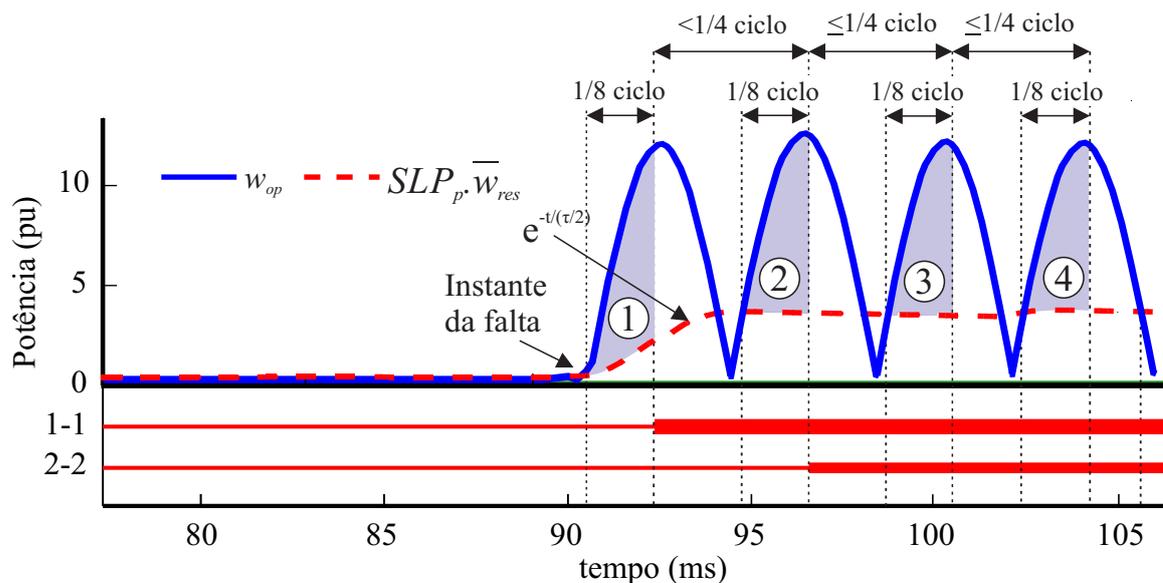


Figura 4.16: Plotagem de w_{op} e \overline{w}_{res} diante de uma falta interna.

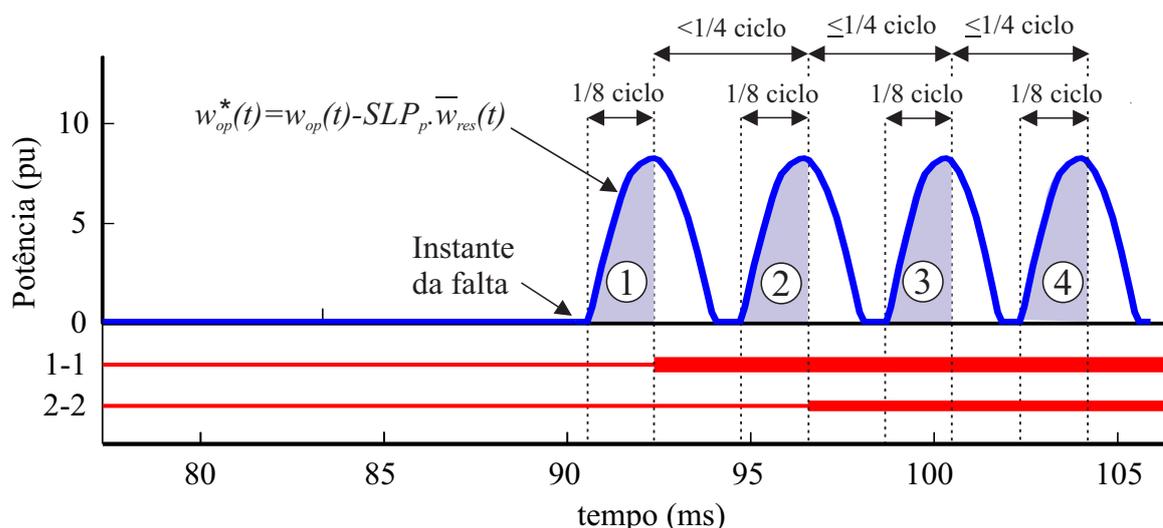


Figura 4.17: Lóbulos de operação obtidos a partir dos sinais de potência instantânea mostrado na Figura 4.16.

Por outro lado, o *flag* de falta externa será ativado caso as condições estabelecidas nas expressões da Equação (4.33) não forem satisfeitas simultaneamente durante um $1/8$ de ciclo,

após detecção de distúrbio. Nesse caso, o relé entra em modo seguro e, conseqüentemente, a lógica 1-de-1 é bloqueada durante 150 ms. Apesar dessa inibição parcial da proteção, a evolução da falta externa para dentro da zona de proteção poderia ainda ser identificada através da lógica 2-de-2. Para isso, a potência harmônica de segunda harmônica, $w_{\varphi, res}^{z, 2h}$, é adicionada à potência de restrição original, $\bar{w}_{\varphi, res}^z$, para obter agora a potência de restrição reforçada, $w_{\varphi, res}^{z, h}$. Portanto, esta falta evolutiva seria identificada apenas se as condições descritas na Equação (4.33) forem satisfeitas durante 1/8 de ciclo em dois lóbulos consecutivos (2LC), utilizando agora a potência harmônica reforçada, $w_{\varphi, res}^{z, 2h}$, e também se o intervalo de tempo entre tais lóbulos de operação fosse menor que 1/4 de ciclo.

A propósito, os lóbulos de operação com esta nova estratégia são melhor visualizados plotando $w_{op}^*(t) = w_{op}(t) - SLP_p \cdot \bar{w}_{res}(t)$, como mostrado na Figura 4.17. Como resultado, o sistema de proteção diferencial baseado na potência instantânea fornece, no mesmo intervalo de tempo, o dobro de lóbulos se comparado com a proteção diferencial tradicional que utiliza a corrente instantânea. Isto significa reduzir os tempos de tomada de decisão pela metade, independente do tipo de falta.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou a descrição detalhada do algoritmo proposto desde a entrada dos sinais de tensão e corrente vindo dos transformadores para instrumentos, até a sua entrada na lógica de proteção para envio ou bloqueio do comando de *trip*. De forma geral, todas as observações feitas em relação à natureza das correntes de curto-circuito, assim como da natureza física e especificações dos equipamentos instalados serviram para desenvolver este algoritmo. Assim mesmo, foram tomadas algumas medidas para lidar com dificuldades que são próprias dos sinais de potência elétrica em uma situação de falta. Também foi mostrado como a lógica de *trip* tradicional pode ser adequada para ser aplicada na proposta deste trabalho. Assim, da forma como esta função foi desenvolvida, é esperado que todo tipo de falta seja identificada de forma rápida, idealmente com metade do tempo das abordagens tradicionais baseadas em corrente.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

O desempenho do algoritmo de proteção diferencial proposto para barramentos, aqui denominada 87BP, é avaliado neste capítulo. Simultaneamente, ele é comparado com a função diferencial tradicional 87B. Para isso, diferentes tipos de falta foram simulados em um sistema de potência modelado no programa ATPdraw. Estas faltas são internas, externas com diferentes graus de saturação de TC e faltas evolutivas, ou seja, externas para internas. Outros cenários, como a energização de um transformador ou a ocorrência de curtos-circuitos *cross-country* são simulados também para testar a segurança do algoritmo proposto. Adicionalmente, a sensibilidade do método é avaliada utilizando diversos valores de resistência de falta e ângulos de incidência de falta de forma separada. Além disso, uma análise de sensibilidade é feita para faltas internas e evolutivas combinando diferentes valores de resistência de falta para terra e entre fases com diferentes ângulos de incidência, para diferentes tipos de falta. Por outro lado, devido à preocupação com a amplificação do ruído decorrente da aplicação do filtro mímico pelo algoritmo proposto, as mesmas simulações em massa mencionadas previamente foram repetidas introduzindo este sinal aleatório nos sinais de corrente e tensão.

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA ANALISADO

O sistema elétrico utilizado para a simulação das falta, cujas lógicas de zonas de proteção são apresentadas no Apêndice A, é mostrado na Figura 5.1, funciona em 230 kV/60 Hz e tem o mesmo arranjo utilizado para mostrar a construção das lógicas de proteção na Seção 3.3.1. Durante a operação normal do sistema avaliado, as linhas de transmissão TL1, TL3, assim como o transformador TF1 estão conectados à Barra 1. Por sua vez, as linhas TL2 e TL4, assim como o transformador TF2 estão conectados na Barra 2.

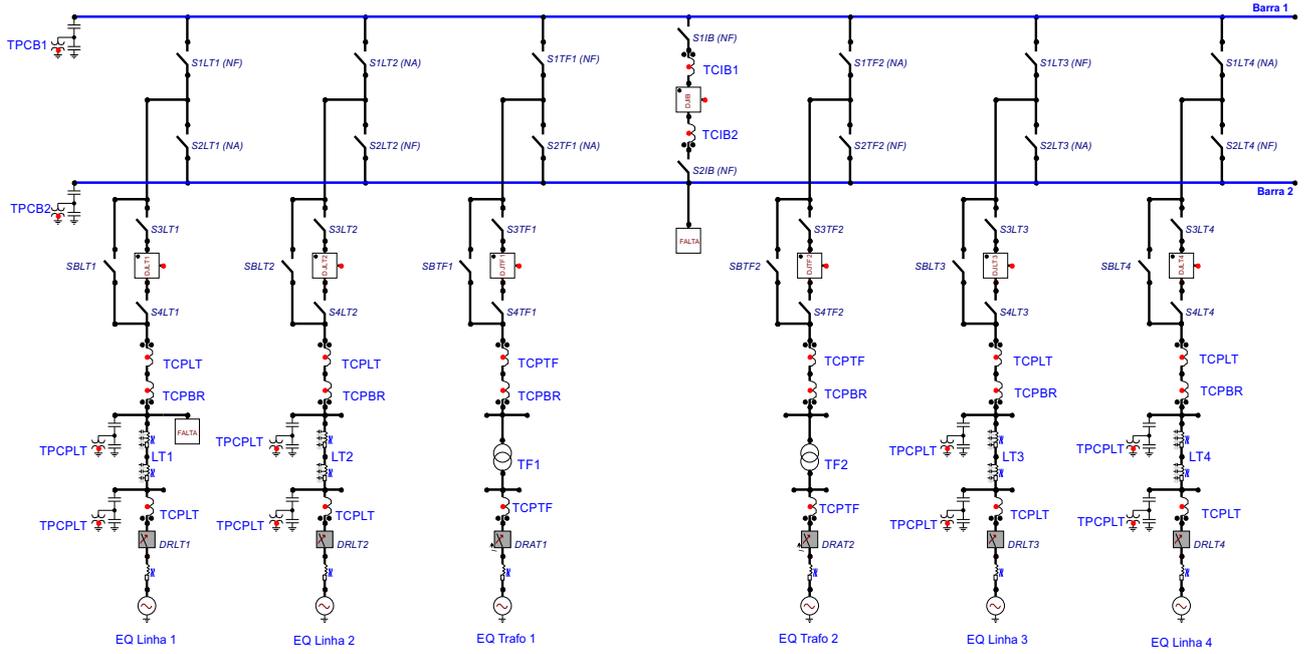


Figura 5.1: Sistema de potência modelo no programa ATPdraw: barra dupla, disjuntor simples a 5 chaves.

Em cada um destes circuitos, uma fonte remota é modelada por circuitos equivalentes de Thévenin. Os parâmetros das linhas de transmissão, transformadores e terminais remotos estão mostrados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.1: Parâmetros das linhas de transmissão.

$Z_0(\Omega/\text{km})$	$Z_1(\Omega/\text{km})$	$B_0(\mu\text{S}/\text{km})$	$B_1(\mu\text{S}/\text{km})$
$0,532 + j1,541$	$0,098 + j0,510$	2,293	3,252

Tabela 5.2: Parâmetros dos transformadores de potência.

Transformador	S (MVA)	Primário (kV)	Secundário (kV)
TF1	450	500 (Y)	230 (Y)
TF2	150	230 (Y)	69 (Δ)

Tabela 5.3: Parâmetros dos equivalentes remotos.

Equivalente	Tensão (pu)	$Z_0(\Omega)$	$Z_1(\Omega)$
Linha 1	$1,00\angle 0^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
Linha 2	$1,00\angle -5^\circ$	$18,41 + j28,69$	$13,39 + j20,89$
TF1	$1,00\angle -5^\circ$	$28,07 + j43,74$	$18,71 + j29,16$
TF2	$1,00\angle 0^\circ$	$5,52 + j8,61$	$4,02 + j6,26$
Linha 3	$1,00\angle -10^\circ$	$18,42 + j28,69$	$13,39 + j20,87$
Linha 4	$1,00\angle 4^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$

No sistema descrito, os sinais de corrente vêm dos enrolamentos secundários dos TCs C800 1200-5 A e os sinais de tensão são obtidos dos TPs de acoplamento capacitivo de 230 kV, cujos modelos foram propostos pelo IEEE Power System Relaying Committee (2009). O tempo máximo de simulação de cada caso é de 150 ms, sendo os sinais de tensão e corrente obtidos da simulação do ATP com um passo de $1\mu s$, correspondente a uma taxa de amostragem de 16667 amostras/ciclo. Estes sinais passaram por um filtro anti-aliasing Butterworth passa-baixas de 3ª ordem com uma frequência de corte de 240 Hz. Em seguida, os sinais são reamostrados para uma taxa de amostragem de 64 amostras/ciclo, correspondente a uma taxa de amostragem de 3840 Hz.

5.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Dependendo do caso, os resultados serão apresentados utilizando os *flags* de operação, os sinais de restrição e operação, ou simplesmente os lóbulos de operação, assim como os sinais de corrente e potência ou as variações dos sinais de restrição por fase. Deve-se ressaltar que os resultados visam mostrar o desempenho da função proposta, 87BP, assim como compará-lo com a função tradicional 87B. Para isso, foi atribuído um valor de *slope*, fator multiplicador dos sinais de restrição, de 0,3 tanto para a função proposta, 87BP, quanto para a função tradicional, 87B. Diante da ocorrência de uma falta externa, a lógica de proteção da função 87BP prevê o reforço harmônico do sinal de restrição. Para esta situação, foi decidido que o valor do *slope* dos sinais de restrição da função 87B permaneça igual, tal qual a formulação tradicional. Da mesma forma, a constante de tempo do sinal de restrição suavizada é inicialmente de 64 ms para a função 87B e 32 ms para a função 87BP. Quando uma falta externa for detectada, a função 87BP adquire um valor de 16 ms para compensar o incremento do *slope*, visando manter a sensibilidade da proteção em caso da falta externa evoluir para interna. Por sua vez, a constante de tempo da restrição da função tradicional, 87B, é mantida constante. Isto é justificado pelo fato que o trabalho não pretende melhorar um algoritmo que já está implementado e amplamente utilizado no mercado. A princípio, isso poderia representar uma clara desvantagem desta função em relação ao algoritmo proposto uma vez que não existe um meio de dar maior segurança ao relé diante de faltas externas. Contudo, foi constatado em casos pontuais que tal imposição não ocasiona necessariamente uma operação errada do relé com esta função. Na apresentação dos

resultados, serão mostrados os estados lógicos dos *flags* de detecção de distúrbio, de falta externa, assim como dos trips enviados pelas lógicas 1-de-1 e 2-de-2 de cada método e em cada uma das fases envolvidas na falta. As mesmas serão identificadas de acordo com a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso.

Variável	Nome
FDD 87BP	Detetor de distúrbio com a função proposta
FDD 87B	Detetor de distúrbio com a função tradicional
EFD 87BP	Detetor de falta externa com a função proposta
EFD 87B	Detetor de falta externa com a função tradicional
1-1 87BP	Operação pela lógica 1-de-1 da função proposta
1-1 87B	Operação pela lógica 1-de-1 da função tradicional
2-2 87BP	Operação pela lógica 2-de-2 da função proposta
2-2 87B	Operação pela lógica 2-de-2 da função tradicional

5.2.1 Curto-circuito trifásico

Neste caso, uma falta trifásica é aplicada na barra 1 em 80 ms. Os tempos de operação são apresentados na Tabela 5.5, mostrando que a função proposta 87BP é realmente mais rápido do que a função tradicional 87B. O desempenho de ambas no tempo em cada fase é visualizado nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4. Como pode ser visto, o esquema proposto é aproximadamente duas vezes mais rápido que a função tradicional uma vez que um lóbulo de operação de corrente abrange dois lóbulos de potência (ver Figura 5.4). Além disso, uma vez que a eliminação da componente de decaimento exponencial não é utilizada na função 87B, os lóbulos ficam alternando entre grandes e pequenos, o que atrasa a atuação do relé com a lógica 2-de-2 (Figuras. 5.2 e 5.3). Isto acontece porque embora a contagem das amostras em cada lóbulo atinja o número necessário para reconhecer uma provável condição de operação, o intervalo entre ambas as contagens não é atingido justamente devido às oscilações.

