

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
BASEADA EM ONDAS VIAJANTES QUANDO APLICADA EM LINHAS  
COM TRÊS TERMINAIS

CELSO ANTUNES DE SOUSA NETO

TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

CELSO ANTUNES DE SOUSA NETO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
BASEADA EM ONDAS VIAJANTES QUANDO APLICADA EM LINHAS  
COM TRÊS TERMINAIS

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

**APROVADO POR:**

---

**Prof. D. Sc. Felipe Vigolvino Lopes, UnB/ENE  
(Orientador)**

---

**Prof. D. Sc. Kleber Melo e Silva, UnB/ENE  
(Examinador interno)**

---

**M. Sc. João Paulo Gomes Ribeiro, UnB/ENE  
(Examinador interno)**

Brasília/DF, julho de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

NETO, CELSO ANTUNES DE SOUSA

Avaliação do Desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Três Terminais. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 117p., 210x297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2018).

Trabalho de Graduação Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Transmissão de energia em linhas  
com três terminais

3. Proteção baseada em ondas viajantes

I. ENE/FT/UnB

2. Linhas de transmissão multi-  
terminais

4. Elemento diferencial TW87

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NETO, C. A. S. (2018). Avaliação do desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Três Terminais. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Celso Antunes De Sousa Neto.

TÍTULO: Avaliação do desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Três Terminais.

GRAU: Graduação em Engenharia Elétrica ANO: 2018.

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

---

Celso Antunes De Sousa Neto  
Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT  
Universidade de Brasília (UnB)  
Campus Darcy Ribeiro  
CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

# AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, que me capacitou e fortaleceu para chegar até aqui.

A minha mãe Sulene, que me ligava depois das provas para saber o resultado, me ajudou nos momentos mais difíceis e sempre acreditou na minha capacidade.

A meu pai José Dias, que me deu todo suporte e orientação para crescer, acompanhando minha luta do início ao fim do curso.

Aos meus irmãos, Filipe e José Vitor, que me animavam durante os momentos complicados me dando força e coragem.

A minha namorada Ingrid Eline, que com carinho e companheirismo me ajudou a suportar todas as dificuldades.

A todos meus familiares pelo apoio e incentivo, que de forma especial contribuíram para este momento.

A todos os amigos que fiz durante o curso, ao João, Aloísio, Nayron, André, Rodrigo, Lucas, Marx e todos os outros, eles foram parte imprescindível da minha formação, obrigado pelas boas lembranças e inúmeras contribuições ao meu aprendizado.

Aos meus mestres, pelos ensinamentos fornecidos, em especial ao meu orientador Felipe Lopes que, com disposição e paciência, tornou a realização deste trabalho possível.

A todos os amigos que fiz ao longo da vida, que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, obrigado pela amizade e apoio.

## RESUMO

Devido à crescente demanda por energia elétrica em todos os setores da sociedade, estudar maneiras seguras e eficientes de montagem de linhas de transmissão tem sido o legado de muitos pesquisadores. As linhas de transmissão com três terminais consistem em um dos modelos estudados, uma solução usual para sistemas de energia e microrredes que fornecem cargas variáveis entre a fonte principal e a carga principal, apresentando uma solução para o abastecimento de pequenas cargas ao longo da linha, como indústrias ou comunidades, meio este, menos dispendioso que a construção de uma subestação. Todavia, as derivações feitas ao longo da linha alteram os perfis das correntes enxergadas nos terminais e dificultam a detecção de faltas.

Neste trabalho, a proteção diferencial baseada em ondas viajantes (TW87) quando aplicada em linhas de transmissão com três terminais é avaliada. Um relé comercial que implementa a função TW87 já está operando em linhas convencionais sem derivações. Para avaliar a TW87 neste tipo de linha várias condições de falta são analisadas, variando as fases envolvidas, localização da falta, resistência de falta, carregamento da linha e ângulo de incidência considerando diferentes ajustes da função de proteção. Para tanto, o software *Alternative Transients Program (ATP)* é utilizado para simular faltas em uma linha com três terminais, contando 200 km do centro para qualquer uma das três extremidades. Em todos os casos simulados as variáveis da TW87, o tempo de atuação e a estimação do local da falta são assistidos, validando o desempenho da função.

Palavras-chave: Linhas de transmissão com três terminais, proteção diferencial baseada em ondas viajantes, função TW87.

# ABSTRACT

Due to the increasing demand for electrical energy in all society sectors, studying safe and efficient ways of transmission lines assembly have been the legacy of many researchers. The transmission lines with three terminals consist in one of the studied models, an usual solution for energy systems and microgrids that supply variable loads between the main energy source and the main load, resulting in a solution to the supply of small loads along the line, like industries or communities, being this way less expensive than a substation building. However, the use of branches along the line changes the current on the terminals and makes difficult detecting the fault.

In this work, the differential protection based on traveling waves (TW87) when applied in transmission lines with three terminals is evaluated. One commercial relay which implements the TW87 is already operating in conventional lines, without derivations. To evaluate the TW87 in this type of lines a lot of fault conditions are analyzed, varying the involved phases, fault location, fault resistance, line loading and fault inception angle, considering different settings of the protection function. The software Alternative Transients Program (ATP) is used to simulate faults in a three terminals lines, with 200 kilometers from the tee point to any of the three terminals. In all simulated cases the TW87 variables, the operation time and the estimated fault location are assessed, validating the function performance.

Keywords: Transmission in three-terminal lines, traveling wave-based differential protection, function TW87.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS.....	6
2.2 ONDAS VIAJANTES .....	9
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 MODELOS DE LINHAS .....	14
3.1.1 Modelo a Parâmetros Concentrados .....	14
3.1.2 Modelo a Parâmetros Distribuídos .....	16
3.2 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	19
3.3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES .....	21
3.3.1 Reflexões e Refrações de Ondas Viajantes .....	21
3.3.2 Reflexões Sucessivas e Diagrama Lattice .....	22
3.4 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS.....	24
3.4.1 Efeito de Divisão da OV no Centro da LT com Três Terminais .....	26
4. PROTEÇÃO TW87 APLICADA EM LINHAS COM TRÊS TERMINAIS .....	28
4.1 FUNDAMENTOS DE ONDAS VIAJANTES APLICADOS A ALGORÍTIMOS DE PROTEÇÃO.....	28
4.2 LÓGICA DE OPERAÇÃO DA TW87 .....	33
4.3 ADAPTAÇÕES FEITAS À FUNÇÃO TW87 PARA LINHAS COM TRÊS TERMINAIS .....	37
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	41
5.1 SISTEMA ANALISADO .....	41

5.2 CASOS AVALIADOS .....	43
5.2.1 Caso 1 .....	45
5.2.2 Caso 2 .....	57
5.2.3 Caso 3 .....	66
5.3 FALTAS EXTERNAS .....	76
5.3 CARACTERÍSTICAS DA ATUAÇÃO.....	90
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	92
6.1 CONCLUSÃO .....	92
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94



# LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquemático de linha de transmissão com três terminais. Fonte: (NERC PLANNING, 2006).....	3
2.1	Diagrama de blocos do algoritmo de Aggarwal. Fonte: (MARCEL, 2006).....	7
2.2	Diagrama de Lattice para linha com três terminais. Fonte: (MARCEL, 2006).....	9
3.1	Modelo de LT curta a parâmetros concentrados. Fonte: (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).....	15
3.2	Modelo de LT média a parâmetros concentrados. Fonte (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010) com modificações.....	16
3.3	Modelo de LT a parâmetros distribuídos. Fonte: (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010) com modificações.....	17
3.4	Ondas progressivas e regressivas. Fonte: (LOPES, 2014).....	19
3.5	Registro oscilográfico real de uma falta monofásica em uma linha de 230 kV: (a) variações nas formas de onda de tensão; (b) variações nas formas de ondas da corrente. Fonte: (LOPES, 2014).....	20
3.6	Diagrama Lattice de reflexões de uma falta no ponto F de uma LT com comprimento $l$ . Fonte: (LOPES, 2014).....	22
3.7	Modelos de linhas com três terminais. Fonte (BOSTWICK e HARDER, 1943).....	25
3.8	Representação da divisão de correntes, provenientes de faltas, no centro da LT. Fonte: (NERC PLANNING, 2006) com modificações.....	26
4.1	Medidas de OV's incidentes nas barras 1 e 2 para: (a) Curto-circuito externo; (b) Curto-circuito interno. Fonte: (LOPES, SILVA, <i>et al.</i> , 2016) com modificações.....	29
4.2	Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados na teoria das OV's. Fonte: (SCHWEITZER, KASZTENNY, <i>et al.</i> , 2014) com modificações.....	32
4.3	Filtro Diff-Smooth: (a) janela de dados; (b) operação do filtro diferenciador. Fonte: (SCHWEITZER, KASZTENNY e MYNAM, 2015).....	32
4.4	OV's extraídas pelo filtro differentiator-smoother. Fonte: (LOPES, 2014).....	33

4.5	Definição das OVs de entrada e de saída para o elemento TW87. Fonte: (SCHWEITZER, KASZTENNY e MYNAM, 2015).....	34
4.6	Lógica de trip do elemento TW87. Fonte: (LOPES, SILVA, <i>et al.</i> , 2016).....	36
4.7	Denominação dos terminais da LT com três terminais. Fonte: (NERC PLANNING, 2006) com modificações.....	37
5.1	Modelo de linha simulado.....	42
5.2	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-2, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	45
5.3	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-2, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	46
5.4	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-2, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	46
5.5	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-2, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	47
5.6	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	49
5.7	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	50
5.8	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	51
5.9	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	51
5.10	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 2-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	53
5.11	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 2-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	54
5.12	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 2-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	55
5.13	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 2-3, com carregamento leve e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	55
5.14	Variação das correntes em função de Rf entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	57

5.15	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	58
5.16	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	58
5.17	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	59
5.18	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	60
5.19	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	61
5.20	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	61
5.21	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	62
5.22	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AB.....	63
5.23	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABC.....	64
5.24	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta ABT.....	64
5.25	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e $\theta = 90^\circ$ para uma falta AT.....	65
5.26	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AB.....	66
5.27	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABC.....	67
5.28	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABT.....	67
5.29	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AT.....	68
5.30	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AB.....	70

5.31	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABC.....	70
5.32	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABT.....	71
5.33	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AT.....	71
5.34	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AB.....	73
5.35	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABC.....	73
5.36	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta ABT.....	74
5.37	Variação das correntes em função de $\theta$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $R_f = 0$ para uma falta AT.....	74
5.38	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AB.....	76
5.39	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABC.....	77
5.40	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABT.....	77
5.41	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AT.....	78
5.42	Representação da divisão das OV's no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 1-2.....	79
5.43	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AB.....	81
5.44	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABC.....	81
5.45	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABT.....	82
5.46	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AT.....	83

5.47	Representação da divisão das OV's no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 1-3.....	84
5.48	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AB.....	85
5.49	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABC.....	86
5.50	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa ABT.....	86
5.51	Variação das correntes em função de $R_f$ entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e $\theta = 90^\circ$ para uma falta externa AT.....	87
5.52	Representação da divisão das OV's no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 2-3.....	88
5.53	Relação entre tempo de atuação e posição da falta.....	90

# LISTA DE TABELAS

4.1	Classificação do loop de falta.....	39
4.2	Correntes de loop.....	40
4.3	Lógica para detecção do trecho de falta.....	40
5.1	Dados da linha de transmissão modelada no ATP.....	42
5.2	Casos de falta analisados.....	43
5.3	Ajustes da função TW87.....	44
5.4	Localidade da falta detectada pela função TW87 quando aplicada aos terminais 1-2 para o Caso 1.....	48
5.5	Localidade da falta detectada pela função TW87 quando aplicada aos terminais 1-3 para o Caso 1.....	52
5.6	Localidade da falta detectada pela função TW87 quando aplicada aos terminais 2-3 para o Caso 1.....	56
5.7	Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-2 para faltas externas.....	80
5.8	Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-3 para faltas externas.....	84
5.9	Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 2-3 para faltas externas.....	88

# LISTA DE SIMBOLOS

$l$	Comprimento da linha de transmissão.
$f$	Frequência fundamental em Hz.
$c$	Velocidade da luz no vácuo.
$\gamma$	Constante de propagação da linha de transmissão em $m^{-1}$ .
$\omega$	Frequência angular fundamental em rad/s.
$Z_L$	Impedância característica da linha de transmissão
$R_L$	Resistência característica da linha de transmissão.
$X_L$	Reatância característica da linha de transmissão.
$Y_L$	Admitância da linha de transmissão.
$C_L$	Capacitância da linha de transmissão.
$g$	Condutância da linha de transmissão.
$v_L$	Tensão de fase no domínio do tempo.
$i_L$	Corrente na linha de transmissão no domínio do tempo.
$\alpha$	Constante de atenuação da linha de transmissão em Neper/m.
$\beta$	Constante de fase da linha de transmissão em rad/m.
$\hat{I}_{Xi}$	Fasor fundamental de corrente a uma distância X do terminal A para a i-ésima componente.
$\hat{V}_{Xi}$	Fasor fundamental de tensão a uma distância X do terminal A para a i-ésima componente.
$NL_{FIRST}$	Índice de amostra da primeira onda viajante no terminal local.
$NR_{FIRST}$	Índice de amostra da primeira onda viajante no terminal remoto.

$NL_{EXIT}$	Índice de amostra da onda viajante de saída no terminal local.
$NR_{EXIT}$	Índice de amostra da onda viajante de saída no terminal remoto.
$IL$	Magnitude das primeiras OV's incidentes no terminal local.
$IR$	Magnitude das primeiras OV's incidentes no terminal remoto.
$I_{DIF}$	Corrente de onda viajante de operação.
$I_{RST}$	Corrente de onda viajante de restrição.
$m_{87}$	Estimativa de localização de falta.
$R_f$	Resistência de falta.
$\delta$	Abertura angular entre as fontes.
$i_{pickup}$	Corrente de pick-up.
$i_{base}$	Corrente de base do sistema.
$SLP$	Slope de proteção da função TW87.
$K_{OV}$	Constante que determina limiar mínimo de detecção de ondas viajantes.
$d$	Distância de falta.
$\dot{V}_{Fn}$	Tensão fase-neutro.
$\dot{\phi}_{IF}$	Fluxo magnético gerado pela corrente de operação na bobina de corrente.
$\dot{I}_F$	Corrente de operação de fase.
$\dot{V}_{pol}$	Tensão de polarização aplicada na bobina de tensão.
$\dot{I}_{pol}$	Corrente de polarização gerada pela tensão de polarização aplicada à bobina de tensão.
$\dot{\phi}_{Ipol}$	Fluxo magnético da bobina de tensão.
$\tau$	Tempo de propagação da OV pela linha de transmissão.
$v_p$	Velocidade de propagação da OV pela linha de transmissão.
$T_{DS}$	Tamanho da janela de dados do filtro diferenciador (differentiator-smoother).



