



**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PLANO ALFA  
GENERALIZADO APLICADO NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
DE BARRAMENTOS**

**JOÃO VITOR LEITE PEDROSA**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PLANO ALFA  
GENERALIZADO APLICADO NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
DE BARRAMENTOS**

**JOÃO VITOR LEITE PEDROSA**

**ORIENTADOR: KLEBER MELO E SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM - 753/20**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO - 2020**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PLANO ALFA  
GENERALIZADO APLICADO NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
DE BARRAMENTOS**

**JOÃO VITOR LEITE PEDROSA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

Prof. Mário Oleskovicz, D.Sc. (USP - S. Carlos)  
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 2 de dezembro de 2020.

## FICHA CATALOGRÁFICA

PEDROSA, JOÃO VITOR LEITE

Avaliação Experimental do Plano Alfa Generalizado Aplicado na Proteção Diferencial de Barramentos. [Distrito Federal] 2020.

xii, 93p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre em Engenharia Elétrica, 2020).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Barramentos

3. Plano Alfa Generalizado

I. ENE/FT/UnB

2. Proteção Diferencial

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEDROSA, J. V. L. (2020). Avaliação Experimental do Plano Alfa Generalizado Aplicado na Proteção Diferencial de Barramentos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM - 753/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Vitor Leite Pedrosa

TÍTULO: Avaliação Experimental do Plano Alfa Generalizado Aplicado na Proteção Diferencial de Barramentos.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado 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, gostaria de agradecer todo suporte e apoio dos meus pais, Ellis e Baltazar, sem a sua força e incentivo nada disso teria sido possível.

Agradeço também ao meu orientador, professor Kleber Melo e Silva, e ao professor Felipe Vigolvino Lopes por todos os ensinamentos e orientações ao longo desta trajetória. E pela grande oportunidade que me deram de fazer parte do laboratório de proteção de sistemas elétricos (LAPSE) da Universidade de Brasília.

Aos meus grandes amigos do LAPSE, Tiago, Vitor, Pedro, Eduardo, Gustavo, Letícia, Jônatas e Rodrigo por todos os momentos vividos durante essa jornada. Cada um de vocês foi fundamental para o meu desenvolvimento pessoal e técnico. Tenho uma gratidão imensa por terem entrado na minha vida e espero que continuemos juntos daqui para a frente.

Agradeço à UnB, por me proporcionar todo o conhecimento e experiência de vida.

À CAPES e FAP-DF, pelo apoio financeiro durante a elaboração desta dissertação.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, muito obrigado.

## RESUMO

Neste trabalho, a nova formulação alternativa do plano alfa generalizado, proposta por *Bainy & Silva*, foi aplicada na proteção diferencial de barramentos com o objetivo de avaliar experimentalmente o desempenho da técnica em comparação com o algoritmo de proteção do relé SEL-487B. Tal avaliação é justificada pela ausência de estudos que demonstrem as reais vantagens da utilização da técnica do plano alfa generalizado na proteção de barramentos, quando comparado com os algoritmos tradicionais reportados na literatura e utilizados por fabricantes. Para cumprir com os objetivos estabelecidos, o algoritmo do plano alfa generalizado alternativo foi integrado ao relé por meio da plataforma de programação livre disponibilizada pelo fabricante do dispositivo. O desempenho dos algoritmos é avaliado por meio da aplicação de diversos cenários de faltas internas, externas e evolutivas, via mala de testes no relé, em um sistema cuja configuração é barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, operando em 230 kV/60 Hz, modelado no *Alternative Transients Program* (ATP). Os resultados obtidos são analisados a partir dos critérios de confiabilidade, uniformidade da trajetória percorrida pelo elemento diferencial e tempos de atuação. Dessa maneira, foi mostrado como os algoritmos de proteção diferencial de barramentos embarcados em dispositivos reais podem ser beneficiados com o uso da técnica do plano alfa generalizado.

**Palavras-chave:** Barramentos, Proteção Diferencial, Plano Alfa Generalizado.

## ABSTRACT

In this work, the new alternative formulation of the generalized alpha plane, proposed by *Bainy & Silva*, was applied to busbar differential protection, in order to experimentally evaluate the performance of the technique in comparison with the protection algorithm of the SEL-487B relay. Such an assessment is justified by the absence of studies that demonstrate the real advantages of using the generalized alpha plane technique to protect busbars, when compared to the traditional algorithms reported in the literature and used by manufacturers. In order to reach the goals, the generalized alpha plane algorithm was integrated into the relay through the free-form programming interface provided by the device manufacturer. The performance of the algorithms is evaluated through the application of several scenarios of internal, external and evolving faults, via a test set in the relay, in a double bus single breaker five disconnects busbar, operating at 230 kV/60 Hz, modeled on the Alternative Transients Program (ATP). The obtained results are analyzed based on the criteria of reliability, uniformity of the trajectory covered by the differential element and operating times. Thus, it was presented how busbar differential protection algorithms embedded in real devices can benefit with the use of the generalized alpha plane technique.

**Keywords:** Busbars, Differential Protection, Generalized Alpha Plane.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iv
<b>Lista de Tabelas</b>	viii
<b>Lista de Símbolos</b>	ix
<b>Glossário</b>	xii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Motivação do Trabalho . . . . .	4
1.3 Objetivos e Contribuições do Trabalho . . . . .	5
1.4 Organização do Texto . . . . .	5
1.5 Publicações . . . . .	6
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	7
<b>Capítulo 3 – Fundamentos da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos</b>	16
3.1 Princípios da proteção diferencial de barramentos . . . . .	18
3.2 Função 87B baseada nos valores instantâneos das correntes . . . . .	18
3.3 Função 87B Baseada nos Fasores Estimados das Correntes . . . . .	22
3.3.1 Análise das condições de faltas para função 87B fasorial . . . . .	23
3.3.1.1 Faltas internas . . . . .	23
3.3.1.2 Faltas externas . . . . .	24
3.4 Zonas de Proteção . . . . .	28
3.5 Construção de uma lógica de zonas de proteção . . . . .	29
3.5.1 Configuração normal de operação . . . . .	29
3.5.2 Transferência da proteção . . . . .	31

3.5.3	Lógica de seleção de zonas . . . . .	33
<b>Capítulo 4 – Proteção Diferencial de Barramentos Aplicada em Dispositivo Real</b>		<b>36</b>
4.1	Funções de Proteção . . . . .	36
4.1.1	Elemento Diferencial Filtrado . . . . .	38
4.1.2	Elemento Direcional . . . . .	39
4.1.3	Lógica de Detecção de Falta . . . . .	40
4.1.3.1	Lógica de Detecção de Falta Externa . . . . .	41
4.1.3.2	Lógica de Detecção de Falta Interna . . . . .	42
4.1.4	Lógica de Seleção Dinâmica de Zona . . . . .	43
4.1.5	Lógica de Trip . . . . .	44
<b>Capítulo 5 – O método do Plano Alfa Generalizado</b>		<b>45</b>
5.1	Plano Alfa . . . . .	45
5.2	PAG original proposto por <i>Miller et al. (2010)</i> . . . . .	48
5.2.1	Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos . . . . .	50
5.3	PAG alternativo proposto por <i>Silva &amp; Bainy (2016)</i> . . . . .	51
5.3.1	Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos . . . . .	52
5.4	Novo PAG alternativo proposto por <i>Bainy &amp; Silva (2020)</i> . . . . .	53
5.4.1	Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos . . . . .	56
<b>Capítulo 6 – Análise dos Resultados</b>		<b>57</b>
6.1	Descrição do Sistema de Potência Analisado . . . . .	57
6.2	Integração do Algoritmo do PAG no Relé SEL-487B . . . . .	59
6.3	Simulações, Metodologia de Testes e Ajustes . . . . .	60
6.4	Resultados . . . . .	63
6.4.1	Caso 1: Análise Transitória de um Curto-Circuito Monofásico Interno . . . . .	64
6.4.2	Caso 2: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Monofásico Interno . . . . .	67
6.4.3	Caso 3: Análise Transitória de um Curto-Circuito Bifásico Interno . . . . .	69
6.4.4	Caso 4: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Bifásico Interno . . . . .	70
6.4.5	Caso 5: Análise Transitória de um Curto-Circuito Trifásico Interno . . . . .	72
6.4.6	Caso 6: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Trifásico Interno . . . . .	75
6.4.7	Caso 7: Curtos-Circuitos Externos . . . . .	76
6.4.8	Caso 8: Curto-Circuito Evolutivo sem Saturação de TC . . . . .	79
6.4.9	Caso 9: Curto-Circuito Evolutivo com Saturação de TC . . . . .	82

---

6.5 Síntese do Capítulo . . . . .	85
<b>Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>86</b>
7.1 Trabalhos Futuros . . . . .	89
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Diagrama de blocos das lógicas de <i>trip</i> 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012). . . . .	20
3.2	Comportamento das correntes de $i_{op}$ e $\bar{i}_{res}$ diante de uma falta interna (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)). . . . .	21
3.3	Comportamento das correntes de $i_{op}$ e $\bar{i}_{res}$ diante de uma falta externa sem saturação de TC (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)). . . . .	21
3.4	Comportamento das correntes de $i_{op}$ e $\bar{i}_{res}$ diante de uma falta externa com saturação de TC (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)). . . . .	21
3.5	Representação do plano $I_{op}$ x $I_{res}$ . . . . .	22
3.6	Condição de falta interna no barramento. . . . .	23
3.7	Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta interna. . . . .	24
3.8	Trajetória do elemento diferencial diante da ocorrência de uma falta interna. . . . .	24
3.9	Condição de falta externa no barramento. . . . .	25
3.10	Diagrama lógico para detecção de falta externa. . . . .	26
3.11	Característica de operação com <i>slope</i> adaptativo. . . . .	26
3.12	Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta externa sem saturação de TC. . . . .	26
3.13	Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta externa com saturação de TC. . . . .	27
3.14	Trajetória do elemento diferencial diante da ocorrência de faltas externas. . . . .	28

3.15	Zonas de proteção para um arranjo de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves. . . . .	30
3.16	Ligação do vão às barras e delimitação das zonas de proteção (Adaptado de (IEEE, 2009)). . . . .	30
3.17	Ilustração da zona de proteção com ponto cego para o vão. . . . .	31
4.1	Diagrama de blocos mostrando a lógica de proteção de barras do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)). . . . .	37
4.2	Legenda dos símbolos lógicos utilizados (SEL, 2018). . . . .	38
4.3	Diagrama lógico para o elemento diferencial filtrado do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)). . . . .	38
4.4	Característica de operação do elemento diferencial filtrado (Adaptada de (SEL, 2018)). . . . .	39
4.5	Diagrama lógico para o elemento direcional do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)). . . . .	40
4.6	Lógica de detecção de faltas do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)). . . .	41
4.7	Lógica de detecção de falta externa do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).	41
4.8	Lógica de detecção de falta interna do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).	42
4.9	Diagrama lógico para ativação da variável lógica de <i>trip</i> do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)) . . . . .	44
5.1	Representação do plano alfa proposto por Warrington (1962) . . . . .	45
5.2	Análise da operação no plano alfa. . . . .	47
5.3	Comparação do mapeamento. (a) Plano $I_{op}$ x $I_{res}$ . (b) Plano Alfa. . . . .	48
5.4	Conceito básico do plano alfa generalizado. . . . .	48
5.5	Utilização do PAG proposto por Miller <i>et al.</i> (2010) na proteção diferencial de barramentos. . . . .	51

---

5.6	Utilização do PAG proposto por Silva & Bainy (2016) na proteção diferencial de barramentos. . . . .	53
5.7	Comportamento do PAG proposto por Bainy & Silva (2020). . . . .	56
5.8	Utilização do PAG proposto por Bainy & Silva (2020) na proteção diferencial de barramentos. . . . .	56
6.1	Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência avaliado. . . . .	58
6.2	Diagrama de blocos ilustrando a integração da nova formulação do PAG alternativa no relé SEL-487B. . . . .	61
6.3	Metodologia de teste adotada para avaliação experimental. . . . .	62
6.4	Resposta no tempo para um curto-circuito AT interno. . . . .	65
6.5	Caso 1 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	66
6.6	Caso 2 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	68
6.7	Caso 2 - Tempos de atuação para fase A - (a) Resistência de falta. (b) Ângulo de incidência. . . . .	68
6.8	Resposta no tempo para um curto-circuito AB interno. . . . .	69
6.9	Caso 3 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	71
6.10	Caso 4 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	72
6.11	Caso 4 - Tempos de atuação - (a) Resistência de falta - Fase A. (b) Resistência de falta - Fase B. (c) Ângulo de incidência - Fase A. (d) Ângulo de incidência - Fase B. . . . .	72
6.12	Resposta no tempo para um curto-circuito ABC interno. . . . .	73
6.13	Caso 5 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	75
6.14	Caso 6 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	76
6.15	Caso 6 - Tempos de atuação - (a) Resistência de falta - Fase A. (b) Ângulo de incidência - Fase A. (c) Resistência de falta - Fase B. (d) Ângulo de incidência - Fase B. (e) Resistência de falta - Fase C. (f) Ângulo de incidência - Fase C. . . . .	77

---

6.16	Resposta no tempo para um curto-circuito AT externo. . . . .	78
6.17	Caso 7 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	79
6.18	Resposta no tempo - (a) Fase A. (b) Fase B. . . . .	80
6.19	Caso 8 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	83
6.20	Resposta no tempo para um curto-circuito AT evolutivo. . . . .	84
6.21	Caso 9 - (a) SEL-487B. (b) PAG. . . . .	84

## LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo dos trabalhos referentes ao trabalho de pesquisa. . . . .	15
3.1	Estados lógicos das <i>flags</i> de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras. . . . .	35
3.2	Lógica de <i>trip</i> dos disjuntores. . . . .	35
6.1	Parâmetros das linhas de transmissão. . . . .	58
6.2	Parâmetros dos transformadores de potência. . . . .	58
6.3	Parâmetros dos equivalentes remotos. . . . .	58
6.4	Ajustes das lógicas de proteção do relé SEL-487B. . . . .	62
6.5	Ajustes das zonas de proteção do relé SEL-487B. . . . .	63
6.6	Ajustes do PAG. . . . .	63
6.7	Significado das variáveis lógicas nas figuras de estudo de caso. . . . .	64
6.8	Tempos de operação para um curto-circuito monofásico em ms. . . . .	65
6.9	Tempos de operação para um curto-circuito bifásico em ms. . . . .	70
6.10	Tempos de operação para um curto-circuito trifásico em ms. . . . .	74
6.11	Tempos de operação para um curto-circuito evolutivo em ms. . . . .	82
6.12	Tempos de operação para um curto-circuito evolutivo em ms. . . . .	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a.a.$	Ao ano.
$B_1$	Barramento 1.
$B_2$	Barramento 2.
$CON1$	Detector de falta externa na zona 1 ativo.
$CON2$	Detector de falta externa na zona 2 ativo.
$DBPF$	<i>Digital Band Pass Filter.</i>
$DE1F$	<i>Directional Element Zone 1 .</i>
$f_p^1$	Flag de habilitação de corrente do circuito $p$ da zona 1.
$f_p^2$	Flag de habilitação de corrente do circuito $p$ da zona 2.
$f_p^{12}$	Flag de habilitação de corrente do circuito $p$ da zona 12.
$FAULT1$	Detector de falta interna na zona 1 ativo.
$FAULT2$	Detector de falta interna na zona 2 ativo.
$FDIF1$	<i>Filtred Diferencial Element Zone 1 Asserted.</i>
$FDIF2$	<i>Filtred Diferencial Element Zone 2 Asserted.</i>
$i_{sec}$	Valor da corrente instantânea do lado secundário do TC.
$I_{dif}$	Corrente diferencial.
$I_{op}$	Corrente de operação.
$I_{res}$	Corrente de restrição.
$\bar{I}_p$	Fasor de corrente do $p$ -ésimo vão.

---

$\bar{I}_L$	Fasor de corrente do terminal local da linha de transmissão.
$\bar{I}_R$	Fasor de corrente do terminal remoto da linha de transmissão.
$\bar{I}_M$	Fasor de corrente do terminal M do elemento equivalente do PAG.
$\bar{I}_N$	Fasor de corrente do terminal N do elemento equivalente do PAG.
$I_{pk}$	Corrente de <i>pick-up</i> .
$\bar{I}_{k,h}$	Corrente harmônica de ordem $h$ , para o terminal $k$ .
$K_{min}$	Limiar de ajuste para detecção de falta.
$MHz$	Mega-Hertz.
$ms$	milissegundo.
$O87P$	Ajuste de <i>pick-up</i> .
$P$	Número de circuitos conectados ao barramento.
$PB$	Condição de paralelismo de barras.
$SLP$	<i>Slope</i> , ajuste de sensibilidade do relé percentual.
$SLP1$	Ajuste de sensibilidade para faltas internas.
$SLP2$	Ajuste de sensibilidade para faltas externas.
$t$	tempo.
$TAP$	Fator de normalização das correntes dos secundários dos TCs.
$Z$	Zona.
$Z_1$	Zona 1.
$Z_2$	Zona 2.
$87B$	Proteção diferencial de barramento de baixa impedância.
$87BW$	Proteção diferencial de barramento de baixa impedância baseada na transformada <i>Wavelet</i> .
$87O1$	Elemento diferencial maior que a corrente de <i>pick-up</i> da zona 1 ativo.
$87O2$	Elemento diferencial maior que a corrente de <i>pick-up</i> da zona 2 ativo.

---

$1 - de - 1$	Lógica de atuação 1-de-1
$2 - de - 2$	Lógica de atuação 2-de-2
$\Delta t$	Intervalo de tempo.
$\Delta I_{res}$	Varição da corrente de restrição.
$\Delta I_{op}$	Varição da corrente de operação.
$\theta$	Fase do coeficiente do plano alfa.
$\Gamma$	Coefficiente do plano alfa.
$\Gamma_{re}$	Parte real do coeficiente do plano alfa.
$\Gamma_{im}$	Parte imaginária do coeficiente do plano alfa.
$\Gamma_A$	Elemento da fase A plano alfa.
$\Gamma_B$	Elemento da fase B plano alfa.
$\Gamma_C$	Elemento da fase B plano alfa.
$\beta$	Ângulo de referência do plano alfa generalizado.

## GLOSSÁRIO

AMR	Amarre
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BP	Chave Seccionadora de <i>by-pass</i>
CS	Chave Seccionadora
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
COP	Característica de Operação Parcial
DJ	Disjuntor
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAP-DF	Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal
IET	<i>Institution of Engineering and Technology</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAG	Plano Alfa Generalizado
SE	Subestação
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>

---

SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TDD	Transferência de disparo direto
TF	Transformador de potência
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O consumo de energia elétrica é uma variável complexa, cuja projeção é baseada em perspectivas sociodemográficas, macroeconômicas e econômicas setoriais. Por representar uma conjuntura de diversos fatores, o consumo de energia é um dos principais indicadores de desenvolvimento econômico e qualidade de vida de uma sociedade (ANEEL, 2008). Dessa forma, o desenvolvimento observado nas últimas décadas intensificou a demanda por este insumo. De fato, ao analisar a taxa de crescimento no consumo nacional de energia elétrica nas últimas duas décadas, percebe-se um aumento substancial em torno de 60% (EPE, 2019). E segundo as mais recentes projeções, vislumbra-se um aumento de 3,8% a.a. (ANEEL, 2019) para a próxima década. A fim de acompanhar as projeções futuras da demanda, a expansão dos empreendimentos do setor elétrico nos segmentos de geração, transmissão e distribuição torna-se uma medida necessária.

A ampliação dos sistemas elétricos de potência acarreta em um aumento do nível de complexidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). A integração de novos empreendimentos à rede básica existente torna-se um desafio, uma vez que a conexão de um novo tipo de equipamento implica em uma nova dinâmica de operação do sistema. De forma a ilustrar este cenário, é possível analisar os efeitos gerados pela inserção de fontes renováveis no SIN, mais especificamente as que são interfaceadas por conversores, como parques eólicos e usinas fotovoltaicas. A operação das lógicas de controle presentes nos conversores induzem distorções nas formas de onda das correntes e das tensões, de tal maneira que estes sinais passam a diferir daqueles tipicamente encontrados em sistemas com geração tradicional baseadas em máquinas síncronas (COSTA *et al.*, 2019). Nesse contexto, é necessária uma avaliação dos impactos causados pelas distorções ao longo de toda a rede para que seja possível avaliar como esta se comporta frente aos novos esforços que está sujeita.

Como consequência da expansão e do aumento no grau de complexidade dos sistemas elétricos de potência, é requerida uma maior exigência com relação aos níveis de confiabilidade e segurança do SIN, de forma a garantir um fornecimento de energia elétrica contínuo e de qualidade. Neste cenário, a utilização de modernos sistemas de proteção é essencial, pois possuem o objetivo de assegurar que condições anormais de operação sejam extintas de forma rápida e apropriada, preservando assim, a integridade dos equipamentos e evitando o desencadeamento de outros defeitos ao longo do sistema.

Dentre os elementos que constituem os sistemas de potência, os barramentos são considerados pontos críticos, por viabilizarem a interconexão de subsistemas de geração, transmissão e distribuição. Deste modo concentram e redistribuem o fluxo de potência para diversos equipamentos, como linhas de transmissão e transformadores. Dada sua relevância, manter a integridade deste equipamento é de suma importância.

As faltas que acometem os barramentos representam apenas de 6-7% do total de faltas em sistemas de potência (ANDERSON, 1999). De fato, ao analisar o levantamento realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a respeito do número de atuações dos sistemas de proteção na rede operacional do SIN em 2016, observa-se um número de 35 atuações para os sistemas de proteção de barramentos, o que é muito inferior quando comparado com linhas de transmissão e transformadores, cujos números são de 5.275 e 304 atuações, respectivamente. Apesar do baixo número de solicitações de atuação registrado pelos sistemas de proteção de barramentos, faz-se oportuno mencionar que aproximadamente 30% representam atuações incorretas. As principais causas relacionadas a estas atuações indevidas são erros humanos, deficiências nas instalações de comando, erros de montagem, defeito na cablagem dos transformadores de corrente (TCs) e testes realizados de forma errada. Quando comparado com outros equipamentos, a taxa de atuações incorretas pelos sistemas de proteção de barramentos é bastante elevada (ONS, 2017b; ONS, 2017c; VÁSQUEZ, 2019).

Ainda que a incidência de faltas em barramentos sejam raras, esse tipo de falha é de grande preocupação para agentes do setor, uma vez que envolvem elevados níveis de curto-circuito, perda de serviço, desligamentos forçados e perturbações graves no sistema. De acordo com ONS (2017a), os sistemas de proteção de barramentos devem ser capazes de garantir imunidade para os diferentes níveis de saturação dos TCs, com estabilidade para faltas externas, sensibili-

dade para faltas internas e seletividade, para desligar apenas os disjuntores conectados à seção defeituosa do barramento.

A respeito da proteção de barramentos, duas técnicas têm sido largamente utilizadas, a proteção diferencial de alta e de baixa impedância. Estas denominações dizem respeito ao valor da impedância que o relé impõe ao ser conectado em série com o secundário dos TCs. A escolha da técnica a ser aplicada para a proteção da barra baseia-se, principalmente, no tipo de arranjo utilizado. A proteção diferencial de alta impedância costumava ser a alternativa mais empregada quando do uso de relés estáticos analógicos, por apresentar vantagens como a imunidade à saturação de TCs, mas, em contrapartida, apresentava uma série de desvantagens como a dificuldade de aplicação em barramentos com topologia variável. Com o advento dos relés numéricos microprocessados, a proteção diferencial de baixa impedância (Código ANSI 87B) passou a ser a mais empregada, em virtude da sua flexibilidade de implementação via arquitetura distribuída, além de outras características como a facilidade de sua adequação após a expansão do barramento e a possibilidade de criação de zonas adaptativas que possibilitam a adequada proteção de barras com topologia variável (BEHRENDT *et al.*, 2010; GUZMÁN *et al.*, 2005; BAINY *et al.*, 2016).

Para implementação da função 87B, os fabricantes têm empregado dois tipos de formulação, aquelas que utilizam diretamente as amostras dos sinais de corrente e as que são baseadas nos fasores fundamentais estimados a partir dos sinais de corrente. No primeiro caso, a determinação das correntes de restrição e operação é realizada diretamente das amostras das correntes medidas em todos os vãos conectados ao barramento, de modo que a decisão de *trip* é feita a partir dos critérios estabelecidos nas tradicionais lógicas 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012). No segundo caso, a formulação é baseada nos fasores das correntes medidas nos vãos conectados ao barramento, de modo que a lógica de *trip* se dá pela análise do plano  $I_{op} \times I_{res}$ . Há ainda aqueles fabricantes que utilizam uma combinação dessas duas formulações para otimizar seus algoritmos, utilizando os elementos instantâneos para acelerar o processo de detecção e classificação da faltas, enquanto o elemento filtrado é utilizado na decisão de *trip*.

Nos últimos anos, tem-se observado uma tendência de mercado na utilização de funções de proteção baseadas no domínio do tempo. Contudo, as funções de proteção baseadas em fasores fundamentais ainda são as mais difundidas no setor. De fato, essa constatação justifica

a investigação por novas técnicas e aprimoramentos utilizando esse tipo de formulação, de forma a garantir uma operação segura, confiável e seletiva das funções de proteção de barramentos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A expansão dos sistemas elétricos de potência é acompanhada pela criação de novas subestações de energia (SEs) ou pela integração de novos vãos a subestações já existentes. De uma forma ou de outra, a complexidade na operação destas SEs aumentará, seja pela necessidade de arranjos de barras mais robustos e dinâmicos, capazes de realizar diversos tipos de manobras, seja pelas dificuldades de integração de novos vãos à instalações antigas, nas quais ocorrerá uma mudança do fluxo de potência, bem como a solicitação de novos tipos de esforços. Diante destas situações, os sistemas de proteção de barramentos devem ser capazes de evoluir para acompanhar as novas dinâmicas de operação impostas para este tipo de equipamento, a fim de evitar a perda de circuitos, operações indevidas, instabilidades no sistema e até mesmo a ocorrência de *blackouts*.

Dentro deste contexto, insere-se a busca por novos avanços nas tradicionais funções de proteção e a proposição de novas técnicas para a proteção de barramentos. Com relação as mais recentes contribuições para a área, destaca-se a utilização da formulação do plano alfa generalizado para a proteção diferencial de barramentos. Esta técnica é pouco difundida para a proteção de barramentos, tendo sido proposta originalmente para a proteção diferencial de linhas de transmissão. Porém, a sua aplicabilidade para outros equipamentos vem ganhando força, em parte graças aos desenvolvimentos e melhorias propostas na nova versão alternativa de Bainy & Silva (2020), que tornaram a técnica mais robusta e confiável.

A literatura mostra que a técnica do plano alfa generalizado cumpre com os requisitos da proteção de barramentos, segundo as avaliações computacionais. Porém há uma carência de estudos que mostrem os reais benefícios desta formulação quando comparados com algoritmos tradicionalmente utilizados e disponíveis em dispositivos reais. Os trabalhos mais relevantes sobre o tema apenas sugerem que a proteção diferencial de barramentos pode se beneficiar de alguma forma com a utilização desta técnica. Neste sentido, o presente trabalho visa preencher esta lacuna observada na literatura.

### 1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho da nova formulação alternativa do plano alfa generalizado, proposta por Bainy & Silva (2020), frente ao desempenho da função de proteção nativa do relé SEL-487B. Com isso, visa-se identificar sua aplicabilidade para a proteção deste tipo de equipamento, bem como suas potencialidades e limitações às diversas condições de operação e curto-circuito. Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Integrar ao relé SEL-487B a nova formulação alternativa do plano alfa generalizado reportada por Bainy & Silva (2020);
- Gerar uma base de casos no formato COMTRADE com diversos cenários de curtos-circuitos, internos, externos e evolutivos, a partir de simulações no *software* ATP; e
- Realizar os testes para comparar a performance da função de proteção diferencial utilizando a nova formulação alternativa do plano alfa generalizado com as funções de proteção nativas do relé.

Com o desenvolvimento deste trabalho, espera-se consolidar, por meio de validação experimental, a utilização da estratégia do plano alfa generalizado como uma alternativa eficiente na proteção diferencial de barras, mostrando suas vantagens e desvantagens frente a outras técnicas usualmente aplicadas.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, realiza-se o levantamento do estado da arte dos algoritmos de proteção de barramentos.
- No Capítulo 3, aborda-se a fundamentação teórica da proteção diferencial de barramentos, suas formas de implementação, desafios intrínsecos e particularidades.
- No Capítulo 4, apresentam-se as lógicas das funções de proteção embarcadas no relé SEL-487B.
- No Capítulo 5, aborda-se a fundamentação teórica do plano alfa generalizado e a aplicação da técnica na proteção diferencial de barramentos.

- No Capítulo 6, apresentam-se os resultados do desempenho do algoritmo nativo do relé e da técnica do plano alfa generalizado.
- Por fim, no Capítulo 7, apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e as sugestões de trabalhos futuros.

## 1.5 PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado possibilitaram a publicação dos seguintes artigos em anais de conferência internacional e nacional:

- **PEDROSA, J.V.L.**, HONORATO, T.R., SILVA, K. M., *Experimental Evaluation of an Alternative Generalized Alpha Plane Applied to Busbar Differential Protection*. Em: *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Brasília, Brasil, Outubro, 2019.
- **PEDROSA, J.V.L.**, SERPA, V.R., HONORATO, T.R., SILVA, K. M., *Experimental Evaluation of The Alternative Generalized Alpha Plane for Double-Circuit Series-Compensated Transmission Lines*. Em: *The IET 15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*. Liverpool, Reino Unido, Março, 2020.

## CAPÍTULO 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Impulsionadas pelo advento de relés microprocessados, diversas pesquisas na área de proteção de barramentos começaram a ser desenvolvidas nas décadas finais do século passado e início do presente século. Os primeiros algoritmos desenvolvidos são baseados na estimação dos fasores fundamentais dos sinais de corrente, e por vezes sinais de tensão, e preocupavam-se, de uma forma geral, em propor estratégias para realizar a distinção entre faltas dentro e fora da zona de proteção do barramento. Adicionalmente, os efeitos da saturação de TC nos esquemas de proteção propostos, já eram levados em consideração, culminando assim no desenvolvimento de diversas técnicas para contornar esta problemática.

Ao passar do tempo, com a evolução da eletrônica digital e por meio do desenvolvimento de novas técnicas de filtragem e processamento de sinais, fenômenos de alta frequência, até então negligenciados devido as limitações tecnológicas, passam a ser foco de diversas pesquisas para o desenvolvimento de algoritmos capazes de operar em tempos ultra-rápidos (PHADKE; THORP, 2009). A predominância de algoritmos baseados em fasores fundamentais, agora é acompanhada por propostas de algoritmos que se baseiam no domínio do tempo. Apesar de todas as evoluções ao longo do tempo, os principais desafios da proteção de barramentos continuam sendo objeto de estudo das mais recentes pesquisas, com o objetivo de encontrar soluções cada vez mais otimizadas (VÁSQUEZ; SILVA, 2019).

De forma a repassar as principais contribuições realizadas na área de proteção de barramentos, este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos mais relevantes presentes na literatura. Para tanto, em cada artigo são avaliados os princípios de operação, as lógicas de *trip*, a maneira com a qual o problema da saturação de TC é abordado e os casos avaliados.

Em um dos primeiros trabalhos de grande relevância, Andow *et al.* (1993) descrevem um relé microprocessado para a proteção de barras que inclui uma contramedida para a saturação

do TC. Foi utilizado um elemento discriminador de forma de onda, que, para o caso de faltas externas, assume a corrente diferencial resultante da saturação do TC como sendo quase zero, entre períodos subsequentes de saturação. Este elemento detecta o início da saturação comparando a mudança nas variações das correntes instantâneas de operação e restrição. A detecção desta variação faz com que a atuação do relé seja bloqueada por um tempo predeterminado. Apesar de garantir estabilidade para o caso de faltas externas, a técnica atrasa a operação para o caso de saturação associada à faltas internas.

Por sua vez, Sachdev *et al.* (2000) propõe uma técnica baseada na análise das impedâncias equivalentes de sequências positiva e negativa vistas pelos relés para distinguir entre faltas dentro e fora da zona de proteção. Para tanto, calcula-se o circuito equivalente de Thévenin de cada vão conectado a barra de referência, e então determina-se as impedâncias equivalentes de sequências, a partir dos fasores de corrente e tensão. Por meio da análise do diagrama R-X das impedâncias equivalentes, constatou-se que para o caso de faltas internas, as impedâncias vistas por todos os relés sempre estão localizadas no terceiro quadrante. Enquanto que para o caso de faltas externas, a impedância vista pelo relé situado no circuito com o defeito está sempre localizada no primeiro quadrante. Ao passo que as demais impedâncias vistas pelos outros relés estão localizadas no terceiro quadrante. A lógica de *trip* implementada é uma combinação lógica do resultado proveniente de cada relé. A técnica proposta mostrou-se estável durante a fase de saturação de TC. Não foi avaliada a performance do algoritmo frente aos casos de faltas evolutivas, as quais são faltas que iniciam fora da zona de proteção e evoluem para componente internos à zona, podendo afetar a mesma fase da falta original ou até mesmo outras (ESCUDEIRO, 2016; ANEEL, 2018). Apesar disso, uma avaliação da lógica de *trip* permite inferir que a técnica proposta não seria capaz de operar corretamente, devido a um sinal de bloqueio de operação após a detecção de falta externa.

Já Kasztenny *et al.* (2001) apresentam um novo algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância que combina elementos diferenciais e direcionais, com um módulo de detecção de saturação de TC. A função de proteção diferencial utiliza duas regiões para a característica de operação, como forma de aumentar a segurança do algoritmo. Para a região identificada como 1 pelos autores, que lida com baixas correntes diferenciais, um sinal de *trip* é enviado apenas se ambos elementos, diferencial e direcional, operarem. Para a segunda região, que lida com

correntes diferenciais mais altas, uma inclinação maior é utilizada para aumentar a segurança do relé. Se a saturação não for detectada pelo módulo dedicado, um sinal de *trip* é enviado baseado apenas no elemento diferencial. Caso haja a detecção de saturação, o comando de *trip* só pode ser enviado se houver uma consonância entre os elementos diferencial e direcional.

