

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE  
BAIXA IMPEDÂNCIA PARA CONFIGURAÇÃO DE BARRA  
DUPLA COM DISJUNTOR SIMPLES A QUATRO CHAVES**

**JOÃO VITOR LEITE PEDROSA**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE  
BAIXA IMPEDÂNCIA PARA CONFIGURAÇÃO DE BARRA  
DUPLA COM DISJUNTOR SIMPLES A QUATRO CHAVES**

**JOÃO VITOR LEITE PEDROSA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, MSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, julho de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

PEDROSA, JOÃO VITOR LEITE

Avaliação da Proteção Diferencial Numérica de Baixa Impedância para Configuração de Barra Dupla com Disjuntor Simples a Quatro Chaves. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 67p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2016).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial

2. Função 87B

3. Barramentos

4. Baixa Impedância

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEDROSA, J. V. L. (2018). Avaliação da Proteção Diferencial Numérica de Baixa Impedância para Configuração de Barra Dupla com Disjuntor Simples a Quatro Chaves, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xp.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Vitor Leite Pedrosa

TÍTULO: Avaliação da Proteção Diferencial Numérica de Baixa Impedância para Configuração de Barra Dupla com Disjuntor Simples a Quatro Chaves.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2018

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

---

João Vitor Leite Pedrosa

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a minha mãe Ellis, por todo amor, carinho e suporte. Por me ajudar e acreditar em mim nos momentos mais difíceis da vida, por me incentivar quando nem mesmo eu acreditava que seria possível. Por ser exemplo de profissional, de comprometimento, de integridade e amor pelo trabalho. Pela sua bondade, paciência e força ao longo dos anos.

Ao meu pai Baltazar, por ser minha referência de justiça e perseverança. Por todo amor, suporte e ensinamentos de vida. Por sempre me incentivar a gostar de estudar e sempre dar o meu melhor.

Ao meu irmão Mateus, pelos momentos compartilhados e companheirismo.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Aos companheiros de jornada Iago Campos e Nicholas Batista, desde o ensino fundamental até a faculdade juntos na mesma trajetória, sempre me ajudando e compartilhando bons momentos.

Aos grandes amigos que a engenharia elétrica me deu e que levarei para toda a vida, Guilherme Dornelas, Matheus Monteiro, Caio Fiche, Pedro Damasceno, Vitor Serpa, Luiza Aviani e Letícia Alves, por todo o convívio durante o tempo de graduação, todas as brincadeiras, todos os sofrimentos compartilhados. Em especial, agradeço a Vitor Serpa por todo o apoio no curso e a Luiza Aviani e Leticia Lima por toda paciência comigo, por me darem apoio e sempre me ajudarem.

Aos amigos do grupo "Nosso Bonde", pela amizade desde a infância, pelas festas, conselhos, companheirismo e bons momentos compartilhados desde sempre. Em especial a Paulo Dubois, pelo grande suporte e amizade nos tempos mais complicados, por sempre insistir na minha reação.

A Gabriela Moraes, por sempre acreditar em mim, ver o meu melhor. Por tudo que me ensinou sobre as suas experiências, pela paciência e insistência em me ver bem.

Ao professor Kleber, pela oportunidade dada em aprender, pela orientação e ensinamentos, bem como a participação em minha formação acadêmica.

Agradeço a Universidade de Brasília (UnB), por me proporcionar todo o conhecimento e experiência de vida.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Os barramentos de subestações são elementos de alta relevância, dado que são os responsáveis pela interligação de vários outros elementos de um sistema elétrico de potência, como linhas de transmissão, transformadores e geradores. A ocorrência de faltas nos barramentos podem ocasionar um grande número de desligamentos, portanto, é imprescindível que esses elementos possuam um sistema de proteção eficiente para mitigar os efeitos causados por distúrbios e faltas nos sistemas elétricos. Neste trabalho é implementado e avaliado um algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância para barramentos. Para tanto, foi realizada a simulação de um barramento com arranjo de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves no *software* ATP (*Alternative Transients Program*), onde foram aplicadas diversas condições de faltas e realização de manobras. Os dados obtidos das simulações foram avaliados por meio de rotinas que emulam as lógicas 1-de-1 e 2-de-2 para identificação de faltas internas e externas às zonas de proteção construídas. Por fim, os resultados foram analisados quanto aos critérios de tempo de atuação, confiabilidade e seletividade da proteção. Dos resultados obtidos, pode-se constatar que a proteção diferencial de baixa impedância para barramentos com configuração variável é vantajosa em relação a outras filosofias de proteção. Esta proteção também tem um caráter de alta confiabilidade e tempos de atuação rápidos, tornando-se uma opção bastante atrativa para ser implementada em relés reais.

**Palavras-chave:** Proteção de sistemas elétricos, Barramentos, Proteção Diferencial, Proteção Diferencial de Baixa Impedância, Função 87B, Lógica 1-de-1, Lógica 2-de-2, ATP.

## **ABSTRACT**

Substation buses are highly relevant since they are responsible for the interconnection of several other elements of an electric power system, such as transmission lines, transformers and generators. The occurrence of faults in the buses can cause a large number of disconnections, therefore, it is imperative that these elements have an efficient protection system to mitigate the effects caused by disturbances and faults in the electrical systems. In this work, a low impedance differential protection algorithm for buses is implemented and evaluated. In order to do so, a simulation of a bus with double bar arrangement with four-way single-circuit breaker in the ATP (Alternative Transients Program) was performed, where several fault conditions and maneuvering were applied. The data obtained from the simulations were evaluated using routines that emulate the logics 1-out-of-1 and 2-out-of-2 to identify internal and external faults to the built protection zones. Finally, the results were analyzed regarding the criteria of operation time, reliability and selectivity of the protection. From the results obtained, it can be seen that the low impedance differential protection for buses with variable configuration is advantageous in relation to other protection philosophies. This protection also has a character of high reliability and fast actuation times, making it a very attractive option to be implemented in real relays.

**Keywords:** Protection of Electrical Systems, Busbar, Differential Protection, Low Impedance Differential Protection, Function 87B, 1-out-of-1 Logic, 2-out-of-2 Logic, ATP.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Lista de Símbolos</b>	ix
<b>Glossário</b>	xi
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3 Organização do Texto . . . . .	3
<b>Capítulo 2 – Fundamentos da Proteção Diferencial de baixa impedância de barramentos</b>	5
2.1 Barramentos e suas configurações . . . . .	6
2.2 Transformador de Corrente (TC) . . . . .	8
2.3 Relés de Proteção . . . . .	11
2.4 Proteção de barramentos . . . . .	13
2.5 Proteção Diferencial Numérica de Baixa Impedância . . . . .	14
2.5.1 Corrente de Restrição Suavizada . . . . .	18
2.6 Lógicas de <i>trip</i> 1-de-1 e 2-de-2 . . . . .	19
2.6.1 Comparação entre a lógica 2-de-2 e o ajuste de sensibilidade adaptativo para detecção de faltas externas . . . . .	22
2.7 Definição de zonas de proteção . . . . .	24
2.8 Lógica de Seleção das Zonas de Proteção . . . . .	27
2.8.1 Transferência da Proteção . . . . .	29
2.8.2 Efeito do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero em Linhas de Transmissão	30
<b>Capítulo 3 – Algoritmo Avaliado</b>	33



3.1	ATP e MODELS . . . . .	34
3.2	Descrição da simulação no ambiente ATP . . . . .	36
3.2.1	Transformadores de Corrente (TCs) para proteção de barras . . . . .	36
3.2.2	Chaves Seccionadoras (SCs) . . . . .	36
3.2.3	Bloco de faltas . . . . .	37
3.2.4	Módulo de Condicionamento de Sinais . . . . .	38
3.2.5	Módulo de Impressão de Sinais . . . . .	38
3.3	Descrição da rotina implementada . . . . .	40
3.3.1	Normalização das amostras das correntes . . . . .	40
3.3.2	Determinação da zona de proteção de cada vão, lógica de paralelismo de barra e da lógica de transferência de proteção . . . . .	41
3.3.3	Cálculo das correntes de operação, restrição e restrição suavizada . . . . .	42
3.3.4	Detecção de Distúrbios, Faltas Externas e Faltas Internas, Lógicas de Trip . . . . .	43
<b>Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados</b>		<b>44</b>
4.1	Descrição do sistema de potência analisado . . . . .	44
4.2	Simulações e Resultados . . . . .	46
4.3	Curto-Circuitos Aplicados no Sistema . . . . .	47
4.3.1	Curto-Circuitos com o sistema na sua configuração normal . . . . .	47
4.3.1.1	Caso 1: Curto-Circuito Trifásico Interno na Barra 1, Zona 1 . . . . .	47
4.3.1.2	Caso 2: Curto-Circuito Bifásico Interno na Barra 2, Zona 2 . . . . .	50
4.3.1.3	Caso 3: Curto-Circuito Trifásico Interno Adjacente ao DJIB . . . . .	52
4.3.1.4	Caso 4: Curto-Circuito Monofásico Externo sem saturação do TC, na LT2, Zona 2 . . . . .	55
4.3.2	Curto-Circuitos com Transferência da Proteção . . . . .	56
4.3.2.1	Caso 5: Curto-Circuito Trifásico na Barra 1 com a proteção da LT1 transferida . . . . .	58
4.3.2.2	Caso 6: Curto-Circuito Trifásico na Barra 2 com a proteção da LT1 transferida . . . . .	60
4.3.3	Curto-Circuito com Paralelismo de Barras . . . . .	62
<b>Capítulo 5 – Conclusões e Propostas Futuras</b>		<b>66</b>
5.1	Propostas de Trabalhos Futuros . . . . .	67
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Dinâmica do sistema de proteção. . . . .	6
2.2	Arranjo de Barra Dupla com Disjuntor Simples a 4 Chaves. . . . .	8
2.3	Modelo do transformador de corrente (ALVARENGA, 2014). . . . .	9
2.4	Instalação do TC para proteção de barramentos (ALVARENGA, 2014). . . . .	10
2.5	Lei das correntes de Kirchoff aplicada a um barramento (ESCUDERO, 2016). . . . .	15
2.6	Relé Diferencial Percentual de Sobrecorrente (VIANNA, 2012). . . . .	15
2.7	Operação Normal (SILVA, 2016). . . . .	16
2.8	(a) Avaliação falta interna (ESCUDERO, 2016) e (VIANNA, 2012) (b) Locus no plano operacional para falta interna (SILVA, 2016). . . . .	17
2.9	(a) Avaliação falta externa (ESCUDERO, 2016) e (VIANNA, 2012) (b) Locus no plano operacional para falta externa (SILVA, 2016). . . . .	18
2.10	Influência da saturação de TC com formas de ondas das energias (ESCUDERO, 2016). . . . .	19
2.11	Circuito que emula o comportamento de $i_{res}^*$ (ESCUDERO, 2016). . . . .	20
2.12	Diagrama de blocos das lógicas de <i>trip</i> 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012). . . . .	21
2.13	Avaliação das lógicas de <i>trip</i> para: (a) falta interna (b) falta externa sem saturação do TC (c) falta externa com saturação do TC (ESCUDERO, 2016) . . . . .	23
2.14	Diagrama de blocos da lógica de detecção de falta externa (VIANNA, 2012). . . . .	24
2.15	Plano operacional com ajuste de inclinação adaptativo (VIANNA, 2012). . . . .	24
2.16	Zonas de proteção de barramento duplo. . . . .	25

2.17	Conexão do vão à determinada barra por meio da chave seletora de barra (ESCUDERO, 2016) . . . . .	26
2.18	Ilustração das zonas de proteção: (a) zonas física e lógica coincidentes; (b) zonas física e lógica diferentes, com a zona lógica contraída. (ESCUDERO, 2016) . . .	27
2.19	Esquemas de proteção no DJIB: (a) com sobreposição de zonas; (b) sem sobreposição de zonas e com a abertura inicial do DJIB (ESCUDERO, 2016). . . . .	27
3.1	Diagrama de blocos do algoritmo implementado. . . . .	33
3.2	Circuito Equivalente do TC (VIANNA, 2013). . . . .	36
3.3	Chave Seccionadora. . . . .	37
3.4	Bloco de Faltas. . . . .	37
3.5	Módulo de Condicionamento de Sinais. . . . .	38
3.6	Resposta em frequência do filtro. . . . .	39
3.7	Etapa de impressão de dados. . . . .	39
4.1	Sistema Simulado . . . . .	45
4.2	Caso 1: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ;(d) Fase B- $Z_2$ ;(e) Fase C- $Z_1$ ;(f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	48
4.3	Caso 1: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	49
4.4	Caso 1: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema. . . . .	50
4.5	Caso 2: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ;(d) Fase B- $Z_2$ ;(e) Fase C- $Z_1$ ;(f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	51
4.6	Caso 2: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	52
4.7	Caso 2: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema. . . . .	52

4.8	Caso 3: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	53
4.9	Caso 3: Correntes de operação e restrição suavizada para Zona 1 e Zona 2 : (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	54
4.10	Caso 3: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema. . . . .	54
4.11	Caso 4: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	55
4.12	Caso 4: correntes de operação e restrição suavizada para Zona 1 e Zona 2 : (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	56
4.13	Caso 4: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema. . . . .	56
4.14	Transferência dos elementos entre as barras : (a) LT1; (b) LT2; (c) LT3; (d) LT4; (e) TF1; (f) TF2. . . . .	57
4.15	Estado Lógico da variáveis de transferência da proteção e de paralelismo de barra de Disjuntores do Sistema. . . . .	58
4.16	Caso 5: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	59
4.17	Caso 5: Correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	59
4.18	Caso 5: Estado Lógico dos Disjuntores. . . . .	60
4.19	Estado Lógico da variáveis de transferência da proteção e de paralelismo de barra de Disjuntores do Sistema. . . . .	60

---

4.20	Caso 6: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	61
4.21	Caso 6: Correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	61
4.22	Caso 6: Estado Lógico dos Disjuntores. . . . .	62
4.23	<i>Flag</i> de detecção de paralelismo de barra (PB). . . . .	63
4.24	Caso 7: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	63
4.25	Caso 7: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A- $Z_1$ ; (b) Fase A- $Z_2$ ; (c) Fase B- $Z_1$ ; (d) Fase B- $Z_2$ ; (e) Fase C- $Z_1$ ; (f) Fase C- $Z_2$ . . . . .	64
4.26	Caso 7: Estado Lógico dos Disjuntores. . . . .	65

## LISTA DE TABELAS

2.1	Identificação de um vão e de sua respectiva zona de proteção. . . . .	28
2.2	Lógica de trip dos disjuntores. . . . .	29
2.3	Estados lógicos dos <i>flags</i> de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras. . . . .	31
2.4	Lógica de trip dos disjuntores. . . . .	31
2.5	Estados lógicos dos <i>flags</i> de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras e o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero. . . . .	32
4.1	Parâmetros da LT modelada no ATP. . . . .	45
4.2	Parâmetros dos transformadores de potência. . . . .	45
4.3	Parâmetros dos equivalentes remotos. . . . .	45
4.4	Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso. . . . .	46
4.5	Cenários de falta avaliados. . . . .	47
4.6	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1 . . . . .	49
4.7	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1 . . . . .	49
4.8	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2 . . . . .	51
4.9	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2 . . . . .	51
4.10	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zonas 1 e 2 . . . . .	53
4.11	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zonas 1 e 2 . . . . .	54
4.12	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1 . . . . .	59
4.13	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1 . . . . .	60

---

4.14	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2 . . . . .	62
4.15	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2 . . . . .	62
4.16	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1 . . . . .	64
4.17	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1 . . . . .	64
4.18	Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2 . . . . .	65
4.19	Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2 . . . . .	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_0$	Susceptância de sequência zero da linha de transmissão.
$B_1$	Susceptância de sequência positiva da linha de transmissão.
$f_p^1$	<i>flag</i> de habilitação de corrente da Zona 1 referente ao p-ésimo vão.
$f_p^2$	<i>flag</i> de habilitação de corrente da Zona 1 referente ao p-ésimo vão.
$I_p$	Corrente no primário do transformador.
$I_s$	Corrente no secundário do transformador.
$I_{cc,pri,max}$	Corrente de curto-circuito máxima no primário.
$I_{pri,nom}$	Corrente nominal do enrolamento primário.
$I_{cc,sec,max}$	Corrente de curto-circuito máxima no secundário.
$I_{sec,nom}$	Corrente nominal do enrolamento secundário.
$I_p$	Corrente do p-ésimo vão.
$I_{op}$	Corrente de operação.
$I_{res}$	Corrente de restrição.
$I_{pickup}$	Corrente mínima de operação.
$I_{res}^*$	Corrente de restrição suavizada.
$k_s$	Limiar de comparação para taxa de variação da corrente de restrição.
$N_p$	Quantidade de espiras do enrolamento primário.
$N_s$	Quantidade de espiras do enrolamento secundário.
$V_{sec,max}$	Tensão máxima do enrolamento secundário.



---

$Z_{burden}$	Carga Nominal do Relé.
$Z_0$	Impedância de sequência zero .
$Z_1$	Impedância de sequência positiva.
$Z_1$	Zona de proteção um.
$Z_2$	Zona de proteção dois.

## GLOSSÁRIO

ABB	<i>ASEA Brown Boveri</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
A/D	Analogico/Digital
DJ	Disjuntor
DJAMR	Disjuntor de Amarre
DJIB	Disjunto de Interligação de Barras
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
FS	Fator de sobrecorrente
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
JT	Janela de Tempo
LT	Linha de Transmissão
LCK	Lei das Correntes de Kirchoff
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
ONS	Operador Nacional do Sistema

---

PB	Paralelismo de Barra
PT	Proteção Transferida
RTC	Relação de transformação do transformador de Corrente
S	Potência Complexa
SE	Subestação
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories
SC	Seccionadora
SLP	Slope
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TDD	Mensagem de disparo direto
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TF	Transformador
TC	Transformador de corrente
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O consumo energético é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de uma sociedade. Este indicador reflete tanto o ritmo de atividades dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços (ANEEL, 2008). A sociedade moderna é dependente do fornecimento de energia elétrica, pois esta configura-se como um dos alicerces principais do mecanismo de funcionamento do mundo atual; sem energia elétrica a indústria fica incapacitada de operar, os meios de telecomunicações ficam indisponíveis, serviços de segurança, abastecimento e saúde também são severamente afetados, daí a importância de um fornecimento contínuo de energia elétrica, para manter a ordem e a operação da vida cotidiana. Cada vez mais a demanda por energia vem aumentando, justificando assim a expansão, modernização e aumento da geração dos sistemas elétricos de potência. Neste contexto, o estudo da proteção de sistemas elétricos é de suma importância, afim de garantir o fornecimento contínuo e seguro de energia elétrica, bem como a interligação de diversos subsistemas que compõem o sistema interligado nacional (SIN) .

O sistema de proteção tem como objetivo principal proteger o sistema elétrico contra possíveis faltas ou distúrbios, sejam eles permanentes ou temporários. Esse objetivo é alcançado projetando-se um esquema de proteção para monitorar continuamente alguma variável do sistema elétrico, como tensões e correntes. Ao primeiro sinal de anomalia desses parâmetros, a proteção deve ser capaz de identificar e atuar de forma correta, garantindo que o defeito seja isolado e posteriormente extinto, não se propagando para o restante do sistema, prevenindo assim, tanto a integridade dos outros elementos que constituem esse sistema, quanto a ocorrência de desligamentos não programados e *blackouts*.

Dentre os elementos que constituem os sistemas elétricos de potência, as subestações de

energia (SEs) desempenham papel fundamental. No percurso que a energia elétrica faz desde a geração até a distribuição, as SEs têm como objetivos transformar os níveis de tensão, permitir a distribuição de energia por meio de malhas elétricas, controlar o fluxo de potência em uma rede e permitir o chaveamento de circuitos. Componente fundamental das SEs e objeto de estudo desse trabalho, o barramento é um ponto crítico de um sistema elétrico, pois configura-se como um ponto de convergência (um nó), onde diversos elementos como linhas de transmissão, geradores e transformadores estão conectados.(KINDERMANN, 2008)

As faltas que acometem barramentos são raras, segundo Anderson (1999), correspondem de 6% a 7% do total de faltas em um sistema de potência, porém seus efeitos são bastante danosos ao sistema, podendo levar à instabilidade, devido ao grande número de manobras e desconexões que são realizadas com o intuito de isolar a falta dos outros elementos que estão ligados à esses barramentos.

A respeito da proteção de barramentos, dois tipos de técnicas são largamente empregadas, a depender da situação, são elas: proteção diferencial de baixa impedância e de alta impedância. A proteção de alta impedância tem sido empregada, tradicionalmente, em SEs de alta e extra-alta tensão, com barramentos de topologia fixa. Já a proteção de baixa impedância tem sido empregada, tradicionalmente, em SEs de alta e extra-alta tensão, que possuem configuração de barramento com topologia variável. Com o desenvolvimento dos elementos de proteção, a exemplo dos relés digitais e digitais numéricos que são relés eletrônicos gerenciados por microprocessadores, onde a lógica de proteção é feita por meio da construção de algoritmos computacionais, a proteção diferencial de baixa impedância tem-se sobressaído em relação a proteção de alta impedância, por oferecer vantagens, como a possibilidade de instalação distribuída, que facilita a incorporação de novos vãos aos barramento. Como desvantagem da utilização da proteção diferencial de alta impedância para barramentos com topologia variável, destacam-se as manobras de chaveamento de circuitos secundários dos transformadores de corrente (TCs), que podem danificar os TCs, isso ocorre devido o modo de instalação dos TCs para utilização desse tipo de proteção

Segundo ONS (2011), o tempo total de eliminação de faltas, que inclui o tempo de operação da proteção do barramento, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores, não deve ser superior a 100 ms, para evitar danos irreversíveis aos equipamentos do SIN.

Diante do exposto, fica evidente a importância de avaliar a atuação da proteção diferencial aplicada aos barramentos, com o intuito de garantir que esta irá atuar com confiabilidade, seletividade e velocidade para mitigar os efeitos dos diversos tipos de distúrbios e impedir que esses distúrbios se alastrem para outros elementos.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a atuação da proteção diferencial de baixa impedância frente aos diferentes tipos de faltas internas, externas e às manobras de transferência de vãos que a configuração de barra em estudo está submetida. Para cumprir esse objetivo são analisadas as lógicas de trip 1-de-1 e 2-de-2, com seus respectivos resultados de implementação. Dessa forma é possível observar a confiabilidade da proteção quando submetida a diferentes tipos de distúrbios. Para tal, são definidos como objetivos específicos:

- Apresentar as lógicas de trip 1-de-1 e 2-de-2;
- Construir as zonas lógicas adaptativas de proteção para a configuração de barra dupla disjuntor simples a 4 chaves;
- Adequar o algoritmo avaliado para o caso de estudo;
- Simular diversas condições de falta no barramento via ATP (*Alternative Transients Program*) e analisar o comportamento do algoritmo da proteção diferencial de baixa impedância.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica da proteção diferencial de barramentos;
- No capítulo 3, descrevem-se as características do sistema estudado, bem como o algoritmo de proteção avaliado.
- No capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos a partir da simulação de diferentes tipos de faltas com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo;

- 
- No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos que possam dar continuidade a este estudo.

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos à falhas de diversas naturezas, dentre elas, destacam-se os curtos-circuitos pela sua grande incidência nesses sistemas. Os curto-circuitos são causados, geralmente, devido à falhas de isolamento, essas falhas interrompem o caminho da corrente de carga do sistema, dando origem a correntes elevadas. Essas correntes elevadas podem circular por todos os elementos conectados ao sistema faltoso, resultando assim em distúrbios de tensão, que podem causar danos irreversíveis tanto para as unidades consumidoras, quanto para o próprio sistema (PAITHANKAR; BHIDE, 2003).