Tabela 5.5: Tempos de operação para uma falta interna trifásica em ms.

Logica	Fase A	Fase B	Fase C
87BP 1-1	2,08	3,64	2,08
87B 1-1	4,68	4,42	4,42
87BP 2-2	6,25	7,81	5,46
87B 2-2	24,73	22,39	9,11

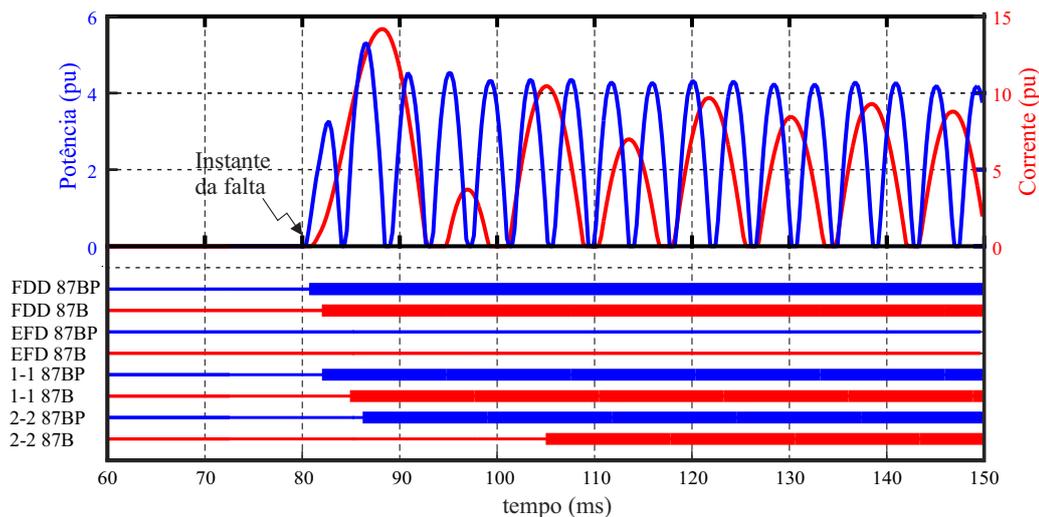


Figura 5.2: ω_{op}^* e i_{op}^* na fase A para uma falta trifásica.

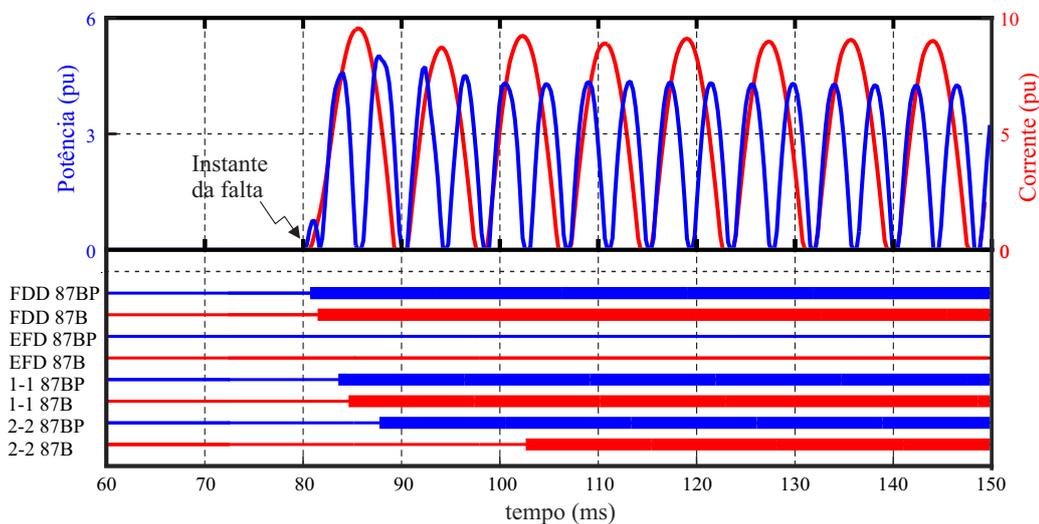


Figura 5.3: ω_{op}^* e i_{op}^* na fase B para uma falta trifásica.

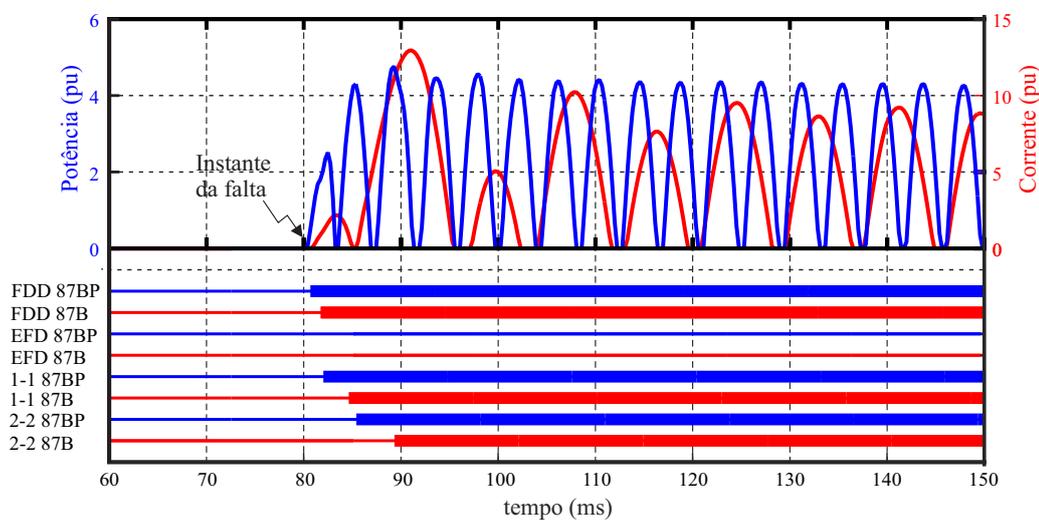


Figura 5.4: ω_{op}^* e i_{op}^* na fase C para uma falta trifásica.

5.2.2 Curto-circuito bifásico

Um curto-circuito bifásico interno na Barra 2, envolvendo as fases B e C e a terra, foi simulado no mesmo instante que no caso anterior, 80 ms. A Figura 5.5 mostra uma resposta similar à resposta obtida no curto-circuito trifásico, exceto que a contagem mínima para a declaração de uma falta interna acontece apenas no segundo lóbulo de operação, em 84,04 ms. Isto porque o primeiro lóbulo de potência não continha as 8 amostras, correspondentes a 1/8 de ciclo. Devido a isso, a lógica 2-de-2 envia o sinal de *trip* apenas no terceiro lóbulo.

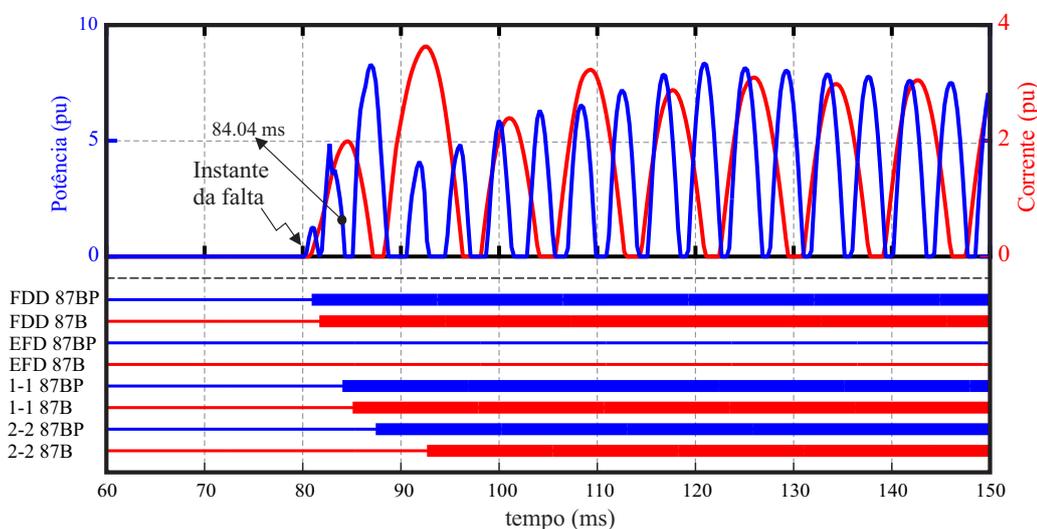


Figura 5.5: Lóbulos e *flags* de operação da fase B em um curto-circuito interno bifásico BCT.

No caso na fase C, pode-se observar na Figura 5.6 que a função 87B opera como esperado, ou seja, os *trips* 1-de-1 e 2-de-2 foram enviados no primeiro e no segundo lóbulo de corrente, respectivamente. Entretanto, a função proposta, que também executa o envio do comando de abertura no primeiro lóbulo de corrente, sofre uma demora com a sua função 2-de-2. Isto é porque os instantes finais em que a contagem das amostras, onde as condições de operação são satisfeitas (82,22 ms e 86,65 ms), tem uma diferença no tempo de 2,43 ms que supera o tempo máximo definido pela lógica 2-de-2 para a declaração da falta como interna. Estas condições apenas foram satisfeitas entre o segundo e o terceiro lóbulo, quando as contagens foram realizadas em 86,66 ms e 90,57 ms, dando uma diferença de 3,92 ms, inferior a 1/4 de ciclo.

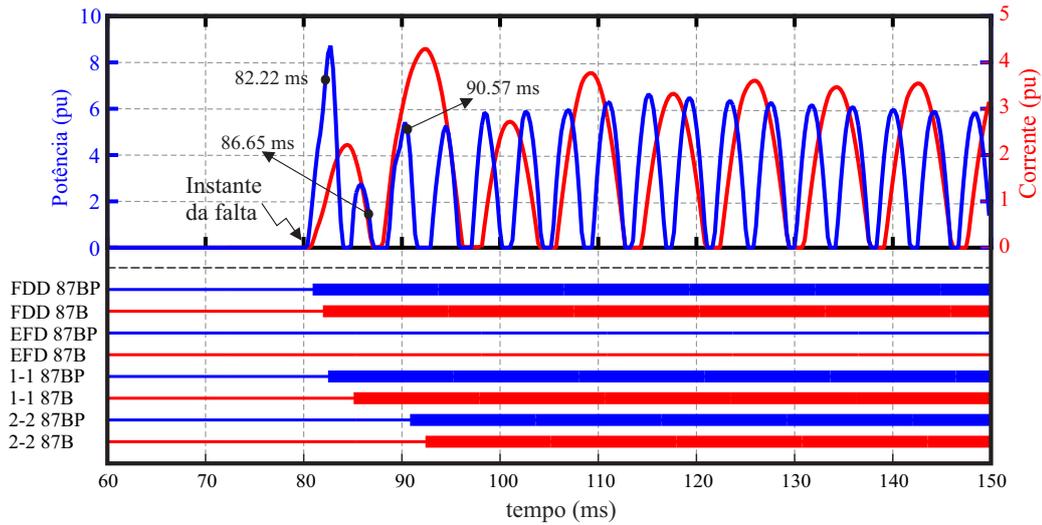


Figura 5.6: Lóbulos e *flags* de operação da fase C em um curto-circuito interno bifásico BCT

5.2.3 Curtos-circuitos externos

Nesta subseção, a robustez do algoritmo proposto é testado com a presença de curtos-circuitos externos à zona de proteção do barramentos. Para isso, avaliam-se os casos onde o TC do circuito envolvido não apresenta saturação e quando apresenta saturação leve e severa. Para isso, um curto-circuito monofásico foi aplicado no circuito da linha de transmissão LT1 em 90 ms, a pouca distância do TC que delimita a zona lógica de proteção da Barra 1. Para a simulação da saturação, a resistência da carga do relé foi alterada para 8Ω e 20Ω para os casos de saturação leve e severa, respectivamente. A Figura 5.8 onde aparecem os sinais de corrente e potência, e os sinais de restrição e operação das funções 87B e 87BP, mostra que os sinais de restrição com ambas técnicas crescem enquanto os sinais de operação permanecem perto de zero. Quando uma saturação leve do TC é introduzida na simulação, percebe-se o incremento considerável dos sinais de operação em ambos os casos até superar, nos dois métodos, os sinais de restrição, como ilustrado na Figura 5.9. Quando esta saturação é mais forte, os sinais de corrente e potência da linha LT1 ficam mais distorcidos ainda, como mostrado na Figura 5.10. Como consequência, a amplitude dos sinais de operação ficam maiores que com uma saturação leve. Apesar disso, de acordo com os *flags* de operação mostrados nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, as faltas externas mencionadas foram reconhecidas e nenhum comando de abertura de disjuntor foi enviado, embora tenham surgido lóbulos de operação. No caso do algoritmo proposto, isto é conseguido devido ao reforço harmônico no seu sinal de restrição.

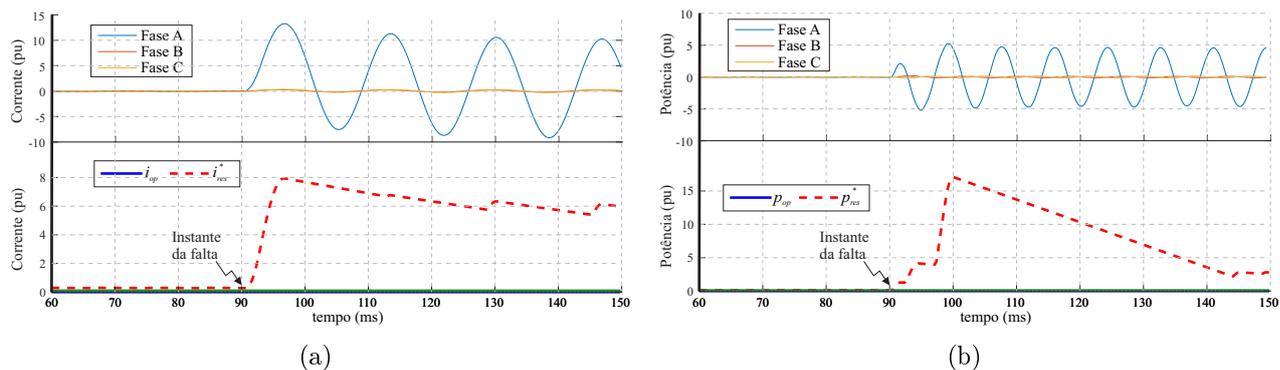


Figura 5.7: Curto-circuito externo sem saturação de TC. a) Função 87B; b) Função 87BP.

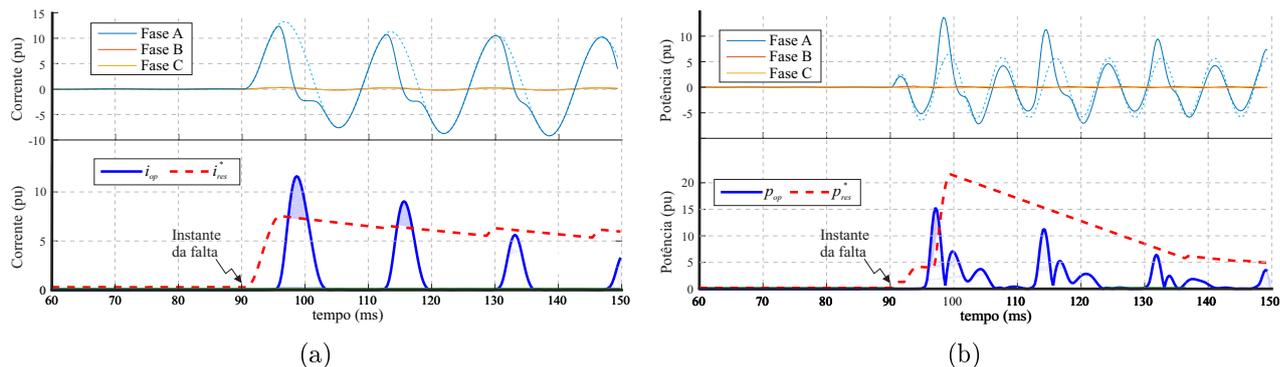


Figura 5.8: Curto-circuito externo com saturação leve. a) Função 87B; b) Função 87BP.

