



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL E TRANSVERSAL  
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO:  
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PLANO ALFA**

**EDIANE TEIXEIRA NEVES**

**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**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO: MODELAGEM  
E SIMULAÇÃO DO PLANO ALFA**

**EDIANE TEXEIRA NEVES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



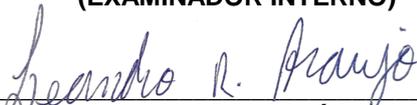
---

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



---

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



---

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

Brasília, 20 de fevereiro de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

NEVES, EDIANE TEIXEIRA

Proteção Diferencial Longitudinal e Transversal de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo: Modelagem e Simulação do Plano Alfa. [Distrito Federal] 2019.

xxv, 150p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2019).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial Longitudinal

3. Circuito Duplo

I. ENE/FT/UnB

2. Proteção Diferencial Transversal

4. Plano Alfa

II. Título (série)

## 719/2019 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NEVES, E. T. (2019). Proteção Diferencial Longitudinal e Transversal de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo: Modelagem e Simulação do Plano Alfa, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-719/2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.

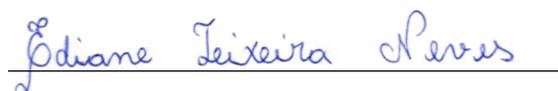
## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ediane Teixeira Neves

TÍTULO: Proteção Diferencial Longitudinal e Transversal de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo: Modelagem e Simulação do Plano Alfa.

GRAU: Mestre ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias 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 desse trabalho de pós-graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Ediane Teixeira Neves

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

*Aos meus pais, Edilson e Cleonice, DEDICO.*

*A sabedoria é a coisa principal;  
adquire pois a sabedoria, emprega tudo o que possuis  
na aquisição de entendimento. Provérbios 4:7.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, meu doce pai, melhor amigo e companheiro, que permitiu que tudo isso acontecesse, ensinou-me a ser forte e enfrentar meus medos, mostrou-me que sou capaz não só durante o curso, mas em toda a minha vida.

Em segundo lugar, aos meus pais, Edilson e Cleonice, pelo amor, honestidade, incentivo e dedicação com que me criaram, apoiaram-me nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Aos meus irmãos Erica, Erik, Edilson e Emerson, a meus tios e primos, por estarem ao meu lado e me apoiarem.

Ao Prof. Dr. Kleber Melo e Silva pela oportunidade e apoio na elaboração desta dissertação, por ser paciente e humilde ao me ensinar, e por acreditar em mim.

Aos colegas do Laboratório LAPSE por todo companheirismo, ensinamentos e amizades.

A Universidade de Brasília, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade de fazer o curso de excelência, pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

A todos os meus amigos, que são como uma família para mim, que estiveram presentes me incentivando e aconselhando, principalmente a Laís e a Tais por sua amizade e incentivo.

## RESUMO

Apresenta-se nesta dissertação uma avaliação de desempenho das funções de proteção diferencial longitudinal e transversal aplicadas em linhas de transmissão de circuito duplo por meio do plano- $\alpha$ . O sistema de potência foi modelado no ATP (*Alternative Transients Program*). As linhas de transmissão que interligam as subestações Utinga e Miramar foram usadas como base, as duas são de concessão da empresa Eletrobras Eletronorte, e possuem tensão e frequência de 230 kV/60 Hz. Os desempenhos das funções de proteção foram avaliadas por meio da Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP) e da Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC). Na primeira análise, apenas um valor de parâmetro muda por vez, fornecendo uma compreensão mais abrangente da relação entre cada parâmetro e o desempenho dos algoritmos, os parâmetros variados foram a resistência de falta, carregamento, força das fontes e a localização da falta. Constatou-se que a função transversal é imune à variação da resistência de falta, do carregamento da linha e da força das fontes, mas é sensível à variação da localização da falta. Por outro lado, a proteção diferencial longitudinal é bastante sensível a todas essas variações, podendo ocorrer a perda de sensibilidade dependendo do valor do carregamento e da resistência de falta. A segunda análise permite a visualização da trajetória dos quocientes no plano- $\alpha$  desde o instante em que é aplicada a falta até o regime permanente de falta. Nesta análise foram simulados casos pontuais e cenários extremos de operação, onde os parâmetros extrapolam valores usuais encontrados na literatura, afim de verificar a confiabilidade e a segurança da proteção.

**Palavras-chave:** Proteção diferencial longitudinal, Proteção diferencial transversal, linhas de transmissão de circuito duplo, plano- $\alpha$ , ATP.

## ABSTRACT

In this master thesis, the performance evaluation of the longitudinal and transverse differential protection functions is presented, applied on double-circuit transmission lines via the  $\alpha$ -plane. The power system was modeled in ATP ( Alternative Transients Program). The transmission lines linking the Utinga and Miramar substations were used as a base, both of which are owned by Eletrobras Eletronorte, and have a voltage and frequency of 230 kV/60 Hz. The performances protection functions were evaluated through Parametric Sensitivity Analysis (ASP) and Short Circuit Transient Analysis (ATC). In the first analysis, only one parameter value changes at a time, providing a more comprehensive understanding of the relationship between each parameter and the performance of the algorithms, the varied parameters were the fault resistance, load, source strength and fault location. It has been found that the transverse function is immune to the variation of the fault resistance, line loading and source strength, but is sensitive to the variation of fault location. On the other hand, the longitudinal differential protection is very sensitive to all these variations, and loss of sensitivity may occur depending on the loading value and the fault resistance. The second analysis allows the trajectory of the quotients in the  $\alpha$ -plane to be viewed from the moment the fault is applied to the steady-state fault regime. In this analysis were simulated specific cases and extreme scenarios of operation, where the parameters extrapolate usual values found in the literature, in order to verify the reliability and safety of the protection.

begin keywords Linear differential protection, Transverse differential protection, Dual circuit transmission lines,  $\alpha$ -plane, ATP. end keywords

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vi
<b>Lista de Símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	x
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.4 Organização do Texto . . . . .	3
1.5 Publicação . . . . .	4
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	5
<b>Capítulo 3 – Fundamentos da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão</b>	11
3.1 Princípios da Proteção de Sistemas Elétricos . . . . .	11
3.2 Proteção Diferencial de LTs . . . . .	12
3.2.1 Correção da Relação de Transformação dos TCs . . . . .	15
3.3 Proteção para Circuito Duplo . . . . .	15
3.3.1 Proteção Diferencial Longitudinal de LTs (Função 87L) . . . . .	17
3.3.2 Proteção Diferencial Transversal de LTs de Circuito Duplo (Função 87LT) . . . . .	18
3.4 Corrente Capacitiva . . . . .	20
3.4.0.1 Método das Correntes Sobrepostas . . . . .	22
3.4.0.2 Modo de Operação . . . . .	24

---

3.5	Plano Alfa . . . . .	26
<b>Capítulo 4 – Mapeamento do Plano Alfa</b>		<b>29</b>
4.1	Modelo 1 . . . . .	29
4.2	Modelo 2 . . . . .	32
4.3	Plano - $\alpha$ . . . . .	34
<b>Capítulo 5 – Análise dos Resultados</b>		<b>36</b>
5.1	Sistema Teste e Simulações . . . . .	37
5.2	Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC) . . . . .	40
5.2.1	Caso ATC-1: Curto-Circuito AB-T na Barra Remota . . . . .	41
5.2.2	Caso ATC-2: Curto-Circuito ABC com Saturação de TC no Terminal Remoto do Circuito 1 . . . . .	43
5.2.3	Caso ATC-3: Curto-Circuito entre os Circuitos 1 e 2 na Fase A-T . . . . .	46
5.2.4	Caso ATC-4: Curto-Circuito entre os Circuitos 1 e 2 da fase B para A . . . . .	48
5.3	Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP) . . . . .	51
5.3.1	Caso ASP-1: Curto-Circuito A-T Interno - Variação da Localização de Falta . . . . .	52
5.3.2	Caso ASP-2: Curto-Circuito B-T Interno - Variação da Resistência de Falta . . . . .	54
5.3.3	Caso ASP-3: Curto-Circuito AB-T Interno - Variação do Carregamento . . . . .	56
5.3.4	Caso ASP-4: Curto-Circuito ABC Interno - Variação do Força da Fonte . . . . .	58
<b>Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros</b>		<b>61</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Relé diferencial: (a) Falta externa. (b) Falta interna. . . . .	13
3.2	Esquema da proteção diferencial longitudinal para circuito duplo. . . . .	18
3.3	Esquema da proteção diferencial transversal para circuito duplo. . . . .	19
3.4	Trajectoria do ponto de operação devido a corrente de carga, função 87L . . . . .	20
3.5	Trajectoria do ponto de operação devido a corrente de carga, função 87LT . . . . .	21
3.6	Circuito duplo. (a) com carregamento. (b) equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta interna. (c) equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta externa. . . . .	24
3.7	circuito duplo com falta F1, F2 e F3. . . . .	25
3.8	Plano Alfa para a Função 87L. . . . .	27
3.9	Regiões do plano- $\alpha$ com atraso de comunicação. . . . .	27
3.10	Plano Alfa para a Função 87LT. . . . .	28
4.1	Mapeamento do plano- $\alpha$ : Região de restrição em função do $K$ para o (a) modelo 1. (b) modelo 2. . . . .	35
5.1	Sistema teste modelado no ATPDraw. . . . .	37
5.2	Torre típica da LT monitorada. . . . .	38
5.3	Correntes no Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto. Correntes no Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto. . . . .	41
5.4	Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito externo aplicado na barra do terminal remoto. Circuito 1:Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2:Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	42

5.5	Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito externo aplicado na barra do terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	42
5.6	Aplicação de curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d). . . . .	44
5.7	Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d). . . . .	44
5.8	Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d). . . . .	45
5.9	Curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T para A-T. Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto, Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto. . . . .	46
5.10	Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ com curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	47
5.11	Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ com curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	48
5.12	Curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase B para A. Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto, Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto. . . . .	49
5.13	Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ com curto-circuito entre o circuito 1 na fase B e o circuito 2 na fase A. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	50
5.14	Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ com curto-circuito entre o circuito 1 na fase B e o circuito 2 na fase A. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d). . . . .	50

5.15	Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$ com variação da localização e com falta monofásica nas fases A-T na circuito 1. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local (d) Terminal Remoto. . . . .	52
5.16	Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$ com variação da localização e com falta monofásica nas fases A-T na circuito 1. Circuito 1 (a) Terminal Local (b) e Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local (d) e Remoto. . . . .	53
5.17	Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$ com variação da Resistência de falta $R_F$ e falta monofásica B-T.Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	55
5.18	Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$ com variação da Resistência de falta $R_F$ e falta monofásica B-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	55
5.19	Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$ com variação do carregamento e falta AB-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	56
5.20	Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$ com variação do carregamento e falta AB-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	57
5.21	Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$ com variação do $FF_L$ e falta trifásica. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	58
5.22	Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$ com variação do $FF_L$ e falta trifásica. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto. . . . .	59

## LISTA DE TABELAS

2.1	Referências para os conteúdos abordados. . . . .	10
3.1	Características da função diferencial no plano complexo. . . . .	14
5.1	Componentes de sequência da LT monitorada. . . . .	39
5.2	Parâmetros elétricos da LT de circuito duplo monitorada . . . . .	40
5.3	Resumo dos casos de ATC avaliados. . . . .	40
5.4	Resumo dos casos avaliados na ASP. . . . .	51
6.1	Resultados: Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC) . . . . .	62
6.2	Resultados: Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP) . . . . .	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Percentual da linha em que ocorre a falta a partir do terminal local.
$\hat{I}_{C1}$	Fasores de corrente medidos na linha 1.
$\hat{I}_{C2}$	Fasores de corrente medidos na linha 2.
$\hat{I}_L$	Fasores de corrente medidos no terminal local.
$\hat{I}_R$	Fasores de corrente medidos no terminal remoto.
$\hat{I}_C$	Fasores de corrente capacitiva da linha de transmissão.
$i_{C,total}$	Fasores de corrente capacitiva total da linha de transmissão.
$\hat{I}_{dif(N)}$	Fasores de corrente diferencial do sistema com múltiplos terminais.
$i_{dif,comp}$	Corrente diferencial compensada.
$\hat{I}_{carga}$	Fasores de Corrente de carga do sistema.
$i_n$	Corrente medida no terminal $n$ .
$\hat{I}_{nom}^{max}$	Fasores de máxima corrente primária dos TCs da zona de proteção.
$\hat{I}_{norm,n}$	Fasores de corrente normalizada do terminal $n$ .
$\hat{I}_{sec,n}$	Fasores de corrente secundária do terminal $n$ .
$i_{TC}^{sec}$	Corrente no secundário do transformador de corrente.
$i_{TC}^{prim}$	Corrente no primário do transformador de corrente.
$RTC_n$	Relação de transformação do TC do terminal $n$ .
TAP	Fator de normalização das correntes medidas pelo relé.
$TAP_n$	TAP do terminal $n$ .

$I_{op}$	Corrente de operação.
$I_{pk}$	Corrente de <i>pick-up</i> . Corrente mínima para atuação do relé diferencial.
$I_{res}$	Corrente de restrição.
$I_{resA}$	Corrente de restrição da fase A.
$I_{resB}$	Corrente de restrição da fase B.
$I_{resC}$	Corrente de restrição da fase C.
$K$	Ajuste de sensibilidade do relé percentual.
$L$	Comprimento da linha de transmissão.
$r$	Vetor no plano- $\alpha$ dado pelo quociente entre $\hat{I}_{C2}$ e $\hat{I}_{C1}$ .
$a$	Parte real de $r$ .
$b$	Parte imaginária de $r$ .
$n$	Número de correntes que delimitam a zona de restrição.
$R$	Raio da circunferência externa da característica modificada no plano- $\alpha$ .
$R_F$	Resistência de falta.
$SIR_L$	$SIR$ da fonte local.
$SIR_R$	$SIR$ da fonte remota.
$\hat{V}_L$	Fasor de tensão da fonte $L$ .
$\hat{V}_R$	Fasor de tensão da fonte $R$ .
$Z_{LT}$	Impedância série da linha de transmissão.
$Z_L$	Impedância do equivalente de Thévenin da fonte $L$ .
$Z_R$	Impedância do equivalente de Thévenin da fonte $R$ .
$\alpha$	Ângulo de abertura da característica modificada no plano- $\alpha$ .
$\phi$	Índice que representa as fases A, B ou C.
$\hat{I}_{T\phi cor}$	Fasores de corrente corrigida considerando na fase $\phi$ .

---

$\hat{I}_{T\phi}$	Fasores de corrente original medida no terminal da linha considerando na fase $\phi$ .
$C_{XX}$	Correntes originais medidas em ambos os terminais da linha.
$\hat{I}_{T\phi cap}$	Fasores de corrente capacitiva considerando na fase $\phi$ .
$\hat{V}_{T\phi}$	Fasores de tensão medidas no terminal considerando na fase $\phi$ .
$C_{XY}$	Capacitâncias mútuas entre as fases A, B e C.
$\theta_{LR}$	Ângulo entre os fasores $\hat{I}_L$ e $\hat{I}_R$ .

## GLOSSÁRIO

87	Função de proteção diferencial.
87T	Proteção diferencial de transformadores.
87B	Proteção diferencial de barramentos.
87L	Proteção diferencial longitudinal de linhas de transmissão.
87LT	Proteção diferencial transversal de linhas de transmissão.
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
ATPDraw	Interface gráfica do ATP
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
plano- $\alpha$	Plano alfa.
pu	por unidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEE	Sistema de Energia Elétrica
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de corrente

---

TcPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
A-T	Fase A para Terra
B-T	Fase B para Terra
C-T	Fase C para Terra
AC-T	Fases A e C para Terra
AB-T	Fases A e B para Terra
BC-T	Fases B e C para Terra
ABC	Fases A, B e C
B11	Disjuntor localizado no terminal local da linha 1
B12	Disjuntor localizado no terminal remoto da linha 1
B21	Disjuntor localizado no terminal local da linha 2
B22	Disjuntor localizado no terminal remoto da linha 2
EHS	<i>Extra High Strength</i>
F1	Ponto de aplicação de falta localizado no terminal local da linha 1
F2	Ponto de aplicação de falta localizado na região central da linha 1
F3	Ponto de aplicação de falta localizado no terminal remoto da linha 1
LT	Linha de transmissão
R1	Relé localizado no terminal local da linha de transmissão
R2	Relé localizado no terminal remoto da linha de transmissão

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A sociedade contemporânea requer o aumento da demanda de energia elétrica de maneira contínua. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a projeção da demanda de eletricidade no horizonte 2017-2026 é de uma expansão média anual de 3,9%. Ainda segundo esse estudo, o número de consumidores terá um crescimento médio de 2,5% ao ano, sendo que o crescimento por consumidor residencial será de 1,4% ao ano. Como consequência, a previsão é que o consumo por residência no Brasil fique em torno de 182 kWh/mês ao final de 2026 (EPE, 2017).

O crescimento da demanda requerida pelos consumidores traz consequências ao suprimento de energia elétrica. Atualmente, os sistemas de energia elétrica (SEEs) operam cada vez mais próximos das suas margens de estabilidade transitória. Visando manter a estabilidade, aumenta-se a busca por esquemas de proteção que promovem uma rápida detecção e isolamento da falta (ALTUVE *et al.*, 2004). É necessário adotar uma proteção de sistemas elétricos de potência adequada ao setor elétrico, para que o suprimento de energia seja estabelecida de forma concreta e para que o abastecimento energético não seja comprometido, mantendo a confiabilidade e a continuidade do abastecimento, não ocorrendo desligamentos desnecessários.

O sistema de proteção deve ser confiável e capaz de detectar falhas de forma rápida e seletiva, além de isolar a parte afetada garantindo o mínimo de desligamentos não programados dos componentes do SEE (PAITHANKAR; BHIDE, 2007). A descontinuidade do funcionamento de linhas de transmissão (LTs) ou de outros equipamentos implica na interrupção do fornecimento para os consumidores, o que, por sua vez, acarreta em prejuízos financeiros tanto para o fornecedor, quanto para o consumidor de energia elétrica (ANEEL, 2017).

Para que a energia elétrica esteja disponível é necessário realizar etapas como, geração, transmissão e distribuição (ONS, 2013). Dentre os equipamentos utilizados, os principais são geradores,

transformadores de potência e LTs. As LTs são responsáveis pela conexão física entre a fonte de geração e o consumidor, são equipamentos geralmente de grande extensão, em consequência de sua dimensão tornam-se suscetíveis a intempéries e vandalismo (TLEIS, 2008). Segundo a ANEEL, no período entre julho de 2016 e junho de 2017, ocorreram 3.768 desligamentos forçados em equipamentos da Rede Básica e da Rede Complementar do Sistema Interligado Nacional (SIN). Destes desligamentos 75,6% ocorreram em LTs (ANEEL, 2018).

As LTs de circuito duplo tem sido amplamente utilizadas em sistemas de transmissão, afim de aumentar a capacidade, a confiabilidade e a segurança na transmissão de energia elétrica. A proteção se torna desafiadora ao combinar as diferentes possibilidades de configuração das linhas paralelas com o efeito do acoplamento mútuo (APOSTOLOV *et al.*, 2007). Se comparado ao circuito simples apresenta vantagens econômicas, pois o circuito duplo permite o transporte de maiores quantidades de energia elétrica para as mesmas distâncias ocupando praticamente a mesma faixa de servidão e a mesma torre de uma LT que um circuito simples, o que proporciona menor custo de transporte de energia por quilômetro se comparado com LTs de circuito simples (FORCAN; STOJANOVIC, 2016). Em um modelo de circuito duplo, em que os terminais de ambos os circuitos estão conectados ao mesmo barramento e os circuitos possuem os mesmos parâmetros, as correntes e tensões das linhas duplas estão relacionadas. Em situações sem ocorrência de faltas ou faltas externas, as grandezas elétricas das duas linhas são semelhantes, quando ocorrem faltas internas perde-se o equilíbrio, assim a falta pode ser detectada (WANG *et al.*, 2005d).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Dentre os diferentes tipos de esquemas de proteção para LTs de circuito duplo, a proteção diferencial tem sido comumente empregada (FERRER; SCHWEITZER III, 2010). Nesta dissertação apresenta-se um estudo da proteção diferencial longitudinal e transversal de LTs de circuito duplo, sendo os resultados avaliados no plano- $\alpha$ . Altuve *et al.* (2002) reporta que a proteção diferencial longitudinal de LTs (função 87L) apresenta boa velocidade de atuação, sensibilidade, segurança e seletividade. No entanto, o desempenho da função 87L depende da confiabilidade do canal de comunicação, por depender de medições de corrente em terminais distintos, as amostras medidas devem estar sincronizadas (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011). Por outro lado, a proteção diferencial transversal aqui denominada (função 87LT) é uma técnica alternativa e economicamente viável para

a proteção desse tipo de LT, pois esse esquema não requer a troca de informações entre os terminais, ou seja, não é necessária a sincronização de dados, além disso. As duas funções não são afetadas pelo acoplamento mútuo de sequência zero, como será visto a seguir (WANG *et al.*, 2005a; ZIMMERMAN; COSTELLO, 2013).

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é avaliar um algoritmo de proteção diferencial transversal para LTs de circuito duplo utilizando o método das correntes sobrepostas, também conhecido como corrente incremental, e a modelagem de um novo plano- $\alpha$ , o qual não necessita de uma característica de restrição modificada, e por fim, analisar os resultados do algoritmo proposto. Para tal, os resultados serão comparados a proteção diferencial longitudinal, que usa o plano- $\alpha$  com característica de restrição modificada. Ambas as proteções utilizam a compensação da corrente capacitiva. São definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica da proteção diferencial de LTs;
- Realizar uma revisão dos fundamentos que norteiam as funções 87L e 87LT;
- Realizar um estudo do plano- $\alpha$  aplicado em LTs de circuito duplo;
- Modelar um sistema teste com a finalidade de avaliar as trajetórias dos quocientes diferenciais no plano- $\alpha$ , simulando diferentes situações operativas e defeitos recorrentes no SEE;
- Empregar um algoritmo segregado por fase capaz de indicar a fase defeituosa e possibilitar a análise do desempenho da atuação das funções 87L e 87LT;
- Validar o algoritmo utilizado para a proteção diferencial em uma LT de circuito duplo existente no SIN, esta será modelada no software *Alternative Transients Program (ATP)* com o intuito de ilustrar o desempenho prático da função diferencial de proteção;
- Apresentar as conclusões a respeito dos resultados obtidos com as simulações computacionais.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 2, realiza-se o levantamento do estado da arte relacionado aos conceitos da prote-

ção diferencial de corrente para LTs de circuito duplo e do plano- $\alpha$ ;

- No Capítulo 3, realiza-se a revisão dos fundamentos teóricos da proteção diferencial de corrente de LTs, abordando os aspectos básicos como deduções analíticas dos quocientes e detecção de curtos-circuitos utilizando o plano- $\alpha$ .
- No Capítulo 4, descreve-se o mapeamento de uma região de restrição para o plano- $\alpha$  proposta nesse trabalho.
- No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com os algoritmos propostos para as funções 87L e 87LT em LTs de circuito duplo via plano- $\alpha$ , a fim de avaliar e comparar seu desempenho.
- Enfim, no Capítulo 6, são feitas conclusões sobre os resultados obtidos das simulações.

## 1.5 PUBLICAÇÃO

No que concerne à divulgação dos estudos realizados ao longo do período de trabalho nesta dissertação, a seguinte publicação foi realizada:

- Parametric Sensitivity Analysis of Longitudinal and Transverse Differential Protections Applied to Double Circuit Transmission Lines, artigo apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VI SBSE) realizado na cidade de Rio de Janeiro (RN) em Maio de 2018.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante a elaboração desta dissertação, consultou-se trabalhos que abordam os esquemas de proteção diferencial longitudinal e transversal de LTs de circuito duplo, funções 87L e 87LT, respectivamente, além de correntes sobrepostas, compensação da corrente capacitiva e modelagem de regiões de restrição do plano- $\alpha$ . A seguir, apresenta-se uma revisão do estado da arte acerca dos referidos assuntos, afim de elucidar a relevância do desenvolvimento dessa dissertação.

Eissa & Malik (1996) propuseram uma técnica de proteção diferencial transversal direcional de corrente, esse esquema se baseia apenas em sinais de corrente sobreposta. Os sinais de corrente sobreposta fornecem o sinal diferencial de corrente de falta com as características direcionais que determinam a direção atual do fluxo durante uma falta. A operação do relé inicia quando a corrente de pós-falta excede a corrente de pré-falta com uma determinada margem, a confirmação da falta ocorre através da análise de uma série de amostras consecutivas. Assim, é possível calcular os valores incrementais nas extremidades da LT. A corrente sobreposta é calculada fazendo a subtração da corrente no instante atual de falta e da corrente medida em um ciclo atrás, assim tem-se a corrente do circuito puro de falta. Esse estudo não fez uso de um canal de comunicação que liga as duas extremidades da LT a ser protegida, além de não ser necessária a aquisição de sinais de tensão. O estudo se aplica principalmente em casos onde há faltas monofásicas de baixa resistência, pois podem ter valores altos de corrente de falta. Se a falta ocorre através de um caminho com alta resistência isso impacta negativamente o algoritmo da proteção de LTs de circuito duplo, o impacto do aumento da resistência é atrasar as trajetórias das amostras no plano- $\alpha$ , retardando assim a ação de cruzar o limite de restrição para que o relé seja sensibilizado.

Altuve *et al.* (2002) descreve uma característica de restrição modificada para o plano- $\alpha$ , a qual é usada para a proteção diferencial longitudinal de uma LT de circuito simples. Apresenta-se no trabalho o conceito do plano complexo com a razão das correntes medidas no terminal local  $\hat{I}_L$  e remoto  $\hat{I}_R$ . Durante o funcionamento normal ou para um curto-circuito fora da região protegida,

corrente  $\hat{I}_L$  é igual a  $\hat{I}_R$ , dessa forma, o quociente  $r = \hat{I}_L/\hat{I}_R$  situa-se no ponto (-1,0) do plano complexo. Por outro lado, ao ocorrer um curto-circuito dentro da região protegida, os valores de  $r$  tendem a se afastar do ponto (-1,0). O estudo mostrou que as regiões onde os pontos se localizam dependem do estado do SEE, porém as trajetórias desses valores podem ser alteradas a partir de imprecisões relativas à classe de exatidão dos TCs, do nível de carregamento do SEE e da impedância dos equivalentes de Thévenin das fontes local e remota. Sendo assim, conhecendo o comportamento no plano- $\alpha$  foi possível propor uma nova característica de restrição modificada para o plano- $\alpha$  com o intuito de o tornar ainda mais sensível. A forma da característica de restrição se ajusta à zona de faltas externas e operação normal. A característica é definida por dois parâmetros: um ângulo  $\alpha$  e um raio  $R$ , onde o ângulo  $\alpha$  fornece a abertura necessária para os erros associados ao canal de comunicação, enquanto que o ajuste  $R$  concede o espaço para acondicionar situações como saturação de TCs e oscilações de baixa frequência.