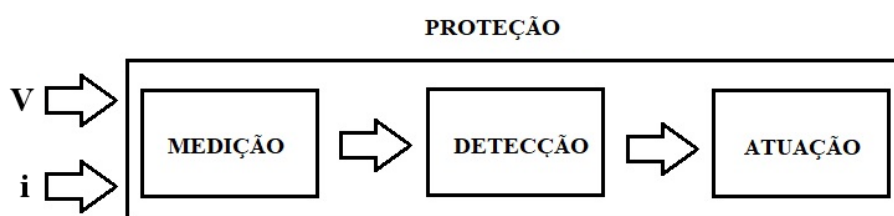
Um sistema de proteção tem como função principal garantir a desconexão de todo sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele (MAMEDE, 2011). Além disso, para ser considerado eficiente, o sistema de proteção deve ter as seguintes características (ANDERSON, 1999):

- Sensibilidade: capacidade de detectar faltas para as quais foi projetado;
- Confiabilidade: habilidade de atuar de maneira correta quando necessário;
- Segurança: capacidade de evitar operações indevidas dos mecanismos, garantindo a não atuação da proteção em condições normais de operação;
- Seletividade: habilidade de isolar do circuito somente o local da falta, provendo assim máxima continuidade no serviço de forma que, em casos de atuação, a quantidade mínima de componentes seja desconectados;
- Coordenação: determinação dos ajustes necessários dos elementos de proteção afim de manter a seletividade;
- Velocidade: capacidade de atuar de forma rápida, visando reduzir a duração das faltas e minimizar os danos ao sistema protegido;
- Economia: garantir o melhor sistema de proteção com o menor custo;



- Simplicidade: utilização mínima de equipamentos e circuitos para garantir a proteção;

De forma resumida e generalista, a dinâmica de um sistema de proteção consiste no monitoramento de algum parâmetro do sistema, por meio de um equipamento de medição, como transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs). As informações medidas são passadas para os instrumentos de controle, os relés, que comparam as características dos dados recebidos com valores previamente ajustados. Caso os dados recebidos apresentem valores superiores aos ajustados, um sinal é enviado aos elementos que promovem a desconexão do circuito elétrico afetado, os disjuntores. A Figura 2.1, abaixo, representa o princípio de operação de um sistema de proteção, conforme descrito.



**Figura 2.1.** Dinâmica do sistema de proteção.

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos e conceitos básicos a respeito da proteção diferencial de barramentos, foco de desenvolvimento do presente trabalho.

## 2.1 BARRAMENTOS E SUAS CONFIGURAÇÕES

Os barramentos são elementos de uma SE nos quais são conectados diversos equipamentos do sistema elétrico, a saber, circuitos alimentadores, circuitos de distribuição e transformadores de potência. Dessa forma, a ocorrência de um defeito nesses componentes ocasionará muitos desligamentos (SILVA, 2016).

Há uma série de considerações ao se projetar um barramento (IEEE, 2009)

- Requisitos de confiabilidade em termos de continuidade de serviço para o barramento todo ou para um elemento essencial da rede alimentado a partir do barramento;
- Considerações operacionais em termos de manutenção de equipamentos e flexibilidade de manobras na rede;
- Restrições econômicas e ambientais;
- Requisitos de seccionamento para evitar a falha excessiva do disjuntor e ciclos operacio-

nais;

- Facilidade de futuras expansões dos barramentos.

Além das considerações citadas, é de suma importância conhecer os arranjos de barras e suas particularidades, antes de projetar um esquema de proteção para uma dada configuração. Dependendo do tipo (transmissão ou distribuição), nível de tensão, quantidade de vãos e importância da SE para o sistema, os barramentos podem possuir os seguintes arranjos (SILVA, 2016) :

- Barra simples;
- Barra simples seccionada;
- Barra principal e de transferência;
- Barra dupla com disjuntor simples a 5 chaves;
- Barra dupla com disjuntor simples a 4 chaves;
- Barra disjuntor e meio;
- Barra dupla disjuntor duplo;
- Anel simples seccionado.

O arranjo de barra dupla com disjuntor simples a 4 chaves é o objeto de estudo desse trabalho. A seguir serão descritas suas principais características.

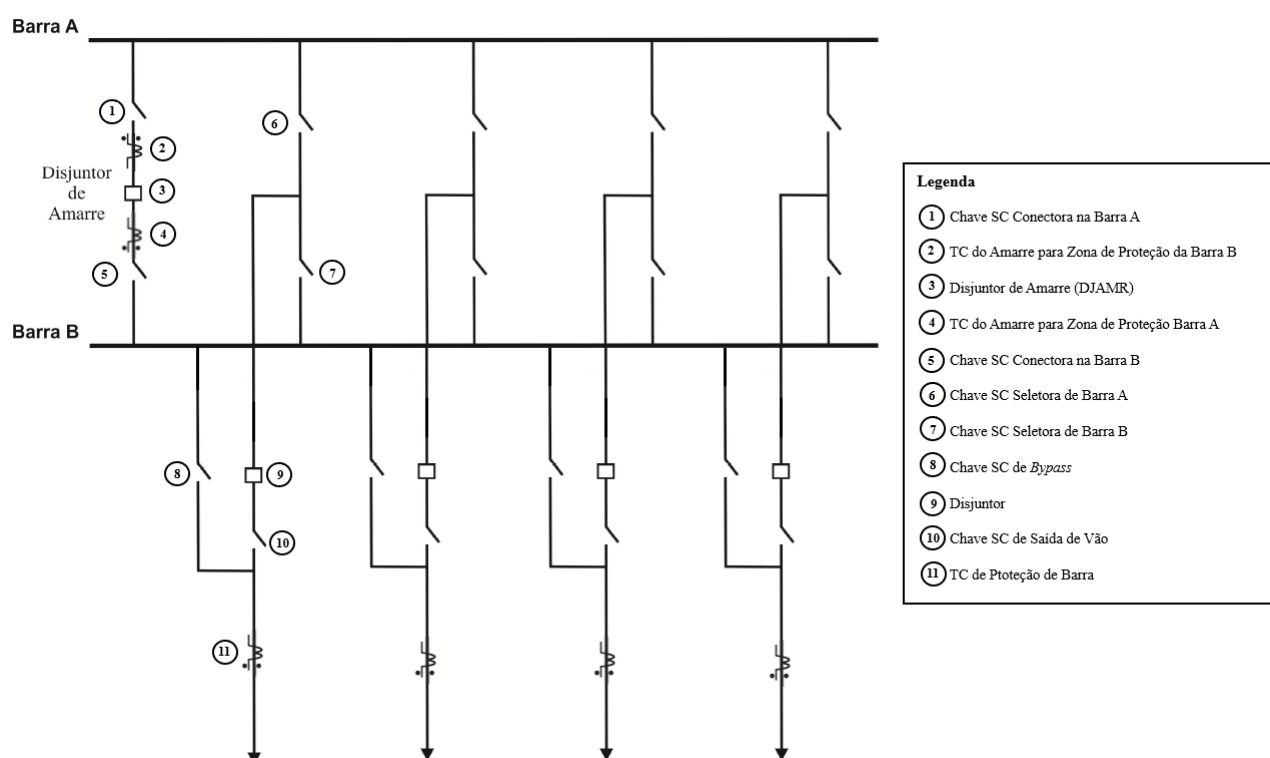
Esta configuração recebe essa denominação pois cada vão é conectado ao barramento através de um disjuntor e 4 chaves seccionadoras, a Figura 2.2 ilustra a conexão. Esse arranjo é recomendado como requisito básico no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS para barramentos de 230 kV com isolamento a ar. As barras podem operar normalmente de duas formas:

- ambas energizadas, com os vãos distribuídos entre elas (mais comum);
- apenas uma das barras energizada, sendo a outra utilizada apenas como barra de transferência.

A configuração de barra dupla com disjuntor simples a 4 chaves possui topologia variável, implicando na possibilidade de realizar um grande número de manobras. Dentre essas manobras, destacam-se a transferência de vãos entre as barras sem que seja necessário desenergizá-las. Vale pontuar que nesse arranjo a barra B é sempre tomada como barra de transferência, e a

liberação do disjuntor para manutenção, mantendo o vão respectivo alimentado pela barra B por meio do fechamento da seccionadora de *by-pass*.

Em relação aos esquemas de proteção aplicados especificamente para este caso, tem-se adotado o uso da proteção diferencial de baixa impedância, dado que as zonas de proteção das barras são variáveis, inviabilizando o uso da proteção diferencial de alta impedância. A proteção de cada vão deverá atuar tanto no disjuntor do seu vão quanto no disjuntor de interligação de barra, caso seja detectada uma falta em uma das barras, somente os vãos ligados àquela barra serão desconectados.



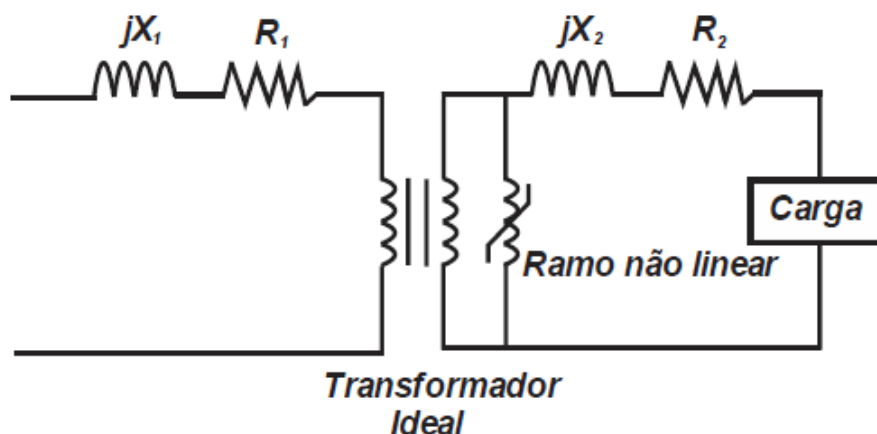
**Figura 2.2.** Arranjo de Barra Dupla com Disjuntor Simples a 4 Chaves.

## 2.2 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)

O transformador de corrente é um transformador que alimenta instrumentos de medição, dispositivos de controle ou dispositivos de proteção. Este equipamento é utilizado pois os níveis de tensão e corrente de operação dos instrumentos, como por exemplo relés, são incompatíveis com a magnitude dessas grandezas do sistema elétrico de potência, sendo muito inferiores. Dessa forma é necessário que haja uma adequação dessas grandezas dos circuitos de alta tensão

para os equipamentos de medição, proteção e controle (KINDERMANN, 2005).

Dentro dessa necessidade de adequação, os TCs atuam reproduzindo, no seu enrolamento secundário, uma corrente que é uma réplica em escala da corrente do primário do sistema elétrico. O modelo do TC é mostrado na Figura 2.3.



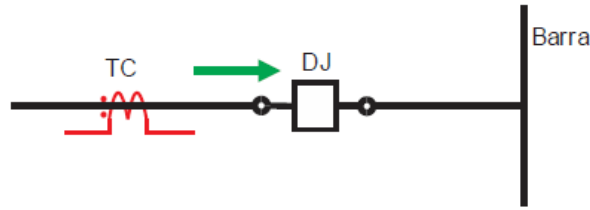
**Figura 2.3.** Modelo do transformador de corrente (ALVARENGA, 2014).

Podem-se destacar três finalidades básicas exercidas pelos TCs (KINDERMANN, 2005):

- Isolar os equipamentos de medição, controle e proteção do circuito de alta tensão;
- Fornecer no seu secundário uma corrente proporcional à corrente no seu primário;
- Fornecer no seu secundário uma corrente de dimensões adequadas para serem usadas pelos dispositivos de medição, controle e proteção.

Liga-se a bobina primária do TC em série com a carga, enquanto seu secundário está ligado em série com os instrumentos de medição. Para a proteção de barramentos, os TCs são instalados, geralmente, após o disjuntor de cada circuito, assim caso o disjuntor esteja aberto não haverá medição de corrente para o vão que está isolado. A instalação do TC para proteção de barramentos é mostrada na Figura 2.4. Cabe destacar que podem haver outros TCs nas proximidades do disjuntor, mas estes são dedicados a outros elementos, como por exemplo linhas de transmissão.

Avançando no estudo do tema, faz-se necessário o entendimento da RTC, relação de transformação do TC, para isso considera-se um transformador ideal, o qual possui relutância magnética igual a zero. Neste caso particular, tem-se que a relação de ampères-espiras do seu enrolamento primário é igual à magnitude da relação ampères-espiras do seu enrolamento secundário:



**Figura 2.4.** Instalação do TC para proteção de barramentos (ALVARENGA, 2014).

$$N_p I_p = N_s I_s \quad (2.1)$$

onde  $N_p$  e  $N_s$  são a quantidade de espiras dos enrolamentos primário e secundário, enquanto  $I_p$  e  $I_s$  representam suas correntes, respectivamente. Dessa forma, a RTC pode ser definida como a seguinte razão:

$$RTC = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s} \quad (2.2)$$

Pode-se ainda representar a corrente no secundário do TC, como uma relação entre a corrente do primário e a RTC do transformador:

$$I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (2.3)$$

A corrente secundária nominal do TC é normalizada, geralmente, em 1A ou 5A, devido à padronização dos equipamentos de proteção (normas ABNT, ANSI e IEC).

Para o entendimento da classe de exatidão dos TCs, segundo as normas ANSI, primeiramente define-se o fator de sobrecorrente (FS), o qual representa a razão entre a corrente de curto-circuito máxima que pode passar pelo primário do TC pela corrente nominal do enrolamento primário.

$$FS = \frac{I_{cc,pri,max}}{I_{pri,nom}} \quad (2.4)$$

As precisões dos transformadores de correntes para proteção são de 2,5%, 5% e 10%. Essa precisão está relacionada ao erro de medição associado ao TC durante a ocorrência de uma falta, onde o TC pode ter o seu núcleo saturado devido aos altos valores de corrente presentes no instante do curto. Dessa forma a porcentagem está associada ao quanto o fluxo magnético do

TC fica fora da região linear na curva de magnetização do núcleo do TC. Já o FS é padronizado, pela norma ANSI, igual a 20 para o Brasil e dessa forma surge uma limitação, mostrada na Equação (2.5) abaixo, que serve como garantia que o TC não ultrapassará seu erro da sua classe de exatidão.

$$I_{cc,pri,max} \geq 20 \times I_{pri,nom} \quad (2.5)$$

Pelas normas ANSI, define-se a precisão do TC, pela limitação máxima de tensão que pode aparecer no secundário do TC, quando da ocorrência do curto-circuito, de acordo com o seu FS. A partir da formulação matemática apresentada é possível calcular a máxima corrente no secundário, quando ocorre uma corrente de falta no primário, considerando uma corrente nominal de 5A no secundário:

$$I_{cc,sec,max} = \frac{I_{cc,pri,max}}{RTC} = \frac{20 \times I_{pri,nom}}{\frac{I_{pri,nom}}{I_{sec,nom}}} = 20 \times I_{sec,nom} = 100A \quad (2.6)$$

Portanto, para os padrões ANSI, a máxima corrente admissível no secundário do TC, de modo a garantir que seu erro esteja dentro da classe de exatidão especificada pelo TC, é de 100A.

A partir da corrente máxima no secundário é possível determinar a tensão máxima que aparece, para cada valor de carga nominal do relé  $Z_{burden}$ :

$$V_{sec,max} = Z_{burden} \times I_{cc,sec,max} \quad (2.7)$$

## 2.3 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés são os elementos mais importantes do sistema de proteção pois comandam toda a dinâmica por trás das filosofias de proteção. Relés são, basicamente, sensores que monitoram a todo o tempo um sistema elétrico. Sua função principal consiste em identificar anomalias e defeitos, localizá-los da forma mais precisa possível e enviar sinais de alerta para os operadores do sistema, para que o defeito seja isolado do resto da rede (KINDERMANN, 2005).

O bom desempenho dos relés garante uma redução da quantidade de desligamentos não

programados, evitando perdas econômicas e de produção, minimiza a extensão do distúrbio pela rede, evitando danos maiores. Para garantir uma boa atuação, o relé deve garantir a seletividade, sensibilidade, rapidez, confiabilidade, robustez e estabilidade.

Os relés podem ser classificados quanto os seus aspectos construtivos, podendo ser eletromecânicos, eletrônicos, digitais e digitais numéricos. Apresenta-se, brevemente, as características de cada um a seguir.

- Relés Eletromecânicos: foram os primeiros relés a serem utilizados para proteção. O relé é acionado por movimentos mecânicos provenientes de acoplamentos elétricos e magnéticos. Seu princípio de funcionamento se baseia na atração eletromagnética ou na indução eletromagnética.
- Relés Eletrônicos: são construídos com dispositivos eletrônicos, são desenvolvidos circuitos eletrônicos (hardware) para cada funcionalidade desempenhada pelo relé, a regulação desse relé é feita pela mudança física em algum dos parâmetros do circuito como variação na capacitância, variação no reostato, mudança do laço no circuito.
- Relés Digitais e Digitais Numéricos: são relés eletrônicos gerenciados por microprocessadores. A lógica de proteção é feita por meio da construção de algoritmos computacionais, garantido grande maleabilidade para o projetista. O relé digital numérico apresenta um processador digital de sinal que otimiza a conversão de A/D e processamento de dados, portanto possui um refinamento tecnológico maior. Apresentam grandes vantagens em relação aos seus antecessores, destacando-se: o baixo consumo de energia, reduzindo assim a capacidade dos TCs; elevada confiabilidade devido à função de autossupervisão; diagnóstico de falha por meio de armazenamento de dados de falha.

Os relés também podem ser classificados de acordo com a função de proteção por meio da qual atuam. Apresentam-se a seguir os princípios das principais funções de proteção.

- Relé de sobrecorrente: são os relés que atuam quando a corrente de falta ou anômala ultrapassa a corrente de ajuste estabelecida pelo relé;
- Relé direcional: é baseado no reconhecimento do sentido em que está fluindo a corrente ou a potência numa determinada parte do sistema;
- Relé de distância: opera medindo os parâmetros de linha de transmissão até o curto-circuito ou a carga; este se baseia na impedância, admitância ou a reatância vista pelo

relé.

- Relé de sobretensão: protegem sistemas elétricos submetidos a níveis de tensão superiores aos valores máximos, que garantem a integridade dos equipamentos elétricos em operação;
- Relé diferencial: é fundamentado na comparação entre as correntes que circulam entre os terminais de entrada e saída de um equipamento.

## 2.4 PROTEÇÃO DE BARRAMENTOS

Segundo ABB (1999), o sistema de proteção de barramentos deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Deve ter atuação rápida;
- Deve ser capaz de detectar faltas internas;
- Deve ser estável para faltas externas, que possam levar à saturação do núcleo magnético do TC do vão defeituoso;
- Deve ser capaz de detectar e isolar somente o trecho do sistema afetado pela falta;
- Deve ser segura contra operações indevidas devido às falhas de contatos auxiliares, erros humanos, faltas nos circuitos secundários, etc.

O esquema de proteção a ser utilizado em determinado barramento depende do grau de importância da SE e o do porte desta. De acordo com o critério de importância, podem ser empregados os esquemas de proteção temporizadas feita pela 2ª zona de relés de distância, ou pela proteção de retaguarda de sistemas tradicionais de proteção; proteção de distância local com recuo para cobrir também a barra; e proteção diferencial para a própria barra. Esse esquema é utilizado em barras mais importantes. Já para o critério de porte da SE são utilizados os esquemas de proteção diferencial de barras com relés de sobrecorrente, diferencial de barras com relé diferencial percentual, diferencial de baixa impedância de barras, diferencial alta impedância de barras, diferencial de barras com relés de sobrecorrente direcional, diferencial de barras com acopladores lineares.

Do ponto de vista da proteção, um barramento pode ser monitorado de três formas distintas:

- Utilizando a 1ª Lei de Kirchoff, que estabelece que o somatório das correntes que entram e saem de um determinado nó deve ser nulo;



- Análise da tensão e corrente no barramento;
- Carregamento existente.

Os procedimentos de rede do ONS estabelecem que cada barramento pertencente ao SIN deve ter ao menos um conjunto de proteção unitária segmentada por fase, que pode ser baseada no princípio diferencial de baixa ou de alta impedância, ou na comparação direcional de fases (ONS, 2011). A proteção unitária mais comumente utilizada tem sido a proteção diferencial de baixa impedância.

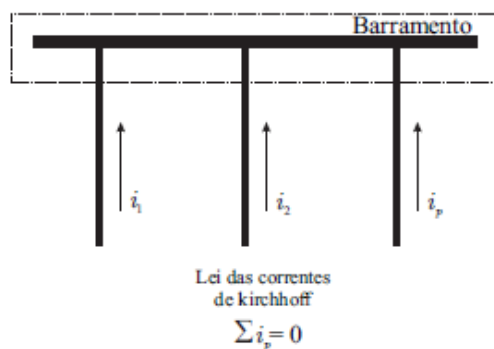
Todos os temas abordados até aqui foram expostos para chegar à próxima seção com um embasamento maior sobre o tema da proteção diferencial de baixa impedância. Até aqui já entende-se quais são as características de um sistema de proteção, qual o elemento do sistema elétrico é objeto de estudo deste trabalho, bem como suas características e requisitos de proteção que devem ser atendidos, como são avaliados os parâmetros a serem monitorados e por fim qual elemento de controle está por trás do sistema de proteção. Dessa forma, pode-se prosseguir com mais profundidade sobre o tema. Este será o objetivo da próxima seção.

## 2.5 PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE BAIXA IMPEDÂNCIA

A função de proteção diferencial numérica de baixa impedância (código IEEE/ANSI 87B) recebe essa denominação pelo fato da impedância imposta pelo relé no secundário do TC ser baixa, minimizando os efeitos da saturação do núcleo magnético do TC. Esta função pode ser implementada de duas formas: baseada nos fasores de corrente (função 87B filtrada) ou nos valores instantâneos das correntes (função 87B instantânea). Como é requerida uma atuação mais rápida, a função 87B instantânea é, tradicionalmente, mais difundida.

Esta função é baseada na Lei das correntes de Kirchoff (LCK), na qual o somatório das correntes que entram e saem de um nó deve ser nulo. A Figura 2.5, abaixo, representa este princípio aplicado ao caso de um barramento.

A função 87B implementa os princípios da proteção diferencial percentual de sobrecorrente, portanto se baseia comparação de uma corrente de operação ( $i_{op}$ ) e uma corrente de restrição ( $i_{res}$ ). Essas correntes são definidas por Ziegler (2012) da seguinte maneira:



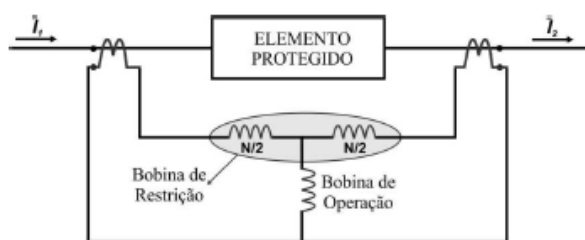
**Figura 2.5.** Lei das correntes de Kirchoff aplicada a um barramento (ESCUADERO, 2016).

$$i_{op} = \left| \sum_{p=1}^P i_p \right|, \quad (2.8)$$

$$i_{res} = \sum_{p=1}^P |i_p|, \quad (2.9)$$

onde  $P$  representa número de vãos conectados ao barramentos e o  $i_p$  é o valor instantâneo da corrente do  $p$ -ésimo vão.

A configuração mais simples para proteger algum elemento com o relé diferencial percentual de sobrecorrente é mostrada na Figura 2.6. Este relé possui uma bobina de operação que é conectado aos secundários dos TCs e uma bobina de restrição, que evita atuações indevidas. As análises da atuação da proteção são feitas a seguir.