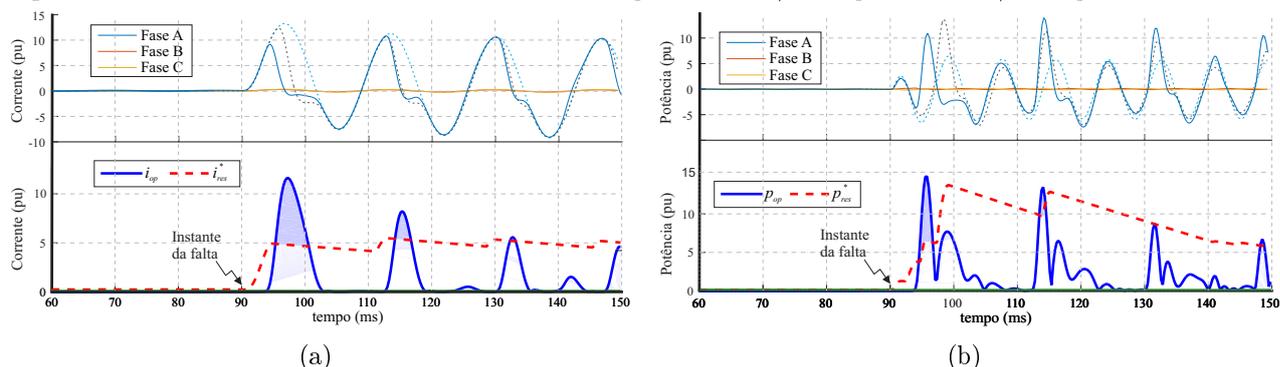


Figura 5.9: Curto-circuito externo com saturação severa. a) Função 87B; b) Função 87BP.

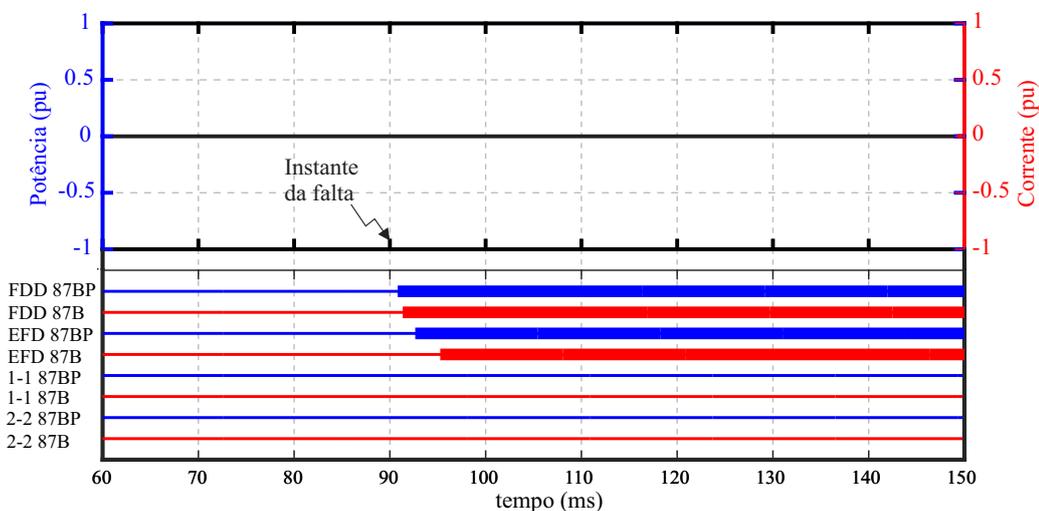


Figura 5.10: Operação diante de um curto-circuito externo sem saturação de TC

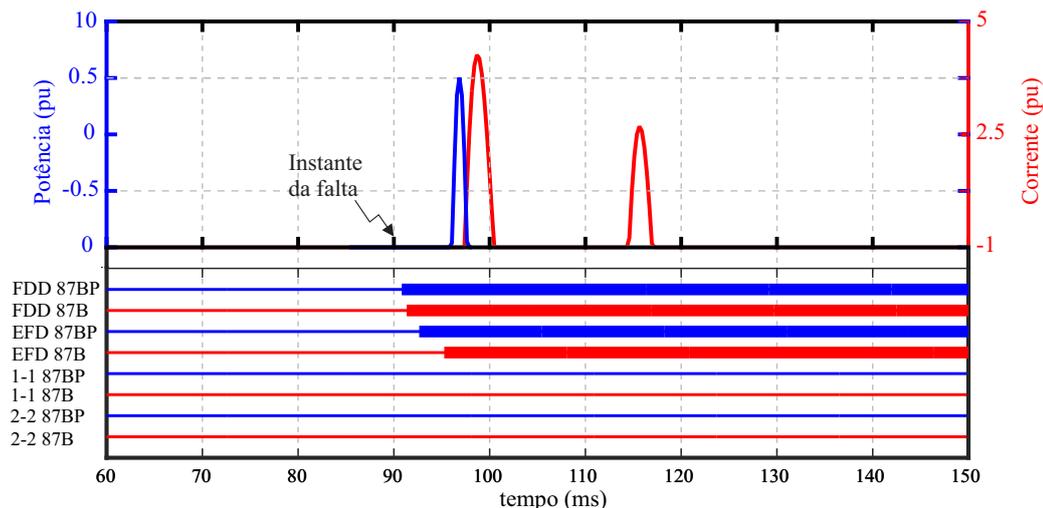


Figura 5.11: Operação diante de um curto-circuito externo com saturação moderada de TC

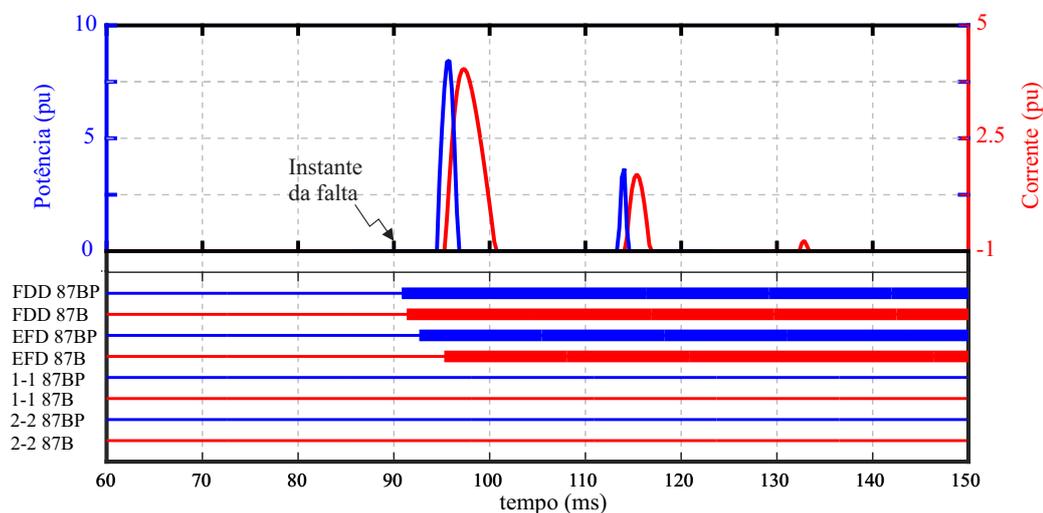


Figura 5.12: Operação de operação diante de um curto-circuito externo com saturação severa de TC

5.2.4 Falta *Cross-Country*

Uma falta *cross-country* inclui duas faltas monofásicas em dois lugares diferentes, acontecendo simultaneamente. Neste caso, uma falta na fase A para terra, AT, acontece inicialmente na linha de transmissão LT1 em 80 ms. Posteriormente, outra falta na fase B para terra, BT, ocorre na linha de transmissão LT2 em 100 ms. Foi assumido que ambas faltas são externas, mas a primeira falta não ocasiona a saturação do TC do circuito correspondente e a segunda falta sim, no TC da linha LT2. Também, a linha LT2 foi conectada na Barra 1 apenas para este caso. É por isso que, de acordo com a Figura 5.13, as funções 87BP e 87B detectam a falta externa na fase A da linha LT1, mas não existem lóbulos de operação. Por sua vez, a

Figura 5.14 mostra que as funções detectam a falta interna na fase B do circuito LT2, e que existem lóbulos de operação de potência e de corrente. Contudo, uma inspeção visual pode gerar algumas dúvidas sobre a função tradicional devido à amplitude e duração dos lóbulos de corrente, diferente dos lóbulos de potência que são menores e com curta duração.

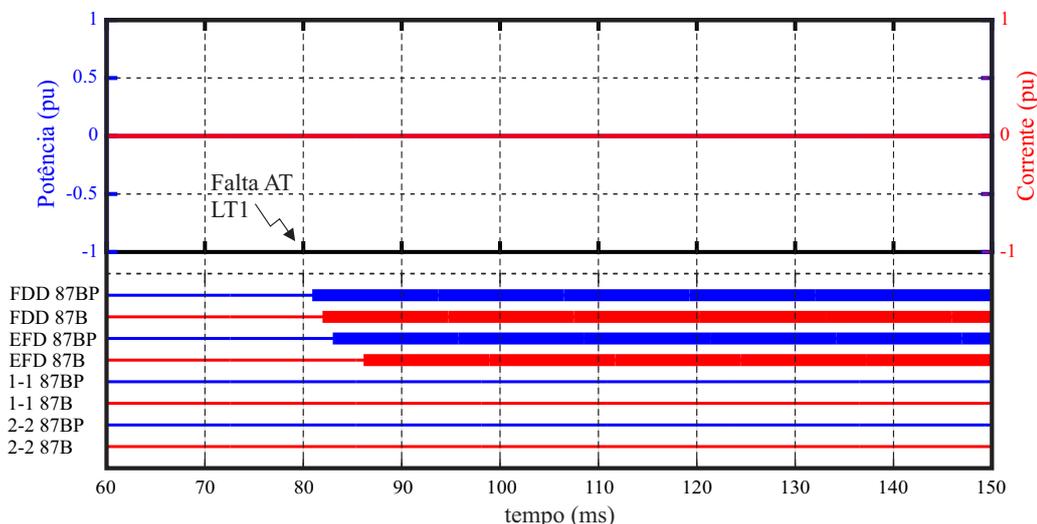


Figura 5.13: Lóbulos e *flags* de operação das funções 87BP e 87B na fase A.

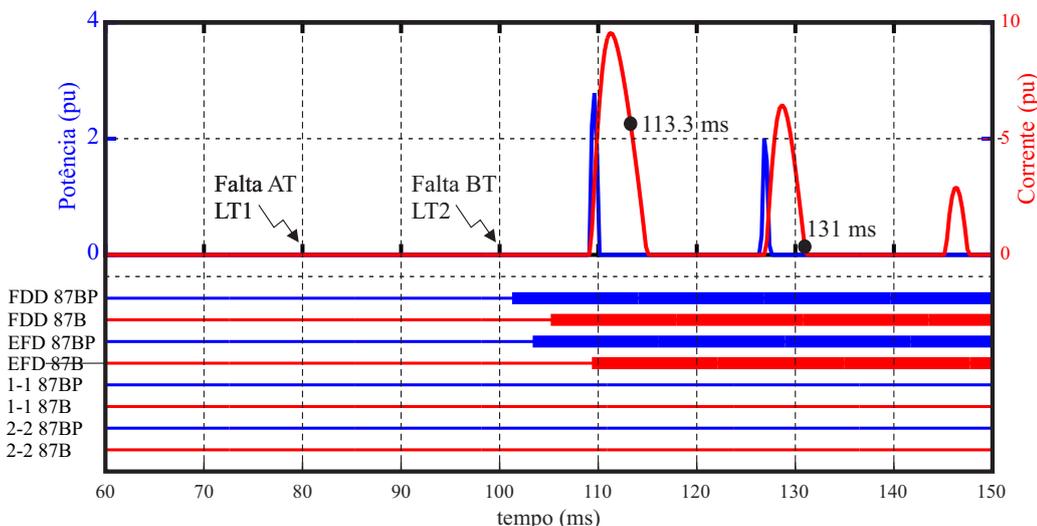


Figura 5.14: Lóbulos e *flags* de operação das funções 87BP e 87B na fase B.

5.2.5 Curto-circuito evolutivo

Neste caso, um curto-circuito externo que leva à saturação do TC foi aplicado em 80 ms na linha LT1 e, posteriormente, esta falta evolui para uma falta interna ABT em 102 ms. Desta forma, a detecção da falta externa inicial causa o bloqueio da lógica de *trip* rápido para ambas as funções 87BP e 87B. Nesse caso, o comando de *trip* pode agora ser enviado apenas pelas

lógicas 2-de-2. A Figura 5.15 mostra o desempenho dos elementos da fase A. Como observado, a lógica de *trip* 2-de-2 com o algoritmo proposto detecta a falta interna na fase A em 107,8 ms, enquanto a função 87B consegue fazer o mesmo apenas em 114,32 ms. De novo, uma vez que a componente de decaimento exponencial não foi eliminada na função tradicional, os lóbulos de corrente alternam entre lóbulos grandes e pequenos, atrasando o envio do *trip*. Por sua vez, a Figura 5.16 mostra a resposta dos elementos na fase B. Os mesmos também detectam a falta externa, de forma que ambas as funções, 87BP e 87B, ativam o modo de operação segura. Como resultado, quando a falta externa evolui para uma falta interna, o comando de *trip* é enviado pela lógica 2-de-2 com as funções 87 BP e 87B em 108,6 ms e 127,1 ms, respectivamente.

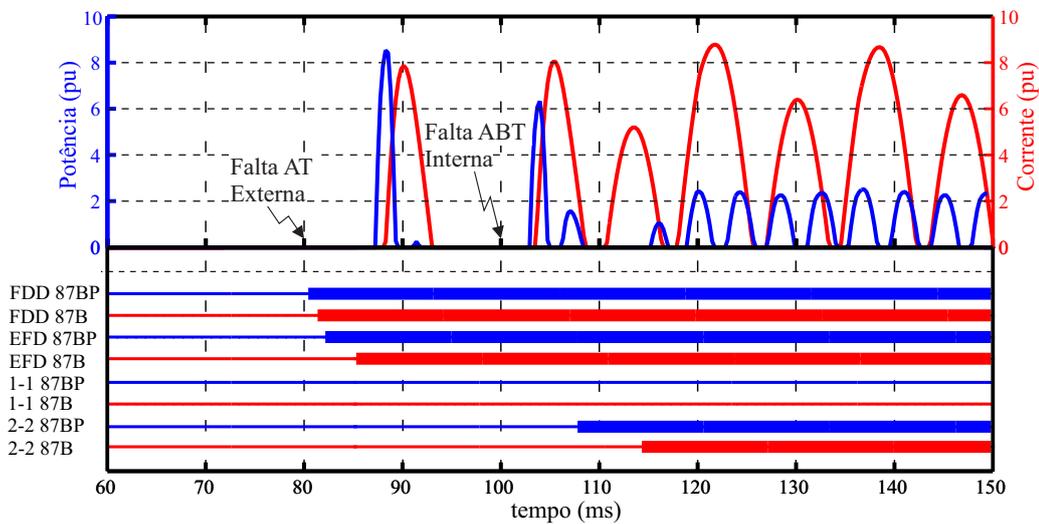


Figura 5.15: ω_{op}^* e i_{op}^* na fase A para uma falta AT com saturação de TC, que evolui para uma falta ABT interna.