Wang *et al.* (2005c) e Wang *et al.* (2005e) apresentaram um relé diferencial transversal para LTs de circuito duplo de alta tensão usando elementos de corrente diferencial cruzada percentual. Afim de melhorar o desempenho do esquema de proteção são usados elementos de tensão para identificar as condições de falta, elementos seletores de fase e um elemento de bloqueio que é capaz de isolar faltas quando há operação instantânea. Mesmo sem o uso de um canal de comunicação a operação se mostrou bem-sucedida. O princípio convencional do relé diferencial transversal inclui o relé de corrente balanceada e o relé direcional diferencial transversal. O relé de corrente balanceada compara as amplitudes de corrente das LTs de circuito duplo, o relé direcional diferencial transversal é baseado no cálculo da amplitude da corrente diferencial para determinar a falta interna ou a falta externa e selecionar a LT com falta por suas direções, ambos usam elementos diferenciais de corrente. Com base no relé diferencial transversal convencional, o valor operacional do elemento diferencial de corrente  $I_{op}$  deve ser maior que a corrente desequilibrada por falta externa. Após a abertura dos disjuntores para eliminar uma falta, a corrente da fase em que houve a falta é zero e a corrente do circuito sem falta é a corrente de carga. A corrente diferencial entre os dois circuitos pode fazer com que o relé diferencial transversal funcione incorretamente atuando para o circuito onde não houve falta. Para atender essas condições deve-se usar valores operacionais significativos, o que prejudica a sensibilidade do relé principalmente para LTs com carregamento elevado. A zona de operação instantânea é reduzida devido ao elevado valor da corrente diferencial. Logo, aumenta o número de faltas que serão eliminadas por operações sucessivas. Se a zona de operação sucessiva for maior que 50% do comprimento

da LT, haverá uma zona morta na LT onde os relés não podem operar. Portanto, o relé diferencial transversal convencional não é adequado para LTs de *Extra High Voltage* (EHV). Em um relé diferencial percentual, a corrente diferencial deve exceder uma porcentagem fixa da corrente de restrição. Ainda nesse trabalho, foram realizados testes usando *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) e *Real Time Digital System Simulator* (RTDS), em que se comprovou que o uso de um relé percentual é capaz de melhorar significativamente o desempenho do relé diferencial transversal convencional, aumentando a cobertura da zona de disparo instantâneo e a confiabilidade do esquema de proteção.

A operação do relé diferencial transversal convencional é sensível quando a fonte é fraca, e seu desempenho também é influenciado pela carga, pois seu funcionamento é baseado na comparação entre as amplitudes atuais das correntes. A fim de sanar essas limitações, Wang *et al.* (2005b) adotaram o uso da sobreposição das correntes, que melhora a sensibilidade do relé diferencial cruzado, tornando-o capaz de funcionar de forma mais confiável quando as fontes forem fortes e fracas. O método tem como base a análise da corrente do circuito puro de falta, para tal, o relé a obtém a partir da subtração entre os valores medidos das correntes, após a falta e das correntes antes da falta (WANG *et al.*, 2005b).

Abdel-Latif *et al.* (2008) apresenta um esquema de proteção de LTs paralelas usando o protocolo *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), o esquema proposto é baseado em sinais atuais medidos nos terminais da LT monitorada e transmitidos via canal de comunicação. Os relés de cada extremidade recebem os sinais de corrente medidos e os armazenam em um arquivo de dados, dessa forma, define-se um formato comum para os arquivos de dados, controle necessário para o intercâmbio dos dados medidos, afim de evitar possíveis falhas entre as estações de comunicação. Os sinais recebidos pelos relés são analógicos, são convertidos para digital através da conversão de três processos: amostragem, quantização e codificação. Para uma recepção eficiente na extremidade receptora, um filtro *anti-aliasing* adequado a uma alta taxa de amostragem são usados. Os valores recebidos no arquivo de dados são aplicados em uma sequência no dispositivo de conversão analógico-digital (A/D). Como resultado, a saída do A/D é um fluxo de *bits* que deve ser encapsulado no quadro Wi-Fi antes de trocar os dados com outras estações através da rede sem fio. A rede de comunicação sem fio traz vantagens se comparada as técnicas convencionais, com uso do canal de comunicação tradicional, como não ser necessário o uso de fio piloto, o qual é suscetível a quebras, além de apresentar uma resposta mais rápida e menor custo, ademais, os relés se comportam de maneira adaptável de acordo com alterações

nas conexões e parâmetros do SEE.

A proteção diferencial de corrente de LT possui desafios referentes ao canal de comunicação, há um limite para a quantidade de dados que podem ser trocados entre os terminais do SEE, e ainda há necessidade de esquemas de alinhamento de dados para permitir o princípio de proteção diferencial. Este trabalho apresenta a compensação da corrente capacitiva da LT, com o objetivo de remover a corrente capacitiva da corrente diferencial. O método aplicado deve funcionar sob condições balanceadas e não balanceadas, LTs transpostas e não transpostas, energização, faltas externas, faltas internas, entre outros. Para fazer a compensação é necessário calcular a corrente capacitiva total da LT, que é a corrente consumida pela capacitância *shunt* total da LT. As contribuições para as correntes diferenciais podem ser calculadas a partir das tensões medidas nos terminais da LT. Por fim, a capacitância *shunt* pode ser representada por um modelo de parâmetros concentrados em cada terminal da LT, que permite que o relé meça a tensão da LT que possui valores próximos a tensão média entre os terminais. Nessa compensação, a corrente diferencial será a corrente capacitiva subtraída da corrente medida (MILLER *et al.*, 2010).

Sanaye-Pasand & Jafarian (2011) sugeriram um algoritmo de proteção baseado em um diagrama de estado com duas dimensões para LTs com circuitos paralelos e uma técnica diferencial cruzada, que compara as correntes das fases a partir de dados obtidos nos relés em cada barramento. Para que a proteção atue, tem-se que a diferença entre as amplitudes das correntes dos circuitos deve ser maior que a corrente de operação, sendo esse um limiar definido de acordo com a assimetria máxima durante a operação sem faltas. Usando um algoritmo baseado em impedância para cobrir as faltas em evolução, onde a falta se estende para a outra LT subsequentemente o efeito do acoplamento mútuo nas impedâncias medidas é compensado gradualmente de acordo com o estado das correntes do circuito paralelo no espaço 2-D segmentado. O método se mostrou interessante, pois foi capaz de detectar faltas entre LTs, mesmo faltas evolutivas. Além disso, foi capaz de selecionar de forma confiável as fases com falta. Nesse trabalho a comparação das correntes dos circuitos paralelos é feita em um espaço com duas dimensões, sendo gerada uma figura com segmentação espacial do algoritmo proposto, e definidas seis áreas com base nas condições possíveis do SEE sob diferentes estados operacionais. Por fim, outro ponto interessante é que quando um dos circuitos está desligado não é necessário desativar a proteção, pois a abordagem proposta abrange todos os estados operacionais dos circuitos paralelos.

Tripathy *et al.* (2014) propuseram um novo esquema de proteção diferencial transversal para uma LT em paralelo na presença de um *Unified Power-Flow Controller* (UPFC). Para a detecção de falhas usou-se uma técnica baseada na soma cumulativa (CUSUM) de sinais trifásicos de corrente, três relés monofásicos (um para cada fase) foram colocados no barramento de envio, cada fase dos dois circuitos paralelos sendo protegidos ao mesmo tempo pelas três unidades de relé. A técnica de CUSUM foi escolhida por ser menos afetada pela presença de ruído, harmônicos e picos no sinal. Além disso, a chance de detecção falsa é relativamente baixa nas técnicas CUSUM durante distúrbios como oscilação de potência e comutação de carga (adição ou remoção). As fases defeituosas são então identificadas através do cálculo das energias espectrais das correntes de fase individuais. Sendo a energia espectral calculada através da aplicação de uma ferramenta computacional conhecida como *First Discrete S-Transform* (FDST), a qual utiliza técnicas de seleção de frequência adequadas para sinais do SEE, o que reduz significativamente a complexidade computacional. O esquema proposto nesse trabalho se mostrou capaz de detectar e classificar faltas em uma LT paralela baseada em UPFC com um tempo de resposta de menos de um ciclo. No entanto, apresentou falhas em alguns casos críticos de faltas externas.

Sarangi & Pradhan (2016) propuseram um esquema de proteção diferencial longitudinal no plano- $\alpha$  adaptativo baseado em correntes de fase e de sequência, que usa a mudança de ângulo entre tensão e corrente nas duas extremidades da LT. A partir da mudança no ângulo de fase nos terminais da LT, pode-se dizer se há condição de falta ou operação normal. O SEE analisado nesse trabalho é constituído de 9 barras, sendo simulado no *Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients* EMTDC/PSCAD para faltas internas, externas, e em condições com alta resistência de falta e saturação de TC. Os fasores de corrente foram obtidos usando a *Discrete Fourier Transform* (DFT) de um ciclo, a taxa de amostragem de dados é mantida em 1,2 kHz. A combinação do uso de correntes de fase e de sequência, pode ser usada para aumentar a segurança e a sensibilidade do esquema de proteção. O esquema proposto foi testado em casos que a linha estava ou não com compensação série. Os resultados para 9 barras mostram que o método funciona corretamente para falhas de alta resistência em uma linha com compensação série.

Li *et al.* (2018) apresentaram um esquema de proteção diferencial transversal integrado capaz de selecionar a fase defeituosa, a LT com falta e com uma estratégia para emissão de sinal de *trip* com religamento. O esquema de seleção de fase defeituosa considera os dois circuitos como um único, e

analisa os dados por fase, sendo assim, soma-se as correntes medidas nas duas LTs para cada fase e depois compara os resultados por fase, dessa forma, seleciona a fase defeituosa, mas não se diferencia o circuito defeituoso. Para a seleção da LT defeituosa, o critério de seleção distingue a LT com a fase defeituosa com base na taxa de impedância transversal, a impedância é diferente da impedância usada para a proteção de distância convencional, a impedância medida no esquema proposto inclui a impedância própria e mútua entre diferentes LTs. Se os parâmetros das LTs de circuito duplo forem simétricos, em caso de falta externa o valor da impedância na LT 1 será igual à da LT 2. No entanto, se ocorrer uma falta interna, o valor da impedância na LT 1 será diferente do valor de impedância na LT 2. Quanto menor a localização da falta, maior será a diferença entre as impedâncias da LT 1 e 2. Em grande parte dos casos de ocorrência de faltas a proteção bloqueia a LT desarmada após um atraso de tempo fixo sem distinguir entre falhas permanentes e falhas transitórias. Acontece que ao restaurar a parte do SEE afetada em casos de falhas permanentes o dano será agravado. O artigo propôs uma emissão de sinal de *trip* aprimorado e uma estratégia para um religamento da LT, os dois circuitos são considerados como um todo, e a possibilidade de disparo e religamento pode ser diminuída pela transferência para a operação após a falta ser eliminada, chamanda de operação *Quasi-Three-Phase* (QTP), de tal forma que, a transferência no modo de operação depende das fases envolvidas no curto-circuito.

**Tabela 2.1.** Referências para os conteúdos abordados.

Referência	CC	CD	P	MCS	CCC	87L	87LT	MO
Eissa & Malik (1996)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
Altuve <i>et al.</i> (2002)	✓	-	✓	-	-	✓	-	-
Wang <i>et al.</i> (2005c)	-	✓	-	-	-	-	✓	✓
Wang <i>et al.</i> (2005e)	-	✓	-	-	-	-	✓	✓
Wang <i>et al.</i> (2005b)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓
Abdel-Latif <i>et al.</i> (2008)	✓	✓	-	-	-	✓	-	-
Miller <i>et al.</i> (2010)	✓	-	-	-	✓	✓	-	-
Sanaye-Pasand & Jafarian (2011)	-	✓	-	-	-	-	✓	-
Tripathy <i>et al.</i> (2014)	-	✓	-	-	-	-	✓	-
Sarangi & Pradhan (2016)	-	-	✓	-	-	-	-	-
Li <i>et al.</i> (2018)	-	✓	-	-	-	-	✓	-

MCS - Método das Correntes Sobrepostas, CC - Canal de Comunicação, CD - Circuito Duplo, CCC - Compensação de Corrente Capacitiva, MO - Modo de operação e P - plano- $\alpha$

## CAPÍTULO 3

# FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 3.1 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

O SEE é composto por equipamentos interconectados divididos de acordo com as funções desempenhadas em três grupos: aparelhos de potência, equipamentos de controle e equipamentos de proteção. Compreende-se por aparelhos de potência como os usados na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica para as cargas. Já os equipamentos de controle ajudam a manter o SEE em sua tensão e frequência em uma faixa normal de operação. Por fim, os equipamentos de proteção são transformadores para instrumento, dispositivos de teleproteção, relés, disjuntores, sensores, circuitos de alimentação, circuitos de comando e sinalização (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Os esquemas de proteção têm a finalidade de proteger os componentes ou uma parte do SEE de curtos-circuitos, visando garantir a integridade dos equipamentos e a segurança das pessoas. É importante que faltas em LTs, subestações ou geradoras sejam eliminadas rapidamente, para garantir a estabilidade do SEE. O uso dos relés tem o efeito de minimizar a extensão dos defeitos e permitir a recomposição do SEE. Já os disjuntores que auxiliam os relés são responsáveis por desconectar o elemento que apresenta o defeito, isolando assim completamente a parte do SEE com defeito (MOLAS; SILVA, 2014).

Os esquemas de proteção apresentam algumas nomenclaturas referentes as suas características, as quais são utilizadas para analisar e comparar o desempenho dos diferentes esquemas. A seguir esses são listados (ANDERSON, 1999; HOROWITZ; PHADKE, 2014):

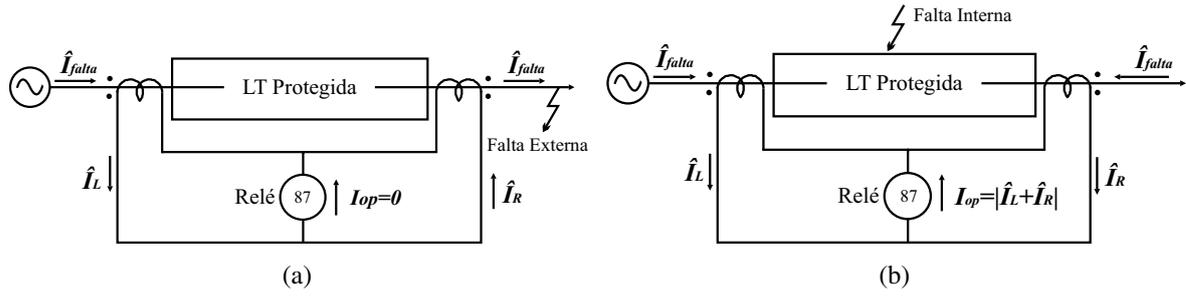
- *Sensibilidade*: O esquema de proteção deve detectar faltas para as quais foi projetado.
- *Confiabilidade*: Tem como premissa atuar corretamente quando necessário.
- *Segurança*: Assegura a não interrupção do fornecimento de energia, pois evita a atuação indevida.

- *Seletividade*: habilidade de prover máxima continuidade no serviço, com um mínimo de desconexões necessárias para isolar uma falta.
- *Coordenação*: É a determinação de ajustes apropriados entre os dispositivos específicos para a proteção de um elemento.
- *Velocidade*: Rapidez na detecção de falta, reduzindo o tempo de duração e minimizando os danos ao SEE protegido.
- *Simplicidade*: Simplificação do esquema de proteção, utilização mínima de equipamentos e circuitos para efetuar a proteção.

### 3.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LTS

A proteção diferencial (código ANSI 87) (LABORATORIES, 2018), baseia-se na aplicação da Lei de *Kirchhoff* das Correntes ao SEE protegido, a qual afirma que a soma algébrica das correntes em um nó é igual a zero (KEZUNOVIC, 2005). No esquema da proteção os transformadores de corrente (TCs) delimitam a região protegida. Esse equipamento mede as correntes no circuito primário e é capaz de reproduzir correntes proporcionais em seus enrolamentos secundários, sendo esses últimos enrolamentos conectados ao relé. A proteção diferencial é aplicada em equipamentos como barramentos, transformadores e LTs, funções 87B, 87T e 87L respectivamente. Com o intuito de garantir seletividade para o esquema de proteção, a função 87L é intrinsecamente segregada por fase, logo a detecção de faltas acontece independentemente em cada fase. O SEE apresenta um par de TCs responsáveis pela aquisição das correntes para cada fase, dessa forma, possibilita a abertura monopolar dos disjuntores em caso de curto-circuito (DORF RICHARD C.; SVOBODA, 2012). O relé diferencial opera quando há diferença vetorial entre duas grandezas elétricas do mesmo tipo, tensão ou corrente, além disso, a corrente de operação  $I_{op}$  deve exceder um limiar pré-determinado, a corrente de operação é a corrente diferencial (MOLAS; SILVA, 2014).

Na Figura 3.1, mostra-se um esboço do relé de sobrecorrente 87 para situações de faltas externa e interna. Sendo assim, ao aplicar a Lei de *Kirchhoff* das Correntes neste SEE, obtêm-se  $I_{op}$ . Quando acontece um curto circuito externo a LT protegida, os fasores de corrente entram e saem do elemento protegido apresentando o mesmo módulo e sentidos contrários, sendo assim  $I_{op}$  é idealmente nula, e a proteção diferencial não atua. Por outro lado, se o curto-circuito é interno a região protegida, os fasores de corrente  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$  apresentam idealmente o mesmo módulo e sentidos iguais, dessa forma,  $I_{op}$

**Figura 3.1.** Relé diferencial: (a) Falta externa. (b) Falta interna.

**Fonte:** (MOLAS; SILVA, 2014) adaptado.

é idealmente o dobro da corrente medida nos terminais da LT monitorada, e a corrente de restrição  $I_{res}$  é idealmente zero. Portanto, se  $I_{op}$  for maior do que um valor de *pick-up*,  $I_{pk}$ , o relé de sobrecorrente confirma a falta, como mostrado na Equação (3.1) (AES *et al.*, 2016).

A proteção diferencial percentual aumenta a sensibilidade do relé, visto que as correntes medidas podem apresentar erros de módulo e ângulo que crescem proporcionalmente com o aumento da corrente primária. Sendo assim, uma combinação entre correntes dos terminais com imprecisões resulta em valores espúrios para  $I_{op}$ , o que pode causar a atuação do relé para faltas externas, atuando de forma errada (MOLAS; SILVA, 2014).

O elemento de corrente diferencial percentual é o elemento mais importante no relé diferencial longitudinal, pois é o qual distingue falha interna e externa, e seleciona a LT com falha (WANG *et al.*, 2005e). Em um relé diferencial percentual, a corrente de operação percentual passa a variar com o uso de um enrolamento de restrição, para que haja detecção de falha a corrente de operação deve ser maior que um percentual da restrição, resultante da soma das correntes dos TCs multiplicado por um percentual constante ( $K$ ), que equivale a restrição do enrolamento (PAITHANKAR; BHIDE, 2007). Diante do exposto, para que o esquema de proteção seja sensibilizado é necessário que as inequações apresentadas em (3.1) e (3.2) sejam satisfeitas.

$$|I_{op}| > I_{pk} \quad (3.1)$$

$$|I_{op}| > K \cdot |I_{res}| \quad (3.2)$$

Na Equação (3.1),  $I_{pk}$  é uma corrente mínima (*pick-up*). Portanto, ainda que  $I_{op}$  seja maior que  $I_{res}$ , a condição  $I_{op}$  deve ultrapassar um valor de  $I_{pk}$  pré-ajustado, para que a proteção atue.  $K$  é um fator de restrição, é utilizado para aumentar a sensibilidade do relé, geralmente expresso como um valor

percentual de cerca de 10%, 20% e 40% (PAITHANKAR; BHIDE, 2007). Por exemplo, um relé com  $K=10\%$  é muito mais sensível que um relé com  $K=40\%$ , no plano- $\alpha$  o valor de  $K$  está atrelado ao tamanho da região de restrição do relé. O valor de  $I_{pk}$  é geralmente cerca de 0,25 A secundários, sendo suficiente para contornar quaisquer erros residuais de TCs (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

$$I_{op} = |\hat{I}_L + \hat{I}_R|, \quad (3.3)$$

$$I_{res} = K \cdot \left( |\hat{I}_L - \hat{I}_R| \right), \quad (3.4)$$

$$I_{res} = K \cdot \left( |\hat{I}_L| + |\hat{I}_R| \right), \quad (3.5)$$

$$I_{res} = \max \left\{ |\hat{I}_L|, |\hat{I}_R| \right\}, \quad (3.6)$$

$$I_{res} = \sqrt{|\hat{I}_L| \cdot |\hat{I}_R| \cdot \cos \theta_{LR}}. \quad (3.7)$$

sendo  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$  as correntes nas barras local e remota, respectivamente, e  $\theta_{LR}$  o ângulo entre  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$ . Por permitir, o uso de mais de dois elementos de restrição para sistemas com múltiplos terminais ou com restrição por componentes harmônicas, as equações mais usadas são (3.5) e (3.6),  $\max$  é uma função que retorna o valor máximo entre  $|\hat{I}_L|$  e  $|\hat{I}_R|$  (ALTUVE *et al.*, 2004).

A região de restrição do plano- $\alpha$  é determinada pela equação da corrente de restrição, a Tabela 3.1 mostra as regiões de restrições a depender da escolha da corrente de restrição.

**Tabela 3.1.** Características da função diferencial no plano complexo.

Condição de Operação:	Corrente de Restrição: $I_{res}$	Tipo de Característica	Centro	Raio
$I_{op} > K \cdot I_{res}$	$ \hat{I}_L - \hat{I}_R $	Circular	$-\frac{1+K^2}{1-K^2} + j0$	$\frac{2 \cdot K}{1-K^2}$
	$ \hat{I}_L  +  \hat{I}_R $	Não Circular	-	-
	$\max \left\{  \hat{I}_L ,  \hat{I}_R  \right\}$	$ \hat{I}_L  >  \hat{I}_R $ Circular	$-1 + j0$	$K$
		$ \hat{I}_L  <  \hat{I}_R $ Circular	$-\frac{1}{1-K^2} + j0$	$\frac{K}{1-K^2}$
	$\sqrt{ \hat{I}_L  \cdot  \hat{I}_R  \cos \theta_{LR}}$	Circular	$-(1 - \frac{K^2}{2}) + j0$	$\frac{K}{2} \cdot \sqrt{K^2 - 4}$

**Fonte:** (ROBERTS *et al.*, 2014), adaptada.

A proteção diferencial é unitária e intrinsecamente restrita, tal fato, torna a atuação mais rápida, pois dispensa a necessidade de um temporizador, dessa forma favorece a manutenção das margens de estabilidade dos SEEs. Adicionalmente, esse esquema de proteção tem como vantagem ser implementado com segregação de fase, o que propicia o religamento automático em LTS aéreas.

A proteção pode atuar indevidamente devido a erros no cálculo da corrente diferencial, tais erros podem ser causados por fatores do próprio SEE, como imprecisões nos valores dos parâmetros elétricos da LT. Além disso, nos TCs, o erro está relacionado a classe de exatidão e assimetria, podendo causar erros na reprodução do sinal. Por fim, podem ocorrer atuações indevidas devido atraso nos dispositivos de telecomunicação, pois tal fato pode causar desalinhamento das amostras de cada terminal em relação ao tempo (MOLAS; SILVA, 2014).

### 3.2.1 Correção da Relação de Transformação dos TCs

Para a realização da proteção diferencial se faz necessário ter as medições de correntes em ambos os terminais da LT monitorada. Logo, se os TCs tiverem relações de transformação diferentes, as correntes medidas em cada terminal não terão a mesma ordem de grandeza, devendo ser feita uma normalização da corrente nos algoritmos do relé antes dos cálculos de  $I_{op}$  e  $I_{res}$ . A correção das correntes medidas para o sistema por unidade (p.u.) é feita usando uma base comum. A base escolhida para este trabalho é a maior corrente nominal primária entre todos os TCs que delimitam a zona de proteção. Dessa forma, cada terminal deve calcular um TAP de normalização, como apresentado em (3.8) e (3.9) (ALMEIDA; SILVA, 2016).

$$TAP_n = \frac{\hat{I}_{nom}^{max}}{RTC_n}, \quad (3.8)$$

$$\hat{I}_{pri,pu} = \frac{\hat{I}_{sec,n}}{TAP_n}, \quad (3.9)$$

A qual,  $n$  corresponde o terminal ao qual o TAP está sendo calculado,  $\hat{I}_{nom}^{max}$  é a corrente primária máxima dos TCs da zona de proteção,  $RTC_n$  é a relação de transformação do TC e  $\hat{I}_{pri,pu}$  a corrente primária normalizada do terminal  $n$ , respectivamente.

## 3.3 PROTEÇÃO PARA CIRCUITO DUPLO

LTs de circuito duplo permitem o transporte de maiores quantidades de energia elétrica para as mesmas distâncias ocupando praticamente a mesma faixa de servidão de um circuito simples, os circuitos podem utilizar a mesma torre, proporcionando um menor custo de transporte por quilômetro se comparado com LTs de circuito simples. O uso deste tipo de LT tem se expandido no SEE, visto que aumenta a confiabilidade e segurança da transmissão de energia elétrica (FORCAN;

STOJANOVIC, 2016), sendo principalmente utilizadas em SEE de alta tensão devido a elevada potência transferida pela LT, e maior disponibilidade de compartilhamento da mesma faixa de servidão (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011). No entanto, a utilização de LTs de circuito duplo também apresenta pontos negativos, por exemplo, nos casos de falhas mecânicas nas torres de transmissão os dois circuitos são afetados, acontecendo o mesmo quando há falta entre os circuitos (*cross-country*).

Ao modelar o relé se prevê a atuação para os piores cenários de operação, como em casos com saturação de TC e alta resistência de falta, e ainda deve-se considerar na modelagem aspectos como resistência de falta, carregamento antes da falta e as faltas entre os circuitos da LT. Deve-se modelar um sistema completamente transposto assemelhando-se a sistemas reais.