Eissa (2004) utiliza uma técnica baseada na formulação de uma função direcional que seja proporcional aos sinais de corrente de pós-falta e de tensão de pré-falta, para distinguir entre faltas dentro e fora da zona de proteção do barramento. Para realização da técnica, são instalados relés em cada um dos circuitos conectados a barra. Estes monitoram as variações de tensão e corrente, caso a variação seja maior que um limiar estabelecido, procede-se com o cálculo das funções direcionais que irão discriminar entre os tipos de falta. Estas funções são calculadas a partir das tensões de pré-falta e da adição ou subtração das correntes de pré-falta em relação à amostra atual de corrente. Além disso, é calculada a potência normal direcional para realizar a tomada de decisão de *trip*. A avaliação da performance mostra tempos rápidos de resposta para o caso de faltas internas e externas, da ordem de pouco mais de 1/8 de ciclo. Quando avaliado o grau de severidade de saturação de TC, a técnica demorou um pouco mais de 1/4 de ciclo para reconhecer a falta como externa, o que pode representar um problema na identificação de faltas evolutivas, assunto esse não abordado pelo autor.

De uma forma inovadora, Guzmán *et al.* (2005) propõem um sistema de proteção de barras com seleção de zonas adaptativas e cuja operação seja segura para os casos de faltas externas com severa saturação de TC e de rápida detecção para faltas que evoluem de externas para internas. Para realizar a definição das zonas adaptativas, o autor recorre à teoria dos grafos. As entradas do algoritmo são valores lógicos relacionados à maneira com que os circuitos estão conectados na barra e como cada barra é ligada entre si. Ou seja, avaliam-se os contatos de chaves seccionadoras e disjuntores por meio da qual os vãos e barras se conectam. A partir das entradas fornecidas, a lógica de seleção de zonas é capaz de determinar quais barras e circuitos estão inclusos em determinada zona de proteção, bem como a identificação da zona faltosa e quais circuitos devem receber o sinal de *trip* durante a operação da função de proteção. Em relação ao algoritmo de proteção, os autores fazem uso de três elementos: elemento diferencial instantâneo para a detecção de falta, elemento diferencial filtrado para tomada de decisão de *trip* e elemento direcional filtrado para assegurar uma operação segura, seguindo dois critérios.

---

A detecção de falta é capaz de distinguir entre faltas externas e internas, a partir da taxa de variação das correntes de operação e restrição calculadas por meio do elemento instantâneo. A ocorrência de falta externa, implica na ativação do modo seguro de operação, no qual muda-se o *slope* da proteção. A lógica de *trip* é realizada pela análise do elemento direcional, bem como as condições de operação dentro do plano  $I_{op} \times I_{res}$ .

Kang *et al.* (2005) descrevem o projeto, avaliação e implementação de um relé diferencial de barramento adequado para operação com TCs de medição. O relé, cuja operação é baseada na análise do plano  $I_{op} \times I_{res}$ , opera em conjunto com um algoritmo de detecção de saturação, que é capaz de identificar efetivamente o início e o fim de cada saturação usando uma técnica baseada no método de diferenças finitas de terceira ordem aplicada ao sinal de corrente. Um sinal de bloqueio é ativado imediatamente após o início da saturação e é mantido ativo até que o período de saturação mais um atraso adicional de um ciclo tenha transcorrido. Para faltas internas que resultam em saturação do TC, o relé emite um comando de *trip* antes que o sinal de bloqueio seja ativado. Para faltas externas que resultam em saturação do TC, o sinal de bloqueio chega primeiro e o comando de *trip* permanece inativo. Essa técnica garante estabilidade em casos de falta externa com saturação do TC, ao mesmo passo que não atrasa o tempo de operação do relé caso ocorra uma falta interna com saturação do TC. No entanto, dificuldades podem surgir diante da ocorrência de faltas evolutivas, porque a segunda ocorrência de falta pode ser detectada como o início ou o fim de uma saturação. Como forma de contornar a fragilidade da técnica utilizada, Kang *et al.* (2008) propõem uma modificação, por meio da qual é capaz de estimar a corrente no secundário do TC de forma correta, independente do grau de saturação e da presença de fluxo remanescente. Para isso, o fluxo magnético no núcleo é estimado, e assim determina-se a corrente de magnetização em conjunto com a curva de magnetização.

Allah (2016) apresenta uma técnica para adaptar a característica de operação da proteção diferencial tradicional. Para isso o autor recorre ao princípio da alienação, o qual determina o grau de variância entre duas grandezas, a fim de evitar os efeitos da saturação do TC. Basicamente, determina-se a correlação, através dos coeficientes de alienação (os quais referem-se ao grau de variância dos sinais avaliados), entre a corrente secundária distorcida no circuito onde ocorreu a falta externa e o somatório das correntes nos demais circuitos. A partir da análise de variância dos sinais, adapta-se a característica de operação do relé.

Através do uso de um tipo de proteção diferencial pouco recorrente, Hossain *et al.* (2017) introduzem a utilização de uma característica de operação parcial (COP) para discriminação de faltas internas e externas em diferentes zonas de proteção. Esta característica é computada por meio da soma sucessiva de correntes terminais qualificadas, as quais são aquelas que superam um valor mínimo. Desta forma, o algoritmo proposto é capaz de distinguir entre faltas, mesmo que ocorra saturação de TC.

A evolução dos componentes de *hardware*, permitiu um aumento na capacidade de processamento e por consequência a captação de sinais na ordem de MHz. Tal fato, permitiu a utilização da teoria de ondas viajantes na proteção de sistemas elétricos. Na prática, os componentes transitórios gerados por faltas contêm uma grande quantidade de informações, como o tipo, o tempo e a direção da falta. Se essas características puderem ser extraídas com precisão, é obtida uma proteção ultra-rápida. Além disso, em geral, antes da saturação do TC, a proteção baseada em componentes de alta frequência já é capaz de classificar a falta como interna ou externa. Portanto, a saturação do TC não produz um efeito negativo no desempenho dessa proteção (ZOU; GAO, 2012).

Utilizando-se dessa prerrogativa, Zou & Gao (2012) recorrem a teoria de ondas viajantes para propor uma técnica ultra veloz de proteção de barramentos. Para isso é realizada uma análise da direcionalidade das ondas incidentes ocasionadas pela falta. Quando uma falta incide sob um barramento, a direcionalidade das primeiras ondas detectadas em todos os circuitos conectados ao barramento é positiva. Enquanto que para o caso de faltas externas, a direcionalidade das ondas no circuito faltoso será negativa, ao passo que nos demais circuitos são observadas ondas positivas. Durante um período muito curto de pós-falta, um critério que discrimina a direção da falta pode ser estabelecido de acordo com as relações integrais de amplitude entre as ondas positivas e negativas. E então a partir da identificação da falta, constrói-se um esquema de proteção para o barramento.

Seguindo a mesma linha, Song & Zou (2015) utilizam o mesmo princípio para distinguir entre faltas, porém a análise de polaridade é realizada a partir de correntes incrementais. Dessa forma, as altas taxas de amostragens, requeridas para a análise de ondas viajantes, são substituídas por valores mais modestos, compatíveis com a grande maioria dos dispositivos de proteção. Além disso, uma transformação modal é utilizada para desacoplar o sistema trifásico em um

---

sistema de componentes independentes, a fim de evitar problemas computacionais relacionados ao acoplamento mútuo entre variáveis de corrente de fase. Uma falta interna é declarada quando a variável do critério de proteção do barramento iguala-se ao número de circuitos conectados ao barramento.

Outra técnica tem sido utilizada para implementar esquemas de proteção ultra-rápidos, inclusive para a proteção de barramentos: a transformada *wavelet*. Comparada com as técnicas que aplicam a transformada de Fourier, a transformada *wavelet* possui maior flexibilidade durante a análise de diferentes faixas de frequência dos sinais monitorados, viabilizando a avaliação de componentes de alta frequência de forma segura e confiável. Esta característica é largamente utilizada para contornar a problemática da distinção entre faltas dentro e fora da zona de proteção do barramento, dada a ocorrência de saturação do TC.

Utilizando-se destes benefícios, Eissa (2004) introduz um esquema de proteção diferencial de barramentos utilizando a transformada *wavelet* contínua. Para isso, as wavelets de Morlet são usadas como função base. A avaliação do esquema de proteção mostra bom desempenho da função de proteção durante os períodos de saturação de TC. Similarmente, Mohammed (2005) apresenta a técnica baseada na transformada *wavelet packet* para extrair as características de um sinal de corrente com falta. Esta ferramenta pode decompor o sinal de falta em diferentes bandas de frequência no domínio do tempo e a partir destes sinais decompostos extraídos forma-se o sinal diferencial. Já Valsan & Swarup (2007) propõe a utilização de um algoritmo direcional, cuja formulação é baseada na transformada *wavelet* discreta, para distinguir entre faltas internas e faltas externas. Em (GAFOOR; RAO, 2011), índices de faltas baseados em coeficientes de *wavelet* são comparados com valores limites para distinguir entre faltas internas e externas. Algoritmos diferenciais baseados nas funções da *wavelet Mexican Hat* e Meyer são relatados em (EISSA, 2012) e (EISSA, 2013a), respectivamente, apresentando bons resultados, mesmo no caso de saturação de TC. Em (EISSA, 2013b), é relatado um esquema diferencial baseado na transformação contínua de *wavelet*, o qual obteve bom desempenho, inclusive para faltas com severa saturação de TC.

Apesar de garantirem tempos rápidos de operação para a maior parte dos casos de faltas internas e operação segura para faltas externas com saturação de TC, os algoritmos apresentados não abordam apropriadamente os casos de faltas evolutivas. Para contornar esta situação, Silva

---

*et al.* (2017) apresentam um novo algoritmo de proteção diferencial de barramento de baixa impedância (função 87BW) baseado na transformada *wavelet*. Por meio desta função, realiza-se o mapeamento dos fundamentos da proteção diferencial baseada nos valores instantâneos de corrente para o domínio *wavelet*. Desse modo, as tradicionais lógicas de *trip* 1-de-1 e 2-de-2 foram adaptadas para funcionar com coeficientes de *wavelet* referentes as energias das correntes para operação e restrição.

Um outro tipo de abordagem tem ganhado espaço na última década devido aos desenvolvimentos nos campos de inteligência artificial e teorias probabilísticas. Esta abordagem consiste na aplicação da teoria de aprendizado estático para o desenvolvimento de modelos capazes de identificar a zona de incidência da falta. Dentre as tendências neste tipo de abordagem, um conjunto de publicações propõe o desenvolvimento de máquinas de suporte e relevância vetorial para a classificação das faltas, estando esses métodos condicionados à realização de treinamentos *off-line* prévios (CHOTHANI *et al.*, 2011; CHOTHANI *et al.*, 2012; CHOTHANI; BHALJA, 2016; JENA; BHALJA, 2017a; GIL; ABDOOS, 2017).

Também de forma inovadora, Vásquez & Silva (2019) propõem um algoritmo de proteção diferencial de barramentos baseado no conceito de potência instantânea. A partir dos valores de corrente instantânea e de uma estratégia de memória de tensão, são calculadas as potências instantâneas para cada fase de cada circuito conectado ao barramento. De posse desses valores, são definidas as potências de operação e restrição. A lógica de *trip* do algoritmo é baseada nas tradicionais lógicas 1-de-1 e 2-de-2. O algoritmo oferece tempos reduzidos de decisão pelo fato do sinal de potência utilizado oscilar com duas vezes o valor da frequência fundamental. Para lidar com os efeitos da saturação de TC, os autores recorrem a um reforço da grandeza de restrição através da estimação de uma potência harmônica de segunda ordem. Os resultados apresentados revelam que o algoritmo é bastante robusto, tendo sido avaliado para diversos cenários de faltas internas, externas com e sem saturação de TC e faltas evolutivas. Quando comparado com o algoritmo de proteção diferencial de barras baseado em valores instantâneos de corrente, a atuação do algoritmo proposto por Vásquez & Silva (2019) se mostrou cerca de duas a quatro vezes mais rápido.

Dentre as mais recentes contribuições para o desenvolvimento da proteção diferencial de barramentos, destaca-se a utilização da técnica do plano alfa generalizado (PAG), proposto

por Miller *et al.* (2010). O PAG foi originalmente proposto para linhas de transmissão com múltiplos terminais e consiste em uma formulação matemática que mapeia os  $n$  terminais de uma linha em um equipamento equivalente de apenas dois terminais, de tal forma que a proteção diferencial baseada no plano alfa possa ser utilizada. Apesar de sua proposição original ser voltada para proteção de linhas de transmissão, a técnica do PAG pode ser utilizada em qualquer equipamento, inclusive barramentos, como avaliado em Bainy *et al.* (2016), Jena & Bhalja (2017b). Apesar dos benefícios de poder representar uma característica de restrição mais personalizada para o equipamento protegido, a formulação original do PAG apresenta uma problemática quando aplicada a proteção de barramentos. Devido ao grande número de circuitos conectados ao barramento, o processo de determinação das correntes equivalentes pode sofrer um pequeno atraso por conta de uma possível mudança no ângulo de referência utilizado na formulação, tal fato pode ocasionar em um atraso de operação da função de proteção.

Versões alternativas do PAG foram propostas por Silva & Bainy (2016) e Bainy & Silva (2020), de forma a obter uma formulação mais simples e que tenha um controle maior sobre a localização dos pontos em regime permanente de falta na característica de operação utilizada. Ao avaliar a performance das formulações alternativas, percebe-se um ganho no desempenho da função de proteção diferencial frente a formulação original proposta por Miller *et al.* (2010). Neste contexto, mostra-se que é possível melhorar o desempenho da proteção diferencial de barramentos quando aplicada a nova formulação alternativa do PAG, utilizando-se das melhorias propostas nas versões modificadas, como demonstrado em (BAINY; SILVA, 2020).

Na literatura de alta relevância a respeito da aplicação da técnica do PAG para a proteção diferencial de barramentos, há uma lacuna que abre brechas para contestar os ganhos oferecidos por este algoritmo na proteção deste tipo de equipamento. Foi observado que o desempenho do PAG não é comparado com outros algoritmos tradicionais de proteção diferencial de barramentos, como aquele reportado por Guzmán *et al.* (2005). Neste contexto, o presente trabalho almeja preencher essa lacuna, com uma análise comparativa baseada em resultados experimentais acerca do desempenho da versão alternativa do algoritmo PAG, frente ao algoritmo de proteção utilizado em um dispositivo real.

Neste capítulo, foram apresentadas as principais contribuições expostas na literatura referente a proteção de barramentos. De forma a concatenar todas as informações presentes no

capítulo, organizou-se a Tabela 2.1, a qual apresenta as técnicas utilizadas em cada um dos trabalhos avaliados e qual tipo de função é proposta, diferencial ou direcional.

**Tabela 2.1.** Resumo dos trabalhos referentes ao trabalho de pesquisa.

Referência	Técnica Utilizada											
	ET	12	PD	DF	TW	MV	OV	PI	PA	CI	CA	DO
Andow <i>et al.</i> (1993)*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
Sachdev <i>et al.</i> (2000)*	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kasztenny <i>et al.</i> (2001)*	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eissa (2004)+	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Guzmán <i>et al.</i> (2005)*+	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kang <i>et al.</i> (2005)*	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Kang <i>et al.</i> (2008)*	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Allah (2016)*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-
Hossain <i>et al.</i> (2017)*	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zou & Gao (2012)+	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
Song & Zou (2015)+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-
Eissa (2004)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Mohammed (2005)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Valsan & Swarup (2007)+	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Gafoor & Rao (2011)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Eissa (2012)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Eissa (2013a)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Eissa (2013b)*	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2017)*	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
Chothani <i>et al.</i> (2011)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Chothani <i>et al.</i> (2012)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Chothani & Bhalja (2016)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Jena & Bhalja (2017a)	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Gil & Abdoos (2017)*	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Vásquez & Silva (2019)*	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
Bainy <i>et al.</i> (2016)*	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
Jena & Bhalja (2017b)*	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
Bainy & Silva (2020)*	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-

**Legenda:**

\*: Diferencial

ET: Equivalente de *Thévenin* de seqs. + e -

PD: Potência Direcional

TW: Transformada Wavelet

OV: Ondas Viajantes

PA: Plano Alfa Generalizado

CA: Coeficiente de Alienação

+: Direcional

12: Lógicas 1-de-1 e 2-de-2

DF: Diferenças Finitas

MV: Máquina Vetorial

PI: Potência Instantânea

CI: Corrente Incremental

DO: Discriminador de onda

## CAPÍTULO 3

# FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS

Os barramentos podem ser considerados pontos críticos em um sistema elétrico de potência visto que são o ponto de convergência de diversos circuitos, sejam eles de geração, transmissão ou carga. Assim sendo, os barramentos são essenciais para manter a integridade dos sistemas de potência.

A proximidade e a conexão de vários equipamentos elétricos no perímetro de uma subestação implica em uma alta concentração de fontes de curto-circuito, de tal maneira que o nível de curto na ocorrência de uma falta em um barramento é bastante elevado. De modo a contornar esta situação, normalmente recorre-se ao uso de filosofias de proteção de alta velocidade, dedicadas aos barramentos para limitar os danos aos equipamentos e ao sistema elétrico, mantendo a maior carga possível em serviço. Além disso, o isolamento desnecessário de um barramento, por seu sistema de proteção, pode alterar consideravelmente a topologia da rede elétrica e, mesmo sem outras contingências, acarretar em problemas de estabilidade do sistema. Portanto, a segurança dos esquemas de proteção de barramento é de suma importância (IEEE, 2009).

Ainda assim, durante muito tempo, especialistas em proteção discutiam a viabilidade de fornecer um esquema de proteção dedicado aos barramentos. De um lado, a falta de uma proteção dedicada implicava na extinção de faltas da barra por meio da zona de proteção de retaguarda de linhas de transmissão, cuja proteção era feita pela função de distância ou de sobrecorrente. Em termos de confiabilidade, essa solução tinha um caráter satisfatório, porém era acompanhada de uma atuação bastante lenta, prolongando os danos causados pela falta em toda a estrutura do barramento e aos equipamentos conectados. Tal fato sugeria que a proteção rápida e dedicada do barramento poderia ser considerada necessária, mesmo que falhas neste tipo de equipamento ocorram com pouca frequência (PAITHANKAR; BHIDE, 2003; ANDERSON, 1999).

---

Por outro lado, argumentava-se que a existência de uma proteção dedicada possibilitaria a ocorrência de operações indevidas do sistema de proteção, causando interrupção no fornecimento aos circuitos conectados ao barramento e criando problemas de estabilidade para o sistema integrado. Essa possibilidade, aliado ao fato de faltas neste tipo de equipamentos serem raras, compunham os argumentos para não se utilizar uma proteção dedicada para barramentos (PAITHANKAR; BHIDE, 2003; ANDERSON, 1999).

A discussão a respeito das filosofias de proteção de barramentos foi superada com a gradual evolução dos relés, que passaram a integrar em suas funcionalidades a identificação de fontes de erros que levavam à operação indevida por parte do algoritmo de proteção, como a identificação do fenômeno de saturação do transformador de corrente, bem como a incompatibilidade no uso de TCS com diferentes relações de transformação. Outro fator importante nessa mudança de atitude é o crescente aumento no fluxo de potência nos modernos sistemas de alta tensão, o que torna a eliminação tardia de faltas um problema sério o qual não poderia ser mais tolerado (ANDERSON, 1999).

Desse ponto em diante, definiram-se os requisitos de desempenho do sistema de proteção de barramentos, os quais devem ser projetados a fim de garantir os seguintes critérios (IEEE, 2009):

- 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 desconectada;
- Rapidez: capacidade de atuar de forma rápida, visando reduzir a duração das faltas e minimizar os danos aos equipamentos protegidos;
- Sensibilidade: habilidade em detectar os mais diversos cenários de falta para os quais o sistema foi projetado;
- Segurança: capacidade de evitar operações indevidas dos mecanismos, garantindo a não atuação da proteção em condições normais de operação.

### 3.1 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS

A função de proteção diferencial numérica de baixa impedância (código IEEE/ANSI 87B) recebe essa denominação pois a impedância imposta pelo relé ao secundário do TC é de baixa magnitude, de tal modo a minimizar a saturação do seu núcleo magnético (ANDERSON, 1999). Esta função pode ser implementada de duas formas: baseada nos valores instantâneos das correntes (função 87B instantânea), ou baseada nos fasores estimados das correntes (função 87B fasorial). A utilização de elementos fasoriais é amplamente disseminada nos algoritmos de proteção de barramentos, porém, com o aumento das exigências por tempos de atuação mais rápidos, diversos fabricantes têm recorrido a estratégias que fazem o uso de elementos instantâneos para acelerar o processo de detecção de faltas (ZIEGLER, 2012).

A proteção diferencial está baseada na lei de *Kirchhoff* das correntes (LKC), dessa forma, o somatório das correntes que entram ou saem de um barramento, deverá ser igual a zero (WARRINGTON, 1962). A função 87B, na verdade, implementa o princípio da proteção diferencial percentual, portanto, baseia-se na comparação entre uma corrente de operação e uma corrente de restrição. Nas próximas seções são discutidas as formas de implementação da função 87B.

### 3.2 FUNÇÃO 87B BASEADA NOS VALORES INSTANTÂNEOS DAS CORRENTES

A função 87B baseada nos valores instantâneos das correntes calcula as grandezas de operação ( $i_{op}$ ) e de restrição ( $i_{res}$ ) diretamente das amostras de corrente, como segue (ZIEGLER, 2012):

$$i_{op} = \left| \sum_{p=1}^P i_p \right| \quad e \quad i_{res} = \sum_{p=1}^P |i_p| \quad (3.1)$$

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

Para que o relé diferencial seja sensibilizado, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$i_{op} > i_{pk} \quad e \quad i_{op} > SLP \cdot i_{res} \quad (3.2)$$

onde  $i_{pk}$ , ou corrente de *pick-up*, é a corrente mínima de operação, que deve ser ajustada para evitar atuações indevidas durante a operação normal do sistema de potência, ocasionadas pela corrente de carga, erros de medição dos TCs, transitórios de chaveamento e correntes solicitadas

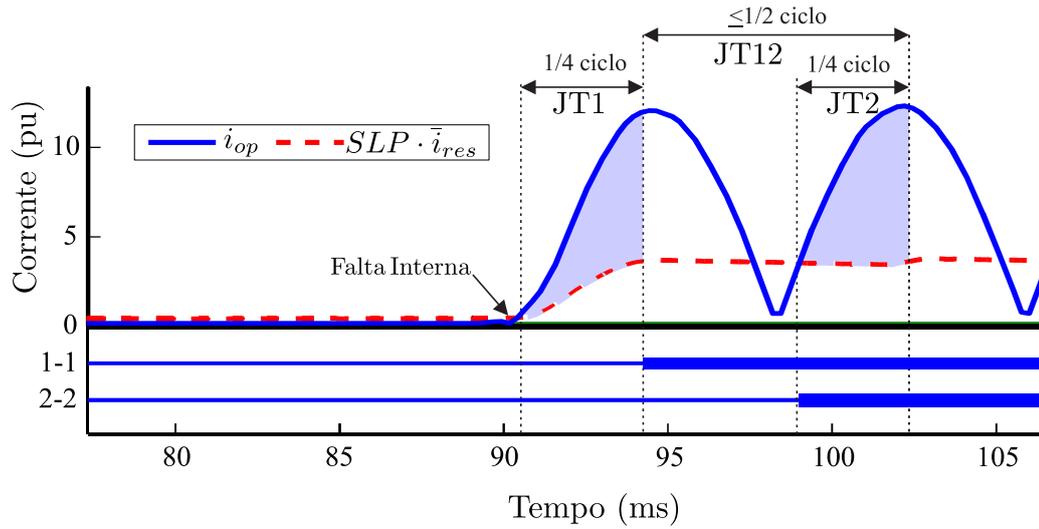
por equipamentos como pára-raios, transformadores auxiliares e transformadores de potencial (BEHRENDT *et al.*, 2010). A constante  $SLP$ , denominada de *slope*, é o ajuste percentual para a curva de atuação da proteção, e deve ser ajustada de tal forma a garantir maior sensibilidade ao relé. Além disso, de forma a contornar instabilidades do algoritmo e erros de operação durante a condição de faltas externas que podem levar a saturação do TC, faz-se necessário manter a corrente de restrição estável e sem oscilações. Para isso, utiliza-se a corrente de restrição suavizada,  $\bar{i}_{res}$ , descrita em (KUMAR; HANSEN, 1993; ZIEGLER, 2012).

Nos relés de proteção de barramentos que utilizam a função 87B instantânea, as condições estabelecidas na Equação (3.2) são avaliadas, tipicamente, por meio das lógicas auxiliares 1-de-1 e 2-de-2, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.1 (KUMAR; HANSEN, 1993; ZIEGLER, 2012). Estas lógicas comparam  $i_{op}$  e  $\bar{i}_{res}$  dentro de janelas de tempo (JT), que se iniciam a partir do primeiro instante em que a condição  $i_{op} > SLP \cdot \bar{i}_{res}$  é satisfeita. A partir das comparações estabelecidas é possível identificar as condições de faltas internas e externas, para então proceder com a tomada de decisão de *trip*.

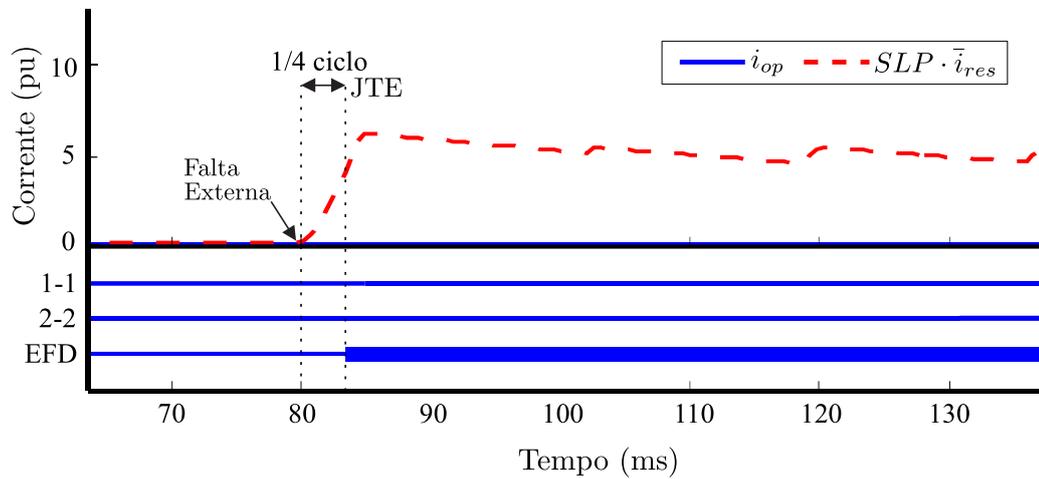
A lógica 1-de-1, conhecida como modo de operação rápido, é ativada quando as condições estabelecidas na Equação (3.2) são satisfeitas imediatamente após o início da falta e a taxa de variação da corrente de restrição filtrada ( $d\bar{i}_{res}/dt$ ) é positiva e maior que um limiar  $k_s$ , o que deve ocorrer para faltas internas à zona de proteção. Para esse cenário, tanto  $\bar{i}_{res}$ , quanto  $i_{op}$  aumentam seus valores simultaneamente, porém o ajuste de sensibilidade  $SLP$  que multiplica  $\bar{i}_{res}$  é menor que um, dessa forma a corrente de operação irá ultrapassar a corrente de restrição, habilitando o início da contagem de tempo. Caso o contador de tempo verifique que  $i_{op}$  permanece maior que  $\bar{i}_{res}$  em pelo menos 1/4 de ciclo 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, conforme apresentado na Figura 3.2. De acordo com os critérios de dimensionamento de TC, o tempo de 1/4 de ciclo representa o tempo máximo que o TC leva para entrar na sua região de saturação (ZIEGLER, 2012).

A lógica 2-de-2 deve operar se as condições estabelecidas na Equação (3.2) são satisfeitas por dois semi-ciclos consecutivos. Esta 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

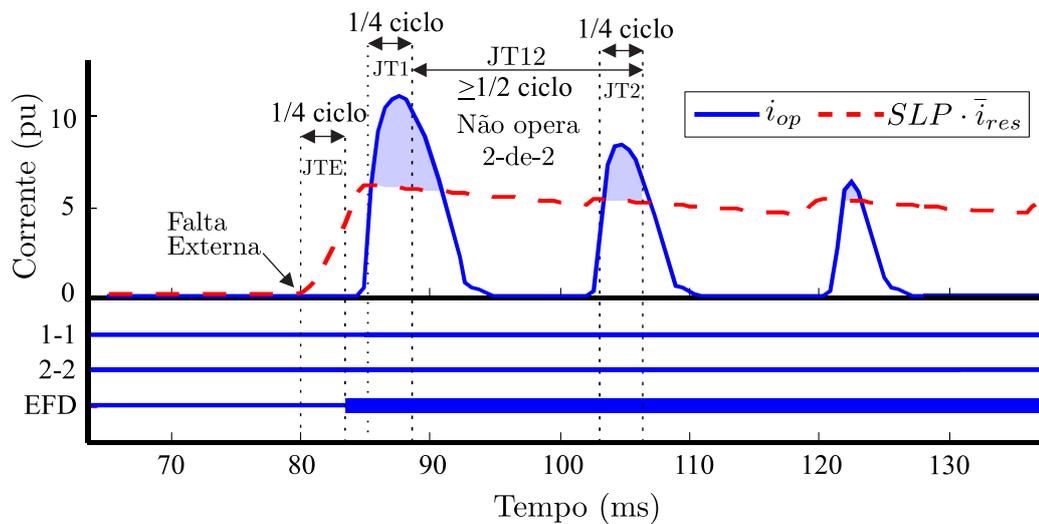




**Figura 3.2.** Comportamento das correntes de  $i_{op}$  e  $\bar{i}_{res}$  diante de uma falta interna (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)).



**Figura 3.3.** Comportamento das correntes de  $i_{op}$  e  $\bar{i}_{res}$  diante de uma falta externa sem saturação de TC (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)).



**Figura 3.4.** Comportamento das correntes de  $i_{op}$  e  $\bar{i}_{res}$  diante de uma falta externa com saturação de TC (Adaptada de (VÁSQUEZ, 2019)).

### 3.3 FUNÇÃO 87B BASEADA NOS FASORES ESTIMADOS DAS CORRENTES

Em sua forma mais recorrente, para aplicações de proteção de barramentos, a função 87B baseada nos fasores estimados das correntes calcula as grandezas de operação ( $I_{op}$ ) e de restrição ( $I_{res}$ ) como (ZIEGLER, 2012):

$$I_{op} = \left| \sum_{p=1}^P \bar{I}_p \right| \quad e \quad I_{res} = \sum_{p=1}^P |\bar{I}_p| \quad (3.3)$$

onde  $P$  representa o número de circuitos conectados ao barramento e  $\bar{I}_p$  é o fasor de corrente do  $p$ -ésimo vão.

Assim como no caso da função 87B instantânea, o relé diferencial que implementa a função filtrada é sensibilizado a partir de comparações entre a corrente de operação e a corrente de restrição. Para o elemento filtrado, as seguintes condições são estabelecidas:

$$I_{op} > I_{pk} \quad e \quad I_{op} > SLP \cdot I_{res} \quad (3.4)$$

A análise das correntes de operação e restrição é realizada por meio do plano  $I_{op} \times I_{res}$ . Este plano é uma ferramenta gráfica, cuja representação é realizada através do gráfico da corrente de operação em função da corrente de restrição, em um plano cartesiano. A partir das condições estabelecidas na Equação (3.4), divide-se o plano em duas regiões distintas. A região abaixo da reta formada pela corrente de *pick-up* e a curva ajustável através do SLP em função da corrente de restrição constitui a chamada região de restrição, e a área acima desta representa a chamada região de operação. A Figura 3.5 ilustra a representação do plano  $I_{op} \times I_{res}$ .

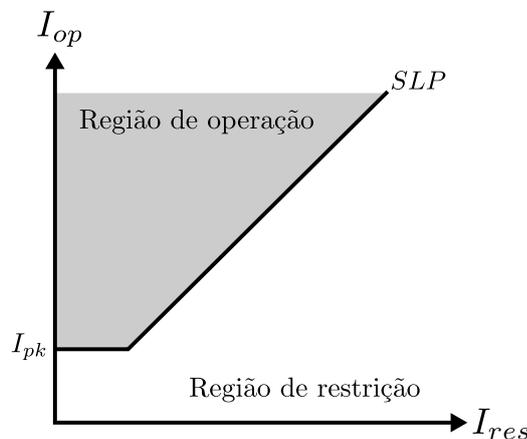


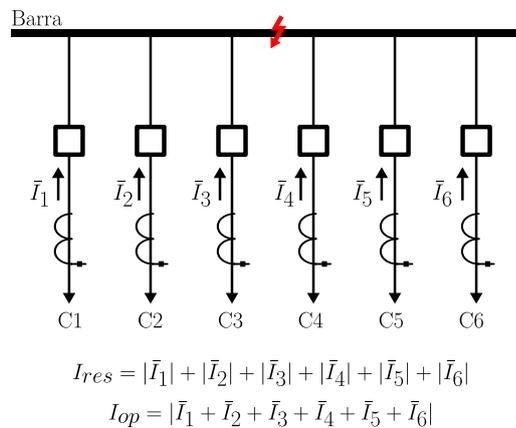
Figura 3.5. Representação do plano  $I_{op} \times I_{res}$ .

### 3.3.1 Análise das condições de faltas para função 87B fasorial

Para o completo entendimento do comportamento da função 87B, analisam-se as situações de falta interna, falta externa e falta externa com saturação de TC.

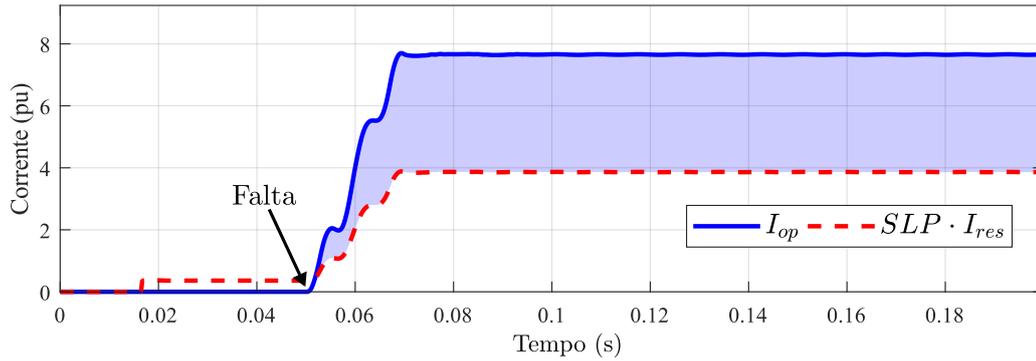
#### 3.3.1.1 Faltas internas

Mediante a ocorrência de uma falta interna, como ilustrado na Figura 3.6, tem-se que a corrente de curto-circuito será dada pelo somatório das contribuições de cada vão conectado ao barramento. Durante o regime de pré-falta, a corrente de restrição é aproximadamente igual a corrente que circula pelo barramento, enquanto que a corrente de operação é nula. No momento da incidência da falta, as correntes de operação e restrição aumentam de magnitude, de tal maneira que seus valores são idealmente iguais, ou muito próximas. Dessa forma, ao avaliar as condições de atuação do relé diferencial, estabelecidas na Equação (3.4), percebe-se que a corrente de operação será maior que a corrente de *pick-up* e que a corrente de restrição multiplicada pelo *slope*, dado que a constante de sensibilidade do relé possui valor numérico inferior a um. A Figura 3.7 apresenta a dinâmica das correntes de operação e restrição fasoriais ao longo do tempo mediante a ocorrência de uma falta interna. O resultado da sensibilização do relé é o envio do comando de *trip* aos disjuntores de todos os circuitos conectados à barra defeituosa.