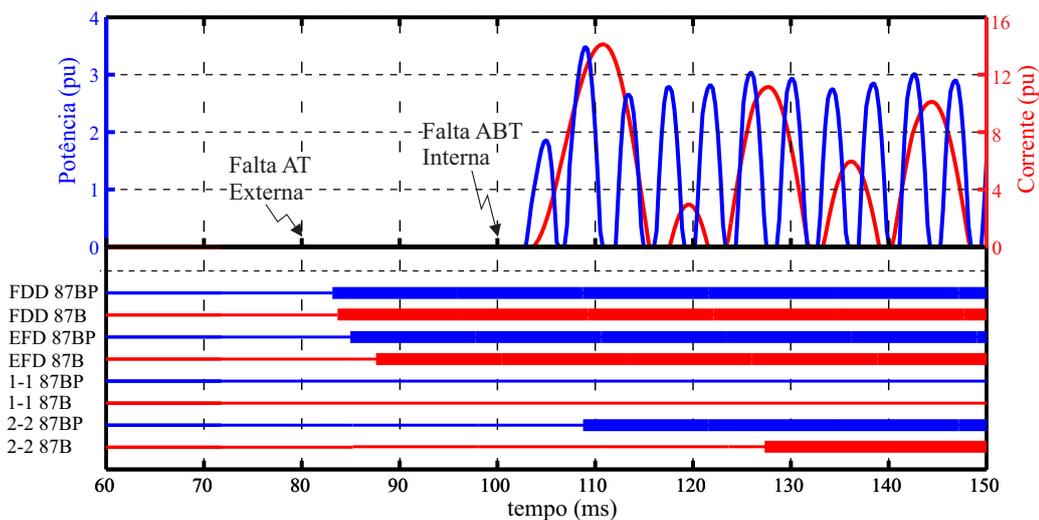


Figura 5.16: ω_{op}^* and i_{op}^* na fase B para uma falta AT com saturação de TC, que evolui para uma falta ABT interna.

5.2.6 Curto-circuito no vão de interligação entre as barras B1 e B2

Este cenário consiste na aplicação de um curto-circuito bifásico AB em 90 ms no vão que acopla as barras, no ramo onde se encontra o disjuntor de amarre. Como foi explicado na Seção 3.3, este elemento faz parte das duas zonas de proteção. As figuras 5.17(a) e 5.17(b) mostram os lóbulos de operação e os estados lógicos do *trip* 1-de-1 de cada fase. Ainda, as Figuras 5.17(a) e 5.17(b) correspondem a resposta dos elementos diferenciais da zona Z1 e Z2, respectivamente.

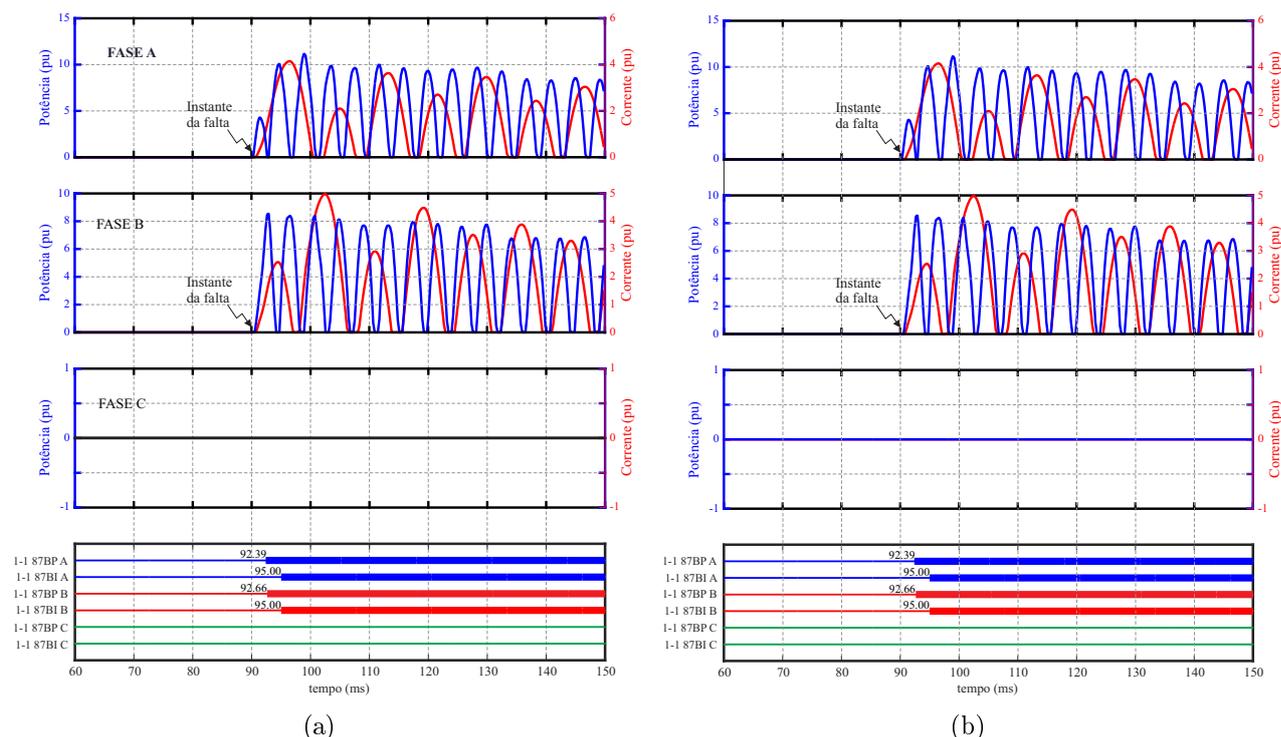


Figura 5.17: Curto-circuito no vão de interligação entre as barras a) Zona 1; b) Zona 2.

Pode-se observar que a falta é enxergada pelas duas zonas, o que significa que todos os circuitos conectados nas suas respectivas barras são desligados para eliminar o defeito, ou seja, toda a subestação seria perdida. Ainda, os instantes em que o *trip* 1-de-1 das fases envolvidas na zona Z1 é enviado com a função 87BP, 92,39 ms para a fase A e 92,66 ms para a fase B, são os mesmos que na zona Z2. Com a função tradicional, acontece a mesma coisa mas ela precisa de 5 ms para enviar o comando de *trip* neste caso específico.

5.2.7 Curto-circuito Interno Durante a Substituição de um Disjuntor

Nesta simulação, o disjuntor da linha de transmissão, DLT2, que está conectado na Barra 2, é retirado. Isto significa que, de acordo com a descrição inicial do sistema, os circuitos que

precisam ser previamente transferidos para a Barra 1 são os do transformador TF2 e da linha de transmissão LT4. Aqui foi assumido que as chaves seletoras para conectá-las na Barra 1 foram fechadas em 70 ms simultaneamente e que as chaves inferiores que os conectavam na Barra 2 foram abertas em 85 ms, também ao mesmo tempo. Ou seja, a condição de paralelismo de barras durou 15 ms. Posteriormente, em 100 ms a chave de *by-pass* do circuito LT2 foi fechado, o disjuntor foi aberto em 120 ms, e as chaves nos extremos dele abrem em 130 ms. Na prática, este procedimento pode levar minutos, mas por motivos de tempo de simulação, ele foi realizado na escala de segundos. A Figura 5.18 mostra o estado do *flag* de paralelismo de barra e do disjuntor da linha LT2. Além disso, nenhum dos detectores de distúrbio, *FDD*, foi ativado. Isto está relacionado também com o valor mínimo da derivada das potências e correntes de restrição das funções 87BP e 87B. Conseqüentemente, nenhum comando de *trip* foi enviado.

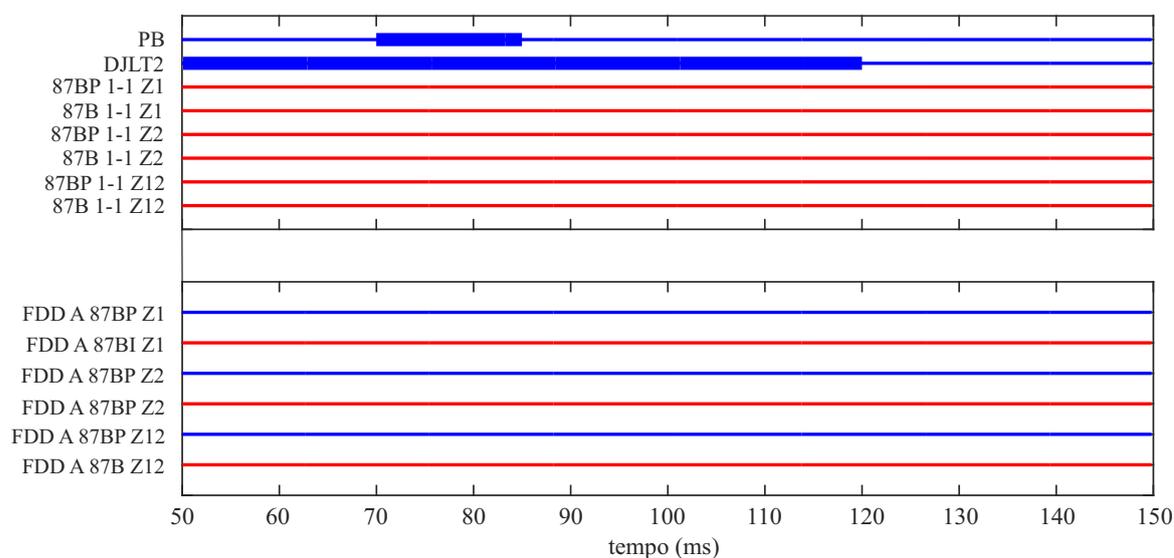


Figura 5.18: *Flags* de operação e dos detectores de distúrbio das funções 87BP e 87B nas zonas Z1, Z2 e Z12, durante um curto-circuito durante o paralelismo de barras

Agora, assume-se que um curto-circuito AT interno ocorreu em 77 ms, durante o período de paralelismo de barras. As respostas do relé e dos disjuntores são mostradas na Figura 5.19. Observam-se os lóbulos de operação da fase A para as funções 87B e 87BP e mostra-se também a mudança dos *flags* de operação utilizados na Figura 5.18. Nota-se que os *trips* da função 87BP são enviados mais rapidamente que com a função 87B. Ainda, estes comandos para abertura de disjuntor foram enviados nas duas zonas Z1 e Z2, além da zona de supervisão total, Z12. Isto é porque durante o paralelismo de barras, ambas zonas de proteção passam a ter uma região de interseção definida pelos ramos onde as chaves seletoras foram fechadas simultaneamente.

Visto de outra forma, é como se o curto-circuito tivesse acontecido muito perto do disjuntor de amarre. Portanto, todos os disjuntores ligados nos barramentos são abertos. Pode ser observado que o envio de trip para os disjuntores das funções 87 BP e 87B é feito em 79,6 ms e 81,5 ms, respectivamente. Apartir desses instantes, de acordo com o recomendado pelos procedimentos de rede (ONS, 2011), o disjuntor deve abrir em um tempo máximo de 3 ciclos para o nível de tensão do sistema descrito neste trabalho, como ilustrado.

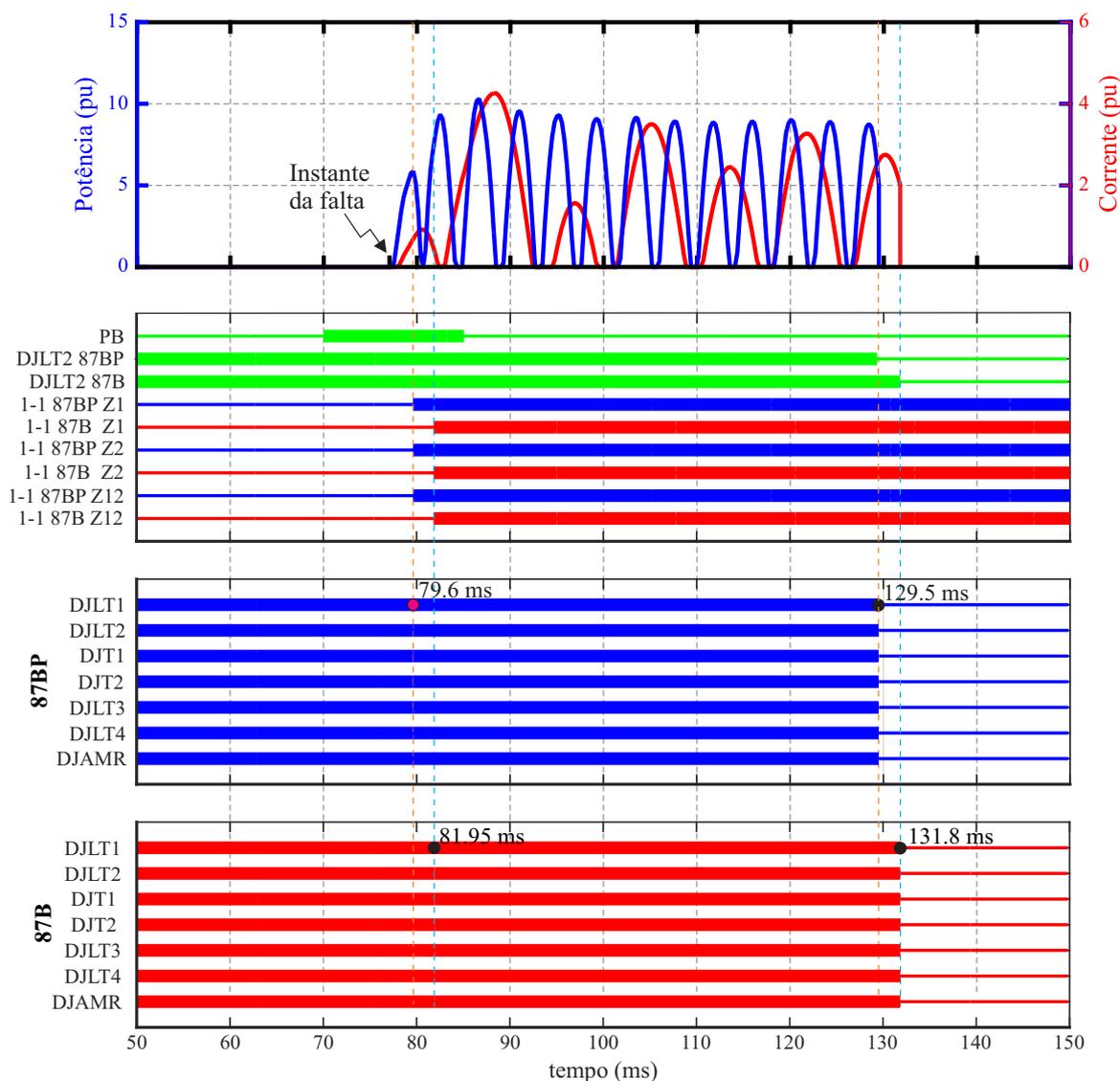


Figura 5.19: Lóbulos de operação, flags de operação das e estados lógicos dos disjuntores

Ainda, vale a pena mencionar que a imposição do valor mínimo para a derivada do sinal de restrição, calculada a partir de correntes ou de potência, define também a possibilidade de ter um bloqueio inicial da lógica 1-de-1 e que a única forma de eliminar um curto-circuito seja com a lógica 2-de-2. Isto esta relacionado com o fluxo de potência que surge entre os barramentos no intervalo de paralelismo de barra, ou seja, depende dos circuitos a serem transferidos.

5.2.8 Energização de Transformador

A energização do transformador é um fenômeno simulado para conferir o possível impacto que a corrente de *inrush* poderia ter sobre a proteção do barramento. Para isso, inicialmente o disjuntor remoto do alimentador do transformador T2, que está conectado na Barra 2, é aberto e o disjuntor que o conecta com a barra B1 é fechado em 80 ms. As formas de onda de corrente de *inrush* das três fases, assim como as respectivas potências instantâneas, são apresentadas na Figura 5.20. Pode ser visualizado na Figura 5.21 que as fases A e C experimentam variações muito grandes de corrente em relação à fase B. Por sua vez, a função 87BP traz variações de potência acima do limite mínimo nas três fases. Para este caso, foi assumido que o valor mínimo destas variações é de 300 A/s. Acima deste valor, os *flags* dos detectores de distúrbio são habilitados. A Figura 5.21 mostra que os detectores de distúrbio das duas funções foram ativados nas fases A e C. Entretanto, o detector de distúrbio da fase B foi apenas habilitado com a função 87BP, o que significa que o *trip* 1-de-1 não será enviado em nenhuma das fases com o método proposto. Isto traz à tona a maior sensibilidade da função 87B, o que pode ser visto como um ponto positivo porque isto reduz a possibilidade de enviar um comando de atuação rápida de forma errada. Por outro lado, isto poderia ser um ponto negativo porque este bloqueio significaria uma atuação mais demorada em caso de um curto-circuito dentro da zona de proteção. Contudo, deve-se perceber na Figura 5.21 que utilizando um valor mínimo de 400 A/s, a função 87BP também não reconheceria um distúrbio nessa fase.