**Figura 2.6.** Relé Diferencial Percentual de Sobrecorrente (VIANNA, 2012).

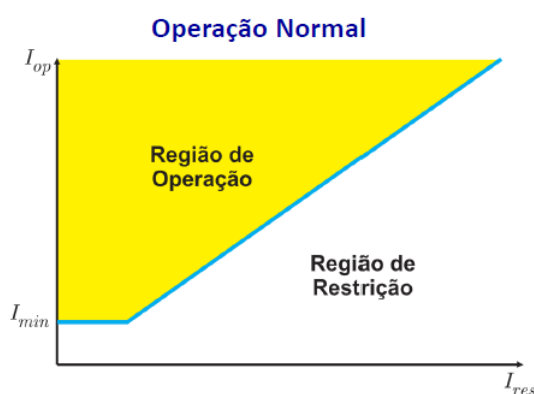
A proteção diferencial de baixa impedância deve atuar quando as seguintes condições forem atendidas:

$$i_{op} > i_{pickup} \quad e \quad i_{op} > SLP \cdot i_{res} \quad (2.10)$$

onde  $SLP$  (do inglês *slope*) é uma constante tipicamente menor que 1, que define a inclinação da curva característica de operação do relé. A análise de sensibilidade da constante  $SLP$  mostra

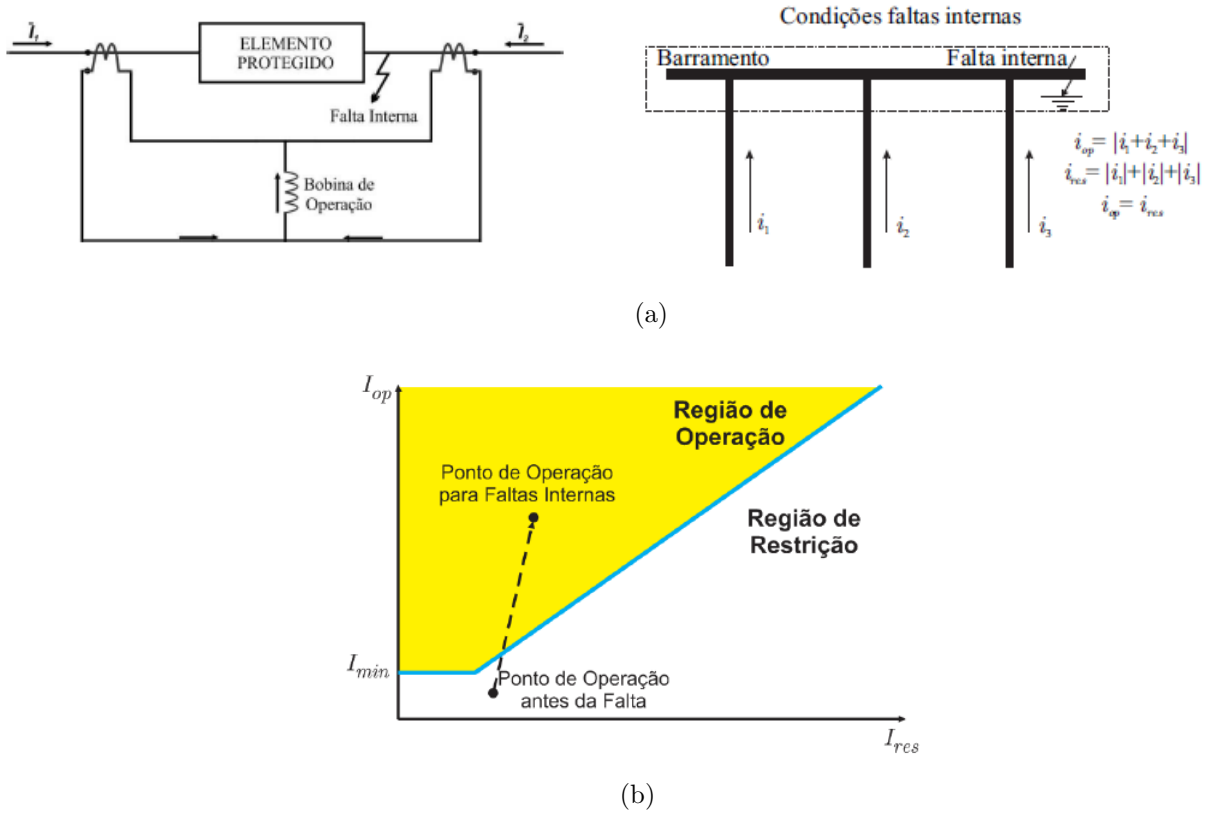
que para valores mais próximos de 0 as condições de operação descritas na equação (2.10) são satisfeitas mais rapidamente, enquanto que para valores mais próximos de 1, a região de restrição é maior.  $i_{pickup}$  é a corrente mínima de operação, que deve ser ajustada para evitar atuações indevidas durante a operação normal do sistema de potência, ocasionados pela corrente de carga, erros de medição dos TCs e transitórios de chaveamento.

Em condições normais de operação do sistema os valores de  $i_{op}$  são idealmente nulos, ou muito baixos, enquanto que  $i_{res}$  é aproximadamente igual ao valor de corrente que circula pelo barramento, portanto as condições apresentadas na equação (2.10) não são atendidas e a proteção não atua. Neste trabalho o plano operacional é utilizado para ilustrar o locus de operação nas condições normais de operação, falta interna e falta externa, para que seja apresentada de forma mais didática como o ponto de operação se comporta e o trajeto realizado nessas condições avaliadas. A Figura 2.7 apresenta a curva para condição normal de operação.



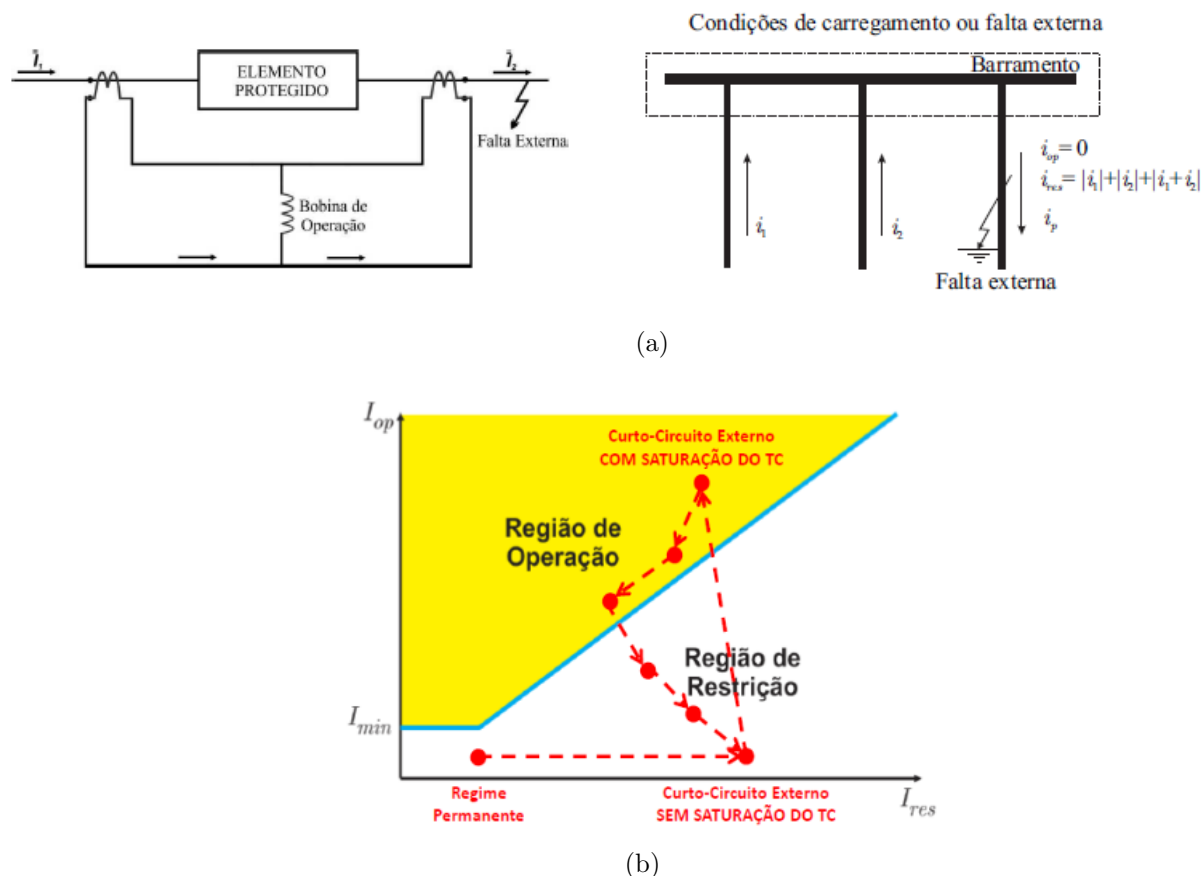
**Figura 2.7.** Operação Normal (SILVA, 2016).

Já para o caso de faltas internas à zona de proteção dos barramentos, tanto  $i_{op}$ , quanto  $i_{res}$  são maiores que zero e têm aproximadamente o mesmo valor. Dessa forma, as condições impostas na equação (2.10) são satisfeitas e uma falta interna é declarada. Assim um comando de *trip* é enviado para os disjuntores de todos os vãos conectados à barra, a fim de isolá-la do restante do sistema. A figura 2.8(a), que apresenta a dinâmica para o caso de falta interna, mostra que a soma das correntes nos secundários dos TCs passam pela bobina de operação do relé, fazendo-o atuar. Também é mostrado o sentido das correntes quando há uma falta interna à zona de proteção no barramento e o cálculo das correntes de operação e restrição. Na figura 2.8(b), é mostrado o trajeto percorrido no locus do plano operacional de proteção, onde faltas internas estão dentro da região de operação do relé.



**Figura 2.8.** (a) Avaliação falta interna (ESCUADERO, 2016) e (VIANNA, 2012) (b) Locus no plano operacional para falta interna (SILVA, 2016).

Para o caso de faltas externas sem saturação do TC, têm-se as mesmas condições da operação normal, os valores de  $i_{op}$  são idealmente nulos, ou muito baixos, enquanto que  $i_{res}$  é aproximadamente igual ao valor de corrente que circula pelo barramento, portanto as condições apresentadas na equação (2.10) não são atendidas e a proteção não atua. Porém, caso haja saturação do TC,  $i_{op}$  torna-se maior que zero e pode chegar a valores maiores que  $i_{res}$ . No intervalo de tempo que o núcleo magnético do TC estiver saturado, essa condição pode fazer com que a proteção atue indevidamente, quando era pra ser estável. Dessa forma é necessário implementar uma lógica que avalie a saturação do TC e bloqueie a proteção, para quando esse fenômeno ocorrer. A figura 2.9(a) apresenta a dinâmica para o caso de falta externa, constata-se que a corrente não passa pela bobina de operação. Também é mostrado o sentido das correntes quando há uma falta externa à zona de proteção no barramento e o cálculo das correntes de operação e restrição, na figura 2.9(b) é mostrado o trajeto percorrido no locus do plano operacional de proteção, onde faltas externas estão dentro da região de restrição, enquanto faltas externas com saturação do TC, podem adentrar a região de operação, no intervalo de tempo em que ocorre esse fenômeno, depois percebe-se que o trajeto volta para a região de restrição.



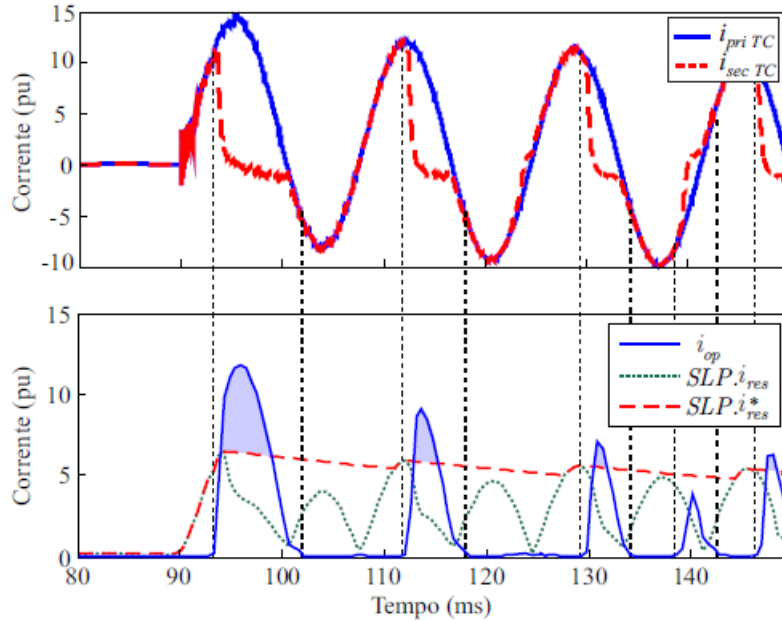
**Figura 2.9.** (a) Avaliação falta externa (ESCUDERO, 2016) e (VIANNA, 2012) (b) Locus no plano operacional para falta externa (SILVA, 2016).

### 2.5.1 Corrente de Restrição Suavizada

A corrente de restrição suavizada, agora identificada por  $i_{res}^*$ , foi a estratégia sugerida por Ziegler (2012), a fim de resolver o problema da atuação indevida da proteção na ocorrência de uma falta externa com saturação do TC.

Foi proposto suavizar a corrente de restrição, sustentando o valor de  $i_{res}$  por uma função exponencial que emula o comportamento de carga e descarga lenta de um capacitor em um conversor AC/DC. A figura 2.10 ilustra o problema da saturação do TC, mostrando que no intervalo de tempo que o núcleo fica saturado, a corrente de operação supera as condições impostas pela equação (2.10), também é retratado a comparação entre as curvas com  $i_{res}$ , com a estratégia proposta utilizando  $i_{res}^*$ .

Para explicar o comportamento descrito de  $i_{res}^*$ , Escudero (2016) propõe uma analogia com um circuito elétrico mostrado na Figura 2.11. O circuito é composto de uma fonte variável, um diodo, um capacitor e um resistor de carga. A linha tracejada corresponde à tensão da fonte e



**Figura 2.10.** Influência da saturação de TC com formas de ondas das energias (ESCUADERO, 2016).

a linha contínua representa a tensão no resistor de carga.

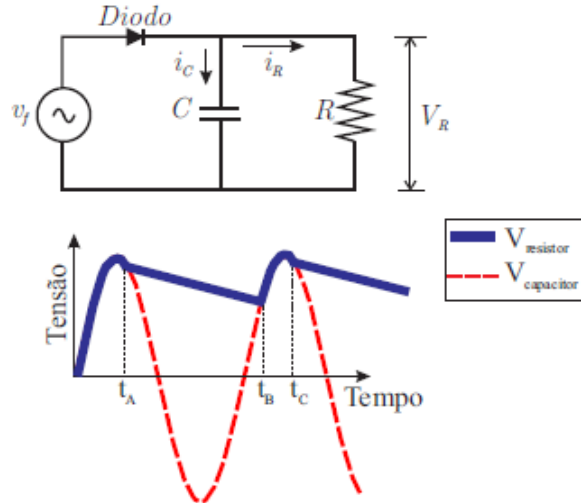
Utilizando a teoria de circuitos elétricos e eletrônicos para a análise do circuito é possível identificar que o diodo é polarizado diretamente do instante  $t = 0$  até o instante  $t = t_A$ , portanto está conduzindo corrente no primeiro ciclo da fonte e a tensão no resistor replica a tensão da fonte. De  $t = t_A$  até  $t = t_B$ , o diodo está polarizado inversamente e não conduz corrente, fazendo com que a potência requerida pelo resistor seja fornecida pelo capacitor, que estava carregando no primeiro ciclo da fonte, até a sua descarga. Em  $t = t_B$  o diodo passa a conduzir novamente até o tempo  $t = t_C$ , quando o capacitor fica novamente carregado. Daí em diante o ciclo repete-se dando origem a forma de onda ilustrada para o resistor de carga. A corrente  $i_{res}^*$  possui o mesmo comportamento descrito para a tensão no resistor do circuito analisado.

## 2.6 LÓGICAS DE TRIP 1-DE-1 E 2-DE-2

Dada a apresentação da corrente de restrição suavizada, a equação (2.10) passa a ser reescrita da seguinte maneira:

$$i_{op} > i_{pickup} \quad e \quad i_{op} > SLP \cdot i_{res}^* \quad (2.11)$$

Nos relés numéricos de proteção de barramento, a comparação entre as correntes de operação e restrição é feita, tipicamente, por meio das lógicas auxiliares 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012).



**Figura 2.11.** Circuito que emula o comportamento de  $i_{res}^*$  (ESCUDERO, 2016).

A grande ideia por trás dessas lógicas é a comparação de  $i_{op}$  e  $i_{res}^*$  dentro de janelas de tempo (JT), que são iniciadas partir do primeiro instante que  $i_{op}$  passa a ser maior que  $SLP \cdot i_{res}^*$ , dessa forma podem ser verificados os intervalos de tempo em que as condições de atuação são atendidas, propondo assim melhorias para dar mais confiabilidade na atuação da proteção.

A lógica 1-de-1, denominada modo de operação rápido, é ativada quando as condições impostas pela equação (2.11) são atendidas imediatamente após o início da falta e a taxa de variação  $di_{res}^*/dt$  é positiva e maior que um limiar  $k_s$ , o que deve ocorrer para faltas internas à zonas de proteção. Para esse cenário, tanto  $i_{res}^*$ , quanto  $i_{op}$  aumentam seus valores simultaneamente, porém a constante  $SLP$  que multiplica  $i_{res}^*$  é menor que 1 (um), assim os valores de  $i_{op}$  serão maiores e o contador de tempo será habilitado. Caso o contador de tempo ateste que  $i_{op}$  permanece maior que  $i_{res}^*$  em pelo menos 4 ms consecutivos após o início da falta, uma janela de tempo JT1 é contabilizada e o comando de *trip* pode ser enviado para os disjuntores associados à zona de proteção defeituosa em até 4 ms após a ocorrência da falta (VÁSQUEZ *et al.*, 2016).

A lógica 2-de-2 deve operar se as condições estabelecidas em (2.11) são satisfeitas por dois semi-ciclos consecutivos. Essa lógica garante principalmente a detecção de faltas evolutivas, que são faltas que começam fora da zona de proteção, mas podem evoluir para os elementos dentro da zona de proteção, e evita operações indevidas para faltas externas com saturação do TC. A explicação por trás dessa lógica baseia-se no fato de que após contabilizada a janela de tempo JT1, os valores de  $i_{op}$  passam a ser menores do que  $i_{res}^*$ , dessa forma as condições estabelecidas



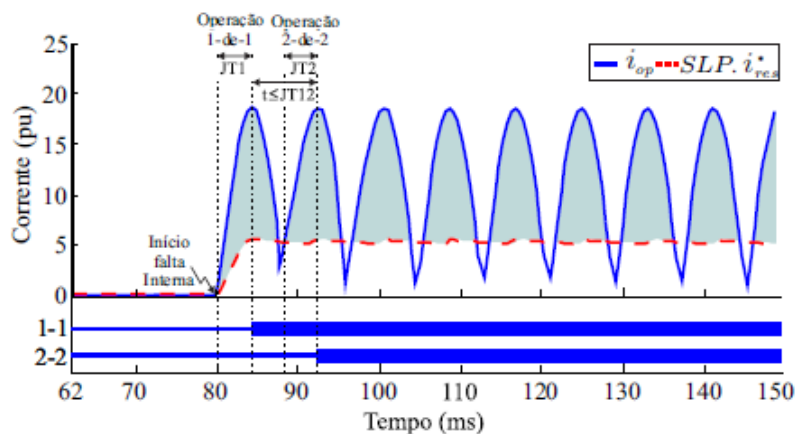


Em Escudero (2016) é apresentado uma análise bem ilustrativa e esclarecedora para as lógicas apresentadas. Esta análise é replicada na figura 2.13(a) , 2.13(b) e 2.13(c) . Na figura 2.13(a) , é mostrada a característica da corrente de operação para um curto interno, atendendo os critérios para ativação da lógica 1-de-1, percebe-se que após a contagem da janela de tempo JT1, a corrente de operação diminui a ponto de ser menor que a restrição, mas logo em seguida os seus valores aumentam novamente satisfazendo as condições da equação (2.11) , nesse instante é contabilizada uma janela de tempo JT2; em seguida é avaliado o intervalo de tempo entre JT1 e JT2, atendendo a condição para ativar a lógica 2-de-2. Na figura 2.13(b) , mostra-se que para uma falta externa a corrente de operação é realmente nula, enquanto que a corrente de restrição aumenta o seu valor, avalia-se a condição proposta no modo de falta externa e a *flag* FE é ativada. Já na 2.13(c), para o caso de falta externa com saturação do TC, mostra-se que a característica para identificar uma falta externa é primordial para prevenir uma atuação indevida, que poderia ocorrer em aproximadamente 86 ms, caso a lógica 1-de-1 não estivesse bloqueada.

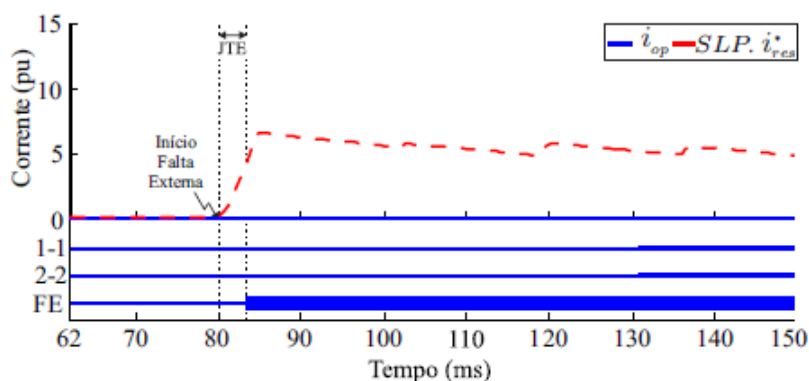
### 2.6.1 Comparação entre a lógica 2-de-2 e o ajuste de sensibilidade adaptativo para detecção de faltas externas

Uma outro algoritmo para detecção de faltas externas é proposto em Vianna (2012), esse algoritmo assemelha-se, em partes, a lógica 2-de-2, porém propõe a alteração da sensibilidade do relé por meio do parâmetro  $SLP$ , com o objetivo de restringir a região de operação e aumentar a região de restrição. O diagrama de blocos desse algoritmo é apresentado na figura 2.14 .

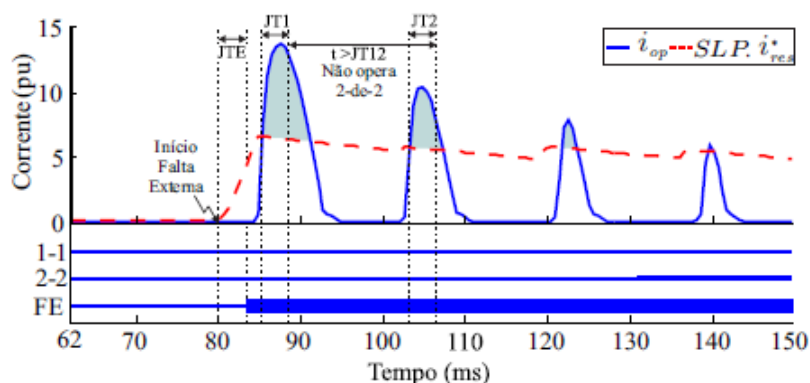
Nesse algoritmo são avaliadas as taxas de variação das correntes de restrição e operação em relação a um limiar estabelecido. Sabe-se que para uma falta externa a variação  $di_{res}/dt$  vai ser positiva e maior que um limiar  $k_{min}$ , enquanto  $di_{op}/dt$  será nulo, portanto inferior ao limiar  $k_{min}$  estabelecido. Se as condições dessas taxas de variações forem mantidas por duas amostras na taxa de 16 amostras por ciclos, aproximadamente 2.083 ms, uma falta externa é declarada. Esse modo de falta externa altera a sensibilidade do relé ( $SLP = K$ ), aumentando a região de restrição e diminuindo a região de operação do relé, durante o intervalo de 150 ms. Esse algoritmo estabelece um ajuste de inclinação adaptativo, como mostra a figura 2.15.



(a)



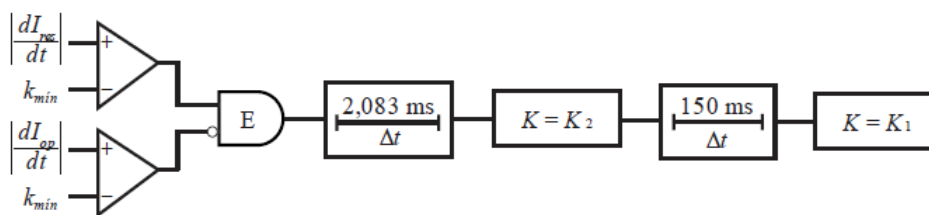
(b)



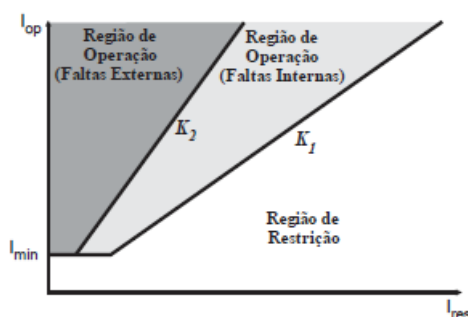
(c)

**Figura 2.13.** Avaliação das lógicas de *trip* para: (a) falta interna (b) falta externa sem saturação do TC (c) falta externa com saturação do TC (ESCUDERO, 2016)

Realizando a comparação entre a lógica 2-de-2 e o ajuste de inclinação adaptativo, é possível chegar a conclusão de que a lógica 2-de-2 é melhor e mais robusta, pois permite viabilizar a detecção de faltas internas e faltas evolutivas, durante o modo de operação de faltas externas. Enquanto, o ajuste de inclinação adaptativo demandaria uma lógica adicional para a detecção de faltas internas e evolutivas, durante o modo de falta externa. Essa demanda por uma lógica



**Figura 2.14.** Diagrama de blocos da lógica de detecção de falta externa (VIANNA, 2012).



**Figura 2.15.** Plano operacional com ajuste de inclinação adaptativo (VIANNA, 2012).

adicional existe pois com o aumento da inclinação perde-se em sensibilidade do relé, o que poderia ocasionar uma falha na proteção, no sentido desta deixar de atuar por não conseguir identificar faltas internas e evolutivas.