São aspectos que dificultam a proteção: o efeito de acoplamento mútuo e as diferentes configurações na topologia do SEE. A principal diferença entre uma LT de circuito simples e uma LTs de circuito duplo é a existência de acoplamento mútuo entre as LTs. As diferentes configurações na topologia são: quando as LTs não estão conectadas ao mesmo barramento em nenhum dos terminais do circuito, quando as LTs estão conectadas ao mesmo barramento em apenas um dos terminais do circuito e quando as LTs estão conectadas ao mesmo barramento em ambos os terminais do circuito (APOSTOLOV *et al.*, 2007).

A falta entre LTs é mais provável de acontecer quando essas estão localizadas na mesma estrutura de torre, desencadeadas, por exemplo por queimadas nas proximidades das LTs, descargas atmosféricas e condutores que são quebrados por diferentes razões. Tais ocorrências, resultam em distribuições incomuns de corrente, o que repercute na impedância observada pelas unidades não envolvidas no circuito de falta, prejudicando assim o método de seleção da fase defeituosa.

O acoplamento de sequência positiva e negativa entre alimentadores paralelos para LTs simétricas são geralmente pequenos e podem ser desprezados, geralmente os valores não ultrapassam 3%. Já o acoplamento mútuo de sequência zero é considerado, pois pode apresentar até 50 a 70% da impedância da linha de sequência zero (APOSTOLOV *et al.*, 2007).

Quando ocorre uma falta envolvendo a terra no SEE, a tensão aplicada em um circuito inclui a tensão induzida proporcional à corrente de sequência zero no outro circuito. Caso a proteção necessite do valor dessa impedância, pode incorrer em erros na medição da impedância, e atuar indevidamente. Isso porque a corrente medida não reflete o efeito de acoplamento mútuo e a impedância medida do relé pode subestimar ou superestimar, dependendo da direção do fluxo de corrente no circuito não

envolvida na falta. Para superar essa situação causada pelo acoplamento mútuo de sequência zero, em especial para proteção de distância, opta-se por realizar esse estudo avaliando a proteção diferencial longitudinal e transversal (APOSTOLOV *et al.*, 2007).

### 3.3.1 Proteção Diferencial Longitudinal de LTs (Função 87L)

Com os avanços tecnológicos alcançados na transmissão de dados, possibilitou-se a aplicação da proteção diferencial de corrente, na qual se é realizada uma análise diferencial tanto de fase quanto de magnitude dos fasores de corrente em cada terminal. Idealmente, a diferença entre os fasores de corrente entre ambos os terminais deve ser igual a zero, porém na prática são obtidos valores espúrios devido a erros dos TCs e aos valores das correntes a depender do carregamento de LT (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

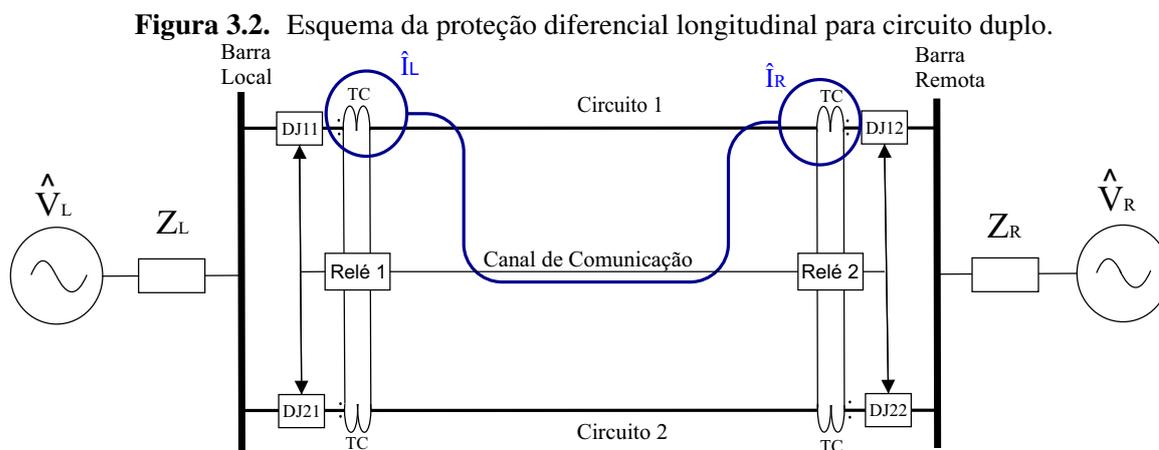
Existem dois tipos principais de esquemas de proteção diferencial longitudinal, o primeiro converte de forma individual as amostras de correntes de fase em um sinal digital e transmite esses sinais entre os terminais. O segundo combina as correntes em cada terminal na forma de um sinal composto e envia esses sinais compostos através de um canal de comunicação. Sendo assim, apenas sinais de corrente são necessários, dispensando a necessidade de transformadores de potencial (TPs), ou transformadores de potencial capacitivos (TPCs), dessa forma, torna a proteção mais sensível se comparada a de distância. O uso de TPs é dispensado quando não se realiza a compensação de corrente capacitiva. Porém, a segurança pode ser comprometida, pois como nenhum dado de tensão está envolvido, dificulta-se a visualização das condições de oscilação do SEE (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

A proteção diferencial longitudinal é considerada uma solução segura e confiável para LTs de circuito duplo. Esse tipo de proteção compara os sinais do terminal local e remoto para cada circuito da LT, e se comunica através de um canal de comunicação entre os relés dos terminais da LT. Portanto, sua confiabilidade está atrelada ao canal. Outro ponto a se considerar é o tempo de atuação da proteção. A necessidade de sincronização de amostras associada ao tempo de comunicação entre os relés contribui para o aumento no tempo de atuação. Os requisitos mais importante para a comunicação em tais aplicações são aspectos de segurança, velocidade e confiabilidade. São exemplos de canais de comunicação: fibra ótica, GPS, wi-fi (comunicação sem fio piloto) e rede de comunicações

multiplexada (HOROWITZ; PHADKE, 2014; ABDEL-LATIF *et al.*, 2008). Esse tipo de proteção é utilizada em LTs com vários circuitos, porém se houver a perda do canal de comunicação, não há conexão entre os relés, logo inviabiliza a aplicação da proteção (APOSTOLOV *et al.*, 2007).

A lógica implementada dentro do relé é capaz de monitorar todas as correntes de entrada, ou seja, engloba LTs de multiterminais, além de detectar a segunda e quinta harmônica, tal fato permite diferenciar entre a energização do transformador e uma corrente de *inrush* de magnetização, sendo assim, tal proteção pode ser aplicada em uma LT com um transformador com derivação (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Na Figura 3.2, mostra-se o esquema de proteção diferencial longitudinal. Observa-se que o relé compara os sinais de correntes medidos pelos TCs e enviados através do canal de comunicação. Dessa forma, a proteção é feita por circuito, ou seja, para cada circuito é realizada uma comparação entre os dados do terminal local e remoto, de tal forma que, se a diferença entre as correntes for maior que o valor de *pick-up*, o relé afirma a falta e emite um sinal de *trip*.

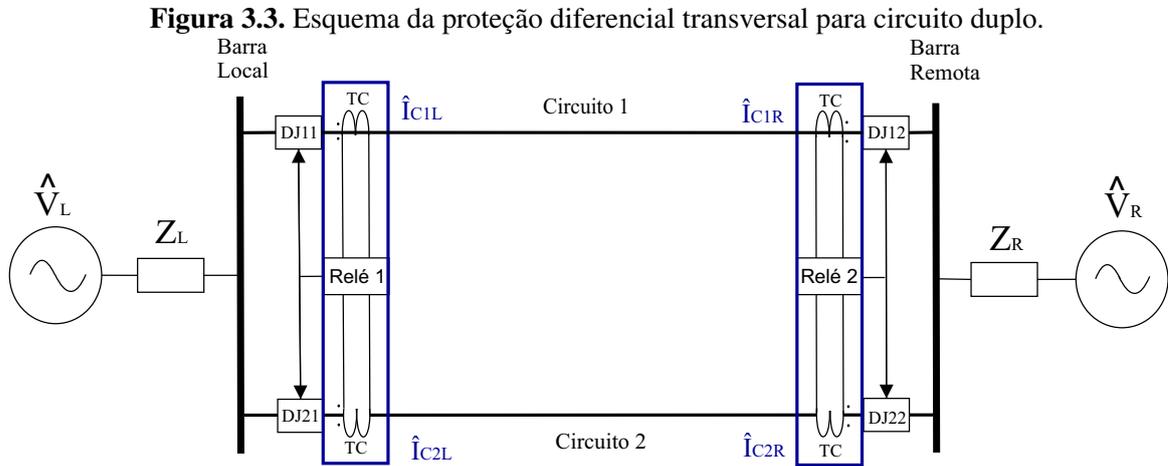


Fonte: (ABDEL-LATIF *et al.*, 2008) adaptado.

### 3.3.2 Proteção Diferencial Transversal de LTs de Circuito Duplo (Função 87LT)

A função 87LT necessita que os dois circuitos da LT estejam em operação, sendo assim, o estado dos disjuntores é monitorado, seja pelo estado dos seus contatos auxiliares ou pela corrente medida no secundário dos TCs. A função é bloqueada sempre que um dos circuitos estiver fora de operação. Porém, essa função de proteção tem como vantagem dispensar a necessidade de canal de comunicação entre os relés em terminais opostos.

Na figura 3.3, ilustra-se uma LT de circuito duplo, em que os terminais de ambas os circuitos estão conectados ao mesmo barramento e ambos os circuitos possuem os mesmos parâmetros elétricos, portanto, as correntes e tensões da LT estão relacionadas.



Fonte: (WANG *et al.*, 2005c) adaptado.

A função 87LT tem como princípio básico a comparação dos módulos das correntes medidas em um mesmo terminal que circulam por cada um dos circuitos da LT monitorada. Sendo assim, o valor resultante da subtração entre as duas correntes é um corrente de restrição  $I_{res}$ , que é um valor constante pré-definido, conforme ilustrado em (3.10) e (3.11). Dessa forma, quando não há falta ou se trata de uma falta externa, as correntes medidas nos dois circuitos possuem aproximadamente o mesmo valor, como consequência, o resultado da subtração entre elas é menor que o valor da constante  $I_{res}$ , sendo assim a proteção não atua. Por outro lado, para uma falta interna em qualquer um dos circuitos, a subtração das correntes medidas resulta em um valor maior que  $I_{res}$ , sendo assim a proteção atua (WANG *et al.*, 2005c).

$$|\hat{I}_{C1}| - |\hat{I}_{C2}| > I_{res}, \quad (3.10)$$

$$|\hat{I}_{C2}| - |\hat{I}_{C1}| > I_{res}. \quad (3.11)$$

As quais  $|\hat{I}_{C1}|$  e  $|\hat{I}_{C2}|$  são os módulos das correntes que circulam pelos circuitos 1 e 2, respectivamente. Em que, a Equação (3.10) é utilizada quando a falta está localizada no circuito 1, enquanto que a Equação (3.11) quando a falta acontece no circuito 2.

### 3.4 CORRENTE CAPACITIVA

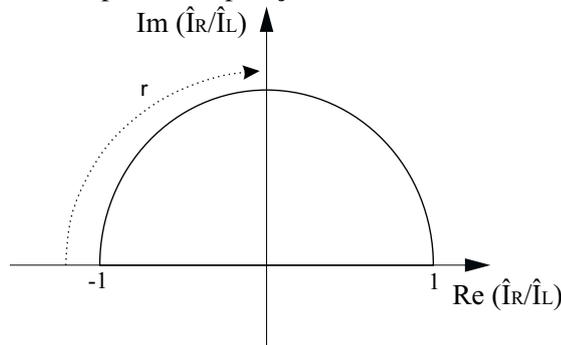
Uma LT possui capacitâncias distribuídas ao longo de sua extensão que drenam corrente capacitiva, que também é conhecida como corrente de descarga, esse fenômeno é responsável pelo efeito Ferranti, e tal fato interfere no desempenho dos esquemas proteção. A corrente capacitiva depende da tensão e comprimento da LT, geralmente sua influência é desprezada para LTs curtas. Porém, a medida que a tensão e a corrente na LT aumentam, a corrente capacitiva também aumenta e passa a afetar a sensibilidade e confiabilidade dos esquemas de proteção (KASZTENNY, 2013).

Nas Figuras 3.4 e 3.5, mostra-se o comportamento dos quocientes no plano- $\alpha$  com o aumento da corrente capacitiva para a função 87L e 87LT respectivamente. Nas Equações 3.12 e 3.13 são calculados os quocientes para o plano- $\alpha$  considerando a corrente capacitiva  $\hat{I}_{cap}$  proveniente de ambos os terminais da LT e a corrente de carga  $\hat{I}_{carga}$ . Na função 87L a  $\hat{I}_{cap}$  é considerada nula durante a operação em regime permanente ou em condições de curtos-circuitos externos, logo os valores de  $r$  permanecem no ponto (-1,0) na região de restrição, no entanto, à medida que a corrente capacitiva aumenta, e seu valor se torna maior que a corrente de carga, os valores de  $r$  tendem ao ponto (1,0), o que acarreta em uma atuação indevida (AES *et al.*, 2016). A função 87LT acontece o mesmo fenômeno, porém conforme  $\hat{I}_{cap}$  aumenta, isso força o ponto a permanecer em (1,0).

#### Proteção Diferencial Longitudinal

$$r = \frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_L} = \frac{-\hat{I}_{carga} + \hat{I}_{cap}}{\hat{I}_{carga} + \hat{I}_{cap}}, \quad (3.12)$$

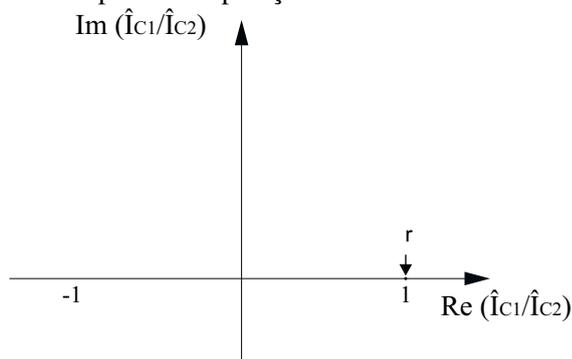
**Figura 3.4.** Trajetória do ponto de operação devido a corrente de carga, função 87L



Fonte: (AES *et al.*, 2016) adaptado.

#### Proteção Diferencial Transversal

$$r = \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} = \frac{\hat{I}_{carga} + \hat{I}_{cap}}{\hat{I}_{carga} + \hat{I}_{cap}}. \quad (3.13)$$

**Figura 3.5.** Trajetória do ponto de operação devido a corrente de carga, função 87LT

**Fonte:** autoria própria.

Uma situação crítica para um esquema proteção é a energização da LT, porque a corrente capacitiva é produzida por apenas um terminal, logo o quociente  $r$  será zero ou infinito. Por se tratar de um fenômeno transitório a corrente apresenta um valor de pico muito maior que o de regime permanente, e logo depois o valor diminui, tal fato, requer a elevação temporária do *pick-up* (MILLER *et al.*, 2010).

Sob condições balanceadas, a corrente de carga da LT afeta apenas os elementos diferenciais de fase, enquanto que sob condições desequilibradas, por exemplo, uma fase em aberto, a corrente de carga da LT também afeta os elementos diferenciais de sequência. Na literatura, existem algumas abordagens para mitigar o impacto da corrente de carregamento da LT na função 87L, são as seguintes (KASZTENNY, 2013):

- Definir o valor de *pick-up* do elemento diferencial acima da corrente de carregamento. Essa solução não requer a incorporação da compensação de corrente de carga no relé, entretanto, limita a sensibilidade do esquema de proteção, especialmente para os elementos de fase em aplicações com LTs longas e/ou com cabos subterrâneos.
- Subtrair um valor, uma posição, no sinal diferencial medido. Em uma implementação para elementos da fase 87L, o relé armazena valores de sinal diferencial de estado estacionário, quando não apresenta variação com o tempo, e calcula a média desses valores em ciclos de potência e usa esse valor como a corrente de carga da LT. Esse método não requer informação da tensão do SEE e fornece uma maior sensibilidade ao esquema de proteção. Entretanto, ao abrir o último disjuntor desenergizando a LT e subtrair uma posição do sinal diferencial da posição zero causaria sinais espúrios levando a atuação indevida do relé.

- Uma última abordagem é a que foi implementada nesse trabalho, é basicamente calcular as correntes de carga de fase usando as tensões medidas e depois subtrair das correntes de fase medidas nas LTs. Este método fornece uma compensação mais precisa e funcionou bem em condições de desequilíbrio e transitórios, para os casos analisados.

Uma forma de lidar com esse problema é calcular a corrente capacitiva do circuito e elevar o pick-up do relé acima desse valor (ROBERTS *et al.*, 2014). O método de compensação descrito a seguir foi proposto por Miller *et al.* (2010), pode ser aplicado para LT de múltiplos terminais tanto no domínio fasorial quanto no domínio do tempo. Para o domínio fasorial e considerando uma LT de dois terminais é possível determinar a corrente capacitiva  $\hat{I}_{T\phi cap}$  em cada uma das fases com base nas tensões das fases e na matriz capacitância da LT, conforme:

$$[\hat{I}_{T\phi cap}] \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} \end{bmatrix} \cdot j\omega [\hat{V}_{T\phi}], \quad (3.14)$$

$$\hat{I}_{T\phi cor} = \hat{I}_{T\phi} - \hat{I}_{T\phi cap} \quad (3.15)$$

As fases A, B ou C são representadas pelo índice  $\phi$ ; as tensões medidas no terminal considerando na fase  $\phi$  são dadas por  $\hat{V}_{T\phi}$ ;  $C_{XX}$  representam as capacitâncias próprias das fases A, B e C; e  $C_{XY}$  representam as capacitâncias mútuas entre as fases A, B e C. Dessa forma, no cálculo das correntes sobrepostas ao invés de usar as correntes originais medidas em ambos os terminais da LT,  $\hat{I}_{T\phi}$ , usa-se a corrente corrigida  $\hat{I}_{T\phi cor}$  definida na Equação 3.15 (ALMEIDA; SILVA, 2016).

### 3.4.0.1 Método das Correntes Sobrepostas

O relé diferencial transversal convencional tem sua sensibilidade afetada quando a fonte é fraca. Além disso seu desempenho é influenciado pelo nível do carregamento do SEE. Adotou-se neste trabalho o método de sobreposição das correntes, que melhora a sensibilidade do relé diferencial transversal, ainda que o SEE seja formado por fontes muito fortes ou muito fracas. O método analisa as correntes do circuito puro de falta, as correntes são obtidas através da subtração dos valores de corrente observados durante o período de falta menos valores do período pré-falta (WANG *et al.*, 2005b).

Suponha que as fontes dos terminais local e remoto sejam fontes forte e fraca, respectivamente, dessa forma, as amplitudes das correntes  $\hat{I}_{C1}$  e  $\hat{I}_{C2}$  tendem a ser semelhantes, portanto, o nível da corrente diferencial será baixa para uma falta interna, e a corrente de curto-circuito é alimentada principalmente a partir da extremidade da fonte forte. Quando o ponto de falta está próximo ao terminal remoto, as amplitudes de corrente nos circuitos na extremidade da fonte fraca são semelhantes, conseqüentemente o relé diferencial transversal convencional não opera (WANG *et al.*, 2005b).

As Equações 3.16 e 3.17 são as correntes sobrepostas nos circuitos 1 e 2, respectivamente. Substitui-se as mesmas nas Equações 3.10 e 3.11, afim de se obter as Equações 3.18 e 3.19.

$$\Delta\hat{I}_{C1} = \hat{I}_{C1,f} - \hat{I}_{C1,carga}, \quad (3.16)$$

$$\Delta\hat{I}_{C2} = \hat{I}_{C2,f} - \hat{I}_{C2,carga}. \quad (3.17)$$

$$|\Delta\hat{I}_{C1}| - |\Delta\hat{I}_{C2}| > |\Delta\hat{I}_{C1}| + |\Delta\hat{I}_{C2}|, \quad (3.18)$$

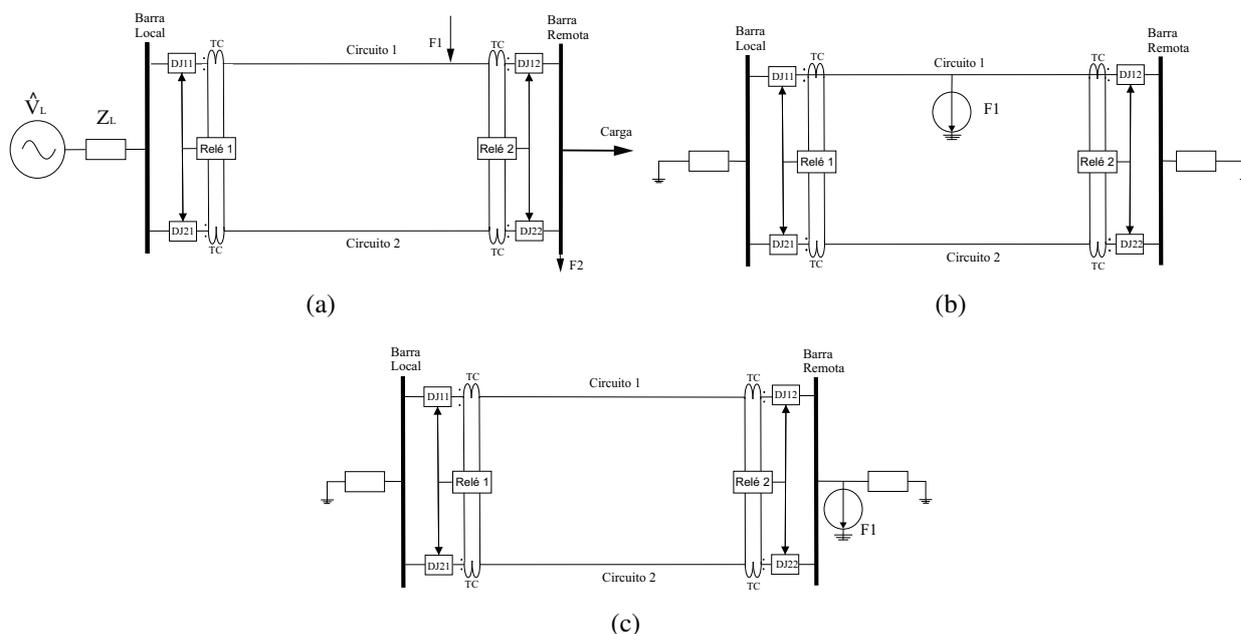
$$|\Delta\hat{I}_{C2}| - |\Delta\hat{I}_{C1}| > |\Delta\hat{I}_{C1}| + |\Delta\hat{I}_{C2}|, \quad (3.19)$$

nas quais  $\hat{I}_{n,f}$  e  $\hat{I}_{n,carga}$  são as correntes de falta e de carga que circulam pelo circuito n (n=1, circuito 1 e n=2, circuito 2), respectivamente. Entende-se como corrente de carga a corrente de pré-falta durante o regime permanente de operação do SEE.

Caso ocorra uma falha interna em uma das linhas duplas, a corrente de curto-circuito será alimentada pela extremidade da fonte forte. A Figura 3.6 (a) representa o circuito duplo com aplicação de falta próximo ao terminal remoto, nesse caso as amplitudes das correntes das linhas duplas na extremidade da fonte fraca são semelhantes, logo, o relé diferencial transversal convencional não detecta falta. Usa-se a corrente sobreposta para sanar esse problema, fazendo com que a proteção atue corretamente mesmo a falta ocorrendo perto do terminal com fonte fraca, como é mostrado na Figura 3.6 (b), a qual apresenta um circuito duplo equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta interna, nesse caso a magnitude da corrente sobreposta do circuito com defeito é maior do que a do circuito sem defeito. A Figura 3.6 (c) apresenta um circuito duplo equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta externa. Nesse caso as magnitudes das correntes sobrepostas dos circuitos duplos são semelhantes e o relé diferencial transversal não detecta a falta externa.

A proteção diferencial transversal deve estar acionada apenas quando os dos circuitos do circuito duplo estiverem em funcionamento. Na ocorrência de uma falta, o módulo das correntes no terminal aberto cai para próximo de zero, decorrente de um desligamento monopolar ou tripolar executado

**Figura 3.6.** Circuito duplo. (a) com carregamento. (b) equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta interna. (c) equivalente de correntes sobrepostas no caso de falta externa.



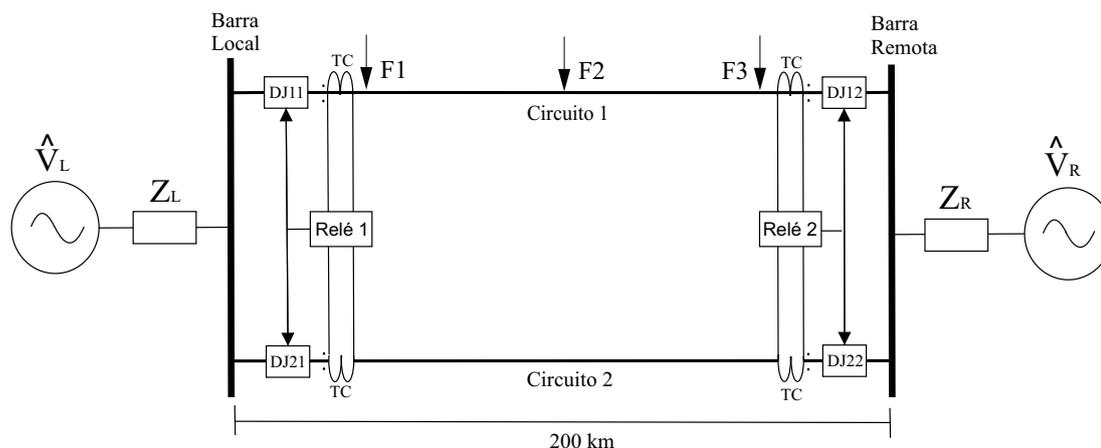
**Fonte:** (WANG *et al.*, 2005b) adaptado.

em um dos terminais do circuito afetado. No circuito sem defeito, as correntes no mesmo terminal aumentam, o que pode fazer com que o relé opere indevidamente, pois enxerga uma corrente elevada no circuito sem defeito, podendo causar uma emissão de sinal de *trip* indevido para esse circuito (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

### 3.4.0.2 Modo de Operação

A proteção diferencial transversal possui dois modos de operação, a depender da localização da falta, são chamados os modos instantâneo e sucessivo. Assim, afim de atender o requisito básico do SEE em termos de velocidade da atuação da proteção, busca-se aumentar a área de atuação instantânea, diminuindo o tempo total de isolamento do defeito, com o intuito de manter a estabilidade do SEE. Para tal, tem se buscado desenvolver técnicas de proteção que permitam a maximização da região em que a proteção opera em modo instantâneo (LI *et al.*, 2018).