$\theta$	Ângulo de incidência da falta.
$i_{RT}$	Corrente de restrição.
$i_{OP}$	Corrente de operação.
$M$	Número de amostras da janela do filtro diferenciador (differentiator-smoother).
$I_{fT}$	Magnitude das primeiras OV's incidentes em cada terminal, por fase.
$I_{OVaT123}$	Soma das magnitudes das primeiras OV's incidentes em cada terminal para a fase A.
$I_{OVbT123}$	Soma das magnitudes das primeiras OV's incidentes em cada terminal para a fase B.
$I_{OVcT123}$	Soma das magnitudes das primeiras OV's incidentes em cada terminal para a fase C.
$FatorNorm$	Fator normalizante usado para classificar o loop de falta.
$I_{OVaT123norm}$	Representação, em p.u., da influência da fase A na falta.
$I_{OVbT123norm}$	Representação, em p.u., da influência da fase B na falta.
$I_{OVcT123norm}$	Representação, em p.u., da influência da fase C na falta.

# GLOSSÁRIO

LT	Linha de Transmissão
OV	Onda Viajante
OVs	Ondas Viajantes
SEP	Sistema Elétrico de Potência
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
EMTU	<i>Energy Management Terminal Unit</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
PAP	Ponta À Ponta
RDS	Relé Direcional de Sobrecorrente
SIR	<i>Source Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de Corrente
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
UnB	Universidade de Brasília
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O caminho que a energia elétrica faz até chegar ao consumidor final é altamente complexo e demanda o uso de um sistema elétrico de potência (SEP) bastante eficiente, no qual as linhas de transmissão (LT) aparecem como um dos elementos mais importantes, uma vez que são responsáveis pelo transporte dessa energia. No entanto, as LT, devido às grandes extensões, também estão muito suscetíveis a desligamentos decorridos de causas naturais, dentre os quais se destacam os curtos-circuitos, popularmente chamados de faltas (LOPES, 2014).

Boa precisão na identificação e localização de faltas poupam tempo e despesas excessivas no reparo do sistema, aumentando a confiabilidade e continuidade dos serviços (ROSOLOWSKI, 2010). Tal rendimento requerido das LT é consequência da crescente demanda por energia elétrica no mundo, visto que quase todos os setores da sociedade dependem de maneira vital do abastecimento da mesma. Por outro lado, tamanha estabilidade requerida tem impulsionado a busca por proteções de LT mais rápidas, e que não somente aumentam a confiabilidade dos SEP, mas também ampliam tanto a segurança pública quanto a segurança das equipes das concessionárias que operam a rede. Além disso, tais sistemas de proteção limitam o desgaste dos equipamentos, prolongam sua vida útil, melhoram qualidade da energia que chega ao consumidor final, reduzem os danos à propriedades e, por fim, possibilitam uma maior transferência de potência (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Nesse contexto, destacam-se os relés: dispositivos de proteção de SEP, que atuam na identificação e reparação de curtos-circuitos nas LT. A maioria destes dispositivos disponíveis no mercado se baseiam na análise de fasores fundamentais, salvo alguns que monitoram valores instantâneos dos sinais que, na maioria dos casos, funcionam de maneira a auxiliar a tomada de decisão, feita apenas após a análise das grandezas fasoriais. O problema surge, então, da necessidade de cálculo desses fasores, o que tradicionalmente requer um processo de

janelamento de amostras, que resulta em atrasos adicionais para envio de comando de abertura dos disjuntores. Esse atraso na identificação da falta pode acarretar grandes perdas econômicas às concessionárias, além de afetar diretamente o consumidor final com possíveis *blackouts*. Ademais, fontes não convencionais de energia, como usinas fotovoltaicas e eólicas não possuem inércia, como geradores hidroelétricos, e se conectam à rede por sistemas de eletrônica de potência que os protegem de eventuais faltas, mas que também podem interferir no funcionamento dos relés convencionais (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Uma solução para os problemas comentados acima seria uma função que observasse apenas valores instantâneos, melhorando a velocidade de atuação, mas que também não pudesse ser influenciada por fatores externos à falta, como interface da fonte com a linha ou uma possível compensação série. Nesse cenário, surgem então as proteções baseadas em ondas viajantes (OVs). A função de proteção diferencial TW87 é uma delas.

Sempre que uma perturbação acontece em qualquer que seja a organização física observada, ondas são propagadas ao longo da estrutura como resposta, de maneira proporcional às características da perturbação. Em linhas de transmissão, devido aos parâmetros distribuídos dessas, dá-se início à propagação de OVs, após a ocorrência de curtos-circuitos, ou seja, transitórios eletromagnéticos são transmitidos e refletidos nas barras a uma velocidade próxima à da luz, as quais podem ser analisadas para fornecer proteção rápida, com tempos de operação da ordem de 1 a 4 milissegundos em média (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Os relés comerciais que usam essa teoria para proteger SEP foram projetados inicialmente pensando em atender linhas com dois terminais, não havendo ainda comprovações reais de como seria seu funcionamento em outras topologias de rede de transmissão. Nesse contexto, surgem diversas topologias de LT, cada uma buscando a melhor solução, algumas vezes individual, para ligar a fonte geradora de energia à carga da maneira mais eficiente possível. Tais topologias tem evoluído em robustez e complexidade, dificultando a atuação dos relés de proteção que, mesmo modernos, não conseguem impor uma parametrização que atenda todas as mudanças topológicas da rede elétrica. Em particular, a proteção de linhas multiterminais pode ser afetada por estas circunstâncias.

Tipicamente, existem três principais configurações de linhas usadas industrialmente: linhas Radiais, compostas apenas de um terminal de carga, linhas de dois terminais, e linhas multiterminais. Dentre as possibilidades do último tipo, figura a linha com três terminais conforme ilustrado na Figura 1.1, também conhecidas como *tapped lines*, que é provavelmente

a configuração de linha mais proeminente deste segmento, sendo portanto estudada durante a realização deste trabalho (THORP, 2008).

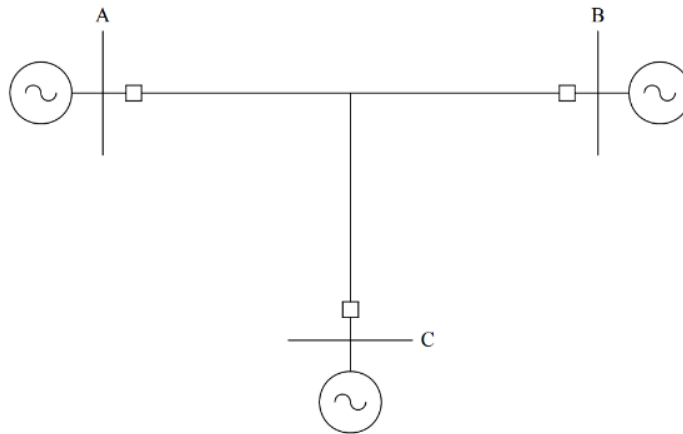


Figura 1.1 Esquemático de linha de transmissão com três terminais. Fonte (NERC PLANNING, 2006).

No Brasil não se pode instalar uma ramificação com ponto de geração sem a construção de uma subestação no ponto intermediário. Portanto, a derivação que leva ao terminal C na Figura 1.1 é, na maioria dos casos, o caminho para uma carga.

Há vários fatores que influenciam na decisão de construir uma LT com três terminais, economia, tempo restrito de construção, aprovações regulamentadoras, disponibilidades de direito de passagem, sobrecargas de linhas e requisitos de desempenho do sistema (NERC PLANNING, 2006).

- No âmbito econômico, derivar uma linha de maneira a construir um sistema com três terminais evita a construção de toda, ou parte, de uma subestação e normalmente reduz os gastos do projeto geral;
- Pode atender a demanda de energia de forma mais rápida;
- Aprovações regulamentadoras podem inviabilizar a construção de novas instalações, e uma saída seria a construção de linhas com três terminais, pois podem, na maioria das vezes, reduzir o impacto geral do projeto;
- Em sistemas específicos pode-se mitigar as possibilidades de sobrecarga na linha de transmissão devido a eventos de contingência única.

Contudo, o uso de linhas com três terminais é, na maioria dos casos, um *trade-off* entre economia e complexidade no sistema de proteção, ou seja, embora essas topologias apresentem

vantagem econômica, tal vantagem vem acompanhada da elevação na dificuldade em proteger o SEP. Isso porque a corrente flui de um terminal para os outros dois, afetando os níveis de tensão e corrente em toda a configuração e desafiando, assim, os principais métodos de proteção usados atualmente. Dessa forma, o uso então de uma proteção baseada no princípio diferencial de corrente é considerado o mais adequado à preservação dessas topologias, podem ser adaptados de forma a acomodar tais problemas, sem requerer grandes mudanças na filosofia de atuação dos dispositivos.

Dito isso, neste trabalho espera-se testar a função TW87 que, baseada nos princípios de ondas viajantes e grandezas incrementais no domínio do tempo, se encontra disponível através do dispositivo de proteção comercial T400L, da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2017) que, como dito anteriormente, foi projetado inicialmente para linhas com dois terminais.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O primordial objetivo deste trabalho é entender e testar o funcionamento da função TW87 através de simulações computacionais que venham a concluir, com propriedade, a aplicabilidade ou inaplicabilidade desta função em LT com três terminais. Para tanto, espera-se:

- Definir o que são LT com três terminais, assim como apresentar o conceito de proteção diferencial baseada em ondas viajantes;
- Avaliar as grandezas resultantes da aplicação da função, quanto à localização e detecção da falta pela função implementada;
- Simular, pelo *Alternative Transientes program* (ATP), a linha com três terminais, assim como a falta e suas diversas condições de ocorrência;
- Revisar trabalhos anteriores que tratem da topologia da linha aqui abordada e sobre proteção diferencial baseada em ondas viajantes.
- Identificar possíveis problemas quanto à implementação da proteção diferencial baseada em ondas viajantes em linhas com três terminais.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, é feita a revisão bibliográfica do tema, demonstrando os algoritmos de proteção atualmente aplicados em linhas de transmissão com três terminais, além de levantar o estado da arte em proteção diferencial baseada em ondas viajantes;
- No capítulo 3, é tratado sobre os conceitos teóricos dos modelos existentes de linha, incluindo as LT com três terminais, assim como os fundamentos físicos das ondas viajantes;
- No capítulo 4, trata-se da aplicabilidade da proteção TW87 em linhas com três terminais, seus fundamentos, lógica de operação e adaptações feitas para a aplicação desta função nesta nova topologia de linha.
- No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos a partir da implementação feita com as simulações em diferentes configurações de falta, assim como a avaliação destes resultados e validação da função de proteção TW87 em linhas com três terminais.
- Por último, no capítulo 6, dar-se conclusão à este trabalho e propõe-se temas futuros que possam dar continuidade a este estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesse capítulo segue um breve estudo sobre pesquisas que debatem temas relacionados a este trabalho. São apresentados os últimos métodos desenvolvidos para localização de faltas em linhas com três terminais, tanto baseado em ondas viajantes quanto em outros métodos. Além disso, detalha-se um pouco da evolução da teoria de ondas viajantes e em que nível essa tecnologia se encontra hoje.

### **2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS**

Os autores JOHNS e JAMALI (1990) propuseram uma técnica de localização de faltas em LT baseada em fasores fundamentais. Nela, a partir da análise dos sinais de correntes e tensões em regime permanente pós-falta nos terminais locais e remotos da linha, podia-se determinar a localização da falta. A representação da linha era feita por parâmetros distribuídos, que serão melhor explicados na seção 3.1.2. A localização da falta para este algoritmo não depende do conhecimento da impedância da fonte, nem da identificação do tipo de falta, mantendo um alto grau de precisão para linhas não transpostas e com erros mínimos para os casos avaliados na pesquisa.

Coincidentemente, no mesmo mês do ano seguinte, em KALAM e JOHNS (1991), um estudo propondo adaptações ao método do parágrafo anterior é apresentado, mas agora com a finalidade de proteger uma LT com três terminais (circuito T). Nele, dados de tensão e corrente são agora medidos em três terminais, para serem posteriormente filtrados e resultarem em fasores fundamentais em regime permanente. Diferente do método anterior, existe uma pequena interação da precisão do método com a resistência e tipo da falta, bem como com a impedância da fonte. Porém, a influência desses fatores não interfere significativamente na precisão do método. Ele atua consideravelmente bem e ainda apresenta vantagens quanto à não dependência de um pré-conhecimento da seção onde a falta ocorreu, tão pouco é afetado por erros inseridos por transdutores e/ou hardwares.



No ano de 1992, em GIRGIS, HART e PETERSON (1992), Girgis propõe uma técnica que pode ser aplicada tanto em linhas com dois terminais, como em linhas com três. O método, assim como os dois aqui já citados, se baseia na análise dos níveis de tensão e corrente medidos nos terminais da LT. Estes são utilizados em modo *on-line*, depois da operação dos relés, ou em modo *off-line*, por meio dos dados registrados na memória do relé. A desvantagem do método é a necessidade de sincronização dos dados entre os terminais para alcançar precisão elevada na localização da falta. Todavia, o artigo também traz um esquema que independe da sincronização dos dados, este porém eleva a porcentagem de erros, que chega à 2%, contra 0,5% encontrados a partir do método com dados sincronizados.

Em 1993, outro autor usa as ideias de JOHNS e JAMALI (1990) e propõe um método que usa formas de ondas filtradas pela Transformada Discreta de Fourier e teoria da superposição a partir de dados provenientes dos três terminais sincronizados, além da Transformada modal. A técnica é independente de variações na impedância da fonte, configurações da linha, inclusive quanto à transposição da linha, e da resistência de falta. O diagrama de blocos abaixo demonstra esse algoritmo (AGGARWAL, COURY, *et al.*, 1993).

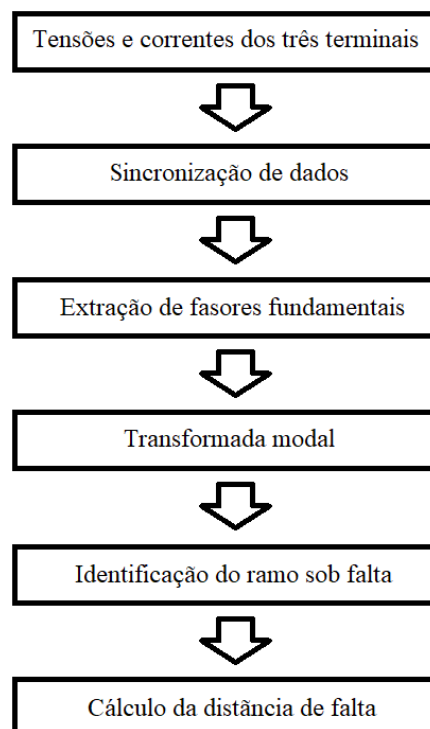


Figura 2.1 Diagrama de blocos do algoritmo de Aggarwal. Fonte: (MARCEL, 2006).

Diferentes configurações do circuito T foram simuladas e resultaram em um erro abaixo de 2%, comprovando a eficácia do método.

Já no primeiro ano do século seguinte, duas pesquisas de grande relevância foram lançadas por Gong e Chen, *et al.* (2000) e Lai, Vaseekar, *et al.* (2000). O primeiro usa um algoritmo obtido por meio de equações diferenciais que recebe como entrada os dados de corrente e tensão de dois ou três terminais, além disso, faz uso de GPS (*Global Positioning System*) para sincronizar os dados da maneira mais precisa possível. Já o segundo faz uso da transformada de *wavelet* e redes neurais e simulações em ambiente EMTU, concluindo que, a depender da *wavelet* mãe utilizada, os resultados obtidos são bem precisos.