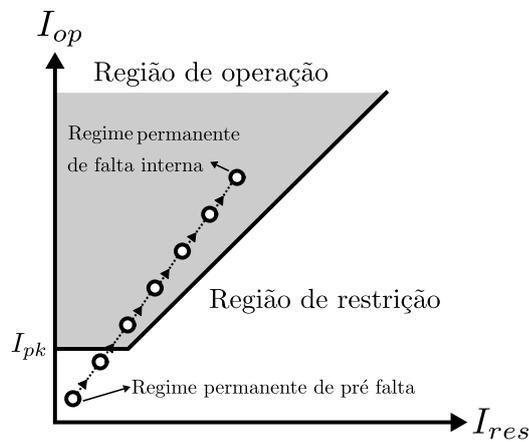
**Figura 3.6.** Condição de falta interna no barramento.

No âmbito do plano  $I_{op} \times I_{res}$ , as relações mostradas para as correntes de operação e restrição durante uma falta interna, são representadas pela trajetória do elemento diferencial ilustrada



**Figura 3.7.** Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta interna.

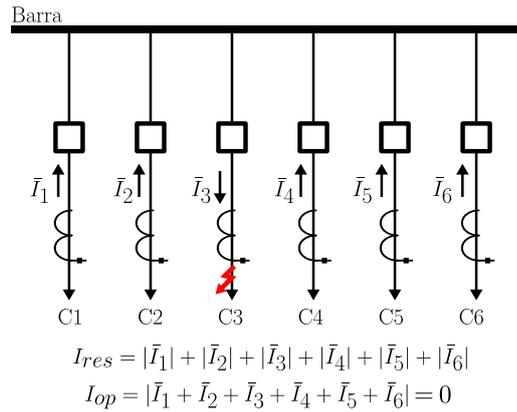
na Figura 3.8, desde a condição de regime permanente de pré-falta, até o regime permanente de falta.



**Figura 3.8.** Trajetória do elemento diferencial diante da ocorrência de uma falta interna.

### 3.3.1.2 Faltas externas

A condição de falta externa constitui um grande desafio para os algoritmos de proteção de barramentos, isso porque nesta situação a corrente que será medida no vão defeituoso é dada pelo somatório das contribuições de cada um dos circuitos conectados ao barramento, como ilustrado na Figura 3.9, onde se ressalta a direcionalidade contrária da corrente no vão defeituoso. A depender da potência de curto-circuito do barramento, o fenômeno de saturação do TC no vão defeituoso pode ser observado. Desta forma a corrente representada no lado secundário do TC fica distorcida, não sendo mais uma representação fidedigna da corrente primária. Essa medição distorcida pode ocasionar no aparecimento de uma corrente diferencial espúria, levando a proteção diferencial da barra a atuar de maneira indevida.



**Figura 3.9.** Condição de falta externa no barramento.

Para contornar essa situação, lógicas adicionais a proteção diferencial de barras são requeridas, como o uso do elemento direcional ou uma lógica de detecção de falta externa. Com relação a lógicas de detecção de faltas, uma técnica comumente utilizada por fabricantes baseia-se na implementação do elemento diferencial instantâneo, a partir do qual compara-se a taxa de variação das correntes instantâneas de operação e restrição nos instantes iniciais de incidência da falta, antes que o núcleo magnético do TC sature. Para o caso de faltas internas, a taxa de variação das correntes de restrição e operação serão elevadas nos primeiros instantes da falta, conforme foi mostrado na Figura 3.2. Enquanto que para o caso de faltas externas apenas a corrente de restrição possui variação significativa antes de uma possível saturação de TC, conforme apresentado na Figura 3.3.

A Figura 3.10 apresenta um diagrama lógico para implementar a detecção de falta externa. Avaliam-se as taxas das correntes instantâneas de operação e restrição comparando-as com um limiar pré estabelecido. Se apenas a taxa de variação da corrente de restrição for maior que este limiar durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , então uma falta externa é declarada e o relé passa a operar no modo de operação seguro por um período de tempo. Neste modo, o relé utiliza uma característica de *slope* adaptativo, ou seja, a ativação desse estado muda a inclinação da característica de operação, deixando-o menos sensível e portanto menos suscetível a operações indevidas em casos de saturação de TC.

A Figura 3.11 ilustra a nova região de restrição, a partir da nova inclinação adotada. Percebe-se uma expansão da região de restrição, fato esse contribui para uma operação segura durante os casos de faltas externas.

A respeito do comportamento da proteção diferencial no caso de faltas externas, utilizam-se

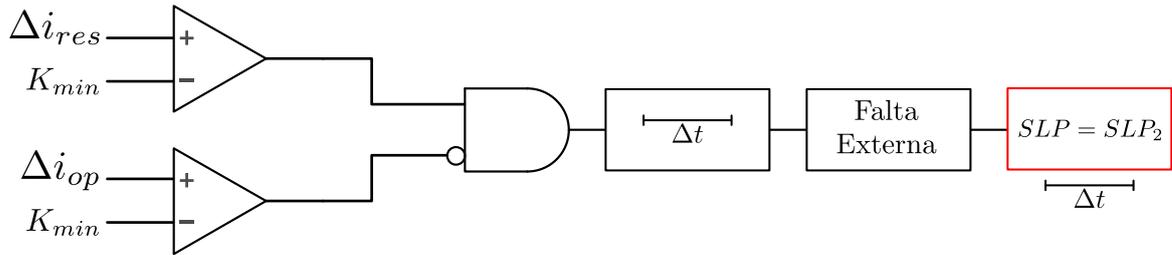


Figura 3.10. Diagrama lógico para detecção de falta externa.

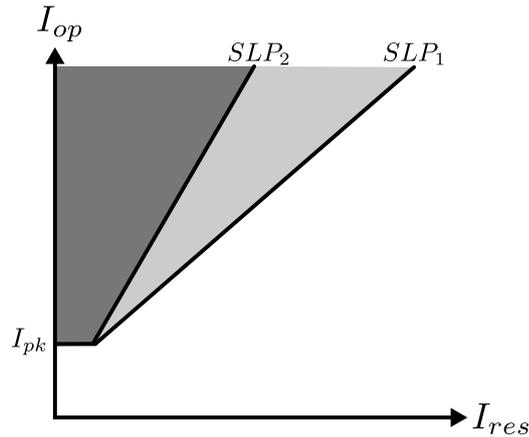


Figura 3.11. Característica de operação com *slope* adaptativo.

as Figuras 3.12 e 3.13 para construir o completo entendimento da resposta da função frente a esse cenário. 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 de operação não são atendidas e a proteção não atua. A Figura 3.12 apresenta o comportamento das correntes de operação e restrição ao longo do tempo, durante um caso de falta externa à zona de proteção do barramento. É possível perceber que a corrente de operação se mantém praticamente nula durante todo o tempo.

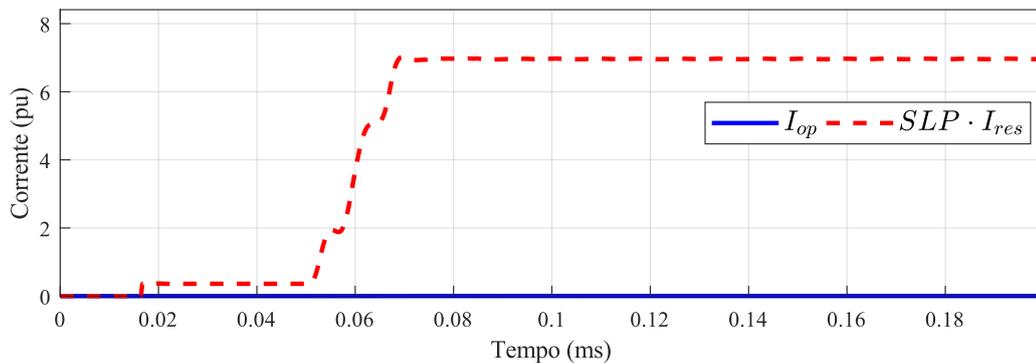
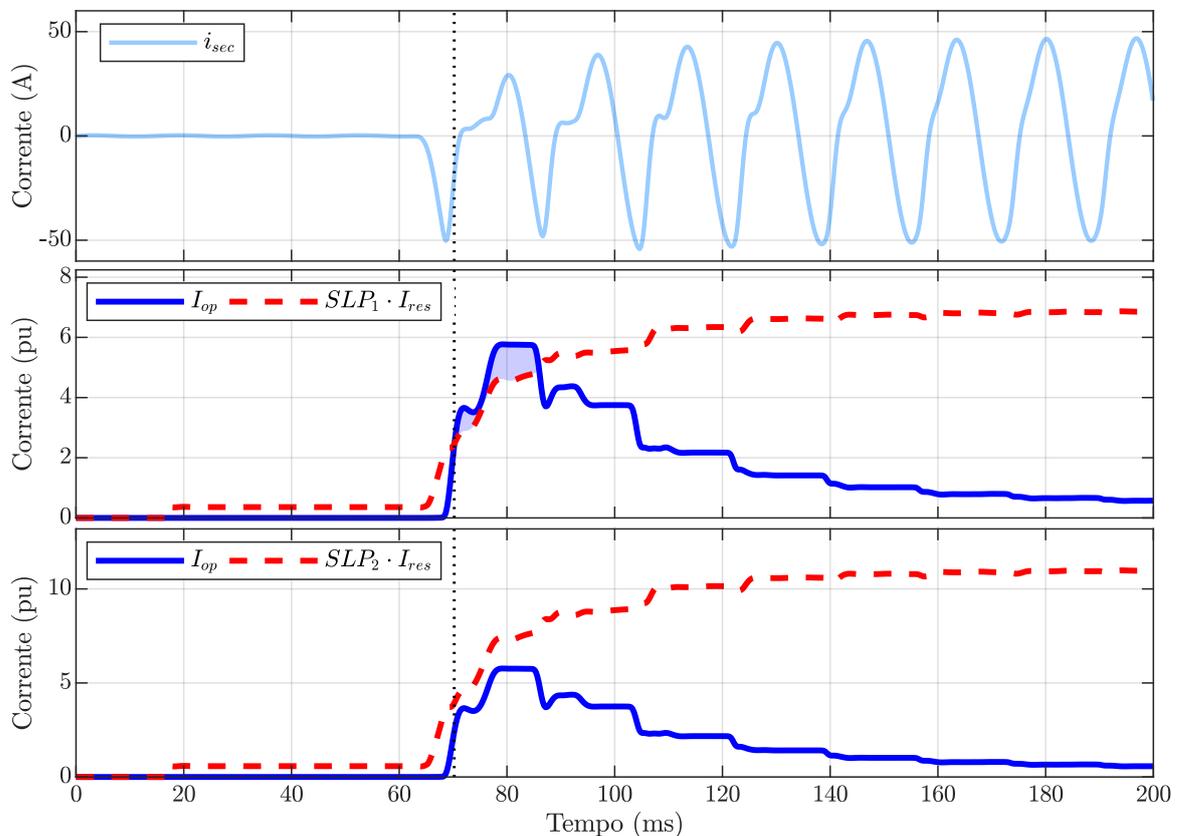


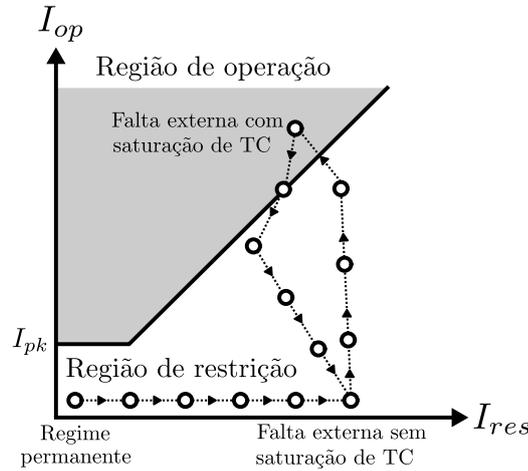
Figura 3.12. Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta externa sem saturação de TC.

Já para o caso de falta externa com saturação de TC, durante intervalo de tempo em que o núcleo magnético do TC estiver saturado, a amplitude da corrente de operação pode ser maior que a corrente de restrição, podendo ocasionar uma atuação indevida do sistema de proteção. A Figura 3.13 apresenta a dinâmica das correntes de operação e restrição ao longo do tempo para o caso de falta externa com saturação de TC. Na imagem de cima, apresenta-se a medição secundária do TC referente ao vão em que ocorreu o defeito externo. Nela é possível observar o efeito da saturação distorcendo a medição primária. Além disso, observa-se que os intervalos de saturação vão diminuindo ao longo do tempo, assim como a componente CC de decaimento exponencial. A figura central apresenta o comportamento descrito anteriormente, em que a corrente de operação ultrapassa a corrente de restrição ajustada pela sensibilidade SLP1. Para contornar o problema de atuação indevida durante o caso de faltas externas com saturação de TC, recorre-se a lógica de detecção de falta externa. O efeito da mudança do *slope*, durante o modo de operação segura, é mostrado na Figura 3.13, onde fica evidente que a utilização de uma característica com inclinação adaptativa, consegue prover uma maior segurança para o algoritmo.



**Figura 3.13.** Comportamento das correntes de operação e restrição diante da ocorrência de uma falta externa com saturação de TC.

Do ponto de vista do plano  $I_{op} \times I_{res}$ , os casos de faltas externas com e sem saturação de TC resultam em uma trajetória do elemento diferencial como mostrado na Figura 3.14. É possível perceber que o elemento diferencial adentra a região de operação durante o intervalo de tempo em que o TC estiver saturado e depois volta para a região de restrição.



**Figura 3.14.** Trajetória do elemento diferencial diante da ocorrência de faltas externas.

### 3.4 ZONAS DE PROTEÇÃO

As zonas de proteção são responsáveis por delimitar as fronteiras de atuação do sistema de proteção, a fim de garantir que a menor quantidade de circuitos e equipamentos sejam desconectados pela atuação do relé de proteção, mediante a ocorrência de uma falta. Para a proteção de barramentos definem-se as chamadas zonas de proteção físicas e lógicas. A zona de proteção física é delimitada tanto pela localização física, quanto 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 (IEEE, 2009).

A combinação dos estados lógicos das chaves seccionadoras e dos disjuntores de cada vão definem as *flags* de habilitação de corrente,  $f_p^Z$ . Estas são responsáveis pela definição de quais correntes serão consideradas no cálculo do elemento diferencial. Desta forma, a Equação (3.3) que descreve as correntes de operação e restrição, deve ser descrita da seguinte maneira:

$$I_{op}^Z = \left| \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot \bar{I}_p \right| \quad e \quad I_{res}^Z = \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot |\bar{I}_p| \quad (3.5)$$

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

### 3.5 CONSTRUÇÃO DE UMA LÓGICA DE ZONAS DE PROTEÇÃO

De forma a ilustrar o procedimento para construção de uma lógica de zonas de proteção, utiliza-se como exemplo a topologia de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, ilustrada na Figura 3.15. Primeiramente, faz-se necessário o entendimento desta configuração de barra, suas particularidades e características operacionais, com o objetivo de que a lógica de zona de proteção proposta cubra todas as exigências deste arranjo, provendo uma maior segurança para o sistema de proteção.

#### 3.5.1 Configuração normal de operação

Usualmente esta configuração de barra é empregada em SEs de transmissão, tipicamente com nível de tensão acima de 230 kV, e tem como principal característica um alto grau de flexibilidade, facilitando a realização de manobras de transferência de vãos e liberação de disjuntores para manutenção. As barras um e dois, a partir de agora denominadas  $B_1$  e  $B_2$ , respectivamente, podem operar de forma que ambas estejam energizadas, com os vãos distribuídos entre elas, ou operar com apenas uma das barras energizadas, atuando como barra principal, enquanto a outra é utilizada como barra de transferência.

Nesta topologia, as barras estão interligadas por meio do vão de amarre, o qual é composto pelo disjuntor de amarre, DJAMR, e suas respectivas chaves conectoras de barras, CSAMR1 e CSAMR2. Adicionalmente, no exemplo em questão, há quatro vãos de linhas conectadas de forma distribuída em cada uma das barras. Cada vão de linha conecta-se a um dos barramentos por meio do seu respectivo disjuntor (DJL1, DJL2, DJL3 e DJL4), o qual encontra-se entre as chamadas chaves seccionadoras de entrada e saída de vão, localizadas do lado do barramento e do lado do circuito, respectivamente. Paralelamente ao disjuntor de cada vão, encontram-se as chamadas chaves de *by-pass* (BPL1, BPL2, BPL3 e BPL4), que são utilizadas durante

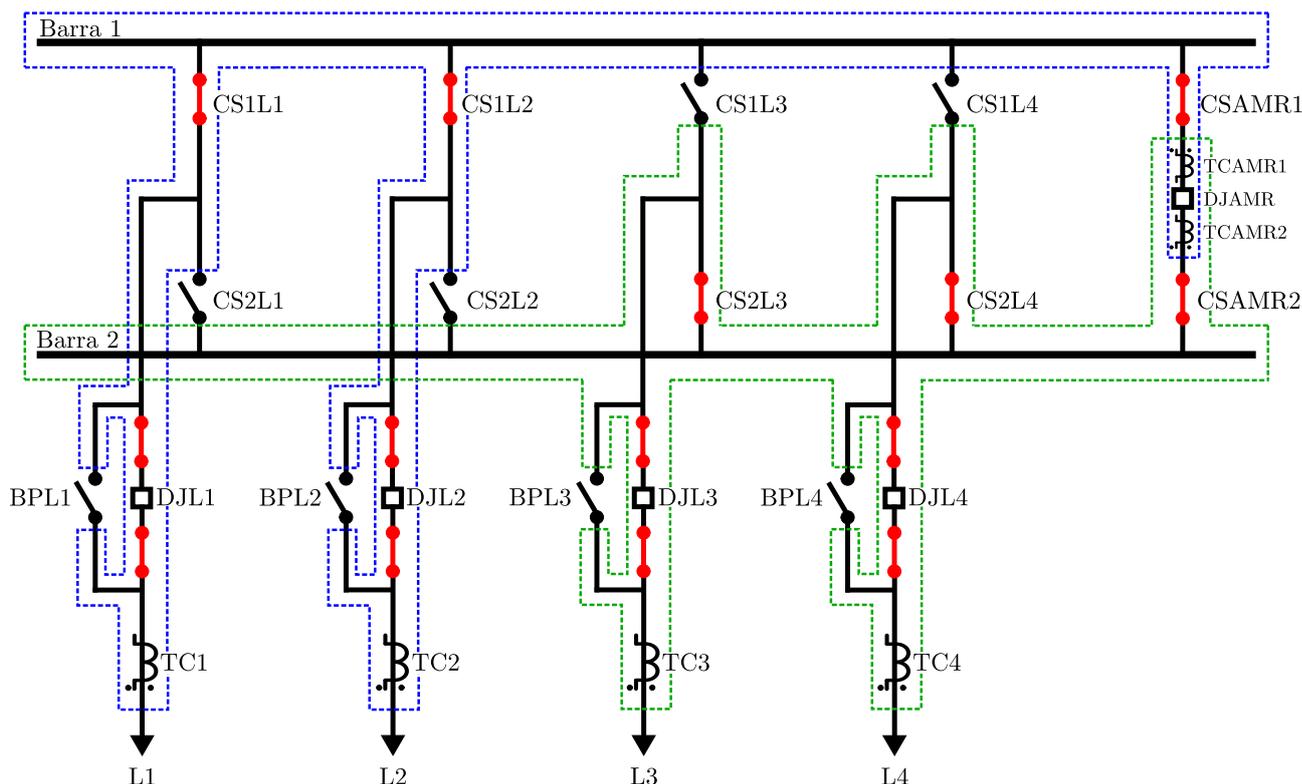


Figura 3.15. Zonas de proteção para um arranjo de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.

as manobras de troca ou manutenção de disjuntores. Estando os disjuntores, ou as chaves de *by-pass*, fechados cada vão pode ser energizado por qualquer uma das barras, a depender apenas de qual chave seletora de barra está fechada. Para que cada um dos quatro vão estejam conectados na barra  $B_1$ , as seguintes chaves seletoras de barras devem estar fechadas: CS1L1, CS1L2, CS1L3, CS1L4. Já para o caso de conexão na barra  $B_2$ , as chaves em questão são CS2L1, CS2L2, CS2L3, CS2L4. O procedimento para conexão do vão à barra é ilustrado na Figura 3.16.

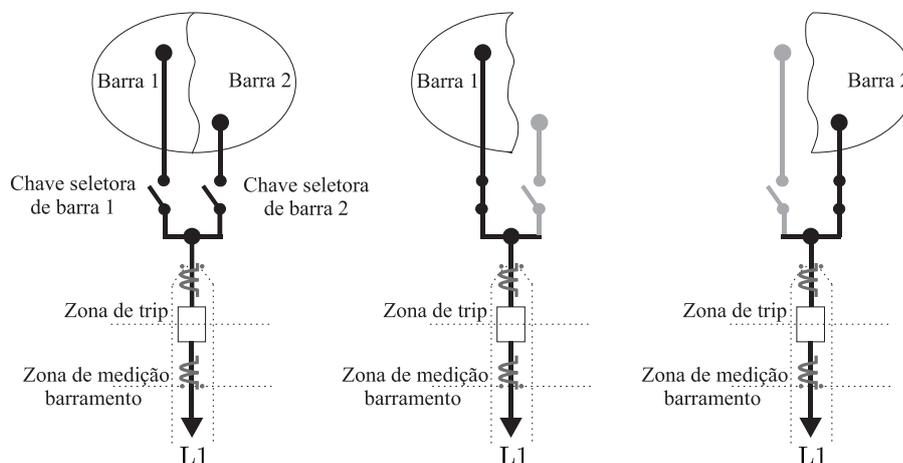
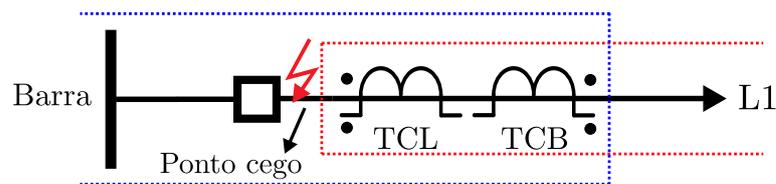


Figura 3.16. Ligação do vão às barras e delimitação das zonas de proteção (Adaptado de (IEEE, 2009)).

Outro aspecto de suma importância para se avaliar é o posicionamento dos TCs de medição da barra com relação aos vãos, pois estes são os responsáveis pela delimitação física das zonas de proteção. No exemplo em questão, cada barra  $B_1$  e  $B_2$ , gera uma zona de proteção,  $Z_1$  e  $Z_2$ , respectivamente. A  $Z_1$  é delimitada pelo TC1, TC2 e TCAMR2, enquanto que a  $Z_2$  envolve TC3, TC4 e TCAMR1.

Usualmente, no que concerne à proteção de barras, os TCs são instalados entre os elementos de conexão, que podem ser disjuntores ou chaves seccionadoras, e o próprio equipamento do sistema. Com a alocação do TC nesta região, surgem os chamados pontos cegos para a zona de proteção do vão, conforme ilustrado na Figura 3.17. Isto acontece pois caso ocorra uma falta entre o TC de proteção do barramento e o elemento de conexão do vão, apenas a proteção do barramento detectaria o curto e enviaria o comando de abertura para os disjuntores conectados ao barramento. Todavia, a falta não se extinguiria, pois ainda há contribuição por parte do vão, o qual não foi capaz de identificar a falta. Para estes casos, é necessário a utilização da proteção de zona morta, a qual enviaria uma mensagem de transferência de disparo direto (TDD) à proteção remota do vão, permitindo assim a completa extinção do curto. Já com relação ao vão de interligação entre as barras, seguindo requisitos de confiabilidade, a instalação dos TCs é feita de tal maneira a promover a sobreposição das zonas de proteção, conforme ilustrado na Figura 3.15. Tal configuração permite a identificação de curtos-circuitos entre os TCs e o DJAMR (IEEE, 2009).



**Figura 3.17.** Ilustração da zona de proteção com ponto cego para o vão.

### 3.5.2 Transferência da proteção

Por fim, antes de se construir a lógica de zonas de proteção deve-se levar em conta todas as manobras que esta configuração de barra está sujeita. Ou seja, a lógica de zonas de proteção precisa ter caráter dinâmico, a fim de acompanhar as várias configurações do sistema. Basicamente, dois tipos de manobras merecem uma atenção especial, do ponto de vista do algoritmo

de proteção, são elas: transferências de vãos entre as barras e liberação de disjuntor de vão para manutenção.

A manobra de transferência de vãos entre as barras pode ser feita pelos mais diversos motivos, sendo o mais comum a operação e manutenção de circuitos. Para realizar esta manobra são utilizadas apenas as chaves seletoras de barra. Como exemplo, analisa-se a transferência do vão L1 da  $B_1$  para a  $B_2$ . Para que o vão seja transferido para a  $B_2$  sem que seja necessário desenergizá-lo, primeiramente fecha-se a chave CS2L1. Após fechamento elétrico e mecânico desta chave, procede-se para a abertura da chave CS1L1. Durante a realização desta manobra, observa-se que as duas chaves seletoras de barra do vão estão fechadas momentaneamente, de tal modo que há uma condição de paralelismo de barras. Nesta condição, não se tem medição de corrente no ramo formado pela configuração série das chaves seccionadoras e então, a depender do fluxo de potência entre as barras, esta condição poderia fazer com que o sistema de proteção atuasse indevidamente. Portanto este estado deve ser identificado e levado em consideração na lógica de zonas de proteção. Para identificar o estado lógico de paralelismo de barras ( $PB$ ), define-se a seguinte expressão lógica:

$$PB = [(CS1L1 \text{ AND } CS2L1) \text{ OR } (CS1L2 \text{ AND } CS2L2) \text{ OR} \\ (CS1L3 \text{ AND } CS2L3) \text{ OR } (CS1L4 \text{ AND } CS2L4)] \text{ AND } DJAMR \quad (3.6)$$

Outra problemática surge durante as manobras de transferência de vão, que é a possibilidade de atraso na mudança de estados ou de falhas dos contatos auxiliares lógicos das chaves seccionadoras seletoras de barras (STEENKAMP *et al.*, 2007). Tal fato pode acarretar na mudança de algum das *flags* de habilitação de corrente e, conseqüentemente, no cálculo do elemento diferencial. Dentre as formas de contornar esta situação, geralmente, recorre-se à implementação de uma zona de supervisão, conhecida como *check-zone*, que engloba as duas barras formando uma única zona,  $Z_{12}$ . A *check-zone* não leva em consideração os estados das chaves seccionadoras seletoras de barra, nem os TCs do vão de interligação entre as barras. Este elemento não tem a função de enviar comando de abertura para os disjuntores, ele apenas supervisiona a atuação das zonas  $Z_1$  e  $Z_2$ . Além disso, um curto-circuito em qualquer uma das barras, também deverá ser identificado por esta zona (IEEE, 2009).

A manobra de liberação de disjuntor para manutenção, requer a chamada transferência da proteção, a fim de garantir que o circuito não fique desprotegido. Esta manobra envolve

uma série de passos que devem ser seguidos a fim de que o algoritmo de proteção permaneça seguro durante esta condição. De forma a ilustrar tal procedimento, analisa-se a liberação do disjuntor DJL1 para manutenção. Primeiramente, deve-se remanejar todos os vãos conectados na  $B_1$ , onde o vão L1 está conectado, para a  $B_2$ . Dessa forma, a  $B_1$  atua como barra de transferência, enquanto a  $B_2$  é a barra principal. Em seguida, o *trip* da proteção do vão L1 é transferido para o disjuntor de amarre. Para que o vão L1 permaneça com fornecimento contínuo, fecha-se a chave de *by-pass*, BPL1. Então, o DJL1 é aberto e as chaves seccionadoras de entrada e saída de vão são abertas, para que a retirada do disjuntor ocorra.

Caso ocorra um curto-circuito na  $B_1$ , o DJAMR é aberto, isolando a barra. Além disso, para que o curto-circuito seja extinto por completo é necessário o envio de um sinal de TDD ao disjuntor remoto da L1. Já durante um curto-circuito na  $B_2$ , os disjuntores DJL2, DJL3, DJL4 e DJAMR receberão o comando de abertura. Porém, ainda assim a  $B_1$  terá potencial, pois ela estará conectada ao vão L1, por meio da chave BPL1.

Analisando as manobras as quais o arranjo de barra está sujeito, verifica-se a importância de incluir na lógica de zona de proteção as informações referentes a condição de paralelismo de barra, bem como o estado das chaves seccionadoras de *by-pass*. Ademais, é de suma importância a implementação da zona de supervisão como um elemento permissivo para o envio do comando de *trip* pelas zonas  $Z_1$  e  $Z_2$ .

### 3.5.3 Lógica de seleção de zonas

Diante do contexto apresentado, procede-se com as etapas de construção de uma lógica de zona de proteção. A Tabela 3.1 apresenta as expressões lógicas para as *flags* de habilitação de corrente, as quais serão responsáveis por determinar quais elementos pertencem a cada zona. Neste sentido, interpreta-se a tabela da seguinte maneira. As correntes medidas nos TCs de cada elemento podem ser incluídas no cálculo do elemento diferencial da  $Z_1$  ou  $Z_2$ , a depender do estado lógico das *flags*  $f_p^1$  ou  $f_p^2$ , as quais dependem dos estados das chaves seletoras de barras. Por outro lado, com relação ao vão de interligação entre os circuitos, as medições do TCAMR1 serão sempre incluídas no cálculo da  $Z_2$ , enquanto que para o caso do TCAMR2, as medições serão incluídas no cálculo da  $Z_1$ . Além disso, analisando as *flags* de habilitação

de corrente para a *check-zone*,  $f_p^{12}$ , é possível perceber que todos os elementos são incluídos no cálculo do elemento diferencial desta zona.

Diante de um curto-circuito dentro de uma das zonas de proteção, apenas os disjuntores dos circuitos conectados ao barramento faltoso devem abrir. Dessa forma, o elemento de proteção diferencial deverá indicar a presença de falta interna na  $Z_1$  ou  $Z_2$ , além de enviar um comando de *trip* que leve em consideração o estado das chaves seletoras de barra, visto que um mesmo vão pode ser conectado a qualquer uma das barras. Dessa maneira, a Tabela 3.2 apresenta as expressões lógicas de *trip* para cada um dos disjuntores. Considerando os vãos conectados da forma apresentada na Figura 3.15, na ocorrência de uma falta na  $B_1$  uma falta interna será identificada na  $Z_1$ , além disso será enviado o comando de abertura de disjuntores para todos aqueles vãos que estiverem com as suas chaves seletoras de  $B_1$  fechadas, neste caso L1 e L2. Além disso, pela lógica apresentada, o comando de abertura também é enviado para o disjuntor de amarre, o qual será responsável por desconectar as barras.