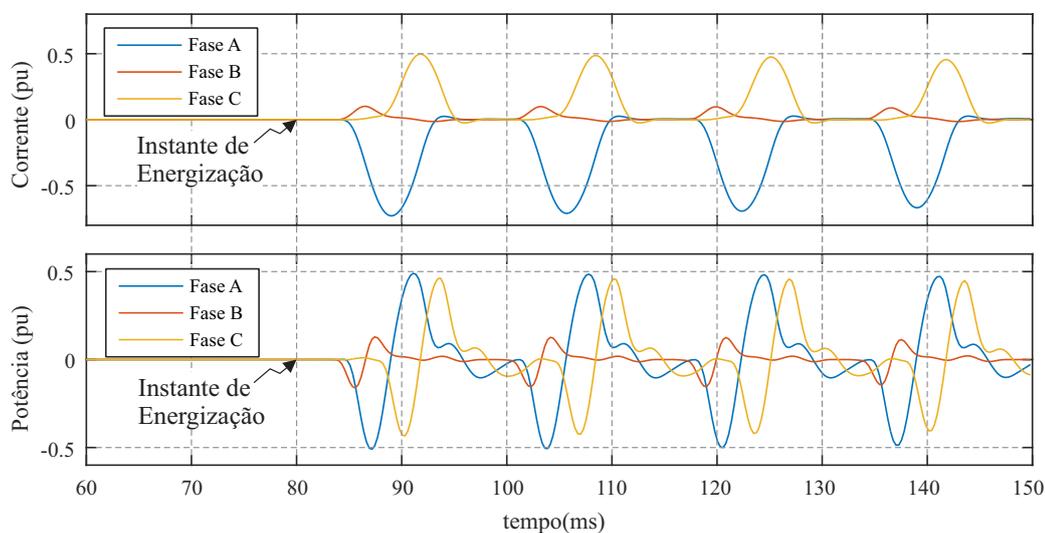


Figura 5.20: Energização de transformador: sinais de potência e corrente das fases A,B e C.

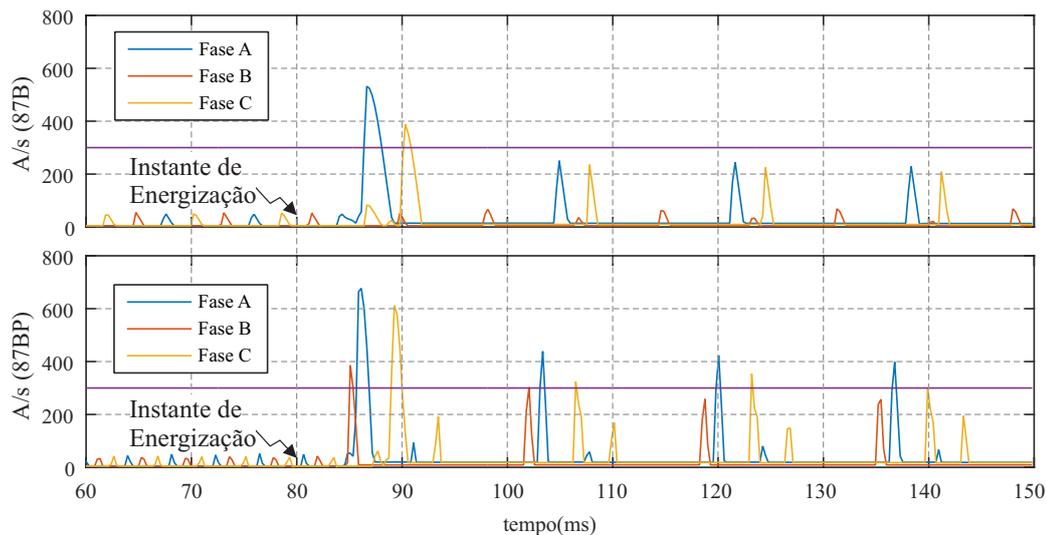


Figura 5.21: Energização de transformador: variação das potências e correntes de restrição das fases A, B e C.

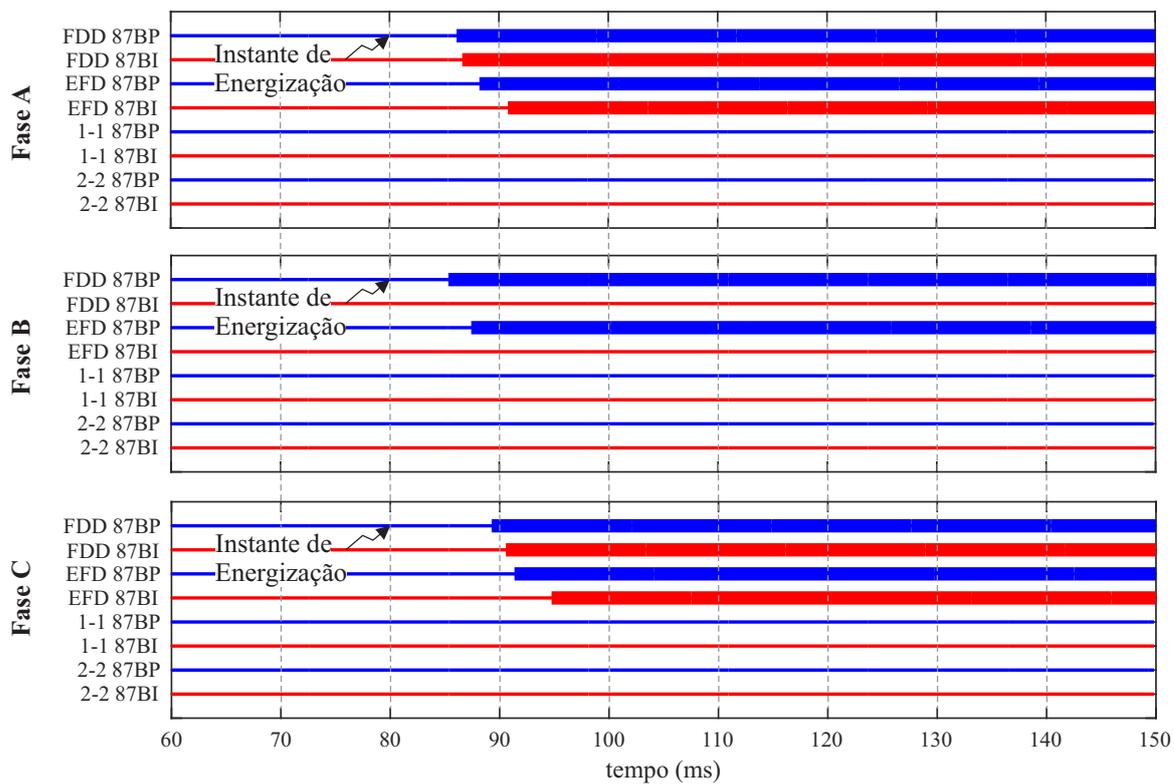


Figura 5.22: *Flags* de operação das funções 87BP e 87B nas três fases.

5.2.9 Influência da taxa de amostragem

Para avaliar o impacto da taxa de amostragem no algoritmo proposto, uma falta interna é aplicada em 80 ms na linha de transmissão LT1 e os valores de taxa de amostragem utilizadas na linguagem MODELS para a exportação das correntes e tensões dos circuitos, assim como dos estados das chaves, foram 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo. As respostas das funções 87BP e 87B são mostradas nas Figuras 5.23(a) e 5.23(b), respectivamente. Neste caso, o resultado mais relevante recai sobre o detector de distúrbio, que é calculado como a derivada da potência de restrição. Pode ser constatado que quanto menor a taxa de amostragem maior o tempo para a falta ser detectada, o que causaria um atraso na atuação do relé. Ainda, pode-se mencionar que na taxa de 16 amostras, apesar do relé ainda atuar, os sinais são bastante distorcidos, o que não oferece segurança absoluta para dizer que esta taxa de amostragem é confiável. Como mencionado anteriormente, a taxa de amostragem escolhida foi 64 amostras/ciclo porque oferece respostas aceitáveis e não ocasiona distorção nos sinais de tensão e corrente.

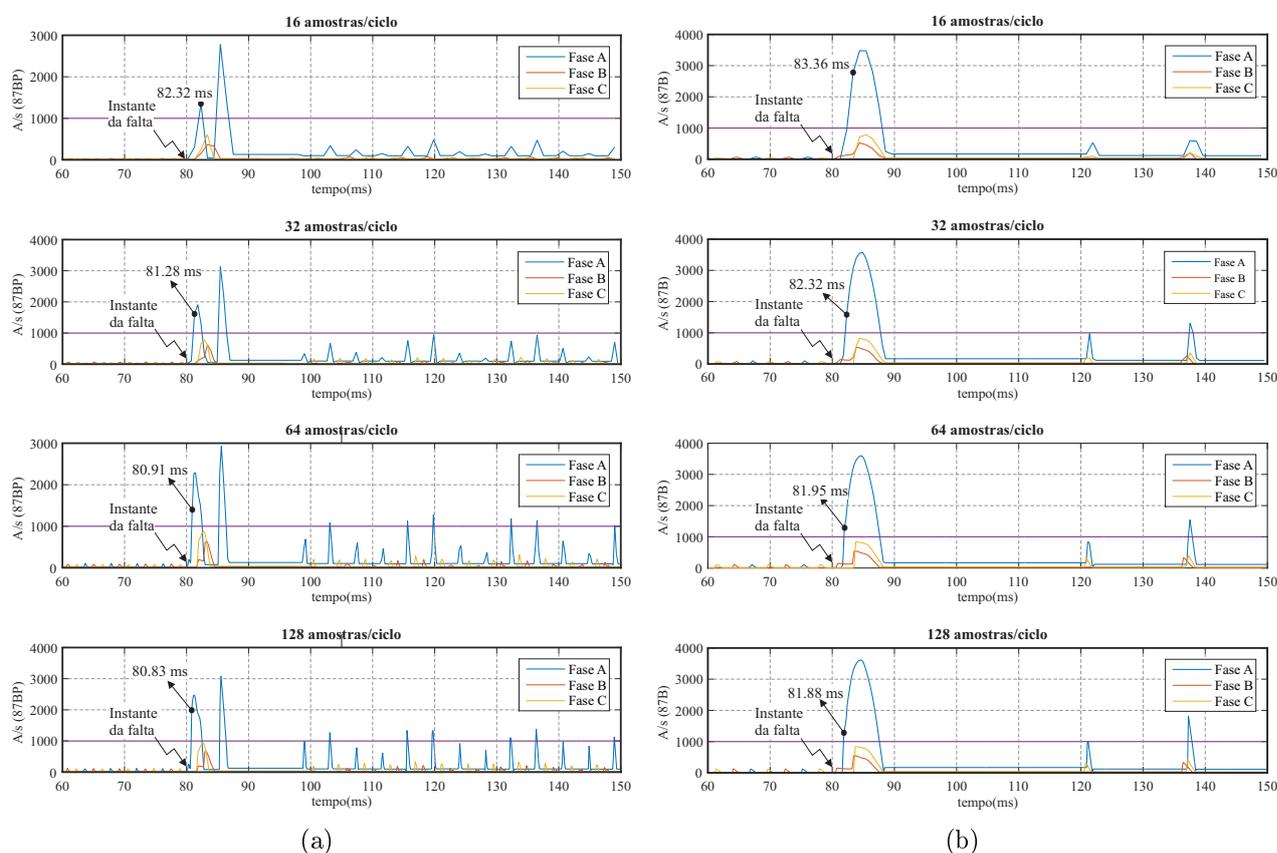


Figura 5.23: Resposta do detetor de distúrbio para diversas taxas de amostragem: a) Função 87BP; b) Função 87B.

5.2.10 Influência do instante de falta em curtos-circuitos internos

Nesta subseção, a análise de sensibilidade paramétrica consiste na aplicação de um curto-circuito monofásico interno, AT, com diferentes ângulos de incidência de falta, de 0° a 360° , começando em 100 ms, com um passo de 1° . Na Figura 5.24, a escala em graus do eixo horizontal corresponde ao ângulo da onda de tensão original, ou seja, sem aplicação da memória de tensão. Pode-se observar que em um ciclo existem dois instantes em que o tempo de envio de *trip* com a função tradicional 87BP sofre um severo incremento. Por sua vez, a função proposta apresenta no mesmo intervalo quatro picos de tempo de atuação $t_{atuacao}$. Isto está relacionado com o fato de um sinal de corrente ter dois instantes em que seu valor é zero. Já a potência possui quatro instantes em que seu valor passa pelo zero. Apesar disso, para este tipo de curto-circuito franco, o maior tempo de atuação da função proposta é menor do que o menor tempo de atuação da função tradicional.

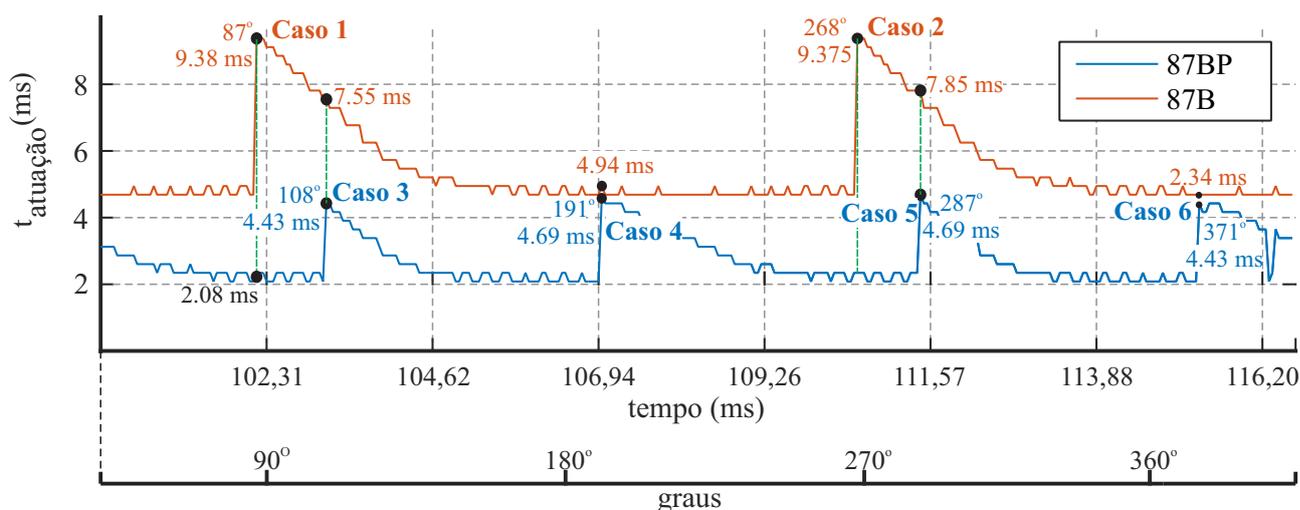


Figura 5.24: Análise de sensibilidade paramétrica: variação do ângulo de incidência de falta de um curto monofásico

A Figura 5.25 mostra que a função 87B demora no envio do *trip* porque seu primeiro lóbulo de operação é pequeno ao ponto de não permitir a contagem mínima para reconhecer a falta. Isto acontece quando a falta aconteceu perto de 90° e 270° (Casos 1 e 2) na onda de tensão, o que está relacionado com um amortecimento da componente de decaimento exponencial nesses instantes. Analogamente, como mostra a Figura 5.26, a presença de lóbulos iniciais muito amortecidos ocasiona que exista uma demora no início da contagem de amostras em que a potência de operação é maior que a potência de restrição (Casos 3, 4, 5 e 6).