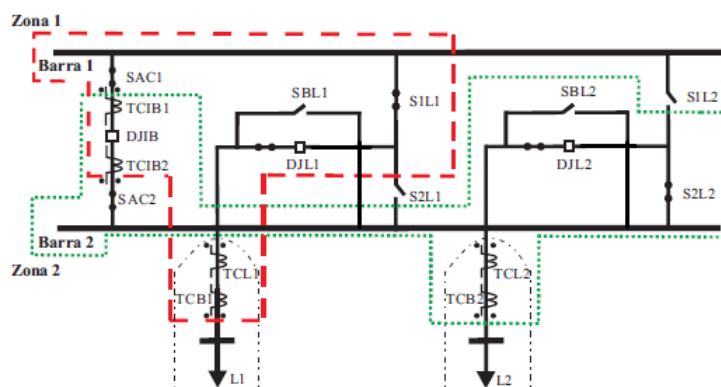
## 2.7 DEFINIÇÃO DE ZONAS DE PROTEÇÃO

As zonas de proteção são responsáveis por delimitar a atuação da proteção e pela detecção das faltas, uma vez que controlam quais correntes devem ser levadas em conta pelos algoritmos de avaliação de distúrbios. Neste contexto são definidos dois tipos de zonas de proteção, a saber, zonas de proteções físicas e zonas de proteções lógicas. A zona de proteção física é delimitada pela localização física e pela polaridade dos TCs de cada elemento conectado ao barramento. Já as zonas lógicas são definidas não só pela localização física e polaridade dos TCs, mas também pelos estados lógicos de chaves seccionadoras e disjuntores utilizados no arranjo do barramento. As zonas lógicas são as responsáveis pela definição de quais correntes serão consideradas para os cálculos das correntes de operação e restrição, utilizadas na proteção diferencial de baixa impedância, isso é feito por meio das *flags* de habilitação, mostradas mais a frente. As zonas físicas e lógicas, geralmente, são coincidentes, mas as vezes é necessário a utilização de estratégias que permitam a expansão ou retração das zonas lógicas, como no

caso da incorporação ou retirada de vãos ligados ao barramento. Isso permite um refinamento no desempenho do sistema de proteção como um todo, principalmente nos barramentos com topologia variável (IEEE, 2009).

Com o intuito de construir as zonas de proteção em um barramento com topologia variável, parte-se para análise de caso do objeto de estudo desse trabalho, a configuração de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves, ilustrado de maneira simplificada na Figura 2.16. Cada barra desta configuração, Barra 1 e Barra 2, possui uma zona de proteção, Zona 1 ( $Z_1$ ) e Zona 2 ( $Z_2$ ), nas quais serão conectados os vãos. A Zona 1 é delimitada pelo TCIB2 e pelo TCB1. Já a Zona 2 é delimitada pelo TCIB1 e pelo TCB2.

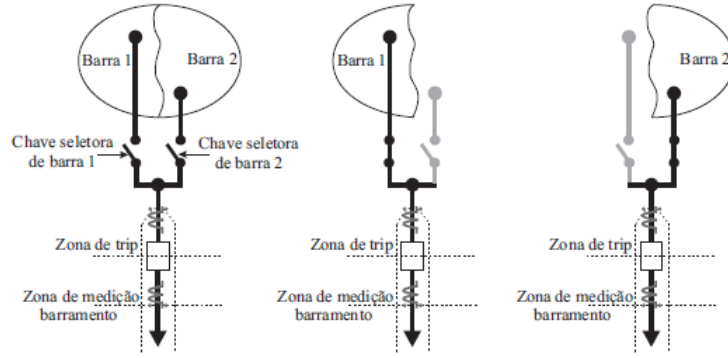
Como dito anteriormente, esse arranjo pode operar com as duas barras energizadas, com os vãos distribuídos entre elas, ou com apenas uma das barras energizadas. Para fins didáticos, escolhe-se o modo de operação mais usual, em que as duas barras estão energizadas e são unidas por um disjuntor de interligação de barras (DJIB), ou também comumente chamado de disjuntor de amarre (DJAMR).



**Figura 2.16.** Zonas de proteção de barramento duplo.

A conexão de cada vão às barras é feita por meio das chaves seccionadoras seletoras de barras. Dessa forma, um vão pode ser alimentado por qualquer uma das duas barras, bastando para isso manobrar a chave seccionadora desejada, como mostrado na Figura 2.17 .

Cada vão pertence a uma zona de proteção que está diretamente relacionada com o estado lógico das chaves seccionadoras e disjuntores. A combinação desses estados define o estado lógico dos chamados *flags* de habilitação de corrente. Considerando esse *flags*, tem-se uma nova



**Figura 2.17.** Conexão do vão à determinada barra por meio da chave seletora de barra (ESCUADERO, 2016)

definição para as correntes de operação e restrição, mostrada a seguir:

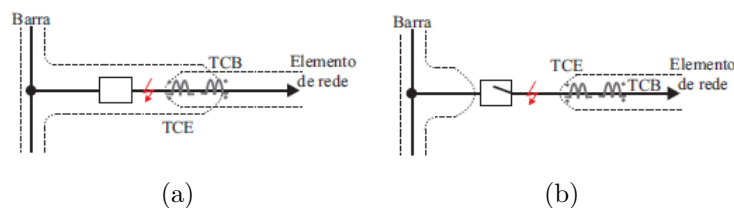
$$i_{op}^Z = \left| \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot i_p \right|, \quad (2.12)$$

$$i_{res}^Z = \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot |i_p|, \quad (2.13)$$

onde  $P$  representa o número de vãos conectados no barramento,  $i_{op}^Z$  e  $i_{res}^Z$  representam as correntes de operação e restrição na zona  $Z$ , respectivamente, e  $f_p^Z$  o *flag* de habilitação da corrente no  $p$ -ésimo vão da zona  $Z$ .

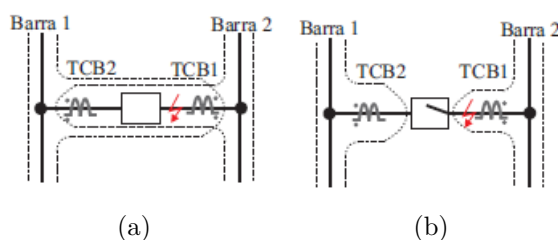
A respeito da posição dos TCs para a proteção de barramentos, normalmente eles são instalados entre o elemento de conexão do vão ao barramento (podendo ser um disjuntor ou uma chave seccionadora) e o próprio componente do sistema (linha de transmissão, transformador, gerador). Porém, essas posições dos TCs geram pontos cegos ou zonas mortas para a proteção do vão, no caso da ocorrência de falta entre o TC e o DJ. Caso uma falta ocorresse nesse ponto, essa falta só seria detectada pela proteção do barramento, que enviaria um comando de abertura para todos os disjuntores a ele conectados. Apesar da abertura do disjuntor, a falta não seria extinta, seria necessário o uso da proteção de zona morta, que no caso seria possível pelo envio de uma mensagem de disparo direto (TDD) à proteção remota do elemento (IEEE, 2009). A figura 2.18(a) ilustra essa situação, bem como a formação das zonas físicas e lógicas.

Na região de interligação de barras, o melhor esquema de proteção é alcançado com a instalação dos TCs de tal forma que se forme uma sobreposição das zonas de proteção, conforme ilustrado na 2.19(a). Apesar do ponto de vista da confiabilidade do sistema de proteção essa opção ser melhor, do ponto de vista da seletividade não é uma boa solução, porque os comandos



**Figura 2.18.** Ilustração das zonas de proteção: (a) zonas física e lógica coincidentes; (b) zonas física e lógica diferentes, com a zona lógica contraída. (ESCUADERO, 2016)

de abertura de disjuntores serão enviados para todos os disjuntores conectados em ambas as barras. Uma outra solução seria identificar que a falta ocorreu na zona de interseção das zonas e enviar um comando de abertura apenas para o DJIB. Dessa forma, após a abertura do DJIB, apenas uma das zonas passaria a enxergar o defeito, isso culminaria apenas na abertura dos disjuntores dos vãos conectados a essa barra, mantendo os vãos ligados a outra barra intactos. A análise de *trade-off* dessa última solução apresentada, passa pela avaliação do ponto negativo intrínseco a essa proposta, que é o aumento do tempo de extinção de curtos-circuitos nos barramentos.



**Figura 2.19.** Esquemas de proteção no DJIB: (a) com sobreposição de zonas; (b) sem sobreposição de zonas e com a abertura inicial do DJIB (ESCUADERO, 2016).

## 2.8 LÓGICA DE SELEÇÃO DAS ZONAS DE PROTEÇÃO

Nesta seção será apresentada a construção das zonas lógicas de proteção, seguindo o modelo proposto em IEEE (2009), para isso é considerada a versão simplificada do arranjo de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves, ilustrado na Figura 2.16. Como dito anteriormente, essa configuração requer duas zonas de proteção, uma para cada barra. Observando a Figura 2.16, constata-se que o barramento possui dois vãos de linhas de transmissão, cada um deles conectado a uma das barras, por meio das chaves seletoras de barra, dessa forma cada vão pertence a uma das zonas de proteção. A proteção da região de interligação das duas barras é

feita por meio da estratégia de sobreposição de zonas, em torno do DJIB.

Os limites físicos da zona de proteção  $Z_1$  são delimitados pelo TCB1, correspondente ao TC do vão 1, e o TCIB2. Já para zona de proteção  $Z_2$ , a delimitação é feita pelo TCB2 e TCIB1.

A Tabela 2.1 mostra a qual zona cada elemento pertence, a partir da designação das *flags* de habilitação. Por exemplo, se a chave seccionadora seletora de barra 1 possuir valor lógico um, para um dos elementos, este elemento será incluído na  $Z_1$  e a corrente medida pelo TC será incluída no cálculo diferencial da  $Z_1$ . Resumindo, as correntes medidas pelos TCs dos elementos podem ser incluídos no cálculo diferencial de determinada zona de proteção, a depender do estado lógico dos *flags* de habilitação, que por sua vez, dependem do estado das chaves seletoras de barras.

**Tabela 2.1.** Identificação de um vão e de sua respectiva zona de proteção.

Elemento	TC correspondente	$f_p^1$	$f_p^2$
L1	TCB1	S1L1	S2L1
L2	TCB2	S1L2	S2L2
DJIB	TCIB1	0	1
	TCIB2	1	0

Avalia-se agora o que acontece caso ocorra uma falta em algum dos barramentos. Na ocorrência de uma falta, um comando de abertura é enviado para os disjuntores dos vãos conectados à barra defeituosa, mantendo-se a barra sã energizada e com todos os seus vãos conectados. Porém, como apresentado na Tabela 2.1, um mesmo vão pode ser conectado a qualquer uma das barras, ou seja, pode pertencer a qualquer uma das zonas de proteção, portanto a lógica de trip dos disjuntores deve levar em consideração não só as atuações das zonas de proteção diferencial  $Z_1$  e  $Z_2$ , mas também o estado lógico das chaves seccionadoras seletoras de barra, conforme apresentado na Tabela 2.2 (ESCUADERO, 2016). As variáveis lógicas  $Z_1$  e  $Z_2$  na, Tabela 2.2, são variáveis que possuem estado lógico 1 (um) quando uma falta dentro da respectiva zona de proteção é detectada e estado lógico 0 (zero), caso contrário.

Exemplificando de forma didática o que foi apresentado, analisa-se o processo de atuação da proteção para a ocorrência de uma falta na Barra 1 (falta interna) da Figura 2.16. Quando as condições apresentadas na equação (2.11) são atendidas, a variável  $Z_1$  é ativada. Para isolar o defeito, o DJIB e o DJL1 devem ser abertos. Analisando a Tabela 2.2 é exatamente o que

**Tabela 2.2.** Lógica de trip dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão Lógica
DJL1	$(Z_1 \text{ AND } S1L1) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L1)$
DJL2	$(Z_1 \text{ AND } S1L2) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L2)$
DJIB	$Z_1 \text{ OR } Z_2$

ocorre. O *trip* do DJIB tem valor lógico 1 (um) devido à varável  $Z_1$  e o *trip* do DJL1 tem valor lógico 1 (um) devido à expressão  $(Z_1 \text{ AND } S1L1)$ .

### 2.8.1 Transferência da Proteção

A transferência da proteção diz respeito a mudanças no sistema, provenientes de manobras de vãos entre as barras. Devido essa maleabilidade do sistema é preciso incluir nas lógicas de *trip* dos disjuntores variáveis que indiquem se os vãos foram manobrados entre as barras, com o intuito de garantir que a proteção possa atuar corretamente.

Um caso particular que pode ser avaliado é a manutenção do disjuntor de algum vão. Para que possa haver a manutenção desse disjuntor, este deve ser isolado do resto do sistema por meio da abertura das chaves seccionadoras seletoras de barra e saída de vão. Mas, antes disso, fecha-se a seccionadora de *by-pass* (que está diretamente ligada na barra 2), para que a alimentação do elemento do vão não seja interrompida. Para realizar essa operação, deve-se deixar apenas o vão cujo disjuntor está em manutenção conectado a barra 2, que é a barra de transferência, e remanejar todos os outros vãos para a barra 1, que opera como barra principal. Por fim, é necessário transferir o comando de *trip* do disjuntor em manutenção para o DJIB, assim caso haja uma falta na barra de transferência, esta será extinta mediante a abertura do DJIB.

Para contemplar a transferência da proteção na lógica de *trip* dos disjuntores é criada a variável lógica auxiliar PB, que indica se há paralelismo entre as barras 1 e 2, ou seja, se algum dos componentes está sendo remanejado e momentaneamente possui as duas chaves seletoras de barras fechadas. O estado lógico de PB é definido pela seguinte expressão lógica:

$$PB = [(S1L1 \text{ AND } S2L1) \text{ OR } (S1L2 \text{ AND } S2L2)] \text{ AND } DJIB \quad (2.14)$$

Quando um vão está sendo manobrado e é identificada a condição de paralelismo de barra,



as zonas  $Z_1$  e  $Z_2$  são alteradas, pois não há medição de corrente no ramo formado pela série das chaves seccionadoras seletoras de barras. Dependendo da distribuição do fluxo de potência no barramento, pode-se provocar uma atuação indevida das zonas de proteção. Outro problema que deve ser constatado durante as manobras de transferência de vãos é o caso do atraso na mudança de estados ou falha dos contatos lógicos das chaves seletoras de barras. Isso pode acarretar em erros nos estados lógicos das *flags* de habilitação, podendo provocar atuações indevidas da proteção. Para contornar esses problemas, é proposto uma supervisão do *trip* das zonas  $Z_1$  e  $Z_2$ , por meio da zona diferencial de checagem, do inglês *check-zone*, que engloba as duas barras simultaneamente, formando a zona  $Z_{12}$ .

A *check-zone* não envia comando de abertura para disjuntores, ela apenas supervisiona a atuação das zonas  $Z_1$  e  $Z_2$ , não leva em conta os estados das chaves seccionadoras seletoras de barras e não inclui os TCs do vão de interligação de barras na sua malha diferencial, gerando assim, uma grande zona que inclui todos os vãos, como se todos estivessem conectados a uma mesma barra.

Assim, todas essas novas considerações devem ser incorporadas na hora de determinar a qual zona lógica cada vão pertence. Portanto, avalia-se mais uma variável, PB, e mais uma zona de checagem deve ser incorporada. As tabelas abaixo mostram as modificações nas expressões lógicas dos *flags* de habilitação e das lógicas de *trip* dos disjuntores para considerar o fenômeno da transferência da proteção.

### 2.8.2 Efeito do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero em Linhas de Transmissão

Uma atenção especial deve ser dada para linhas de transmissão que possuem acoplamento mútuo de sequência zero, decorrente do fato de constituírem linhas de circuitos duplos ou por compartilharem a mesma faixa de servidão durante toda ou parte de sua extensão. A problemática surge quando uma das linhas está fora de operação e com seus terminais aterrados via chaves seccionadoras de aterramento. Mesmo com a linha fora de operação, devido à localização dos TCs, eles permanecerão dentro do laço de sequência zero do sistema. Assim, quando ocorrer um curto-circuito que envolva a terra na linha que permanece em operação, devido ao acoplamento de sequência zero entre as linhas, uma corrente circulará pelos TCs da linha que

**Tabela 2.3.** Estados lógicos dos *flags* de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras.

Vão	TC	Flag	Expressão Lógica
L1	TCB1	$f_1^1$	S1L1 <b>OR</b> [PB <b>AND</b> (DJL1 <b>OR</b> SCBL1)]
		$f_1^2$	S2L1 <b>OR</b> [PB <b>AND</b> (DJL1 <b>OR</b> SCBL1)]
		$f_1^{12}$	DJL1 <b>OR</b> (SCBL1 <b>AND</b> DJAC)
L2	TCB2	$f_2^1$	S1L2 <b>OR</b> [PB <b>AND</b> (DJL2 <b>OR</b> SCBL2)]
		$f_2^2$	S2L2 <b>OR</b> [PB <b>AND</b> (DJL2 <b>OR</b> SCBL2)]
		$f_2^{12}$	DJL2 <b>OR</b> (SCBL2 <b>AND</b> DJAC)
DJIB	TCIB1	$f_{IB}^1$	0
		$f_{IB}^2$	$\overline{PB}$ <b>AND</b> DJIB
		$f_{IB}^{12}$	0
	TCIB2	$f_{IB}^1$	$\overline{PB}$ <b>AND</b> DJIB
		$f_{IB}^2$	0
		$f_{IB}^{12}$	0

**Tabela 2.4.** Lógica de trip dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão Lógica
DJL1	$[(Z_1 \text{ AND S1L1) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND S2L1)] \text{ AND } Z_{12}$
DJL2	$[(Z_1 \text{ AND S1L2) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND S2L2)] \text{ AND } Z_{12}$
DJIB	$(Z_1 \text{ OR } Z_2) \text{ AND } Z_{12}$

está desenergizada, podendo levar a uma operação indevida da proteção do barramento, já que, a priori, esse vão não foi retirado da malha diferencial uma vez que a seccionadora seletora de barra continuaria fechada. Para contornar essa situação, as lógicas de atribuição dos estados dos *flags* de habilitação de corrente devem contemplar o estado dos disjuntores de interligação de cada vão ao barramento (ou seccionadoras, a depender da topologia empregada) (ESCU-DERO, 2016). Dessa forma, as expressões lógicas apresentadas na Tabela 2.3 são modificadas para aquelas apresentadas na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5.** Estados lógicos dos *flags* de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras e o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero.

Vão	TC	Flag	Expressão Lógica
L1	TCB1	$f_1^1$	$[(S1L1 \text{ OR } SBL1) \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SCBL1)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SCBL1)]$
		$f_1^2$	$[(S2L1 \text{ OR } SBL1) \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SCBL1)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SCBL1)]$
		$f_1^{12}$	$DJL1 \text{ OR } (SCBL1 \text{ AND } DJAC)$
L2	TCB2	$f_2^1$	$[(S1L2 \text{ OR } SBL2) \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SCBL2)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SCBL2)]$
		$f_2^2$	$[(S2L2 \text{ OR } SBL2) \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SCBL2)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SCBL2)]$
		$f_2^{12}$	$DJL2 \text{ OR } (SCBL2 \text{ AND } DJAC)$
DJIB	TCIB1	$f_{IB}^1$	0
		$f_{IB}^2$	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		$f_{IB}^{12}$	0
	TCIB2	$f_{IB}^1$	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		$f_{IB}^2$	0
		$f_{IB}^{12}$	0

## ALGORITMO AVALIADO

Neste capítulo é apresentado o algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância para barramentos proposto neste trabalho, o qual é baseado na fundamentação teórica descrita no capítulo anterior. A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo implementado. O resultado da implementação garante que o método proposto é capaz de promover *trips* rápidos e confiáveis para curtos-circuitos internos e segurança para curtos-circuitos externos.

Tendo em vista as considerações feitas acima, com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo de proteção diferencial de barras proposto, foi desenvolvida uma rotina para analisar os dados proveniente da simulação de um SEP sintetizado em ATP. Neste capítulo são comentadas as implementações computacionais realizadas e são abordadas as características do sistema avaliado.

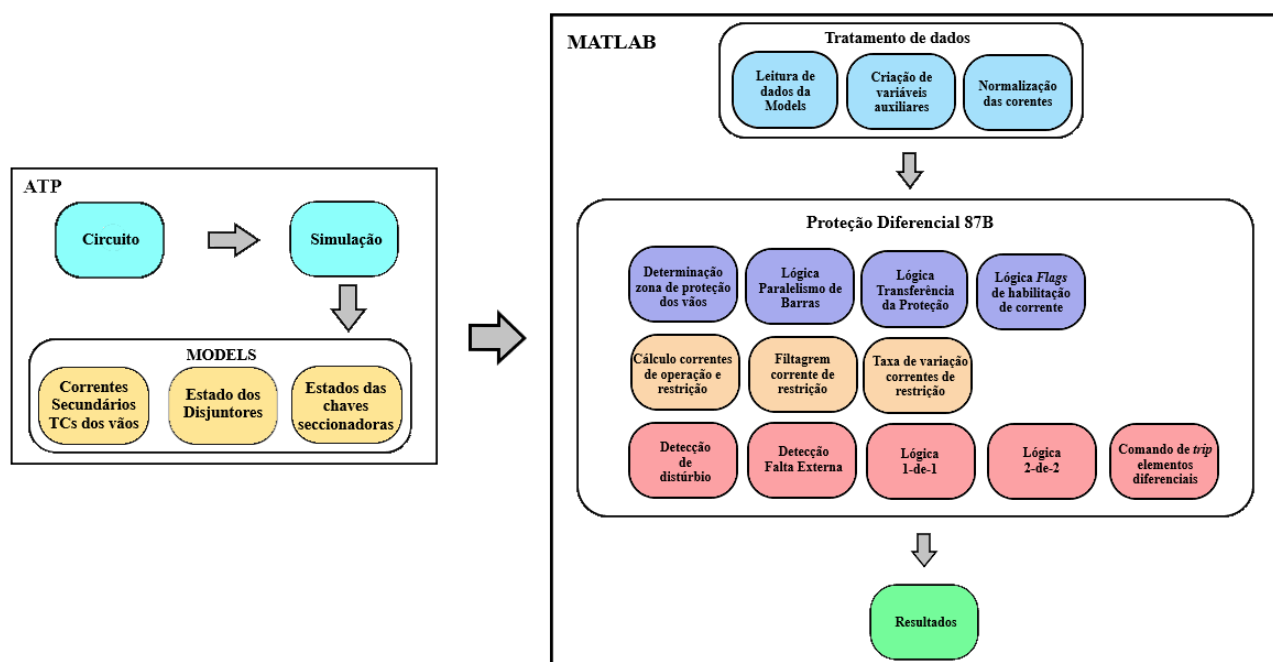


Figura 3.1. Diagrama de blocos do algoritmo implementado.

### 3.1 ATP E MODELS

No estudo da proteção de sistemas elétricos, os transitórios eletromagnéticos desempenham papel fundamental para modelagem da proteção. Estes consistem em fenômenos que provocam variações súbitas de tensão ou corrente em sistemas que inicialmente estavam em estado de regime permanente, suas causas são as mais variadas, podendo-se destacar os fenômenos de descargas atmosféricas, curto-circuitos, variações repentinas na topologia do sistema, por manobras de chaveamento de circuitos ou variação de carga. Assim, faz-se necessários o estudo das causas desses transitórios, para que os sistemas de proteção possam ser projetados a fim de mitigar os efeitos desse fenômeno nos sistemas elétricos de potência (VIANNA, 2013).

Para tanto são utilizados os programas do tipo EMTP (*Eletromagnetic Transient Programs*) como ferramentas fundamentais de análise desses fenômenos.

O ATP é um dos *softwares* do tipo EMTP, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Além disso, durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes (FILHO; PEREIRA, 1996).

Estão disponíveis neste programa diversos modelos prontos para serem usados na montagem e simulação de sistemas elétricos de potência. Dentre eles, estão presentes os (FILHO; PEREIRA, 1996).:

- Elementos RL acoplados;
- Modelos PI-Equivalentes Polifásicos;
- Transformadores;
- Linhas de transmissão;
- Elementos não-lineares;
- Chaves;
- Fontes;
- Pára-raios;

- Componentes estáticos e válvulas conversoras.

A MODELS é uma linguagem de programação estruturada anexa ao ATP, voltada para a simulação no domínio do tempo e pode ser usada para fazer a descrição dinâmica do comportamento de complexos sistemas físicos. Além disso, é uma versão moderna da TACS (Transient Analysis of Control Systems). A utilização de elementos da TACS e da MODELS permite uma grande quantidade de alternativas para a medição de grandezas não fornecidas diretamente pelo programa ou mesmo para o pós-processamento das grandezas calculadas pelo ATP (DUBE, 1996).

Os blocos descritivos da MODELS possuem quatro características principais (FURST, 1994):

- Quais elementos estão presentes no modelo;
- Como estes elementos interagem entre si;
- Como estes elementos interagem com o ambiente externo em que estão inseridos;
- Como o modelo deve ser simulado.

Além disso, podem ser citadas as seguintes características da linguagem MODELS:

- Linguagem de programação de alto nível e fácil compreensão, similar a Pascal e Fortran;
- Permite o controle de algumas variáveis da simulação no ATP;
- Armazenamento de sinais de corrente e tensão calculados pelo ATP;
- Serve de interface entre o ATP e sub-rotinas feitas em linguagens como C e Fortran;
- Permite visualização dinâmica da interação entre o sistema e os modelos criados;
- A descrição de cada modelo na MODELS possui uma sintaxe que possibilita o interfaceamento com o programa ATP, esta conexão é realizada por meio dos comando de entrada e saída.