Em 2002 surge mais uma abordagem sobre localização de falta em linhas com três terminais. De acordo com o exposto em Lin, Liu e Yu (2002), o método propõe utilizar unidades de medição fasorial (PMUs), bem como os dados medidos em dois dos três terminais da LT. Diferentes cenários de falta foram simulados em ambiente EMTU e ATP e demonstraram boa acurácia na localização e identificação de faltas.

Ao longo dos anos seguintes alguns métodos que usam dados de corrente e tensão obtidos dos três terminais da linha surgiram. É o caso de Brahma (2005), que apresenta um esquema em dois estágios, no qual o primeiro analisa as medidas nos terminais e identifica o trecho faltoso e o segundo localiza a falta a partir da sincronização dos dados. É o caso também de Liu, Lien, *et al.* (2008) que propõem um esquema para localização de faltas não só para uma linha com três terminais, mas para  $N$  terminais, desde que  $N$  seja maior ou igual à três.

No ano de 2005, pesquisas baseadas na teoria de ondas viajantes aplicadas à proteção de LT com três terminais também foram publicadas. Em Evrenosoglu e Abur (2005) os autores propõem um algoritmo de localização de falta para LT com três terminais que atua em dois passos, semelhante ao descrito no parágrafo anterior, o primeiro identifica o ramo defeituoso e o segundo localiza a falta. Este método utiliza a transformada *wavelet*, através dela é possível comparar o modo aéreo dos três terminais, pois normalmente o de maior amplitude é o ramo da LT sob falta. A detecção do local da falta pode ser feita a partir das reflexões, tempos e índices das ondas incidentes sobre os terminais. Tal ideia pode ser melhor explicada pela imagem que se segue.

O diagrama abaixo será melhor detalhado na seção 3.3.2.

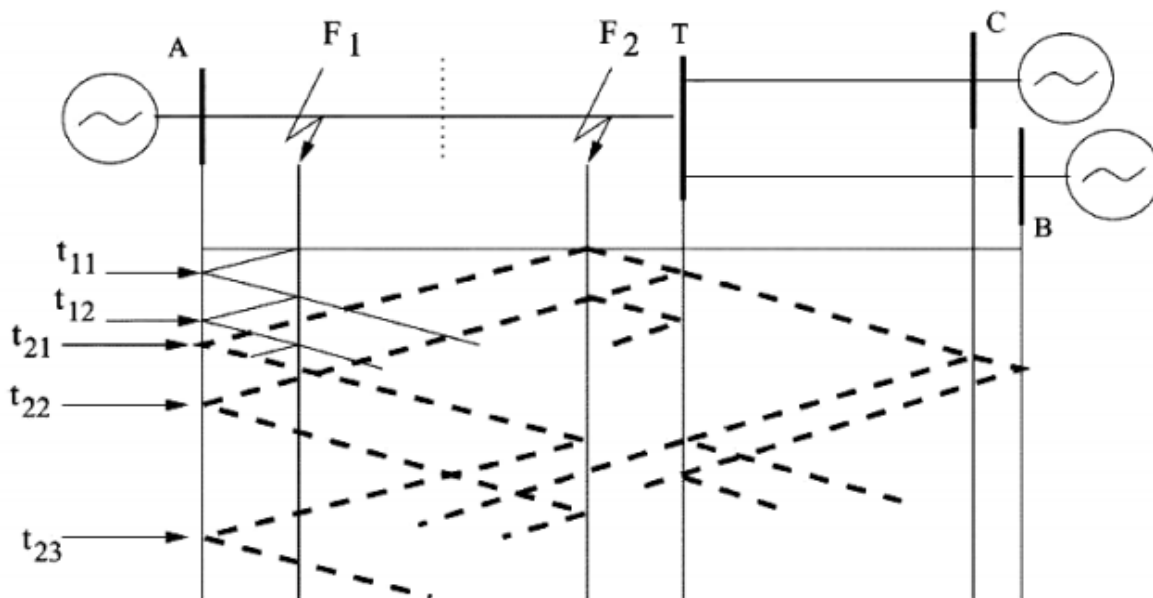


Figura 2.2 Diagrama de Lattice para linha com três terminais. Fonte: (MARCEL, 2006).

Outro trabalho marcante correlacionado a esse tema foi Silva e Coury, *et al.* (2008). No qual o método, baseado nos níveis de ruído do sinal recebido na entrada, “decide” qual esquema de proteção usar, o fundamentado nas componentes de alta frequência do sinal faltoso ou nas componentes de baixa frequência, ou seja, pelo método de ondas viajantes ou por frequência fundamental. A desvantagem se apresenta novamente sob a forma da necessidade de sincronização precisa entre os dados dos terminais, onde a transformada *wavelet* é usada para extrair as componentes de alta e baixa frequência da falta.

Por fim, conclui-se a inexistência de trabalhos que simulam a atuação do relé comercial TW87 numa LT com três terminais. Além disso, proteções baseadas em LT deste modelo ainda são pouco exploradas. Estes dois fatores contribuem para a importância desse trabalho que, por fim, tentará somar mais um método eficiente ao estado da arte em proteção de LT tipo circuito T.

## 2.2 ONDAS VIAJANTES

Embora os SEP tenham seguido um crescimento relevante nas últimas décadas, a pesquisa por métodos não convencionais de proteção de LT que possibilitem a transmissão de grandes blocos de energia elétrica é bem mais antiga. Na década de 1930, por exemplo, L. V. Bewley condensa os recentes estudos produzidos na época sobre ondas viajantes, resultantes do trabalho de pesquisadores representativos e percussores deste tema, como Oliver Heaviside, C. P. Steinmetz, W. Peterson, K. W. Wagner, R. Pfiffner, R. Rudenberd, e alguns outros (BEWLEY, 1933). Esta publicação foi bastante expressiva na época e desencadeou uma série de outros estudos nas décadas seguintes.

Na década de 70 em Dommel e Michels (1978), por exemplo, o estudo dos transitórios eletromagnéticos transmitidos na LT após uma perturbação da rede, seja pela mudança de posição nos disjuntores ou faltas ao longo da linha, foram fonte de inspiração para novas tecnologias de proteção de SEP. Contudo, nesta época ainda vigorava o uso de dispositivos analógicos, o que impossibilitava a observação perfeita dos transitórios, já que esta requer altas taxas de amostragem, o que só foi possível somente no final do século XX, mais precisamente na década de 1990, com o advento e popularização dos dispositivos digitais.

Com a disponibilidade e facilidades que os dispositivos digitais podiam oferecer, foi proposto em Gale e Crossley, *et Al.*, (1993) algumas expressões que serviriam para determinar a localização das faltas a partir de alguns dados de entrada, como a velocidade de propagação das OV's, tamanho da linha de transmissão e instante inicial da leitura dos transitórios no terminal monitorado. Além disso, os autores classificaram os métodos de localização de faltas em três grupos, de acordo com a utilização ou não de pulsos elétricos para a localização da falha, reflexão das ondas nos terminais e no ponto de falha e número de terminais monitorados. Por último, uma análise da confiabilidade de cada grupo foi feita e constatou-se que sistemas de proteção com monitoramento de apenas um terminal, embora sejam independentes da sincronização de dados, são mais propensos a erros, pois por dependerem de ondas refletidas no ponto da falta, pode haver confusão ao diferenciar estas ondas de outras refletidas e/ou refratadas em outros pontos do SEP. Dessa forma, mesmo dependendo da sincronização de dados da rede, elegeu-se como mais confiável o método de localização de falta a partir da visualização dos transitórios de falta em dois terminais, ou seja, que não requerem uso de pulsos elétricos, mas baseiam-se apenas nos primeiros transitórios eletromagnéticos transmitidos após o curto. Esse método depende apenas da percepção exata do momento de chegada da primeira onda viajante em cada terminal, o que não é difícil já que essas ondas não existem antes de ocorrer a falta, tornando o sistema mais robusto, simples e menos susceptível a erros.

Em Shehab-Eldin e Maclaren (1988) é proposto ainda um estudo, com base no esquema de localização de faltas de um terminal, sobre problemas relacionados a distinção entre as ondas refletidas no ponto de falta a as refletidas no terminal remoto da LT, através de uma função de correlação composta que analisa o tamanho da janela de dados na influência da determinação da onda refletida. Um fator corretivo é aplicado para compensar a diminuição da magnitude do sinal em relação ao ângulo de incidência de falta, fazendo com que seja independente da resistência de falta, mas dependente da distância desta.

Nos anos seguintes uma série de trabalhos foram publicados na tentativa de mitigar a fonte de erros desta metodologia, acompanhando a modernização dos sistemas digitais que permitiam uma visualização cada vez mais precisa dos transitórios possibilitando a identificação correta das ondas incidentes nos terminais e seus instantes de chegada. Dessa forma, consolidou-se a teoria das ondas viajantes como sendo uma maneira muito eficaz na identificação de faltas, com velocidade de detecção ultra-rápida e taxas de erro baixas. Uma dessas tentativas foi proposta em Jian, Xiangxun e Jianchao (1998) através da consideração de diferentes velocidades de propagação para ondas progressivas e regressivas. Neste método uma análise espectral dos sinais medidos nos terminais da LT é feita de maneira a determinar as principais frequências das ondas a serem analisadas. Após isso determinam-se os parâmetros da linha para então estimar as velocidades de propagação, aumentando a precisão do método. Contudo, analisar os espectros do sinal aumenta a complexidade do sistema de localização de falta, além de gastar um tempo precioso quando se fala em reparar o curto.

Já no século XXI, em Gilany, Ibrahim e Eldin, (2007) um método que dispensa a determinação das velocidades de propagação das OV's foi proposto, todavia, ele se baseia na reflexão de ondas no ponto de falta, que como já dito anteriormente, pode ser uma fonte de erro do sistema devido à facilidade em confundir ondas refletidas neste ponto com outras ondas refletidas e/ou refratadas por outros pontos da LT. No ano seguinte um outro modelo de detecção baseado em três terminais que dispensava o conhecimento preciso das velocidades de propagação das OV's foi proposto, todavia, o tempo necessário para a análise oscilográfica advinda dos três terminais em série juntamente com consideração de velocidade iguais de propagação em todos os trechos da LT acrescentavam erros e complexidade ao sistema de localização de faltas, que em alguns casos não justificava seu uso (FENG, JUN, *et al.*, 2008).

Mais recentemente, métodos de dois terminais com visualização em tempo real, com e sem sincronização de dados, vêm sendo desenvolvidos, como em Costa e Souza (2011) e Lopes (2014).

Percebe-se então um desenvolvimento bastante expressivo nas últimas décadas de tecnologias para detecção de faltas em SEP baseados na teoria de ondas viajantes. Além disso, houve um tempo para consolidação desta tecnologia, já que, como mencionado nos parágrafos anteriores, datam do começo do século passado. Os pesquisadores puderam validar suas propostas através de simulações reais e computacionais, abrindo assim precedente para o desenvolvimento de dispositivos físicos que se baseiam somente na análise de transitórios eletromagnéticos, trazendo rapidez na detecção de faltas sem perda de confiabilidade do sistema de proteção.

Diante do exposto a empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) lança no ano de 2014 um documento expondo a rapidez e confiabilidade que seria possível alcançar num dispositivo que, no domínio do tempo, se baseasse apenas nos parâmetros distribuídos da linha, deixando de lado os métodos mais tradicionais que se baseiam nos fasores de corrente e tensão, e permitindo tempos de operação próximos de 1 milissegundo. Tudo isso, porém, só se tornou possível com o advento da eletrônica digital aplicada a sistemas de potência, já para chegar nesse nível de velocidade de atuação o método se baseia nos parâmetros distribuídos da linha e tomam vantagem no espectro de frequência, que pode chegar a centenas de quilohertz (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

No ano seguinte a SEL apresenta uma continuação desse estudo, agora ilustrando o funcionamento de um dispositivo real (T400L) com vários elementos, sendo um de seus principais o elemento diferencial baseado em ondas viajantes (TW87), uma função que recebe os dados instantâneos da rede e, após uma filtragem destes, consegue detectar OV's incidentes nos terminais da LT, de maneira a determinar o local e o tipo da falta com um mínimo de erro. Detalhes importantes à implementação computacional desta função são fornecidos no documento da Schweitzer e possibilitaram a realização das simulações feitas neste trabalho de graduação. (SCHWEITZER, KASZTENNY e MYNAM, 2015).

Usando as orientações dos artigos citados nos últimos dois parágrafos, pesquisadores da Universidade de Brasília desenvolveram uma análise da sensibilidade paramétrica da função TW87 por meio de mais de duas mil simulações no ATP, concluindo que os ajustes da função influenciam diretamente na sensibilidade da mesa. Para ajustes que resultam na TW87 mais

sensível a função atuou em 100% dos casos, porém para ajustes mais conservadores observou-se uma pequena redução nos seus limites de sensibilidade, porém sem comprometer seu funcionamento. Uma análise de tempo também foi feita e chegou-se à atuações na ordem de 0,7 milissegundos (LOPES, SILVA, *et al.*, 2016).

Em 2017 um manual do relé comercial T400L foi publicado e as atualizações presentes nesse foram inseridas neste trabalho de maneira que as simulações ficassem o mais próximas possível do proposto neste documento (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2017). Contudo, trata-se de uma tecnologia relativamente nova, com poucos dispositivos disponibilizados no mercado e, em se tratando da TW87, sem precedentes de utilização real ou computacional em linha com três terminais, realidade essa que motiva a realização deste trabalho.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo, expõe-se uma caracterização da transmissão de energia elétrica por LT. Em resumo, é apresentado o modelo matemático que representa uma LT, aspectos relacionados a faltas em um SEP, métodos de localização de faltas e os atributos de uma LT com três terminais, assim como a problemática de métodos convencionais aplicados para localização de faltas nesta topologia.

### **3.1 MODELOS DE LINHAS**

Nos campos de estudo da engenharia, assim como da física, biologia, química, ou qualquer outra área que busque o entendimento de processos e sistemas, faz-se uso de modelos que os descrevam matematicamente. Dessa forma, é possível avaliar seu desempenho e analisar sua complexidade e possíveis falhas. Na transmissão de energia elétrica não é diferente, modelos de LT são feitos para descrever seu funcionamento e através deles métodos de localização de falta são elaborados, os quais têm precisão diretamente proporcional à fidelidade com que os modelos representam as LT (LOPES, 2014).

Muitos fatores presentes nas linhas dos SEP podem influenciar esses modelos, desde a construção (linha aérea ou a cabo subterrâneo, materiais usados, geometria da linha), nível de tensão (geralmente alta ou média), configuração da rede (circuito único, duplo, linhas com dois ou mais terminais), compensação de reatância (sem compensação ou com compensação em série), entre outros. De fato, há bastante complexidade associada à criação dos modelos, mas de maneira geral eles são divididos em dois, e estes servem como base principal aos métodos de localização de faltas: modelo a parâmetros concentrados e modelo a parâmetros distribuídos (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).