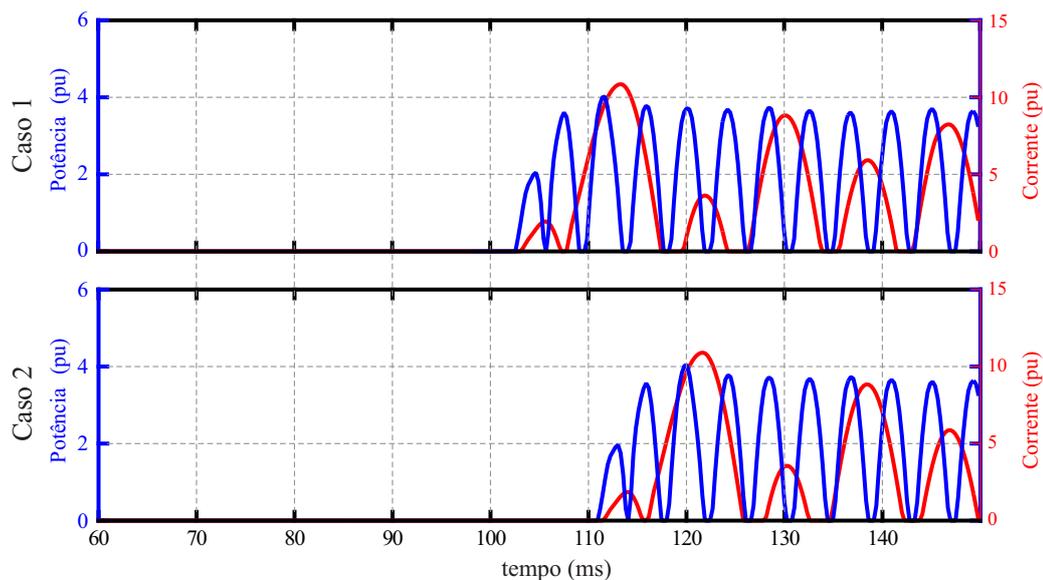


Figura 5.25: Lóbulos de operação nos casos 1 e 2 citados na Figura 5.24.

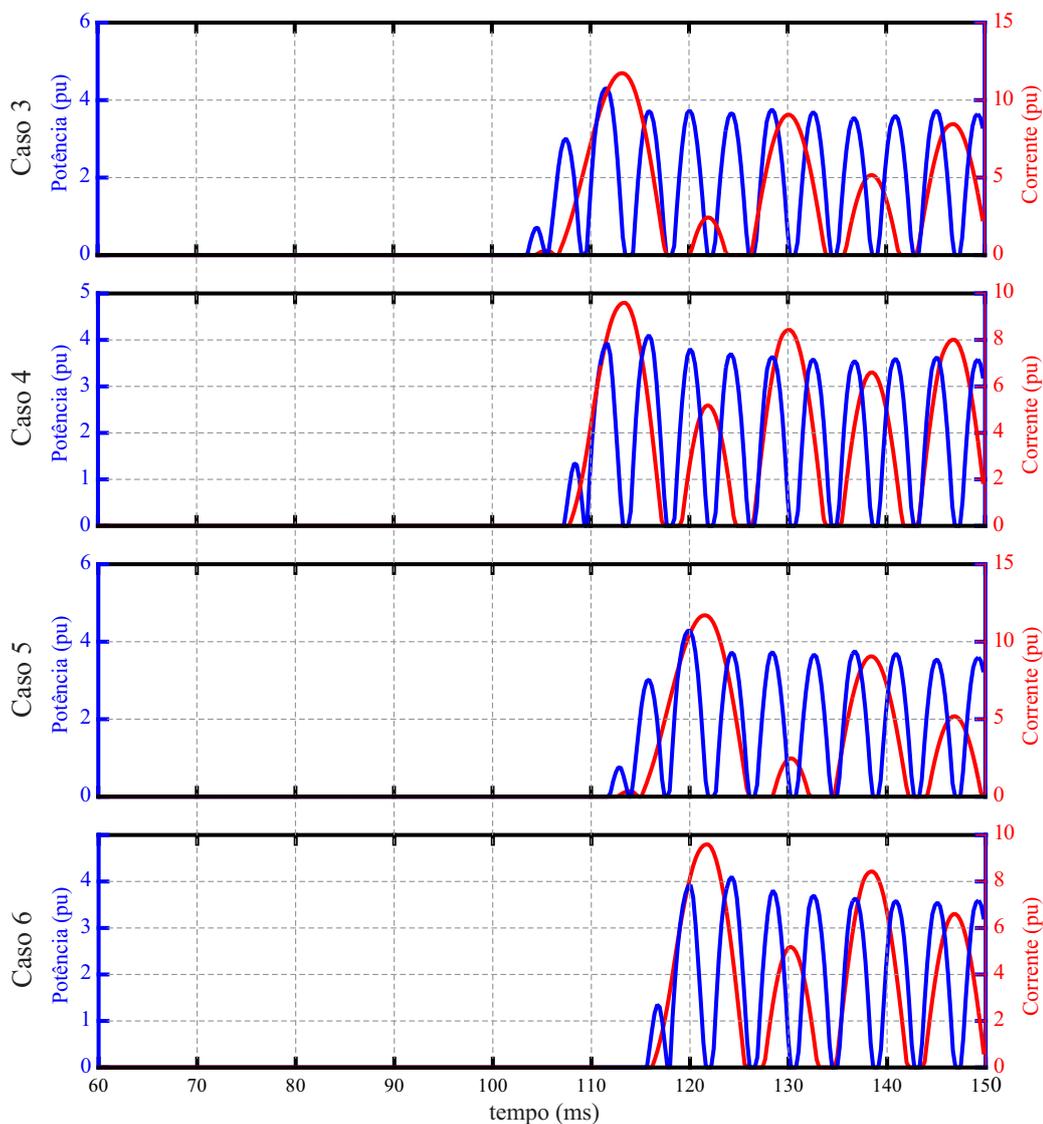


Figura 5.26: Lóbulos de operação nos casos 3, 4, 5 e 6 citados na Figura 5.24.

5.2.11 Influência da resistência de falta em curtos-circuitos internos

O limite de sensibilidade da função proposta, 87BP, está governada pelo valor de SLP , uma vez que $w_{op}^*(t) = w_{op}(t) - SLP_p \cdot \bar{w}_{res}(t)$, como descrito na Seção 4.4. Por exemplo, nas Figuras 5.27(a) e 5.27(b), é ilustrado o primeiro lóbulo de operação para diferentes valores de resistência de falta (0-300 Ω) considerando $SLP = 0,30$ e $SLP = 0,15$, respectivamente, onde os pontos cheios representam a amostra final da contagem para a atuação por parte da lógica 1-de-1. Como observado, um maior SLP leva a menores lóbulos de operação, de forma que o comando de *trip* é atrasado, ou inclusive nem enviado. Por outro lado, com um menor SLP , os lóbulos de operação são maiores, o que significa um aumento da sensibilidade do esquema proposto. Contudo, deve ser também ponderada a possibilidade de que um SLP menor pode deixar a função menos seguro, sobretudo diante de faltas externas severas. É por esse motivo que, o valor de *slope* neste trabalho, $SLP = 0,3$, foi escolhido de forma a tentar não recair em uma dessas situações extremas.

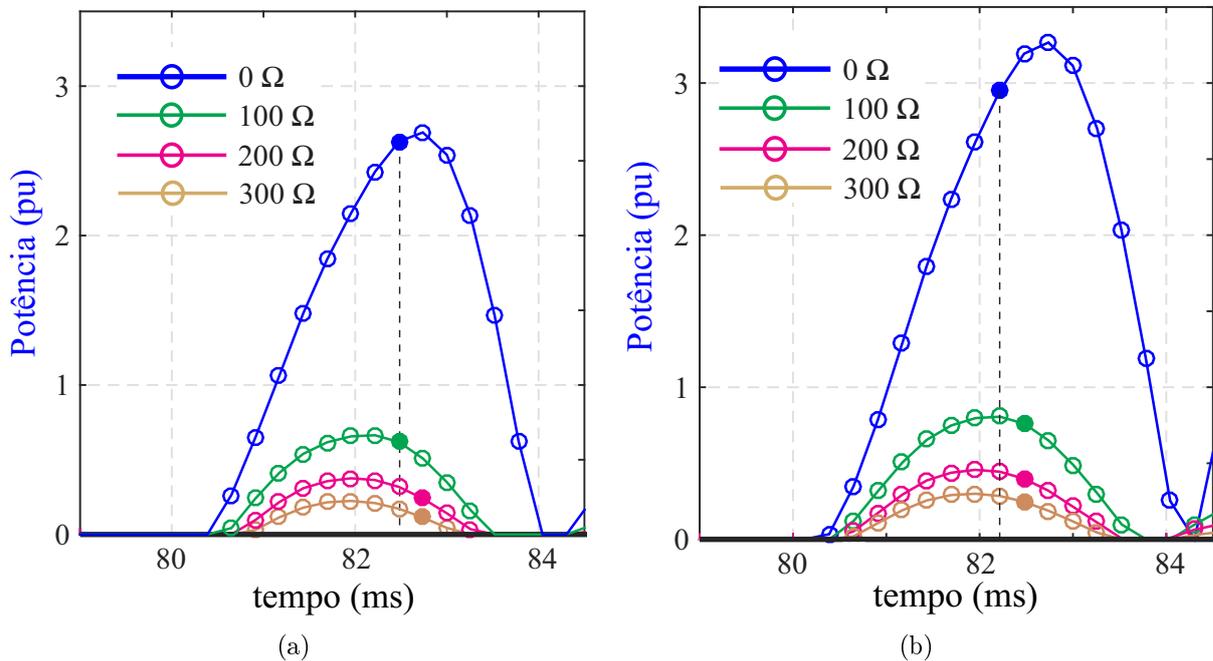


Figura 5.27: Primeiro lóbulo de operação no caso de uma falta interna com diferentes valores de resistência de falta a terra: a) com $SLP=0,3$; b) com $SLP=0,15$.

Para melhor avaliar este aspecto, foi feita uma análise de sensibilidade paramétrica para comparar os tempos de operação para diversos valores de resistência de falta à terra e descobrir a máxima resistência de falta para a qual as funções 87BP e 87B funcionam. Para isso, inicialmente foi feita a simulação de um curto-circuito monofásico AT em 100 ms, para uma

faixa de resistências de 0Ω até 400Ω , com um passo de 1Ω , ou seja, 400 casos. A Figura 5.28 mostra que em geral a função 87BP atua mais rápido que a função 87B, exceto o trecho entre 72Ω e 111Ω em que o tempo de *trip* da função tradicional é menor que a da função proposta. Contudo, por ser visualizado que a função 87B pode experimentar tempos maiores de 10 ms, enquanto que o tempo máximo da função 87BP é menor mesmo nas resistências mais elevadas. Finalmente, como observado, o valor máximo para a função 87BP é de 306Ω , superior aos 193Ω que restringem a atuação da função 87B.

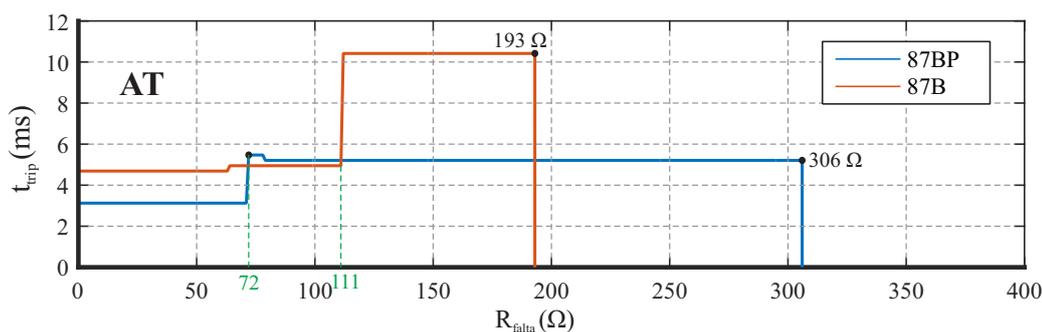


Figura 5.28: Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de um curto-circuito AT em 100 ms

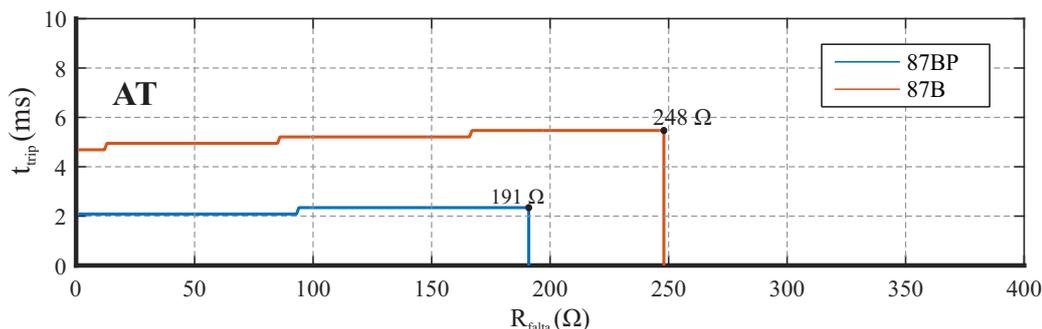


Figura 5.29: Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de um curto-circuito AT em 97,66 ms

Posteriormente, todos os curtos-circuitos fase-terra (AT, BT e CT) e fase-fase-terra (ABT, BCT, CAT) foram aplicados em 97,66 ms com a mesma faixa de resistências e com o mesmo passo. No total, foram 2400 casos adicionais que foram avaliados. A Figura 5.29 mostra uma resposta diferente para o mesmo curto-circuito AT anterior. Aqui, o limite de operação da função 87BP é 191Ω , enquanto que a função 87B consegue operar até com uma resistência de falta de 248Ω . Isto deixa em evidência o impacto do ângulo de incidência da falta. Apesar disso, durante a faixa de resistências que a função 87BP operou, ela sempre foi melhor do que a função tradicional. A Figura 5.30 mostra a resposta para as fases B e C. Nestes casos, a resistência limite para a função tradicional é muito menor que o da função proposta. Ainda, o tempo de atuação da função 87BP é menor que a da 87B.

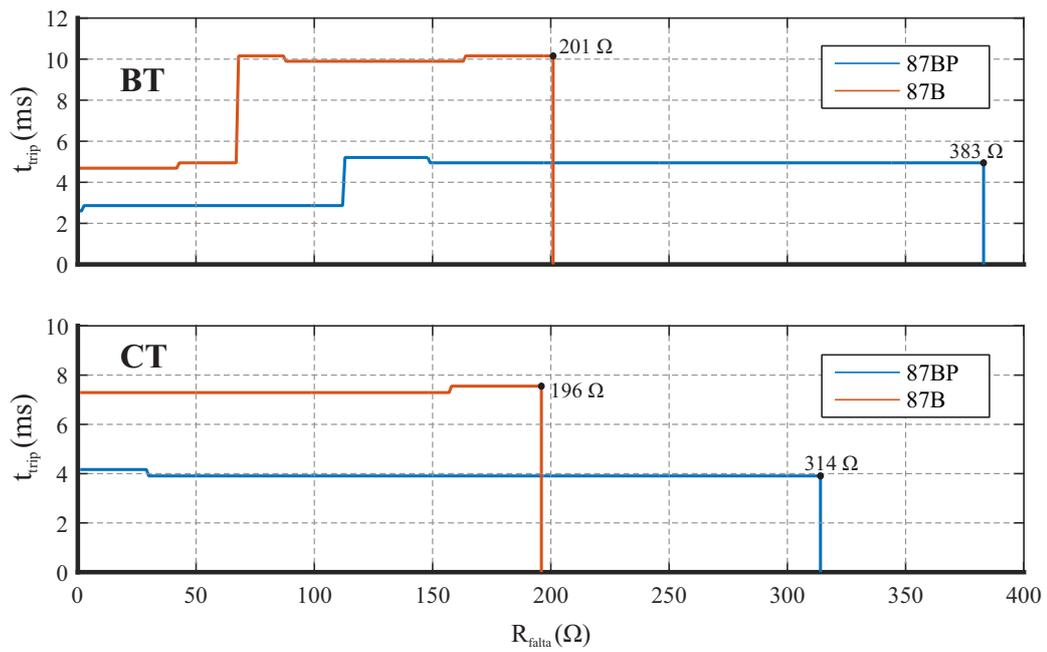


Figura 5.30: Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de curtos-circuitos AT e BT em 97.66 ms