Dada a grande versatilidade do ATP e da linguagem MODELS, estes foram utilizados para modelar o sistema elétrico, objeto de estudo desse trabalho, barramento na configuração de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves, mostrado na Figura 4.1. Foram simuladas diversas condições de faltas para obter todos os dados necessários que são manipulados na rotina de proteção implementada. Nas seções a seguir serão descritos todos os procedimentos computacionais realizados para obtenção dos resultados deste trabalho.

## 3.2 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO NO AMBIENTE ATP

### 3.2.1 Transformadores de Corrente (TCs) para proteção de barras

Neste trabalho, foram utilizados TCs do tipo C800 com relação de transformação 1200-5 A. Sua modelagem foi feita diretamente no ATP (autor: Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UnB)), segundo modelo proposto em (IEEE, 2009). O circuito equivalente do TC é mostrado na Figura 3.2. O ramo de magnetização foi representado utilizando o elemento 98 do ATP, que modela uma indutância pseudo não-linear, que não considera a representação da característica de histerese do núcleo. A resistência  $r_2$  do enrolamento secundário é de  $0.75 \Omega$  e a impedância de carga do TC é  $2.0 \Omega$ , correspondendo à soma da resistência dos cabos mais a de entrada do relé numérico.

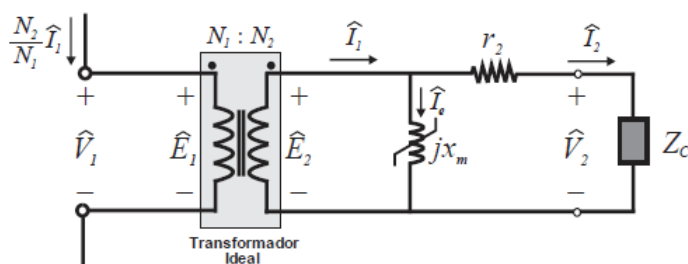


Figura 3.2. Circuito Equivalente do TC (VIANNA, 2013).

### 3.2.2 Chaves Seccionadoras (SCs)

As chaves seccionadoras fazem parte dos equipamentos de manobra em uma SE, são definidas, segundo a ABNT NBR 6935/85 (substituída posteriormente pela ABNT NBR IEC 62271 - 102:2006), como um dispositivo mecânico de manobra capaz de abrir e fechar um circuito elétrico quando uma corrente de intensidade desprezível é interrompida ou restabelecida. Também é capaz de conduzir correntes sob condições normais do circuito e, durante um tempo especificado, correntes sob condições anormais, como curto-circuito. Suas principais funções consistem em isolar circuitos e equipamentos, manobrar circuitos entre os diferentes barramentos de uma SE, realizar o *by-pass* em um elemento do sistema de potência, com o intuito de realizar manutenção, desempenhar funções de chave geral, liga/desliga, de controle, de seletividade de sistemas.

Para fins de simulação, as chaves seccionadoras foram modeladas como um componente *switch* trifásico em série com uma resistência de entrada e uma resistência de saída com valores de  $1\text{ m}\Omega$ , para prevenir danos à chave. A Figura 3.3 mostra o esquema de simulação da chave seccionadora.

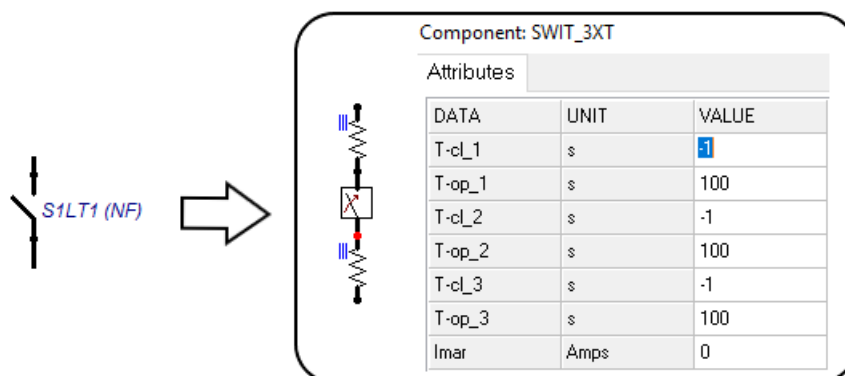


Figura 3.3. Chave Seccionadora.

### 3.2.3 Bloco de faltas

No ATP, a simulação dos curtos simétricos ou assimétricos está condicionada ao fechamento de chaves, controladas por tempo pré-determinados na rotina. Impedâncias são dispostas entre as chaves relativas às fases e neutro. Para cada tipo de curto, existe uma combinação de fechamento de chaves e de valores de resistência. Na Figura 3.4 é demonstrada constituição do bloco de falta que foi empregado nas simulações descritas neste trabalho. Para cada caso de curto-circuito, há um esquema de abertura e fechamento destas chaves. (ALVARENGA, 2013).

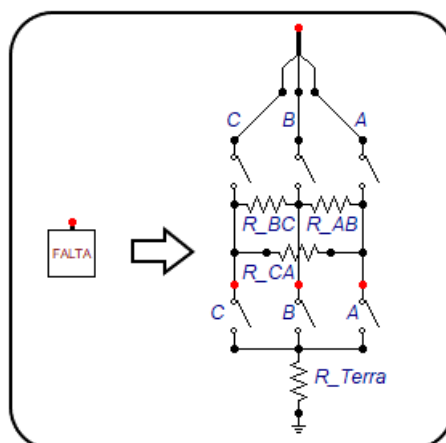
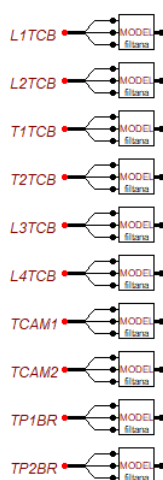


Figura 3.4. Bloco de Faltas.



### 3.2.4 Módulo de Condicionamento de Sinais

O módulo de condicionamento de sinais é implementado em linguagens MODELS. Este módulo consiste em um filtro analógico que tem a função de eliminar as componentes de alta frequência contidas nos sinais provenientes dos TCs de cada vão, mostrado na Figura 3.5. Tais componentes surgem devido aos transitórios decorrentes de faltas ou de operações normais do sistema, como religamentos e manobras. Elas podem ser responsáveis por picos de tensão e pelo dobramento espectral (*aliasing*) (SILVA, 2009). Por isso, foi implementado um filtro passa-baixas do tipo Butterworth de terceira ordem, cuja função de transferência é dada por:



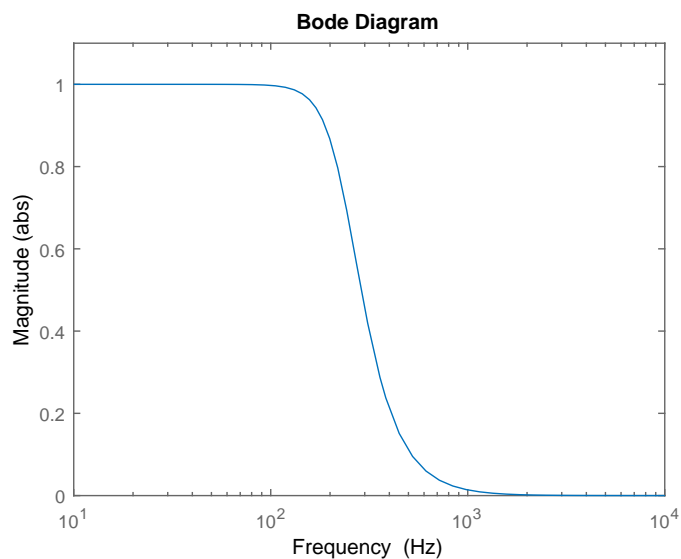
**Figura 3.5.** Módulo de Condicionamento de Sinais.

$$H(s) = \frac{3.429 \cdot 10^9}{s^3 + 3016 \cdot s^2 + 4.548 \cdot 10^6 \cdot s + 3.429 \cdot 10^9} \quad (3.1)$$

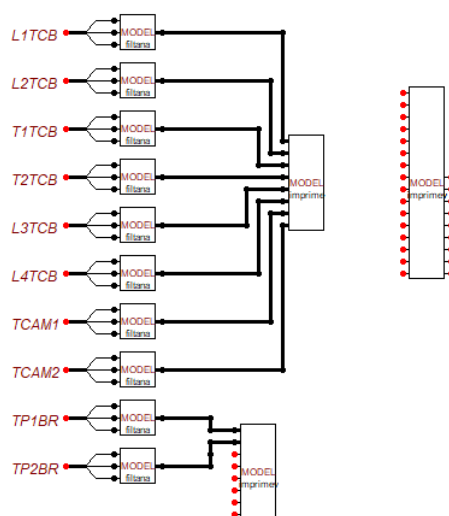
A Figura 3.6 mostra a resposta em frequência do filtro, percebe-se que as componentes de frequência superior a 190  $Hz$  são atenuadas. Percebe-se que além da eliminação das componentes de alta frequência, a aplicação do filtro gera um atraso no sinal de saída em relação ao de entrada, o que é evidenciado no tempo de incidência da falta obtido. Entretanto, este comportamento é típico deste filtro e não afeta significativamente os resultados posteriores.

### 3.2.5 Módulo de Impressão de Sinais

Após a simulação de diversas condições de faltas no sistema de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves, os dados das correntes dos TCs passam pelo módulo de condiciona-



**Figura 3.6.** Resposta em frequência do filtro.



**Figura 3.7.** Etapa de impressão de dados.

mento de sinais. A etapa final no ambiente ATP, consiste em imprimir os dados das correntes filtradas e os estados lógicos de todas as chaves seccionadoras e disjuntores por meio da linguagem MODELS. Para isso são definidos todas as entradas que desejam ser impressas em uma MODELS e depois usa-se o comando *write* para efetuar a impressão dos dados em arquivo de texto, que serão analisados. A Figura 3.7 mostra o esquema para impressão de dados na MODELS.

### 3.3 DESCRIÇÃO DA ROTINA IMPLEMENTADA

Os dados obtidos das diversas simulações de faltas no sistema elétrico avaliado no ATP, agora são analisados dentro da rotina de proteção implementada. Essa rotina foi desenvolvida com base na teoria apresentada no capítulo anterior e implementa os princípios da proteção diferencial de baixa impedância.

Pode-se dividir em três grandes etapas a rotina implementada. A primeira consiste no tratamento dos dados enviados pelo ATP, nesta etapa os valores das correntes, o estado lógico de chaves e disjuntores são carregados dentro do arquivo de programação, também são criadas e inicializadas todas as variáveis que serão utilizadas no código e por último é efetuada a normalização das amostras de correntes. A segunda etapa consiste na implementação do laço da função de proteção 87B, são implementadas as lógicas de paralelismo de barra, transferência da proteção, dos *flags* de habilitação de corrente, de detecção de faltas internas e externas, dos *trips* dos disjuntores e são calculadas as correntes de operação e restrição para cada zona. Por fim, os resultados obtidos da segunda etapa são gerados e apresentados na tela de comando. Esta seção descreverá as etapas da rotina implementada.

#### 3.3.1 Normalização das amostras das correntes

Por vezes, os TCs empregados na proteção diferencial de baixa impedância de barramentos têm relações de transformações diferentes (GUZMÁN *et al.*, 2004; GUZMÁN *et al.*, 2005), seja por questões econômicas ou de projeto que podem ser usados diferentes tipos de transformadores. Portanto, é necessário realizar a normalização das correntes, colocando-as na mesma base de referência, para que os cálculos de operação e restrição da proteção sejam corretos. Para realizar essa normalização, emprega-se o fator  $TAP$ , que pode ser calculado par o p-ésimo vão da seguinte maneira:

$$TAP_p = \frac{i_{2TCmax} \cdot RTC_{TCmax}}{RTC_p} \quad (3.2)$$

onde  $i_{2TCmax}$  e  $RTC_{TCmax}$  são a corrente secundária nominal e a relação de transformação do TC com maior relação dentre aqueles conectados ao barramento, respectivamente. E  $RTC_p$  é

a relação de transformação do TC do p-ésimo vão.

Na simulação foram utilizados TCs iguais tal que,  $i_{2TC_{max}} = 5 A$ ,  $RTC_{TC_{max}} = 240$  e  $RTC_p = 240$ . Em seguida, procede-se com a normalização da seguinte forma:

$$i_p = \frac{i_p}{TAP_p} \quad (3.3)$$

onde  $i_p$  é a corrente de uma determinada fase e de um determinado vão.

### 3.3.2 Determinação da zona de proteção de cada vão, lógica de paralelismo de barra e da lógica de transferência de proteção

Esta etapa consiste em determinar a que zona de proteção cada vão pertence, em condições normais de operação. Para avaliar a qual zona de proteção cada vão pertence, é checado o estado lógico das chaves SCs seletoras de barra, as chaves SCs de *by-pass* e o estado dos disjuntores, segregados por fase, associados a cada um dos P vãos conectados no barramento. Portanto foi implementada uma lógica condicional de checagem das chaves, com a utilização dos operadores booleanos **AND** e **OR**, onde o estado lógico 0 representa uma afirmação falsa e o estado lógico 1 representa uma afirmação verdadeira.

Para avaliar se determinado vão pertence a  $Z_1$  é feita a seguinte afirmação condicional:

"**SE** a chave SC seletora de barra 1 possuir estado lógico 1 **AND** a chave SC seletora de barra 2 possuir estado lógico 0 **AND** a chave SC de *by-pass* possuir estado lógico 0, **então** o vão pertence a  $Z_1$  e a *flag* de detecção de  $Z_1$ , para o vão, é colocada no estado 1, caso contrário o vão não pertence a  $Z_1$ ."

Para avaliar se determinado vão pertence a  $Z_2$  é feita a seguinte afirmação condicional:

"**SE** a chave SC seletora de barra 2 possuir estado lógico 1 **OR** a chave SC de *by-pass* possuir estado lógico 1 **AND** a chave SC seletora de barra 1 possuir estado lógico 0, **então** o vão pertence a  $Z_2$  e a *flag* de detecção de  $Z_2$ , para o vão, é colocada no estado 1, caso contrário o vão não pertence a  $Z_2$ ."

Como consequência desta etapa, obtém-se a lógica dos *flags* de habilitação de corrente dos P vãos nas diferentes zonas de proteção e de forma segregada por fase.

A condição de paralelismo de barras é satisfeita quando as chaves SCs seletoras de barra 1 e 2 estão fechadas durante um mesmo intervalo de tempo. Portanto para avaliar se a variável **PB** seria ativada foi implementada uma avaliação condicional das chaves SCs seletoras de barra e do estado do disjuntor de amarre.

"**SE** a chave SC seletora de barra 1 possuir estado lógico 1 **AND** a chave SC seletora de barra 2 possuir estado lógico 1 **AND** o disjuntor de amarre possuir estado lógico 1, para qualquer um dos vãos, **então** a variável PB é ativada, caso contrário não há paralelismo de barras."

Para a transferência da proteção procede-se da mesma maneira, com a seguinte lógica condicional:

"**SE** para determinado vão, a chave SC seletora de barra 1 possuir estado lógico 0 **AND** a chave SC seletora de barra 2 possuir estado lógico 0 **AND** a chave SC de *by-pass* possuir estado lógico 1, em determinado instante da simulação, **AND** todas os outros vãos estiverem com a *flag* de pertencente à  $Z_1$  ativada, **então** o vão em questão está com a proteção transferida para o disjuntor de amarre, caso contrário o vão não está com a proteção transferida."

### 3.3.3 Cálculo das correntes de operação, restrição e restrição suavizada

Os cálculos das correntes de operação e restrição são feitos como indicado nas equações (2.12) e (2.13). Estas correntes são segregadas por fase e por zona de proteção.

O método de filtragem utilizado no algoritmo consiste na comparação da corrente de restrição com uma variável inicializada com um valor muito pequeno. Avalia-se se essa variável é menor que a corrente de restrição em determinado instante, caso seja menor, o valor da variável é atualizado com o valor da corrente de restrição, dessa forma vai se comparando a cada instante os valores e estes vão sendo atualizados de tal forma que a curva obtida para corrente de restrição suavizada se assemelha àquela mostrada na Figura 2.9(a).

### 3.3.4 Detecção de Distúrbios, Faltas Externas e Faltas Internas, Lógicas de Trip

A detecção de distúrbio de potência é feita por meio da análise da taxa de variação da corrente de restrição suavizada. Avalia-se se essa taxa é maior que uma constante, em caso afirmativo a *flag* de detecção de distúrbio é acionada.

Os casos de faltas externas e internas se baseiam na análise feita no capítulo 2. Nesta etapa, são verificadas se as condições da Equação (2.11) são satisfeitas para classificar uma falta como interna, em caso negativo são avaliadas as características das correntes de operação e restrição para classificar uma falta como externa. Para todos os casos são avaliadas as lógicas 1-de-1, lógica 2-de-2 e o modo de falta externa.

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos da avaliação do desempenho do esquema de proteção diferencial de baixa impedância para a configuração de barramento duplo com disjuntor simples a quatro chaves. A função de proteção 87B baseia-se na comparação entre as correntes de operação e restrição dos elementos diferenciais. Para testar o desempenho da proteção, o sistema foi submetido a diversas condições típicas de faltas que podem ocorrer em subestações com configuração flexível, levando em consideração a seleção adaptativa das zonas de proteção de cada barramento. Dentre os casos de estudo avaliados, destacam-se os casos de: falta interna, falta externa e situações em que ocorre a transferência da proteção. Para cada um dos casos, as operações e os tempos de atuação são analisados por meio dos estados lógicos das variáveis de *trip* de cada fase.

## 4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA ANALISADO

O sistema elétrico de potência analisado neste trabalho é apresentada na Figura 4.1, e consiste em uma subestação com configuração de barramento duplo de 230 kV com saída de disjuntor simples a quatro chaves em cada vão. No barramento são conectadas quatro linhas de transmissão modeladas como perfeitamente transpostas, com parâmetros constantes na frequência, cada uma com 180 km de comprimento. Além das linhas, são considerados dois transformadores de potência, resultando em um sistema com seis vãos de saída. Os parâmetros de sequência das linhas de transmissão e os parâmetros utilizados na modelagem dos transformadores são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2. Os subscritos 0 (zero) e 1 (um) correspondem aos valores de sequência zero e positiva, respectivamente. Na tabela 4.3 são apresentados os parâmetros dos equivalentes de Thévenin conectados nos terminais remotos das linhas de transmissão e dos transformadores.

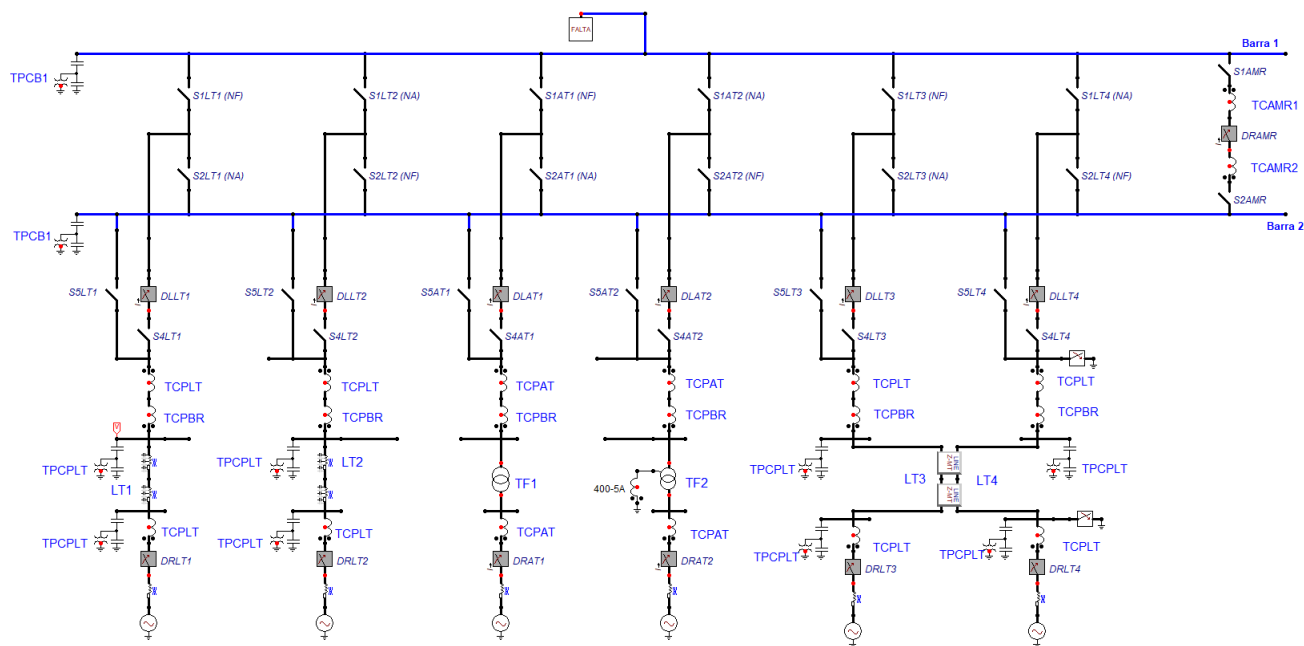


Figura 4.1. Sistema Simulado

Tabela 4.1. Parâmetros da LT modelada no ATP.

$Z_0(\Omega/km)$	$Z_1(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$	$B_1(\mu S/km)$
$0,532 + j1,541$	$0,098 + j0,51$	2,293	3,252

Tabela 4.2. Parâmetros dos transformadores de potência.

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

Tabela 4.3. Parâmetros dos equivalentes remotos.

Equivalente	Tensão (pu)	$Z_0(\Omega)$	$Z_1(\Omega/km)$
Linha 1	$1.00\angle 0^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
Linha 2	$1.00\angle -5^\circ$	$18,41 + j28,69$	$13,39 + j20,86$
Linha 3	$1.00\angle -10^\circ$	$18,42 + j28,69$	$13,39 + j20,87$
Linha 4	$1.00\angle 4^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
TF1	$1.00\angle -5^\circ$	$28,07 + j43,74$	$18,71 + j29,16$
TF2	$1.00\angle 0^\circ$	$5,52 + j8,61$	$4,02 + j6,26$

A interligação entre as barras é feita por meio de um disjuntor, DJAMR, o qual permanece fechado durante a operação normal do sistema. As barras são conectadas entre si permitindo



uma distribuição uniforme de toda a carga da subestação. O DJAMR abre se for verificado uma condição de falta interna à zona de proteção de uma das barras protegidas.

Para aplicar os diferentes tipos de condições de operação ao sistema foi utilizado o módulo ATPDrawm do ATP, com o tempo máximo de simulação de 200 ms. Para todas as simulações, utilizou-se um passo de integração de  $1 \mu s$ .

## 4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para avaliar a função de proteção, verificam-se os valores de  $i_{op}$  e  $i_{res}^*$  ajustada pelo SLP para cada zona de proteção. Para cada caso avaliado, verifica-se a operação ou não do esquema de proteção proposto, seguindo as condições a serem satisfeitas pela Equação (2.11). O valor de  $slope$  utilizado no algoritmo da proteção é 0.3, já o valor de  $i_{pickup}$  utilizada é de 0.1 pu.

Com o intuito de caracterizar a eficiência da proteção são avaliados os tempos de atuação das lógicas 1-de-1 e 2-de-2, bem como o estado lógico das variáveis mais representativas do algoritmo proposto. O tempo de atuação da proteção é definido como a diferença entre o tempo de emissão de *trip* aos disjuntores e o tempo de incidência da falta.

Na Tabela 4.4 apresentam-se as variáveis utilizadas para caracterizar a proteção nos estudos de caso, também é feita uma descrição de cada uma delas.

**Tabela 4.4.** Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso.

Variável	Nome
FFD 87BI	Detecção de Distúrbio
EFD 87BI	Detecção de Falta Externa
1-1 87BI	Operação da Lógica 1-de-1
2-2 87BI	Operação da Lógica 2-de-2
PB	Detecção de Paralelismo de Barra
PTxx	Detecção de Proteção Transferida do Elemento xx
xxINZ1	Detecção do elemento xx na Zona 1
xxINZ2	Detecção do elemento xx na Zona 2

Na Tabela 4.5 são reportados os casos simulados para avaliação do esquema de proteção proposto.

Tabela 4.5. Cenários de falta avaliados.