Na Figura 3.7, ilustra-se uma LT de circuito duplo em que são aplicadas três faltas F1, F2 e F3 no circuito 1, a primeira F1 perto do terminal local, a segunda F2 no meio do circuito e a terceira F3 perto do terminal remoto. Partindo do pressuposto que o SEE estava funcionando normalmente antes da falta, portanto, as correntes que circulam em cada um dos circuitos possuem módulos aproximada-

**Figura 3.7.** circuito duplo com falta F1, F2 e F3.

**Fonte:** (WANG *et al.*, 2005c) adaptado.

mente iguais. Em uma situação de falta as correntes passam a ter valores diferentes e a proteção atua em modo instantâneo ou sucessivo. Assim, definem-se os modos de operação de proteção para cada um desses pontos de falta como:

**Modo de Operação Instantâneo:** As correntes medidas nos terminais da LT têm valores elevados o suficiente para que os dois relés detectem a falta simultaneamente. Fazendo com que os disjuntores de cada terminal do circuito sejam abertos de forma independente (WANG *et al.*, 2005e; WANG *et al.*, 2005c). Considerando o SEE apresentado na Figura 3.7 em regime de falta, o relé 1 opera em modo instantâneo na abertura do disjuntor DJ11 para faltas localizadas nos pontos F1 e F2. Enquanto o relé 2 opera o disjuntor DJ12 para faltas localizadas nos pontos F2 e F3 também no modo instantâneo.

**Modo de Operação Sucessivo:** A proteção diferencial transversal não depende do canal de comunicação, porém, para algumas faltas internas podem ser disparados sinais de *trip* em modo de operação sucessivas. A operação sucessiva acontece porque a distribuição da corrente de falta através dos dois circuitos não é igual nos dois terminais. Essa afirmação é válida a depender da proximidade da falta ao terminal, pois o terminal mais próximo de onde ocorreu a falta apresenta valores maiores de corrente de tal forma que apenas um dos relés consegue detectar a falta instantaneamente e abrir seu disjuntor correspondente. Após a abertura do primeiro disjuntor, a falta passa a ser alimentada apenas pelo terminal do circuito que ainda se encontra fechado. Assim, a corrente que passa por esse terminal se torna grande o suficiente para que o relé consiga detectá-la e, só então, o segundo disjuntor é aberto (WANG *et al.*, 2005e; WANG *et al.*, 2005c). Da Figura 3.7, verifica-se que o esquema de proteção do circuito 1 atua no modo de operação sucessivo para faltas localizadas nos pontos F1 e F3.

Portanto, reitera-se que a proteção diferencial transversal só funciona enquanto os dois circuitos estiverem em operação, e é necessário que o sistema seja monitorado, principalmente o estado dos disjuntores (seja pelo estado dos seus contatos auxiliares ou pela corrente medida no secundário dos TCs), a fim de bloquear essa função de proteção sempre que um dos circuitos estiver fora de operação.

Por fim, busca-se neste trabalho aumentar a região em que a proteção opera em modo instantâneo, reduzindo o tempo de atuação da proteção, visto que os pontos em que a proteção opera em modo instantâneo ou sucessivo são influenciados por condições do SEE como resistência de falta, força das fontes, e abertura angular do circuito (LI *et al.*, 2018).

### 3.5 PLANO ALFA

O plano alfa é um plano complexo, no qual os eixos das abscissas e ordenadas correspondem as partes real e imaginária da razão  $r$ , respectivamente. Para a função 87L, os quocientes representam a razão das correntes nos terminais do circuito, ou seja, obtêm-se os valores de  $r$  usando os fasores de correntes dos circuitos 1 e 2, fazendo a razão entre os valores do terminal remoto e local  $\hat{I}_R/\hat{I}_L$  para o terminal local e fazendo a razão entre os valores do terminal local e remoto  $\hat{I}_L/\hat{I}_R$  para o terminal remoto, a Equação 3.22 mostra o quociente para o terminal local. Enquanto que para a função 87LT a razão é feita com os valores das correntes sobrepostas  $\Delta\hat{I}_{C1}/\Delta\hat{I}_{C2}$  para a proteção do circuito 1 e  $\Delta\hat{I}_{C2}/\Delta\hat{I}_{C1}$  para o circuito 2, como mostra a Equação 3.24 (ALTUVE *et al.*, 2004; ROBERTS *et al.*, 2014).

As Figuras 3.8 e 3.10 ilustram o gráfico do plano- $\alpha$ , e as Equações básicas que definem o plano- $\alpha$  são apresentadas de 3.20 à 3.21, representam a localização do quociente  $r$  no plano- $\alpha$ . Nas Equações 3.20 à 3.25, (a) representa a partes real e (b) a imaginária da razão entre as correntes medidas em ambos os terminais da linha de transmissão protegida.

$$\theta = \arctan \frac{b}{a}, \quad (3.20)$$

$$a = |r| \cdot \cos \theta \quad \text{e} \quad b = |r| \cdot \sen \theta. \quad (3.21)$$

#### Proteção Diferencial Longitudinal

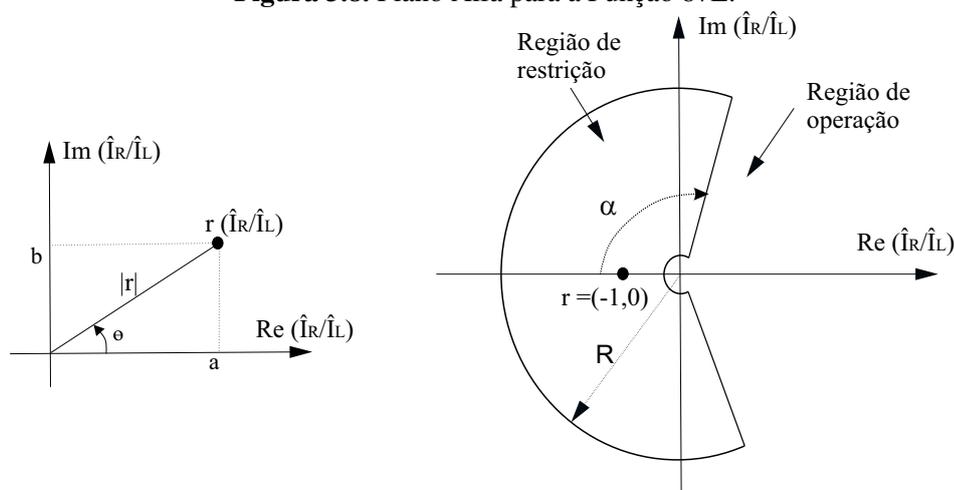
$$\frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_L} = a + jb = r = |r| \cdot e^{j\theta}, \quad (3.22)$$

$$\frac{|\hat{I}_R|}{|\hat{I}_L|} = |r| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3.23)$$

### Característica de Restrição Modificada

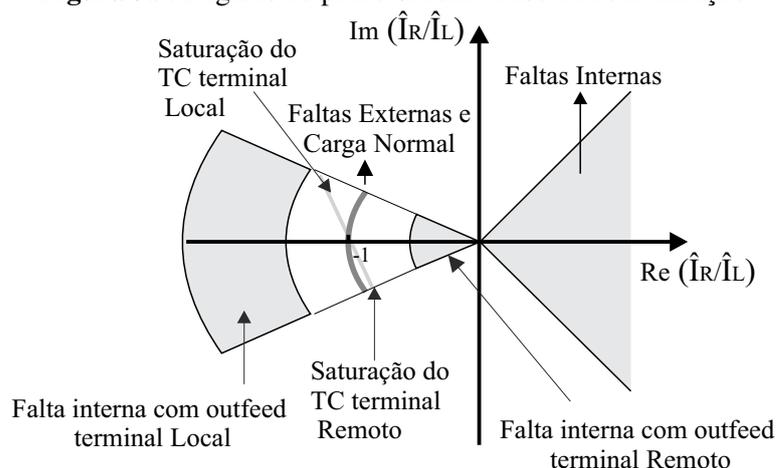
A característica de restrição usada para a proteção diferencial longitudinal de LTs no plano- $\alpha$  é ilustrada na Figura 3.8, a região de restrição é definida como a área entre os dois arcos de círculos e as duas retas, e deve incluir o ponto  $(-1,0)$  visto que os quocientes para o regime permanente antes da falta tendem a permanecer neste ponto (ROBERTS *et al.*, 2014).

**Figura 3.8.** Plano Alfa para a Função 87L.



**Fonte:** (ROBERTS *et al.*, 2014) adaptado.

**Figura 3.9.** Regiões do plano- $\alpha$  com atraso de comunicação.



**Fonte:** (ROBERTS *et al.*, 2014) adaptado.

Da Figura 3.9, observa-se que a área da característica de restrição se ajusta à zona de faltas, sendo elas externas, internas, com saturação de TCS, com *outfeed* e com carga normal. Os parâmetros a serem variados são raio ( $R$ ) e ângulo ( $\alpha$ ), o ajuste de  $R$  fornece espaço para acomodar situações

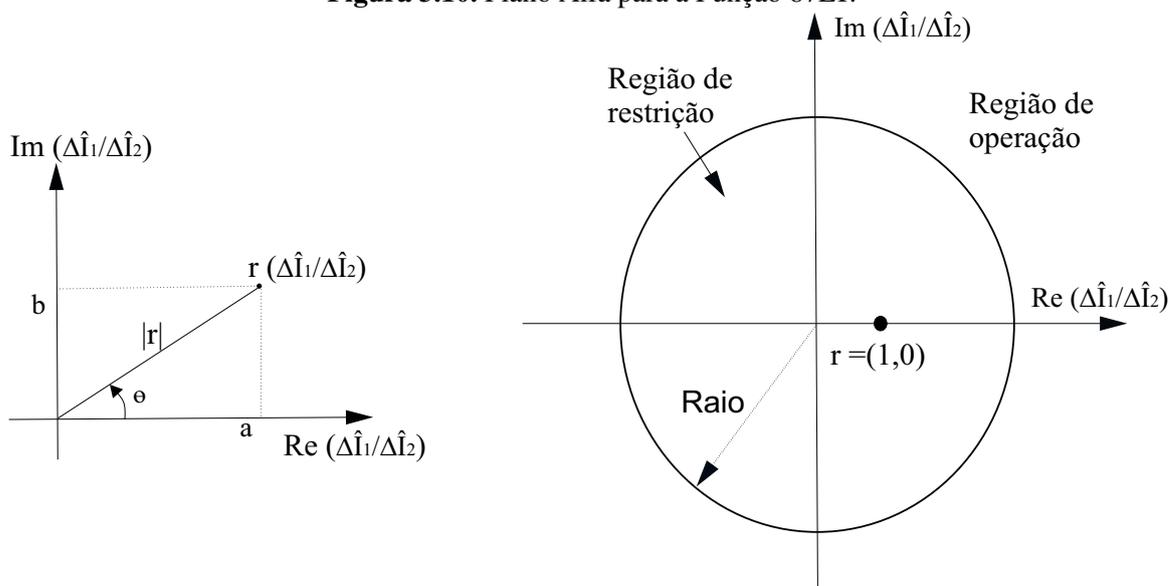
como saturação de TCs e oscilações de baixa frequência, recomenda-se valores de raio entre 8 e 10, enquanto o ângulo fornece a abertura necessária para alocar os piores casos de erros de comunicação fazendo com que a proteção seja imune ao desalinhamento de amostras, propõe-se que o ângulo  $\alpha$  esteja entre  $180^\circ$  a  $210^\circ$ , afim de comportar altos níveis de saturação (BENMOUYAL; LEE, 2004).

### Proteção Diferencial Transversal

$$\frac{\Delta \hat{I}_{C1}}{\Delta \hat{I}_{C2}} = a + jb = r = |r| \cdot e^{j\theta}, \quad (3.24)$$

$$\frac{|\Delta \hat{I}_{C1}|}{|\Delta \hat{I}_{C2}|} = |r| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3.25)$$

**Figura 3.10.** Plano Alfa para a Função 87LT.



**Fonte:** (ROBERTS *et al.*, 2014) adaptado.

Na proteção diferencial transversal a razão  $r$  é calculada usando os valores das correntes sobrepostas dos circuitos 1 e 2 no mesmo terminal, assim sendo o sentido das correntes são os mesmos, quando é feita a divisão os resultados para o regime permanente antes da falta se situam no ponto  $(1,0)$  no plano- $\alpha$ , e para faltas internas os quocientes devem estar fora da região de restrição delimitada pela circunferência.

## CAPÍTULO 4

### MAPEAMENTO DO PLANO ALFA

Neste capítulo, mostram-se dois modelos de mapeamento para o plano- $\alpha$ . É proposta uma característica de operação da proteção diferencial percentual transversal, em que a região de restrição foi modelada baseada na análise de correntes de operação e de restrição.

#### 4.1 MODELO 1

No modelo 1 será usada a Equação (4.1) para a corrente de operação e a Equação (4.2) para a corrente de restrição, que serão substituídas na Equação (4.3). Da Equação (4.3), conclui-se que a atuação do relé se dá quando  $I_{op}$  é maior que uma porcentagem  $K$  de  $I_{res}$ .

Corrente de Operação:

$$I_{op} = |\hat{I}_{C1}| - |\hat{I}_{C2}|, \quad (4.1)$$

Corrente de Restrição:

$$I_{res} = |\hat{I}_{C1}| + |\hat{I}_{C2}|, \quad (4.2)$$

$$I_{op} = K \cdot (I_{res}), \quad (4.3)$$

$$|\hat{I}_{C1}| - |\hat{I}_{C2}| = K \cdot (|\hat{I}_{C1}| + |\hat{I}_{C2}|), \quad (4.4)$$

colocando o fator comum  $|\hat{I}_{C2}|$  em evidência, e depois cancelando  $|\hat{I}_{C2}|$  em ambos os lados da Equação (4.4),

$$\left( \frac{|\hat{I}_{C1}|}{|\hat{I}_{C2}|} - 1 \right) \cdot |\hat{I}_{C2}| = K \cdot \left( \frac{|\hat{I}_{C1}|}{|\hat{I}_{C2}|} + 1 \right) \cdot |\hat{I}_{C2}|, \quad (4.5)$$

$$\frac{|\hat{I}_{C1}|}{|\hat{I}_{C2}|} - 1 = K \cdot \left( \frac{|\hat{I}_{C1}|}{|\hat{I}_{C2}|} + 1 \right), \quad (4.6)$$

sendo, a divisão das correntes em módulo é igual ao módulo da divisão das correntes, tem-se:

$$\left| \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} \right| - 1 = K \cdot \left( \left| \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} \right| + 1 \right), \quad (4.7)$$

para simplificar os cálculos, substitui-se  $\frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}}$  por  $r$ ,

$$r = m + j \cdot n = \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}}, \quad (4.8)$$

Substituindo a Equação (4.8) na Equação (4.7), tem-se:

$$|m + j \cdot n| - 1 = K \cdot (|m + j \cdot n| + 1), \quad (4.9)$$

Da definição de módulo, tem-se:

$$(\sqrt{m^2 + n^2} - 1) = K \cdot (\sqrt{m^2 + n^2} + 1), \quad (4.10)$$

elevando ambos os lados da Equação (4.10) ao quadrado, obtém-se:

$$\left[ (\sqrt{m^2 + n^2} - 1) \right]^2 = \left[ K \cdot (\sqrt{m^2 + n^2} + 1) \right]^2, \quad (4.11)$$

definindo:

$$a = \sqrt{m^2 + n^2}, \quad (4.12)$$

substituindo a Equação (4.12) na Equação (4.11), tem-se:

$$(a - 1)^2 = K^2 \cdot (a + 1)^2, \quad (4.13)$$

$$a^2 - 2a + 1 = K^2 \cdot (a^2 + 2a + 1), \quad (4.14)$$

multiplicando a Equação (4.14) por  $(1 - K^2)$  e agrupando-se os termos, tem-se:

$$(1 - K^2) \cdot (a^2 - 2a + 1) = (1 - K^2) \cdot [(K^2 \cdot (a^2 + 2a + 1))], \quad (4.15)$$

$$(1 - K^2) \cdot a^2 - 2a \cdot (1 + K^2) + (1 - K^2) = 0, \quad (4.16)$$

dividindo a Equação (4.16) por  $(1 - K^2)$

$$a^2 - 2a \cdot \frac{1 + K^2}{1 - K^2} + 1 = 0, \quad (4.17)$$

Desenvolvendo a Equação (4.17), chega-se ao quadrado da diferença de dois termos, onde o primeiro termo é  $a$  e o segundo é  $\frac{1+K^2}{1-K^2}$ .

$$\left( a - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 = a^2 - 2a \cdot \frac{1 + K^2}{1 - K^2} + \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.18)$$

usa-se na Equação (4.18) o método de completar quadrado, adicionando a Equação (4.19):

$$+ \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.19)$$

tem-se:

$$a^2 - 2a \cdot \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right) + \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 + 1 = 0, \quad (4.20)$$

$$\left[ a - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right]^2 = \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - 1, \quad (4.21)$$

fazendo algumas manipulações matemáticas,

$$= \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - 1 = \frac{1 + 2K^2 + K^4}{1 - 2K^2 + K^4} - 1 =, \quad (4.22)$$

$$= \frac{1 + 2K^2 + K^4 - 1 + 2K^2 - K^4}{1 - 2K^2 + K^4} = \frac{4K^2}{1 - 2K^2 + K^4}, \quad (4.23)$$

$$= \frac{(2K)^2}{(1 - K^2)^2} = \left( \frac{2K}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.24)$$

substituindo a Equação (4.24) na Equação (4.21), tem-se:

$$\left[ a - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right]^2 = \left( \frac{2K}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.25)$$

substituindo  $a$  da Equação (4.12), obtêm-se:

$$\left[ \left( \sqrt{m^2 + n^2} \right)^2 - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right) \right]^2 = \left( \frac{2K}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.26)$$

$$\left[ (m^2 + n^2) - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right) \right]^2 = \left( \frac{2K}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.27)$$

fazendo algumas manipulações matemáticas, encontra-se o centro e o raio da circunferência, portanto:

$$(m^2 + n^2) - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} = \frac{2K}{1 - K^2}, \quad (4.28)$$

$$(m^2 + n^2) = \frac{K^2 + 2K + 1}{1 - K^2}, \quad (4.29)$$

$$(m^2 + n^2) = \frac{(1 + K)^2}{1 - K^2}, \quad (4.30)$$

$$(m^2 + n^2) = \left( \frac{1 + K}{\sqrt{1 - K^2}} \right)^2, \quad (4.31)$$

sendo a equação da circunferência na forma reduzida

$$(x - xC)^2 + (y - yC)^2 = r^2, \quad (4.32)$$

onde  $x^C$  e  $y^C$  são as coordenadas do centro da circunferência,  $r$  o raio,  $x$  e  $y$  são as coordenadas de um ponto  $P$  posicional da circunferência, nesse trabalho não usou-se o  $P$ . A equação da circunferência na forma reduzida foi usada para a identificação do centro e do raio da circunferência.

Portanto, da Equação (4.32), tem-se  $(x - x^C)^2 = m^2$  e  $(y - y^C)^2 = n^2$ , define-se:

$$\text{raio} = \frac{1 + K}{\sqrt{1 - K^2}}, \quad (4.33)$$

$$\text{centro} = (0, 0). \quad (4.34)$$

## 4.2 MODELO 2

Neste modelo será usado a Equação (4.35) para a corrente de operação e a Equação (4.36) para a corrente de restrição, que serão substituídas na Equação (4.3).

Corrente de Operação:

$$I_{op} = |\hat{I}_{C1} - \hat{I}_{C2}|, \quad (4.35)$$

Corrente de Restrição:

$$I_{res} = |\hat{I}_{C1} + \hat{I}_{C2}|, \quad (4.36)$$

$$|\hat{I}_{C1} - \hat{I}_{C2}| = K \cdot (|\hat{I}_{C1} + \hat{I}_{C2}|), \quad (4.37)$$

colocando  $\hat{I}_{C2}$  em evidência, depois cancelando  $\hat{I}_{C2}$  em ambos os lados da Equação(4.37), tem-se:

$$\left| \hat{I}_{C2} \cdot \left( \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} \right) - 1 \right| = K \cdot \left| \hat{I}_{C2} \cdot \left[ \left( \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} \right) + 1 \right] \right|, \quad (4.38)$$

$$\left| \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} - 1 \right| = K \cdot \left| \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}} + 1 \right|, \quad (4.39)$$

definindo:

$$r = m + j \cdot n = \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{C2}}, \quad (4.40)$$

$$|r - 1| = K \cdot |r + 1|, \quad (4.41)$$

$$|(m + jn) - 1| = K \cdot |(m + jn) + 1|, \quad (4.42)$$

separando a parte real da imaginária e usando a definição de módulo, tem-se:

$$\sqrt{(m - 1)^2 + n^2} = K \cdot \sqrt{(m + 1)^2 + n^2}, \quad (4.43)$$

$$(m - 1)^2 + n^2 = K^2 \cdot [(m + 1)^2 + n^2], \quad (4.44)$$

$$m^2 - 2m + 1 + n^2 = K^2 \cdot (m^2 + 2m + 1 + n^2), \quad (4.45)$$

organizando e igualando a zero a Equação (4.45), obtém-se:

$$m^2 \cdot (1 - K^2) + (-2m) \cdot (1 + K^2) + (1 - K^2) + (1 - K^2) \cdot n^2 = 0, \quad (4.46)$$

dividindo a Equação (4.46) por  $(1 - K^2)$

$$m^2 + (-2m) \cdot \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right) + 1 + n^2 = 0, \quad (4.47)$$

usa-se o método de completar quadrado, adicionando a Equação (4.48):

$$+ \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.48)$$

adiciona-se a Equação (4.48) na Equação (4.47)

$$m^2 + \left[ (-2m) \cdot \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right] + \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 + 1 + n^2 = 0, \quad (4.49)$$

$$\left( m - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 = m^2 + \left[ (-2m) \cdot \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right] + \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.50)$$

$$\left( m - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 + n^2 = \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - 1, \quad (4.51)$$

manipulando matematicamente a Equação (4.51), tem-se:

$$\left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 - 1 = \frac{(1 + K^2)^2 - (1 - K^2)^2}{(1 - K^2)^2}, \quad (4.52)$$

$$\frac{(1 + 2K^2 + K^4) - (1 - 2K^2 + K^4)}{(1 - K^2)^2} = \frac{4K^2}{(1 - K^2)^2}, \quad (4.53)$$

$$\frac{4K^2}{(1 - K^2)^2} = \left( \frac{2K}{1 - K^2} \right)^2, \quad (4.54)$$

substituindo a Equação (4.54) na Equação (4.51), tem-se:

$$\left( m - \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right)^2 + n^2 = \left[ \frac{2K}{1 - K^2} \right]^2, \quad (4.55)$$

analisando a Equação (4.32) e a Equação (4.55), defini-se o centro e raio da circunferência do plano- $\alpha$ , sendo que  $(x - xC)^2 = m^2$  e  $(y - yC)^2 = n^2$

$$\text{raio} = \frac{2K}{1 - K^2}, \quad (4.56)$$

$$\text{centro} = \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2}, 0 \right). \quad (4.57)$$

O plano- $\alpha$  é a ferramenta para a visualização de fenômenos ocorridos durante a atuação do relé diferencial percentual. Uma circunferência representa o limiar de operação da função diferencial de corrente, sendo a área interna correspondente a região de restrição, enquanto a área externa representa a região de operação. De tal forma que, conforme o valor de  $K$  cresce a característica de restrição aumenta, ou seja, a área da circunferência aumenta, o que causa uma diminuição de sensibilidade. As correntes  $I_{op}$  e  $I_{res}$  são calculadas ao longo do tempo, caso o resultado da análise esteja localizado na zona de atuação, a falta é afirmada.

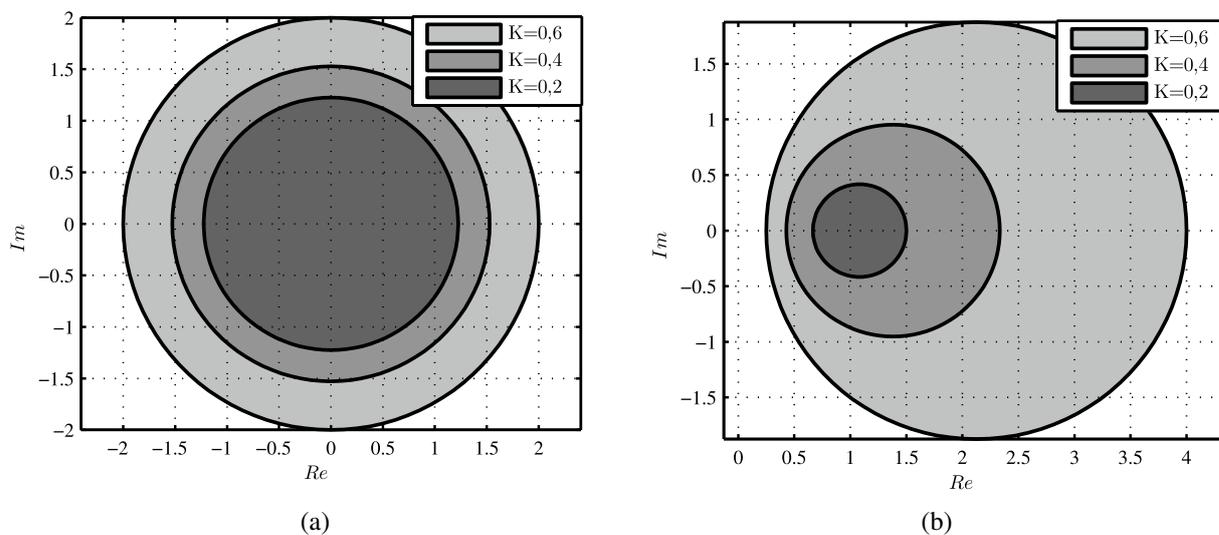
### 4.3 PLANO - $\alpha$

As Seções 4.1 e 4.2 apresentam o mapeamento da região de restrição no plano- $\alpha$ , através de manipulações matemáticas encontrou-se duas circunferências que delimitam a região de restrição, possuem raios e centros diferentes, conforme mostrado nos modelos 1 e 2.