#### **3.1.1 Modelo a Parâmetros Concentrados**



No modelo simplificado de uma linha curta aérea com parâmetros concentrados somente a resistência  $R_L$  e a reatância  $X_L$  são consideradas, conforme sugerido na Figura 3.1. Dessa forma, uma impedância em série  $Z_L$  é representada no modelo, e esta é calculada conforme a observação da frequência fundamental do SEP. Em vista disso, desconsidera-se o efeito capacitivo da LT, tornando o modelo ideal apenas para a representação de linhas curtas, geralmente com menos de 80km de extensão (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).

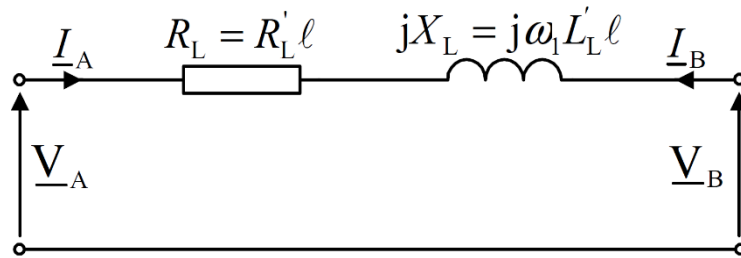


Figura 3.1 Modelo de LT curta a parâmetros concentrados. Fonte: (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).

Na Figura 3.1, os seguintes sinais e parâmetros são usados:  $V_A$  e  $V_B$  são as tensões nos terminais A e B,  $I_A$  e  $I_B$  são as correntes nos terminais A e B,  $R_L$  e  $L_L$  são a resistência e a reatância por unidade de comprimento da linha,  $l$  é o comprimento da linha e, por último,  $\omega_1$  é a frequência angular fundamental do SEP.

Sob condições equilibradas de operação e de perfeita transposição, a impedância  $Z_L$  de um sistema trifásico pode ser descrita conforme a matriz 3x3 abaixo:

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LP} & Z_{LM} & Z_{LM} \\ Z_{LM} & Z_{LP} & Z_{LM} \\ Z_{LM} & Z_{LM} & Z_{LP} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

onde a diagonal principal representa a impedância própria dos condutores de fase e os demais elementos da matriz representam a impedância mútua entre dois condutores de fase. Dados por:  $Z_{LM} = (Z_{L0} - Z_{L1})/3$  e  $Z_{LP} = Z_M + Z_{L1}$ , sendo  $Z_{L0}$  e  $Z_{L1}$  as impedâncias de sequência zero e positiva da LT, respectivamente, para isso as seguintes condições devem ser satisfeitas:  $Z_{Lba} = Z_{Lab}$ ,  $Z_{Lca} = Z_{Lac}$ ,  $Z_{Lcb} = Z_{Lbc}$  (LOPES, 2014).

Já para linhas um pouco mais longas, entre 80 e 250 km de comprimento, geralmente adiciona-se uma admitância em paralelo com a fonte ao modelo de parâmetros concentrados da LT. A parte real da admitância, a condutância, é comumente desprezada, sobrando apenas a parte imaginária, ou seja, as capacitâncias que surgem entre os condutores carregados e o solo.

Usualmente, divide-se a admitância em duas parcelas iguais, postas uma em cada extremo da linha, conforme ilustrado na Figura 3.2 (LOPES, 2014).

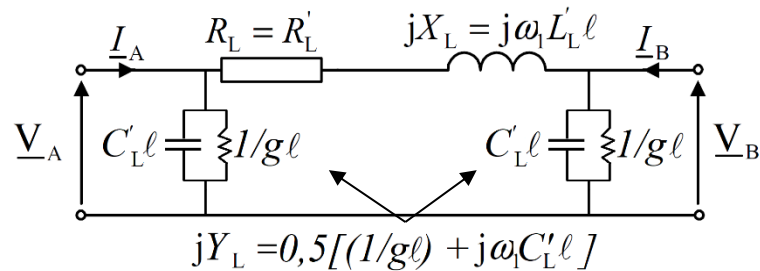


Figura 3.2 Modelo de LT média a parâmetros concentrados. Fonte (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010) com modificações.

Onde  $Y_L$  é a admitância da linha,  $g$  é a condutância e  $C_L$  é a capacitância, todas estas grandezas são dadas por unidade de comprimento da linha.

Outro fato importante a ser comentado sobre o modelo de parâmetro concentrados é que, por representar a linha com seus fenômenos concentrados em um único ponto, considera-se o tempo de propagação de variações ao longo da linha como nulo, ou seja, variações em A seriam instantaneamente percebidas em B. Todavia, isso não acontece na prática, já que oscilações medidas no terminal A exigem um certo tempo de trânsito pela linha para que possam ser percebidas no terminal oposto. Essa consideração não pode ser feita para linhas longas, uma vez que para estas um tempo maior de propagação das variações entre os terminais é exigido, o que interfere diretamente no comportamento do modelo (LOPES, 2014).

### 3.1.2 Modelo a Parâmetros Distribuídos

Para linhas médias e curtas, o modelo a parâmetros concentrados é suficiente, mas para descrever linhas de longas distâncias faz-se necessário o modelo a parâmetros distribuídos. De fato, para esse tipo de linha o comprimento não é mais desprezível e seu efeito de propagação de ondas deve ser levado em consideração. Como consequência disso a tensão  $v_L$  e a corrente  $i_L$  passam a ser funções do tempo e comprimento da linha,  $v_L = (x, t)$  e  $i_L = (x, t)$ . Os efeitos de resistência, indutância e capacitância continuam presentes de maneira semelhante ao já discutido no modelo a parâmetros concentrados (LEÃO, 2009).

Como pode ser observado na Figura 3.3, o modelo é formado pela adição de vários elementos incrementais de uma LT monofásica de comprimento  $\Delta x$ , a resistência e indutância série, assim como a capacitância shunt são representadas, respectivamente, por  $R'_L, L'_L$  e  $C'_L$ . Na Figura 3.3, o ponto X em destaque representa o local da medição de tensão e corrente,  $v_L = (x, t)$  e  $i_L = (x, t)$ .

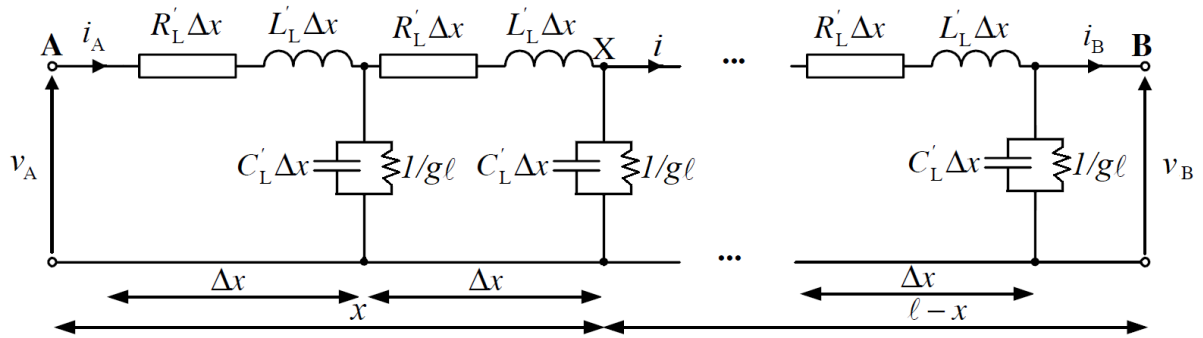


Figura 3.3 Modelo de LT a parâmetros distribuídos. Fonte: (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010) com modificações.

Tais tensões e correntes dependem dos parâmetros  $R'_L, L'_L$  e  $C'_L$ , no ponto X, da linha da seguinte maneira:

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = R'_L \cdot i(x, t) + L'_L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial x}, \quad (3.2a)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g \cdot v(x, t) + C'_L \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial x}. \quad (3.2b)$$

A solução das equações apresentadas dá origem a um conjunto de expressões equivalentes, usualmente conhecidas como *equações telegráficas*, que descrevem as variações de  $v_L = (x, t)$  e  $i_L = (x, t)$  no espaço e no tempo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} &= R'_L \cdot g \cdot v(x, t) + (R'_L \cdot C'_L + L'_L \cdot g) \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \\ &+ L'_L \cdot C'_L \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (3.3a)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = R'_L \cdot g \cdot i(x, t) + (R'_L \cdot C'_L + L'_L \cdot g) \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + L'_L \cdot C'_L \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (3.3b)$$

Para  $R'_L$  e  $g$  iguais a zero, ou seja, uma linha sem perdas, obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = L'_L \cdot C'_L \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3.4a)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = L'_L \cdot C'_L \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3.4b)$$

mais conhecidas como equações de onda das tensões e correntes.

De maneira simplificada, para uma linha sem perdas, a solução geral do sistema de equações exposto nas expressões 3.4 pode ser:

$$v(x, t) = f_1 \left( t - \frac{x}{v_p} \right) + f_2 \left( t + \frac{x}{v_p} \right), \quad (3.5a)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_C} \left[ f_1 \left( t - \frac{x}{v_p} \right) - f_2 \left( t + \frac{x}{v_p} \right) \right], \quad (3.5b)$$

onde  $Z_C = \sqrt{\frac{L'_L}{C'_L}}$  e  $v_p = \sqrt{\frac{1}{L'_L \cdot C'_L}}$  correspondem, respectivamente, à impedância de surto da linha e à velocidade de propagação das ondas viajantes pelos condutores da linha, ainda para o modelo sem perdas, com  $R'_L$  e  $g$  iguais à zero.

O método de ondas viajantes foi aplicado para resolução das Equações vistas em 3.4, resultando nas expressões contidas em 3.5, estas, por sua vez, representam a superposição de duas ondas, as funções  $f_1$  e  $f_2$ , que podem ser interpretadas como pulsos eletromagnéticos se propagando do ponto de variação até os terminais das linhas. As ondas  $f_1$  e  $f_2$  são classificadas em progressivas ou regressivas de acordo com a direção de sua propagação. Geralmente, estabelece-se um terminal local e outro remoto, de forma que a onda que se lança ao terminal

remoto é dita progressiva, e a que se lança em direção ao terminal local é chamada regressiva (LOPES, 2014).

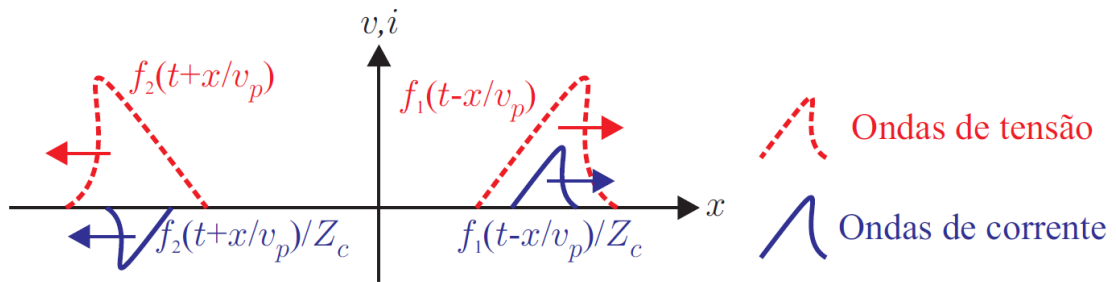


Figura 3.4 Ondas progressivas e regressivas. Fonte: (LOPES, 2014).

O ponto X representado na Figura 3.3 pode ser visto como um ponto de falta, que causa variações nos níveis de tensão e corrente da LT, dessa forma, as ondas  $f_1$  e  $f_2$  se propagam pela linha do ponto de defeito até os terminais carregando a informação dessa variação. Como sugerido antes, fica claro agora que as ondas devem percorrer um comprimento de linha  $x$  ou  $(\ell - x)$  antes que cheguem até um dos terminais em questão, dessa forma o modelo a parâmetros distribuídos se faz necessário, pois contempla tal característica da linha.

## 3.2 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Faltas, ou curtos circuitos, são o principal motivo para desligamento não programados de SEP, o que implica em perda na transferência de potência, dano aos equipamentos, possíveis acidentes aos operários, entre outras contrariedades. É de inteiro interesse das concessionárias, então, sanar tais eventos o mais rápido possível. Para que isso ocorra a primeira coisa que deve acontecer é a identificação da falta.

Existe, porém, uma certa facilidade na identificação do momento inicial do episódio da falta já que os parâmetros ( $R$ ,  $L$ ,  $g$  e  $C$ ) se mantêm praticamente constantes, variando apenas em decorrência de pequenas oscilações climáticas ou de vegetação no local onde a linha aérea está instalada. Por outro lado, a mudança nos parâmetros da linha em decorrência de um curto-circuito é de altíssima relevância e abrupta, acontecendo em um período curtíssimo de tempo, gerando sobretensões sustentadas, com amplitudes que dependem do aterramento do SEP e das características de operação (ZANETTA JR, 2003).

As faltas podem ser classificadas de acordo com o número de fases envolvidas no curto circuito, são elas: faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra ou trifásicas. Dentre as mais comuns figuram as faltas monofásicas, menos agressivas e com maior incidência, aproximadamente 65% de ocorrência no sistema Chesf, e as faltas bifásicas para o terra, estas são mais severas, porém acontecem com menor frequência, 25% dos relatos também no sistema Chesf (SOUZA, BRITO, *et al.*, Julho 2004).

Pela teoria apresentada até aqui é sabido que quando uma falta ocorre, transitórios são propagados ao longo do circuito e podem ser lidos nos terminais da linha, conforme a Figura 3.5, que apresenta registros reais nas variações oscilográficas das formas de onda da corrente e da tensão em uma fase do SEP monitorado durante o surgimento e isolamento da falta (LOPES, 2014). Vale ressaltar ainda que a amplitude desses transitórios eletromagnéticos será proporcional às características da falta, principalmente do ângulo de incidência sobre a onda de tensão e da distância da falta (PAULO, 2001).

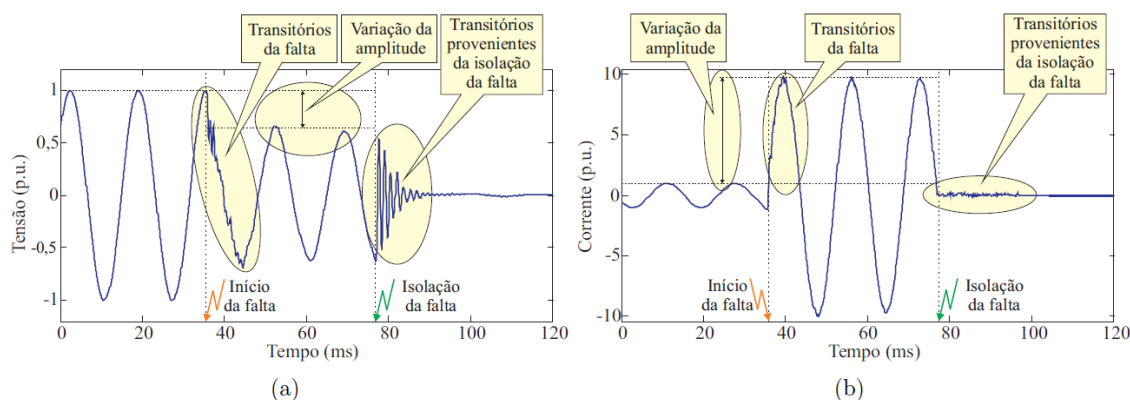


Figura 3.5 Registro oscilográfico real de uma falta monofásica em uma linha de 230 kV: (a) variações nas formas de onda de tensão; (b) variações nas formas de ondas da corrente. Fonte: (LOPES, 2014).