Caso	Descrição
1	Curto-Circuito trifásico interno na Barra 1, $Z_1$
2	Curto-Circuito bifásico interno na Barra 2, $Z_2$
3	Curto-Circuito trifásico interno adjacente ao DJIB
4	Curto-Circuito monofásico externo sem saturação do TC na LT2, $Z_2$
5	Curto-Circuito trifásico na Barra 1 com a proteção da LT1 transferida
6	Curto-Circuito trifásico na Barra 2 com a proteção da LT1 transferida
7	Curto-Circuito com paralelismo de barras

### 4.3 CURTOS-CIRCUITOS APLICADOS NO SISTEMA

#### 4.3.1 Curtos-Circuitos com o sistema na sua configuração normal

Com o sistema operando na sua configuração normal, as duas barras estão energizadas e interligadas via o DJAMR (ou DJIB), com os vãos distribuídos entre elas de forma homogênea, conforme mostrado na Figura 4.1. As siglas NF e NA indicam que determinada chave SC seletora de barra está normalmente fechada e normalmente aberta, respectivamente. Então analisando o estado lógico destas chaves, observa-se que são normalmente conectadas na barra 1 os vãos LT1, TF1 e LT3, enquanto que os vãos LT2, TF2 e LT4 são conectados na barra 2. Nessa situação, o curto-circuito em uma das barras resultará na abertura apenas dos DJs conectados na barra defeituosa, mantendo a outra barra e seus vãos correspondentes ainda em operação.

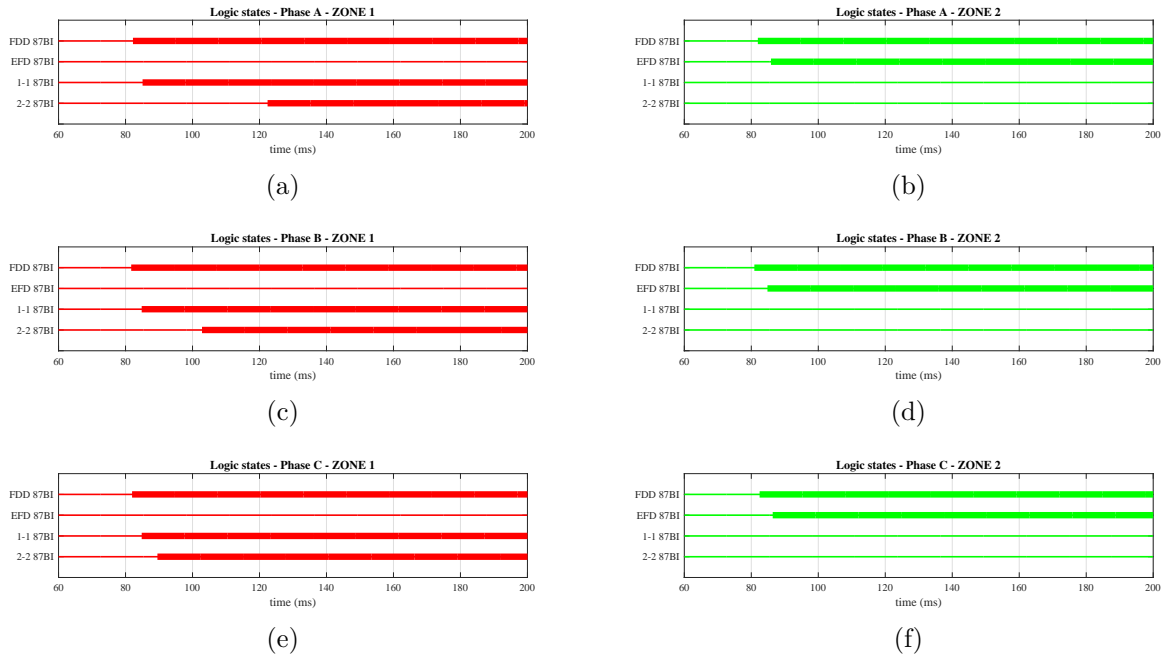
Nas próximas seções são apresentadas as condições de falta aplicadas no sistema, bem como seus resultados e análise.

##### 4.3.1.1 Caso 1: Curto-Circuito Trifásico Interno na Barra 1, Zona 1

Uma falta trifásica, sem envolver o terra, é aplicada no barramento 1, no instante  $t = 80 \text{ ms}$ . Portanto, a proteção da  $Z_1$  deve ser capaz de identificar esse curto como interno e enviar comando de *trip* aos disjuntores da LT1, LT3 e TF1. Além disso o DJAMR também deve abrir, para isolar os vãos ligados a  $Z_2$  da região defeituosa. Em contrapartida, a proteção da  $Z_2$  deve ser capaz de identificar a falta que ocorreu na barra 1 com uma falta externa, evitando

assim uma operação indevida por parte desta zona.

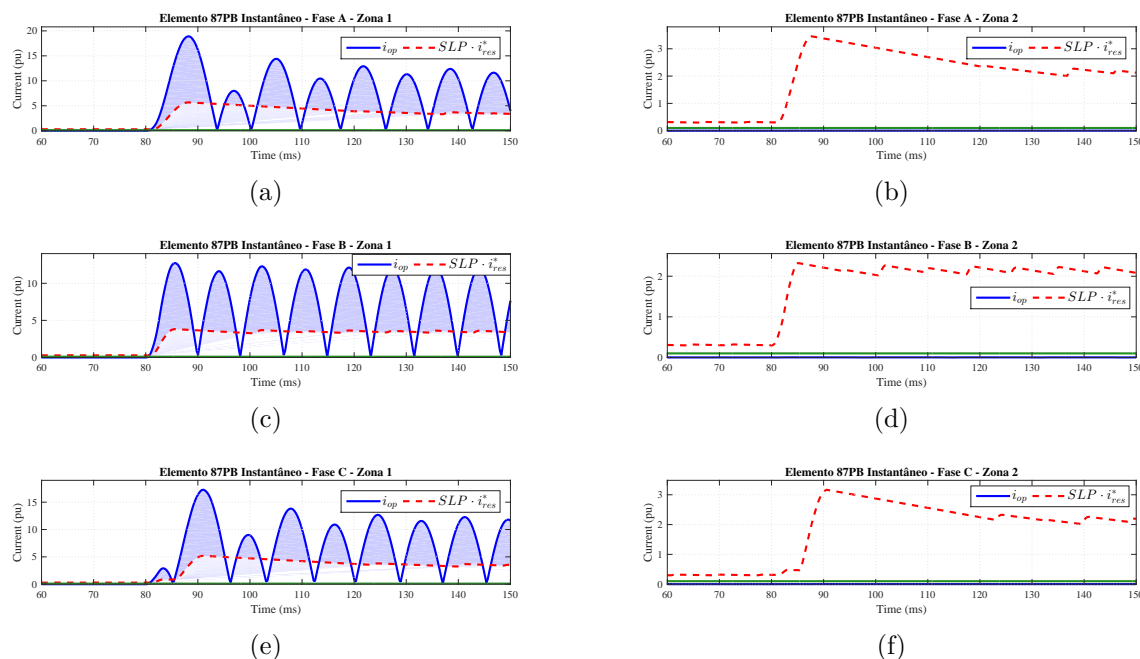
A Figura 4.2 mostra que logo após a incidência da falta, as duas zonas de proteção identificaram um distúrbio de potência no sistema, representado pela ativação da *flag* FDD 87BI, porém a lógica de proteção da  $Z_2$  foi capaz de identificar o curto como externo, logo em seguida, culminando com a ativação da *flag* EFD 87BI, assim o modo de falta externa foi ativado e o modo de proteção rápida fica bloqueada por 150 ms, enquanto a lógica 2-de-2 continua funcionando em paralelo. Cabe salientar que para a  $Z_2$ , a lógica de 2-de-2 não atua pois os valores de  $i_{op}$  não ultrapassam os valores de  $i_{res}^*$  em nenhum momento. Como esperado, a proteção da  $Z_1$  atuou por meio das lógicas 1-de-1 e 2-de-2, como pode ser visto por meio da ativação das *flags* 1-1 87BI e 2-2 87BI.



**Figura 4.2.** Caso 1: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

Na Figura 4.2, são mostradas as correntes de operação e restrição suavizada ao longo do tempo de simulação, para cada fase da  $Z_1$ . É possível perceber que a corrente de operação ( $i_{op}$ ) ultrapassa a corrente de restrição ( $i_{res}^*$ ) em vários instantes de tempo, superando também o valor de  $i_{pickup}$ . Logo após o início da falta em 80 ms,  $i_{op}$  é mantida acima de  $SLP \cdot i_{res}^*$ , durante um intervalo de tempo suficiente para indicar uma condição de falta interna. Portanto, por meio da lógica de atuação 1-de-1, o relé gera um comando de *trip*, que é enviado para os disjuntores.

A abertura dos disjuntores é mostrada na Figura 4.4, percebe-se que apenas os disjuntores dos vãos conectados a barra 1 e o DJAMR receberam o comando de abertura. Os tempos de atuação da proteção e o respectivos instantes da atuação são mostrados nas tabelas 4.6 e 4.7.



**Figura 4.3.** Caso 1: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

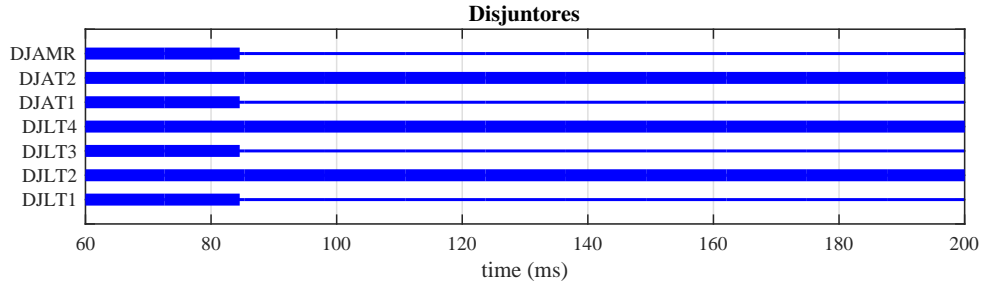
**Tabela 4.6.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	4.6875	84.8958
B	4.4270	84.6354
C	4.4270	84.6354

**Tabela 4.7.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	41.9270	122.1354
B	22.3958	102.6041
C	9.1145	89.3229

Avaliando a atuação da proteção para o caso 1, viu-se que todos os requisitos esperados foram atendidos. O esquema de proteção mostrou-se estável para a zona onde a falta não foi aplicada, mas a atuação mostrou-se rápida na zona de ocorrência da falta. Portanto os critérios



**Figura 4.4.** Caso 1: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema.

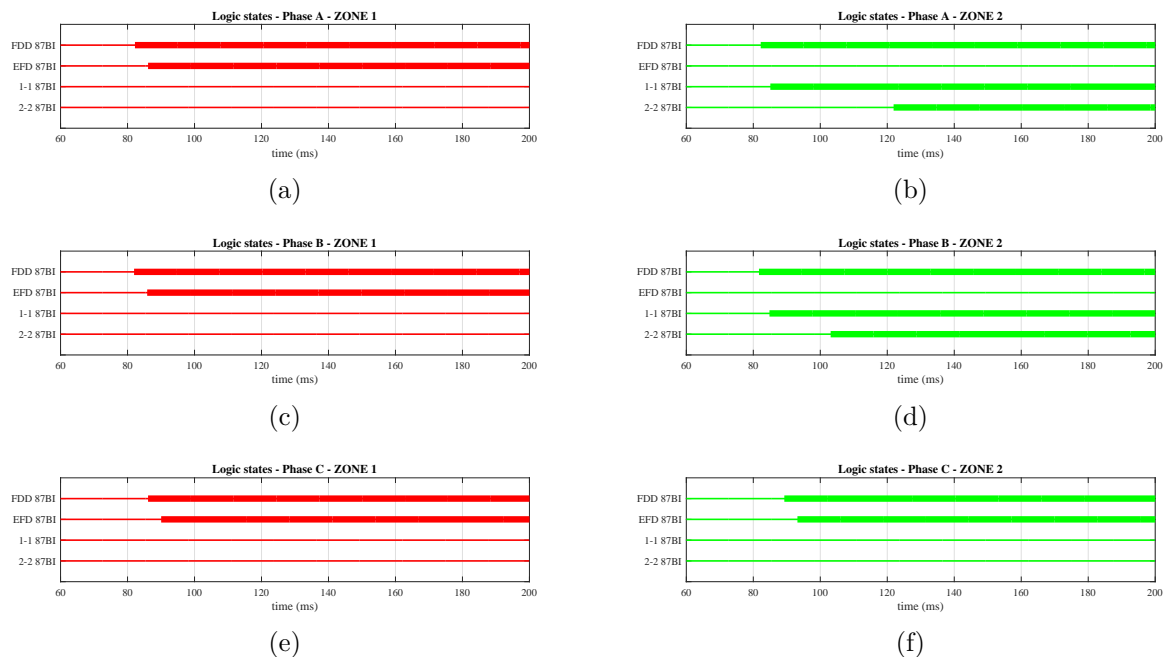
de confiabilidade, seletividade e velocidade foram alcançados pela proteção diferencial de baixa impedância para o caso de faltas internas.

#### 4.3.1.2 Caso 2: Curto-Circuito Bifásico Interno na Barra 2, Zona 2

Uma falta bifásica AB, sem envolver o terra, é aplicada no barramento 2, no instante  $t = 80 \text{ ms}$ . Portanto, a proteção da  $Z_2$  deve ser capaz de identificar esse curto como interno e enviar comando de *trip* aos disjuntores da LT2, LT4 e TF2. Além disso o DJAMR também deve abrir, para isolar os vãos ligados a  $Z_1$  da região defeituosa. Em contrapartida, a proteção da  $Z_1$  deve ser capaz de identificar a falta que ocorreu na barra 2 com uma falta externa, evitando assim uma operação indevida por parte desta zona.

A Figura 4.5 mostra que logo após a incidência da falta, as duas zonas de proteção identificaram um distúrbio de potência no sistema, representado pela ativação da *flag* FDD 87BI, porém a lógica de proteção da  $Z_1$  foi capaz de identificar o curto como externo, logo em seguida, culminando com a ativação da *flag* EFD 87BI, assim o modo de falta externa foi ativado e o modo de proteção rápida fica bloqueada por 150 ms, enquanto a lógica 2-de-2 continua funcionando em paralelo. Cabe salientar que para a  $Z_1$ , a lógica de 2-de-2 não atua pois os valores de  $i_{op}$  não ultrapassam os valores de  $i_{res}^*$  em nenhum momento. Como esperado, a proteção da  $Z_2$  atuou por meio das lógicas 1-de-1 e 2-de-2, como pode ser visto por meio da ativação das *flags* 1-1 87BI e 2-2 87BI.

Na Figura 4.6, são mostradas as correntes de operação e restrição suavizada ao longo do tempo de simulação, para cada fase da  $Z_2$ . É possível perceber que a corrente de operação ( $i_{op}$ ) ultrapassa a corrente de restrição ( $i_{res}^*$ ) em vários instantes de tempo, superando também o valor de  $i_{pickup}$ . Logo após o início da falta em  $80 \text{ ms}$ ,  $i_{op}$  é mantida acima de  $SLP \cdot i_{res}^*$ , durante um



**Figura 4.5.** Caso 2: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A- Z<sub>1</sub>; (b) Fase A- Z<sub>2</sub>; (c) Fase B- Z<sub>1</sub>; (d) Fase B- Z<sub>2</sub>; (e) Fase C- Z<sub>1</sub>; (f) Fase C- Z<sub>2</sub>.

intervalo de tempo suficiente para indicar uma condição de falta. Portanto, por meio da lógica de atuação 1-de-1, o relé gera um comando de *trip*, que é enviado para os disjuntores.

A abertura dos disjuntores é mostrada na Figura 4.7, percebe-se que apenas os disjuntores dos vãos conectados a barra 2 e o DJAMR receberam o comando de abertura. Os tempos de atuação da proteção e o respectivos instantes da atuação são mostrados nas tabelas 4.8 e 4.9.

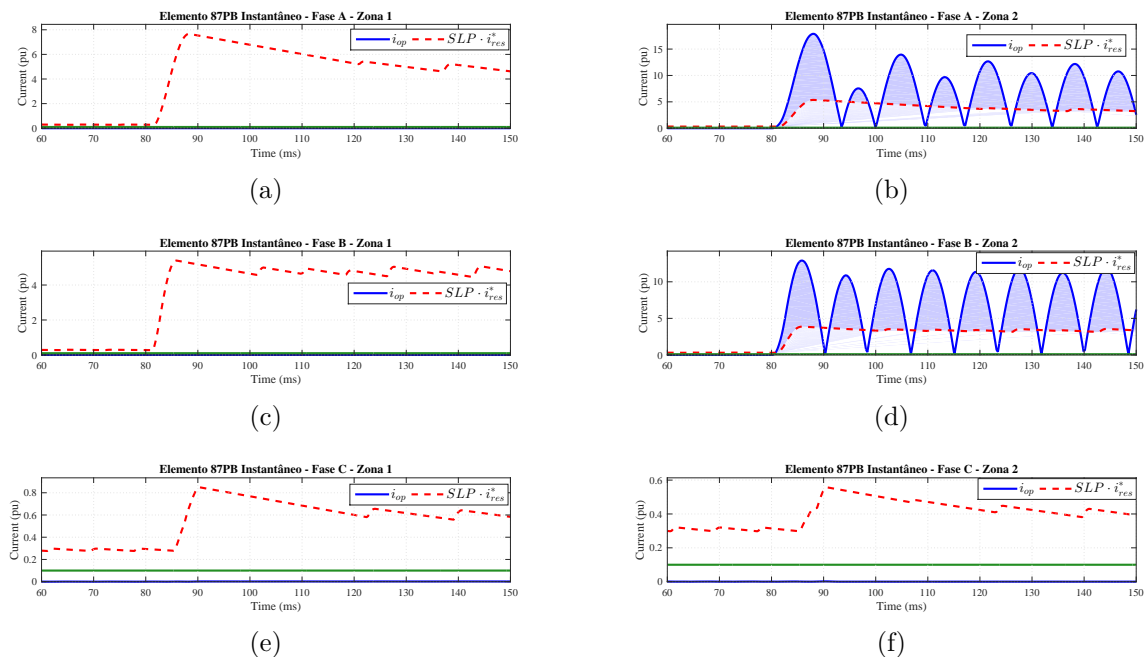
**Tabela 4.8.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	4.6875	84.8958
B	4.4270	84.6354
C	-	-

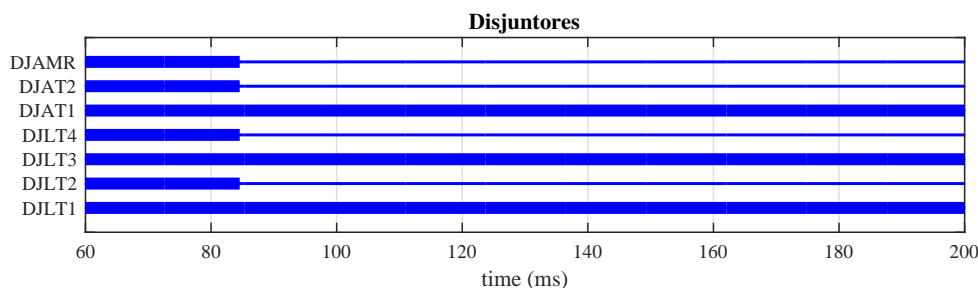
**Tabela 4.9.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	41.4062	121.6145
B	22.6562	102.864
C	-	-

Avaliando a atuação da proteção para o caso 2, viu-se que todos os requisitos esperados foram atendidos. O esquema de proteção mostrou-se estável para as fases e zonas onde a falta



**Figura 4.6.** Caso 2: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .



**Figura 4.7.** Caso 2: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema.

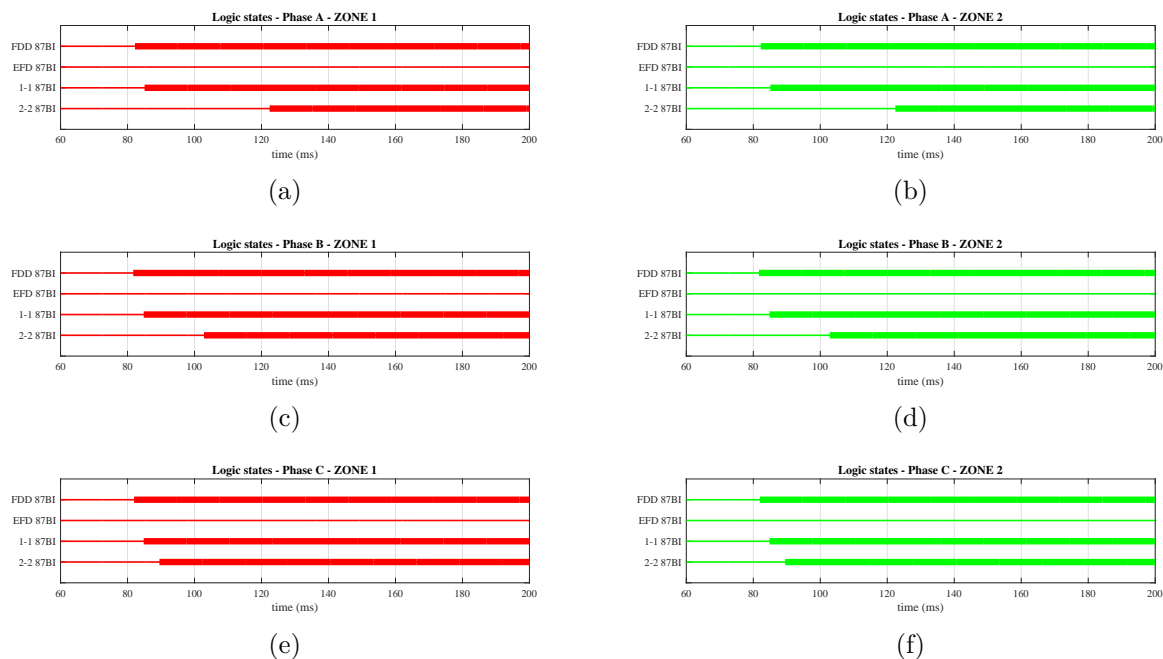
não foi aplicada, mas a atuação mostrou-se rápida na zona de ocorrência da falta. Portanto os critérios de confiabilidade, seletividade e velocidade foram alcançados pela proteção diferencial de baixa impedância para o caso de faltas internas.

#### 4.3.1.3 Caso 3: Curto-Circuito Trifásico Interno Adjacente ao DJIB

No capítulo 2 foi apresentada uma estratégia para a proteção do vão de interligação das barras, foi proposto instalar os TCs de tal forma que houvesse uma sobreposição das zonas em torno do DJIB, dessa forma o vão de interligação é monitorado pelas zonas  $Z_1$  e  $Z_2$ . Espera-se que a proteção diferencial envie um comando de *trip* para abertura dos disjuntores de ambas as zonas. A partir da teoria apresentada, foi aplicado um curto-circuito trifásico ao lado do

disjuntor DJIB, no instante  $t = 80 \text{ ms}$ , com o intuito de avaliar a atuação para esse caso específico.

A Figura 4.8 mostra que as duas zonas detectaram o distúrbio e nenhuma delas ativou a *flag* de detecção de falta externa, corroborando com o que era esperado na teoria.



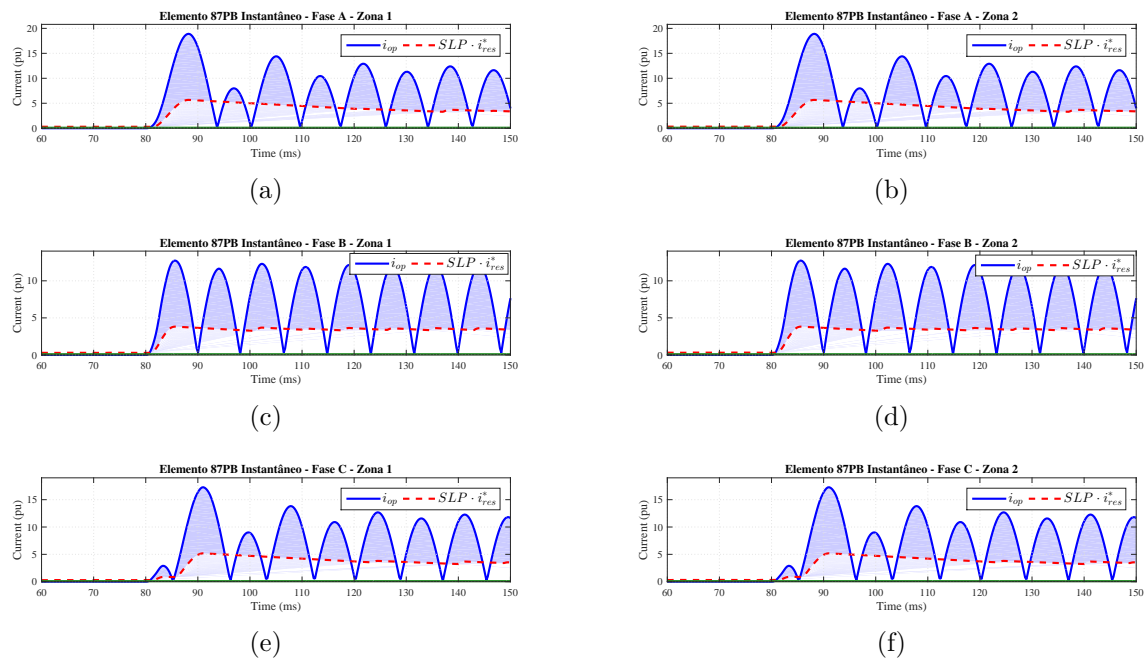
**Figura 4.8.** Caso 3: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

Já na Figura 4.9, são analisadas as correntes de operação e restrição para as duas zonas, percebe-se que tanto a lógica 1-de-1, quanto a lógica 2-de-2 atuaram para esse caso nas duas zonas, enviando comando de *trip* para todos os vãos conectados aos barramentos da subestação. Nas Tabelas 4.10 e 4.11, são apresentados os tempos e instantes da atuação das lógicas 1-de-1 e 2-de-2, respectivamente. Além disso, é constatado que as zona  $Z_1$  e  $Z_2$  atuaram na mesma medida, como resposta ao curto aplicado, ou seja, os tempos de atuação da proteção foram iguais nos dois casos.