Na Figura 4.1, realiza-se uma comparação do efeito da variação do fator de restrição  $K$  na sensibilidade da proteção. Observa-se que, a redução de  $K$  aumenta a sensibilidade, de fato, ao reduzir a zona de restrição do plano- $\alpha$ , o esquema de proteção se torna mais suscetível à atuação. Ainda na Figura 4.1, ilustra-se a região de restrição para variação de  $K$ , sendo  $K = 0, 2$ ,  $K = 0, 4$  e  $K = 0, 6$ . Nota-se que, realmente com a variação de  $K$  o comportamento do relé diferencial percentual é alterado, seguindo o comportamento citado anteriormente.

Na Figura 4.1(a), mostra-se a zona de restrição do plano- $\alpha$  com a modelagem exposta no modelo 1. Nota-se que as três circunferências tem centro em (0,0) e o raio cresce proporcionalmente a variação de  $K$ . Por outro lado, da Figura 4.1(b), em que se representa zona de restrição do plano- $\alpha$  com a modelagem exposta no modelo 2, observa-se que as circunferências apresentam centro variando no eixo das abcissas de acordo com os valores de  $K$ .

No modelo 2, a área da circunferência não cresce proporcionalmente conforme é variado os valores de  $K$ , o centro se distancia do ponto (1,0), logo, a região de restrição tende a se afastar do ponto (1,0). O aumento elevado da área faz com que a proteção perca sensibilidade, tal característica dificulta a utilização desse modelo, pois o torna susceptível à atuação quando não há falta.

**Figura 4.1.** Mapeamento do plano- $\alpha$ : Região de restrição em função do  $K$  para o (a) modelo 1. (b) modelo 2.

Fonte: autoria própria.

Neste trabalho, o modelo 1 é usado na apresentação dos resultados para a função 87LT, visto que os pontos de estabilidade do SEE na proteção diferencial percentual transversal se localizam no ponto (1,0), e ainda, porque mesmo com a variação de  $K$ , a circunferência permanece com o mesmo centro. Dessa forma, apresenta melhor sensibilidade quando comparada ao modelo 2.

## CAPÍTULO 5

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, analisam-se os resultados obtidos através de simulações para a proteção diferencial longitudinal e transversal para LTs de circuito duplo via plano- $\alpha$ . O sistema teste utilizado é ilustrado na Figura 5.1, a modelagem e os testes foram feitos no *software ATPDraw*. Os resultados foram divididos em duas categorias: na primeira fez-se simulações de casos pontuais, onde é feita uma Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC) mostrada na Seção (5.2), enquanto na segunda fez-se simulações em regime permanente de curto-circuito, onde é feita uma Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP) mostrada na Seção (5.3).

Os resultados serão apresentados na forma de figuras, sendo que para cada caso são analisadas as função 87L e 87LT. Para a função 87L, os resultados são mostrados no plano- $\alpha$  com uso de uma característica de restrição modificada proposta por Roberts *et al.* (2014), apresentada na Seção 3.5, enquanto que para a função 87LT os resultados são apresentados no plano- $\alpha$  usando a região de restrição delimitada no modelo 1 do Capítulo 4, usou-se o centro e o raio do modelo 1 para delimitar a área da circunferência, que é a área de restrição da atuação do relé, em que para as amostras que se situarem dentro dessa região não haverá atuação do relé.

Nas análises dos curto-circuito realizadas, considerou-se a influência da força das fontes dos equivalentes de Thévenin local e remoto  $FF_L$  e  $FF_R$ , respectivamente, além da localização de falta  $d$  (% do circuito), expressa em relação ao comprimento total da linha  $\ell$ , tipo de falta, da resistência de falta  $R_f$  e carregamento do sistema  $\delta$ . No total, foram simulados 4 casos a fim de atestar o uso das funções para situações com diferentes pontos de operação do SEE. Nas simulações, foram realizadas a compensação da corrente capacitiva conforme explicado na Seção 3.4 para as funções 87L e 87LT, e apenas na função 87LT foram usadas correntes sobrepostas de fase, apresentada na Seção 3.4.0.1.

Na função 87L faz-se uma análise das correntes por circuito, comparando os fasores de corrente do terminal local e remoto para cada circuito analisado, ou seja, ao avaliar o terminal local do circuito 1, o valor de  $r$  é a razão os fasores de corrente  $\hat{I}_R/\hat{I}_L$ , já para o terminal remoto o valor de  $r$  é a razão

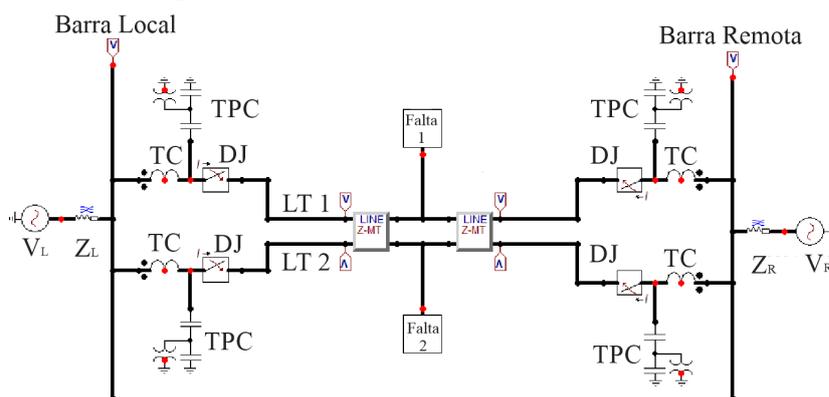
os fasores de corrente  $\hat{I}_L$   $\hat{I}_R$ , o mesmo acontece para o circuito 2.

Na função 87LT faz-se uma análise das correntes por terminal, comparando os fasores de corrente do circuito 1 e 2, ou seja, ao avaliar o terminal local do circuito 1, a razão  $r$  é feita com os fasores das correntes sobrepostas  $\Delta\hat{I}_{C1}/\Delta\hat{I}_{C2}$  e ao avaliar o terminal local do circuito 2  $\Delta\hat{I}_{C2}/\Delta\hat{I}_{C1}$ .

## 5.1 SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES

Na Figura 5.1, ilustra-se o sistema teste 230 kV/60 Hz em operação Utinga-Miramar, o qual basicamente consiste de uma LT de circuito duplo modelada com 200 km de extensão. As LTs do circuito duplo compartilham a mesma torre, logo os parâmetros elétricos de ambos os circuitos da LT monitorada iguais, e além disso, os circuitos equivalentes de *Thévenin* remoto e local possuem os mesmos valores de impedância e tensão,  $Z_L = Z_R$  e  $\hat{V}_L = \hat{V}_R$ , o TC usado foi o modelo C800 e o TPC. Vale ressaltar que, o sistema teste foi modelado como perfeitamente transposto a parâmetros distribuídos (DOMMEL, 1992). Os transformadores para instrumento empregados são os mesmos em ambos os terminais, os TCs são do tipo C800 2000-5 A, com modelagem e parâmetros descritos por (COMMITTEE, 2004). Os modelos dos TPCs empregados são apresentados por (Pajuelo *et al.*, 2008).

**Figura 5.1.** Sistema teste modelado no ATPDraw.

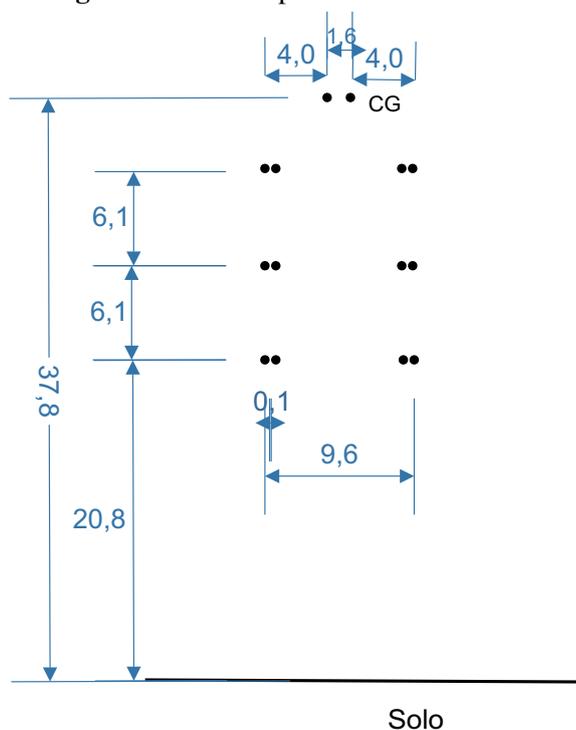


**Fonte:** autoria própria.

Os dados das LTs inseridos no *ATPDraw* foram obtidos através da geometria da torre, a qual é apresentada na Figura 5.2, os dados nela mostrados estão em metros e o termo CG representam os cabos guardas. A torre é do tipo básica e as fases estão dispostas verticalmente, cada fase é composta por um feixe de dois condutores do tipo *Grosbeak* 636 kcmil/fase, são cabos de Alumínio Nu com

Alma de Aço (CAA), além de dois cabos guarda do tipo EHS 3/8", extra-alta resistência (*Extra High Strength*) com 3/8 polegadas de diâmetro.

**Figura 5.2.** Torre típica da LT monitorada.



**Fonte:** autoria própria.

Para modelar o sistema teste, utilizou-se a rotina *Line Constants* do *software ATPDraw*. No qual, insere-se os dados da geometria da torre e as características dos cabos condutores e dos cabos guardas, afim de obter as matrizes de impedância em  $\Omega/km$  e capacitância em  $S/km$ , além dos dados das componentes de sequência zero e positiva da LT. Os resultados representam uma LT de circuito duplo perfeitamente transposta a parâmetros distribuídos, em que é representado o acoplamento de sequência zero entre os circuitos. Usou-se um modelo do ATPDraw para uma linha de circuito duplo perfeitamente transposta com acoplamento de sequência zero, cujo o resultado é o mesmo que fazer uma transposição de 9 estágios, a transposição de 9 estágios promove um melhor desacoplamento, logo ao calcular as correntes capacitivas desconsiderou-se as capacitâncias dentro do circuito. Na Tabela 5.1, apresentam-se os parâmetros elétricos obtidos como resultados das simulações computacionais (LEUVEN, 1987).

**Tabela 5.1.** Componentes de sequência da LT monitorada.

Resistência do solo ( $\Omega \cdot km$ )	Sequência	Resistência ( $\Omega/km$ )	Reatância ( $\Omega/km$ )	Suceptância ( $\mu S/km$ )
500	zero	$4,2659 \times 10^{-1}$	1,84748	2,43493
	positiva	$5,87446 \times 10^{-2}$	$7,50854 \times 10^{-1}$	3,99006

**Fonte:** Rotina *Line Constants* do software *ATPDraw*.

Sendo a matriz de impedâncias da LT de circuito duplo com transposição,  $Z_{abc}$  por unidade de comprimento dada por (5.1):

$$Z_{abc} = \begin{vmatrix} Z_S & Z_P & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_S & Z_P & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_P & Z_P & Z_S & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_S & Z_P & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_S & Z_P \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_P & Z_P & Z_S \end{vmatrix} \quad (5.1)$$

Considera-se o acoplamento de sequência zero entre os circuitos da LT, sendo esse acoplamento entre fases representado por três parâmetros distintos,  $Z_m$ ,  $Z_S$  e  $Z_P$ , em que  $Z_m$  é a impedância mútua entre duas fases de diferentes circuitos trifásicos,  $Z_S$  a impedância própria da linha e  $Z_P$  a impedância mútua entre duas fases de um mesmo circuito trifásico, todas dadas por unidade de comprimento. Com base nesses dados foi possível obter os parâmetros para a LT monitorada,  $Z_G$ ,  $Z_L$  e  $Z_{IL}$ , em que  $Z_L$  é o parâmetro da LT de circuito duplo,  $Z_G$  o parâmetro terra da LT e  $Z_{IL}$  o parâmetro da LT associado ao acoplamento de sequência zero entre circuitos (LEUVEN, 1987).

Os parâmetros da LT podem ser representados por relações entre as impedâncias  $Z_m$ ,  $Z_S$  e  $Z_P$ :

$$Z_G = Z_S + 2Z_m + 3Z_P, \quad (5.2)$$

$$Z_L = Z_S - Z_m, \quad (5.3)$$

$$Z_{IL} = Z_S + 2Z_m + 3Z_P, \quad (5.4)$$

Sabendo que, a matriz de impedâncias em componentes simétricas por unidade de comprimento da LT  $Z_{012}$  é dada por:

$$Z_{012} = \begin{vmatrix} Z_{0,C1} & 0 & 0 & Z_{m0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1,C1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2,C1} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{m0} & 0 & 0 & Z_{0,C2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{1,C2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{2,C2} \end{vmatrix}, \quad (5.5)$$

em que  $Z_{0,C1}$ ,  $Z_{1,C1}$ ,  $Z_{2,C1}$  são as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa para o circuito 1 e  $Z_{m0}$  é a impedância de acoplamento mútuo de sequência zero dos circuitos. Para LTs transpostas, as impedâncias de sequência positiva e negativa são iguais.

A impedância de acoplamento mútuo de sequência zero não interfere na proteção diferencial. Interfere na proteção de distância, pois em caso de faltas fase-terra o acoplamento mútuo de sequência zero irá interferir no cálculo da impedância calculada pelo relé, em função da circulação de corrente de sequência zero no circuito em que não houve falta (MASCHER, 2010).

Na Tabela 5.2, ilustram-se os parâmetros elétricos da LT de circuito duplo monitorada.

**Tabela 5.2.** Parâmetros elétricos da LT de circuito duplo monitorada

<b>Resistência (<math>\Omega/km</math>)</b>	$R_L$	$R_G$	$R_{IL}$
	0,057	0,83	0,056
<b>Reatância (<math>\Omega/km</math>)</b>	$X_L$	$X_G$	$X_{IL}$
	0,36	2,57	0,45
<b>Admitância (<math>\mu mho/km</math>)</b>	$Y_L$	$Y_G$	$Y_{IL}$
	4,68	2,05	3,72

**Fonte:** Rotina *Line Constants* no software ATPDraw.

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

Esse tipo de análise permite a visualização do trajeto dos quocientes no Plano- $\alpha$  desde o instante em que a falta é aplicada até o regime permanente de falta, a partir da detecção da falta pelo algoritmo. Considerou-se 16 amostras por ciclo para a simulação, escolheu-se um número de amostras referente a meio ciclo de amostras para a detecção do curto-circuito, logo, a falta é detectada através do Plano- $\alpha$  quando 8 amostras saem da região de restrição e se situam na região de operação. Assim sendo o tempo mínimo de atuação para o relé será de 8,3 ms, cada amostra corresponde a 0.001 s no tempo de atuação. Na Tabela 5.3 são apresentados os casos analisados. Nos gráficos da função 87LT os termos C1 e C2 referem-se as correntes sobrepostas do circuito 1 e do circuito 2.

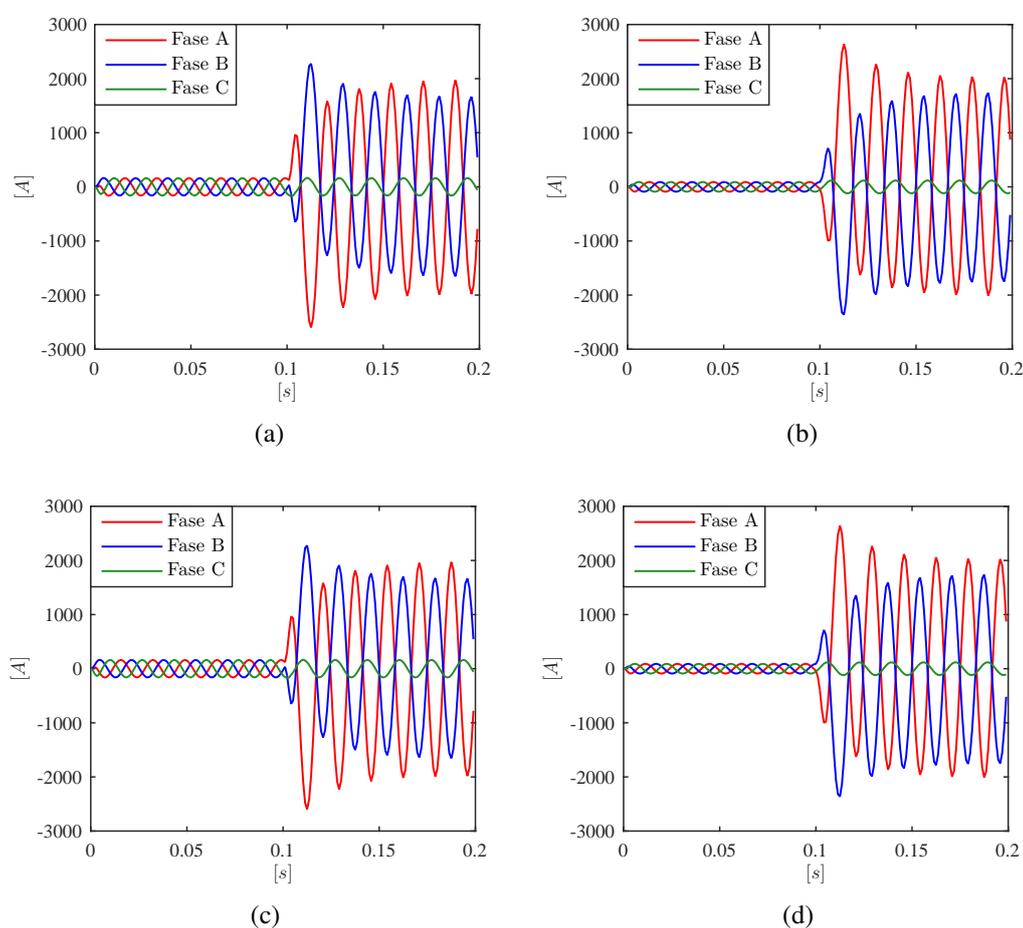
**Tabela 5.3.** Resumo dos casos de ATC avaliados.

<b>Caso</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>Terminal com falta</b>	<b><math>d</math> (%)</b>	<b><math>R_f</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>\delta</math></b>
ATC-1	AB-T	Falta externa	-	50	$-5^\circ$
ATC-2	ABC	Falta com saturação de TC	80	-	$-40^\circ$
ATC-3	AT-AT	Falta entre os circuitos 1 e 2	50	10	$-5^\circ$
ATC-4	B-A	Falta entre os circuitos 1 e 2	50	50	$5^\circ$

### 5.2.1 Caso ATC-1: Curto-Circuito AB-T na Barra Remota

Aplicou-se um curto-circuito bifásico-terra na barra remota com  $R_f = 50 \Omega$ ,  $\delta = -5^\circ$ ,  $FF_L = 0,1$  e  $FF_R = 1,0$ , ou seja, uma falta externa aos circuitos. Na Figura 5.3, ilustra-se o comportamento das correntes nos terminais local e remoto nos circuitos 1 e 2. Percebe-se uma sobrecorrente a partir de 0,1 segundos, em regime permanente de falta passa a ter amplitude de cerca de 2000 A em ambos os circuitos pois a falta não é aplicada em um dos circuitos e sim na barra onde estão ligados os circuitos 1 e 2.

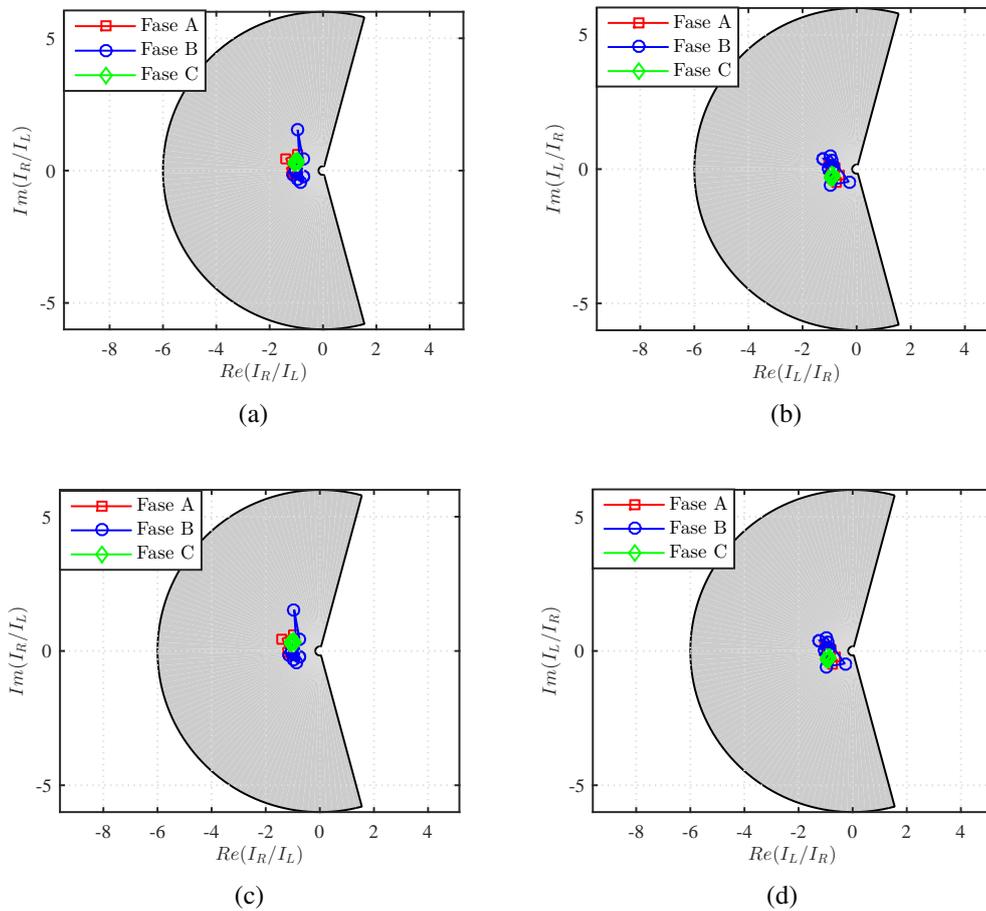
**Figura 5.3.** Correntes no Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto. Correntes no Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto.



**Fonte:** autoria própria.

A Figura 5.4 mostra os resultados para a função 87L, observa-se que as unidades de fase permanecem próximas ao ponto  $(-1,0)$  no plano- $\alpha$ , há uma pequena variação, porém, não o suficiente para operação indevida do esquema de proteção. Enquanto a Figura 5.5 mostra os resultados da função 87LT, ilustram-se as unidades de fase, nota-se que essas permanecem no ponto  $(1,0)$ , e não há signi-

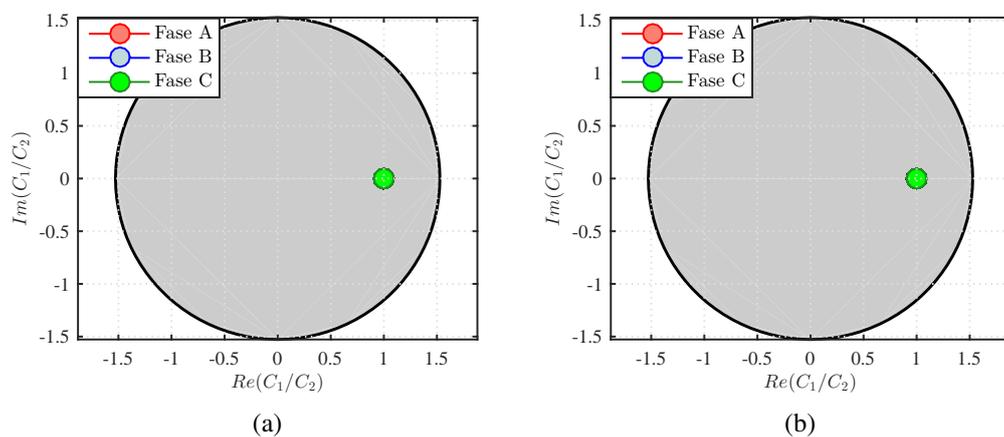
**Figura 5.4.** Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito externo aplicado na barra do terminal remoto. Circuito 1:Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2:Terminal Local (c) e Remoto (d).

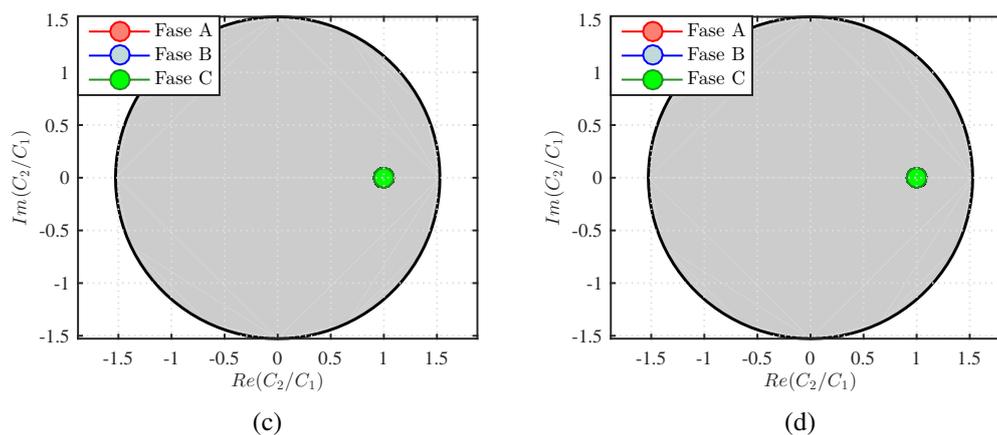


Fonte: autoria própria.

ficativa variação na trajetória das amostras. Logo, as funções 87L e 87LT atuam corretamente frente a falta externa, não detectando o curto-circuito. O que já era esperado por se tratar de uma prote-

**Figura 5.5.** Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito externo aplicado na barra do terminal remoto. Circuito 1:Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2:Terminal Local (c) e Remoto (d).





Fonte: autoria própria.

ção unitária, a qual destina-se a detectar faltas que ocorram apenas no elemento protegido (ANEEL, 2011).