**Tabela 3.1.** Estados lógicos das *flags* de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras.

Elemento	TC	Flag	Expressão Lógica
L1	TC1	$f_1^1$	CS1L1 OR [PB AND (DJL1 OR BPL1)]
		$f_1^2$	CS2L1 OR [PB AND (DJL1 OR BPL1)]
		$f_1^{12}$	DJL1 OR (BPL1 AND DJAMR)
L2	TC2	$f_2^1$	CS1L2 OR [PB AND (DJL2 OR BPL2)]
		$f_2^2$	CS2L2 OR [PB AND (DJL2 OR BPL2)]
		$f_2^{12}$	DJL2 OR (BPL2 AND DJAMR)
L3	TC3	$f_3^1$	CS1L3 OR [PB AND (DJL3 OR BPL3)]
		$f_3^2$	CS2L3 OR [PB AND (DJL3 OR BPL3)]
		$f_3^{12}$	DJL3 OR (BPL3 AND DJAMR)
L4	TC4	$f_4^1$	CS1L4 OR [PB AND (DJL4 OR BPL4)]
		$f_4^2$	CS2L4 OR [PB AND (DJL4 OR BPL4)]
		$f_4^{12}$	DJL4 OR (BPL4 AND DJAMR)
DJAMR	TCAMR1	$f_{AMR}^1$	0
		$f_{AMR}^2$	$\overline{PB}$ AND DJAMR
		$f_{AMR}^{12}$	0
	TCAMR2	$f_{AMR}^1$	$\overline{PB}$ AND DJAMR
		$f_{AMR}^2$	0
		$f_{AMR}^{12}$	0

**Tabela 3.2.** Lógica de *trip* dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão Lógica
DJL1	$(Z_1$ AND CS1L1) OR $(Z_2$ AND CS2L1) AND $Z_{12}$
DJL2	$(Z_1$ AND CS1L2) OR $(Z_2$ AND CS2L2) AND $Z_{12}$
DJL3	$(Z_1$ AND CS1L3) OR $(Z_2$ AND CS2L3) AND $Z_{12}$
DJL4	$(Z_1$ AND CS1L4) OR $(Z_2$ AND CS2L4) AND $Z_{12}$
DJAMR	$(Z_1$ OR $Z_2)$ AND $Z_{12}$

## CAPÍTULO 4

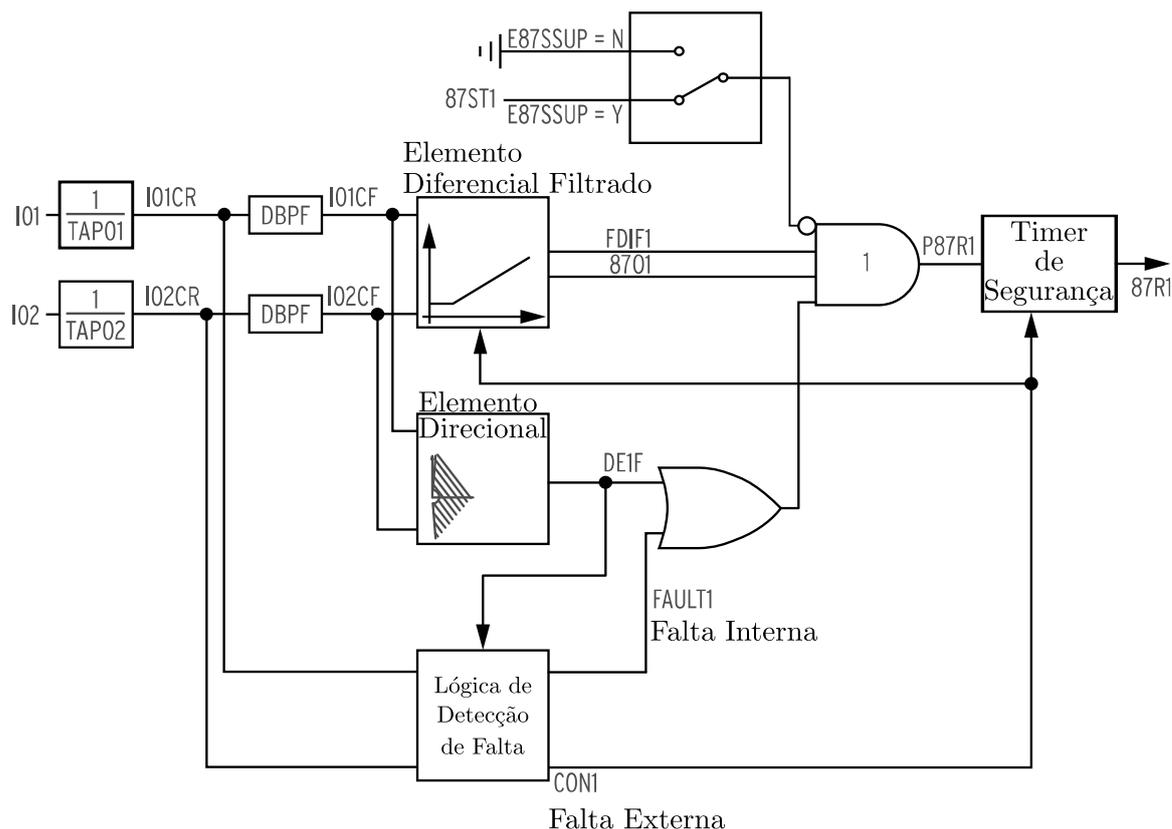
# PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS APLICADA EM DISPOSITIVO REAL

Como visto no capítulo anterior, a proteção diferencial de barramentos pode ser implementada baseada nos valores instantâneos das correntes ou nos fasores fundamentais estimados. Além disso, há a necessidade de implementar lógicas adicionais de forma a garantir uma operação segura durante os casos de faltas externas com e sem saturação de TC. Dado esse conjunto de possibilidades de implementação da função de proteção de barramentos, cada fabricante desenvolve a melhor estratégia para implementar a função diferencial em seus relés. O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho do algoritmo do PAG alternativo frente a função de proteção de um dispositivo real, para isso utilizou-se o relé de proteção diferencial de barramentos SEL-487B. De forma a analisar a resposta do relé para cada situação avaliada, faz-se necessário entender a função de proteção implementada. Portanto neste capítulo apresenta-se a programação lógica das funções de proteção embarcadas no dispositivo real.

### 4.1 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

Tradicionalmente, as filosofias de proteção de barra utilizam critérios 2-de-2 para enviar o comando de *trip*. Isso quer dizer que além do elemento diferencial amplamente usado, lógicas adicionais são requeridas para garantir que dois critérios distintos enxerguem o defeito simultaneamente, habilitando assim o envio do comando de *trip* pela função de proteção. Dentre as lógicas adicionais que podem ser utilizadas, o relé SEL-487B promove o uso do elemento direcional e de uma lógica de detecção de falta baseada em valores instantâneos. A Figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos da lógica de proteção utilizada pelo relé.

Nesta seção, descreve-se o algoritmo de proteção do relé SEL-487B. Para isso, cada um dos elementos utilizados na lógica de proteção é apresentado separadamente. Faz-se oportuno



**Figura 4.1.** Diagrama de blocos mostrando a lógica de proteção de barras do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

mencionar que a zona de proteção 1 foi utilizada como exemplo e por este motivo o índice 1 aparece associado a cada variável lógica apresentada.

Para o pleno entendimento dos diagramas lógicos apresentados em cada um dos elementos de proteção avaliados, apresenta-se na Figura 4.2 uma legenda dos símbolos utilizados. Especial atenção é dada ao *timer* de borda de subida. Este funciona da seguinte maneira: a borda de subida da variável A inicia a contagem, e então a saída B será ativada após um intervalo X de tempo contado a partir do instante em que a borda de subida da variável A foi detectada. A saída B por sua vez permanecerá ativa durante um período Y de tempo.

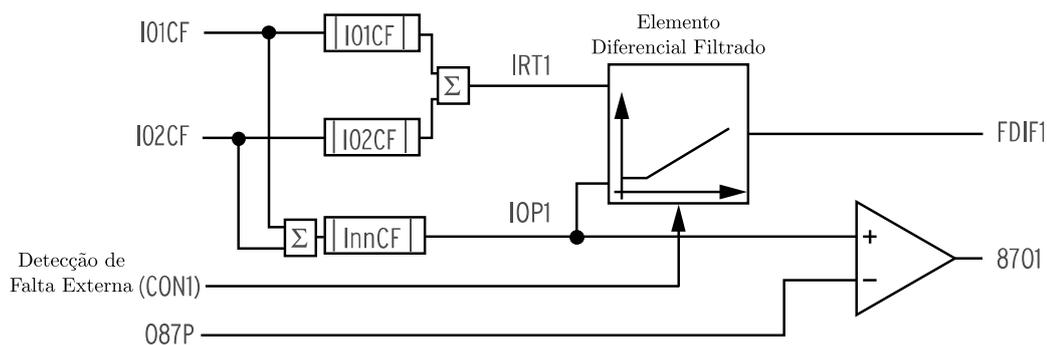
Como ponto de partida, analisa-se o início do diagrama de blocos apresentado na Figura 4.1. As correntes I01 e I02 são referentes aos terminais das entradas analógicas 01 e 02 do relé. Cada uma das correntes de entrada do relé passa pelo processo de normalização por meio do fator de ajuste TAP. As correntes normalizadas são renomeadas para I01CR e I02CR. É importante enfatizar que essas correntes normalizadas ainda não passaram pelo processo de estimação fasorial, portanto são correntes instantâneas, as quais são provenientes das medições dos TCs de barra.

Nome	Símbolo
Comparador	
OU	
E	
E com entrada invertida	
Timer de borda de subida	

**Figura 4.2.** Legenda dos símbolos lógicos utilizados (SEL, 2018).

#### 4.1.1 Elemento Diferencial Filtrado

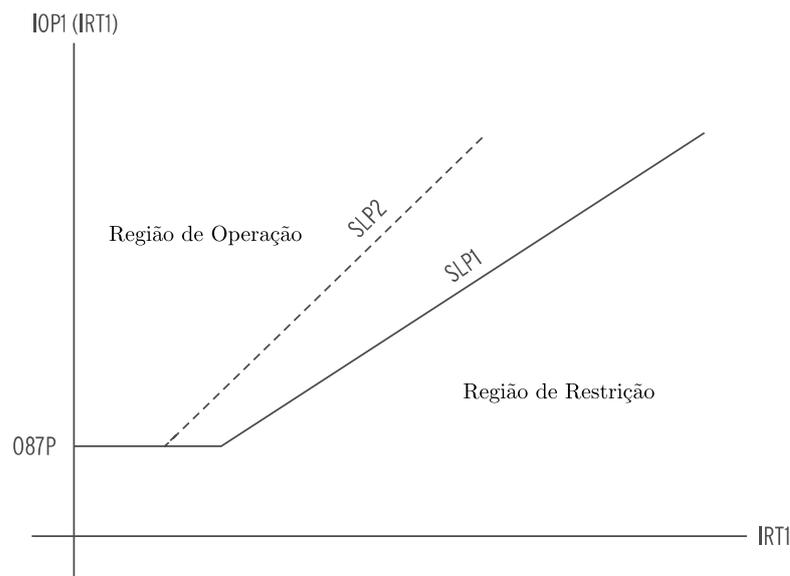
O elemento diferencial filtrado recebe as correntes provenientes do processo de estimação fasorial realizado pelo relé, I01CF e I02CF, para realizar o cálculo das grandezas de operação, IOP1, e restrição, IRT1, da mesma forma que demonstrado na Equação 3.1, e então realizar as comparações mostradas na Equação 3.2. O diagrama lógico para este elemento é ilustrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Diagrama lógico para o elemento diferencial filtrado do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

A variável lógica FDIF1 é a saída proveniente do cálculo diferencial. Se a corrente de operação exceder a corrente de restrição ponderada pelo *slope*, esta variável fica ativa. Já a variável lógica 8701, fica ativa quando a corrente de operação é maior que o *pick-up*, O87P, ajustado no relé. Juntas, estas duas variáveis formam a característica de operação do elemento diferencial filtrado, ilustrado na Figura 4.4.

Além disso, o relé tem como ajuste duas inclinações de *slope* distintas. O SLP1 deve ser ajustado para ser efetivo no caso de faltas internas, enquanto o SLP2 deve ser ajustado a fim de garantir uma operação segura caso ocorram faltas externas, com e sem saturação de TC. O relé faz o uso de uma lógica de detecção de faltas, de tal forma que, quando uma falta externa é identificada a variável lógica CON1 fica ativa e força a alteração da inclinação da característica de operação do relé durante os cálculos realizados pelo elemento diferencial.

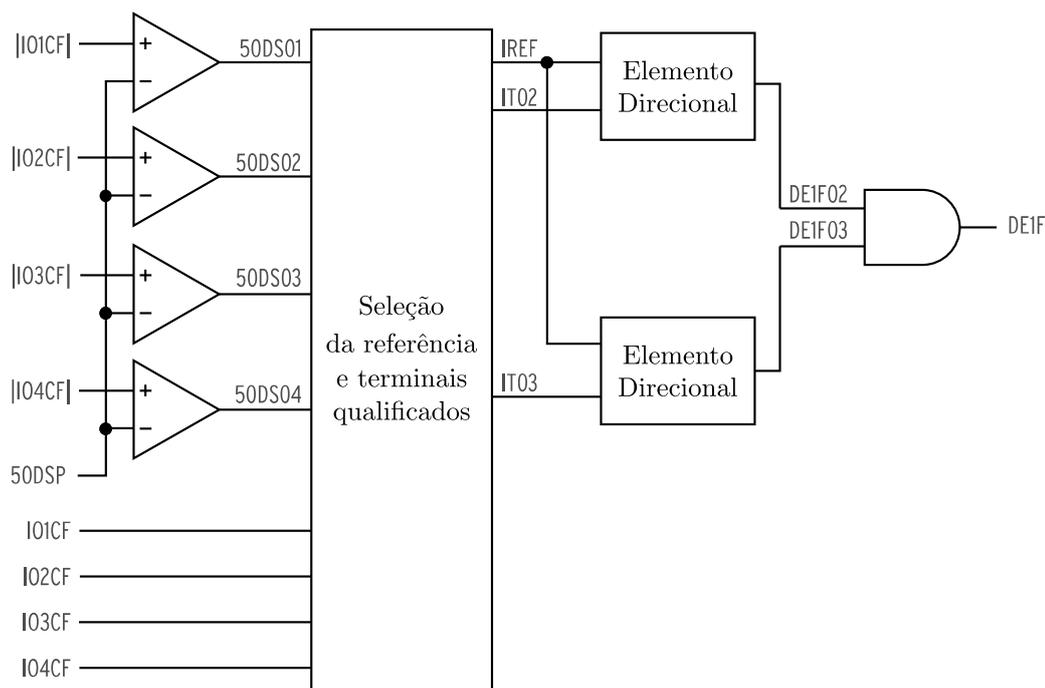


**Figura 4.4.** Característica de operação do elemento diferencial filtrado (Adaptada de (SEL, 2018)).

#### 4.1.2 Elemento Direcional

O algoritmo de proteção do relé SEL-487B faz uso da estratégia de utilizar elementos direcionais para supervisionar o elemento diferencial, com o objetivo de prover uma segurança adicional durante condições de faltas externas com severa saturação de TC. O diagrama lógico para o elemento direcional pode ser observado na Figura 4.5.

Primeiramente, o relé realiza uma comparação entre a magnitude da corrente de fase dos terminais com o *pick-up* do elemento de sobrecorrente direcional de supervisão, 50DSP, para selecionar os chamados terminais qualificados, que são aqueles cujo módulo da corrente é maior que o *pick-up*, denominados no diagrama lógico como IT01, IT02 e IT03. Após isso, um dos terminais é tido como referência, no caso apresentado IT01 é escolhido como referência. E então o elemento direcional compara a direção da corrente no terminal de referência com a direção da corrente em todos os outros terminais qualificados. Para cada operação, o relé calcula o



**Figura 4.5.** Diagrama lógico para o elemento direcional do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

torque como sendo a parte real do produto interno entre a corrente do terminal e o conjugado da corrente de referência, como mostrado na Equação (4.1).

$$T = \text{Re}(IT02 \cdot IREF^*) \quad (4.1)$$

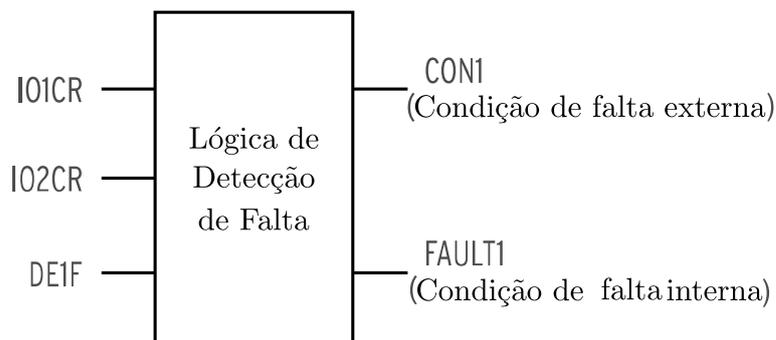
A variável lógica DE1Fxx ativa, indica que a corrente do terminal "xx"avaliado possui a mesma direção que a corrente de referência. Se as direções das correntes em todos os terminais restantes coincidem com a direção da corrente no terminal de referência, o relé declara a condição de falta interna, ativando a variável lógica DE1F.

### 4.1.3 Lógica de Detecção de Falta

O relé SEL-487B conta com um algoritmo de detecção de faltas para distinguir entre faltas externas e internas. O uso desta lógica, assim como a utilização do elemento direcional, tem como objetivo garantir uma operação segura para o elemento diferencial, visto que a saída desta lógica é utilizada como um elemento de supervisão no algoritmo do relé.

A lógica de detecção de faltas faz o uso das correntes instantâneas normalizadas dos terminais em seu algoritmo, ao invés da utilização das correntes filtradas. A Figura 4.6 apresenta as

entradas da lógica, que são as correntes instantâneas normalizadas, I01CR e I02CR, bem como a saída do elemento direcional.

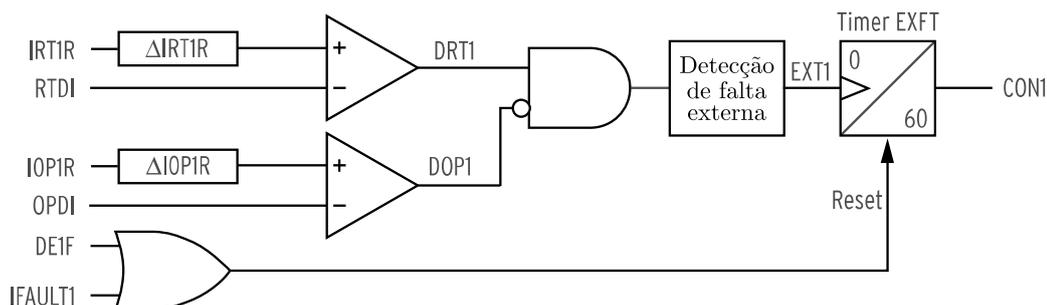


**Figura 4.6.** Lógica de detecção de falhas do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

Com estas entradas, calculam-se as correntes de operação, IOP1R, e restrição, IRT1R, instantâneas, as quais são utilizadas dentro do algoritmo para fazer a distinção entre faltas internas e externas. Por fim, este módulo apresenta duas variáveis lógicas de saída, CON1, cuja ativação está associada a identificação de uma falta externa, e FAULT1, identificando a presença de uma falta interna.

#### 4.1.3.1 Lógica de Detecção de Falta Externa

A detecção de faltas externas baseia-se no comportamento das correntes de operação e restrição quando ocorre uma falta. Em geral, na ocorrência de uma falta interna, as correntes de operação e restrição aumentam sua magnitude quase que simultaneamente. Ao passo que para o caso de faltas externas sem saturação de TC, apenas a corrente de restrição aumenta sua magnitude. Dessa forma, o relé compara a variação instantânea de cada uma dessas correntes com os limiares de ajuste de restrição e operação, RTD1 e OPD1, respectivamente. A Figura 4.7 apresenta a lógica implementada no relé para detecção de faltas externas.



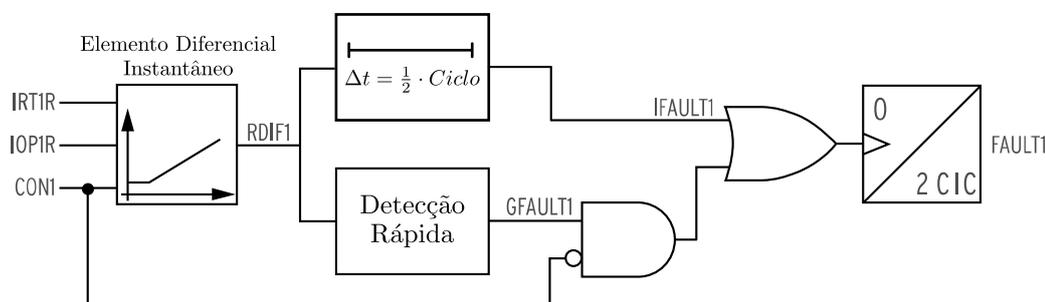
**Figura 4.7.** Lógica de detecção de falta externa do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

O resultado desta comparação é expresso pelas variáveis lógicas DRT1 e DOP1. Com a ativação apenas da variável DRT1, uma falta externa é detectada e o relé entra no modo de operação seguro, indicado pela variável CON1, durante um intervalo de tempo igual a sessenta ciclos. Este intervalo de tempo está associado à garantia de uma operação segura mesmo na ocorrência do fenômeno de saturação do TC.

O fato do relé se manter no modo de operação seguro durante o intervalo de sessenta ciclos pode representar um risco caso ocorra uma falta evolutiva. Ou seja, a falta pode não ser identificada pela mudança na característica de operação ou o tempo para extinguir a falta pode ser muito elevado. Para prevenir tal situação, o relé SEL-487B conta com uma lógica adicional que faz uso do elemento direcional, DE1F, e da saída da lógica de detecção de falta interna, IFAULT1, para desativar o modo de operação seguro. Com isso, o relé volta a operar com os ajustes normais, possibilitando a identificação de uma falta evolutiva.

#### 4.1.3.2 Lógica de Detecção de Falta Interna

A lógica de detecção de falta interna implementa o mesmo processo utilizado para o elemento diferencial filtrado, porém o realiza com as correntes instantâneas. A saída do elemento diferencial instantâneo, RDIF1, consiste na avaliação das condições apresentadas na Equação (3.2). Casos estas condições se mantenham durante um intervalo de tempo consecutivo de meio ciclo, a variável lógica IFAULT1 é ativada indicando a ocorrência de uma falta interna, como mostrado pelo diagrama lógico apresentado na Figura 4.8.



**Figura 4.8.** Lógica de detecção de falta interna do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018)).

Além disso, a lógica conta com um módulo de detecção rápida para distinguir entre correntes diferenciais espúrias, provenientes da atuação de pára-raios instalados nos barramentos de uma SE, e correntes diferenciais resultantes de faltas. Se a avaliação do módulo de detecção rápida

entender que a corrente diferencial existente é proveniente de uma falta interna, a variável lógica GFAULT1 é ativada.

Por fim, a saída da lógica de detecção de falta interna é a variável lógica FAULT1, a qual ficará ativa, por um intervalo de tempo de dois ciclos, caso uma falta interna seja identificada.

#### 4.1.4 Lógica de Seleção Dinâmica de Zona

Para realizar o cálculo diferencial, o relé deve ser capaz de atribuir apropriadamente as correntes dos circuitos terminais às suas respectivas zonas de proteção. Além disso, o relé deve levar em consideração as mudanças de topologia em arranjos de barra com elevado grau de flexibilidade e atribuir dinamicamente, de acordo com a configuração momentânea da barra, as correntes de entrada aos corretos elementos diferenciais de forma a não comprometer a proteção do barramento.

O relé SEL-487B implementa um algoritmo baseado na teoria dos grafos para realizar a lógica de seleção dinâmica de zonas (GUZMÁN *et al.*, 2005; BAINY *et al.*, 2019). O algoritmo recebe como entradas os estados lógicos de chaves seccionadoras e disjuntores, os quais tipicamente fornecem as informações de como a barra está configurada. Com estas informações o relé cria as chamadas equações de controle *SELogic*, que são divididas em dois tipos: IqqBZpV (do inglês *terminal-to-bus-zone connection programmable equations*) e BZpBZpV (do inglês *bus-zone-to-bus-zone connection programmable equations*), onde  $q$  se refere ao número do terminal conectado e  $p$  ao número da barra (SEL, 2018).

As equações de controle do tipo IqqBZpV têm por finalidade indicar como cada circuito terminal está conectado a determinada barra. Ou seja, estas equações recebem o estado lógico de uma chave seccionadora que faz a conexão do circuito com determinada barra e assim determinam a qual zona cada circuito terminal pertence. Já as equações de controle do tipo BZpBZpV, indicam como as barras de uma SE estão conectadas, se há um vão de interligação entre elas, por exemplo.

Com base nas equações de controle *SELogic* IqqBZpV e BZpBZpV, a lógica de seleção de zona determina as seguintes informações (SEL, 2018):

- Os barramentos a serem incluídos em cada zona de proteção;

- Os terminais que serão incluídos em cada zona de proteção, para realizar o cálculo do elemento diferencial de cada zona; e
- Os terminais que receberão o comando de *trip* pela operação do algoritmo de proteção de determinada zona.

#### 4.1.5 Lógica de Trip

A lógica de *trip* do relé SEL-487B é apresentada na Figura 4.9. A variável lógica de saída do elemento diferencial, 87R1, é supervisionada pelo elemento Z1S (do inglês *Zone 1 Supervision*), o qual é uma equação de controle configurável pelo usuário, que fornece um critério adicional final de supervisão, antes que o sinal de *trip* possa ser enviado. Esta equação de controle permite uma customização da função de proteção do relé, a depender das necessidades do usuário, podendo ser utilizada com lógicas programáveis ou até mesmo com as próprias variáveis de saída das funções de proteção do relé. Para o presente trabalho, atribui-se o valor lógico um ao ajuste Z1S, de tal forma que o *trip* do relé dependa apenas da lógica diferencial.



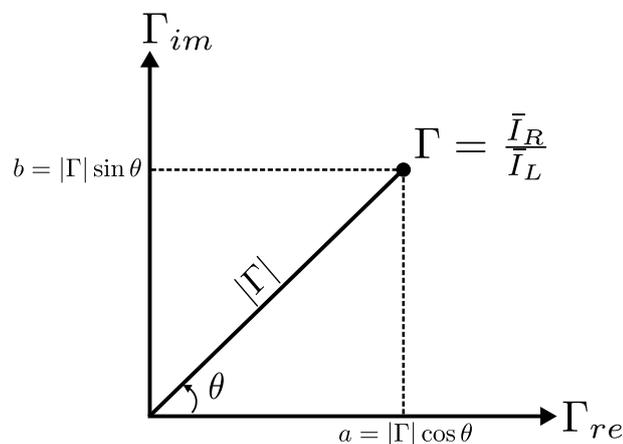
**Figura 4.9.** Diagrama lógico para ativação da variável lógica de *trip* do relé SEL-487B (Adaptada de (SEL, 2018))

## O MÉTODO DO PLANO ALFA GENERALIZADO

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica por trás da técnica do plano alfa generalizado (PAG). Para entender os motivos que levaram a sua concepção, faz-se necessário revisitar conceitos que são abordados, majoritariamente, na proteção diferencial de linhas de transmissão. De forma a cumprir com os objetivos do capítulo e apresentar toda uma contextualização ao leitor, decidiu-se por apresentar cronologicamente os fatos que culminaram nas diferentes proposições do PAG atualmente disponíveis na literatura. A partir do entendimento da técnica, tem-se como objetivo ilustrar a aplicabilidade de cada formulação na proteção diferencial de barramentos.

### 5.1 PLANO ALFA

Originalmente proposto por Warrington (1962), o plano alfa consiste em um plano complexo, no qual são representadas as partes real e imaginária da razão entre os fasores de corrente dos terminais remoto e local da linha de transmissão, conforme ilustrado na Figura 5.1 e definido matematicamente nas Equações (5.1), (5.2) e (5.3).



**Figura 5.1.** Representação do plano alfa proposto por Warrington (1962)

$$\Gamma = \frac{\bar{I}_R}{\bar{I}_L} = a + jb = |\Gamma|e^{j\theta} \quad (5.1)$$

$$|\Gamma| = \frac{|\bar{I}_R|}{|\bar{I}_L|} = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{b}{a}\right), \quad (5.2)$$

$$a = |\Gamma| \cos \theta, \quad b = |\Gamma| \sin \theta. \quad (5.3)$$

Segundo Roberts *et al.* (2001), é possível mapear no plano alfa o limiar de atuação da proteção diferencial percentual baseada no plano  $I_{op}$  x  $I_{res}$ . Para o caso da proteção diferencial de linhas de transmissão, as correntes de operação e restrição são, geralmente, definidas como apresentado na Equação (5.4) (ROBERTS *et al.*, 2001).

$$I_{op} = |\bar{I}_L + \bar{I}_R|, \quad I_{res} = |\bar{I}_L - \bar{I}_R|, \quad (5.4)$$

Para realizar o mapeamento do limiar de atuação, substitui-se a definição das correntes de operação e restrição, na condição de atuação do relé,  $I_{op} > SLP \cdot I_{res}$ . A partir das manipulações matemáticas apresentadas nas Equações (5.5)-(5.8), obtém-se:

$$|\bar{I}_L + \bar{I}_R| = SLP \cdot |\bar{I}_L - \bar{I}_R|, \quad (5.5)$$

$$\left| \frac{\bar{I}_R}{\bar{I}_L} + 1 \right| = SLP \cdot \left| 1 - \frac{\bar{I}_R}{\bar{I}_L} \right|, \quad (5.6)$$

$$|a + jb + 1| = SLP \cdot |-a - jb + 1|, \quad (5.7)$$

$$\left( a + \frac{1 + SLP^2}{1 - SLP^2} \right)^2 + b^2 = \left( \frac{1 + SLP^2}{1 - SLP^2} \right)^2 - 1 \quad (5.8)$$

A Equação (5.8) representa uma circunferência com as seguintes características:

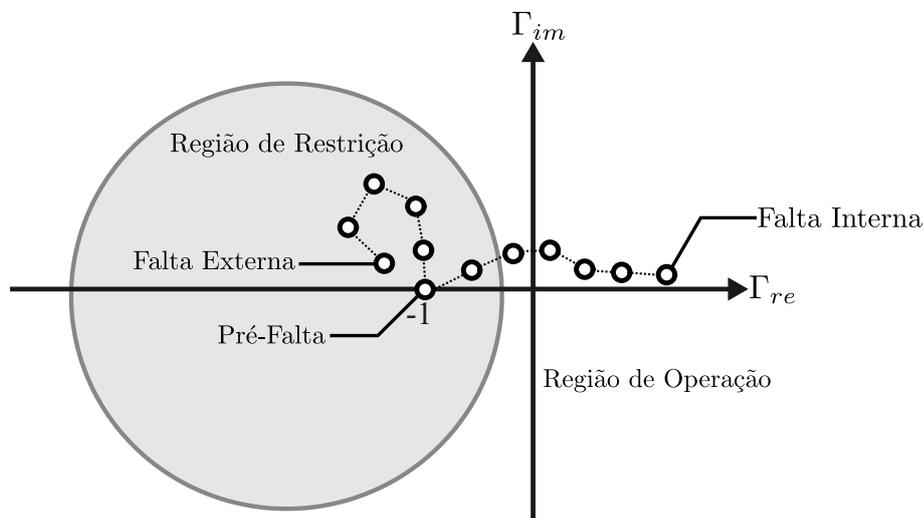
$$CENTRO : \left( -\frac{1 + SLP^2}{1 - SLP^2}, 0 \right), \quad RAI0 : \frac{2SLP}{1 - SLP^2} \quad (5.9)$$

A circunferência obtida representa o limiar de operação da função diferencial de corrente. Nesta, a área interna corresponde à região de restrição, enquanto que a área externa aos limites da circunferência representa a região de operação da função. Na Figura 5.2 é apresentado o limiar de operação circular obtido no plano alfa.

Para os cenários de regime permanente de pré-falta e faltas externas, as correntes nos terminais local e remoto da linha apresentam, idealmente, módulos iguais e sentidos contrários, de tal que forma que  $\bar{I}_R = -\bar{I}_L$ . Portanto, ao proceder com o cálculo do coeficiente do plano alfa,  $\Gamma$ , o mesmo situa-se no ponto  $(-1;0)$  do plano complexo, ou na prática, muito próximo deste ponto. Já para o caso de faltas internas, de modo geral, os ângulos dos fasores apresentam valores próximos. Conseqüentemente, os pontos no plano alfa estarão fora da região de restrição, próximos ao eixo real positivo (ALMEIDA, 2016).

A Figura 5.3 apresenta o mapeamento do limiar de atuação do plano  $I_{op}$  x  $I_{res}$  para o plano alfa considerando três valores distintos de *slope* pra fins de comparação. É possível perceber que ao aumentar a constante de sensibilidade, há uma retração da região de operação em ambos os planos de representação. Em contrapartida, há uma expansão na região de restrição.

Por fim, oportuno se faz mencionar que a circunferência obtida como região de restrição pelo mapeamento do limiar de operação depende de como é definida a corrente de restrição. A escolha por uma outra formulação, implica em diferentes características de restrição no plano alfa, conforme relatado na literatura (ROBERTS *et al.*, 2001).



**Figura 5.2.** Análise da operação no plano alfa.

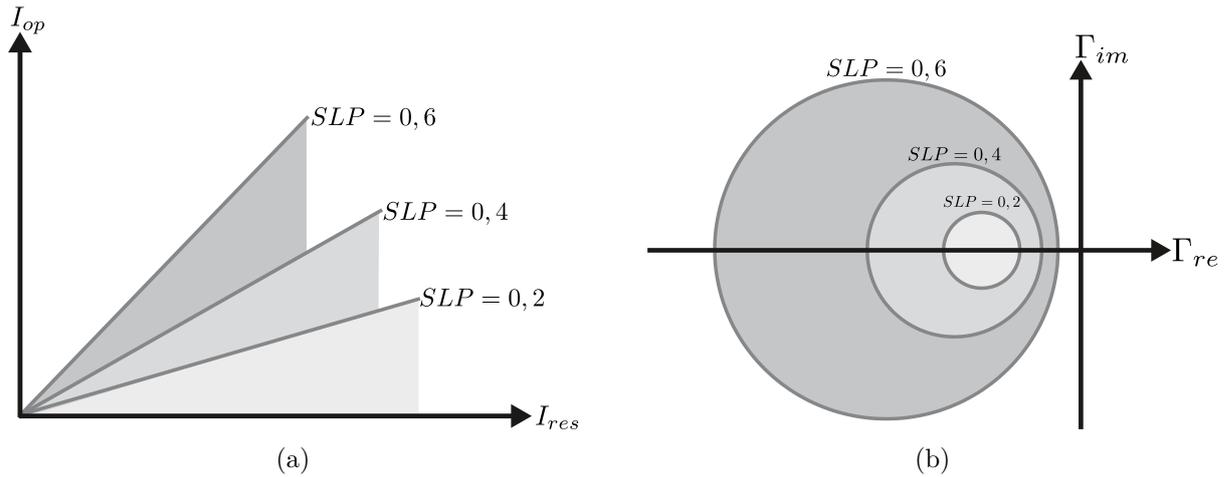


Figura 5.3. Comparação do mapeamento. (a) Plano  $I_{op} \times I_{res}$ . (b) Plano Alfa.

## 5.2 PAG ORIGINAL PROPOSTO POR MILLER ET AL. (2010)

O plano alfa foi originalmente proposto para cobrir aplicações de linhas de transmissão de dois terminais. Portanto o seu uso é limitado a esta configuração de equipamento. Esta limitação associada a expansão de aplicações com múltiplos terminais fez com que Miller *et al.* (2010) propusesse a formulação do plano alfa generalizado (PAG). Por meio desta técnica, os  $k$  terminais do equipamento protegido são mapeados em apenas dois,  $M$  e  $N$ , formando assim um equipamento equivalente de dois terminais, como ilustrado na Figura 5.4.

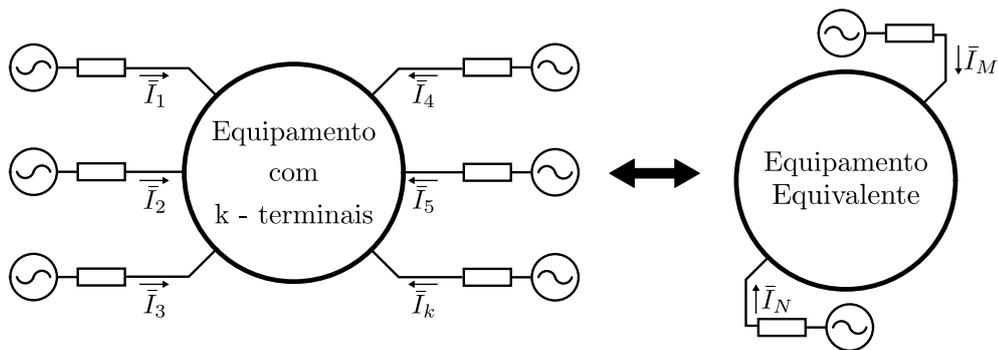


Figura 5.4. Conceito básico do plano alfa generalizado.

A estratégia do PAG permite que as vantagens observadas com a utilização do plano alfa possam ser aplicadas para linhas de transmissão de múltiplos terminais, além disso, é possível estender a utilização desta técnica para outros tipos de equipamentos, como barramentos e transformadores.