Pela análise dos registros oscilográficos durante e após o acontecimento da falta, pode-se chegar a informações como resistência da falta, local do curto, fases envolvidas (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOŁOWSKI, 2010). Dados estes imprescindíveis à isolação da falha, portanto, tal análise das variações de corrente e tensão compõe a base para os métodos de localização de faltas, inclusive o método trabalhado neste documento.

### **3.3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

Da seção 3.1.2 viu-se que qualquer distúrbio (tal como provocados por curtos-circuitos, descargas atmosféricas ou alguma perturbação que tire o SEP das condições normais de operação) em um ponto da LT dá origem a ondas viajantes que se propagam no sentido das extremidades da linha, com velocidade a depender das características da linha, mas que costuma ser bem próxima à da luz ( $\cong 3 \cdot 10^8 m/s$ ) em linhas aéreas. Estas ondas também estão sujeitas a descontinuidades físicas do sistema que provocam sua refração ou reflexão. Dependendo das particularidades destas descontinuidades, este processo interativo permanece acontecendo até que a falta seja isolada e as ondas sejam atenuadas devido às perdas na linha, chegando à sua extinção e retornando ao regime permanente do distúrbio (SILVA, 2003; SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010).

#### **3.3.1 Reflexões e Refrações de Ondas Viajantes**

Durante o percurso percorrido pela OV, uma série de elementos do SEP podem interferir nesse caminho. Estes elementos são interpretados como descontinuidades, ou seja, pontos de transição no qual há uma súbita mudança nos parâmetros da linha, a exemplo tem-se: transformadores ou enrolamentos de máquinas, junção com uma outra LT com parâmetros diferentes ou com outro número de circuitos, terminais abertos ou em curto, etc. Classificam-se então as OVs de acordo com seu comportamento após atingir tais descontinuidades, podendo ser refletidas de volta ou refratadas para outra parte do circuito. A onda que chega no terminal é dita onda incidente, já as duas ondas advindas da descontinuidade são chamadas refletidas e refratadas. As leis de Kirchhoff continuam válidas durante a análise dessas ondas. Estas também satisfazem as equações diferenciais propostas na seção 3.1.2 e os princípios de conservação de energia (BEWLEY, 1933)

### 3.3.2 Reflexões Sucessivas e Diagrama Lattice

Há vários casos no estudo de LT em que as sucessivas reflexões das OV nas descontinuidades do SEP são relevantes, seja para processos localização de faltas ou proteção. A análise dessas reflexões é um processo razoavelmente complicado. Porém, como forma de simplificar o problema, Bewley (1933) desenvolveu uma técnica de análise gráfica denominada diagrama de *Lattice* ou diagrama espaço-tempo, norteando diversos estudos que envolvam OV em LT. Através dele é possível observar a posição e a direção de cada OV (incidente, refletida e refratada) em relação ao instante de tempo, possibilitando a visualização do histórico da onda e de previsões de posição. Além disso, uma vez conhecendo os efeitos de atenuação e distorção da onda, pode-se inclui-los ao diagrama. Este diagrama é exemplificado na Figura 3.6 (BEWLEY, 1933; NAIDU, 1985; LOPES, 2014).

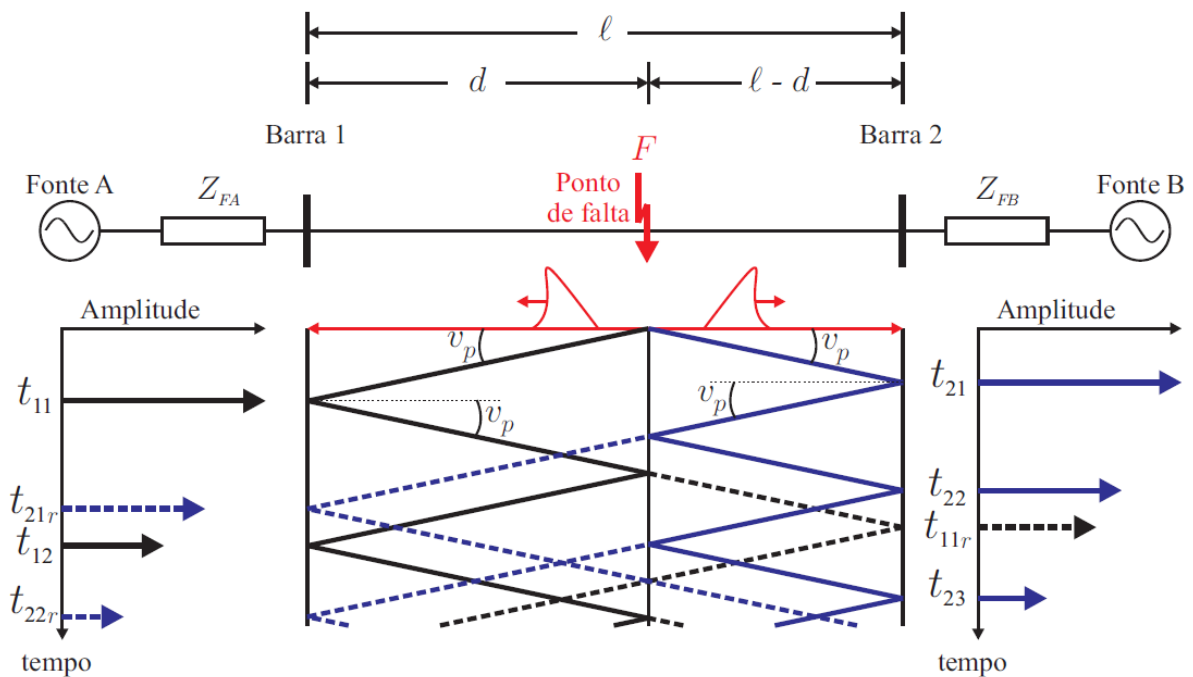


Figura 3.6 Diagrama Lattice de reflexões de uma falta no ponto  $F$  de uma LT com comprimento  $\ell$ . Fonte: (LOPES, 2014).

No diagrama acima é possível ver a geração de ondas progressivas e regressivas a partir de um ponto de falta  $F$ , a uma distância  $d$  do terminal local (Barra 1), em uma LT de extensão  $\ell$ . Sendo  $t_{11}$  e  $t_{21}$  o momento de chegada das ondas incidentes nas barras 1 e 2, respectivamente,



$t_{12}$ ,  $t_{22}$  e  $t_{23}$  os instantes de tempo de reflexão das ondas nas barras e, por último,  $t_{21r}$ ,  $t_{22r}$  e  $t_{11r}$  os momentos de refração das ondas (LOPES, 2014).

A complexidade em analisar o diagrama vai aumentando proporcionalmente à duração do intervalo de tempo considerado, já que sempre que uma onda atinge uma descontinuidade, dá origem a uma nova onda refletida e outra refratada. Alguns problemas exigem a análise de várias descontinuidades, aumentando ainda mais a complexidade e justificando assim o uso deste diagrama.

Como dito anteriormente, os métodos baseados em ondas viajantes são elaborados com base no diagrama de Lattice. De fato, conhecendo os instantes de incidência das ondas sobre os terminais monitorados, o comprimento total da linha e velocidade de propagação das ondas, é possível determinar a distância  $d$  entre a barra 1 e o local da falta de acordo com a seguinte equação:

$$d = \frac{l - c(t_{21} - t_{11})}{2}, \quad (3.6)$$

onde  $l$  é o comprimento total da linha e  $c$  é a velocidade de propagação das OV's, descrita pela expressão:  $c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , conforme demonstrado na seção 3.1.2.

Assim, o evento determinante para o funcionamento dos métodos baseados em ondas viajantes é a detecção dos transitórios de faltas no domínio do tempo, exigindo uma comunicação em tempo real entre os terminais, caso haja mais de um terminal sendo monitorado. Pensando nisso, a precisão do método está diretamente ligada à confiabilidade do instante de tempo entendido como momento da incidência da onda sobre o terminal, o que tem incentivado vários trabalhos dedicados a propor soluções que melhorem esse processo de detecção de transitórios (LIN, JUN, *et al.*, 2008; SILVA, COURY, *et al.*, 2008; COSTA, SOUZA e BRITO, 2008).

Uma alternativa à forma de localização de onda dita nos parágrafos anteriores é analisar as frequências dominantes das OV's incidentes nos terminais da LT ao invés de tempos de incidência. Estes levam vantagem por não requererem sincronização de dados entre os terminais monitorados, visto que não necessitem da análise no domínio do tempo (LOPES, 2014). Nota-se que quão mais longe for a falta do terminal monitorado, menor é o número de reflexões das OV's entre o ponto de medição e o ponto de falta, resultando em uma menor frequência dominante dos transitórios advindos do distúrbio e de sua isolação. É possível, então, relacionar

matematicamente a distância entre o ponto de falta e o terminal monitorado pela frequência dominante dos transitórios de falta (SAHA, IZYKOWSKI e ROSOLOWSKI, 2010; FAYBISOVICH, FEIGINOV e KHOROSHEV, 2010; IURINIC, FERRAZ, *et al.*, July, 2013). Como o método exige uma análise de frequência, um intervalo de tempo é necessário para que se possa estabelecer uma taxa precisa de reflexões, limitando o uso do método para aplicações off-line pós-falta.

### **3.4 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS**

Antes de apresentar as proteções mais comuns para LT com três terminais, vale a pena comentar, agora de maneira mais aprofundada, sobre sua definição.

Sistemas multiterminais, como as LT com três terminais, podem ser compreendidas como uma extensão de sistemas ponta-a-ponta (PAP) convencionais, podendo apresentar dois tipos diferentes de configuração: paralela e série. Na configuração paralela, os níveis de tensão são iguais para todos os três terminais, porém os níveis de correntes são individuais e podem variar. Já na configuração série, os níveis de corrente nos trechos são semelhantes e os níveis de tensão são individuais (REEV, 1980).

Em um sistema multiterminal em corrente, cada terminal tem o potencial de operar com valores de potência e corrente distintos uns dos outros. A proteção deste SEP precisa então de alguns refinamentos, mas é bastante semelhante à aplicada em sistemas PAP tradicionais (LONG, 1990).

Como comentado no parágrafo acima, LT com três terminais possuem níveis de corrente individuais por terminal. Todavia, há uma grande correlação entre eles e as perturbações em um terminal afetam a distribuição de potência nos outros dois, causando assim oscilações de potência no sistema, modificações nos filtros de linha e mudança nos parâmetros dos relés de proteção. (LONG, 1990).

Segundo BOSTWICK e HARDER (1943), as LT com três terminais podem ser classificadas em 7 tipos:

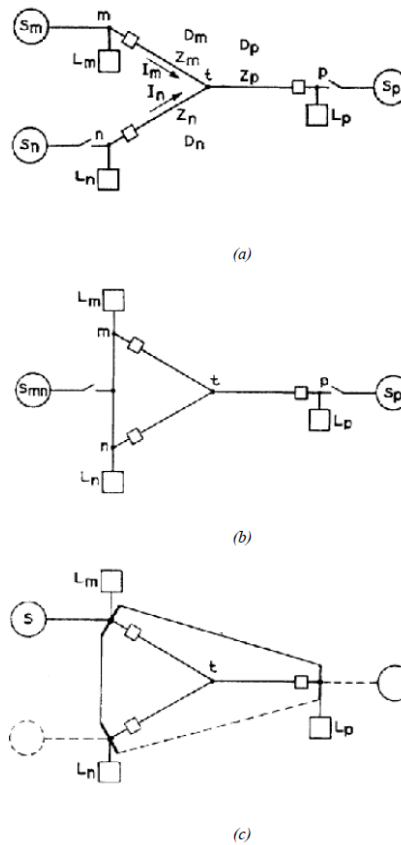


Figura 3.7 Modelos de linhas com três terminais. Fonte (BOSTWICK e HARDER, 1943).

Dentro da topologia mostrada na Figura 3.7a, sem laços paralelos, existem outras três subdivisões:

1. Sistema com uma fonte geradora;
2. Sistema com duas fontes geradoras;
3. Sistema com três fontes geradoras;

Já para topologia com laços paralelos entre dois dos três terminais, mostrada na Figura 3.7b, existem mais três subdivisões:

4. Fonte geradora apenas no terminal conectado;
5. Fonte geradora apenas no terminal independente;
6. Fonte geradora nos dois terminais;

Por último, na topologia da Figura 3.7c, com laços paralelos entre os três terminais:

7. Fonte geradora está efetivamente em todos os terminais.

Quanto à problemática relacionada às proteções típicas para linhas com três terminais, vale salientar dois principais pontos: o primeiro é referente a impedância, que vista de um terminal para os outros dois pode ser diferente, introduzindo então um problema aos relés de distância. O segundo se refere à impedância medida em um terminal para uma falta perto de um segundo terminal, podendo ser afetada pelo fluxo de corrente entrando no nó de encontro com o terceiro terminal.

Neste trabalho, a configuração estudada é a de número 3, porém, em todas as sete topologias percebem-se duas principais dificuldades que se impõe à proteção. É importante ressaltar que no Brasil não é possível conectar uma terceira fonte geradora na LT sem a construção de uma subestação. Dessa forma, a configuração utilizada tem apenas fins ilustrativos para o estudo, podendo ainda ser substituída por uma carga.

### 3.4.1 Efeito de Divisão da OV no Centro da LT com Três Terminais

A primeira lei de Kirchhoff enuncia que a soma das correntes que entram em um nó do circuito deve ser igual à soma das correntes que saem, ou seja, um nó não acumula carga. No nó central da linha aqui apresentada essa lei é de suma importância para a análise.

Seja uma falta em qualquer ponto da LT com três terminais, o aumento de corrente, que gera os transitórios, produzido por ela irá entrar por um dos ramos do nó e sairá pelos outros dois ramos multiplicada por uma razão de dois, contando que a LT tenha os mesmos parâmetros em todos os três sentidos partindo do ponto “T”. Esse efeito pode ser melhor visualizado pela Figura 3.8.

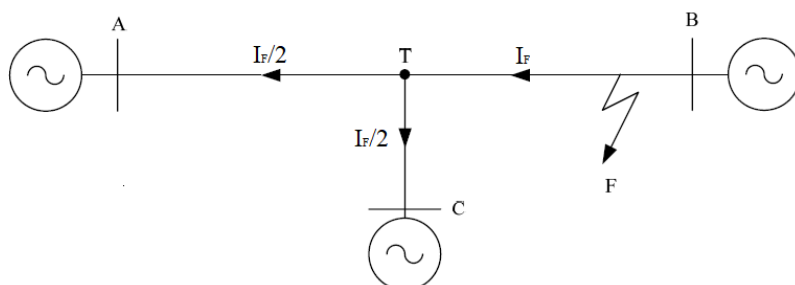


Figura 3.8 Representação da divisão de correntes, provenientes de faltas, no centro da LT. Fonte: (NERC PLANNING, 2006) com modificações.