### 5.2.2 Caso ATC-2: Curto-Circuito ABC com Saturação de TC no Terminal Remoto do Circuito 1

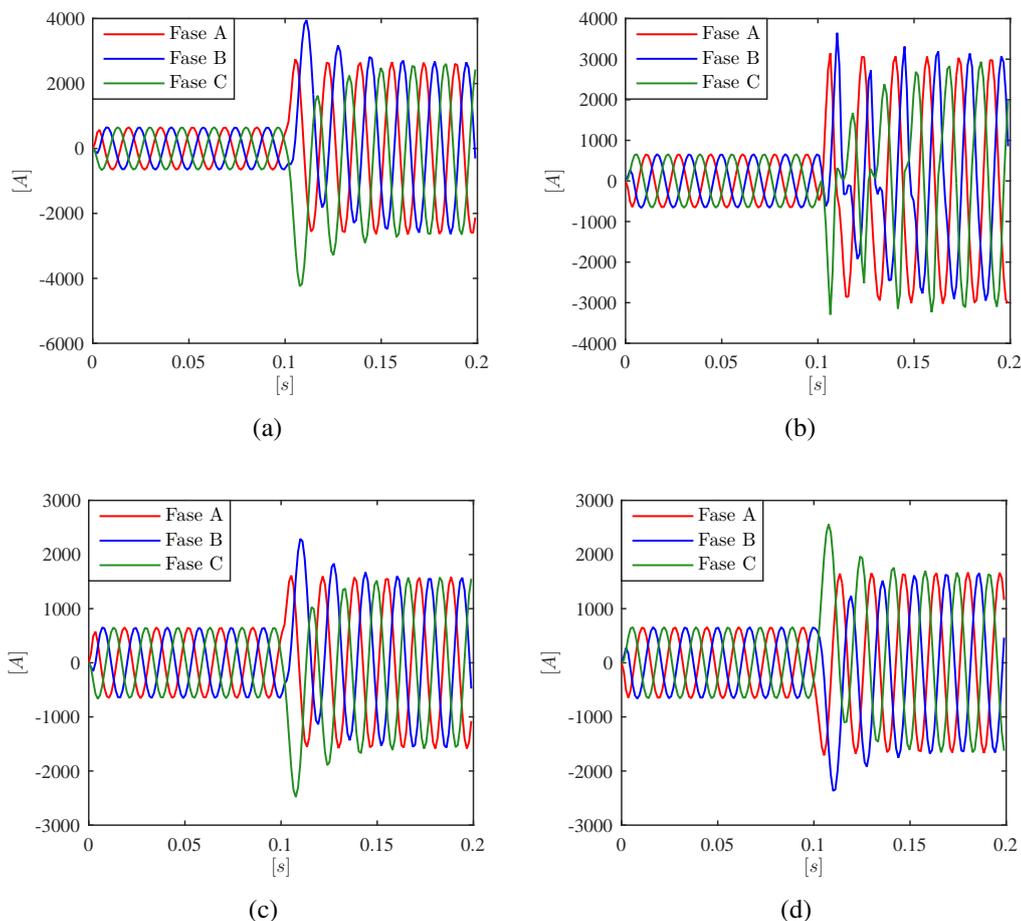
Aplicou-se um curto-circuito trifásico ABC em  $d = 80\%$  do circuito 1 da LT monitorada, sendo que o TC do terminal remoto do circuito 1 estava saturado, para as seguintes configurações do SEE:  $\delta = -40^\circ$ ,  $FF_L = 0,1$  e  $FF_R = 1,0$ . O TC usado foi o modelo C800, forçando-o a saturar em um terminal. Para tal a impedância no secundário foi ajustada para  $100 \Omega$ , para um ângulo de carregamento de  $-40^\circ$ .

Na Figura 5.6, ilustra-se o comportamento das correntes de fase quando uma falta é aplicada em 0,1 segundos. Do gráfico, percebe-se o efeito da saturação nas correntes logo no começo do transitório para os dados do terminal remoto do circuito 1.

Nas funções 87L e 87LT, os resultados são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8 em que (a) e (b) caracteriza a falta no circuito 1, percebe-se que no terminal onde o TC está saturado há maior variação na localização das amostras, visualiza-se nas Figuras 5.7 (b) e 5.8 (b), as quais mostram a proteção para o circuito 1 no terminal remoto. No circuito 2, a função 87L apresentada nas Figuras 5.7 em (c) e (d), as unidades de fase permanecem próximas ao ponto  $(-1,0)$  dessa forma, o relé opera corretamente, sem atuação de nenhuma unidade mesmo durante a saturação.

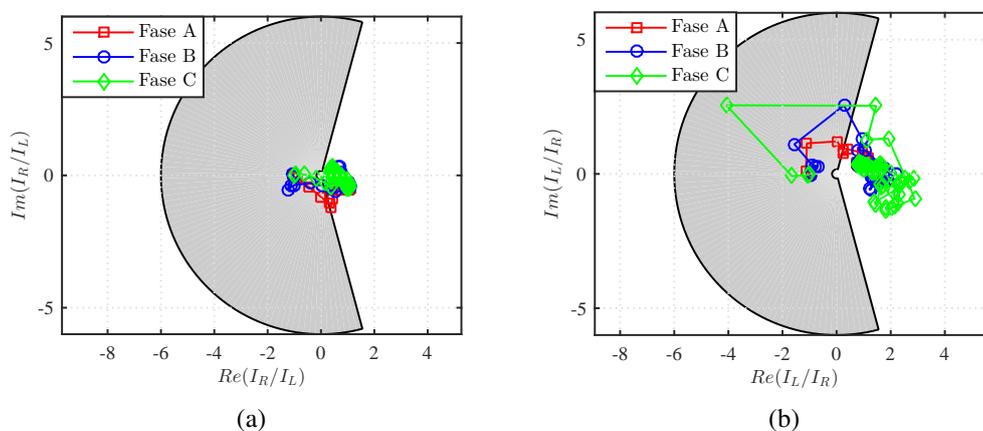
Para a função 87LT nas Figuras 5.8 em (c) e (d), as amostras variam em torno de  $(1,0)$  no plano- $\alpha$ ,

**Figura 5.6.** Aplicação de curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d).



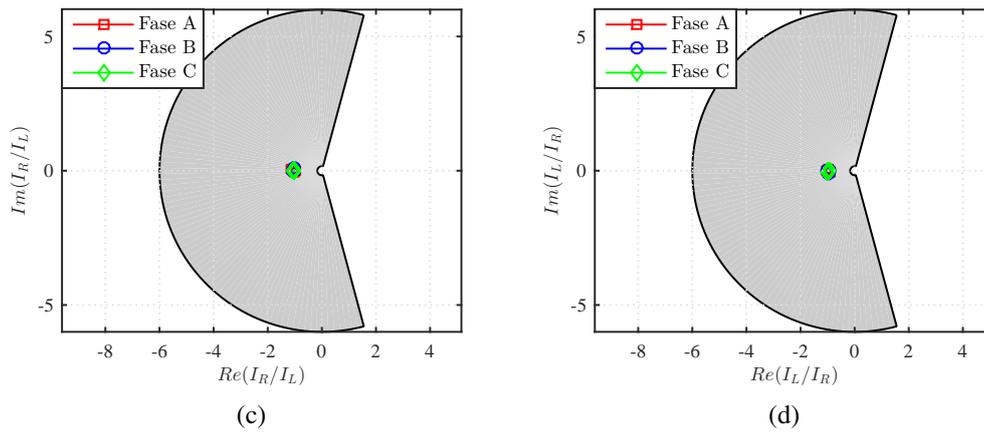
Fonte: autoria própria.

**Figura 5.7.** Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d).



no terminal remoto uma amostra sai da região de restrição, o que não caracteriza a atuação do relé.

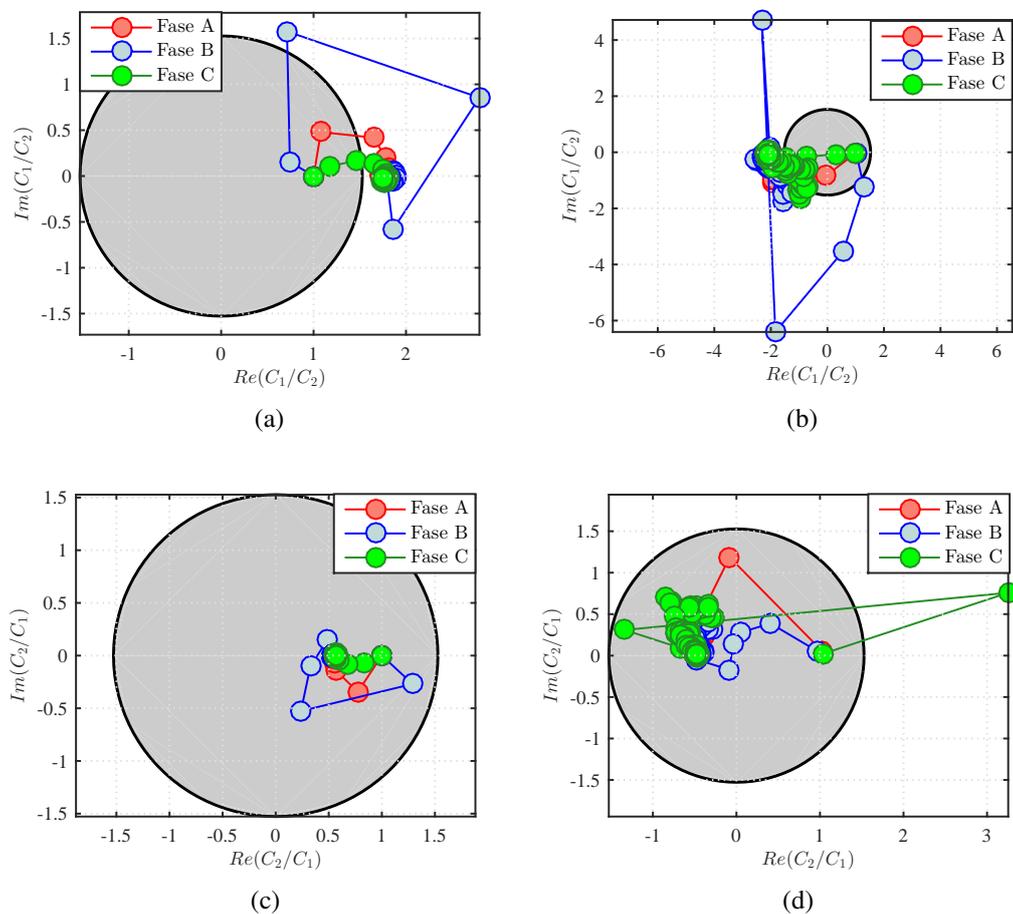
Deteção do curto-circuito através do plano- $\alpha$  no circuito 1, para a função 87L a detecção das 3



Fonte: autoria própria.

fases aconteceu em 15.6 ms, enquanto a função 87LT a falta é detectada em 11.5 ms no terminal local e em 12,5 ms no terminal remoto.

**Figura 5.8.** Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$ , curto-circuito trifásico no circuito 1 com TC saturado no terminal remoto. Circuito 1: Terminal Local (a) e Terminal Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Terminal Remoto (d).



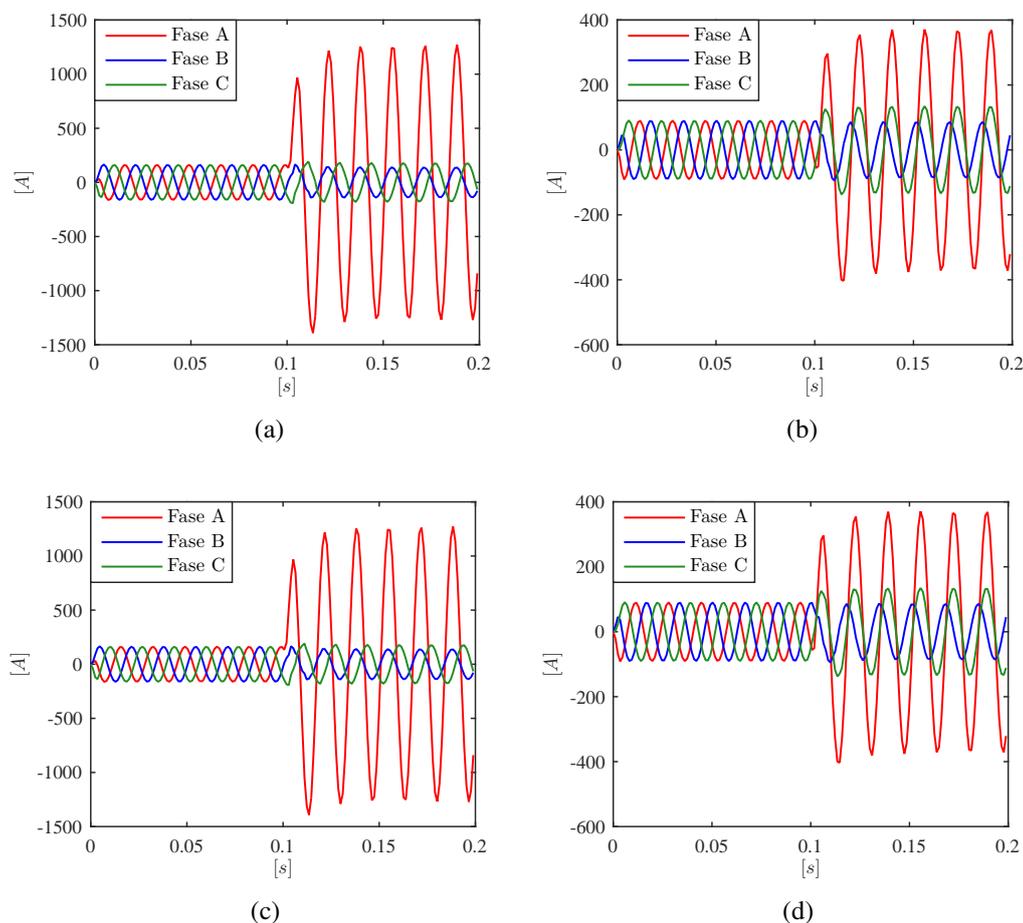
Fonte: autoria própria.

### 5.2.3 Caso ATC-3: Curto-Circuito entre os Circuitos 1 e 2 na Fase A-T

Avalia-se as funções de proteção para faltas entre os dois circuitos, para tal, simulou-se um curto-circuito entre os circuitos 1 na fase A-T e no circuito 2 na fase A-T em  $d = 50\%$ , com o sistema operando nas seguintes características: carregamento de  $-5^\circ$ ,  $FF_L = 0, 1$ ,  $FF_R = 1, 0$ , sendo a falta aplicada em 0,1 segundos para uma  $R_f = 10 \Omega$ . A análise deste tipo de falta é necessária para LTs de circuito duplo (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

Na Figura 5.9, ilustra-se o comportamento das correntes de fase quando acontece um curto-circuito entre os circuitos 1 e 2, nas fases A-T para A-T em 0,1 segundos.

**Figura 5.9.** Curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T para A-T. Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto, Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto.



**Fonte:** autoria própria.

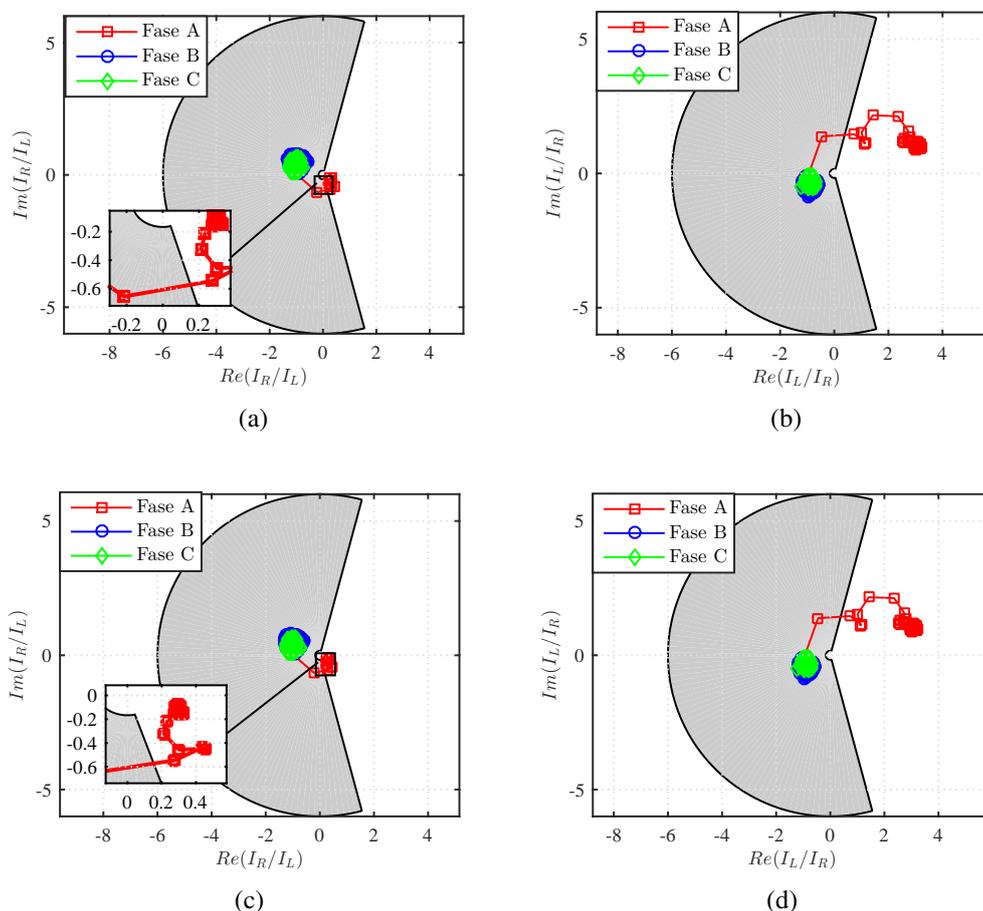
As correntes no terminal local e remoto são influenciadas pelas forças das respectivas fontes a cada terminal, essa influência pode ser vista nas figuras, ao comparar a figura 5.9 (a) com a Figura 5.9 (b) e ao comparar a Figura 5.9 (c) com a Figura 5.9 (d), nota-se que a corrente no terminal local é

maior que a corrente no terminal remoto, deve-se a contribuição da força da fonte para a corrente de curto-circuito.

Os resultados para a função 87L são apresentados na Figura 5.10, da qual se observa que a proteção detectou o curto-circuito nos dois circuitos. De fato, como essa função compara os fasores das correntes do terminal local e remoto, e essa razão, para esse caso, mostrou-se suficiente a ponto de sensibilizar o relé. O mesmo não acontece para a função 87LT, o que se observa na a Figura 5.11.

Na detecção da falta através do plano- $\alpha$ , para a função 87L ocorreu em 11,5 ms após a aplicação da falta, 3 amostras permaneceram dentro da região de restrição.

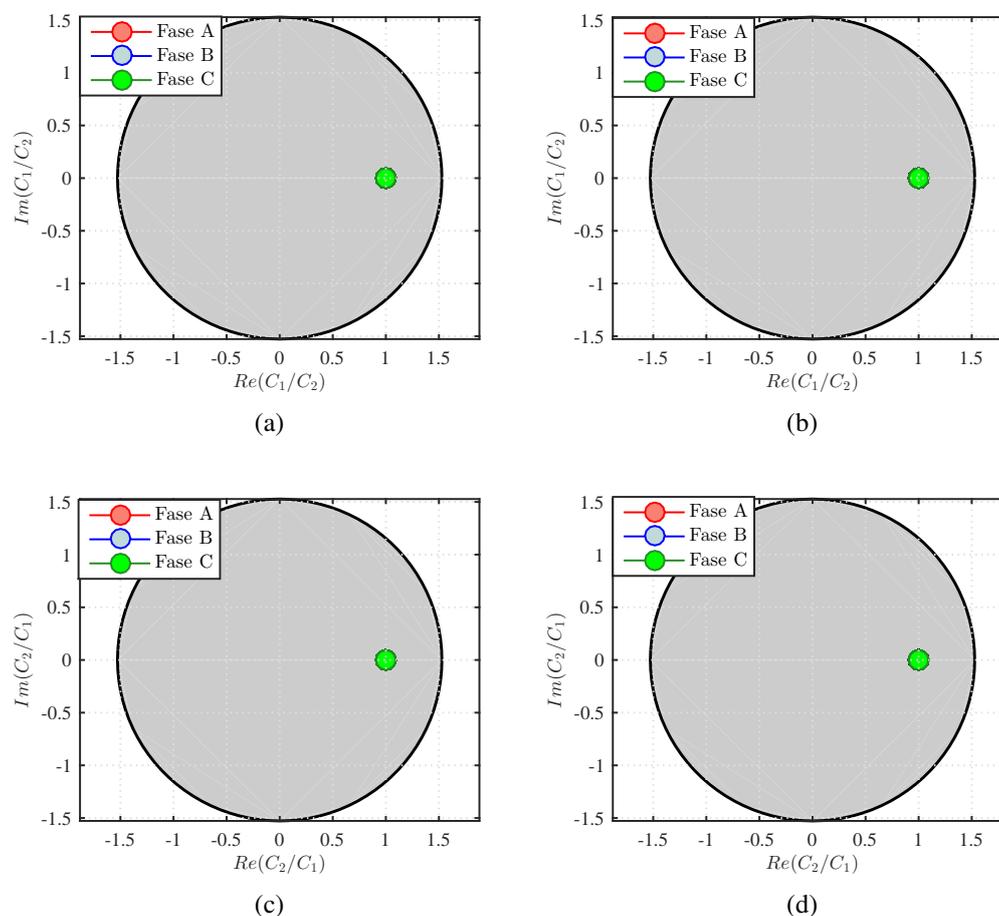
**Figura 5.10.** Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$  com curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d).



**Fonte:** autoria própria.

A função 87LT não detectou a falta, as amostras são a razão entre os fasores dos circuitos 1 e 2, e o resultado indica que a variável permanece alocado na região de restrição, devido o módulo das correntes fasoriais apresentarem valores menores que o  $I_{pk}$ , sendo assim, a função não é sensibilizado, atua de forma incorreta.

**Figura 5.11.** Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$  com curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase A-T. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d).



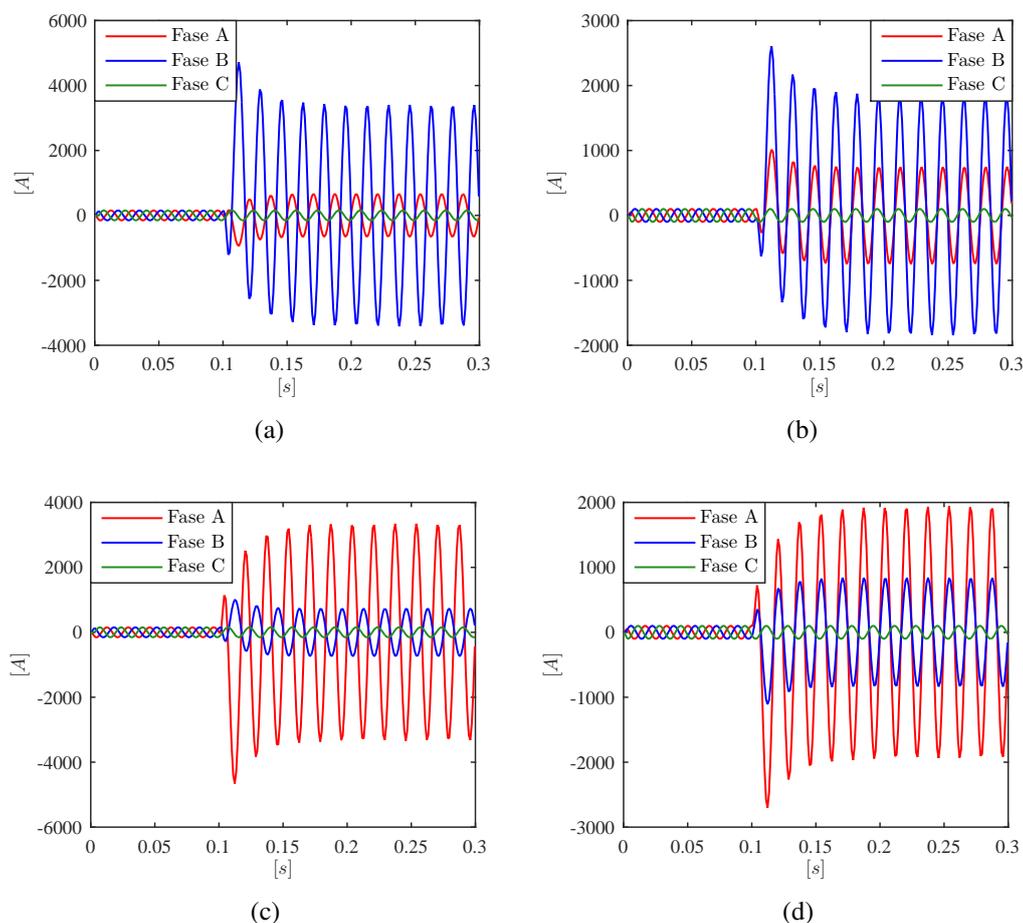
Fonte: autoria própria.

#### 5.2.4 Caso ATC-4: Curto-Circuito entre os Circuitos 1 e 2 da fase B para A

Neste caso são avaliadas as funções de proteção 87L e 87LT para faltas entre os dois circuitos, simulando a falta entre os circuitos 1 e 2 da fase B para A, respectivamente. Sendo o sistema teste operando com as seguintes características: ângulo de carregamento de  $5^\circ$ ,  $FF_L = 0,1$  e  $FF_R = 1,0$ , ademais, sendo a falta aplicada em 0,1 segundos com  $R_f = 50 \Omega$ . Na Figura 5.12, mostram-se as correntes em ambos os circuitos da LT monitorada.

Percebe-se na Figura 5.12 que a falta na fase B do circuito 1 influencia a corrente na mesma fase do circuito 2, e a falta na fase A do circuito 2 influencia a corrente na fase A do circuito 1, enquanto a fase C permanece constante. Para essa simulação, o sistema foi configurado com fonte local forte e fonte remota fraca, ao comparar a figura 5.12 (a) com a Figura 5.12 (b) e ao comparar a figura 5.12 (c) com a Figura 5.12 (d), nota-se que a corrente no terminal local é maior que a corrente no terminal

**Figura 5.12.** Curto-circuito entre os circuitos 1 e 2 na fase B para A. Circuito 1: (a) Terminal Local e (b) Terminal Remoto, Circuito 2: (c) Terminal Local e (d) Terminal Remoto.