Para realizar o mapeamento proposto pelo PAG, parte-se da premissa que as correntes diferencial e de restrição devem ser iguais nos dois equipamentos. Dessa forma, têm-se as

seguintes definições para o equipamento com  $K$  terminais:

$$\bar{I}_{dif} = \sum_{k=1}^K \bar{I}_k = I_{dif,re} + jI_{dif,im} \quad (5.10)$$

$$I_{res} = \sum_{k=1}^K |\bar{I}_k| \quad (5.11)$$

Já no elemento equivalente de dois terminais,  $\bar{I}_{dif}$  e  $I_{res}$  são calculadas como:

$$\bar{I}_{dif,eq} = \bar{I}_M + \bar{I}_N \quad (5.12)$$

$$I_{res,eq} = |\bar{I}_M| + |\bar{I}_N| \quad (5.13)$$

Para determinar as correntes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ , igualam-se as correntes diferenciais e de restrição para os dois equipamentos, como demonstrado abaixo.

$$\bar{I}_{dif} = \bar{I}_{dif,eq} \quad (5.14)$$

$$I_{res} = I_{res,eq} \quad (5.15)$$

Este sistema de equações possui quatro incógnitas, sendo elas as partes reais e imaginárias dos fasores  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ . Contudo, analisando as Equações (5.14) e (5.15), existem apenas três equações de contorno, dadas pelas partes real e imaginária de  $\bar{I}_{dif}$  e o valor absoluto de  $I_{res}$ . Nesse sentido, o sistema de equações tem grau de liberdade um, de modo que se faz necessário a atribuição do valor de uma das variáveis, determinando-se em seguida os valores das demais de acordo com as relações estabelecidas.

Para tanto, Miller *et al.* (2010) optou por arbitrar o ângulo de  $\bar{I}_N$  como sendo igual ao ângulo da corrente com a maior projeção sobre  $\bar{I}_{dif}$ . Dessa forma, cada uma das  $K$  correntes tem sua projeção sobre  $\bar{I}_{dif}$  calculada, como demonstrado na Equação (5.16) abaixo:

$$R_k = Re\{\bar{I}_k \cdot \bar{I}_{dif}^*\} \quad (5.16)$$

onde  $*$  representa o conjugado de um número complexo.

Selecionada a corrente de maior projeção,  $\bar{I}_p$ , define-se o ângulo de referência  $\beta$  como:

$$\beta = \angle \bar{I}_p \quad (5.17)$$

Segundo Miller *et al.* (2010), essa escolha garante uma maior sensibilidade para curtos-circuitos internos e uma maior segurança para curtos-circuitos externos com saturação de TCs.

A partir de manipulações matemáticas, chegam-se às seguintes expressões para as correntes equivalentes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ :

$$\bar{I}_X = \bar{I}_{dif} \cdot \angle(-\beta) \quad (5.18)$$

$$\bar{I}_M = \left\{ \frac{I_m(\bar{I}_X)^2 - [I_{res} - Re(\bar{I}_X)]^2}{2[I_{res} - Re(\bar{I}_X)]} + j \cdot Im(\bar{I}_X) \right\} \cdot 1\angle(\beta) \quad (5.19)$$

$$\bar{I}_N = (I_{res} - |\bar{I}_M|) \cdot 1\angle(\beta) \quad (5.20)$$

Determinadas as correntes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ , o plano alfa pode ser calculado como:

$$\Gamma = \frac{\bar{I}_M}{\bar{I}_N} = \Gamma_{re} + j\Gamma_{im} \quad (5.21)$$

A fim de prover uma maior segurança durante a ocorrência de faltas externas com saturação de TC, pode ser utilizada a estratégia de restrição por harmônicas associada a implementação de uma lógica de detecção de falta externa. Dessa forma, quando uma falta externa é detectada, incrementa-se a corrente de restrição com as harmônicas, geralmente de segunda, quarta e quinta ordem (KASZTENNY *et al.*, 2013). O aumento da corrente de restrição implica que  $\Gamma$  estará mais próximo do ponto (-1;0) do plano complexo. Assim, a Equação (5.11) pode ser reescrita da seguinte forma:

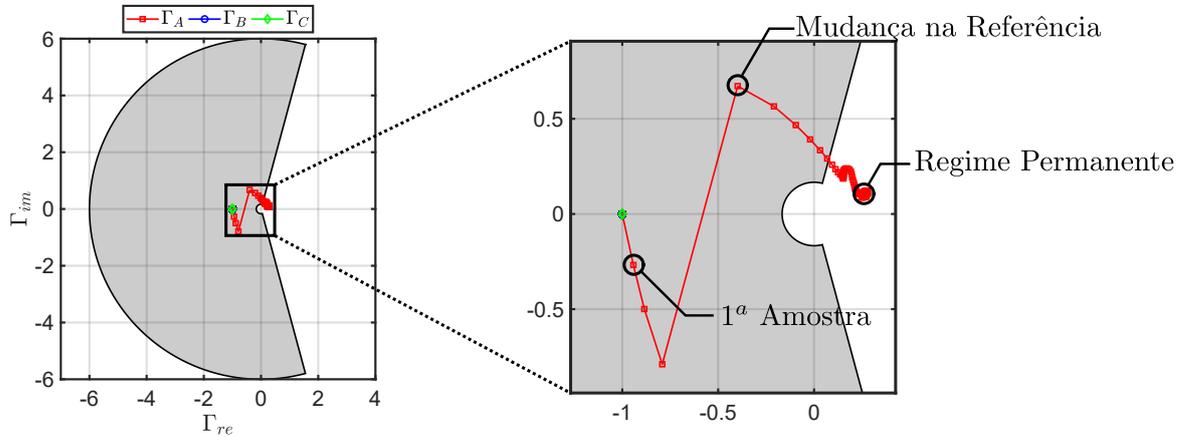
$$I_{res} = \sum_{k=1}^K |\bar{I}_k| + f_{ext} \cdot k_h \left( \sum_{k=1}^K |\bar{I}_{k,h}| \right) \quad (5.22)$$

onde  $f_{ext}$  é a variável de saída da lógica de detecção de faltas externas,  $k_h$  é um fator de multiplicação e  $\bar{I}_{k,h}$  é a corrente harmônica de ordem  $h$ , para o terminal  $k$ .

### 5.2.1 Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos

Para ilustrar a utilização do PAG proposto por Miller *et al.* (2010) na proteção diferencial de barramentos, recorre-se a análise de uma falta interna AT franca, com ângulo de incidência de noventa graus em uma das barras de uma subestação com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, operando em 230 kV/60 Hz. A barra em que incidiu a falta possui quatro circuitos conectados. Dessa forma, aplicou-se o PAG proposto por Miller *et al.*

(2010) , para obtenção das correntes equivalentes, e em seguida foram calculados os coeficientes para cada fase ( $\Gamma_A, \Gamma_B, \Gamma_C$ ), além disso foi utilizada a característica de restrição modificada. O resultado obtido é mostrado na Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Utilização do PAG proposto por Miller *et al.* (2010) na proteção diferencial de barramentos.

Os coeficientes  $\Gamma_A$  se deslocam da região de pré-falta  $(-1;0)$ , quando o módulo da corrente diferencial é superior a um limiar estabelecido. Na Figura 5.5 é indicada a primeira amostra com falta na região de restrição, adicionalmente, mostra-se o deslocamento na trajetória dos pontos devido a uma mudança de referência para o ângulo  $\beta$ . Por fim, chama-se a atenção para tortuosa trajetória percorrida no plano alfa até a região de estabilização em regime permanente de falta, como consequência desse efeito, pode-se citar um atraso de oito amostras para o elemento diferencial sair da característica de restrição.

### 5.3 PAG ALTERNATIVO PROPOSTO POR SILVA & BAINY (2016)

Alternativamente a formulação original proposta por Miller *et al.* (2010), Silva & Bairy (2016) propuseram uma versão alternativa para o PAG, com o objetivo de contornar algumas fragilidades presentes na versão anterior. A solução proposta por Miller *et al.* (2010) para resolução do sistema de equações em (5.14) e (5.15) é altamente dependente da escolha de um terminal como referência para o cálculo das correntes equivalentes,  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ . A desvantagem desta solução reside na mudança do terminal de referência durante as transições entre o regime permanente de pré-falta, período transitório de falta e o regime permanente de pós-falta. Esse fenômeno pode comprometer a trajetória dos coeficientes no plano alfa, retardando a atuação da função de proteção, e, em alguns casos, devido a uma particularidade da formulação original,

durante o cálculo do elemento diferencial, pode ocorrer uma divisão por zero, de tal forma que se essas condições foram identificadas, o algoritmo força a posição do elemento diferencial no ponto  $(0; 0)$  do plano complexo.

A solução proposta por Silva & Bairy (2016) consiste na utilização de uma formulação alternativa para as correntes de restrição. Primeiramente, a Equação (5.22) para a corrente de restrição é alterada de tal forma a incluir uma constante multiplicativa  $k$ , como demonstrado abaixo:

$$I_{res} = k \sum_{k=1}^K |\bar{I}_k| + f_{ext} \cdot k_h \left( \sum_{k=1}^K |\bar{I}_{k,h}| \right) \quad (5.23)$$

Além disso, adota-se a seguinte definição para a corrente de restrição equivalente:

$$\bar{I}_{res,eq} = \bar{I}_M - \bar{I}_N \quad (5.24)$$

Da mesma maneira que a versão original, a determinação das correntes equivalentes,  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ , passa pela equivalência entre as correntes diferencial e de restrição, para os dois sistemas. Porém, a escolha de uma representação fasorial para  $\bar{I}_{res,eq}$  leva a um sistema linear de equações determinado e consistente, não sendo mais necessário arbitrar o valor de uma das variáveis e simplificando de sobremaneira a formulação. O sistema linear obtido a partir da formulação proposta por Silva & Bairy (2016) é apresentado abaixo:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{M,re} \\ I_{M,im} \\ I_{N,re} \\ I_{N,im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dif,re} \\ I_{dif,im} \\ I_{res} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

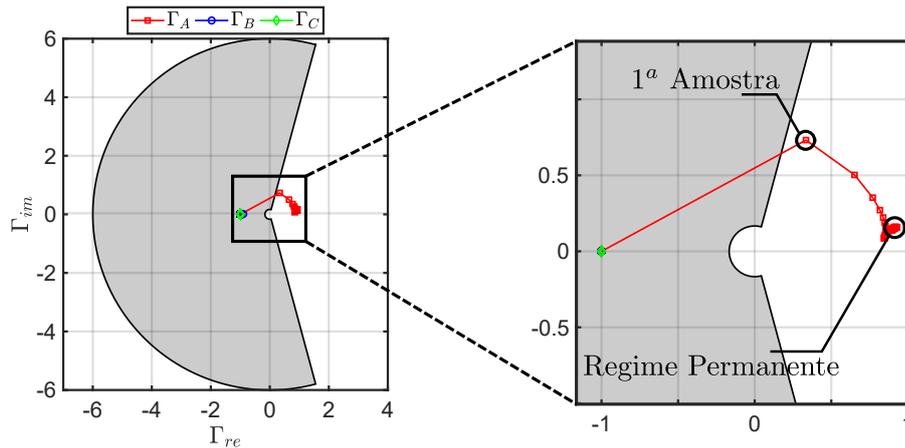
Com a resolução do sistema, chega-se às seguintes expressões para as correntes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ :

$$\bar{I}_M = 0.5[(I_{dif,re} + I_{res}) + jI_{dif,im}] \quad (5.26)$$

$$\bar{I}_N = 0.5[(I_{dif,re} - I_{res}) + jI_{dif,im}] \quad (5.27)$$

### 5.3.1 Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos

As mesmas condições impostas para a análise da formulação proposta por Miller *et al.* (2010) são utilizadas para avaliação da versão proposta por Silva & Bairy (2016). O resultado obtido é mostrado na Figura 5.6.



**Figura 5.6.** Utilização do PAG proposto por Silva & Bairy (2016) na proteção diferencial de barramentos.

Ao analisar a figura, pode-se perceber que esta formulação permite um comportamento mais uniforme no plano alfa. Além disso, destaca-se que a primeira amostra de falta já está fora da região de restrição, diferentemente do que ocorre com o PAG proposto por Miller *et al.* (2010). Por fim, é possível perceber que a trajetória percorrida da primeira amostra de falta até a região de estabilização em regime permanente de falta é mais direta e suave, o que leva a um desempenho mais rápido e confiável por parte da função de proteção, visto que o elemento diferencial não percorre a trajetória dentro da característica de restrição..

#### 5.4 NOVO PAG ALTERNATIVO PROPOSTO POR BAINY & SILVA (2020)

A solução alternativa proposta por Silva & Bairy (2016) já apresentava uma performance melhor quando comparada ao PAG original proposto por Miller *et al.* (2010), porém, ainda assim alguns fatores precisavam ser aperfeiçoados para tornar a solução mais completa. Dentre esses fatores, destacam-se o ajuste do coeficiente multiplicativo  $k$ , que havia sido validado apenas de forma empírica, além da questão de se ter um maior controle sobre os pontos no plano alfa, de forma a prover proteções mais personalizadas. Neste contexto, os autores propuseram em (BAINY; SILVA, 2020) uma nova versão aprimorada do algoritmo de 2016, em que as problemáticas anteriormente citadas foram superadas.

O novo algoritmo alternativo proposto por Bairy & Silva (2020) tem como principais características o controle sobre a região de repouso em regime permanente de falta no plano alfa, aliado a uma trajetória transitória mais bem comportada e suave. A formulação proposta cul-

minou em dois importantes desdobramentos para a proteção diferencial baseada no PAG, que são a definição de uma característica de operação, ao invés da utilização de uma característica de restrição, e o fato dos ajustes da função independermem do tipo de equipamento que está sendo protegido.

O algoritmo aprimorado segue as mesmas premissas da versão anterior, porém apresenta em sua formulação a utilização de fatores de ajuste para se obter o controle desejado sobre a região de assentamento dos pontos no plano alfa. A seguir, apresenta-se sucintamente a formulação proposta.

Bainy & Silva (2020) definem as correntes diferencial e de restrição do elemento equivalente como sendo:

$$\bar{I}_{dif,eq} = \bar{I}_M + \bar{I}_N, \quad \bar{I}_{res,eq} = \eta_1 \bar{I}_M - \eta_2 \bar{I}_N, \quad (5.28)$$

onde  $\eta_1$  e  $\eta_2$  são fatores de ajuste.

Para obter as correntes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ , primeiramente, realiza-se a equivalência entre as correntes diferencial e de restrição, conforme o equacionamento apresentado em (5.14) e (5.15). A partir daí, obtém-se o seguinte sistema linear de equações:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \eta_1 & 0 & -\eta_2 & 0 \\ 0 & \eta_1 & 0 & -\eta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{M,re} \\ I_{M,im} \\ I_{N,re} \\ I_{N,im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dif,re} \\ I_{dif,im} \\ I_{res} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

Assim como na versão anterior, a nova solução proposta por Bainy & Silva (2020) recai em um sistema possível e determinado, graças a escolha da corrente de restrição equivalente como uma grandeza fasorial. Resolvendo o sistema de equações acima, encontram-se as seguintes expressões para as correntes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ :

$$\bar{I}_M = \frac{1}{\eta_1 + \eta_2} (\eta_2 \bar{I}_{dif} + I_{res}), \quad \bar{I}_N = \frac{1}{\eta_1 + \eta_2} (\eta_1 \bar{I}_{dif} - I_{res}) \quad (5.30)$$

Analisando as Equações em (5.30), percebe-se que a formulação do PAG proposto possui dois ajustes,  $\eta_1$  e  $\eta_2$ , os quais influenciam diretamente a região de repouso em regime permanente de falta no plano alfa. Como é desejável ter controle sobre a região em que  $\Gamma$  estará no regime permanente de falta, Bainy & Silva (2020) propuseram ajustar  $\eta_1$  e  $\eta_2$  por meio da formação de uma região circular de repouso.

Basicamente, é desejado que durante o regime permanente de falta  $\Gamma$  recaía sobre um região de repouso circular, a qual é caracterizada por um centro,  $\Gamma_f$ , que deverá estar sobre o eixo real positivo do plano alfa e um raio,  $k_\Delta$ . Portanto,  $\eta_1$  e  $\eta_2$  são descritos em função dos ajustes da região circular escolhida. A partir de manipulações matemáticas, Bairy & Silva (2020) obtiveram as seguintes expressões para os ajustes  $\eta_1$  e  $\eta_2$ :

$$\eta_1 = \frac{1}{k_\Delta}(1 + \Gamma_f) \quad \eta_2 = \Gamma_f \cdot \eta_1 \quad (5.31)$$

Os valores para  $\Gamma_f$  e  $k_\Delta$  devem ser escolhidos de forma que os seguintes requisitos sejam atendidos: 1)  $\Gamma_f$  deve ser maior que um ( $\Gamma_f > 1$ ), e 2)  $k_\Delta$  deve ser ajustado para um valor menor que 5% de  $\Gamma_f$ . Segundo Bairy & Silva (2020), o primeiro requisito garante uma maior segurança, pois distancia  $\Gamma$  do ponto de pré-falta no plano alfa,  $(-1;0)$ . O segundo requisito é importante para garantir uma pequena região circular de repouso em regime permanente de falta, e, conseqüentemente, valores próximos para  $\Gamma$  em todos os elementos diferenciais de fase (ou seja,  $\Gamma_A$ ,  $\Gamma_B$  e  $\Gamma_C$ ).

A possibilidade de controlar onde os pontos de  $\Gamma$  estarão durante o regime permanente de falta permitiu que Bairy & Silva (2020) desenvolvessem uma característica de operação, algo até então disruptivo quando se refere ao PAG. As formulações anteriores do PAG faziam uso de uma característica de restrição, geralmente a característica *rainbow* (ROBERTS *et al.*, 2001). Apesar das suas grandes vantagens, a característica de restrição modificada foi desenvolvida a partir do comportamento operacional de linhas de transmissão, o que tornaria a sua aplicação para outros tipos de equipamento de certa forma questionável. Portanto, a proposição de uma característica de operação que independe do tipo de equipamento que está sendo protegido, contribui para superar a lacuna da utilização do PAG em outros tipos de equipamentos.

Com relação a característica de operação proposta por Bairy & Silva (2020), escolheu-se uma circunferência concêntrica a região de repouso em regime permanente de falta, e com raio dado por  $\Psi \cdot k_\Delta$ , o qual pode ser ajustado de acordo com os requisitos de sensibilidade desejados, quanto maior o valor de  $\Psi$ , mais sensível será a função de proteção. Além disso, Bairy & Silva (2020) estabelecem um intervalo de valores para o fator multiplicativo  $\Psi$ ,  $(1,05 \leq \Psi \leq \frac{\Gamma_f}{k_\Delta})$ , de forma a garantir a melhor performance para o algoritmo proposto. A Figura 5.7 apresenta o comportamento do PAG proposto por Bairy & Silva (2020) no plano alfa.

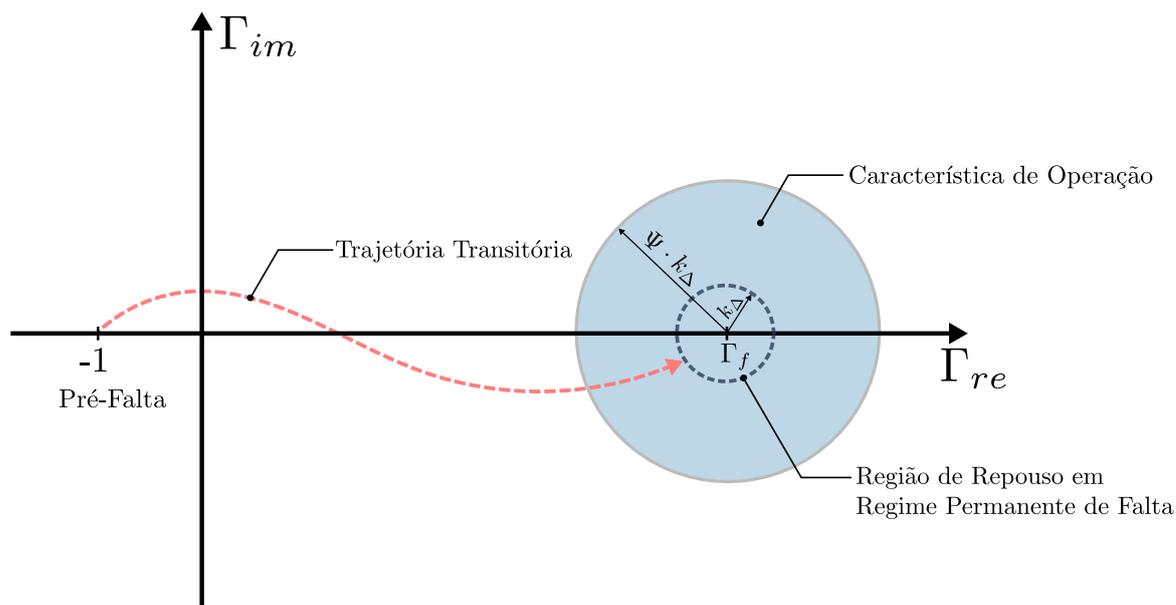


Figura 5.7. Comportamento do PAG proposto por Baily & Silva (2020).

#### 5.4.1 Avaliação da Formulação na Proteção de Barramentos

Assim como no caso anterior, as mesmas condições de teste foram estabelecidas. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.8. Pode-se observar que a primeira amostra de falta percorreu uma trajetória retilínea e direta do ponto de pré-falta,  $(-1;0)$ , até a região de operação, fato esse que não ocorre na formulação proposta por Miller *et al.* (2010). Adicionalmente, verifica-se que, de fato, a formulação proposta por Baily & Silva (2020) permite controlar a região de repouso dos pontos em regime permanente de falta. Esse fato é constatado com a concentração de amostras em torno do centro ( $\Gamma_f = 10$ ) da região circular definida. Além da trajetória transitória direta e do controle sobre a região de repouso, destaca-se ainda o número reduzido de três amostras para se estabelecer a região de regime permanente.

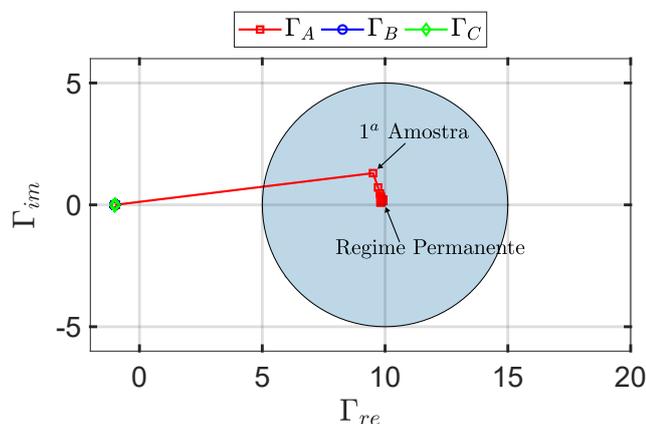


Figura 5.8. Utilização do PAG proposto por Baily & Silva (2020) na proteção diferencial de barramentos.

## CAPÍTULO 6

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas a metodologia utilizada para a integração da técnica do PAG junto ao relé SEL-487B, bem como a metodologia de teste aplicada para avaliar o desempenho do algoritmo nativo do relé, comparando-o com os resultados obtidos para a técnica integrada. Para realizar a análise comparativa entre os algoritmos, foram simuladas as mais diversas condições de falta no programa ATP, destacando-se a avaliação de faltas internas, externas e evolutivas. Adicionalmente, recorre-se a uma análise de sensibilidade para os parâmetros de resistência de falta, ângulo de incidência da falta e nível de saturação do TC, de forma a delimitar as fronteiras de atuação para cada algoritmo. Os resultados obtidos são avaliados por meio dos critérios de velocidade, confiabilidade e uniformidade de operação.

### 6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA ANALISADO

O sistema elétrico de potência avaliado nesta dissertação é apresentado na Figura 6.1, e consiste em uma subestação com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, operando em 230 kV/60 Hz. Durante a operação normal do sistema, as linhas de transmissão LT1, LT3, bem como o trafo TF1 estão conectados à Barra 1. Já as linhas de transmissão LT2 e LT4 e o trafo TF2 estão conectados à Barra 2. Além disso, a interligação entre as barras é feita por meio de um disjuntor de amarre, o qual permanece fechado durante a operação normal do sistema.

Para cada circuito conectado a um dos barramentos da subestação foram modeladas, por meio do teorema de *Thévenin*, fontes e impedâncias remotas equivalentes. Os parâmetros das linhas de transmissão, transformadores e equivalentes remotos são apresentados nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, respectivamente.

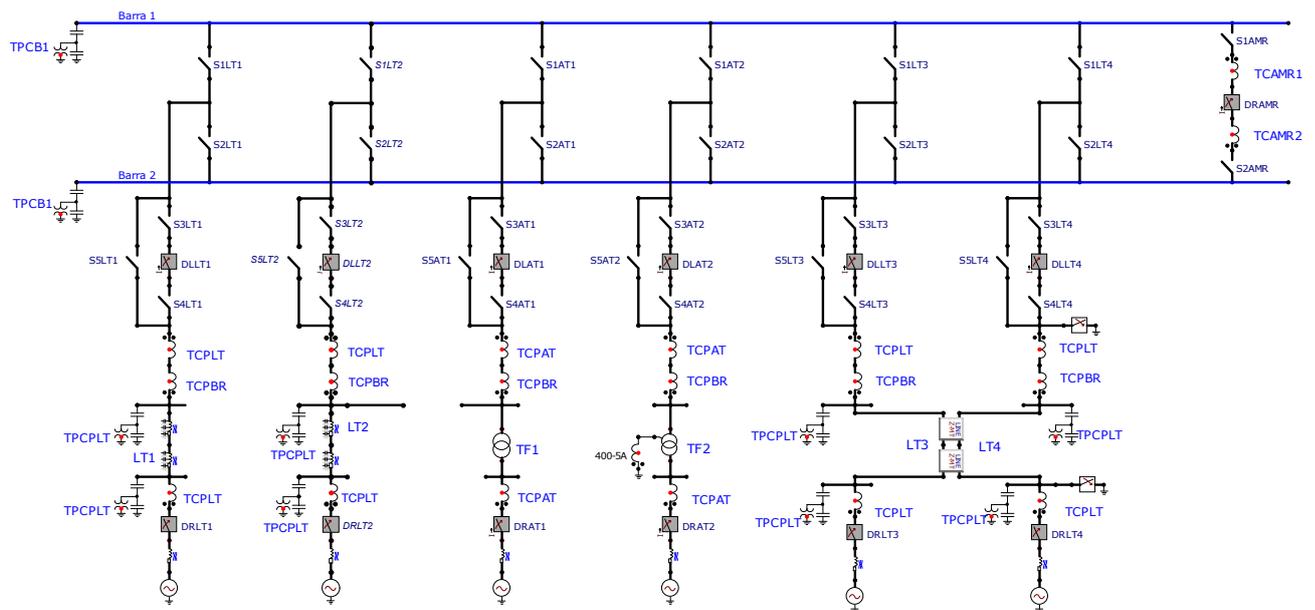


Figura 6.1. Diagrama unifilar do sistema elétrico de potência avaliado.

Tabela 6.1. Parâmetros das linhas de transmissão.

Linha de Transmissão	$Z_0(\Omega/km)$	$Z_1(\Omega/km)$	L(km)
LT1	$0,532 + j1,541$	$0,098 + j0,51$	180
LT2	$0,532 + j1,541$	$0,098 + j0,51$	180
LT3	$0,4432 + j1,5078$	$0,0001 + j0,3565$	200
LT4	$0,4432 + j1,5078$	$0,0001 + j0,3565$	200

Tabela 6.2. 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 6.3. Parâmetros dos equivalentes remotos.

Equivalente	Tensão (pu)	$Z_0(\Omega)$	$Z_1(\Omega/km)$
LT1	$1,00\angle 0^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
LT2	$1,00\angle -5^\circ$	$18,41 + j28,69$	$13,39 + j20,89$
LT3	$1,00\angle -10^\circ$	$18,42 + j28,69$	$13,39 + j20,87$
LT4	$1,00\angle 4^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
TF1	$1,00\angle -5^\circ$	$28,07 + j43,74$	$18,71 + j29,16$
TF2	$1,00\angle 0^\circ$	$5,52 + j8,61$	$4,02 + j6,26$

Os sinais de corrente de cada circuito são provenientes dos enrolamentos secundários dos TCs destinados a proteção das barras. Estes são do tipo C800 1200-5A e foram modelados conforme os modelos propostos por IEEE (2009), considerando as características de saturação.

## 6.2 INTEGRAÇÃO DO ALGORITMO DO PAG NO RELÉ SEL-487B

Os relés da série SEL-400 contam com áreas específicas para customização, via programação direta, das áreas de proteção e automação dos relés, denominadas *Free-Form SELogic Control Equation Programming*. Neste ambiente de programação livre, o usuário tem acesso a um conjunto de variáveis digitais e analógicas, as quais são utilizadas pelas funções de proteção nativas do relé, além de temporizadores e contadores para auxiliar na programação. Dessa forma, é possível realizar diversas operações matemáticas e booleanas, com o objetivo de criar lógicas adicionais, estender e personalizar a operação da proteção, além da possibilidade de implementar outros algoritmos. Cabe salientar que a área de programação livre voltada para proteção opera no mesmo intervalo de processamento dos algoritmos nativos do relé, fato esse que respalda a customização das funções de proteção (SEL, 2018).

Apesar de toda a série SEL-400 contar com essa função de customização das áreas de proteção e automação, cada relé possui uma quantidade limitada de armazenamento e processamento, para realizar tais personalizações. Os relés SEL-411L e SEL-487E, destinados a proteção diferencial de linhas e proteção de transformadores, respectivamente, contam com um total de 250 linhas para programação livre, em cada um dos seus grupos de ajuste, enquanto que para o relé SEL-487B são destinadas 100 linhas por grupo de ajuste. De fato, é compreensível a capacidade reduzida destinada ao relé de proteção diferencial de barras, visto que este recebe como entrada um número bem superior de sinais, quando comparado aos relés 411L e 487E, e portanto irá requerer grande parte da capacidade de processamento disponível para o tratamento dos sinais e execução das funções nativas do relé. A capacidade reduzida de processamento na área de programação livre torna-se um desafio para a criação de lógicas adicionais dentro do relé, de tal forma que o usuário precisa seguir as diretrizes de programação eficiente, para não exceder a capacidade de processamento do relé durante a implementação de seu algoritmo.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, o cálculo das correntes equivalentes  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$  dependem das correntes diferencial e de restrição, além dos ajustes  $\Gamma_f$  e  $k_\Delta$ . Contudo, o usuário não tem acesso a corrente diferencial do relé, apenas ao módulo desta corrente. Portanto, faz-se necessário o cálculo desta grandeza durante a integração. Outra adaptação necessária para realizar a integração do algoritmo no relé, diz respeito a restrição por harmônicos no caso de uma falta externa, presente na formulação do PAG. O relé não faz uso de harmônicas em

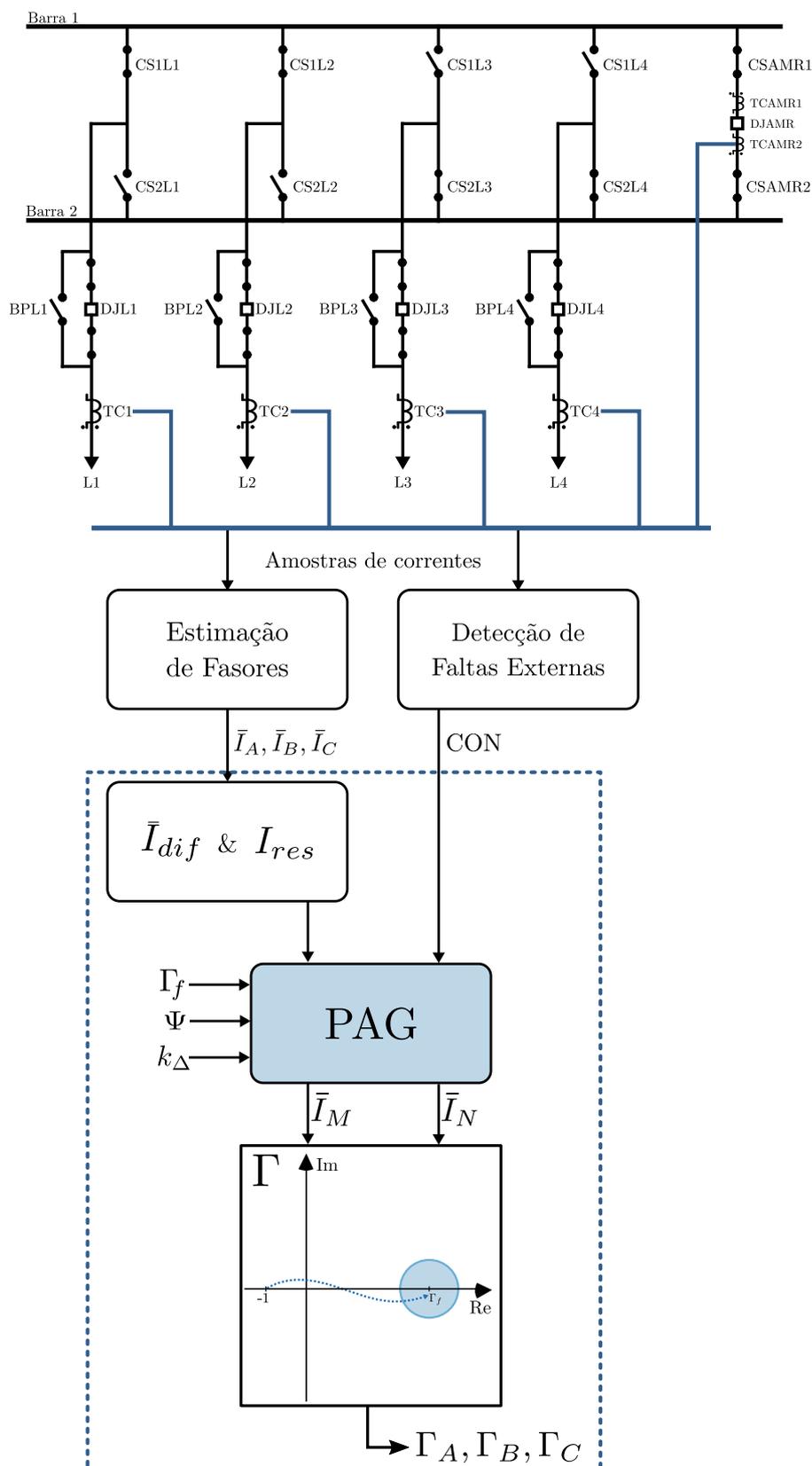
seu algoritmo nativo. Portanto, para restringir a atuação do PAG no caso de faltas externas, é utilizada a variável lógica CON para fixar os coeficientes do plano alfa no ponto (-1;0) do plano complexo, ou seja, enquanto a variável de falta externa do relé estiver ativa, o elemento diferencial será forçado a ficar no ponto de repouso em regime permanente de pré-falta. Caso contrário, o algoritmo está habilitado para proceder com o cálculo normal da razão do PAG.