**Tabela 4.10.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zonas 1 e 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	4.3749	84.6354
B	4.1145	84.3750
C	4.1145	84.3750



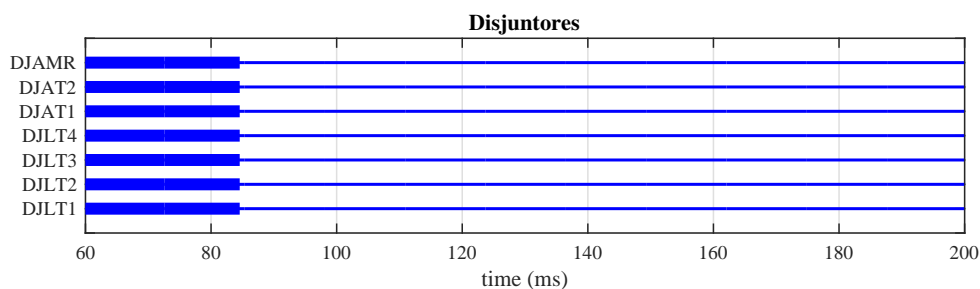


**Figura 4.9.** Caso 3: Correntes de operação e restrição suavizada para Zona 1 e Zona 2 : (a) Fase A- Z<sub>1</sub>; (b) Fase A- Z<sub>2</sub>; (c) Fase B- Z<sub>1</sub>; (d) Fase B- Z<sub>2</sub>; (e) Fase C- Z<sub>1</sub>; (f) Fase C- Z<sub>2</sub>.

**Tabela 4.11.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zonas 1 e 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	41.6145	121.8750
B	22.0830	102.3437
C	8.7983	89.0625

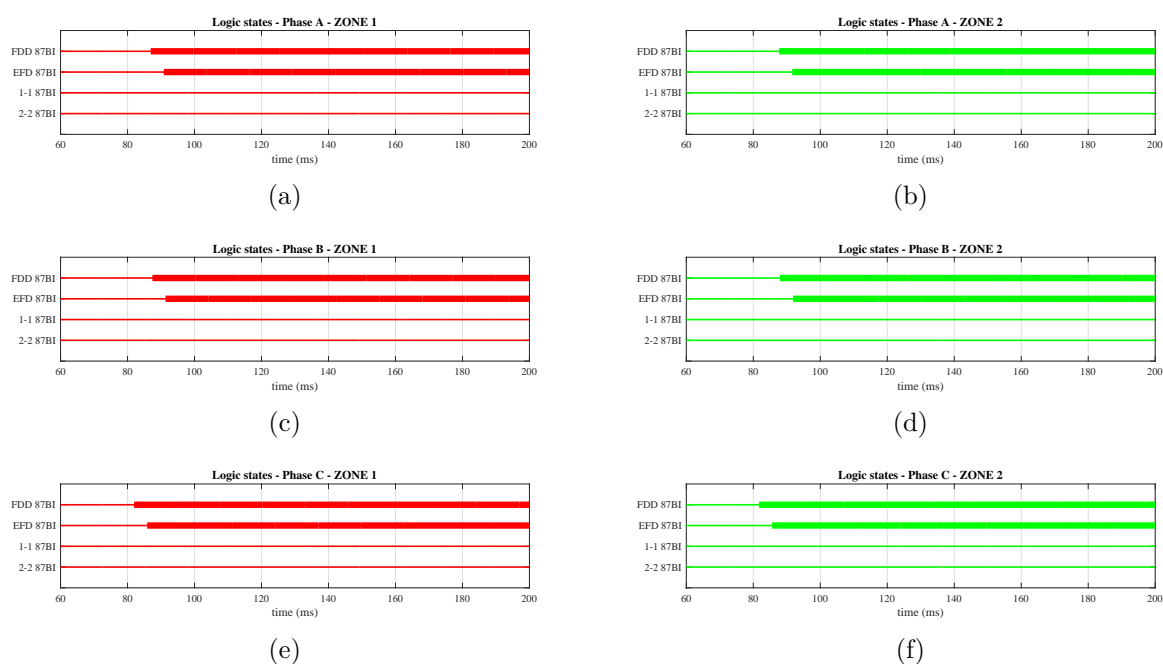
Por último, a Figura 4.10 mostra que todos os disjuntores receberam o comando de abertura por parte das suas respectivas zonas de proteção. Neste caso, a abertura dos disjuntores foi proveniente da atuação do modo rápido de proteção, daí os tempos de abertura serem em torno de 85 ms.



**Figura 4.10.** Caso 3: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema.

#### 4.3.1.4 Caso 4: Curto-Circuito Monofásico Externo sem saturação do TC, na LT2, Zona 2

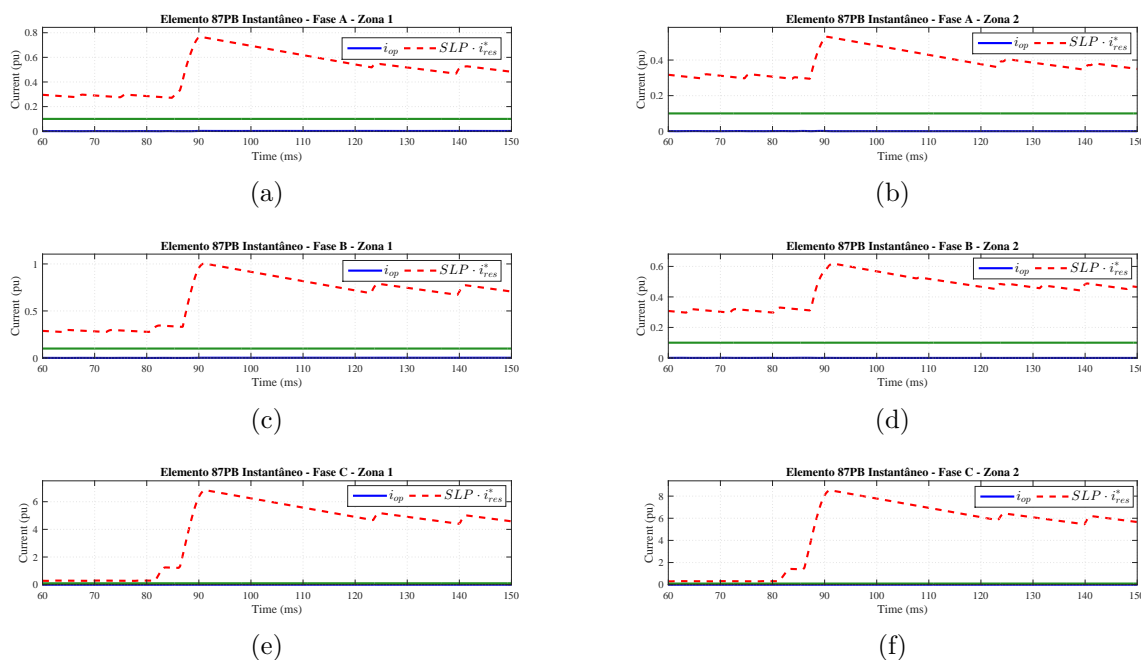
Neste caso, aplica-se um curto monofásico CT fora da zona de proteção  $Z_2$ , no instante  $t = 80 \text{ ms}$ , em um ponto imediatamente à frente do TC de proteção de barras TCPBR da LT2. A Figura 4.11 mostra que as duas zonas identificaram o curto como externo, daí a ativação da *flag* de falta externa EFD.



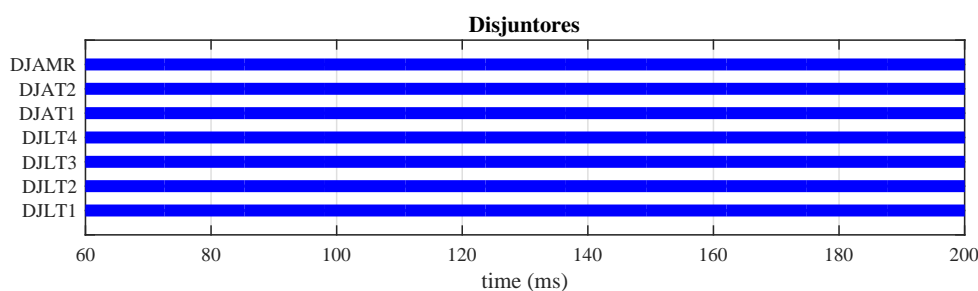
**Figura 4.11.** Caso 4: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

Na Figura 4.12, observa-se que durante todo o tempo de simulação, os valores de  $i_{op}$  permaneceram constantes e próximos de zero, enquanto que os valores de  $SLP \cdot i_{res}^*$  demonstram um comportamento oscilatório, com uma taxa de variação alta em alguns momentos. Esses resultados mostram que o modo de falta externa foi ativado, bloqueando a lógica 1-de-1 por 150 ms, deixando o comando do *trip* para a lógica de 2-de-2. A Figura 4.13 mostra que nenhum dos disjuntores recebeu um comando de abertura por parte da proteção.

Analisando os resultados obtidos para o caso de falta externa, percebe-se que a proteção manteve-se estável, não atuando para curtos fora da zona de proteção, como esperado.



**Figura 4.12.** Caso 4: correntes de operação e restrição suavizada para Zona 1 e Zona 2 : (a) Fase A- Z<sub>1</sub>; (b) Fase A- Z<sub>2</sub>; (c) Fase B- Z<sub>1</sub>; (d) Fase B- Z<sub>2</sub>; (e) Fase C- Z<sub>1</sub>; (f) Fase C- Z<sub>2</sub>.



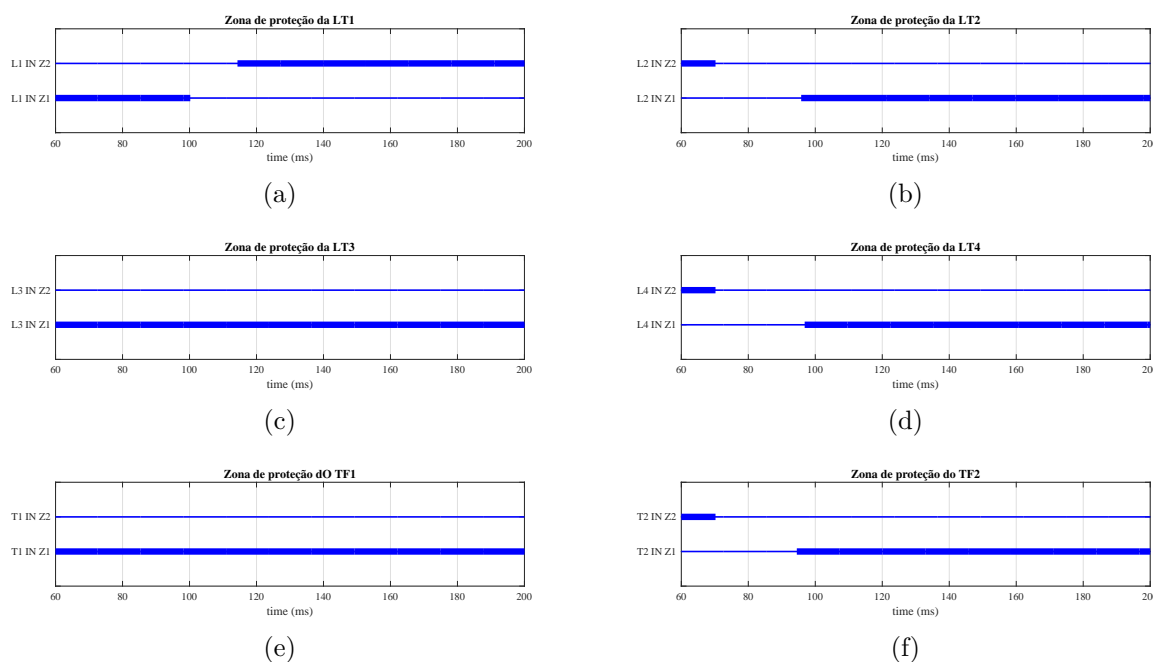
**Figura 4.13.** Caso 4: Estado Lógico dos Disjuntores do Sistema.

### 4.3.2 Curto-Circuitos com Transferência da Proteção

No capítulo 2 foi abordado o tema da transferência da proteção. Este assunto é retomado nesse ponto do texto, para avaliação dos resultados dessas manobras. A configuração de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves permite que um DJ seja liberado para manutenção, mantendo-se o seu vão correspondente ainda em operação, mediante o fechamento da sua chave de *by-pass* e o remanejamento de todos os vãos para a barra 1, que opera como barra principal, com exceção daquele cujo DJ está liberado para manutenção, que fica isolado na barra 2, que opera como barra de transferência. Nessa situação, o comando de *trip* da proteção do vão é então transferido para o DJAMR (IEEE, 2009).

Para analisar esse caso, avalia-se a transferência da proteção do DJLT1 com o objetivo de

liberá-lo para manutenção. Para isso uma série de manobras são realizadas a fim de implementar esse caso. Primeiramente, deve-se transferir todos os vãos ligados à barra 2 para barra 1 (barra principal). Estão ligados à barra 2 a LT2, LT4 e o TF2, portanto suas chaves SCs seletoras de barra 1 são fechadas no instante  $t = 70 \text{ ms}$ , enquanto suas chaves SCs seletoras de barra 2 são abertas em  $t = 90 \text{ ms}$ . Em seguida, deve-se transferir a LT1, cujo disjuntor será liberado para manutenção, da barra 1 para barra 2 (barra de transferência), por meio do fechamento da chave SC de *by-pass*, essa manobra é realizada em  $t = 100 \text{ ms}$ . No instante  $t = 110 \text{ ms}$ , o vão da LT1 é desconectado da barra 1, por meio da abertura da chaves SC seletora de barra 1. Por fim, o DJLT1 é aberto no instante  $t = 120 \text{ ms}$  e pode-se liberar de modo seguro a chave SC de saída de vão ( $t = 130 \text{ ms}$ ) para isolar o disjuntor do restante do sistema. Dessa forma apenas o vão da LT1 fica conectado no barramento 2. A Figura 4.14 mostra os vãos da subestação sendo remanejados entre as barras, por meio da indicação a qual zona de proteção determinado elemento pertence durante o tempo de simulação.



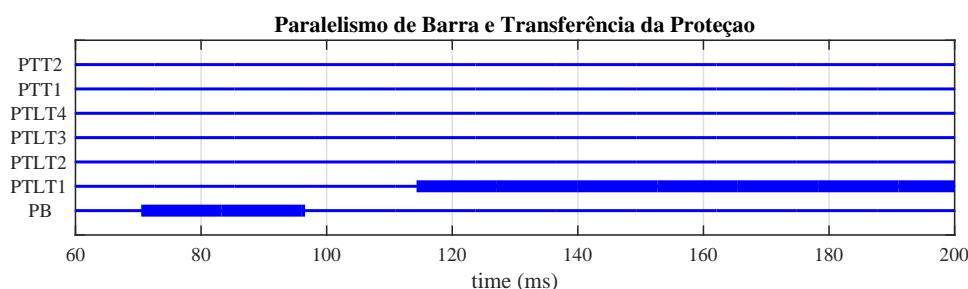
**Figura 4.14.** Transferência dos elementos entre as barras : (a) LT1; (b) LT2; (c) LT3; (d) LT4; (e) TF1; (f) TF2.

A seguir, descreve-se o comportamento do sistema de proteção para o caso de dois curtos trifásicos, um na barra 1, outra na barra 2, enquanto a LT1 estiver com a sua proteção transferida para o DJAMR.

### 4.3.2.1 Caso 5: Curto-Circuito Trifásico na Barra 1 com a proteção da LT1 transferida

Após as manobras de transferências de vão, foi aplicado um curto circuito trifásico, sem envolver o terra, no instante  $t = 140 \text{ ms}$  na barra 1. Espera-se que um comando de *trip* seja enviado para os disjuntores da LT2, LT3, LT4, TF1 e TF2 que são os vãos que estão conectados na barra 1. Também deve ser enviado um comando de abertura para o DJAMR com o intuito de isolar a barra defeituosa da barra sã.

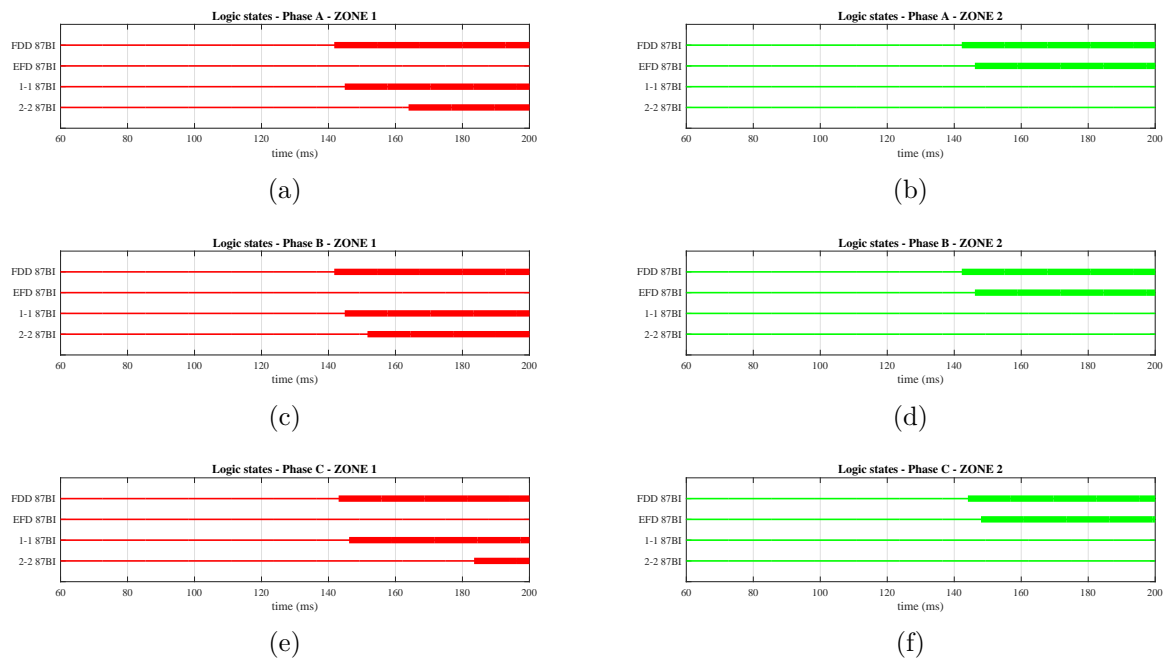
A Figura 4.15 mostra que as variáveis de paralelismo de barra (PB) e de transferência da proteção da LT1 (PTLT1) foram ativadas, então o algoritmo foi capaz de detectar que os vãos estavam sendo remanejados (por meio da avaliação dos estados lógicos das chaves SCs seletoras de barras) e que a LT1 teve sua proteção transferida para o DJAMR.



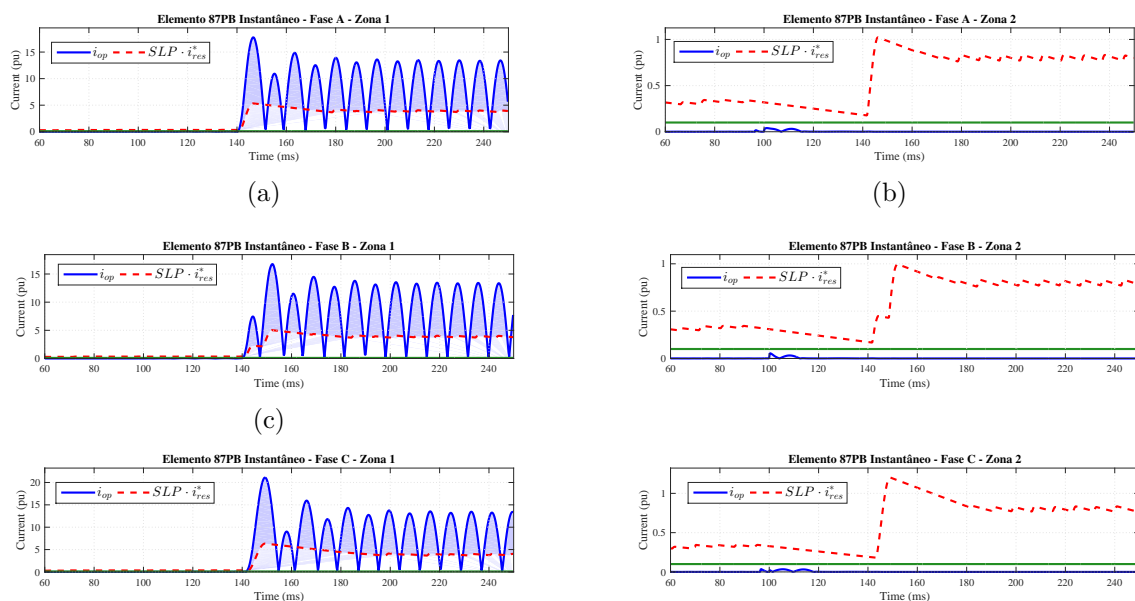
**Figura 4.15.** Estado Lógico da variáveis de transferência da proteção e de paralelismo de barra de Disjuntores do Sistema.

A Figura 4.16 indica que as duas zonas detectaram um distúrbio de potência, porém a  $Z_2$  foi capaz de identificar o curto como externo, enquanto a zona 1 identificou um curto interno. Na Figura 4.17 são analisadas as correntes de operação e restrição suavizada.

Por fim, são apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13 os tempos de atuação da proteção para as lógicas 1-de-1 e 2-de-2 da  $Z_1$ . O resultado obtido na Figura 4.18 mostra que todos os disjuntores receberam o comando de abertura por parte da proteção, cabe salientar que o disjuntor DJLT1 é aberto em  $t = 110 \text{ ms}$  como parte da manobra para realizar a operação de manutenção e não por conta de uma atuação indevida da proteção.