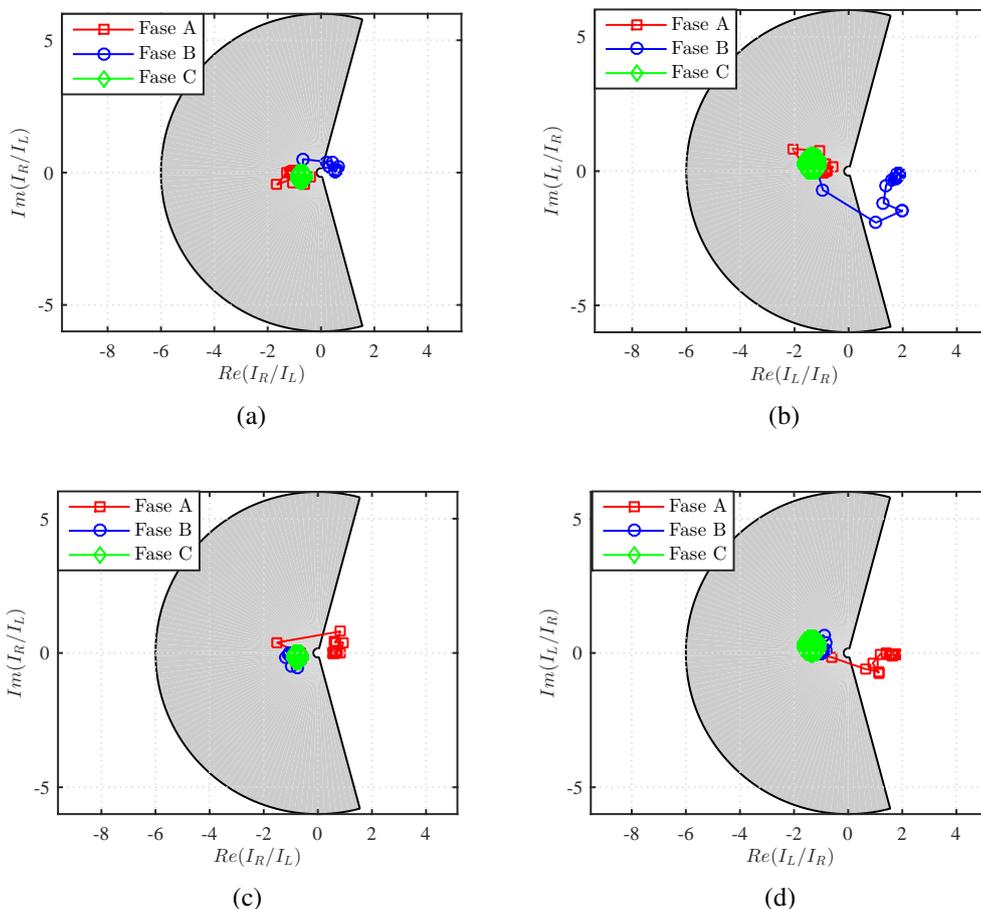


**Fonte:** autoria própria.

remoto no circuito 1, deve-se a contribuição da força da fonte para a corrente de curto-circuito, o mesmo acontece no circuito 2.

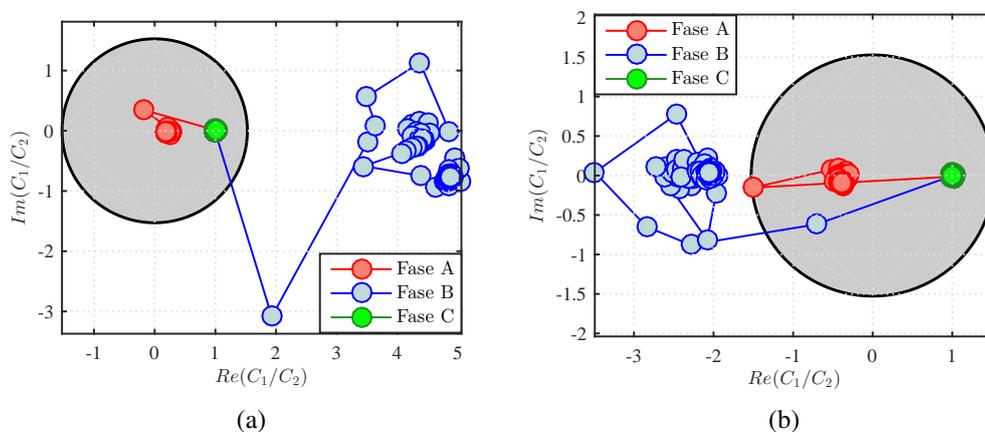
Na figura 5.13, ilustram-se os resultados para a função 87L, enquanto que na Figura 5.14 são ilustrados os resultados para função 87LT. Nota-se que ambas as funções detectaram as faltas corretamente, sensibilizando o relé apenas para a fase com defeito nos respectivos circuitos. A função 87LT funcionou corretamente devido os curtos circuitos serem aplicados em fases diferentes, no circuito 1 fase B e no circuito 2 fase A, logo o modulo das correntes fasoriais são maiores que o  $I_{pk}$ .

**Figura 5.13.** Proteção Diferencial Longitudinal no Plano- $\alpha$  com curto-circuito entre o circuito 1 na fase B e o circuito 2 na fase A. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d).

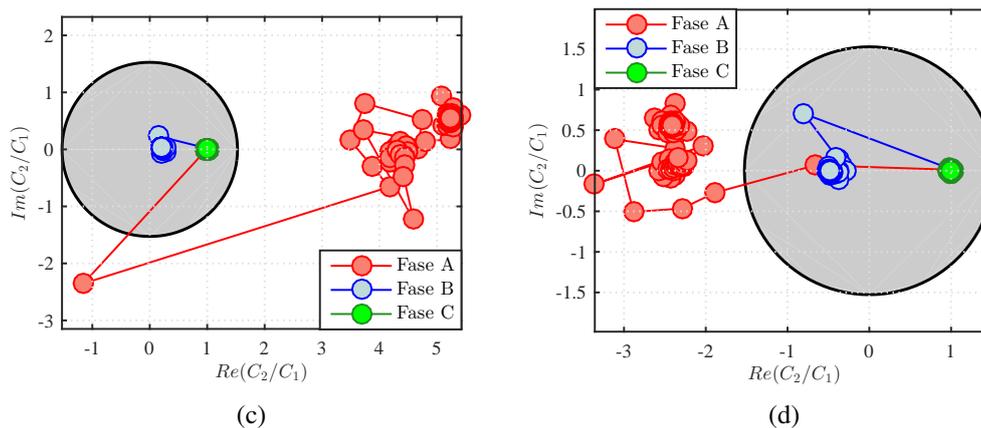


Fonte: autoria própria.

**Figura 5.14.** Proteção Diferencial Transversal no Plano- $\alpha$  com curto-circuito entre o circuito 1 na fase B e o circuito 2 na fase A. Circuito 1: Terminal Local (a) e Remoto (b), Circuito 2: Terminal Local (c) e Remoto (d).



Na detecção da falta através do plano- $\alpha$ , para a função 87L e para o terminal remoto da função 87LT a detecção ocorreu em 10,4 ms após a aplicação da falta, 2 amostras permaneceram dentro



Fonte: autoria própria.

da região de restrição, enquanto no terminal local da função 87LT, a falta foi detectada em 9,4 ms, ficando apenas 1 amostra dentro da região de restrição.

### 5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA (ASP)

Nas análises dos curto-circuito realizadas, considerou-se a influência da força das fontes dos equivalentes de Thévenin local e remoto  $FF_L$  e  $FF_R$ , respectivamente, além da localização de falta  $d$  (% do circuito), expressa em relação ao comprimento total da linha  $\ell$ , tipo de falta, da resistência de falta  $R_f$  e carregamento do sistema  $\delta$ . No total, foram simulados 4 casos a fim de atestar o uso das funções para situações com diferentes pontos de operação do SEE.

Na Tabela 5.4, apresenta-se um resumo dos casos avaliados na ASP. Para cada caso, os resultados são apresentados em forma de figuras da seguinte forma: as Figuras (a) e (b) representam os terminais local e remoto para o circuito 1 e as Figuras (c) e (d) representam os terminais local e remoto para o circuito 2.

**Tabela 5.4.** Resumo dos casos avaliados na ASP.

Caso	Tipo de Falta	$d$	$R_f$	$FF_L$	$FF_R$	$\delta$
ASP-1	A-T	Varia	10 $\Omega$	0,1	1,0	$-5^\circ$
ASP-2	B-T	50%	Varia	0,1	1,0	$-10^\circ$
ASP-3	AB-T	50%	10 $\Omega$	0,1	1,0	Varia
ASP-4	ABC	50%	-	Varia	1,0	$10^\circ$

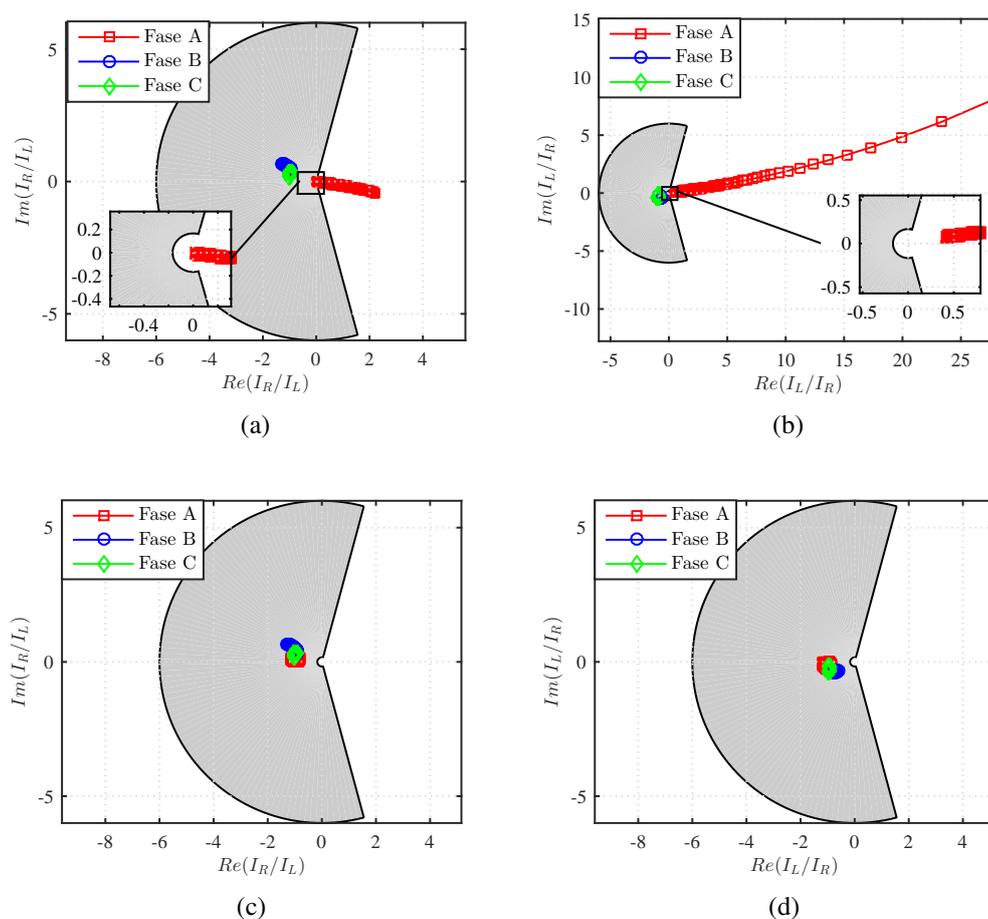
Fonte: autoria própria.

Uma ASP consiste em uma análise em que apenas um parâmetro varia por vez, enquanto outros são mantidos constantes, assim é possível verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito, desta forma, cada variação reproduz um comportamento das amostras no plano- $\alpha$ .

### 5.3.1 Caso ASP-1: Curto-Circuito A-T Interno - Variação da Localização de Falta

No primeiro caso, analisa-se a influência da localização da falta no desempenho do algoritmo proposto, variou-se a localização da falta de 1 a 99% do circuito 1, com taxa de 1%. Foram aplicados curtos-circuitos A-T, com carregamento de  $-5^\circ$ , força das fontes no terminal local e remoto,  $FF_L=0,1$  e  $FF_R=1,0$  respectivamente. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.15 e 5.16.

**Figura 5.15.** Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$  com variação da localização e com falta monofásica nas fases A-T na circuito 1. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local (d) Terminal Remoto.

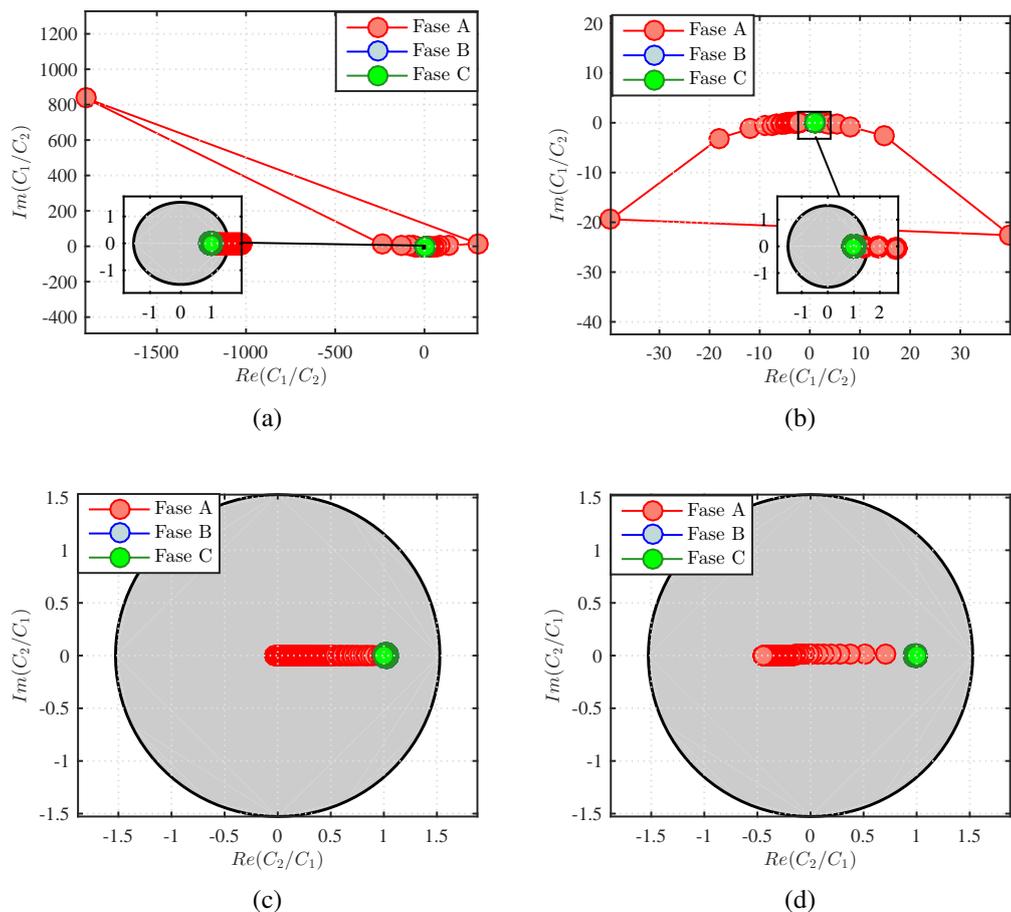


Fonte: autoria própria.

Da Figura 5.15, observa-se que a função 87L detectou todas as faltas simuladas cobrindo 100% do

circuito 1 da LT monitorada, cabe ressaltar que, na prática essa função de proteção requer o uso de um canal de comunicação. Nota-se a seletividade, ocorrendo atuação apenas na unidade diferencial da fase A, e restrição para as fases B e C, conforme esperado, pois essa proteção trabalha com segregação de fase. A função 87LT atuou em modo instantâneo em 87% da LT monitorada a partir do terminal

**Figura 5.16.** Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$  com variação da localização e com falta monofásica nas fases A-T na circuito 1. Circuito 1 (a) Terminal Local (b) e Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local (d) e Remoto.



Fonte: autoria própria.

local e 98% a partir do terminal remoto. Conclui-se que, por se tratar de uma função que não requer o uso de canal de comunicação, a função se mostra sensível para os casos analisados. Da Figura 5.16, mostram-se os resultados da função 87LT nos circuitos 1 e 2. Essa função também trabalha com segregação de fase, logo apenas a unidade diferencial da fase A é sensibilizada.

Por fim, conclui-se que a amplitude dos elementos de fase aumentam e diminuem dependendo da localização da falta  $d$ , em especial, para a função 87L à medida que a falta se aproxima do terminal remoto, maior é o quociente  $r$  no plano- $\alpha$ , e quanto mais próximo do terminal local, esses valores são

menores. Por outro lado, na função 87LT acontece o inverso, além disso, a trajetória das variáveis no plano- $\alpha$  apresentam uma aparência circular. Dessa forma, tem-se dos resultados que a parte real e imaginária de ambas as funções de proteção analisadas são afetadas pela variação da localização de falta.

### 5.3.2 Caso ASP-2: Curto-Circuito B-T Interno - Variação da Resistência de Falta

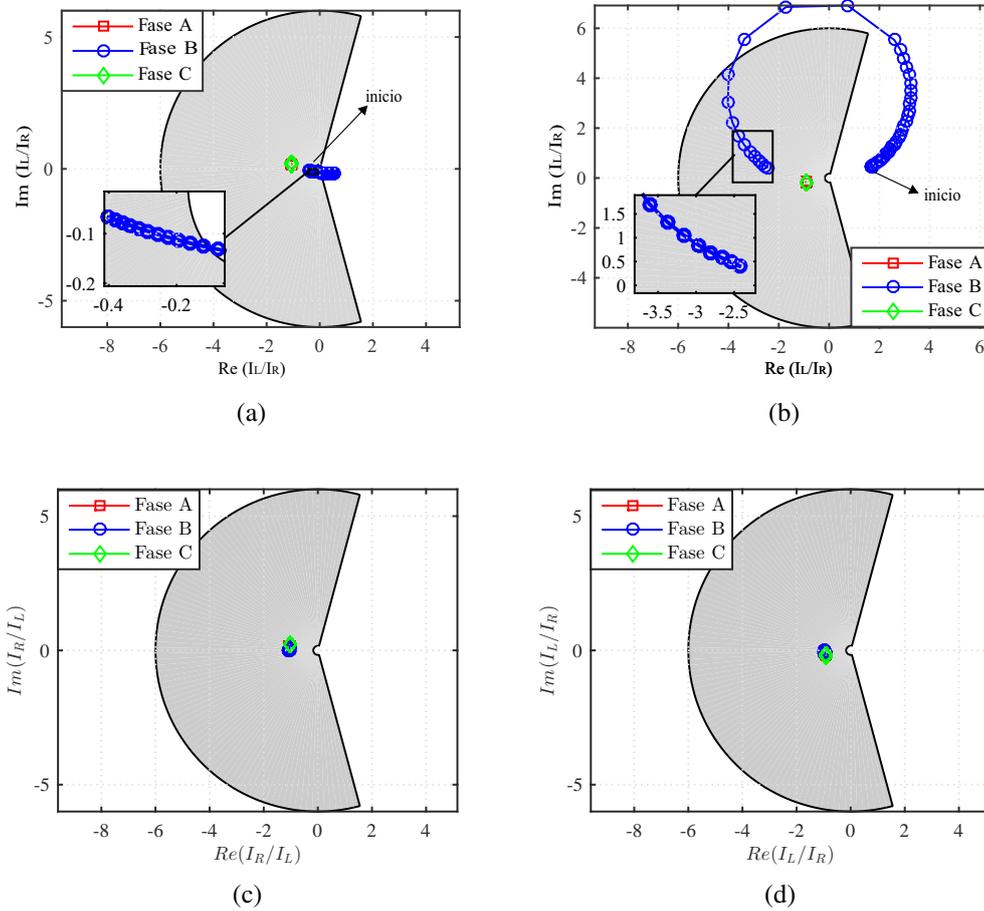
Neste caso, a resistência de falta  $R_f$  foi variada de 0 a 10  $\Omega$  com uma taxa de 1  $\Omega$ , de 10 a 300  $\Omega$  com uma taxa de 10  $\Omega$ , e de 300 a 1000  $\Omega$  com uma taxa de 50  $\Omega$ . Foram simulados curtos circuitos B-T em  $d = 50\%$  do circuito 1, considerando o SEE operando com carregamento de  $\delta = -10^\circ$ ,  $FF_L = 0,1$  e  $FF_R = 1,0$ . Da literatura, encontrou-se como valores razoáveis para a resistência de falta que raramente são maiores que 50  $\Omega$  (FORCAN; STOJANOVIC, 2016), logo, com essa análise é possível saber os valores máximos para a  $R_f$  que a proteção consegue detectar a falta corretamente. Os resultados para a função 87L são apresentados na Figura 5.17 e da função 87LT na Figura 5.18.

Da Figura 5.17 referente a função 87L, percebe-se que há perda de sensibilidade já com 500  $\Omega$  no terminal local e remoto, os elementos da fase B apresentam uma trajetória circular enquanto que da fase A e C permanecem no ponto (-1,0) uma vez que estes não estão envolvidos na falta, a proteção se torna insensível para curtos-circuitos com resistência de falta maior ou igual a 500  $\Omega$ , as amostras que estão dentro da região de restrição, possuem valores superiores e igual a este.

Para a função 87LT, os resultados são apresentados nas Figura 5.18, a falta ocorreu no circuito 1. Nota-se que, a função atuou corretamente para os circuitos 1 e 2. A proteção atuou para resistência de até 1000  $\Omega$  em modo instantâneo, mostrando ser robusta em relação a variação de  $R_f$ . O circuito 2 não foi afetado pelo curto-circuito, a proteção atuou corretamente, não detectando a falta.

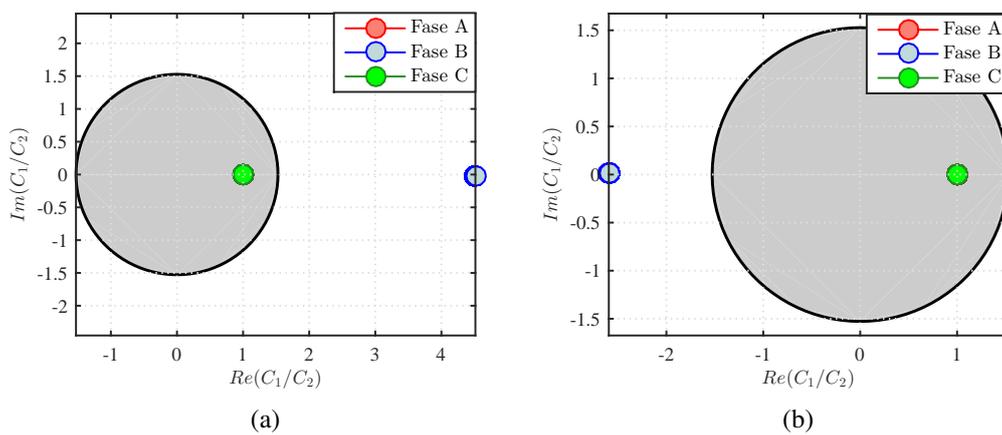
Segundo Eissa & Malik (1996), para os casos de faltas envolvendo terra, os valores de corrente de falta podem ser significativos se a falta ocorre através de um caminho com alta resistência. Tal fato impacta negativamente em alguns algoritmos de proteção de LTs de circuito duplo, o impacto do aumento dessa resistência é retardar as trajetórias do plano- $\alpha$ , como consequência, retarda-se a ação de cruzar o limite de restrição para que a função de proteção seja sensibilizada, aumentando assim o tempo de operação. Para contornar esse problema, na função 87LT foi feita a remoção da corrente de pré-falta das unidades de fase, usando o método das correntes sobrepostas, tal utilização, reduz a influência de  $R_f$ , logo, os elementos de fase envolvidos no curto-circuito passam ser menos sensíveis ao aumento da resistência de falta.

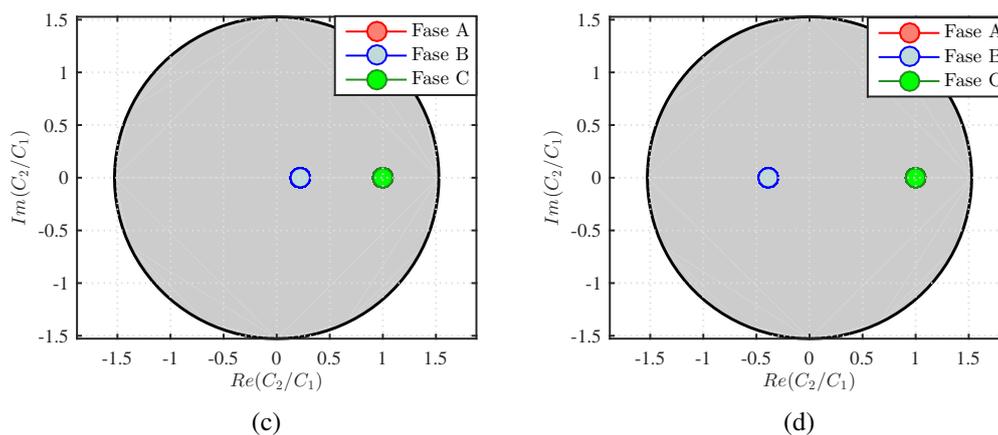
**Figura 5.17.** Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$  com variação da Resistência de falta  $R_F$  e falta monofásica B-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.



Fonte: autoria própria.

**Figura 5.18.** Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$  com variação da Resistência de falta  $R_F$  e falta monofásica B-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.