A Figura 6.2 apresenta o diagrama de blocos ilustrando a integração do PAG no relé. Em pontilhado, são destacadas todas as etapas que foram implementadas na área de programação livre do relé. O processo de estimação fasorial e a lógica de detecção de faltas externas são realizados pelo próprio relé. Portanto, faz-se o uso dessas grandezas para calcular a corrente diferencial e de restrição para o PAG. Em seguida, são calculadas as correntes equivalentes,  $\bar{I}_M$  e  $\bar{I}_N$ , para cada fase e para cada zona de proteção. Por fim, é calculada a razão entre as correntes equivalentes para determinar os elementos de fase do PAG. Reforça-se que o algoritmo permite uma operação segregada por fase, com abertura monopolar de disjuntores. O processo realizado demonstra que o algoritmo do PAG poderia ser facilmente integrado nos algoritmos dos fabricantes, dada a simplicidade de sua formulação.

### 6.3 SIMULAÇÕES, METODOLOGIA DE TESTES E AJUSTES

A Figura 6.3 apresenta a metodologia de teste empregada para avaliação do desempenho da função de proteção nativa do relé SEL-487B e do algoritmo do PAG integrado a ele. A partir do arquivo .ATP do sistema avaliado, ilustrado na Figura 6.1, gera-se uma base de casos com diversos cenários de falta no formato COMTRADE, por meio de uma solução personalizada para automação de testes desenvolvida na linguagem *Python* no âmbito do laboratório de proteção de sistemas elétricos. Esta solução permite ao usuário a simulação em massa de diversos cenários de falta, a partir da variação dos parâmetros desejados tais como tipo de falta, resistência de falta e ângulo de incidência.

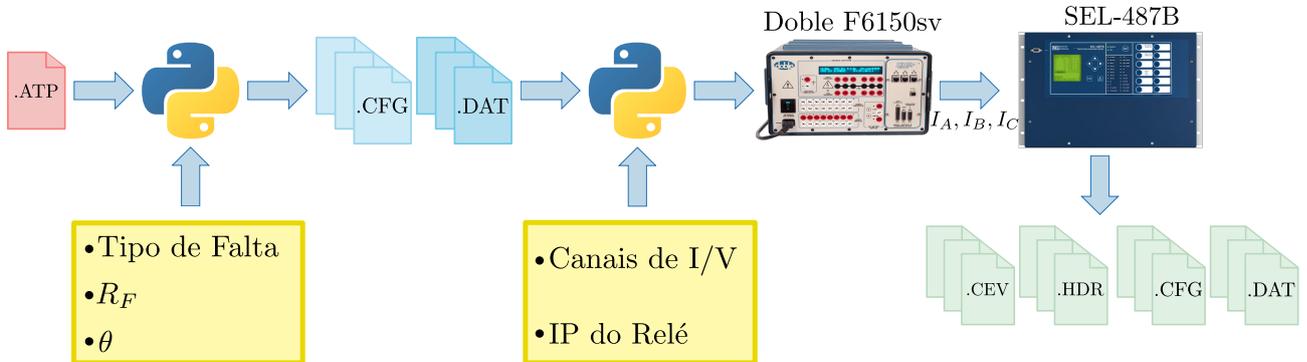
Com os arquivos COMTRADE gerados, é necessário carregar cada um dos casos e configurar os canais de corrente na mala de teste *Doble F6150sv*. Após esta etapa, a mala de testes efetua a reprodução dos sinais de corrente diretamente nos canais analógicos do relé SEL-487B. Ao fim da reprodução do evento, efetua-se a coleta dos registros que contêm as variáveis analógicas e



**Figura 6.2.** Diagrama de blocos ilustrando a integração da nova formulação do PAG alternativa no relé SEL-487B.

lógicas que demonstram o desempenho das funções de proteção utilizadas no relé. Cabe ressaltar que os registros disponibilizados pelo relé para análise de grandezas analógicas, o arquivo .CEV,

possui uma taxa de amostragem de 12 amostras/ciclo. Por fim, cada registro proveniente do relé é analisado, comparando as variáveis de interesse para mensurar o desempenho do algoritmo de proteção nativo do relé e o algoritmo do PAG.



**Figura 6.3.** Metodologia de teste adotada para avaliação experimental.

Em relação aos ajustes utilizados nas lógicas de proteção do relé SEL-487B, este foi parametrizado conforme as recomendações contidas no manual do dispositivo (SEL, 2018). É oportuno mencionar que a mala de testes possui um limite máximo de corrente a qual esta é capaz de reproduzir. Portanto, quando os níveis de curto-circuito envolvidos na simulação superam esse valor máximo, é necessário utilizar um fator de escala para os canais de corrente da mala. Este fato implica numa adequação dos ajustes do relé com o mesmo fator de escala, para que haja uma coerência na ordem de grandeza dos sinais avaliados. O valor de cada ajuste utilizado nos testes realizados é apresentado na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4.** Ajustes das lógicas de proteção do relé SEL-487B.

Ajuste	Valor (p.u.)
O87P	0,1
SLP1	0,6
SLP2	0,8
RTDI	0,1
OPDI	0,1
50DSP	0,05

A respeito da definição das zonas de proteção do relé, optou-se por utilizar zonas de proteção segregadas por fase. Como a configuração da subestação avaliada é barra dupla, são necessárias três zonas de proteção para cada barra. A descrição de cada zona ajustada no relé é apresentada na Tabela 6.5.

**Tabela 6.5.** Ajustes das zonas de proteção do relé SEL-487B.

Zona	Elemento Protegido
ZONA 1	Fase A - Barra 1
ZONA 2	Fase B - Barra 1
ZONA 3	Fase C - Barra 1
ZONA 4	Fase A - Barra 2
ZONA 5	Fase B - Barra 2
ZONA 6	Fase C - Barra 2

Por fim, a Tabela 6.6 apresenta os ajustes da nova função alternativa do PAG, conforme proposto por Bainy & Silva (2020).

**Tabela 6.6.** Ajustes do PAG.

Ajuste	Valor
$\Gamma_f$	10
$k_\Delta$	0,2
$\Psi$	25

## 6.4 RESULTADOS

Para avaliar o desempenho das funções de proteção do relé e do PAG foram realizadas análises de regime transitórios para casos pontuais e análises de sensibilidade paramétrica.

A avaliação em caráter transitório permite verificar o comportamento da trajetória percorrida pelo elemento diferencial tanto no plano  $I_{op} \times I_{res}$  quanto no plano alfa. Além disso, de forma a contribuir para uma avaliação mais detalhada dos resultados de cada caso, analisa-se a resposta no tempo das lógicas de proteção mais relevantes do relé, das correntes de operação e restrição e dos elementos de fase do PAG. Na Tabela 6.7 apresenta-se o significado de cada uma das variáveis lógicas utilizadas na análise dos casos.

A análise de sensibilidade paramétrica permite verificar o comportamento dos algoritmos de proteção, em regime permanente de falta, frente à variação de um parâmetro específico. Por fim, a validação dos resultados é corroborada por meio da análise dos tempos de atuação de cada algoritmo. Esse tempo é calculado como a diferença entre os instantes de emissão do comando de *trip* e de aplicação da falta. Para o relé SEL-487B, esse resultado é extraído do

próprio registo do relé, enquanto que para o algoritmo do PAG foi adotado o seguinte critério: caso o elemento diferencial de fase permaneça dentro da característica de operação pelo período de um quarto de ciclo consecutivo, a função está habilitada a enviar o comando de *trip*.

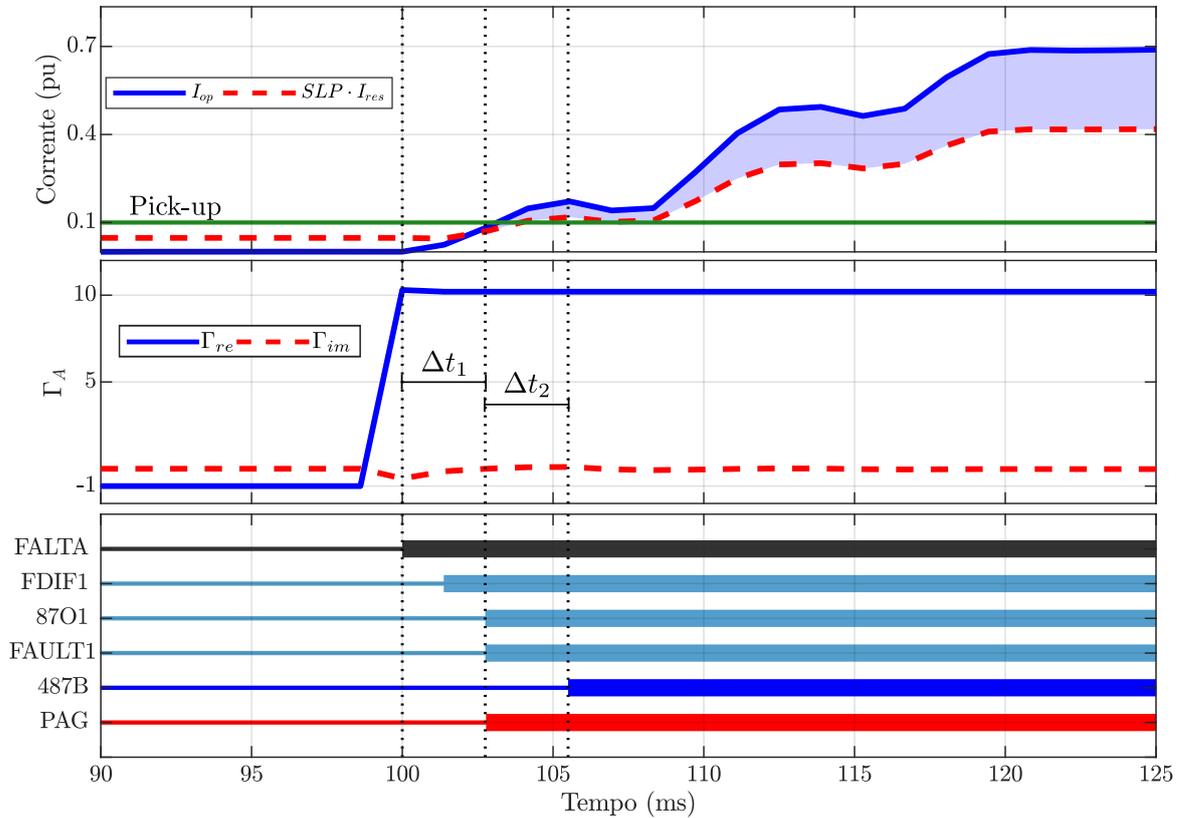
**Tabela 6.7.** Significado das variáveis lógicas nas figuras de estudo de caso.

Variável	Significado
FALTA	Aplicação de falta
FEXT	Aplicação de falta externa
FINT	Aplicação de falta interna
FDIF	$I_{op} > SLP \cdot I_{res}$
87O	$I_{op} > I_{pick-up}$
FAULT	$\dot{i}_{op} > SLP \cdot \dot{i}_{res}$
487B	Operação pela lógica de proteção do relé SEL-487B
PAG	Operação pela lógica de proteção do PAG

#### 6.4.1 Caso 1: Análise Transitória de um Curto-Circuito Monofásico Interno

Neste caso, um curto-circuito AT franco é aplicado na Barra 1 em  $t = 100$  ms, portanto a zona  $Z_1$  ajustada no relé deve ser capaz de identificar o defeito e enviar o comando de *trip* aos disjuntores dos circuitos conectados a ela, enquanto que as outras zonas ajustadas devem se manter estáveis. A Figura 6.4 apresenta a resposta no tempo das principais lógicas de proteção utilizadas pelo relé, bem como o comportamento do elemento de fase  $\Gamma_A$  do PAG, integrado ao relé. Primeiramente, observa-se que mediante a aplicação da falta no sistema, as correntes de operação e restrição crescem, de tal forma que uma amostra após o início do defeito, a corrente de operação supera a corrente de restrição ajustada pelo fator de sensibilidade, SLP1, resultando no acionamento da lógica do elemento diferencial filtrado, FDIF1, do relé. Consecutivamente, o limiar de *pick-up* é alcançado, acionando o elemento 87O1, e as condições para satisfazer o acionamento do elemento diferencial instantâneo, FAULT1, são satisfeitas. É oportuno mencionar que o elemento diferencial instantâneo possui um carácter oscilatório, isto é, as correntes de operação e restrição instantâneas variam durante o tempo, de tal forma que a corrente de operação passa por períodos crescentes e decrescentes, podendo haver atrasos para que as condições do elemento diferencial instantâneo sejam satisfeitas. Esse comportamento explica o motivo pelo qual o elemento diferencial filtrado foi capaz de ser acionado primeiro. Com relação ao desempenho do PAG, assim que a falta incide no sistema é possível observar

que o algoritmo é prontamente sensibilizado, na primeira amostra de falta. Tal fato pode ser observado na mudança do ponto de operação do elemento de fase  $\Gamma_A$ , o qual no período de pré-falta está no ponto  $(-1;0)$ , e assim que ocorre a falta o ponto se desloca para dentro da região de operação, no ponto  $(10;0)$ .



**Figura 6.4.** Resposta no tempo para um curto-circuito AT interno.

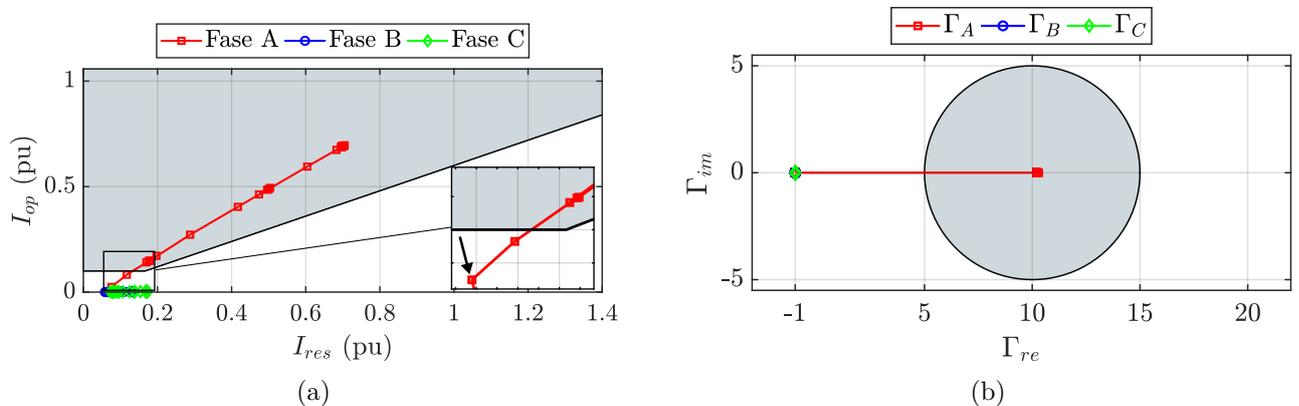
A Tabela 6.8 apresenta os tempos de atuação tanto do relé, quanto do PAG para o caso em questão. Além disso, a partir da análise das variáveis lógicas na Figura 6.4, é possível observar as diferenças de tempo ( $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ ) das lógicas utilizadas na função de proteção pelo relé, bem como seu tempo de atuação, com relação ao comportamento do algoritmo do PAG.

**Tabela 6.8.** Tempos de operação para um curto-circuito monofásico em ms.

Algoritmo	Fase A	Fase B	Fase C
487B	5,55	-	-
PAG	2,77	-	-

Os resultados também podem ser analisados a partir dos planos de representação adequados, onde é possível avaliar a trajetória percorrida pelo elemento diferencial desde a incidência da

falta até os instantes de regime permanente de falta. A Figura 6.5 apresenta os resultados do algoritmo de proteção utilizado pelo relé no plano  $I_{op} \times I_{res}$ , enquanto que os resultados para o PAG são apresentados no plano complexo, com a característica de operação citada anteriormente. Para realizar a comparação entre o desempenho dos dois algoritmos utilizando as ferramentas gráficas, avaliam-se a rapidez com que os pontos adentram as regiões de operação, a uniformidade da trajetória percorrida por cada elemento diferencial e a confiabilidade do algoritmo. Na Figura 6.5(a), a seta indica a primeira amostra após aplicação da falta no sistema, dessa forma é possível perceber que o algoritmo do relé demora duas amostras após a falta para adentrar a região de operação do plano  $I_{op} \times I_{res}$ . Em contrapartida, o algoritmo do PAG já desloca o ponto, assim que a falta é aplicada, para a característica circular de operação. Portanto, é possível afirmar que o PAG é duas amostras mais rápido, quando comparado com o relé, o que representa um ganho de 2,77 ms. Do ponto de vista da uniformidade das trajetórias percorridas, observa-se que no plano  $I_{op} \times I_{res}$ , o elemento diferencial da fase A sofre alguns desvios, devido as mudanças nas relações das correntes de operação e restrição ao logo da ocorrência da falta, e percebe-se ainda uma demora para que os pontos se estabilizem na região de regime permanente de falta. Já com relação ao PAG, verifica-se uma trajetória direta entre a região de pré-falta e a região de regime permanente de falta em torno do ponto (10;0), tal fato é justificado a partir do controle de ajustes da região de repouso proporcionada pela formulação proposta por Bainy & Silva (2020). Com relação aos requisitos de confiabilidade, ambos algoritmos operaram sem dificuldades para as condições de falta avaliadas no caso.



**Figura 6.5.** Caso 1 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

### 6.4.2 Caso 2: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Monofásico Interno

Com este caso deseja-se avaliar a influência do instante de falta e da resistência de falta no desempenho dos algoritmos. Para isso, recorreu-se a aplicação de um conjunto de faltas na Barra 1 envolvendo a fase A e a terra, nas quais os parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência, com referência senoidal, foram variados de  $0 \Omega$  até  $150 \Omega$ , em passos de  $5 \Omega$ , e de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ , em passos de  $30^\circ$ , respectivamente. Para a análise da variação de resistência de falta 31 casos foram avaliados. Já no que se refere à variação do ângulo de incidência 7 casos de faltas foram considerados.

Os resultados obtidos para os algoritmos do relé e do PAG são apresentados na Figura 6.6. É importante mencionar que ambas análises de variação paramétrica foram plotadas no mesmo gráfico mas são avaliadas de maneira independente. Analisando a resposta do relé frente a variação da resistência de falta, constata-se que este é capaz de operar corretamente para faltas de até  $105 \Omega$ , além desse limiar o algoritmo do relé não é capaz de identificar uma falta interna à zona de proteção. Diante de faltas de alta impedância, a proteção diferencial tradicional tem a sua atuação comprometida pois, em sua essência, esta nada mais é que um comparador de amplitude. Dessa forma, quando os sinais de correntes estão muito atenuados, a amplitude da corrente diferencial não será capaz de satisfazer as condições de operação da função. Particularmente para o relé, a corrente de operação nos casos de resistência de falta na faixa de  $110\text{-}150 \Omega$  não excedeu o *pick-up* ajustado. Portanto, o relé não operou. Com relação ao ângulo de incidência, sabe-se que este impacta diretamente na amplitude da componente de decaimento exponencial. Apesar desse fenômeno, foi constatado que o algoritmo do relé não é influenciado pelo ângulo de incidência da falta, como pode ser visto na Figura 6.6(a), na qual é destacada a região de repouso em regime permanente de falta para todos os valores de ângulo de incidência analisados.

A Figura 6.6(b) apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo do PAG. É constatado que a formulação proposta por Bainy & Silva (2020) é imune aos efeitos da resistência de falta, bem como do ângulo de incidência. Dessa forma, realizando uma análise quantitativa, o algoritmo do PAG foi capaz de operar em 100% dos cenários de falta avaliados, demonstrando alto grau de sensibilidade para as condições adversas de atenuação dos sinais de corrente. Em contrapartida,

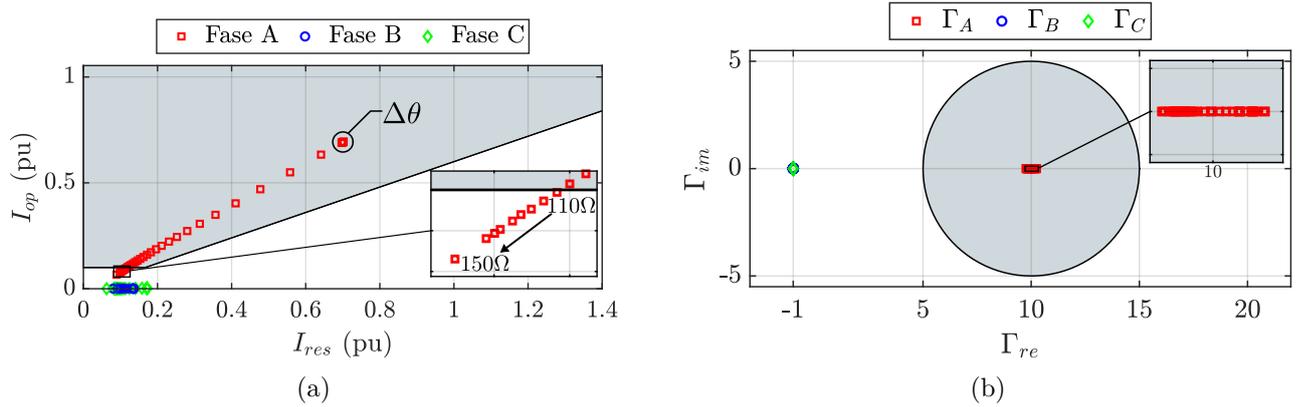


Figura 6.6. Caso 2 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

o relé operou para 76,32% dos casos avaliados. Adicionalmente, chama-se atenção para a região de repouso em regime permanente de falta no PAG. Os pontos encontram-se todos ao redor do ponto (10;0), com uma margem de erro definida pela circunferência de raio  $k_{\Delta}$ , presente na formulação do algoritmo. A uniformidade dos pontos nesta região confirma que a formulação não é afetada pelos parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência.

Por fim, analisam-se os tempos de operação para os diversos cenários de falta avaliados. A Figura 6.7 mostra que o algoritmo do PAG atua mais rapidamente em todos os casos avaliados, ademais os tempos de atuação se mostram consistentes, sem apresentar variações significativas. Conforme mencionado anteriormente, o relé é severamente afetado pela resistência de falta. Tal fato fica evidente a partir do aumento nos tempos de atuação obtidos a medida que o valor da resistência de falta varia positivamente, podendo demorar mais de um ciclo para atuar ou até deixar de operar.

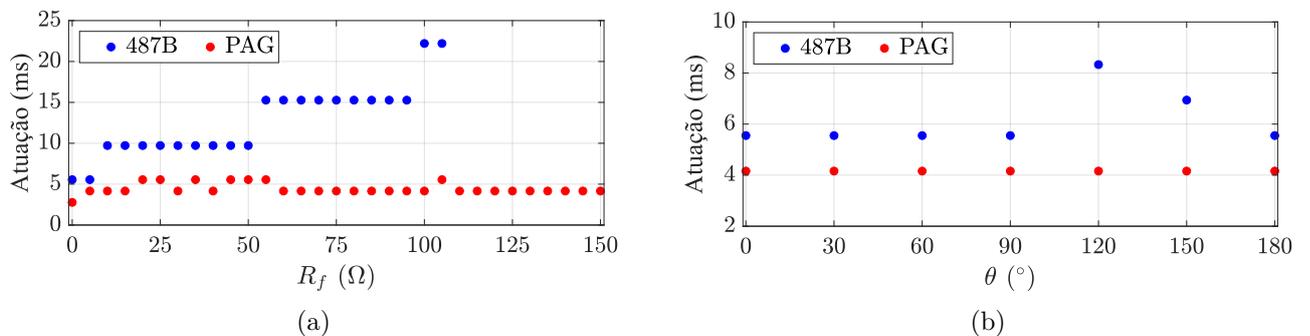


Figura 6.7. Caso 2 - Tempos de atuação para fase A - (a) Resistência de falta. (b) Ângulo de incidência.

### 6.4.3 Caso 3: Análise Transitória de um Curto-Circuito Bifásico Interno

Um curto-circuito AB franco é aplicado na Barra 1 em  $t = 100$  ms. Portanto as zonas  $Z_1$  e  $Z_2$  ajustadas no relé devem ser capazes de identificar o defeito e enviar o comando de *trip* aos vãos associados. De forma análoga ao primeiro caso, apresenta-se na Figura 6.8 a resposta no tempo das principais lógicas de proteção utilizadas pelas zonas  $Z_1$  e  $Z_2$  do relé, além do comportamento dos elementos de fase  $\Gamma_A$  e  $\Gamma_B$  do PAG.

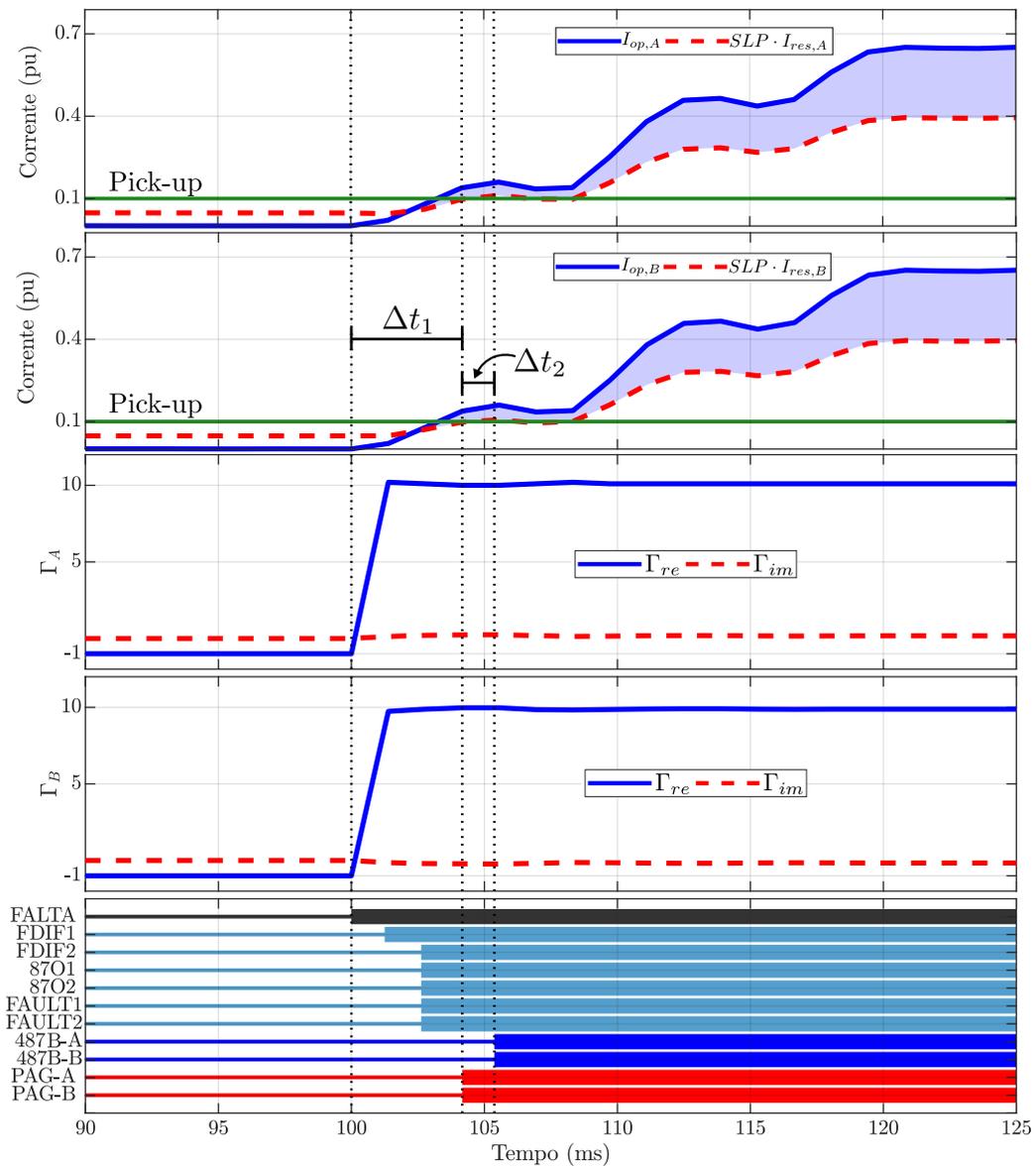


Figura 6.8. Resposta no tempo para um curto-circuito AB interno.

Analisando o desempenho do algoritmo do relé, verifica-se que o elemento diferencial filtrado da fase A, FDIF1, foi acionado uma amostra após a aplicação da falta (relembrando que a taxa do relé é de 12 amostras/ciclo), enquanto que as demais lógicas utilizadas no algoritmo

de proteção do relé foram ativadas após duas amostras. Diferentemente do que ocorreu no primeiro caso, a resposta do PAG para os elementos de fase  $\Gamma_A$  e  $\Gamma_B$  não foi imediata, ou seja, o algoritmo precisou de uma amostra após a incidência da falta, para deslocar o ponto de operação da região de regime permanente de pré-falta, localizada no ponto (-1;0), para dentro da característica de operação, em torno do ponto (10;0).

Os tempos de atuação associados a cada um dos algoritmos são apresentados na Tabela 6.9, onde é possível ressaltar as diferenças de tempo ( $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ ) entre os dois algoritmos. Ademais, chama-se atenção ao tempo de resposta dos elementos de fase do PAG, em relação as lógicas de proteção utilizadas no algoritmo do relé. A Figura 6.9 apresenta os resultados obtidos por meio da representação gráfica. Utilizando os mesmos critérios de análise do primeiro caso, verifica-se que o algoritmo do PAG demora uma amostra para adentrar a região de operação, enquanto que o algoritmo do relé requer duas amostras para que o elemento diferencial esteja na região de operação do plano  $I_{op} \times I_{res}$ . Com relação as trajetórias percorridas pelos elementos de fase de ambos algoritmos, nota-se que o comportamento é semelhante ao mostrado no caso 1. Ou seja, no plano  $I_{op} \times I_{res}$ , os elementos diferenciais de fase percorrem uma trajetória sujeita a desvios, além disso demoram mais tempo até chegar a região de repouso em regime permanente de falta. Enquanto isso, no PAG os pontos percorrem uma trajetória direta e suave para adentrar a região de operação. Além disso aponta-se um número reduzido de amostras após a ocorrência do defeito para estabelecer a região de repouso em regime permanente. Em relação aos requisitos de confiabilidade, ambos algoritmos operaram sem problemas.

#### 6.4.4 Caso 4: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Bifásico Interno

Este caso tem como objetivo avaliar a influência do instante de falta e da resistência de falta no desempenho dos algoritmos mediante a ocorrência de um curto-circuito bifásico. Para isso,

**Tabela 6.9.** Tempos de operação para um curto-circuito bifásico em ms.

Algoritmo	Fase A	Fase B	Fase C
487B	5,55	5,55	-
PAG	4,16	4,16	-

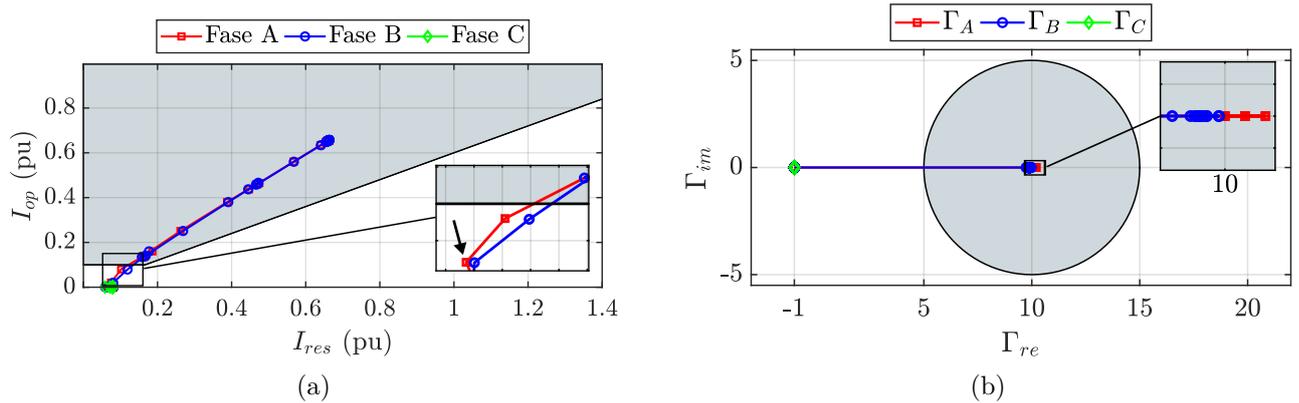


Figura 6.9. Caso 3 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

recorreu-se a aplicação de um conjunto de faltas na Barra 1 envolvendo as fases A e B, nas quais os parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência foram variados de  $0 \Omega$  até  $50 \Omega$ , em passos de  $5 \Omega$ , e de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ , em passos de  $30^\circ$ , respectivamente. Para a análise da variação de resistência de falta, 11 casos foram avaliados. Já no que se refere à variação do ângulo de incidência, 7 casos de faltas foram considerados.

Os resultados para os algoritmos do relé e do PAG são apresentados na Figura 6.10. É importante mencionar que ambas análises de variação paramétrica foram plotadas no mesmo gráfico mas são avaliadas de maneira independente. Os níveis de corrente associados a um curto-circuito bifásico são, de forma geral, maiores do que aqueles presentes em curtos monofásicos, e além disso, quando da ocorrência de defeitos entre fases e que não envolvem a terra, as resistências de falta envolvidas neste fenômeno são mais baixas. Tais fatos minimizam a influência do parâmetro de resistência de falta para a proteção diferencial no caso de curtos bifásicos. Dessa maneira, o relé foi capaz de operar para todos os valores de resistência de falta e ângulo de incidência, tendo assim um aproveitamento de 100% dos cenários avaliados para este tipo de curto. Já em relação ao PAG, os resultados observados assemelham-se aqueles apresentados no primeiro caso. Ou seja, o algoritmo é imune aos efeitos da resistência de falta e ângulo de incidência, e foi capaz de operar em 100% dos cenários de falta avaliados.

Por fim, a Figura 6.11 apresenta os tempos de operação de cada algoritmo para cada fase. É possível perceber que o algoritmo do PAG atua mais rapidamente em todos os casos avaliados. Apesar do impacto da resistência de falta ser minimizado para um curto-circuito bifásico, é possível perceber pela análise do tempo de operação do relé que ainda assim este fator retarda a atuação do algoritmo.