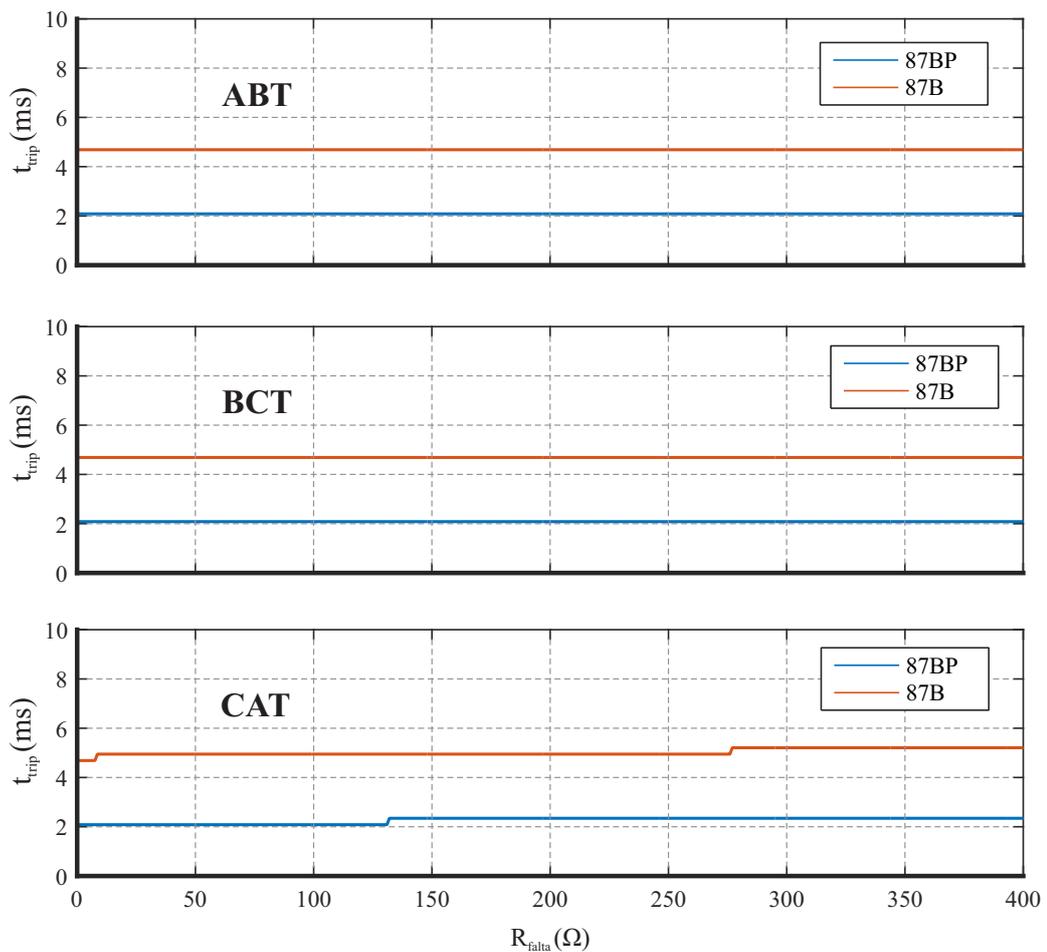


Figura 5.31: Limite de resistência de falta para envio de *trip* diante de curtos-circuitos ABT, BCT e CAT em 97.66 ms

Finalmente, no que diz respeito às faltas fase-fase-terra, pode-se observar na Figura 5.31 que não existe impacto da resistência de falta nos tempos de atuação de ambas as funções. Contudo, o tempo de atuação do algoritmo proposto é sempre menor que a da função 87B. Esta característica deve-se ao fato de que embora exista uma resistência de falta à terra, esta seção não contempla a existência de uma resistência apreciável entre as fases envolvidas. Ou seja, a corrente de curto-circuito é franca entre elas, o que facilita a detecção por parte das lógicas de operação.

5.2.12 Análise de sensibilidade paramétrica geral

Uma análise em massa é feita com o objetivo de testar de forma abrangente o esquema proposto e observar as suas vantagens quando comparada com a função tradicional 87B. Adicionalmente, o filtro mímico utilizado para eliminar a componente de decaimento exponencial de corrente é um filtro passa-altas, de modo que seria razoável pensar que o ruído e outras componentes transitórias podem ser amplificadas por ele. Contudo, quando os sinais originais passam pelo filtro *antialiasing*, as componentes de alta frequência são eliminadas, restando apenas o conteúdo de baixa frequência do ruído, ou seja, um ruído aleatório branco. Diante dessa problemática, foi conveniente realizar um estudo geral da resposta do algoritmo proposto em comparação com a função tradicional com e sem a presença de ruído. Para isso, foi considerado que a relação sinal-ruído (SNR) por amostra dele é 50 dB.

Nesta avaliação, faltas internas e faltas evolutivas foram simuladas no sistema de potência da Figura 5.1, variando a resistência de falta a terra (R_G), resistência entre fases em faltas que não envolvem o terra (R_F), ângulo de incidência da falta (θ), assim como a fases envolvidas na falta, como descrito na Tabela. 5.6. Além disso, foi considerado que todas as faltas evolutivas começam com uma falta externa AT com uma resistência de falta a terra de $R_G = 150 \Omega$.

Tabela 5.6: Parâmetros de falta usados na análise em massa.

Parâmetro	Valor
R_G	0, 25, 50, 75 e 100 Ω
R_F	0, 5, 10, 15 e 20 Ω
θ	0°, 30°, 60°, ..., 150° e 180°
Tipo de falta	AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG and ABC

O tempo médio de operação (μ) e o desvio padrão (σ) do esquema proposto e da função 87B estão resumidas na Tabela 5.7. Os gráficos de dispersão, mostrados nas Figuras 5.32(a) e 5.32(b), mostram que as faltas internas podem ser detectadas duas, ou mesmo quatro vezes mais rapidamente com a técnica proposta. Além disso, apesar do tempo médio de operação ser um pouco maior quando o ruído é introduzido, esta tendência é mantida, como mostrado na Figura 5.32(b). Contudo, pode ser visto também que alguns casos o desempenho da função proposta é superada pela função tradicional. Isto ocorre porque nesses casos o filtro mímico reduz drasticamente o primeiro lóbulo de operação, atrasando a operação do relé via lógica 1-de-1. Por outro lado, a função 87B não tem tal inconveniente uma vez que este filtro não é aplicado nele, de forma que a componente CC de decaimento exponencial cria um primeiro lóbulo de operação muito amplo, levando a uma atuação rápida. Nas Figuras 5.33(a) e 5.33(b), é apresentado o desempenho das funções de proteção para faltas evolutivas, de onde se percebe que a tendência é a mesma.

Tabela 5.7: Estatísticas dos tempos de operação em ms.

Medida	Faltas Internas		Faltas Evolutivas	
	Sem ruído	Com ruído	Sem ruído	Com ruído
μ_{prop}	2,4804	2,7845	3,1652	3,5967
σ_{prop}	0,6878	0,4522	2,9112	3,0285
μ_{87B}	5,1855	5,8246	6,9581	7,5507
σ_{87B}	1,1721	1,3155	5,9953	5,8165

A partir dos gráficos de dispersão pode ser confirmado que existe uma tendência de que os tempos de atuação do algoritmo proposto são duas, ou até quatro, vezes mais rápido do que o algoritmo tradicional de corrente. Especificamente, em 97,85% das faltas internas e 97,00% das faltas evolutivas esta estatística foi cumprida. Adicionalmente, em 1,3% das faltas internas e 1,43% das faltas externas, o método proposto é mais rápido ainda que menos de duas vezes. Entretanto, foi detectado que em 6 casos de falta interna o método proposto é um pouco mais lento que a função tradicional, justamente devido à aplicação do filtro mímico. Como ele não é aplicado na função 87B, seus lóbulos são muito grandes, facilitando a sua atuação rápida. Ainda, pode-se perceber que a presença do ruído levou a não ter mais os casos onde o algoritmo proposto era mais lento. Isto é consequência direta da alteração dos lóbulos de operação de potência, o que aumenta um pouco a sensibilidade da função 87BP e reduz o tempo de atuação.

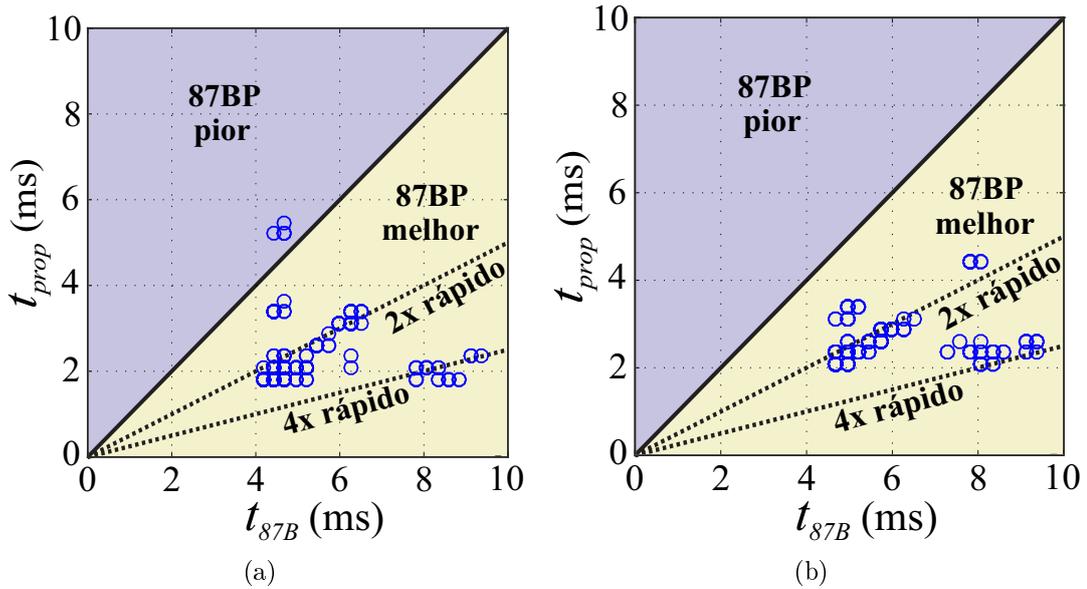


Figura 5.32: Gráficos de dispersão dos tempos de operação do algoritmo proposto (t_{prop}) e da função 87B, baseada em nas amostras de corrente (t_{87B}): (a) faltas internas sem ruído; (b) faltas internas com ruído.

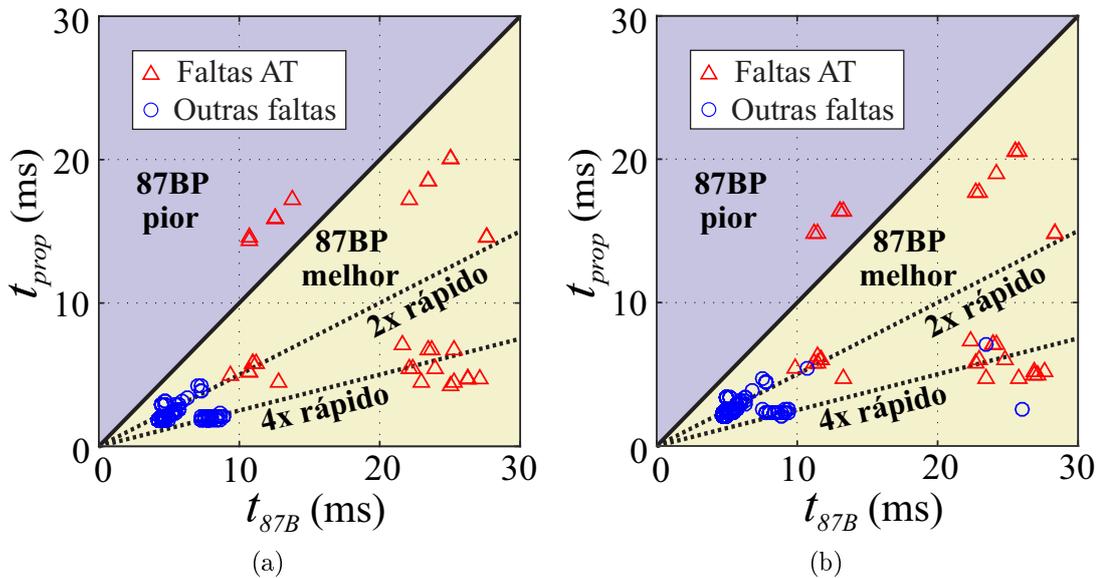


Figura 5.33: Gráficos de dispersão dos tempos de operação do algoritmo proposto (t_{prop}) e da função 87B, baseada em nas amostras de corrente (t_{87B}): (a) faltas evolutivas, externas para internas, sem ruído; (b) faltas evolutivas, externas para internas, com ruído.

Da mesma forma, foram identificados 11 casos de falta evolutiva onde a técnica proposta não teve o desempenho desejado. Tal fato aconteceu apenas quando a falta externa AT evoluiu para uma falta interna AT. Isso aconteceu devido à ativação do reforço da potência de operação que causou uma redução nos primeiros lóbulos de operação após a evolução da falta para dentro da

zona de proteção. Como consequência, a lógica 2-de-2 sofreu um atraso da sua atuação. Ainda, é importante mencionar que, quando uma falta externa AT evolui para uma falta interna envolvendo apenas outras fases, os elementos diferencias das outras fases sequer reconhecem a falta como externa, de forma que nesses casos, o tempo de operação quando a falta interna de fato acontece é definido apenas pela lógica 1-de-1.

Apesar destas exceções, o método proposto ainda oferece tempos de decisão bastante reduzidos na grande maioria dos casos, o que é apropriado para a proteção de qualquer elemento do sistema de potência, e em especial para os barramentos. Além disso na grande maioria dos casos, o método proposto é mais rápido que a proteção tradicional duas, ou mais, vezes mais rápido. De fato, a existência dos casos onde esta tendência não é respeitada não é reflexo direto do princípio que governa o funcionamento do método proposto, mas dos parâmetros impostos e da técnica de eliminação da componente CC de decaimento exponencial.

5.2.13 Síntese do Capítulo

Este capítulo mostrou a resposta do algoritmo proposto diante das faltas mais comuns e mais abordadas pelos trabalhos descritos na literatura. Também, situações mais atípicas como faltas *cross-country* e outra preocupação como a energização de um transformador foram avaliadas. De acordo com estes resultados, o algoritmo proposto consegue de fato ser duas ou mais vezes mais rápido que a função tradicional 87B diante de faltas internas. Além disso, foi observado que a potência de restrição reforçada com a segunda harmônica de potência garante que uma falta externa com saturação de TC não irá sensibilizar a função de proteção. Também, destaca-se que o valor mínimo para a variação da potência de restrição que define o estado lógico do detector de distúrbio possui um papel importante, pois caso ele tenha um valor baixo, pode bloquear a lógica 1-de-1, mas se tiver um valor muito elevado pode demorar a detecção. Por outro lado, o algoritmo proposto oferece atuações muito rápidas diante de faltas evolutivas. Ainda, apesar de não ser uma função direcional, a função proposta consegue atuar diante de faltas internas com elevados valores de resistência de falta. Contudo, isto pode ser impactado pelo instante de falta. Além disso, foi visto que o ruído pode aumentar levemente os tempos de atuação, mas a sua superioridade em relação à função tradicional ainda é notável.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, uma nova função de proteção diferencial de barramentos baseada no conceito da potência instantânea foi apresentada. A partir dela, a lógica de proteção utilizou como base as lógicas de *trip* 1-de-1 e 2-de-2, tradicionalmente utilizadas pelos relés comerciais. Ainda, esta estratégia está acoplada a uma lógica de zonas de proteção para lidar adequadamente com arranjos de barramentos reconfiguráveis. Como resultado, verificou-se que a nova técnica pode oferecer, na maioria dos casos, tempos de *trip* mais rápidos do que a função tradicional 87B, que utiliza sinais de corrente.

No que diz respeito aos desafios inerentes ao método, ressalta-se que a perda de informação da tensão diante de curtos-circuitos é facilmente superada graças à implementação do filtro de memória de tensão, contrário a outras técnicas que vêm seu desempenho prejudicado na ocorrência de uma falta franca, por exemplo. Além disso, a adição de uma espécie de segunda harmônica de potência instantânea no sinal de restrição garante que o método proposto ofereça segurança diante de faltas externas severas, nas quais acontece a saturação do TC. Por outro lado, diferente de outras técnicas onde a atuação do relé é completamente bloqueada quando faltas externas acontecem, a lógica de *trip* utilizada permite que, embora a lógica de atuação rápida 1-de-1 seja bloqueada durante um determinado intervalo, a lógica 2-de-2 esteja apta para reconhecer a evolução da falta para dentro da zona de proteção do barramento, tornando a função de proteção mais confiável.