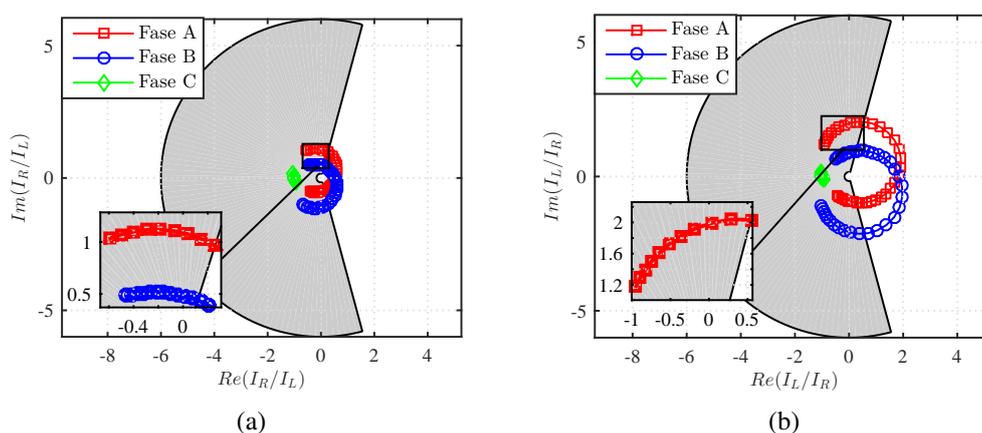


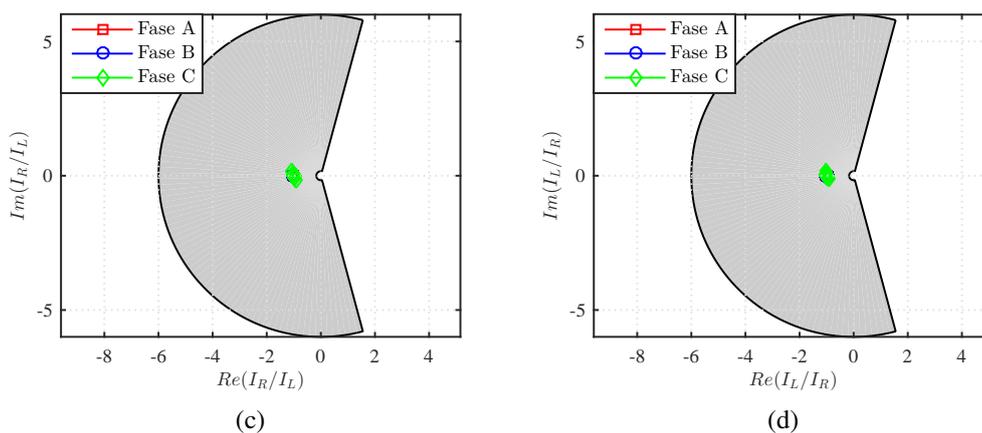
Fonte: autoria própria.

### 5.3.3 Caso ASP-3: Curto-Circuito AB-T Interno - Variação do Carregamento

Nesse caso, avaliou-se o sistema teste para carregamento  $\delta$  variando de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  com passo de  $5^\circ$ . Sendo simulados curtos-circuitos bifásico-terra envolvendo as fases A e B, sendo  $d = 50\%$  do circuito 1, com  $R_f = 10 \Omega$ ,  $FF_L = 0,1$  e  $FF_R = 1,0$ . As condições de carregamento do SEE foram determinadas para a barra local com tensão igual a  $1\angle 0^\circ$  p.u. e a barra remota com  $1\angle \delta$  p.u.. O valor de  $\delta$  corresponde a abertura angular entre as tensões nas barras, sendo o ajuste feito através do controle das tensões nas fontes local e remota em regime permanente. Da literatura, sabe que os valores típicos para o carregamento variam entre  $30^\circ$  e  $40^\circ$ , no entanto, visando obter uma análise geral, o valor do ângulo foi extrapolado para valores maiores (SAADAT, 2010). Na Figura 5.19, mostra-se o comportamento da função 87L e a Figura 5.20 o comportamento da função 87LT para diferentes valores de  $\delta$ , o curto-circuito foi aplicado no circuito 1.

**Figura 5.19.** Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$  com variação do carregamento e falta AB-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.



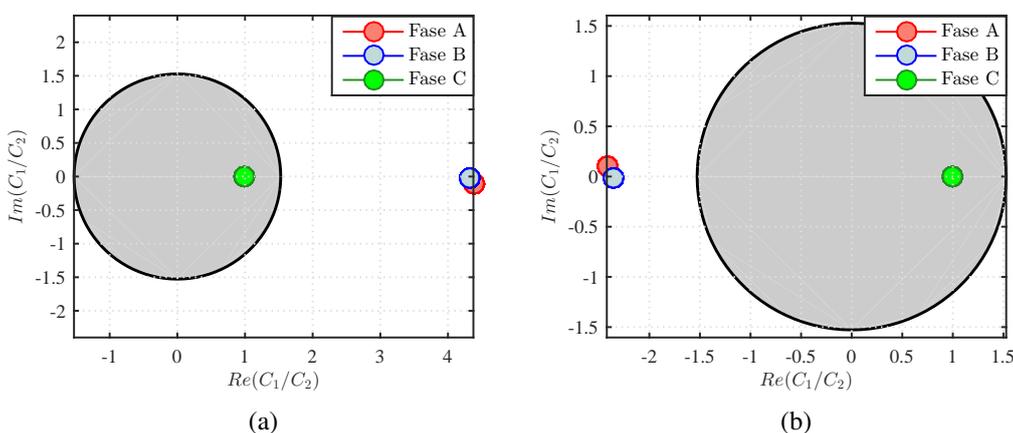


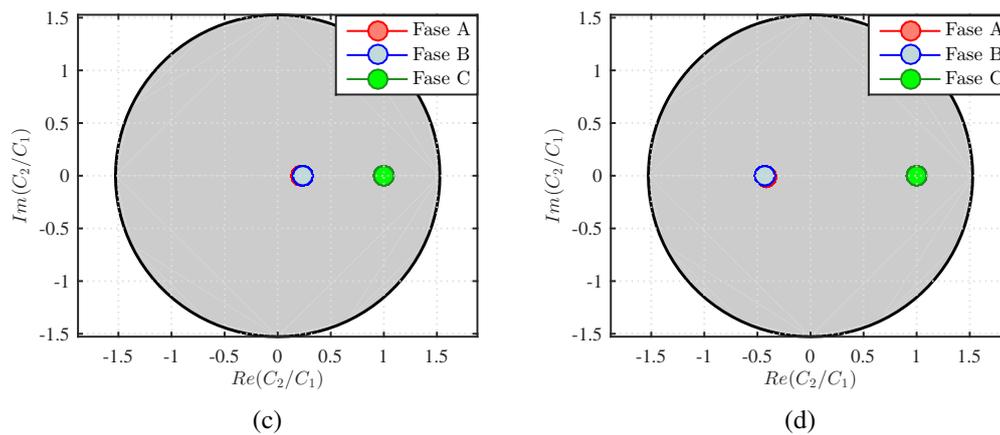
Fonte: autoria própria.

Nas Figuras 5.19(a) e 5.19(b), observa-se que a função 87L atuou para faltas no circuito 1 do terminal local e remoto, sendo sensibilizada para as duas fases envolvidas no curto-circuito, atuando assim corretamente. No entanto, a função 87L detectou faltas apenas para a variação de  $\delta$  de  $-50^\circ$  a  $50^\circ$ , não atuando para os carregamentos no intervalo de  $-55^\circ$  a  $-90^\circ$  e para  $55^\circ$  a  $90^\circ$ . Esses valores não são realísticos, na pratica não se encontra sistemas com carregamentos tão elevados ou tão baixos. No circuito 2, mostrado nas Figuras 5.19(c) e 5.19(d) a função 87L atuou corretamente não detectando falta.

Dos resultados, na Figura 5.20, ilustra-se o comportamento da função 87LT que detectou o curto-circuito para os valores de carregamento avaliados, em modo de operação instantânea, pois, conforme explicado anteriormente, a utilização do elemento diferencial percentual aumenta a sensibilidade da função 87LT. Ainda assim, o desempenho dessa função se mostrou consideravelmente influenciado

**Figura 5.20.** Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$  com variação do carregamento e falta AB-T. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.





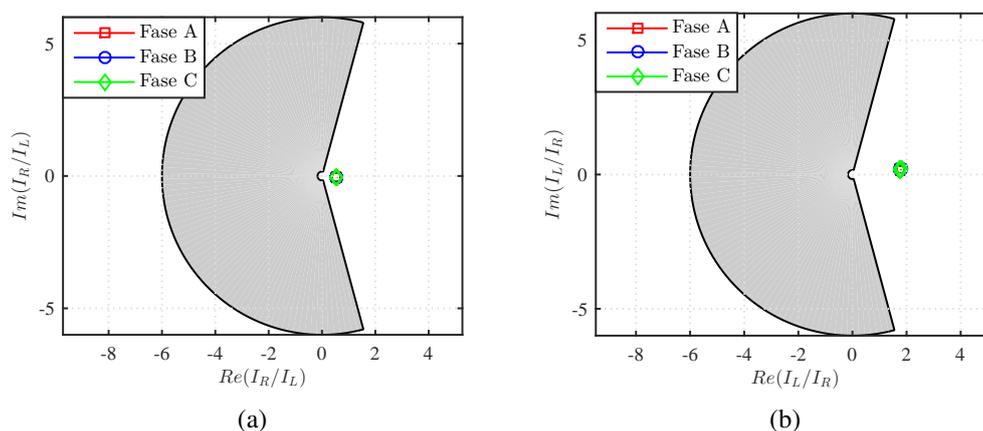
Fonte: autoria própria.

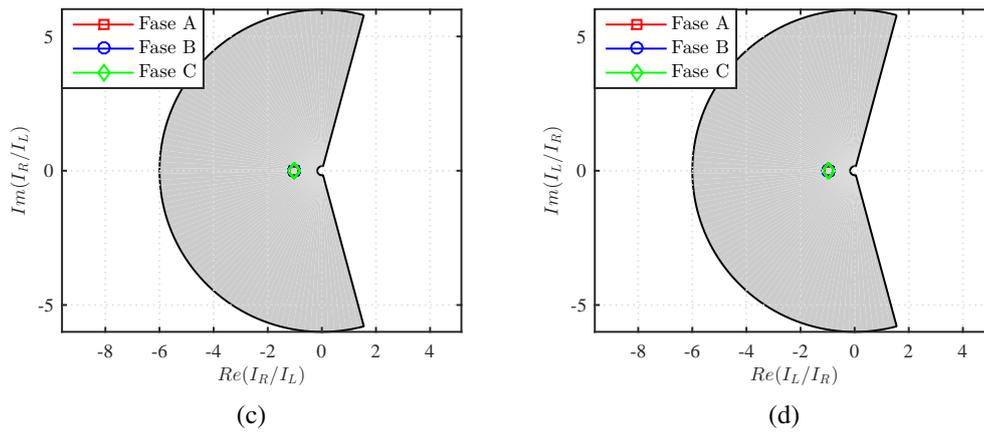
pela corrente de carga da LT monitorada. Por outro lado, a função 87LT por utilizar correntes sobrepostas de fase, não sofre influência do carregamento do SEE. De fato, as correntes sobrepostas são calculadas a partir da subtração entre os valores das correntes medidas após a ocorrência do defeito e as correntes medidas antes da falta, portanto, elimina-se a corrente de carga (WANG *et al.*, 2005e; EISSA; MALIK, 1996).

### 5.3.4 Caso ASP-4: Curto-Circuito ABC Interno - Variação da Força da Fonte

Nesta seção, analisa-se a influência da força das fontes nas trajetórias dos quocientes no plano- $\alpha$  mostradas nas Figuras 5.21 e 5.22. Considerou-se uma variação de  $FF_L$  de 0,1 a 10 na fonte local, mantendo-se constante o  $FF_R = 0,1$  do terminal remoto. Foram simulados curtos-circuitos ABC sem resistência de falta em  $d = 50\%$  do circuito 1, com  $\delta = 10^\circ$  no terminal remoto.

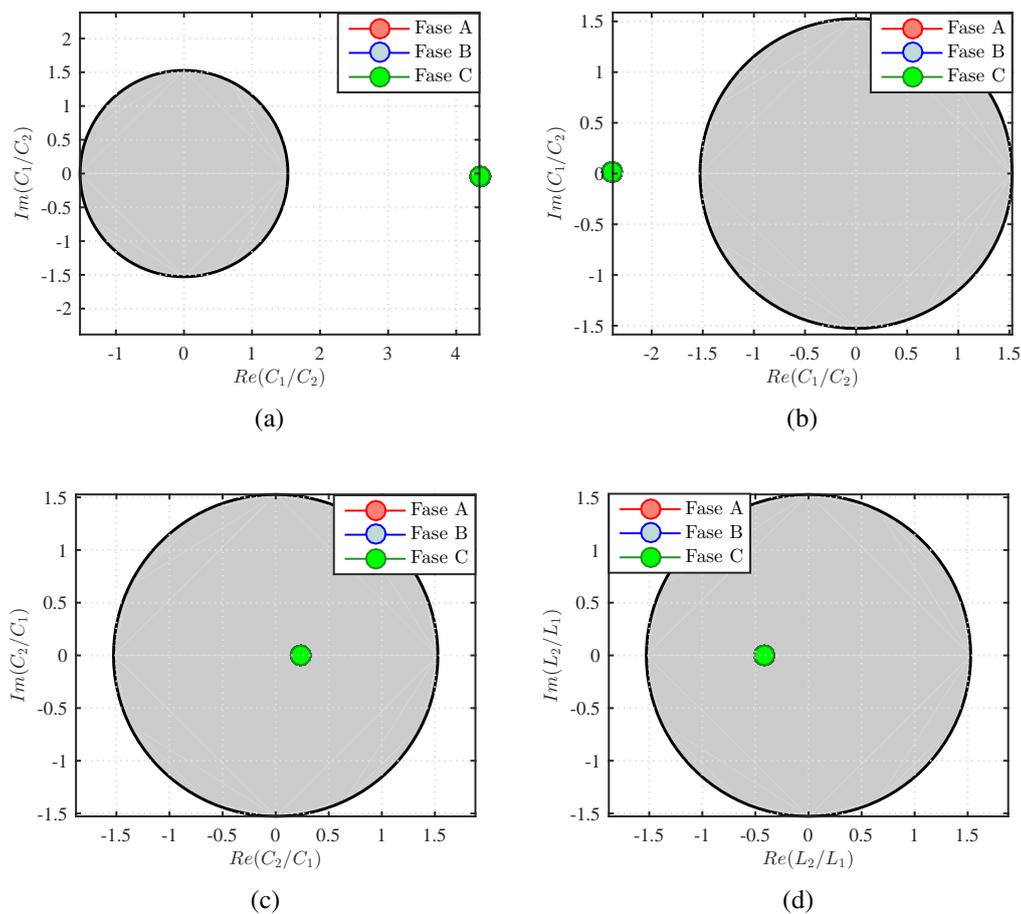
**Figura 5.21.** Proteção diferencial longitudinal no Plano- $\alpha$  com variação do  $FF_L$  e falta trifásica. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.





Fonte: autoria própria.

**Figura 5.22.** Proteção diferencial transversal no Plano- $\alpha$  com variação do  $FF_L$  e falta trifásica. Circuito 1 (a) Terminal Local. (b) Terminal Remoto. Circuito 2 (c) Terminal Local. (d) Terminal Remoto.



Fonte: autoria própria.

Dos resultados, nota-se que as duas funções detectaram as faltas para todos os valores de força da fonte analisados. A força da fonte está intimamente ligada à capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito, seu valor pode influenciar nas trajetórias no plano- $\alpha$ .

Em particular, a função 87LT por ser implementada usando correntes sobrepostas, operou corretamente para a variação da força da fonte, ainda que para condições de fonte fraca analisadas. Ainda, verificou-se que a função 87LT detectou as faltas simuladas para todos os valores em modo de operação instantânea, por ser uma função diferencial percentual, essa é sensível as variações das correntes medidas nos terminais da LT, pois em ambos os terminais os valores das correntes são significativamente elevadas a ponto da função detectar a falta simultaneamente, fazendo com que os disjuntores de cada terminal do circuito sejam abertos de forma independente.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, implementou-se as proteções diferencial longitudinal e transversal, função 87L e 87LT, respectivamente, para aplicação em LTs de circuito duplo. As análises foram realizadas utilizando o plano- $\alpha$ , com uma característica de restrição sendo uma variação da tradicional circular para a função 87L, e para a função 87LT foi desenvolvida uma nova região de restrição. As funções de proteção foram implementadas utilizando um elemento diferencial percentual associado ao método das correntes sobrepostas e da compensação de corrente capacitiva com o intuito de aumentar a sensibilidade e melhorar a segurança na operação.

Os resultados foram obtidos por meio de simulações em massa e simulações transitórias, a primeira simulação foi utilizada para verificar a atuação do relé durante o defeito, enquanto que a segunda considera apenas o regime permanente de curto-circuito. Os resultados mostram a atuação da função 87LT com a nova região de restrição do plano- $\alpha$  para LTs de circuito duplo, em que dispensa a necessidade de uma característica de restrição modificada para aumentar sua sensibilidade, além do uso de um canal de comunicação entre os terminais da LT monitorada.

Por meio da análise transitória de curto-circuito (ATC) percebe-se que a função 87LT detecta as faltas em um tempo menor, no entanto, não detecta falta entre circuitos quando as fases envolvidas são iguais. Conclui-se que a função 87LT deve ser usada como uma função complementar auxiliando a função 87L. Outro ponto a ser considerado é que em caso de energização da linha ou quando apenas uma das linhas está em funcionamento a função 87LT deve estar desligada, afim de evitar atuação indevida, pois a função 87LT compara as correntes sobrepostas dos dois circuitos em cada terminal, considerando um caso em que um circuito está em funcionamento e outro não, a proteção irá detectar falta ao comparar as correntes dos terminais.

**Tabela 6.1.** Resultados: Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC)

<b>Proteção Diferencial Longitudinal (Função 87L)</b>
Atua corretamente não detectando faltas externas; Atua corretamente detectando faltas quando há saturação do TC; Atua corretamente detectando faltas entre os circuitos 1 e 2, na mesma fase e em fases diferentes.
<b>Proteção Diferencial Transversal (Função 87LT)</b>
Atua corretamente não detectando faltas externas; Atua corretamente detectando faltas quando há saturação do TC; Não atua para faltas entre os circuitos 1 e 2, na mesma fase; Atua corretamente detectando faltas entre os circuitos 1 e 2, na mesma fase e em fases diferentes.

Por meio da análise de sensibilidade paramétrica (ASP), constatou-se que a função 87LT é imune à variação da resistência de falta ( $R_f$ ), do carregamento da LT ( $\delta$ ) e da força das fontes ( $FF$ ) atuando em modo de operação instantânea para os casos citados, ao mesmo tempo que é sensível a variação da localização da falta ( $d$ ). Porém, ao analisar a variação da localização da falta, a função atuou em modo instantâneo em 87% da LT monitorada a partir do terminal local e 98% a partir do terminal remoto, para o resto da linha atua em modo de operação sucessiva. Conclui-se que, por se tratar de uma função que não requer o uso de canal de comunicação, a função se mostra sensível para os casos analisados.

**Tabela 6.2.** Resultados: Análise de Sensibilidade Paramétrica (ASP)

<b>Proteção Diferencial Longitudinal (Função 87L)</b>
Imune à variação do carregamento da LT; Sua atuação é restringida quando a falta apresenta valores de $R_f \geq 500 \Omega$ ; e quando o carregamento apresenta valores menores que $-50^\circ$ e maiores que $50^\circ$ .
<b>Proteção Diferencial Transversal (Função 87LT)</b>
Imune à variação da resistência de falta, da força das fontes e do carregamento da LT; Sensível a variação da localização da falta, atuou em modo de operação sucessiva para faltas próximas aos terminais

Por fim, propõe-se como continuidade para este trabalho as seguinte análises:

- Modelar e simular sistemas elétricos de potência com diferentes esquemas de transposição, parâmetros de LT, tensões e comprimentos da LT;
- Modelar e simular sistemas elétricos de potência para circuitos duplos que não compartilham a mesma torre;
- Propor um método de trip e uma estratégia de religamento para linhas de circuito duplo, evitando o religamento para faltas permanentes, para que os danos ao sistema não sejam agravados

e diminuído trips desnecessários, afim de manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

- Fazer uma pesquisa explicativa sobre a trajetória das amostras no plano alfa para a proteção diferencial transversal
- Verificar o comportamento da proteção diferencial transversal através da comparação dos resultados obtidos das simulações computacionais com os ensaios de laboratório utilizando relés reais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-LATIF, K. M.; EISSA, M. M.; ALI, A. S.; MALIK, O. P.; MASOUND, M. E. Protection of parallel transmission lines using wi-fi protocol. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. ISSN 1932-5517. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10, and 18.
- AES, J. M. C. G.; ROSSI, R.; SILVEIRA, P. M.; GUERRERO, C. A. Differential protection performance in presence of charging current for hv transmission. In: *13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 20.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Plano da Operação Elétrica 2018/2019 - PEL*. Brasília, 2017. Citado na página 1.
- ALMEIDA, M. L. S. D.; SILVA, K. M. E. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada no Plano Alfa de Potências Complexas*. 181 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasília, Brasil, Out. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 22.
- Altuve, H.; Benmouyal, G.; Roberts, J.; Tziouvaras, D. A. Line differential protection with an enhanced characteristic. In: *3rd Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*,. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1–9. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5, and 10.
- ALTUVE, H.; BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D. A. Transmission line differential protection with an enhanced characteristic. In: *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 414–419 Vol.2. ISSN 0537-9989. Citado 3 vezes nas páginas 1, 14, and 26.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 11.
- ANEEL. *CARACTERÍSTICAS E REQUISITOS TÉCNICOS BÁSICOS DAS INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO*. 2011. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\\_transmissao/documentos/Anexo.T%C3%A9cnico.Lote\\_B\\_SE\\_Miramar\\_SE\\_Tucuru%C3%AD\\_FINAL\(2807\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/Anexo.T%C3%A9cnico.Lote_B_SE_Miramar_SE_Tucuru%C3%AD_FINAL(2807).pdf)>. Citado na página 43.
- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica, RELATÓRIO DE ANÁLISE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO*. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/Relatorio+de+Analise+de+Desligamentos+Forcados+do+Sistema+de+Transmissao+2017>>. Citado na página 2.
- APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D.; SAMBASIVAN, S.; RICHARDS, S. Protection of double circuit transmission lines. In: *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 85–101. Citado 4 vezes nas páginas 2, 16, 17, and 18.

- BENMOUYAL, G.; LEE, T. Securing sequence-current differential elements. In: . [S.l.]: 31st Annual Western Protective Relay Conference Spokane, Washington, 2004. p. 31. Citado na página 28.
- COMMITTEE, I. P. S. R. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Citado na página 37.
- DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. 2. ed. [S.l.]: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992. Citado na página 37.
- DORF RICHARD C.; SVOBODA, J. A. *Introdução aos Circuitos Elétricos*. 8. ed. [S.l.]: PSA Publishing, 2012. Citado na página 12.
- EISSA, M. M.; MALIK, O. P. A new digital directional transverse differential current protection technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 3, p. 1285–1291, July 1996. ISSN 0885-8977. Citado 4 vezes nas páginas 5, 10, 54, and 58.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. *Projeção da Demanda de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 1.
- FERRER, H. J. A.; SCHWEITZER III, E. O. *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010. Citado na página 2.
- FORCAN, M.; STOJANOVIC, Z. An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs. *Elsevier- Electric Power Systems Research*, v. 1, n. 1, mac. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 2, 16, and 54.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. Power system relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, feb. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 11, 14, 17, and 18.
- KASZTENNY, B. B. G. A. H. J. F. N. Tutorial on operating characteristics of microprocessor-based multiterminal line current differential relays. *Schweitzer Engineering Laboratories*, July 2013. ISSN 2084-2201. Citado 2 vezes nas páginas 20 and 21.
- KEZUNOVIC, M. *Fundamentals of Power System Protection*. College Station, Texas, USA: Department of Electrical Engineering, 2005. Citado na página 12.
- LABORATORIES, S. E. *Tabela ANSI*. 2018. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>>. Citado na página 12.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program: Rule Book*. Herverlee, Belgium, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 38 and 39.
- LI, S.; CHEN, W.; YIN, X.; CHEN, D.; MALIK, O. P. Integrated transverse differential protection scheme for double-circuit lines on the same tower. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 5, p. 2161–2169, Oct 2018. ISSN 0885-8977. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 24, and 26.
- MASCHER, L. J. dantas. *ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA FRENTE À FALTAS MONOFÁSICAS à ABORDAGEM TENDO EM VISTA UMA PROTEÇÃO ADAPTATIVA*. Dissertação (Mestrado), Itajubá - MG, 2010. Citado na página 40.
- MILLER, H.; BURGER, J.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Modern line current differential protection solutions. In: *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–25. Citado 4 vezes nas páginas 8, 10, 21, and 22.

- MOLAS, E. C.; SILVA, K. M. e. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no Plano Alfa: Modelagem e Simulação*. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasília, Brasil, Nov. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 13, and 15.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *ONS RE 3/076/2013 - Análise Estatística dos Desligamentos Forçados de Componentes do Sistema Elétrico Brasileiro Referente ao Ano de 2012*. Brasília, 2013. Citado na página 1.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 1, 13, and 14.
- Pajuelo, E.; Ramakrishna, G.; Sachdev, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 2, n. 4, p. 588–599, July 2008. ISSN 1751-8687. Citado na página 37.
- ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. J. The effect of multiprinciple line protection on dependability and security. In: *Line Current Differential Protection: A Collection of Technical Papers Representing Modern Solutions, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* [S.l.: s.n.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 14, 22, 26, 27, 28, and 36.
- SAADAT, H. *Power System Analysis*. 3. ed. USA: PSA Publishing, 2010. Citado na página 56.
- SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1829–1840, July 2011. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 2, 8, 10, 16, 24, and 46.
- SARANGI, S.; PRADHAN, A. K. Enhanced alpha plane line protection. In: *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 10.
- TLEIS, N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. 1. ed. USA: Elsevier Ltd., 2008. Citado na página 2.
- TRIPATHY, L. N.; DASH, P. K.; SAMANTARAY, S. R. A new cross-differential protection scheme for parallel transmission lines including upfc. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 4, p. 1822–1830, Aug 2014. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 10.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D. Cross differential protection of double lines based on super-imposed current. p. 1–4, June 2005. ISSN 0537-9989. Citado na página 3.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D. Cross differential protection of double lines based on super-imposed current. In: *CIGRE 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–4. ISSN 0537-9989. Citado 5 vezes nas páginas 7, 10, 22, 23, and 24.
- WANG, Q. P.; DONG, X. Z.; BO, Z. Q.; CAUNCE, B. R. J.; APOSTOLOV, A. Application of percentage cross differential relay in ehv double lines. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 6, 10, 19, and 25.
- WANG, Q. P.; DONG, X. Z.; BO, Z. Q.; CAUNCE, B. R. J.; THOLOMIER, D.; APOSTOLOV, A. Protection scheme of cross differential relay for double transmission lines. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2697–2701 Vol. 3. ISSN 1932-5517. Citado na página 2.

WANG, Q. P.; DONG, X. Z.; BO, Z. Q.; CAUNCE, B. R. J.; THOLOMIER, D.; APOSTOLOV, A. Protection scheme of cross differential relay for double transmission lines. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2697–2701 Vol. 3. ISSN 1932-5517. Citado 5 vezes nas páginas 6, 10, 13, 25, and 58.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. A practical approach to line current differential testing. 2013. Citado na página 3.