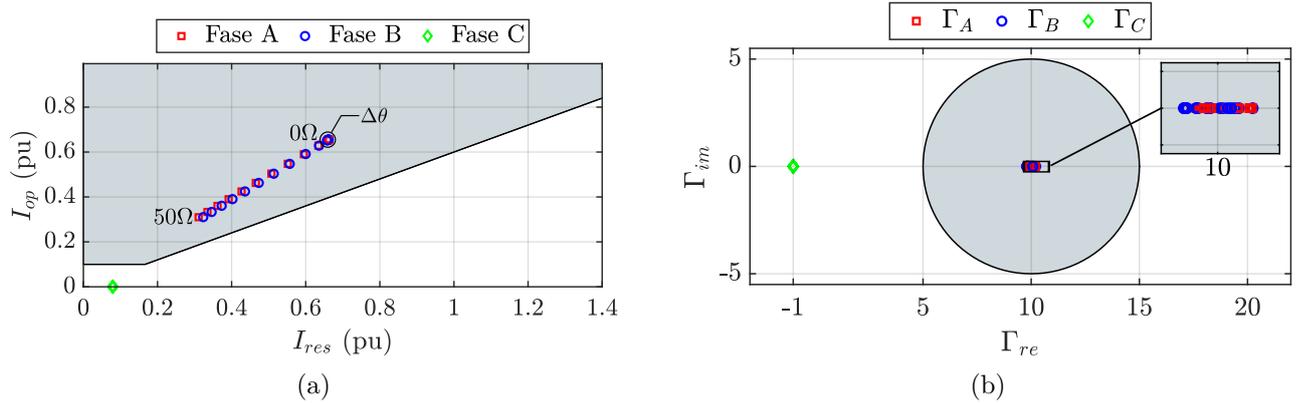


Figura 6.10. Caso 4 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

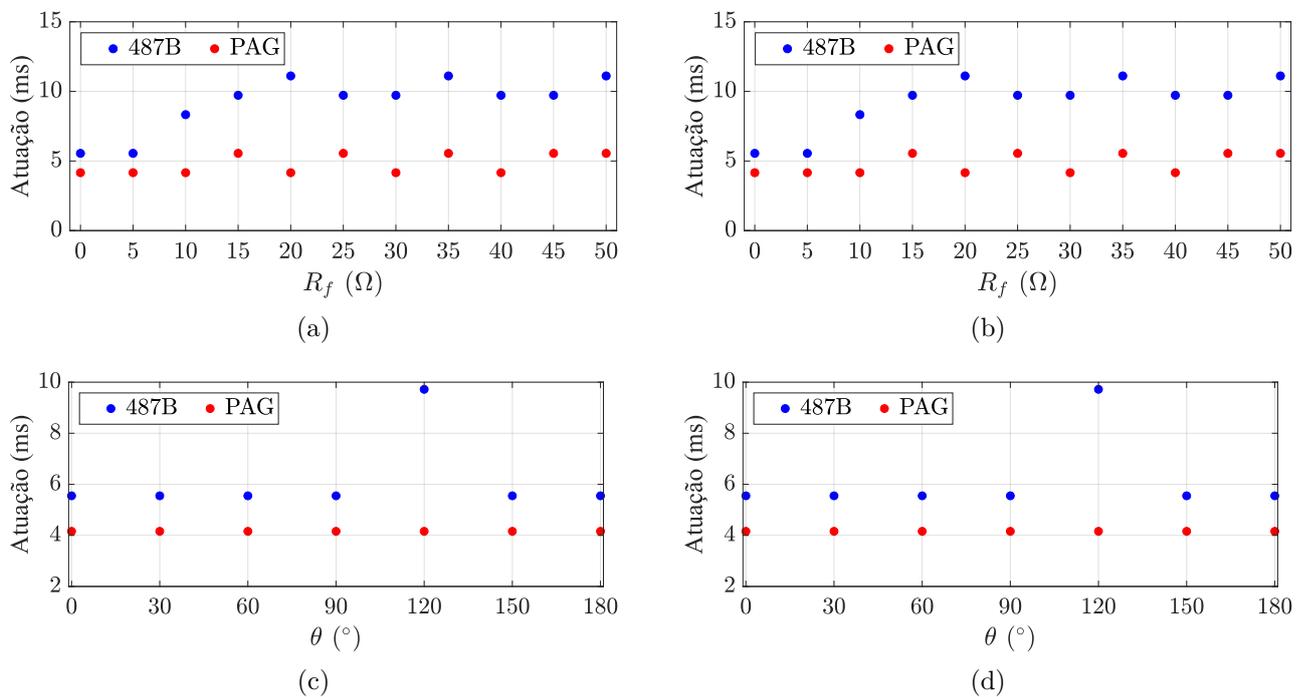
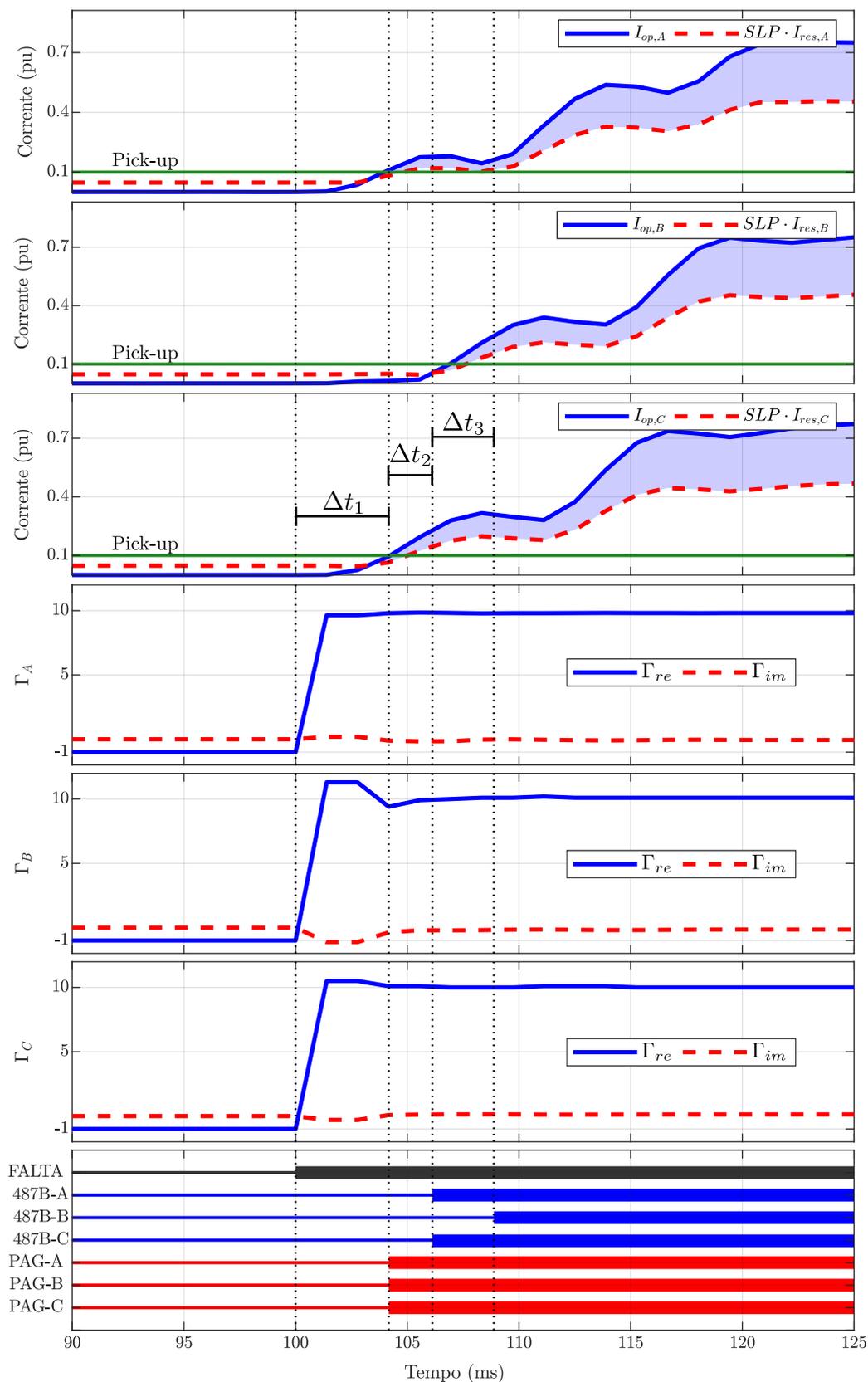


Figura 6.11. Caso 4 - Tempos de atuação - (a) Resistência de falta - Fase A. (b) Resistência de falta - Fase B. (c) Ângulo de incidência - Fase A. (d) Ângulo de incidência - Fase B.

### 6.4.5 Caso 5: Análise Transitória de um Curto-Circuito Trifásico Interno

Neste caso, um curto-circuito ABC franco é aplicado na Barra 1 em  $t = 100$  ms. Portanto, as zonas  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  ajustadas no relé devem ser capazes de identificar o defeito e enviar o comando de *trip* aos vãos associados. De forma análoga aos casos anteriores, apresenta-se na Figura 6.12 a resposta no tempo das correntes de operação e restrição para cada fase, além do comportamento dos elementos de fase  $\Gamma_A$ ,  $\Gamma_B$  e  $\Gamma_C$  do PAG.

A partir da análise dos resultados provenientes do algoritmo nativo do relé, verifica-se que as lógicas associadas à proteção da fase B demoraram mais para serem satisfeitas, em relação



**Figura 6.12.** Resposta no tempo para um curto-circuito ABC interno.

as outras fases. De fato esse fenômeno fica claro ao avaliar o comportamento das correntes de operação e restrição da fase B, pois observa-se que a corrente de operação requer um período de

tempo maior para ultrapassar as condições impostas pela corrente de restrição e pelo *pick-up*. Com relação ao desempenho do PAG, prevaleceu um comportamento semelhante ao caso 3, onde após uma amostra do início do defeito houve a mudança nos coeficientes do plano alfa.

Os tempos de atuação associados a cada um dos algoritmos são apresentados na Tabela 6.10, onde é possível ressaltar as diferenças de tempo ( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  e  $\Delta t_3$ ) entre os dois algoritmos. É possível notar que o PAG atua mais rapidamente e de maneira uniforme para o caso em questão nas três fases.

**Tabela 6.10.** Tempos de operação para um curto-circuito trifásico em ms.

Algoritmo	Fase A	Fase B	Fase C
487B	5,55	8,33	5,55
PAG	4,16	4,16	4,16

A Figura 6.13 apresenta os resultados obtidos por meio da representação gráfica. Utilizando os mesmos critérios de análise dos casos anteriores, verifica-se que o algoritmo do PAG demora uma amostra para adentrar a região de operação, enquanto que o algoritmo do relé requer duas amostras para que o elemento diferencial adentre a região de operação do plano  $I_{op} \times I_{res}$ .

Em relação as trajetórias percorridas, observa-se a mesma tendência que os casos anteriores. Os elementos de fase no plano  $I_{op} \times I_{res}$  sofrem desvios pelas mudanças nas correntes de operação e restrição, além disso uma quantidade maior de amostras é requerida para chegar na região de repouso em regime permanente de falta.

Com relação ao PAG, destaca-se que os elementos de fase  $\Gamma_A$  e  $\Gamma_C$  se comportaram como esperado. Porém, o elemento  $\Gamma_B$  apresentou um *overshoot* durante os instantes iniciais de falta, de tal maneira que o ponto se afastou da região de repouso em regime permanente definida, ou seja, o coeficiente de erro ultrapassou os limiares da circunferência de raio  $k_\Delta$  ajustada. Esse erro provocou um tempo de assentamento maior por parte do elemento de fase  $\Gamma_B$ . Porém, cabe pontuar que mesmo com esse erro, foi observada uma trajetória direta e suave por parte dos coeficientes do PAG. A respeito dos requisitos de confiabilidades, os dois algoritmos atuaram sem dificuldades.

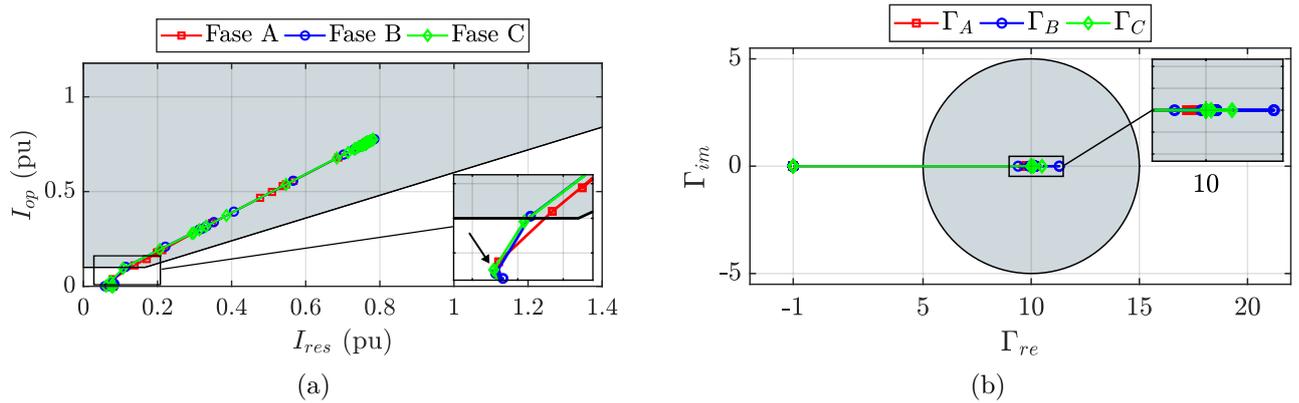


Figura 6.13. Caso 5 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

#### 6.4.6 Caso 6: Análise de Sensibilidade Paramétrica de um Curto-Circuito Trifásico Interno

Com este caso deseja-se avaliar a influência do instante de falta e da resistência de falta no desempenho dos algoritmos mediante a ocorrência de um curto-circuito trifásico. Para isso, recorreu-se a aplicação de um conjunto de faltas na Barra 1 envolvendo a fase A, B e C, nas quais os parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência foram variados de  $0 \Omega$  até  $50 \Omega$ , em passos de  $5 \Omega$ , e de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ , em passos de  $30^\circ$ , respectivamente. Para a análise da variação de resistência de falta, 11 casos foram avaliados. Já no que se refere à variação do ângulo de incidência, 7 casos de faltas foram considerados.

Os resultados obtidos para os algoritmos do relé e do PAG são apresentados na Figura 6.14. É importante mencionar que ambas análises de variação paramétrica foram plotadas no mesmo gráfico mas são avaliadas de maneira independente. Para um curto-circuito trifásico tem-se uma análise semelhante ao curto bifásico com relação a resistência de falta, ou seja, para os valores avaliados, o aumento de resistência de falta entre as fases não promoveu uma atenuação severa dos sinais de corrente, a ponto do relé não conseguir identificar as faltas internas. Com relação ao ângulo de incidência da falta, fica claro pela Figura 6.14(a), que o algoritmo do relé não é influenciado por este parâmetro. É possível observar que os diferentes casos de falta para os ângulos de incidência avaliados estão quase que sobrepostos em uma região, identificada na figura como  $\Delta\theta$ . Em todos os casos avaliados, o relé foi capaz de operar sem maiores dificuldades. Com relação ao PAG, pode-se observar que o mesmo operou para todos os cenários de falta, e que os pontos encontram-se sob a região de repouso em regime

permanente definida pelo algoritmo, tal fato reforça que a formulação proposta por Bainy & Silva (2020) não é afetada pelos parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência.

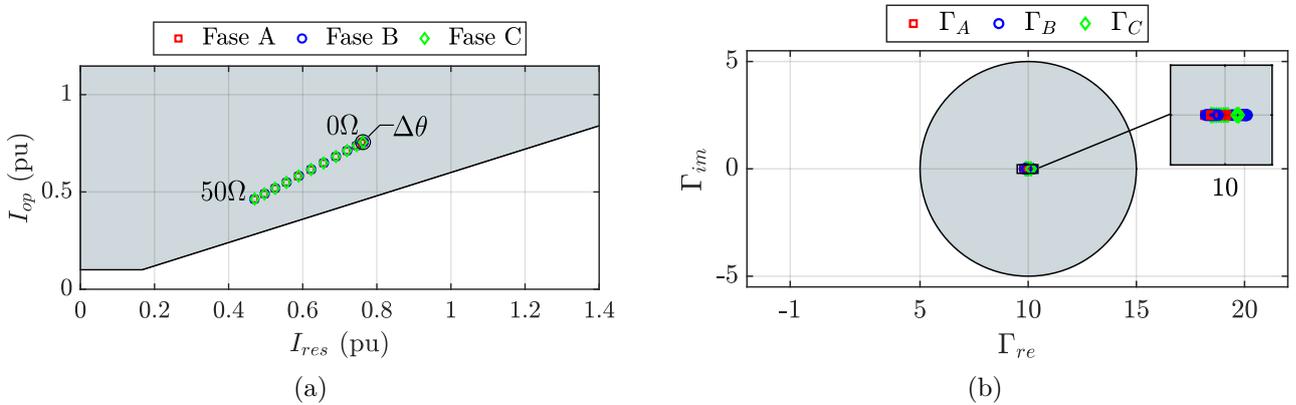


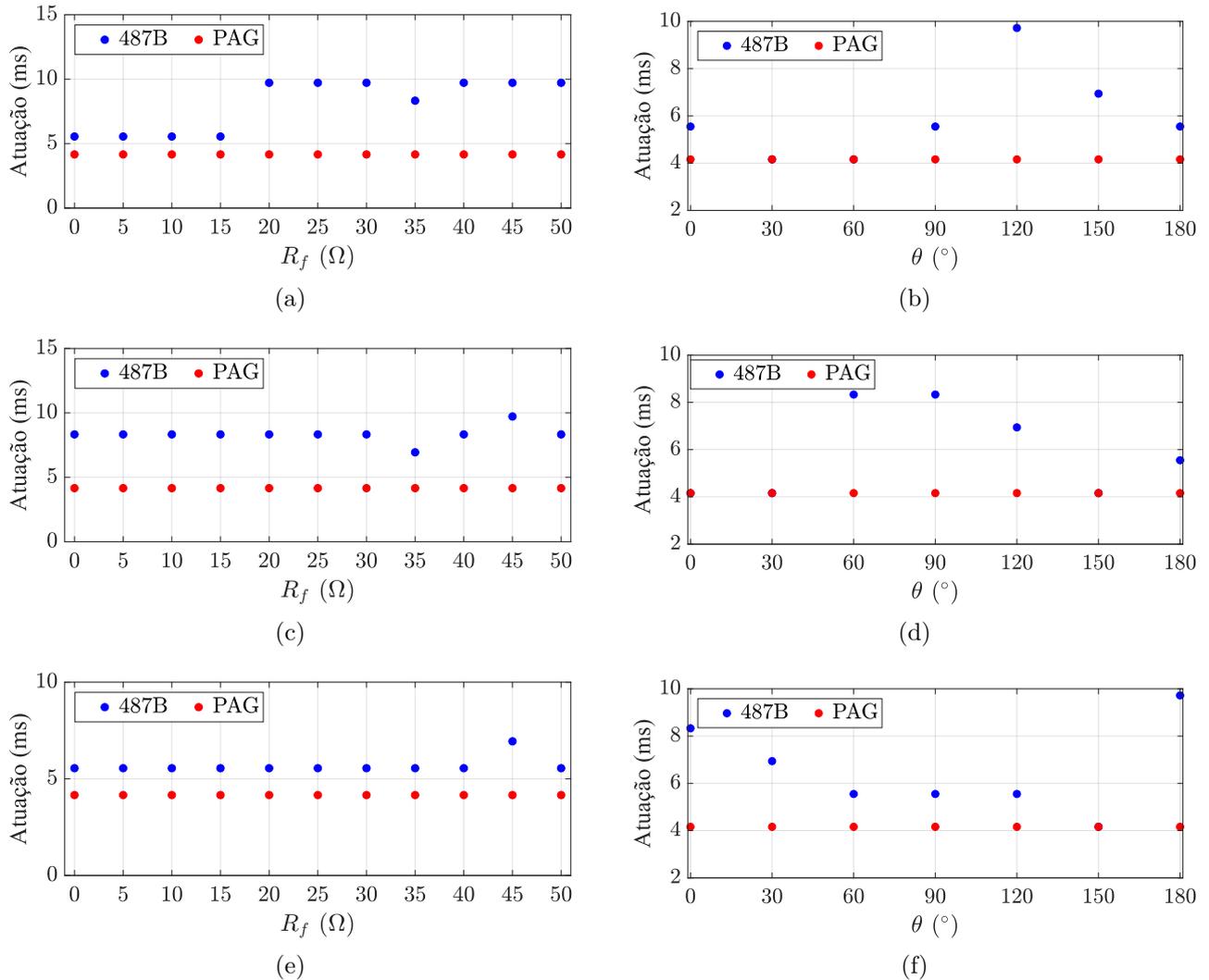
Figura 6.14. Caso 6 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

Por fim, a Figura 6.15 apresenta os tempos de operação de cada algoritmo para cada fase. É possível observar que o algoritmo do PAG atua mais rapidamente em todos os casos avaliados.

#### 6.4.7 Caso 7: Curtos-Circuitos Externos

Neste caso, deseja-se avaliar a robustez e segurança dos algoritmos frente a situações de curtos-circuitos externos. Para isso, dois tipos de análise são realizadas para mensurar o desempenho dos algoritmos. Em primeiro lugar, avalia-se o comportamento da resposta no tempo dos algoritmos do relé e do PAG diante do cenário de um curto-circuito externo monofásico com severa saturação de TC. Esse caso tem como objetivo avaliar a influência da saturação do TC nas lógicas de proteção utilizadas pelo relé, mais especificamente, na eficácia da lógica de detecção de falta externa, visto que durante o período em que o TC estiver saturado, pode haver uma corrente diferencial espúria, a qual pode implicar em uma operação indevida por parte do algoritmo de proteção. Já a segunda análise refere-se a uma avaliação de sensibilidade paramétrica, onde diversas condições de faltas externas são aplicadas ao sistema com o intuito de verificar a confiabilidade dos algoritmos.

Para o primeiro caso, um curto-circuito monofásico franco AT foi aplicado no circuito da linha de transmissão LT1 em  $t = 100$  ms, logo a frente do TC destinado a proteção de barras deste vão, ou seja, fora da zona de proteção. Para simular a severa saturação de TC, a resistência de carga do relé foi ajustada para  $30 \Omega$ . A Figura 6.16 apresenta a resposta no tempo dos



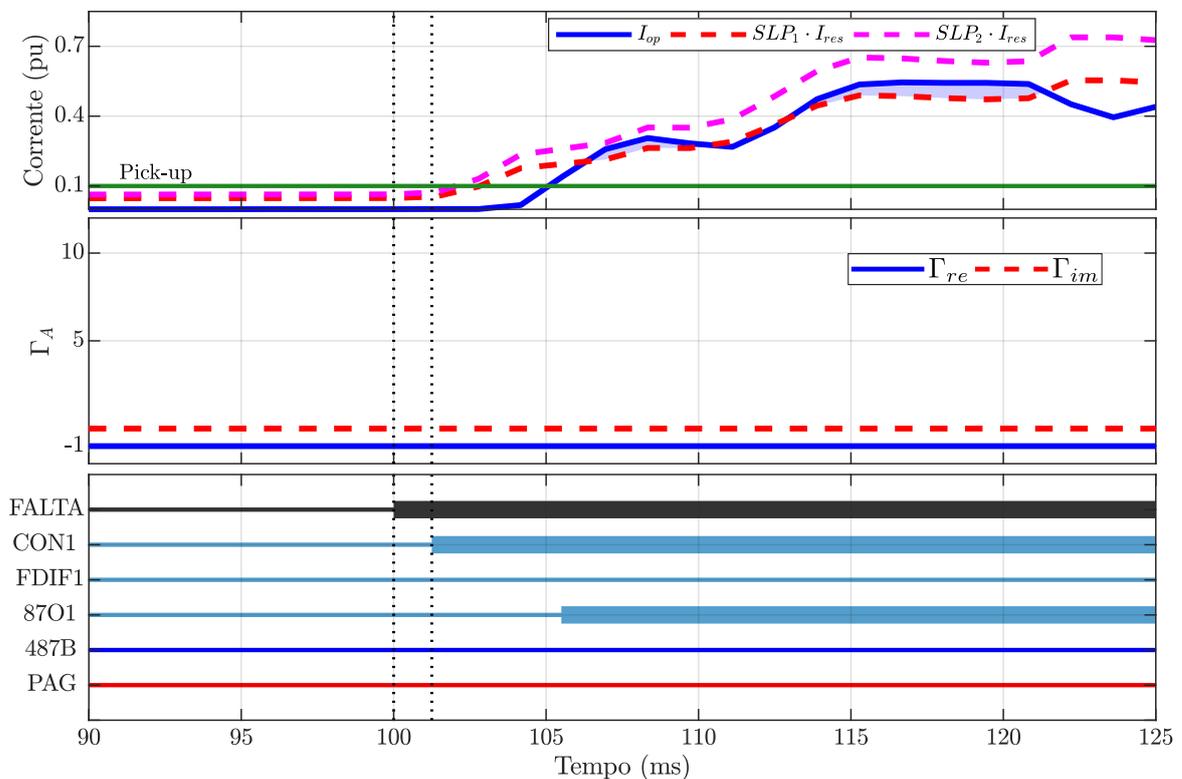
**Figura 6.15.** Caso 6 - Tempos de atuação - (a) Resistência de falta - Fase A. (b) Ângulo de incidência - Fase A. (c) Resistência de falta - Fase B. (d) Ângulo de incidência - Fase B. (e) Resistência de falta - Fase C. (f) Ângulo de incidência - Fase C.

algoritmos do relé e do PAG para este caso. Observa-se que nos primeiros instantes após a aplicação da falta, apenas a corrente de restrição tem o seu valor incrementado, enquanto a corrente de operação é praticamente nula. A partir disso, a lógica de detecção de falta externa compara a variação instantânea das correntes de restrição e operação com os limiares ajustados no relé. Para o caso em questão apenas a variação da corrente de restrição foi capaz de superar o ajuste definido, portanto o relé identifica que houve uma falta externa, acionando a variável lógica CON1 uma amostra após o início do defeito.

Com a falta externa identificada, o relé passa a operar no modo de operação seguro. Neste modo, o relé troca o ajuste de sensibilidade da característica de operação, SLP1 para SLP2, tornando-o menos sensível, a fim de garantir uma operação segura. A partir da Figura 6.16

a importância da lógica de falta externa é evidenciada pois constata-se que durante o período de saturação do TC, a corrente de operação supera o pick-up e a corrente de restrição com o ajuste de sensibilidade SLP1. Portanto, caso não houvesse a mudança promovida pelo modo de operação seguro, o algoritmo estaria suscetível a uma operação indevida.

Em relação ao desempenho do PAG, este manteve-se estável, permanecendo sob o ponto (-1;0) durante toda a ocorrência da falta em questão. Cabe lembrar que pelo fato do relé não fazer o uso de restrição por harmônicas, associou-se a saída da lógica de falta externa do relé ao algoritmo do PAG, de forma que este não deve operar enquanto a variável CON1 estiver ativa. Em conclusão, ambos algoritmos foram capazes de permanecer seguros diante de uma condição extremamente severa de saturação de TC, o que demonstra grande confiabilidade.



**Figura 6.16.** Resposta no tempo para um curto-circuito AT externo.

A análise de sensibilidade paramétrica para o caso de faltas externas consistiu na variação dos parâmetros de resistência de falta, ângulo de incidência e nível de saturação de TC para curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Os cenários avaliados foram todos aplicados na linha de transmissão LT1, logo a frente do TC que delimita a zona lógica de proteção da barra. No total, foram avaliados 65 casos de faltas externas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.17.

O desempenho do relé mostrou-se seguro para todos os casos avaliados, ressaltando-se a distribuição dos pontos de operação ao longo do plano  $I_{op}$  x  $I_{res}$ . Pode-se observar a tendência dos pontos de ficarem sob o eixo de restrição. Isso se deve ao fato da corrente de operação ser praticamente nula durante uma falta externa sem saturação de TC. Além disso, os pontos próximos a origem representam os resultados para resistência de falta mais elevadas, o que atenua a corrente de restrição. Por fim, os pontos mais próximos da região de operação e que estão acima do eixo de restrição referem-se aos casos de faltas externas com saturação de TC.

Apesar das condições impostas pela saturação serem um grande desafio para a proteção de barramentos, percebe-se que os pontos no plano  $I_{op}$  x  $I_{res}$  estão afastados da região de operação mais escura, a qual está ajustada para evitar atuações indevidas durante estas situações mais severas. Com relação ao desempenho do PAG, observa-se que todas as condições de falta permaneceram no ponto  $(-1;0)$ , não havendo qualquer dificuldade por parte do algoritmo para detectar as condições adversas. Por fim, se faz oportuno mencionar que ambos algoritmos apresentaram grande confiabilidade para as condições de faltas externas mais desafiadoras, não havendo uma condição de vantagem de um sobre o outro.

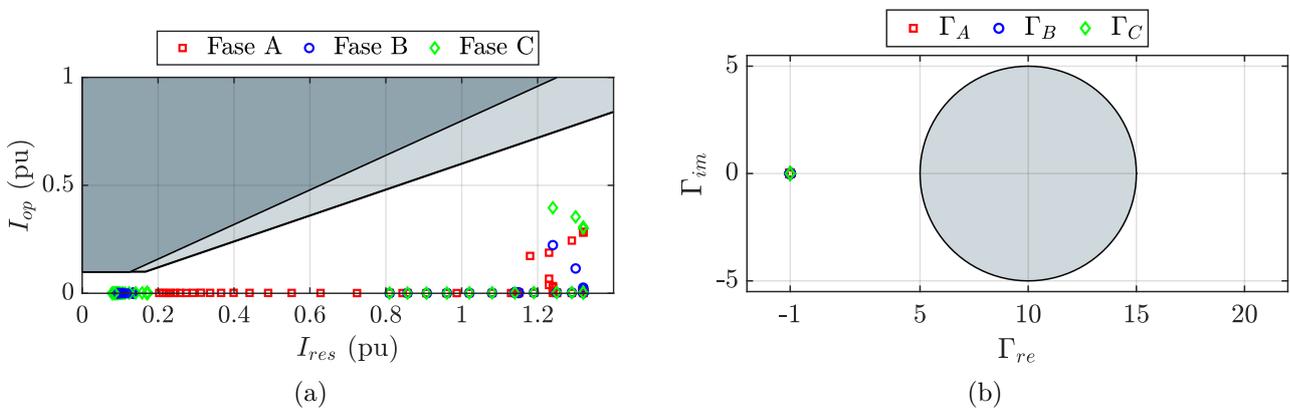


Figura 6.17. Caso 7 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

#### 6.4.8 Caso 8: Curto-Circuito Evolutivo sem Saturação de TC

Neste caso, um curto-circuito externo AT sem saturação de TC foi aplicado em  $t = 100$  ms na linha de transmissão LT1, e, posteriormente, este defeito evolui para uma falta interna AB em  $t = 136,11$  ms. A Figura 6.18 mostra o desempenho dos algoritmos para as fases A e B envolvidas neste cenário de falta.