Fazendo uma comparação com os trabalhos desenvolvidos, mencionados na Tabela 2.4, percebe-se que os únicos métodos que fornecem tempos decisão menores do que o algoritmo proposto utilizam a transformada *wavelet* e outros que combinam um elemento de sobrecorrente instantâneo e um detetor de saturação de TC. Os trabalhos baseados no primeiro método certamente oferecem tempos muito reduzidos mas eles poderiam falhar diante de faltas com uma componente transitória muito amortecida. Assim mesmo, a presença de ruído no sinal

pode levar ao bloqueio da sua operação (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC., 2016). Por sua vez, o outro grupo de métodos que envia um sinal de bloqueio de *trip* caso a saturação do TC fosse detectada proporcionam tempos de decisão bastante curtos porque os autores assumem que o *trip* pode ser dado após a primeira amostra em que as condições de operação da lógica de proteção são satisfeitas. Contudo, de acordo com o explicado na Seção 3.2, por uma questão de segurança, é recomendável que as condições de *trip* sejam satisfeitas durante 1/4 de ciclo. Vale a pena comentar que, durante essa pesquisa, foi visto que vários trabalhos não deixam explícito tal informação, preocupando-se apenas de classificar corretamente a falta.

Finalmente, pode-se concluir que o fato de ter menores tempos de decisão, inclui que qualquer falta externa possa ser também reconhecida de forma mais rápida, reduzindo a possibilidade de atingir o tempo mínimo de saturação dos TCs e, portanto, os requisitos do seu dimensionamento. Também, o algoritmo proposto poderia ser de fato implementado em relés comerciais de proteção e sem requerimentos de um *hardware* sofisticado devido à sua simplicidade matemática e à taxa de amostragem que pode ser a mesma que a utilizada pela função tradicional desde o que os sinais não apresentem distorção. É justamente uma formulação simples, com uma estrutura de programação sólida, capaz de cobrir todos os requerimentos de uma função de proteção diferencial de barramentos, o que torna o método proposto uma alternativa bastante atraente para ser considerada pelos fabricantes em seus relés.

Durante a formulação e a obtenção dos resultados, alguns desafios podem ser colocados:

- Desenvolver um algoritmo que supere as características do filtro mímico, utilizado para a eliminação da componente CC.
- Formular um detector de falta externa que evolui para a uma falta interna para não depender apenas da restrição com a constante de tempo menor, como proposto neste trabalho.
- Verificar a aplicabilidade do conceito da potência instantânea em outros elementos de sistemas de potência de forma similar a como foi construída neste trabalho.
- Avaliação do algoritmo proposto com registros oscilográficos reais.
- Implementar o algoritmo proposto em dispositivos reais.

6.1 PUBLICAÇÕES

Os artigos publicados durante este doutorado são os seguintes:

- VASQUEZ, FRANCIS ARODY MORENO; SILVA, KLEBER MELO . Instantaneous-Power-Based Busbar Numerical Differential Protection. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, v. 34, p. 1-1, 2019.
- VÁSQUEZ, F. A. M.; ESCUDERO, A. P. ; BAINY, R. G. ; SILVA, K. M. . Fundamentals of Instantaneous-Values-Based Busbar Differential Protection. *In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2016, Natal,RN.
- ESCUDERO, ALFREDO PIANETA ; VASQUEZ, FRANCIS A. MORENO ; MELO E SILVA, KLEBER; LOPES, FELIPE VIGOLVINO . Low-impedance busbar differential protection modeling and simulation using ATP/EMTP. *In: Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 2017, Brasília. p. 1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. *REB670 Busbar Protection, Version 2.2 ANSI*. [S.l.], 2017. Citado na página 3.

ALLAH, R. A. Adaptive busbar differential relaying scheme during saturation period of current transformers based on alienation concept. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 10, n. 15, p. 3803–3815, 2016. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 12, 17, 18, 20, and 21.

ALMEIDA, M. L. S.; SILVA, K. M. Transmission lines differential protection based on an alternative incremental complex power alpha plane. *IET Generation, Transmissions & Distribution*, v. 11, n. 1, p. 10–17, January 2017. Citado na página 16.

ALSTOM GRID. *Network Protection and Automation Guide*. 2nd edition. ed. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 30.

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 na página 44.

BEHRENDT, K.; COSTELLO, D.; ZOCHOLL, S. E. Considerations for using high-impedance or low-impedance relays for bus differential protection. *IEEE 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, p. 1–15, March 2010. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 24.

BENMOUYAL, G. Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 621–630, April 1995. Citado 2 vezes nas páginas 44 and 45.

CHOTHANI, N. G.; BHALJA, B. R. A new algorithm for busbar fault zone identification using relevance vector machine. *Electric Power Components and Systems*, v. 44, n. 2, p. 193–205, January 2015. Citado 6 vezes nas páginas 11, 14, 17, 18, 20, and 21.

CHOTHANI, N. G.; BHALJA, B. R.; PARIKH, U. B. New fault zone identification scheme for busbar using support vector machine. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 10, p. 1073–1079, October 2011. ISSN 1751-8687. Citado 6 vezes nas páginas 11, 14, 17, 18, 20, and 21.

Costa, F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 1, p. 140–153, Feb 2014. ISSN 0885-8977. Citado na página 26.

Dantas, D. T.; Pellini, E. L.; Manassero Junior, G. Energy and reactive power differential protection hardware-in-the-loop validation for transformer application. *The Journal of Engineering*, v. 2018, n. 15, p. 1160–1164, 2018. ISSN 2051-3305. Citado na página 16.

Darwish, H. A.; Taalab, A. . I.; Ahmed, E. S. Investigation of power differential concept for line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 617–624, April 2005. ISSN 0885-8977. Citado na página 15.

EISSA, M. A new digital busbar protection technique based on frequency information during ct saturation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 45, n. 1, p. 42 – 49, 2013. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512005042>>. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

EISSA, M. M. A novel digital directional technique for bus-bars protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1636–1641, Oct 2004. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 10, 13, 17, 18, 20, and 21.

EISSA, M. M. Improvement of the differential busbar characteristic to avoid false operation during to ct saturation. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 6, n. 10, p. 931–939, October 2012. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

EISSA, M. M. New differential busbar characteristic based on high frequencies extracted from faulted signal during current transformer saturation. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 8, n. 4, p. 619–628, April 2014. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

FRAGA, F. N.; XAVIER, C. S. D. S.; FILHO, E. A. S. L.; BARROS, J. R. P.; TAVARES, K. M.; COSTA, L. E. V. J.; COUTINHO, P. R. L. N.; MONTENEGRO, S. G. Desafios para o seccionamento de barramentos 230 kv em subestações energizadas: Um estudo de caso nas subestações de recife ii, camaçari ii, paulo afonso iii e fortaleza ii da chesf. In: *XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Curitiba - PR, Brasil: [s.n.], 2017. Citado na página 2.

GAFOOR, S. A.; RAO, P. V. R. A transient current based busbar protection scheme using wavelet transforms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 33, p. 1049–1053, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

GIL, M.; ABDOOS, A. A. Intelligent busbar protection scheme based on combination of support vector machine and s-transform. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n. 8, p. 2056–2064, 2017. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

GUO, Z.; YAO, J.; TAN, Z. Hilberthuang transform-based transient busbar protection algorithm. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 9, n. 14, p. 2032–2039, 2015. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

GUZMAN, A.; QIN, B.-L.; LABUSCHAGNE, C. Reliable busbar protection with advanced zone selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 625–629, April 2005. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas páginas 10, 17, 18, 20, and 21.

HARGRAVE, A.; THOMPSON, M. J.; HEILMAN, B. Beyond the knee point: A practical guide to ct saturation. In: *71st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 24.

HART, D. G.; NOSOVEL, D.; SMITH, R. A. *Modified cosine filters*. U.S. Patent 6,154,687: November, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 47 and 52.

HOSSAIN, M.; LEEVONGWAT, I.; RASTGOUFARD, P. Partial operating current characteristics to discriminate internal and external faults of differential protection zones during ct saturation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 2, p. 379–387, 2018. ISSN 1751-8687. Citado 6 vezes nas páginas 15, 17, 18, 20, 21, and 25.

- HUANG, N. E.; SHEN, S. S. P. *Hilbert Huang Transform and Its Applications: 2nd Edition*. 2nd edition. ed. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2014. (Interdisciplinary Mathematical Sciences). Citado na página 14.
- IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING. *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas vii and 25.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Std C37.110 - Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*. [S.l.], 2008. Citado na página 24.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Std C37.234 - Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*. [S.l.], 2009. Citado 5 vezes nas páginas 15, 22, 25, 30, and 59.
- JENA, S.; BHALJA, B. R. Development of a new fault zone identification scheme for busbar using logistic regression classifier. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n. 1, p. 174–184, 2017. ISSN 1751-8687. Citado 5 vezes nas páginas 11, 17, 18, 20, and 21.
- JENA, S.; BHALJA, B. R. Numerical busbar differential protection using generalised alpha plane. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 12, n. 1, p. 227–234, 2018. ISSN 1751-8687. Citado na página 15.
- JINLIANG, H.; YU, G.; YUAN, J.; ZENG, R.; ZHANG, B.; ZOU, J.; GUAN, Z. Decreasing grounding resistance of substation by deep-ground-well method. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, p. 738 – 744, 05 2005. Citado na página 25.
- KANG, Y.-C.; LIM, U.-J.; KANG, S.-H.; CROSSLEY, P. A. A busbar differential protection relay suitable for use with measurement type current transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1291–1298, April 2005. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 11, 17, 18, 20, 21, and 24.
- KANG, Y. C.; YUN, J. S.; LEE, B. E.; KANG, S. H.; JANG, S. I.; KIM, Y. G. Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 2, n. 1, p. 100–109, January 2008. ISSN 1751-8687. Citado 6 vezes nas páginas 11, 17, 18, 20, 21, and 24.
- KAWADY, T. A.; TAALAB, A.-M. I.; AHMED, E. S. Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 32, n. 5, p. 390 – 397, 2010. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206150900177X>>. Citado na página 16.
- KUMAR, A.; HANSEN, P. Digital bus-zone protection. *Computer and Applications in Power, IEEE*, v. 6, n. 4, p. 29–34, October 1993. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 42.
- Luo, S.; Dong, X.; Shi, S.; Wang, B. A directional protection scheme for hvdc transmission lines based on reactive energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 2, p. 559–567, April 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 16.

MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–25. Citado na página 15.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. *RAP - Relatório ONS-RE-3-252/2009*. [S.l.], 2009. Citado na página 4.

MOHAMMED, M. E. High-speed differential busbar protection using wavelet-packet transform. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 152, n. 6, p. 927–933, Nov 2005. ISSN 1350-2360. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.

ONS. *Submodulo 2.3 - Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 70.

ONS. *Propostas para melhoria das instalações estratégicas do Sistema Interligado Nacional - Avaliação dos aspectos relacionados aos arranjos de barramentos. Anexo V: Consolidação de Obras de Transmissão 2015*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2015. Citado na página 2.

ONS. *Procedimentos de rede: Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 28.

ONS. *Relatório de Análise Estatística do Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção de Equipamentos referente ao ano de 2016*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2017. Citado 2 vezes nas páginas iii and 2.

ONS. *Relatório de Análise Estatística do Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção de Linhas de Transmissão referente ao ano de 2016*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2017. Citado 2 vezes nas páginas iii and 2.

ONS-CCEE-EPE. *Previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2018-2022: 1a Revisão Quadrimestral*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2018. Citado na página 1.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Inc., 2009. Citado na página 13.

QAIS, M.; KHALED, U.; ALGHUWAINEM, S. Improved differential relay for bus bar protection scheme with saturated current transformers based on second order harmonics. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 30, n. 4, p. 320 – 329, 2018. ISSN 1018-3639. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363916300472>>. Citado na página 24.

SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; GILL, H. S. A busbar protection technique and its performance during ct saturation and ct ratio-mismatch. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 3, p. 895–901, Jul 2000. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas páginas 9, 17, 18, 20, and 21.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *SEL-T400L Time-Domain Line Protection*. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 and 84.

- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *SEL-487B Bus Differential and Breaker Failure Relay*. [S.l.], 2018. Citado na página 3.
- SIEMENS. *SIPROTEC 5 - Low-Impedance Busbar Protection 7SS85*. [S.l.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 6.
- SILVA, K. M.; ALMEIDA, M. L. S. Positive sequence voltage memory filter for numerical digital relaying applications. *Electronic Letters*, v. 51, n. 21, p. 1697–1699, October 2015. Citado na página 47.
- SILVA, K. M.; ESCUDERO, A. M. P.; LOPES, F. V.; COSTA, F. B. A wavelet-based busbar differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 3, p. 1194–1203, June 2018. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 3, 13, 17, 18, 20, and 21.
- SILVA, K. M.; KUSEL, B. F. On combining wavelet-based designed filters and an adaptive mimic filter for phasor estimation in digital relaying. *Electric Power Systems Research*, v. 92, n. 21, p. 60–72, May 2012. Citado na página 46.
- SONG, S.; ZOU, G. A novel busbar protection method based on polarity comparison of superimposed current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 4, p. 1914–1922, Aug 2015. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 12, 17, 18, 20, 21, and 25.
- STEENKAMP, L.; LABUSCHAGNE, C.; WALLER, E. S. Tutorial: Complex busbar protection application. *34th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, October 2007. Citado na página 32.
- TOSHIBA. *GBR100 Busbar Protection Relay*. [S.l.], 2017. Citado na página 3.
- VALSAN, S. P.; SWARUP, K. S. Computationally efficient wavelet-transform-based digital directional protection for busbars. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 3, p. 1342–1350, July 2007. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 20, and 21.
- WARRINGTON, A. R. C. *Protective Relays: Their Theory and Practice, Volume 1*. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1962. Citado na página 26.
- Zhang, Z.; Crossley, P.; Xu, B.; Yin, M. Sequence current component and its power direction-based improved protection for spot network with ders. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n. 7, p. 1634–1644, 2017. ISSN 1751-8687. Citado na página 16.
- ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 22, 24, 27, and 28.
- ZIV APLICACIONES Y TECNOLOGIA. *DBN Bus Differential Protection*. [S.l.], 2019. Citado na página 3.
- ZOU, G.; GAO, H. A traveling-wave-based amplitude integral busbar protection technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 602–609, April 2012. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas páginas 13, 17, 18, 20, and 21.

APÊNDICE A

LÓGICA DE ZONAS DE PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATPDRAW

Tabela A.1: Atribuição dos estados lógicos das correntes

Branch	f_r^1	f_r^2	f_r^{12}
TL1	((D1TL1) AND (CBTL1 OR D5TL1)) OR ((BP) OR (CBTL1 OR D5TL1))	((D2TL1) AND (CBTL1 OR D5TL1)) OR ((BP) OR (CBTL1 OR D5TL1))	(CBTL1) OR (D5TL1 AND CCB)
TL2	((D1TL2) AND (CBTL2 OR D5TL2)) OR ((BP) OR (CBTL2 OR D5TL2))	((D2TL2) AND (CBTL2 OR D5TL2)) OR ((BP) OR (CBTL2 OR D5TL2))	(CBTL2) OR (D5TL2 AND CCB)
TF1	((D1TF1) AND (CBTF1 OR D5TF1)) OR ((BP) OR (CBTF1 OR D5TF1))	((D2TF1) AND (CBTF1 OR D5TF1)) OR ((BP) OR (CBTF1 OR D5TF1))	(CBTF1) OR (D5TF1 AND CCB)
TF2	((D1TF2) AND (CBTF2 OR D5TF2)) OR ((BP) OR (CBTF2 OR D5TF2))	((D2TF2) AND (CBTF2 OR D5TF2)) OR ((BP) OR (CBTF2 OR D5TF2))	(CBTF2) OR (D5TF2 AND CCB)
TL3	((D1TL3) AND (CBTL3 OR D5TL3)) OR ((BP) OR (CBTL3 OR D5TL3))	((D2TL3) AND (CBTL3 OR D5TL3)) OR ((BP) OR (CBTL3 OR D5TL3))	(CBTL3) OR (D5TL3 AND CCB)
TL4	((D1TL4) AND (CBTL4 OR D5TL4)) OR ((BP) OR (CBTL4 OR D5TL4))	((D2TL4) AND (CBTL4 OR D5TL4)) OR ((BP) OR (CBTL4 OR D5TL4))	(CBTL4) OR (D5TL4 AND CCB)
Amarre	Nunca \overline{PB} AND CCB	\overline{PB} AND CCB Never	Nunca Nunca