Essa divisão pode fazer com que as OV's incidentes sobre os terminais remotos da linha sejam mais atenuadas que o normal, de forma a comprometer o devido acionamento da função. Esse efeito será melhor visualizado e discutido no Capítulo 5.

## 4. PROTEÇÃO TW87 APLICADA EM LINHAS COM TRÊS TERMINAIS

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos teóricos e aplicacionais da proteção baseada em ondas viajantes, assim como a lógica de operação da função aqui explorada e as adaptações desta à linha de transmissão, neste trabalho, estudada.

### 4.1 FUNDAMENTOS DE ONDAS VIAJANTES APLICADOS A ALGORÍTIMOS DE PROTEÇÃO

#### 4.1.1 TW87 aplicada em linhas com dois terminais

Negligenciados os efeitos de dispersão e atenuação, as ondas que incidem no terminal local (barra 1), passado o tempo de propagação pela linha desde o ponto da falta ( $\tau$ ), são semelhantes às ondas que incidem sobre o terminal remoto (barra 2) (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Pelas chamadas *equações de Bergeron*, descritas detalhadamente em (TAKAGI, BARBAR, *et al.*, 1977), é possível transformar a consideração feita no parágrafo anterior em um algoritmo de localização e detecção de falta, as equações são:

$$i_1(t - \tau) + \frac{1}{Z_c} \cdot v_1(t - \tau) = -i_2(t) + \frac{1}{Z_c} \cdot v_2(t) \quad (4.1)$$

$$-i_1(t) + \frac{1}{Z_c} \cdot v_1(t) = i_2(t - \tau) + \frac{1}{Z_c} \cdot v_2(t - \tau) \quad (4.2)$$

O equilíbrio das equações acima é satisfeito para faltas externas e ondas decorrentes de chaveamentos na linha, porém se tornam desequilibradas para faltas internas. Com base nas

Equações 4.1 e 4.2 definem-se então sinais diferenciais que, quando diferentes de zero acionam o trip da linha. Estes sinais diferenciais são:

$$\varepsilon_1 = i_1(t - \tau) + i_2(t) + \frac{1}{Z_c} \cdot [v_1(t - \tau) - v_2(t)], \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_2 = i_2(t - \tau) + i_1(t) + \frac{1}{Z_c} \cdot [v_2(t - \tau) - v_1(t)]. \quad (4.4)$$

Este método foi proposto originalmente por Takagi no final da década de 70 em Takagi, Barbar, *et Al.*, 1977 e Takagi, Yamakose, *Et Al.* (1979) e é constituído de um elemento diferencial baseado nas OV's que incidem sobre os terminais. O método requer alinhamento preciso de tempo entre os terminais da linha. Este algoritmo também requer sinais de tensão com alta fidelidade, necessários ao cálculo das ondas incidentes antes da comparação de seus valores.

Para exemplificar as considerações feitas pelo método de Takagi (1977/1979), tem-se a Figura 4.1.

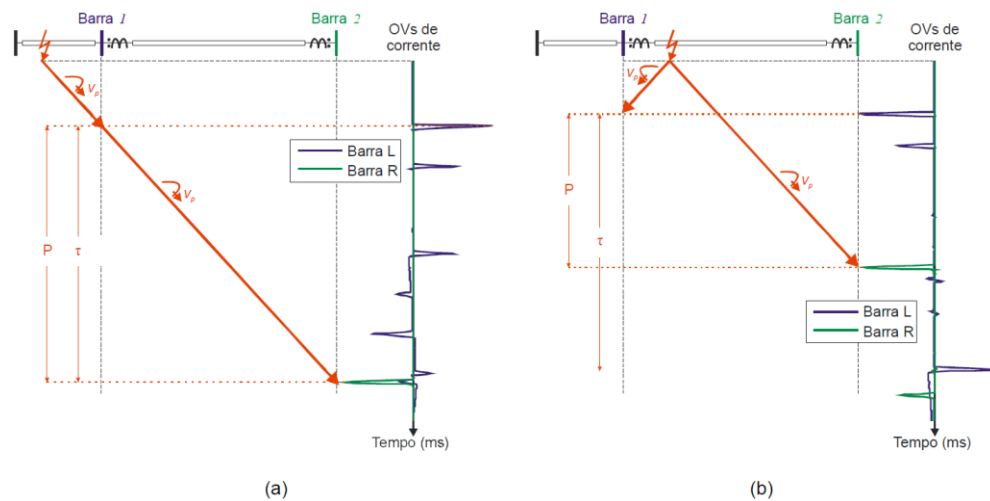


Figura 4.1 Medidas de OV's incidentes nas barras 1 e 2 para: (a) Curto-circuito externo; (b) Curto-circuito interno. Fonte: (LOPES, SILVA, et al., 2016) com modificações.

Percebe-se que para faltas externas (Figura 4.1a) a diferença de tempo P entre a chegada da onda incidente na barra 1 e na barra 2 será igual à  $\tau$ , que é o tempo necessário para que a onda percorra toda a linha. Já para faltas internas esse tempo P será menor que  $\tau$ , pois a onda já não precisa percorrer toda a extensão da linha até alcançar o terminal mais distante. De fato, conhecendo o tempo total de propagação de uma OV característica pela linha inteira, como se conhece, é possível determinar se a falta foi externa ou interna.

Este método agora apresentado é o mesmo utilizado durante a implementação da função detectora e localizadora de falta do qual este trabalho trata. Por meio dela foi possível excluir a exigência dos sinais de tensão de alta fidelidade, fator limitador de alguns dos métodos que dependem da análise de ondas viajantes de tensão, já que aqui usa-se um esquema diferencial de OV's baseado apenas em corrente.

Devido aos efeitos de terminação do circuito e as perdas atenuantes de sinal que a linha provoca, os sinais de correntes medi dos nos terminais não serão totalmente compatíveis entre si para faltas externas. Todavia, é possível tornar as medições das ondas incidentes e refletidas independentes das impedâncias de terminação. Para isso basta isolá-las, como é feito no método de Takagi, possibilitando assim a comparação dos níveis de amplitude nos terminais da linha, mas ainda dependendo da alta precisão nas medidas de tensão (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Esse fato pode ser contornado com o uso das ondas de correntes medidas, já que estas são a soma das ondas incidentes e refletidas e conservam a polaridades das ondas incidentes. Basta então apenas considerar o atraso de propagação para que seja possível comparar as amplitudes de ondas de corrente nos terminais da linha (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014). Para exemplificar melhor o processo, tem-se o seguinte passo-a-passo:

- Para calcular uma grandeza de operação  $i_{OP(t)}$ , que é a soma das primeiras OV's de corrente que incidem sobre os terminais local e remoto (com o devido alinhamento de tempo), assume-se em primeira instância que a falta é interna e passa-se a segunda etapa para checar a veracidade dessa atribuição. A grandeza aqui calculada tem a seguinte forma:

$$i_{OP(t)} = |i_{1(t)} + i_{2(t-P)}|, \quad (4.5)$$

$$i_{OP(t)} = |i_{1(t-P)} + i_{2(t)}|, \quad (4.6)$$

na Equação 4.5 assumiu-se que a onda chegou primeiro na barra 2, terminal remoto, e é aplicado um valor  $P$  para alinhar essa onda com a medida na barra 1, terminal local, sendo  $P \leq \tau$ , já que a falta foi considerada interna. O inverso acontece na Equação 4.6. Apenas uma dessas equações é executada a depender de em qual terminal a onda chegou primeiro, obtendo-se então apenas um valor para  $i_{OP}$ .



- Diferente do passo anterior, nesta etapa assume-se que a falta é externa e calcula-se uma grandeza de restrição que terá um valor elevado caso a falta seja realmente externa, isso porque ao passar pelo terminal a onda tem seu sinal invertido. A expressão usada para esse cálculo é dada por:

$$i_{RT1}(t) = |i_{1(t)} - i_{2(t-\tau)}|, \quad (4.7)$$

$$i_{RT2}(t) = |i_{2(t)} - i_{1(t-\tau)}|, \quad (4.8)$$

a mesma consideração feita para  $P$  no passo anterior é agora feita para o  $\tau$ , sendo este o tempo da onda percorrer toda a LT, já que agora a falta é considerada externa. Nesta hora, porém, as duas Equações 4.7 e 4.8, são executadas, a primeira após a chegada da onda no terminal 2 e a segunda após a chegada da onda no terminal 1. Estas etapas podem ser melhor ilustradas através da Figura 4.1.

- Por último, compara-se os valores de  $i_{OP}$  e  $i_{RT}$ , sendo que este último é a combinação das Equações 4.7 e 4.8, dada pela seguinte forma:

$$i_{RT} = \max(i_{RT1} + i_{RT2}), \quad (4.9)$$

e a tomada de decisão para o trip acontece então pela seguinte comparação:

$$i_{OP} > k \cdot i_{RT}, \quad (4.10)$$

sendo  $k$  um fator de restrição.

Considerando o tempo de propagação das ondas viajantes e a necessidade em alinhar precisamente as medidas feitas nos terminais da linha, esse esquema requer uma comunicação de alta velocidade (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

#### 4.1.2 Processamento e Aquisição dos Sinais

Uma vez tendo o conhecimento dos métodos matemáticos usados na detecção e localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes, faz sentido agora analisar o processo para aquisição dos sinais de interesse.

Para exemplificar, apresenta-se na Figura 4.2 um diagrama simplificado de aquisição de sinais.

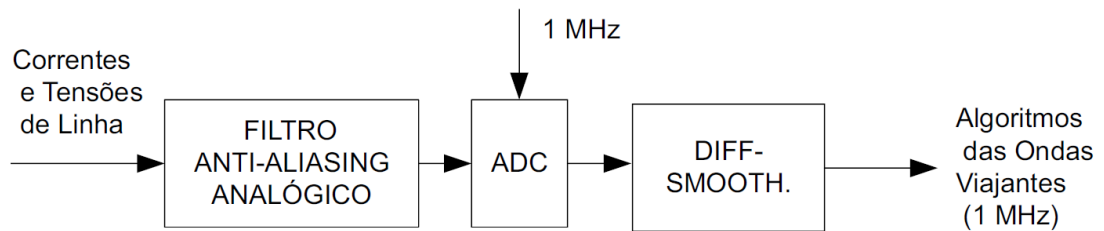


Figura 4.2 Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados na teoria das OV's. Fonte: (SCHWEITZER, KASZTENNY, et al., 2014) com modificações.

Como citado nos capítulos anteriores, esquemas de proteção baseados em ondas viajantes exigem uma alta taxa de amostragem das correntes e tensões, justificando assim o uso de 1 MHz de taxa no filtro *differentiator-smoother*. Por conveniência, alinham-se as amostras com uma entrada de tempo absoluta no relé, dessa forma a análise do evento e a localização da falta são facilitadas (SCHWEITZER, KASZTENNY, et al., 2014).

O primeiro estágio do diagrama apresentado na Figura 4.2 é a representação de um filtro analógico passa-baixa que atenua as amplitudes de frequência mais alta evitando o *aliasing* do sinal. Na sequência, para extrair as OV's de tensões e correntes, aplica-se um filtro *differentiator-smoother* (SCHWEITZER, III, et al., October 2013).

O filtro diferenciador pode ser melhor explicado pela Figura 4.3.

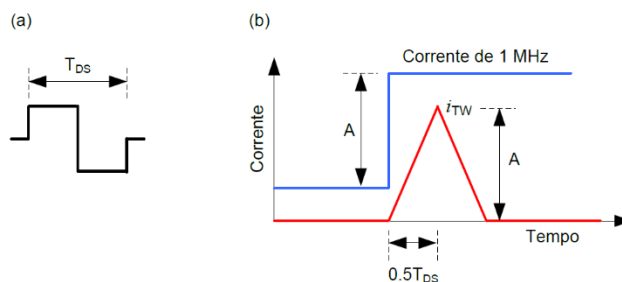


Figura 4.3 Filtro Diff-Smooth: (a) janela de dados; (b) operação do filtro diferenciador.

Uma OV pode ser descrita como uma brusca mudança nos níveis de corrente e tensão da linha, dessa forma, antes de uma falta, por exemplo, o sinal de OV's se mantém num nível estacionário, para uma rede sã. No entanto, quando acontece o evento de falha o filtro detecta essa brusca mudança e responde a ela com uma saída em forma de triângulo, conforme ilustrado

na Figura 4.3b. Para conservar a informação de magnitude das OV's, o ganho do filtro diferenciador é selecionado de forma que o valor de pico da saída corresponda à magnitude da mudança de degrau na entrada. Usa-se também o tempo associado ao pico da saída como o instante de chegada da OV, fatorando um atraso constante do grupo de metade do comprimento da janela do diferenciador. O filtro diferenciador possui uma janela de dados de tamanho  $T_{DS}$ , como apresentado na Figura 4.3a (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Na prática, as variações de corrente e a resposta do filtro a essas variações acontecem de forma semelhante ao demonstrado na Figura 4.4.

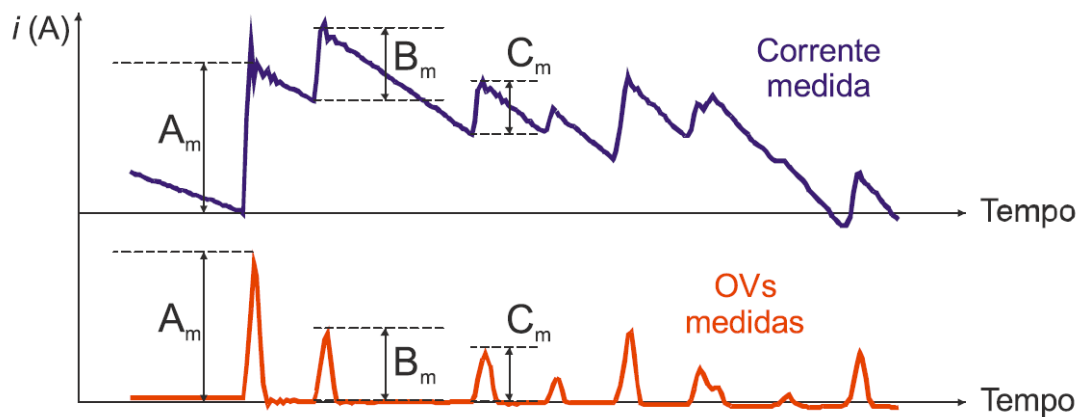


Figura 4.4 OV's extraídas pelo filtro differentiator-smoother. Fonte: (LOPES, 2014).

## 4.2 LÓGICA DE OPERAÇÃO DA TW87

TW87 é um elemento diferencial que compara polaridades, magnitudes e tempos das OV's num par de terminais da LT e processa esses dados para uma tomada de decisão de trip eficaz. Para um evento externo, a OV incide sobre um terminal da linha e, passado o tempo  $\tau$  necessário para a propagação desta por toda a LT, incide sobre o segundo terminal com a polaridade oposta, com uma magnitude possivelmente menor devido às perdas durante o percurso de propagação (TAKAGI, BARBAR, *et al.*, 1977).

Para implementar o método primeiro deve-se identificar o tempo (como um índice de amostra) de incidência das primeiras OV's nos dois terminais. Identificar esse pico não é uma tarefa difícil, uma vez que, no instante anterior, como falado em parágrafos passados, o sinal de OV's está em modo estacionário e somente se excita quando acontece algum evento na LT.