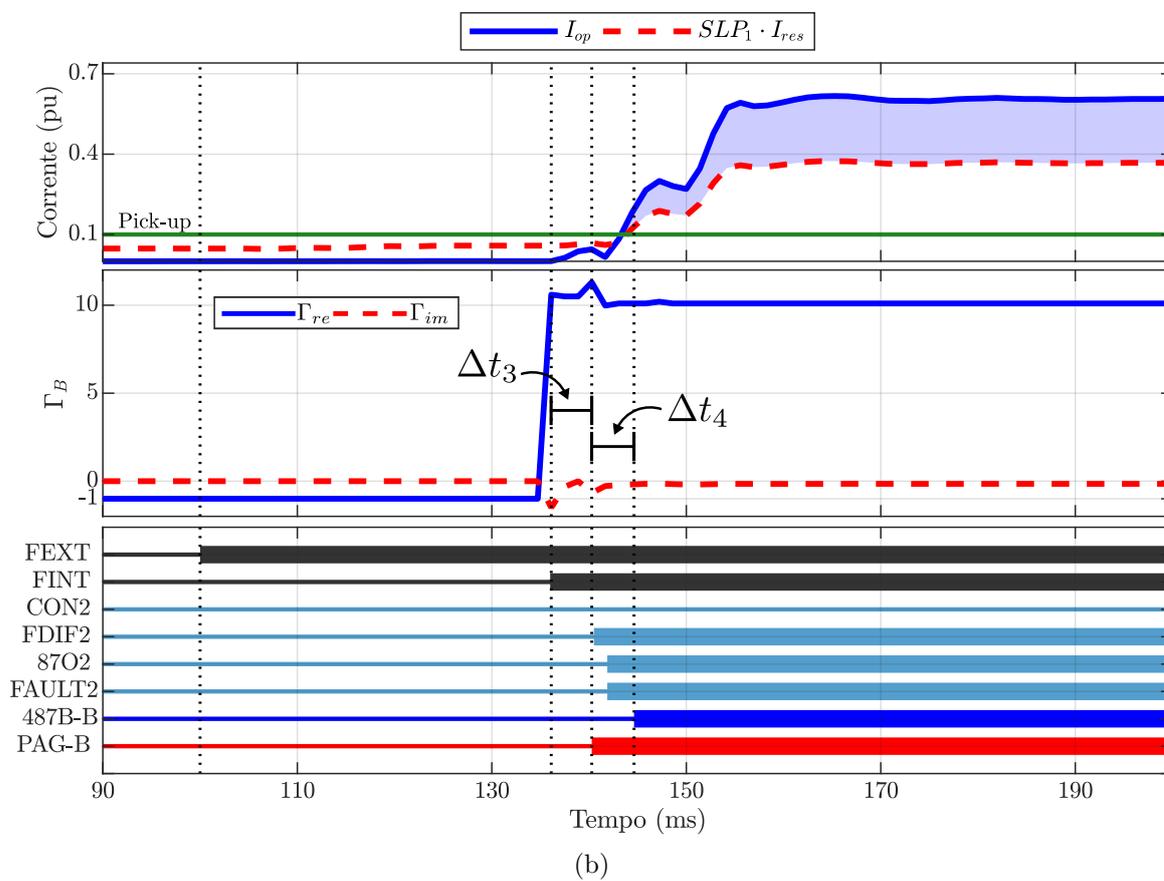
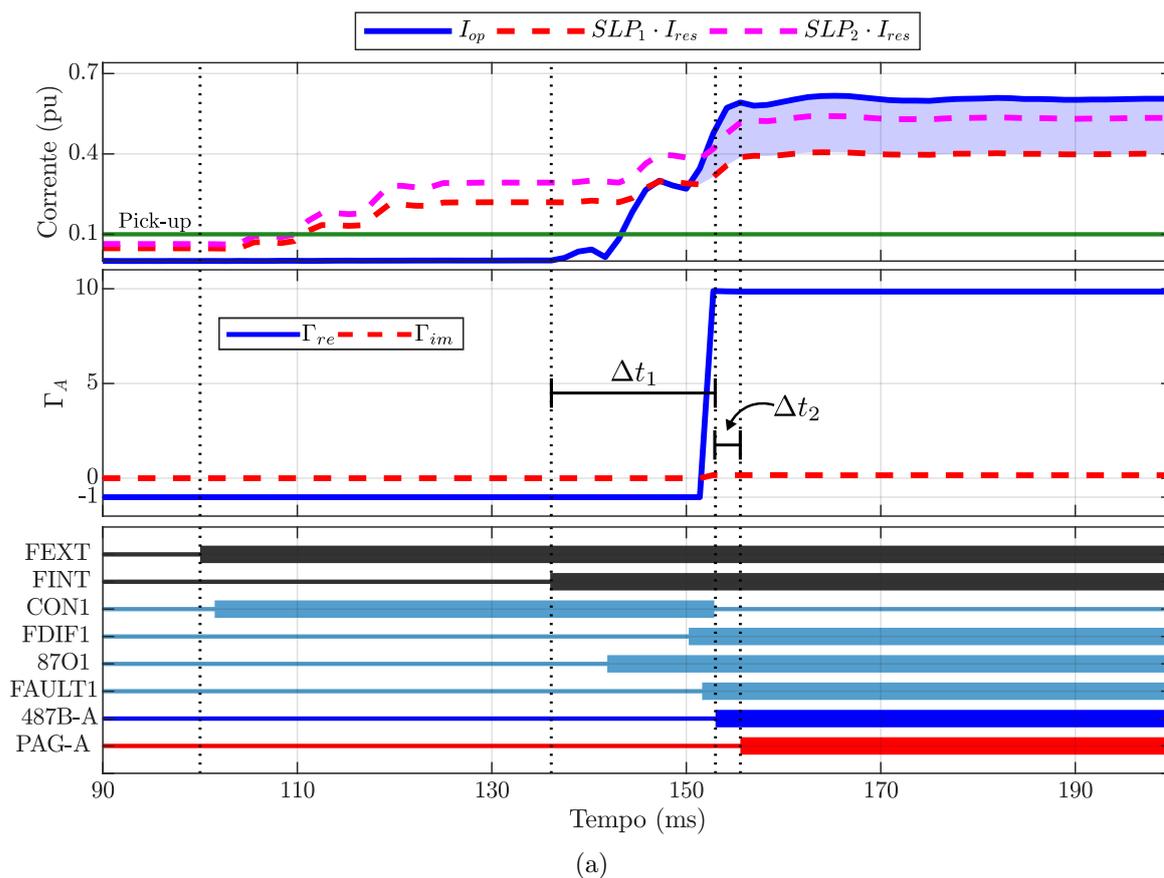


Figura 6.18. Resposta no tempo - (a) Fase A. (b) Fase B.

Analisando primeiramente os elementos da fase A, observa-se que uma amostra após o início da falta o algoritmo do relé foi capaz de detectar uma falta externa e entrar no modo de operação seguro. Quando o curto-circuito evolui, a corrente de operação da fase A começa a crescer, excedendo o valor de *pick-up* ajustado. É interessante notar que os elementos diferenciais filtrado e instantâneo demoram a reconhecer o defeito, isso ocorre pois a variável lógica CON1 permanece ativa por um período após a incidência da falta interna. Ou seja, a variável CON1 reduz a sensibilidade do relé para defeitos internos com o ajuste de SLP2, retardando assim a lógica do elemento diferencial do relé. Todavia, com o decorrer da falta, o aumento da corrente de operação é capaz de exceder os valores de  $SLP_2 \cdot I_{res}$ . Tal fato possibilita o acionamento dos elementos diferenciais filtrado e instantâneo, identificando assim uma condição de falta interna. Por fim, a lógica do esquema de proteção do relé precisa que a variável lógica CON1 não esteja mais ativa, para que o comando de *trip* possa ser enviado. Portanto, assim que a lógica de falta externa deixa de enxergar o defeito como externo, o modo de operação seguro é desativado, e o comando de *trip* é enviado.

O desempenho do PAG está associado a lógica de falta externa do relé. Portanto, apenas quando a variável CON1 é desativada que o algoritmo é capaz de detectar o defeito e mover o ponto de operação do elemento diferencial da região (-1;0) para a região (10;0) do plano complexo. Tal fato implica em uma atuação mais rápida por parte do algoritmo de proteção do relé, com uma diferença de uma amostra de vantagem.

Com relação a fase B, o desempenho não foi influenciado pelo curto-circuito externo devido aos ajustes das zonas de proteção segregadas por fase. Portanto a sua análise se aproxima do que foi observado para o caso 3, onde um curto-circuito bifásico interno era aplicado ao sistema.

Os tempos de atuação associados a cada um dos algoritmos são apresentados na Tabela 6.11, onde é possível ressaltar as diferenças de tempo ( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  e  $\Delta t_4$ ) entre os dois algoritmos. Pode-se perceber que o tempo de operação de ambos algoritmos para fase A, a qual estava sujeita a aplicação de um curto externo, é relativamente alto. Isso ocorre por conta do tempo em que o relé permanece no modo de operação seguro, bloqueando atuações mais rápidas por parte do algoritmo de proteção. Nesse sentido, constata-se o desafio que esse tipo de falta representa para os algoritmos de proteção de barramentos.

**Tabela 6.11.** Tempos de operação para um curto-circuito evolutivo em ms.

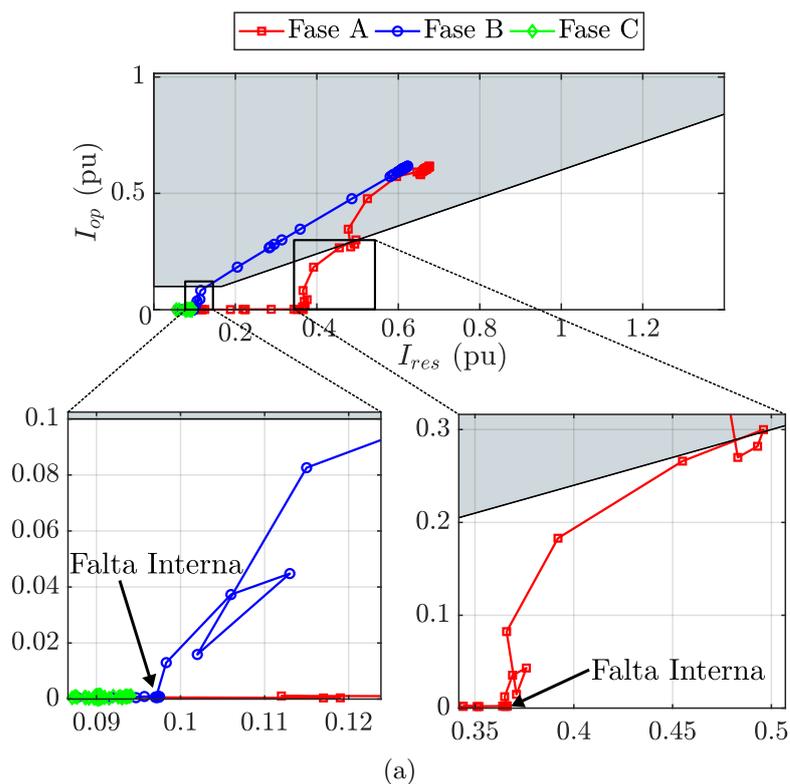
Algoritmo	Fase A	Fase B	Fase C
487B	18,05	9,72	-
PAG	19,44	4,16	-

A Figura 6.19 apresenta os resultados obtidos por meio da representação gráfica. Na Figura 6.19(a) é possível observar no plano  $I_{op} \times I_{res}$  a amostra em que a falta interna foi aplicada ao sistema. A partir disso, constata-se que os elementos diferenciais das fases A e B percorrem uma trajetória significativa até adentrar a região de operação. Adicionalmente são ressaltadas as mudanças de percurso provenientes das relações entre as correntes de operação e restrição de cada fase. Apesar do PAG depender da variável lógica CON1, a trajetória dos elementos de fase  $\Gamma_A$  e  $\Gamma_B$  continua sendo direta e suave, com um requisito de no máximo uma amostra após aplicação da falta para adentrar a região de operação. Do ponto de vista de confiabilidade, ambos algoritmos foram capazes de atuar corretamente para o caso avaliado.

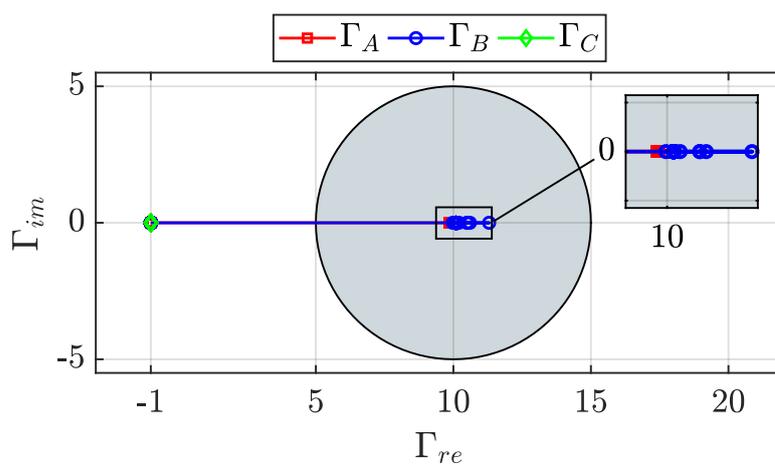
#### 6.4.9 Caso 9: Curto-Circuito Evolutivo com Saturação de TC

Neste caso, um curto-circuito externo AT com saturação de TC foi aplicado em  $t = 100$  ms na linha de transmissão LT1 e, posteriormente, este defeito evoluiu para uma falta interna AT em  $t = 136,11$  ms. A Figura 6.20 mostra a resposta no tempo para os algoritmos avaliados. É interessante notar os efeitos da saturação do TC na lógica de proteção do relé. Pode-se perceber que após a aplicação da falta externa o relé entrou no modo de operação seguro, por meio do acionamento da variável CON1. Porém, diferentemente do caso anterior, a corrente de operação supera o limiar do *pick-up* mais rapidamente, devido aos efeitos da saturação do TC. O elemento diferencial filtrado apenas foi acionado quando o relé desativou o modo de operação segura, fazendo com que o ajuste de sensibilidade voltasse para o valor de SLP1. Conforme o caso anterior, o desempenho do PAG fica condicionado a lógica de detecção de falta externa do relé, assim que o valor lógico da variável CON1 retorna a zero, o ponto adentra a característica de operação.

Os tempos de atuação associados a cada um dos algoritmos são apresentados na Tabela 6.12, onde é possível ressaltar as diferenças de tempo ( $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ ) entre os dois algoritmos.



(a)



(b)

**Figura 6.19.** Caso 8 - (a) SEL-487B. (b) PAG.**Tabela 6.12.** Tempos de operação para um curto-circuito evolutivo em ms.

Algoritmo	Fase A	Fase B	Fase C
487B	18,05	-	-
PAG	19,44	-	-

A Figura 6.21 apresenta os resultados obtidos por meio da representação gráfica. Na Figura 6.21(a) é possível observar no plano  $I_{op} \times I_{res}$  a amostra em que a falta interna foi aplicada no sistema. Antes da falta interna, é possível perceber que algumas amostras adentram a região de

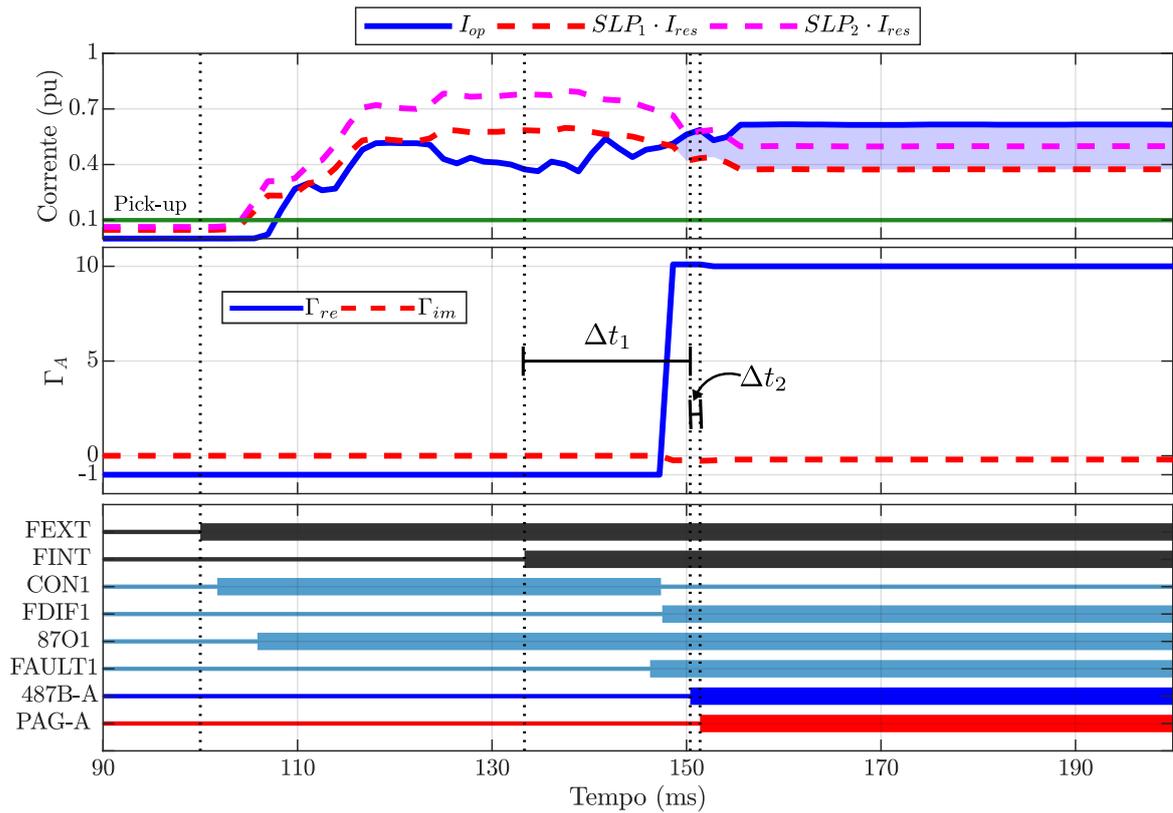


Figura 6.20. Resposta no tempo para um curto-circuito AT evolutivo.

operação ajustada pelo SLP1, daí a importância do modo de operação seguro, para evitar uma operação indevida por parte do algoritmo do relé durante situações que envolvam saturação de TC. Além disso, nota-se que após a incidência da falta interna, o elemento diferencial percorre uma trajetória desordenada até entrar na região de operação, tal fato retarda a operação do algoritmo de proteção do relé. Com relação ao algoritmo do PAG, as mesmas condições do caso anterior são observadas. Do ponto de vista de confiabilidade, ambos algoritmos foram capazes de atuar corretamente para o caso avaliado.

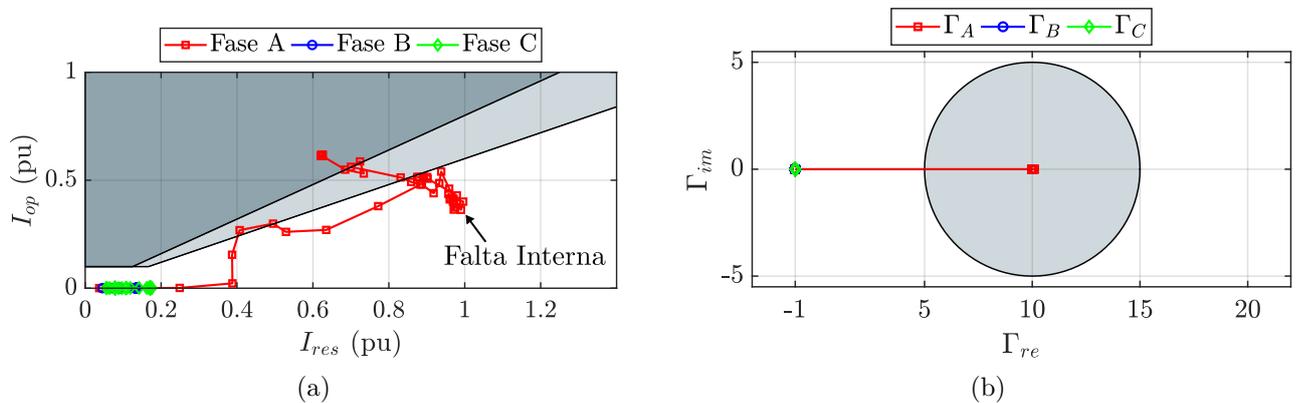


Figura 6.21. Caso 9 - (a) SEL-487B. (b) PAG.

## 6.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados referentes ao desempenho do algoritmo nativo de proteção do relé SEL-487B e do algoritmo do PAG diante dos cenários de faltas mais comumente abordados na literatura de proteção de barramentos. De acordo com estes resultados, o algoritmo do PAG consegue apresentar grande sensibilidade para faltas de alta impedância, não tendo o seu desempenho comprometido quando sinais atenuados são avaliados. Além disso, foi constatado que os tempos de atuação para a função do PAG são mais rápidos e consistentes quando comparados com os tempos de atuação provenientes do algoritmo do relé SEL-487B. Também, se destaca o controle da região de repouso em regime permanente proporcionado pelos ajustes da função do PAG. Tal característica permite que a trajetória percorrida pelo elemento diferencial no plano complexo seja direta e suave, o que contribui para acelerar os tempos de atuação por parte do algoritmo.

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, a nova formulação alternativa do PAG proposta por Bainy & Silva (2020) foi aplicada a proteção diferencial de barramentos com o objetivo de avaliar experimentalmente o desempenho da técnica em comparação com o algoritmo de proteção do relé SEL-487B. A partir disso, foi mostrado como o algoritmo de proteção diferencial de barramento embarcado no dispositivo real pode ser beneficiado com o uso da técnica do PAG.

Originalmente proposto para a proteção diferencial de linhas de transmissão, o plano alfa generalizado em sua formulação original começou a ser considerado como uma alternativa para a proteção de barramentos (BAINY *et al.*, 2016; JENA; BHALJA, 2017b). A literatura mostra que apesar desta técnica cumprir com os requisitos da proteção de barramentos, alguns problemas podem surgir. O fato de um barramento possuir diversos circuitos conectados representa um desafio para a formulação original do PAG, visto que há uma constante mudança no ângulo de referência, o qual é fruto de um equacionamento matemático não trivial. No plano complexo, tal fato induz grandes variações na trajetória percorrida pelo elemento diferencial, o que representa um problema para o algoritmo de proteção, visto que os pontos podem entrar e sair da característica de restrição quando de fato não deveriam, além do caminho percorrido até a região de repouso em regime permanente de falta ser maior, o que pode implicar em uma atuação mais lenta da proteção. Outra problemática apontada a partir do uso da formulação original do PAG para a proteção diferencial de barramentos é com relação a característica de restrição utilizada, a qual foi desenvolvida considerando a operação e os desafios da proteção de linhas de transmissão. Portanto, a aplicação desta característica de restrição para outros tipos de equipamentos não é adequada.

Ao longo do tempo, novos desenvolvimentos foram sendo propostos para a formulação do PAG. Em especial, destaca-se a nova versão alternativa proposta por Bainy & Silva (2020). Nesta versão, uma formulação mais simples é proposta, de tal modo que os problemas com

relação ao ângulo de referência da proposição original são superados. Além disso, há três novos ganhos com a formulação, os quais permitiram formar uma solução mais completa e robusta. Primeiramente, a partir do equacionamento proposto, fatores de ajustes foram incorporados a solução, de tal forma que se obtém controle sobre a região de repouso em regime permanente de falta dentro do plano complexo. Essa característica do algoritmo permitiu que a trajetória do elemento diferencial no plano complexo fosse mais comportada, suave e direta, melhorando assim os requisitos de velocidade e confiabilidade da função. Além disso, a partir desse ganho foi possível propor uma característica de operação para a técnica do PAG, algo até então nunca abordado. Essa característica pode ser ajustada de acordo com a sensibilidade desejada, além de ser totalmente independente do tipo de equipamento que está sendo protegido.

Os ganhos oferecidos pela nova formulação alternativa foram avaliados por meio de simulações computacionais na proteção de barramentos e foi constatado que, novamente, os requisitos da proteção de barras são atendidos. Porém, em nenhum momento foi feita uma avaliação das reais contribuições da técnica para a proteção de barras, não é realizada a comparação com algoritmos tradicionalmente utilizados e disponíveis comercialmente. Neste contexto que o presente trabalho foi realizado. Escolheu-se a nova formulação alternativa do PAG proposta por Bainy & Silva (2020), por ser uma versão mais completa, para mensurar o desempenho da técnica frente a um algoritmo de proteção de barramentos disponível em um dispositivo real.

A partir dos resultados obtidos, pôde-se avaliar o desempenho do relé e do PAG a partir dos cenários de faltas internas, externas e evolutivas. Com relação a faltas internas, o desempenho da nova formulação alternativa do PAG mostrou que este não é afetado pelos parâmetros de resistência de falta e ângulo de incidência, fato esse que não pode ser dito para o algoritmo do relé SEL-487B. A atuação do relé está atrelada a amplitude dos sinais de corrente, por se tratar de uma proteção diferencial tradicional. Portanto, a ocorrência de faltas de alta impedância representam uma problemática para o relé. Dessa forma, com relação a função de proteção diferencial do relé SEL-487B, a técnica do PAG avaliado pode aprimorar a operação do algoritmo para o cenário de faltas de alta impedância. Além disso, pode-se ressaltar que os tempos de operação da função do PAG foram mais rápidos que os tempos de atuação do relé, em 100% dos casos avaliados. Uma operação mais rápida por parte do sistema de proteção reduz os desgastes dos equipamentos durante curtos-circuitos, aumenta as margens de estabilidade do

sistema, contribui para a qualidade de energia e promove uma maior continuidade do fornecimento de energia elétrica. Neste sentido, a nova formulação alternativa do PAG pode promover uma atuação mais rápida do algoritmo de proteção diferencial de barras, minimizando os danos causados por faltas.

Diante dos resultados apresentados para faltas internas, promove-se uma reflexão com relação ao desempenho dos algoritmos. Primeiramente, cabe ressaltar que o algoritmo do relé possui grande confiabilidade, tendo atuado de maneira correta na maioria dos casos para o qual foi projetado. Adicionalmente, ressalta-se os tempos de operação reduzidos, podendo até ser menores que meio ciclo. Em nenhum momento questiona-se a robustez do relé SEL-487B. Pelo contrário, as avaliações realizadas indicam que o algoritmo do relé se comporta como esperado em todos os casos. A grande pergunta a ser respondida por este trabalho é como um algoritmo de um relé comercial poderia se beneficiar do uso da nova técnica alternativa do PAG. Tendo isso em mente, pode-se avaliar a seguinte situação: sabe-se que a lógica de proteção do relé apresenta funções e critérios para garantir uma atuação mais segura, em detrimento do tempo de operação,. Portanto, é possível associar o uso da nova formulação do PAG a lógica do relé, para que um se beneficie do outro. Neste momento, ressalta-se a constância no desempenho do algoritmo do PAG durante todas as condições de faltas internas. Sua operação não foi influenciada pelos parâmetros avaliados, a trajetória do elemento diferencial não sofreu desvios, apresentou sempre um comportamento suave e direto, assim que a falta era aplicada o ponto de operação movia-se para dentro da característica. Todos esses fatos evidenciaram a robustez da nova formulação proposta por Bainy & Silva (2020). E nesse sentido, retoma-se a análise dos elementos utilizados pela função de proteção do relé, como, por exemplo, o elemento diferencial filtrado, o elemento diferencial instantâneo e o valor de *pick-up*. A operação desses elementos variou de caso para caso, levando de uma até várias amostras para operarem, ou seja, eles não são previsíveis. E é justamente isso que a nova formulação alternativa do PAG pode oferecer para o algoritmo do relé, constância de atuação. Não basta apenas operar ou não operar, ser rápido ou devagar, um algoritmo de proteção deve ser sólido e consistente. Portanto, conclui-se que a incorporação do algoritmo do PAG como um critério de supervisão de *trip*, de fato melhoraria o desempenho do relé frente ao cenário de faltas internas.

Com relação aos casos de faltas externas com e sem saturação de TC, evidencia-se a grande

confiabilidade de ambos os algoritmos, que são capazes de reconhecer o defeito como externo e se manter estáveis. A respeito dos curto-circuitos evolutivos, pode-se enaltecer o algoritmo do relé, em propor uma lógica que permita reconhecer que uma falta interna ocorreu durante o modo de operação seguro, e assim promover o comando *trip* de maneira confiável e rápida.

Por fim, ressalta-se a simplicidade do algoritmo do PAG, característica essa que foi confirmada justamente com a integração da técnica como uma lógica adicional a um relé comercial. Como conclusão geral deste trabalho, pode-se dizer que a técnica do PAG é capaz de complementar o algoritmo de proteção do relé SEL-487B, trazendo benefícios para a proteção diferencial de barras.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação dos desenvolvimentos realizados nesta dissertação, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho dos algoritmos do PAG e do relé SEL-487B para condições de *outflow* na barra;
- Implementar um módulo de detecção de falta externa na área de programação livre do relé, de tal maneira que o desempenho da nova formulação do PAG não dependa das lógicas nativas do relé;
- Avaliar a utilização de ajustes adaptativos para a nova formulação alternativa do PAG quando aplicado na proteção diferencial de barramentos; e
- Integrar aos relés de proteção diferencial de linhas e de transformadores a nova formulação alternativa do plano alfa generalizado proposta por Bainy & Silva (2020) e avaliar o seu desempenho quando comparado com as funções de proteção nativas de cada relé.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA 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.
- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise Deligamentos Forçados de Sistema de Transmissão*. Brasília, DF, Brasil, 2018. Citado na página 8.
- ALLAH, R. A. Adaptive busbar differential relaying scheme during saturation period of current transformers based on alienation concept. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 10, n. 15, p. 3803–3815, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 15.
- ALMEIDA, M. L. S. de. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada no Plano Alfa de Potências Complexas*. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, out. 2016. Citado na página 47.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado 4 vezes nas páginas 2, 16, 17, and 18.
- ANDOW, F.; SUGA, N.; MURAKAMI, Y.; INAMURA, K. Microprocessor-based busbar protection relay. In: IET. *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.], 1993. p. 103–106. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 15.
- BAINY, R. G.; PIANETA, A.; SILVA, K. M. Proteção diferencial de barramentos baseada no plano alfa generalizado. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 4 vezes nas páginas 3, 14, 15, and 86.
- BAINY, R. G.; SILVA, K. M. Enhanced generalized alpha plane for numerical differential protection applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2020. Citado 17 vezes nas páginas vi, 4, 5, 14, 15, 53, 54, 55, 56, 63, 66, 67, 76, 86, 87, 88, and 89.
- BAINY, R. G.; SILVA, K. M.; LOTFIFARD, S.; GUZMÁN, A.; JOHNSON, B. K. Dynamic zone selection for busbar protection based on graph theory and boolean algebra. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 35, n. 4, p. 1769–1778, 2019. Citado na página 43.
- BEHRENDT, K.; COSTELLO, D.; ZOCHOLL, S. E. Considerations for using high-impedance or low-impedance relays for bus differential protection. In: IEEE. *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2010. p. 1–15. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 19.
- CHOTHANI, N.; BHALJA, B.; PARIKH, U. New fault zone identification scheme for busbar using support vector machine. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 5, n. 10, p. 1073–1079, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.
- CHOTHANI, N.; BHALJA, B.; PARIKH, U. Development of a new bus zone identification algorithm using support vector machine. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 6, n. 7, p. 710–718, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.

- CHOTHANI, N. G.; BHALJA, B. R. A new algorithm for busbar fault zone identification using relevance vector machine. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 44, n. 2, p. 193–205, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.
- COSTA, J. S.; TOLEDO, R. T.; GAMA, L. A.; SANTOS, G. B.; LOPES, F. V.; PEREIRA, P. S.; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. Investigation on full-converter-based wind power plant behavior during short-circuits. In: IEEE. *2019 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.], 2019. p. 1–4. Citado na página 1.
- EISSA, M. A novel wavelet approach to busbar protection during ct saturation and ratio-mismatch. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 72, n. 1, p. 41–48, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 9, 12, and 15.
- EISSA, M. Improvement of the differential busbar characteristic to avoid false operation during to ct saturation. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 6, n. 10, p. 931–939, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- EISSA, M. New differential busbar characteristic based on high frequencies extracted from faulted signal during current transformer saturation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 8, n. 4, p. 619–628, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- EISSA, M. A new digital busbar protection technique based on frequency information during ct saturation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 42–49, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA. *Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede por Classe:1995-2018*. Rio de Janeiro, Brasil, 2019. Citado na página 1.
- EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Rio de Janeiro, Brasil, 2019. Citado na página 1.
- ESCUDEIRO, A. M. P. *Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Transformada Wavelet*. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, jun. 2016. Citado na página 8.
- GAFOOR, S. A.; RAO, P. V. R. A transient current based busbar protection scheme using wavelet transforms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 1049–1053, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- GIL, M.; ABDOOS, A. A. Intelligent busbar protection scheme based on combination of support vector machine and s-transform. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 11, n. 8, p. 2056–2064, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.
- GUZMÁN, A.; QIN, B.-L.; LABUSCHAGNE, C. Reliable busbar protection with advanced zone selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 625–629, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 3, 9, 14, 15, and 43.
- HOSSAIN, M.; LEEVONGWAT, I.; RASTGOUFARD, P. Partial operating current characteristics to discriminate internal and external faults of differential protection zones during ct saturation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 12, n. 2, p. 379–387, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 15.

- IEEE. Ieee guide for protective relay applications to power system buses. *IEEE Std C37.234-2009*, p. C1–115, 2009. Citado 8 vezes nas páginas v, 16, 17, 28, 30, 31, 32, and 58.
- JENA, S.; BHALJA, B. R. Development of a new fault zone identification scheme for busbar using logistic regression classifier. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 11, n. 1, p. 174–184, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.
- JENA, S.; BHALJA, B. R. Numerical busbar differential protection using generalised alpha plane. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 12, n. 1, p. 227–234, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15, and 86.
- KANG, Y.; YUN, J.; LEE, B.; KANG, S.; JANG, S.; KIM, Y. Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 2, n. 1, p. 100–109, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 15.
- KANG, Y.-C.; LIM, U.-J.; KANG, S.-H.; CROSSLEY, P. A. A busbar differential protection relay suitable for use with measurement type current transformers. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 1291–1298, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 15.
- KASZTENNY, B.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. J.; FISCHER, N. Tutorial on operating characteristics of microprocessor-based multiterminal line current differential relays. *Present Problems of Power System Control*, 2013. Citado na página 50.
- KASZTENNY, B.; GRUNELO, G.; SEVOV, L. Digital low-impedance bus differential protection with reduced requirements for cts. In: *IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 703–708. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 15.
- KUMAR, A.; HANSEN, P. Digital bus-zone protection. *IEEE Computer Applications in Power*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 29–34, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 19 and 20.
- MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: IEEE. *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2010. p. 1–25. Citado 9 vezes nas páginas v, 14, 48, 49, 50, 51, 52, 53, and 56.
- MOHAMMED, M. High-speed differential busbar protection using wavelet-packet transform. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 152, n. 6, p. 927–933, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede: Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Rio de Janeiro, Brasil, 2017. Citado na página 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Relatório de Análise Estatística do Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção de Equipamentos referente ao ano de 2016*. Rio de Janeiro, Brasil, 2017. Citado na página 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Relatório de Análise Estatística do Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção de Linhas de Transmissão referente ao ano de 2016*. Rio de Janeiro, Brasil, 2017. Citado na página 2.
- PAITHANKAR, Y. G.; Bhide, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 16 and 17.

- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado na página 7.
- ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. The effect of multiprinciple line protection on dependability and security. In: *54th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 3–5. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47, and 55.
- SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; GILL, H. S. A busbar protection technique and its performance during ct saturation and ct ratio-mismatch. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 15, n. 3, p. 895–901, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 15.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-487B-1 Bus Differential and Breaker Failure Relay Instruction Manual*. [S.l.], 2018. Citado 11 vezes nas páginas v, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 59, and 62.
- SILVA, K.; BAINY, R. Generalized alpha plane for numerical differential protection applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 31, n. 6, p. 2565–2566, 2016. Citado 5 vezes nas páginas vi, 14, 51, 52, and 53.
- SILVA, K. M.; ESCUDERO, A. M. P.; LOPES, F. V.; COSTA, F. B. A wavelet-based busbar differential protection. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 33, n. 3, p. 1194–1203, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 15.
- SONG, S.; ZOU, G. A novel busbar protection method based on polarity comparison of superimposed current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 30, n. 4, p. 1914–1922, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 15.
- STEENKAMP, L.; LABUSCHAGNE, C.; STOKES-WALLER, E. Tutorial: Complex busbar protection application, proceedings of the 34th annual western protective relay conference. *Spokane, WA, October, 2007*. Citado na página 32.
- VALSAN, S. P.; SWARUP, K. Computationally efficient wavelet-transform-based digital directional protection for busbars. *IEEE Transactions on Power delivery*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1342–1350, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 15.
- VÁSQUEZ, F. A. M. *Proteção Diferencial de Barramentos Baseada na Potência Instantânea*. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, jul. 2019. Citado 3 vezes nas páginas iv, 2, and 21.
- VÁSQUEZ, F. A. M.; SILVA, K. M. Instantaneous-power-based busbar numerical differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 2, p. 616–626, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13, and 15.
- WARRINGTON, A. R. C. *Protective Relays: Their Theory and Practice, Volume 1*. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1962. Citado 3 vezes nas páginas v, 18, and 45.
- ZIEGLER, G. *Numerical differential protection: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 6 vezes nas páginas iv, 3, 18, 19, 20, and 22.
- ZOU, G.; GAO, H. A traveling-wave-based amplitude integral busbar protection technique. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 602–609, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 15.