**Figura 4.16.** Caso 5: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .



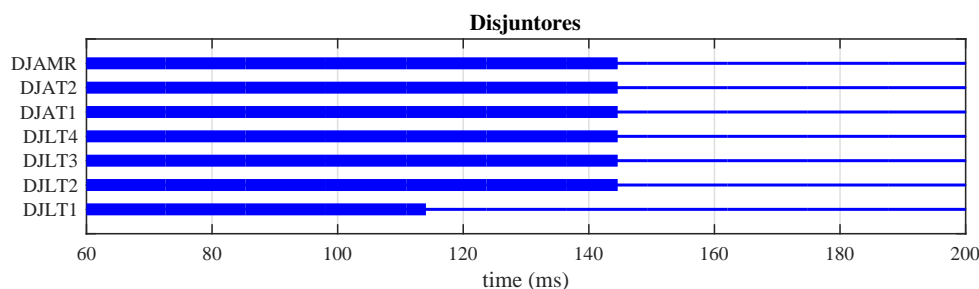
**Figura 4.17.** Caso 5: Correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

**Tabela 4.12.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	4.4270	144.5312
B	4.4270	144.5312
C	5.7291	145.8333

**Tabela 4.13.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1

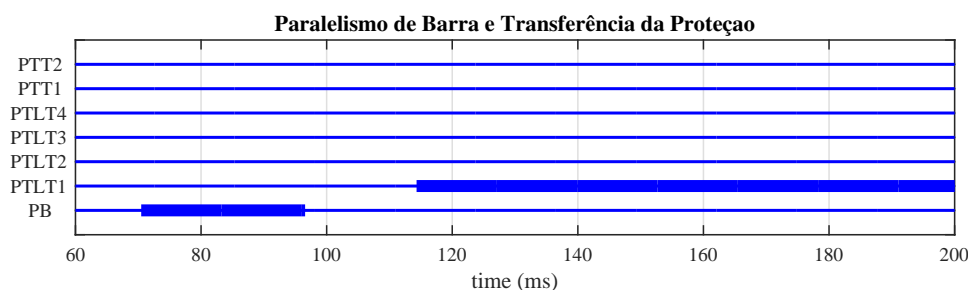
Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	23.4375	163.5416
B	11.19	151.3020
C	42.96	183.0729

**Figura 4.18.** Caso 5: Estado Lógico dos Disjuntores.

#### 4.3.2.2 Caso 6: Curto-Circuito Trifásico na Barra 2 com a proteção da LT1 transferida

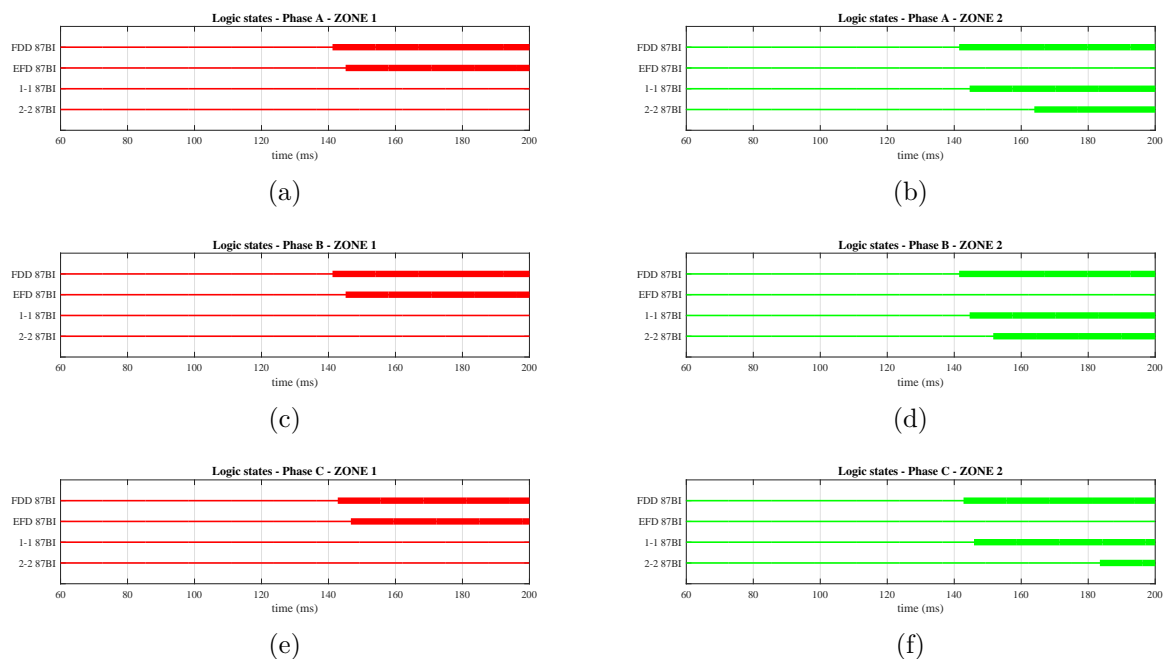
Após as manobras de transferências de vão, foi aplicado um curto circuito trifásico, sem envolver o terra, no instante  $t = 140 \text{ ms}$  na barra 2. Espera-se que um comando de *trip* seja enviado para o disjuntor DJAMR, o qual substitui a proteção do DJLT1.

A Figura 4.19 mostra que as variáveis de paralelismo de barra (PB) e de transferência da proteção da LT1 (PTLT1) foram ativadas, então o algoritmo foi capaz de detectar que os vãos estavam sendo remanejados (por meio da avaliação dos estados lógicos das chaves SCs seletoras de barras) e que a LT1 teve sua proteção transferida para o DJAMR.

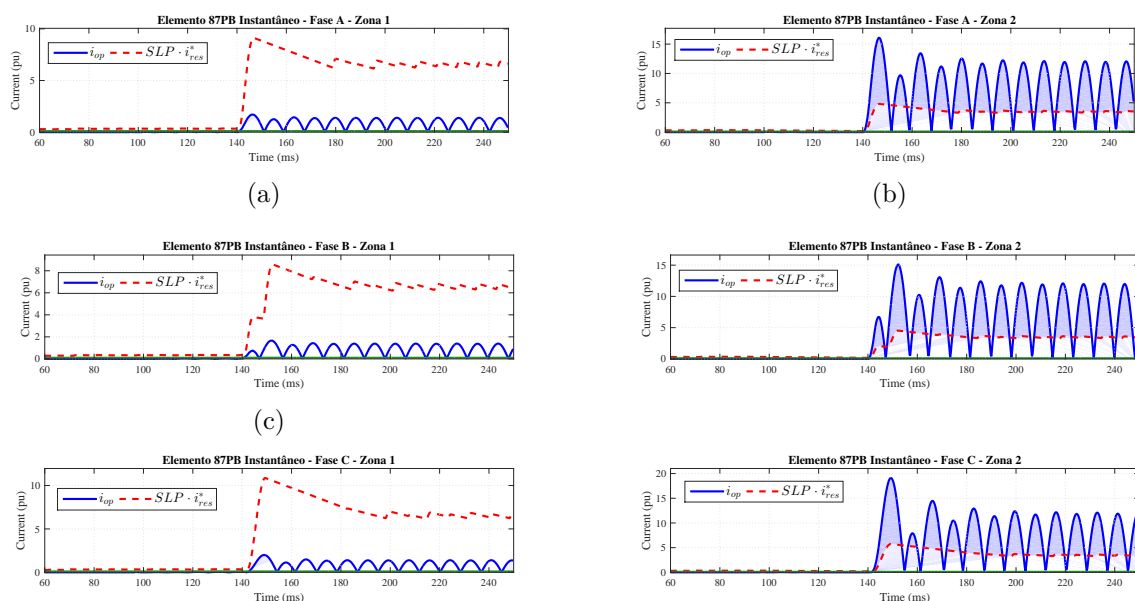
**Figura 4.19.** Estado Lógico da variáveis de transferência da proteção e de paralelismo de barra de Disjuntores do Sistema.

A Figura 4.20 indica que as duas zonas detectaram um distúrbio de potência, porém a  $Z_1$  foi capaz de identificar o curto como externo, enquanto a  $Z_2$  identificou um curto interno. Na

Figura 4.21 são analisadas as correntes de operação e restrição suavizada.



**Figura 4.20.** Caso 6: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .



**Figura 4.21.** Caso 6: Correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

Por fim, são apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15 os tempos de atuação da proteção para as lógicas 1-de-1 e 2-de-2 da  $Z_2$ . O resultado obtido na Figura 4.22 mostra que apenas o DJAMR recebeu o comando de abertura por parte da proteção, cabe salientar que o disjuntor DJLT1 é aberto em  $t = 110 \text{ ms}$  como parte da manobra para realizar a operação de manutenção e não



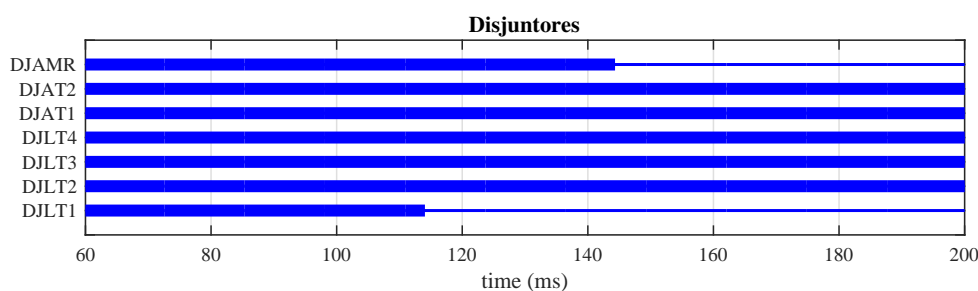
por conta de uma atuação indevida da proteção.

**Tabela 4.14.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	4.1666	144.2708
B	4.1666	144.2708
C	5.4687	145.5729

**Tabela 4.15.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	23.4375	163.5416
B	11.1979	151.3020
C	42.9687	183.0729



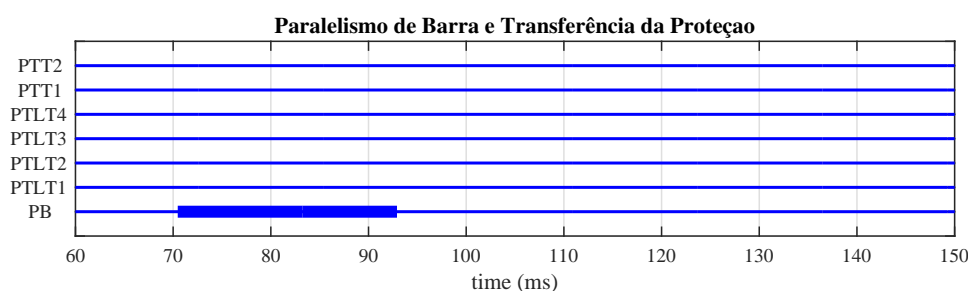
**Figura 4.22.** Caso 6: Estado Lógico dos Disjuntores.

### 4.3.3 Curtos-Circuito com Paralelismo de Barras

A condição de paralelismo de barras acontece quando vãos estão sendo remanejados entre as barras. O paralelismo de barra é caracterizado pelo fato das chaves seccionadoras seletoras de barras ficarem com os seus contatos fechados simultaneamente, como consequência desse fenômeno há uma ligação direta entre as barras, sem a necessidade de interromper o fornecimento de energia durante a manobra de transferência de um vão de uma barra para outra. Sendo assim, um curto circuito em qualquer uma das barras durante a situação de paralelismo irá provocar a abertura de todos os vãos do sistema.

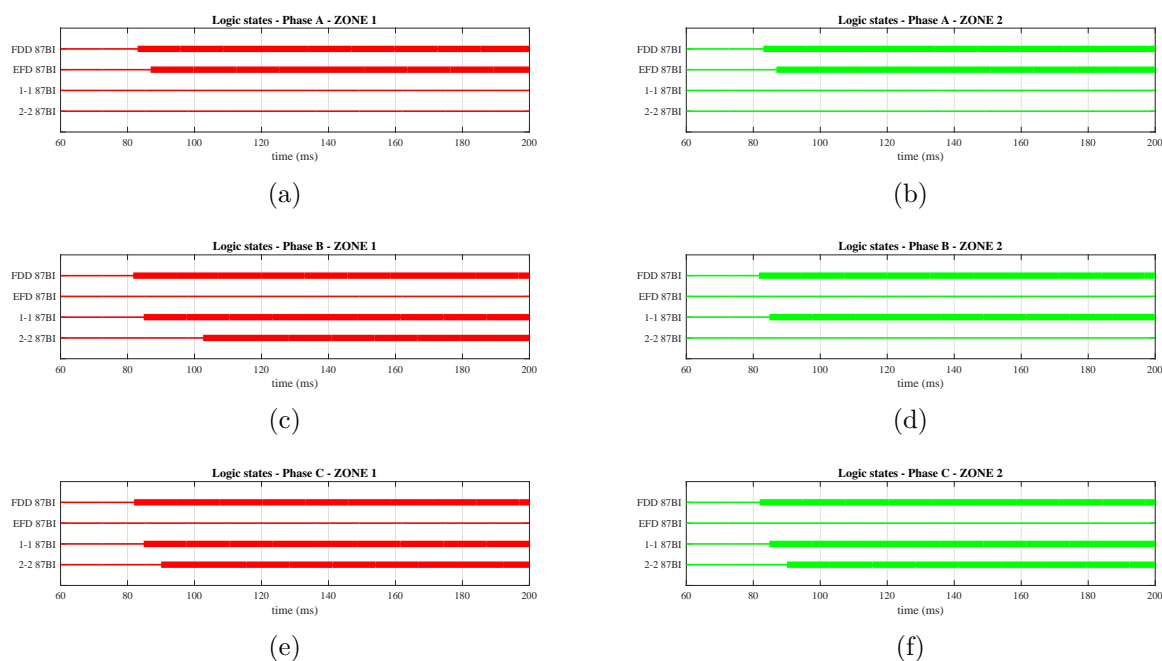
A situação do paralelismo de barras foi simulada através do fechamento simultâneo de ambas as chaves SCs seletoras de barra do vão TF1, durante o seu remanejamento da barra 1, a qual

ele é normalmente conectado, para barra 2. Em  $t = 70 \text{ ms}$  a chave seletora de barra 2 deste vão foi fechada, no instante  $t = 90 \text{ ms}$  a chave seletora de barra 1 foi aberta, portanto o vão permaneceu durante 20 ms na condição de paralelismo de barra. Foi aplicado um curto-circuito bifásico BC, sem envolver o terra, no instante  $t = 80 \text{ ms}$ , no sistema. A Figura 4.23 mostra que a *flag* de paralelismo de barra foi ativada durante a simulação.



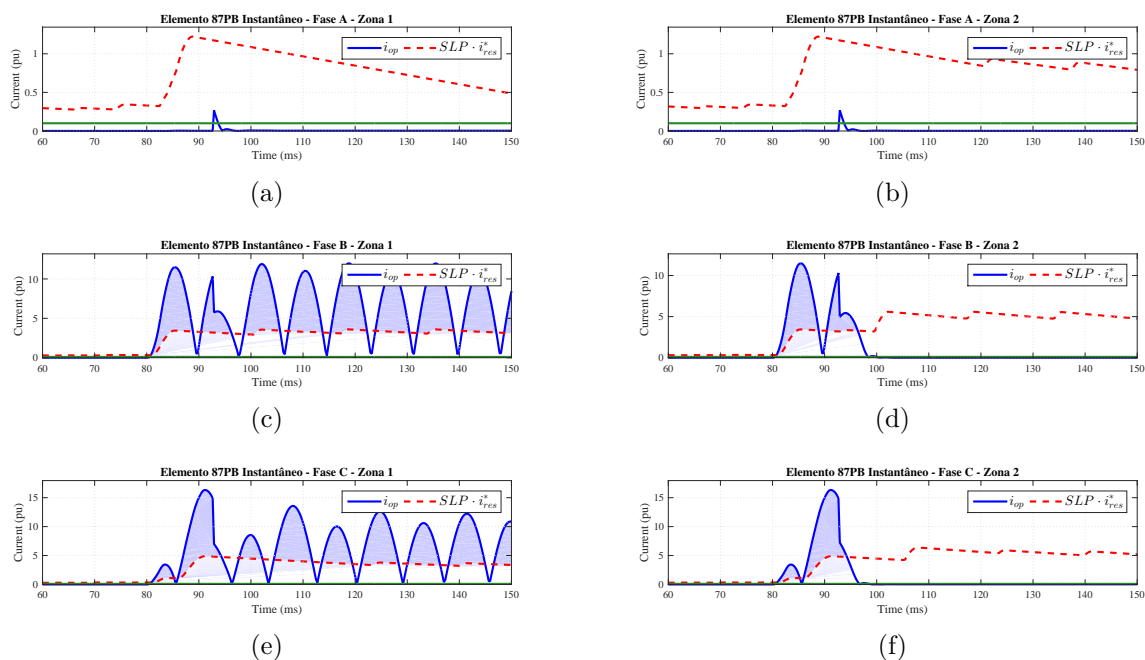
**Figura 4.23.** *Flag* de detecção de paralelismo de barra (PB).

A Figura 4.23, mostra que a fase A tanto da  $Z_1$ , quanto da  $Z_2$ , detectou o curto como externo, o que é coerente dado que foi aplicado um curto BC. Para a fase B da  $Z_1$ , as lógicas 1-de-1 e 2-de-2 atuaram, enquanto que para a  $Z_2$  só houve atuação do modo de proteção rápido, o que pode ser explicado analisando a Figura 4.25, percebe-se a influência do paralelismo de barra e do remanejamento do TF1 da barra 1 para a barra 2 nas correntes de operação da fase B da  $Z_2$ .



**Figura 4.24.** Caso 7: estado das variáveis lógicas da proteção separadas por fase e por zona de proteção: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

Por fim, apresenta-se na Figura 4.26 o estado dos estados lógicos dos disjuntores após a aplicação do curto. Como esperado todos os disjuntores receberam o comando de abertura com a ocorrência da falta, isso acontece porque a situação de paralelismo de barra provoca um fusão das duas zonas de proteção durante um período de tempo, com a aplicação de um curto nesse intervalo, atua uma proteção combinadas das zonas 1 e 2. Os tempos de atuação da proteção são mostrados nas tabelas



**Figura 4.25.** Caso 7: correntes de operação e restrição suavizada: (a) Fase A-  $Z_1$ ; (b) Fase A-  $Z_2$ ; (c) Fase B-  $Z_1$ ; (d) Fase B-  $Z_2$ ; (e) Fase C-  $Z_1$ ; (f) Fase C-  $Z_2$ .

**Tabela 4.16.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 1

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	-	-
B	4.4270	84.6354
C	4.4270	84.6354

**Tabela 4.17.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 1

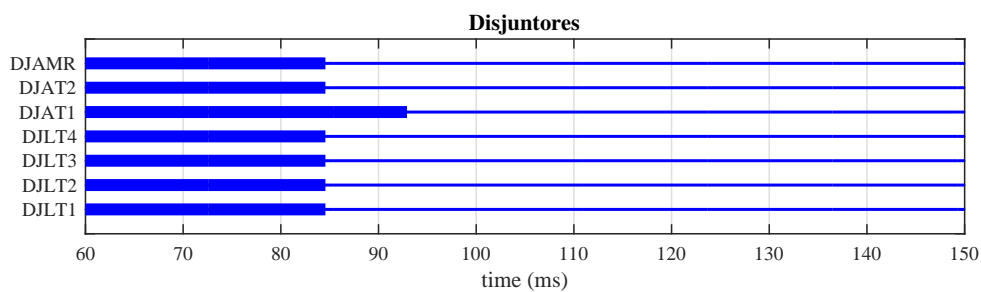
Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	-	-
B	22.1354	102.3437
C	9.6354	89.8437

**Tabela 4.18.** Tempos de atuação da Lógica 1-de-1 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	-	-
B	4.4270	84.6354
C	4.4270	84.6354

**Tabela 4.19.** Tempos de atuação da Lógica 2-de-2 para Zona 2

Fase	Tempo de atuação (ms)	Instante de atuação (ms)
A	-	-
B	-	-
C	9.6354	89.8437

**Figura 4.26.** Caso 7: Estado Lógico dos Disjuntores.

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho, apresentou-se a implementação e avaliação do desempenho do algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância de barramentos. Para tanto, foram utilizados os *softwares* ATP e o seu ambiente MODELS, para realizar a simulação do circuito e a obtenção dos dados, e implementação das rotinas que constituem a função 87BI. Foi escolhido como estudo de caso um sistema com configuração de barramento duplo com disjuntor simples a quatro chaves.

Inicialmente, foi realizado no Capítulo 2 um estudo teórico sobre os conceitos fundamentais de barramentos, mostrando seus tipos de arranjos, características particulares da configuração de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves. Depois, partiu-se para a análise dos transformadores de corrente e sua participação nos sistemas de proteção. Os relés de proteção também foram revisados neste trabalho, com o intuito de entender quais são as suas funções, quais suas classificações e filosofias de proteção disponíveis para serem utilizadas. Por fim, a proteção diferencial foi abordada de forma minuciosa, para o pleno entendimento do algoritmo proposto e dos resultados deste trabalho. As vantagens da proteção diferencial de baixa impedância foram abordadas, bem como seus princípios e operação.

Em seguida, no capítulo 3 foi demonstrado a implementação do algoritmo da proteção diferencial de baixa impedância. A lógica foi implementada baseada naquela apresentada em IEEE (2009), que propõe o uso de zonas de proteção para cada um dos barramentos, bem como o método de construção das zonas, as lógicas de *trip* dos disjuntores. Para enriquecer o trabalho foram utilizadas as lógicas 1-de-1 e 2-de-2, apresentadas em Escudero (2016), com o intuito de melhorar a proteção no quesito detecção de faltas internas e externas, deixando para trás a lógica de sensibilidade adaptativa, proposta na literatura mais antiga.

O algoritmo de proteção de baixa impedância proposto foi testado através de simulações de diversas condições de faltas e manobras que os barramentos de uma subestação estão sujeitos. A

partir disso, foram analisados casos particulares, acompanhando o desempenho da proteção em cada um deles. Neste contexto, foram avaliadas as características de seletividade, confiabilidade e velocidade da proteção quando submetida a situações adversas, comumente encontradas em SEPs.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a lógica de proteção implementada é eficiente, atuando corretamente em todos os casos avaliados. Uma avaliação mais profunda da atuação da proteção mostra que esta é altamente confiável para faltas externas, mantendo a estabilidade e não atuando graças a implementação da lógica 2-de-2, que é altamente criteriosa na detecção de curtos externos, prevenindo uma atuação indevida da proteção. Para falta internas à zona de proteção, o algoritmo se comportou da forma esperada, com atuações rápidas e precisas, garantidas pela lógica 1-de-1. Os tempos de atuação da proteção proposta neste trabalho foram menores que 5 ms, para o modo de atuação rápida, e inferiores a 50 ms, para a lógica 2-de-2, esses valores estão muito abaixo dos requisitos solicitados pelo ONS, em (ONS, 2011), para barramentos de 230 kV, dessa maneira é categórico dizer que a proteção diferencial de baixa impedância é altamente recomendada neste contexto.

## 5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A partir dos bons resultados obtidos da avaliação da proteção diferencial de baixa impedância para a configuração de barramento duplo com disjuntor simples a quatro chaves por meio do *software* matlab, abrem-se as seguintes possibilidades de pesquisas que possam dar continuidade a este trabalho:

- Analisar a atuação da proteção diferencial de baixa impedância para outras configurações de barramento;
- Propor melhorias nas rotinas implementadas;
- Implementar uma lógica de proteção de falha do disjuntor no algoritmo;
- Analisar os efeitos de faltas evolutivas na atuação da proteção diferencial de baixa impedância;
- Implementar a função 87BI em MODELS para a configuração de barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves;

- Implementar o algoritmo proposto em *hardware*, afim de realizar testes comparativos com o relé SEL-487B;
- Criar algoritmo, baseado em IA, para que sejam criadas zonas de proteção automaticamente para diversas topologias de sistemas elétricos interligados;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. *Protection Application Handbook*. [S.l.]: BU TS / Global LEC Support Programme, 1999. Citado na página 13.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Citado na página 1.

ALVARENGA, M. T. S. *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP*. Monografia (Trabalho Final de Graduação em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, ABR. 2013. Citado na página 37.

ALVARENGA, M. T. S. *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP*. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, dez. 2014. Citado 3 vezes nas páginas iii, 9, and 10.

ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 5.

DUBE, L. *User Guide to Models in ATP*. USA, 1996. Citado na página 35.

ESCUADERO, A. M. P. *Proteção Diferencial de Barramentos na Transformada Wavelet*. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, jun. 2016. Citado 14 vezes nas páginas iii, iv, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 28, 31, and 66.

FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. *ATP – Alternative Transients Program: Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. CLAE: Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996. Citado na página 34.

FURST, G. *MODELS Primer*. [S.l.], 1994. Citado na página 35.

GUZMÁN, A.; LABUSCHAGNE, C.; QIN, B. L. Reliable busbar and breaker failure protection with advanced zone selection. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman*, 2004. Citado na página 40.

GUZMÁN, A.; LABUSCHAGNE, C.; QIN, B. L. Reliable busbar protection with advanced zone selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Apr. 2005. Citado na página 40.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Nenhuma citação no texto.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*. New York, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 6, 25, 26, 27, 36, 56, and 66.



- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. Santa Catarina: Edição do Autor, 2005. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 11.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. Santa Catarina: Edição do Autor, 2008. v. 3. Citado na página 2.
- MAMEDE, F. e. D. R. M. João. *Proteção de Sitemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: LTC, 2011. Citado na página 5.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 14, and 67.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2003. Citado na página 5.
- SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado na página 38.
- SILVA, K. M. e. *Fundamentos da Proteção de Barramentos - Notas de aula da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.], 2016. Citado 6 vezes nas páginas iii, 6, 7, 16, 17, and 18.
- VÁSQUEZ, F. A. M.; ESCUDERO, A. P.; BAINY, R. G.; SILVA, K. M. e. Fundamental of instantaneous-values-based busbar differential protection. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 20 and 21.
- VIANNA, P. de L. *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP*. Monografia (Trabalho Final de Graduação em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, jun. 2012. Citado 6 vezes nas páginas iii, 15, 17, 18, 22, and 24.
- VIANNA, P. de L. Mestrado em Engenharia Elétrica, *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP*. Brasília, DF: [s.n.], 2013. 71 f. Citado 3 vezes nas páginas iv, 34, and 36.
- ZIEGLER, G. *Numerica Differential Protection: Principles and Applications*. 2. ed. Berlin, Germany: Simiens, AG, 2012. Citado 5 vezes nas páginas iii, 14, 18, 19, and 21.