Para o primeiro índice de pico conhecido na barra 1 (local) dá-se o nome de  $NL_{FIRST}$ , já para o incidente na barra 2 (remota),  $NR_{FIRST}$ .

Como comentado sobre faltas externas, sabe-se que para esses casos uma onda semelhante à que incidiu primeiro sobre um dos terminais aparecerá no terminal adjacente passado um tempo  $\tau$ . Com isso em mente, uma janela de procura é estabelecida para tentar detectar a passagem dessa OV no terminal remoto, caso a OV incida primeiro sobre o local, ou no terminal local, caso a OV incida primeiro sobre o remoto. Além disso, é considerado uma margem,  $\Delta T_L$ , para o intervalo de procura, uma vez que, a velocidade de propagação acompanha oscilações intrínsecas às condições climáticas e ambientais no momento da falta, acomodando assim possíveis variações no tempo de percurso da OV (SCHWEITZER, KASZTENNY e MYNAM, 2015). O conteúdo descrito neste parágrafo e no anterior fica mais claro quando observada a Figura 4.5.

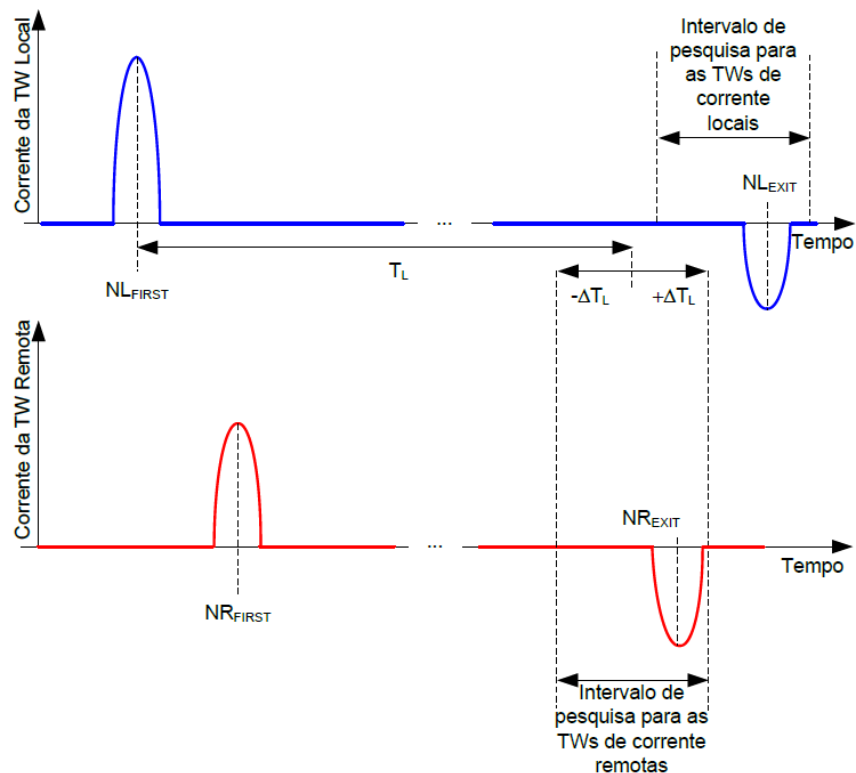


Figura 4.5 Definição das OVs de entrada e de saída para o elemento TW87. Fonte: (SCHWEITZER, KASZTENNY e MYNAM, 2015).

Por fim, identificam-se quatro índices, dois de entrada ( $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$ ) e dois de saída ( $NL_{EXIT}$  e  $NR_{EXIT}$ ), utilizando  $M$  amostras da ordem de metade da janela do diferenciador

( $M < 0.5 \cdot T_{DS}$ ). Isso é feito para evitar que ruídos ou picos de origem aleatória venham a ser confundidos com OV's legítimas.

A magnitude das primeiras OV's incidentes nos terminais local e remoto são chamadas IL e IR, e são calculadas da seguinte forma:

$$IL = Y \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{OVL(NL_{FIRST}-k)} \right|, \quad (4.11a)$$

$$IR = Y \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{OVR(NR_{FIRST}-k)} \right|, \quad (4.11b)$$

sendo Y um fator de escala que mantenha o ganho unitário dos valores calculados em 4.11 para uma OV ideal.

A corrente de operação será a soma dos primeiros picos de OV's incidentes nos terminais local e remoto, e a corrente de restrição será a diferença entre as ondas de entrada e de saída.

Corrente OV de operação:

$$I_{DIF} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{OVL(NL_{FIRST}-k)} + i_{OVR(NR_{FIRST}-k)}) \right|. \quad (4.12)$$

Corrente da OV de restrição, quando  $NL_{FIRST} < NR_{FIRST}$ :

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{OVL(NL_{FIRST}-k)} - i_{OVR(NR_{EXIT}-k)}) \right|, \quad (4.13a)$$

ou ainda:

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{OVL(NR_{FIRST}-k)} - i_{OVR(NL_{EXIT}-k)}) \right|, \quad (4.13b)$$

para casos em que a onda incidiu primeiro sobre o terminal remoto.

A localização da falta pode ser feita segundo a seguinte equação:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{NL_{FIRST} - NR_{FIRST}}{T_L} \right). \quad (4.14)$$

Obtidos os resultados das Equações 4.12 até 4.14, segue-se a seguinte lógica de acionamento de trip para o elemento TW87:

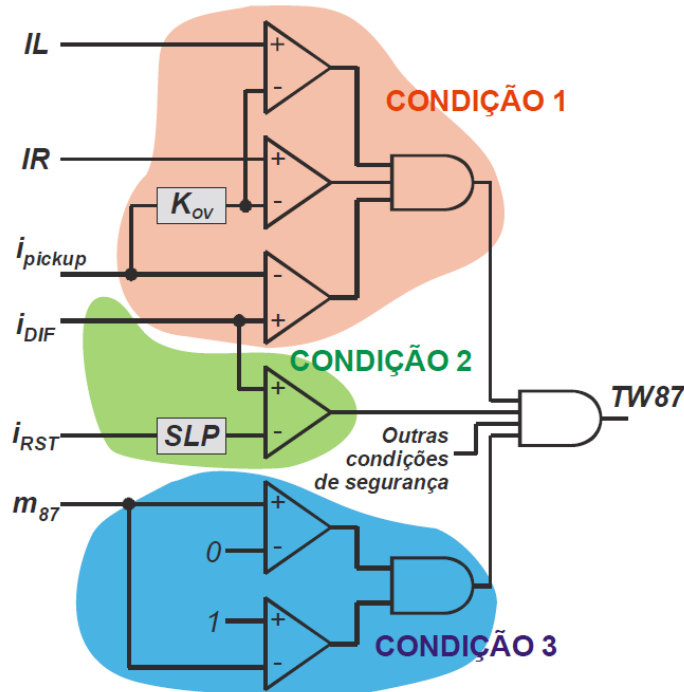


Figura 4.6 Lógica de trip do elemento TW87. Fonte: (LOPES, SILVA, et al., 2016).

Pode-se dividir a lógica de operação do elemento TW87 em três condições principais, de acordo com a Figura 4.6.

- Na condição 1: analisa-se  $IL$ ,  $IR$  e  $I_{DIF}$ , evitando operações errôneas para transitórios de magnitudes muito baixas. Isso é feito através da comparação entres estas grandezas e uma corrente de pick-up,  $i_{pickup}$ , multiplicada por  $K_{OV}$ , uma constante que determina um limiar mínimo para detecção das OV's, no caso da comparação com  $IL$  e  $IR$ .
- Na condição 2: verifica-se se a falta é interna ou externa, para faltas internas a seguinte condição deve ser verdadeira:  $I_{DIF} > SLP \cdot I_{RST}$ , onde  $SLP$  é a constante *slope* da função.
- Por fim, na condição 3: observa-se a localização estimada da falta  $m_{87}$  (em p.u.), que deve assumir valores entre 0 e 1 para curtos-circuitos internos.

Algumas outras condições de segurança são analisadas para evitar decisões de trip erradas, como durante manobras de chaveamento de reatores e capacitores série na LT ou uma descarga elétrica na blindagem dos cabos, por exemplo (SCHWEITZER, KASZTENNY e

MYNAM, 2015). Apenas as faltas na LT foram simuladas neste trabalho, desta forma, a supervisão por sobrecorrente foi desabilitada, e apenas as OV's estão sendo avaliadas, através da função TW87.

### 4.3 ADAPTAÇÕES FEITAS À FUNÇÃO TW87 PARA LINHAS COM TRÊS TERMINAIS

Como visto na seção 4.2, o elemento TW87 trabalha a partir de medições feitas em dois terminais de uma LT, todavia, neste trabalho busca-se testar seu funcionamento em uma linha com três terminais. Para isso considerou-se a nomenclatura dos terminais conforme a Figura 4.7.

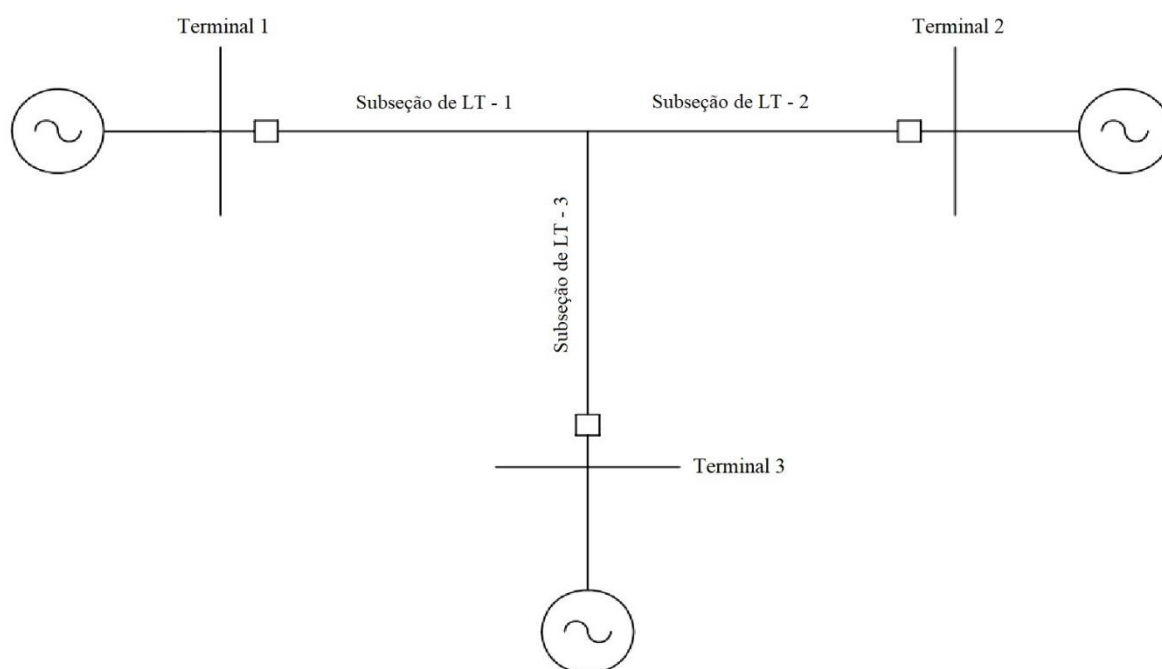


Figura 4.7 Denominação dos terminais da LT com três terminais.

Foi aplicada a função para cada um dos três pares formados pela configuração da linha, são eles: Terminal 1 (local) – Terminal 2 (remoto), Terminal 2 (local) – Terminal 3 (remoto) e, por último, Terminal 1 (local) – Terminal 3 (remoto).

Vale ressaltar ainda que uma falta percebida em qualquer que seja a subseção da LT será notada em todos os pares de terminais. Caso aconteça uma falta na subseção de LT 2, por

exemplo, o trecho de linha supervisionado pelo par de terminais 1-3 enxergará uma falta exatamente no centro da LT. Esse pensamento vale para as outras subseções da topologia.

Uma avaliação a mais também foi feita durante a realização deste trabalho, isto é, na tentativa de tornar o elemento independente do tipo de falta nos SEP trifásicos reais, uma consideração dos valores adequados no loop de falta é feita, determinando assim qual tipo de falta ocorreu e especificando a correta OV a ser usada para acionamento ou não do trip (SCHWEITZER, KASZTENNY, *et al.*, 2014).

Para isso, considerou-se as variáveis  $I_{aT1}$ ,  $I_{aT2}$ ,  $I_{aT3}$ ,  $I_{bT1}$ ,  $I_{bT2}$ ,  $I_{bT3}$ ,  $I_{cT1}$ ,  $I_{cT2}$  e  $I_{cT3}$  que recebem a magnitude da primeira OV incidente em cada terminal para cada fase, conforme a equação abaixo:

$$I_{fT} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{OVT(N_{TFIRST}-k)} \right|, \quad (4.15)$$

sendo  $f$  e  $T$  a fase e o terminal referente, respectivamente.

Feito isso, insere-se mais três variáveis,  $I_{OVaT123}$ ,  $I_{OVbT123}$  e  $I_{OVcT123}$  que receberam a soma das magnitudes das primeiras OVs percebidas em cada terminal por fase, conforme a equação abaixo:

$$I_{OVaT123} = I_{aT1} + I_{aT2} + I_{aT3}, \quad (4.16a)$$

$$I_{OVbT123} = I_{bT1} + I_{bT2} + I_{bT3}, \quad (4.17b)$$

$$I_{OVcT123} = I_{cT1} + I_{cT2} + I_{cT3}. \quad (4.18c)$$

Cria-se então um fator normalizante:

$$FatorNorm = I_{OVaT123} + I_{OVbT123} + I_{OVcT123}, \quad (4.19)$$

para que com ele seja possível calcular a influência de cada fase na falta.

Em posse do  $FatorNorm$ , finalmente calculam-se as variáveis  $I_{OVaT123norm}$ ,  $I_{OVbT123norm}$  e  $I_{OVcT123norm}$ , que representam, em p.u., a influência de cada fase na falta, segundo as seguintes equações:

$$I_{OVaT123norm} = \frac{I_{OVaT123}}{FatorNorm}, \quad (4.20a)$$



$$I_{OVbT123norm} = \frac{I_{OVbT123}}{FatorNorm}, \quad (4.20b)$$

$$I_{OVcT123norm} = \frac{I_{OVcT123}}{FatorNorm}, \quad (4.20c)$$

por meio destes valores escolhe-se então o loop que melhor se adequa à falta segundo a Tabela 4.1.

*Tabela 4.1 Classificação do Loop de falta*

<b>LOOP DE FALTA</b>	$I_{OVaT123norm}$	$I_{OVbT123norm}$	$I_{OVcT123norm}$
Loop 1 (A-Terra)	$\geq 0.33$	$< 0.33$	$< 0.33$
Loop 2 (B-Terra)	$< 0.33$	$\geq 0.33$	$< 0.33$
Loop 3 (C-Terra)	$< 0.33$	$< 0.33$	$\geq 0.33$
Loop 4 (A-B)	$\geq 0.33$	$\geq 0.33$	$< 0.33$
Loop 5 (B-C)	$< 0.33$	$\geq 0.33$	$\geq 0.33$
Loop 6 (C-A)	$\geq 0.33$	$< 0.33$	$\geq 0.33$

Sabendo o loop de falta, certifica-se que o elemento opera corretamente para todos os tipos de falta.

Uma vez calculada as OV's de corrente incidentes em cada terminal da LT, pode-se determinar uma OV apropriada a ser processada na função TW87 a partir do loop identificado. Isso é feito segundo a Tabela 4.2.

Nela,  $T_x$  é a representação do terminal, ou seja, as OV's são calculadas por fase e para cada terminal e  $I_{OV0Tx}$  são as OV de modo zero, dada pela média da soma das OV's incidentes no terminal por fase:  $\frac{(I_{OVaTx} + I_{OVbTx} + I_{OVcTx})}{3}$ . Por fim, procede-se com a lógica de operação normalmente para cada par de terminais.

Tabela 4.2 Correntes de Loop

<b>LOOP DE FALTA</b>	<b>OV</b>
Loop 1 (A-Terra)	$I_{OVaTx} - I_{OV0Tx}$
Loop 2 (B-Terra)	$I_{OVbTx} - I_{OV0Tx}$
Loop 3 (C-Terra)	$I_{OVcTx} - I_{OV0Tx}$
Loop 4 (A-B)	$\frac{(I_{OVaTx} - I_{OVbTx})}{\sqrt{3}}$
Loop 5 (B-C)	$\frac{(I_{OVbTx} - I_{OVcTx})}{\sqrt{3}}$
Loop 6 (C-A)	$\frac{(I_{OVcTx} - I_{OVaTx})}{\sqrt{3}}$

De acordo com a magnitude das OVs detectadas nos terminais locais e remotos é possível ainda desenvolver uma lógica que identifique o trecho da LT em que a falta aconteceu, conforme demonstra a tabela abaixo.

Tabela 4.3 Lógica para detecção do trecho de falta.

<b>TRECHO DA FALTA</b>	<b>CONDIÇÕES</b>		
	<b>Par de terminais 1-2</b>	<b>Par de terminais 1-3</b>	<b>Par de terminais 2-3</b>
Subseção de LT 1	$IL > IR$	$IL > IR$	$IL \cong IR$
Subseção de LT 2	$IL < IR$	$IL \cong IR$	$IL > IR$
Subseção de LT 3	$IL \cong IR$	$IL < IR$	$IL < IR$

Essa lógica poderia ser adaptada no relé de maneira a possibilitar um desligamento inteligente da LT, através dele só o trecho defeituoso seria isolado e o restante da linha poderia continuar em operação, desde que haja um grupo de seccionamento no ponto onde ocorre a derivação da linha e que os trechos da LT possuam mesmos parâmetros.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações realizadas. A função é avaliada com base na precisão e velocidade de atuação nos diversos cenários aqui testados. Além disso, é feita uma análise dos ajustes da proteção TW87.

### 5.1 SISTEMA ANALISADO

Para realização deste trabalho foi utilizado um sistema de transmissão simulado a partir do software *Alternative Transients Program* (ATP), cujos dados gerados foram processados externamente em uma ferramenta matemática computacional. A estrutura do modelo usado é representada na Figura 5.1. e se trata de uma linha de transmissão de 500kV/60Hz. Para simulação das faltas externas e ligação entre a fonte e a LT, uma linha a montante de 50 km é inserida entre a Fonte 1 e a Barra 1, uma linha a jusante também com 50 km é colocada entre a Barra 2 e a Fonte 2 e, por último, um terceiro trecho de linha, também com 50 km, é colocado entre a Fonte 3 e a Barra 3. O comprimento da linha é de 400 km entre cada par de barras e de 200 km de cada barra ao ponto de derivação. As fontes de tensão foram nomeadas e representadas de acordo com suas respectivas tensões e impedâncias de Thévenin, sendo configuradas para simular valores de Source Impedance Ratio (SIR) de 0,1. A Tabela 5.1 detalha as especificações desta linha.

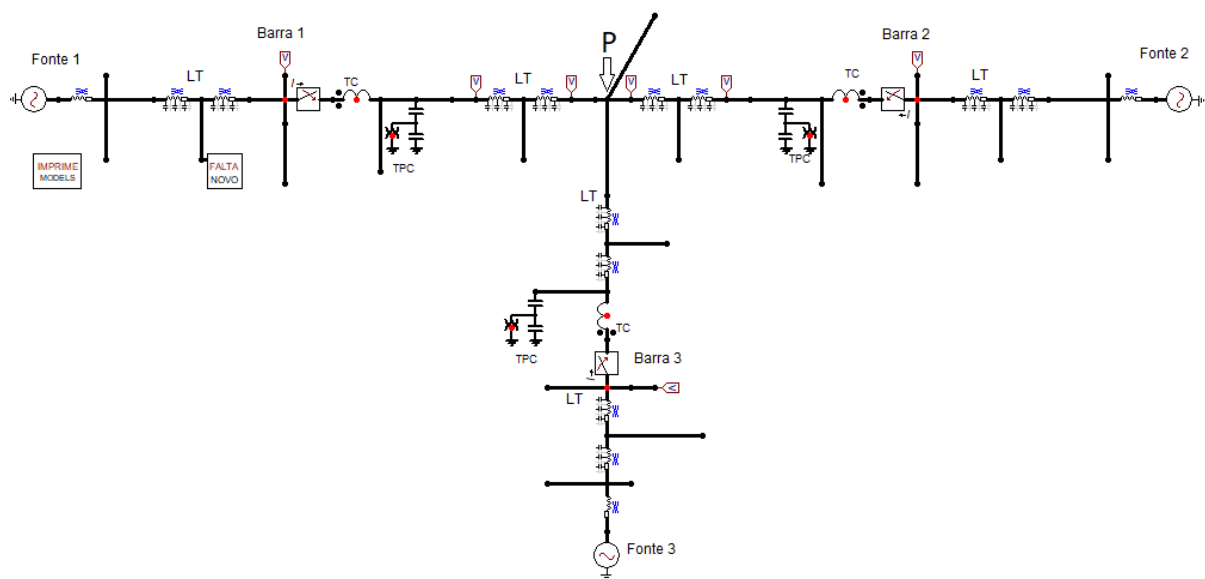


Figura 5.1 Modelo de linha simulado.

Próximo ao barramento de cada fonte existe um transformador de corrente (TC) que, com uma relação de 2000 A para 5 A, fornece medição de corrente secundária. Na sequência deste, existe um transformador de potencial capacitivo (TPC), fornecendo as medições de tensão também secundária. As medições fornecidas pelos transformadores de corrente serão usadas como valor de entrada para obtenção das ondas viajantes e aplicação da função. Além disso, o ponto **P** determina o centro da LT, onde as subseções de linha ilustradas na Figura 5.1 se encontram conectadas. Este ponto será constantemente citado na análise dos gráficos deste capítulo.

Um bloco de falta composto por resistores e chaves passíveis de controle no tempo possibilitou a simulação de diversos cenários. Variações no tempo de fechamento da chave mudavam o ângulo de incidência da falta, assim como as fases envolvidas, enquanto que variações nas resistências do bloco permitiam testar curtos com diferentes resistências de falta.

Tabela 5.1 Dados da linha de transmissão modelada no ATP.

Tensão nominal: 500 kV					
Comprimento da LT: 400 km					
Frequência nominal: 60 Hz					
Impedâncias e Admitâncias da LT					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$	$B_1(\mu S/km)$
0,4177	1,5238	2,8648	0,0346	0,3005	5,5106

## 5.2 CASOS AVALIADOS

Para validar o funcionamento da função TW87 em LT com três terminais é necessário a consideração do maior número de cenários de falta, além de diferentes ajustes do elemento de proteção. Pensando nisso, simulou-se faltas monofásicas para o terra (AT), bifásicas (AB), bifásicas para o terra (ABT) e trifásicas (ABC), variando para cada tipo de curto a resistência de falta, a localização desta e o ângulo de incidência.

Os casos avaliados estão descritos na Tabela 5.2, sendo ' $d$ ' a distância da falta tomando a como referência a barra 1 em direção à barra 2, ' $\theta$ ' é o ângulo de incidência, ' $R_f$ ' é a resistência de falta, ' $\delta$ ' é a abertura angular entre as fontes indicando o nível de carregamento. Vale ressaltar que a variação no ângulo de incidência toma a fase A como referência. Além disso a abertura angular, embora diferente se enxergada entre cada par de fontes, atua de maneira conjunta na LT e resulta em um carregamento pesado para o SEP.

Tabela 5.2 Casos de falta analisados.

Casos de falta						
Caso	$d$	$\delta_{1-2}$	$\delta_{2-3}$	$\delta_{1-3}$	$R_f$	$\theta$
Caso 1	0,025, 0,25, 0,5, 0,75, 0,975 p.u.	$\approx 5^\circ$	$\approx 3^\circ$	$\approx 8^\circ$	0, 100, ..., 900, 1000 $\Omega$	$90^\circ$
Caso 2	0,025, 0,25, 0,5, 0,75, 0,975 p.u.	$\approx 35^\circ$	$\approx 3^\circ$	$\approx 38^\circ$	0, 100, ..., 900, 1000 $\Omega$	$90^\circ$
Caso 3	0,025, 0,25, 0,5, 0,75, 0,975 p.u.	$\approx 10^\circ$	$\approx 5^\circ$	$\approx 15^\circ$	$\approx 0 \Omega$	0, 30, ..., 330 e $360^\circ$
Falta externa	Ext. Direita, Ext. Esquerda, Ext. Inferior	$\approx 10^\circ$	$\approx 5^\circ$	$\approx 15^\circ$	0, 100, ..., 900, 1000 $\Omega$	$90^\circ$

A intenção é avaliar o desempenho da função nos diferentes cenários. Vale ressaltar ainda que cada caso foi aplicado para faltas AT, AB, ABT e ABC, sendo os resultados apresentados a partir de gráficos que demonstraram a forma como as grandezas resultantes da aplicação da função se comportaram com as variações simuladas. Os ajustes aplicados no elemento diferencial TW87, são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Ajustes da função TW87.

<b>Ajustes TW87</b>			
Parâmetros	$K_{OV}$	SLP	$i_{pickup}$
Ajuste 1	0,1	0,3	0,1
Ajuste 2	0,1	0,3	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 3	0,1	0,3	$0,05 \cdot i_{base}$
Ajuste 4	0,1	0,5	0,1
Ajuste 5	0,1	0,5	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 6	0,1	0,5	$0,05 \cdot i_{base}$
Ajuste 7	0,1	0,7	0,1
Ajuste 8	0,1	0,7	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 9	0,1	0,7	$0,05 \cdot i_{base}$

Sendo  $i_{base}$  a corrente base calculada, com valor igual à 1748 A.

As condições de trip para a função estão resumidas na lógica apresentada pela Figura 4.6 e são abaixo lembradas:

- Primeira condição:

$$IL \text{ e } IR > i_{pickup} \cdot K_{OV} \quad (5.1a)$$

$$I_{DIF} > i_{pickup}$$

- Segunda condição:

$$\frac{I_{DIF}}{I_{RST}} > SLP \quad (5.1b)$$

- Terceira condição:

$$0 < m_{87} < 1 \quad (5.1c)$$

Como mencionado em capítulos anteriores, a função TW87 funciona a partir da análise de sinais provenientes de ondas viajantes incidentes sobre um par de terminais. Pensando nisso, a função foi aplicada primeiro ao par de terminais 1-2, depois ao 1-3 e, por último, ao 2-3, que representam, respectivamente, as barras 1-2, 1-3 e 2-3 (vide Figura 5.1).

A expressão 5.1b é resultado de uma leve alteração que promove uma melhor apresentação dos resultados.

Nas imagens deste capítulo serão representados dois ajustes como sendo os limiares de atuação para a primeira condição (5.1a) da função TW87. Em “Ajuste A”,  $K_{OV} \cdot i_{pickup}$  assume o valor de 3,496 e em “Ajuste B”, 8,741.

## 5.2.1 Caso 1

Como demonstrado na Tabela 5.2, nesta seção serão abordados os casos de falta com carregamento leve. Além disso será considerado um valor de ‘ $\theta$ ’ igual à  $90^\circ$ , ou seja, a falta está programada para acontecer quando houver um pico de tensão na fase A, sendo este valor o *default* neste trabalho. As representações provenientes da TW87 são representadas abaixo.

### 5.2.1.1 Par de Terminais 1-2

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

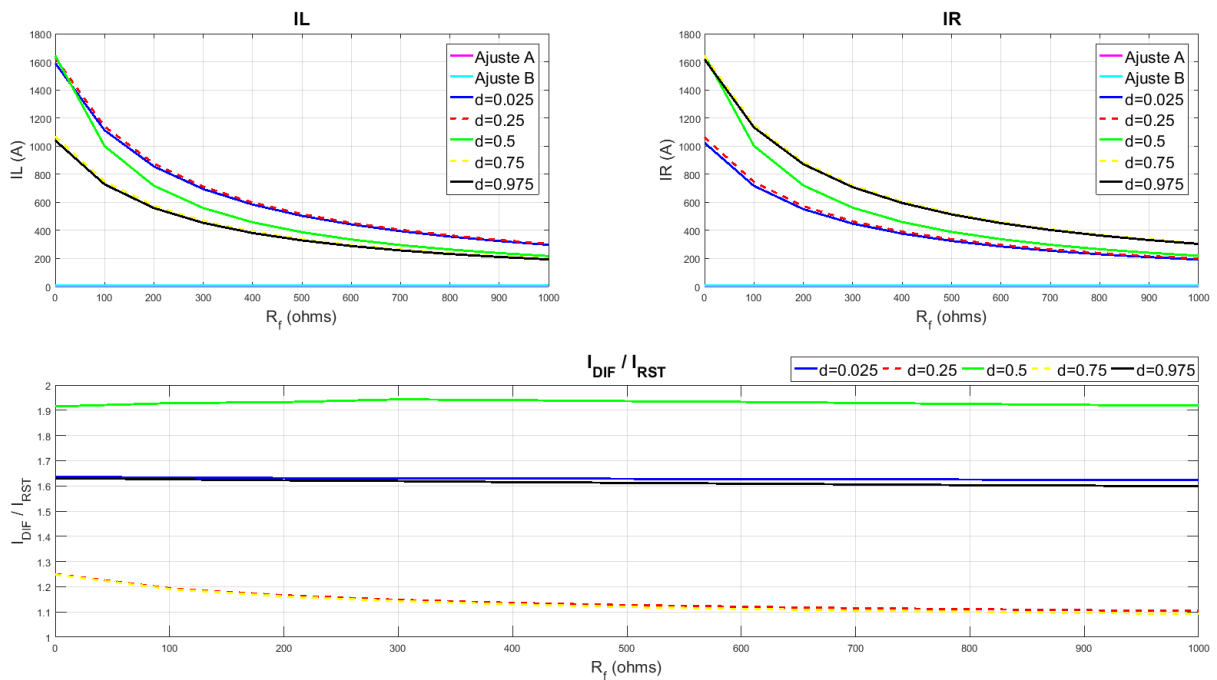


Figura 5.2 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

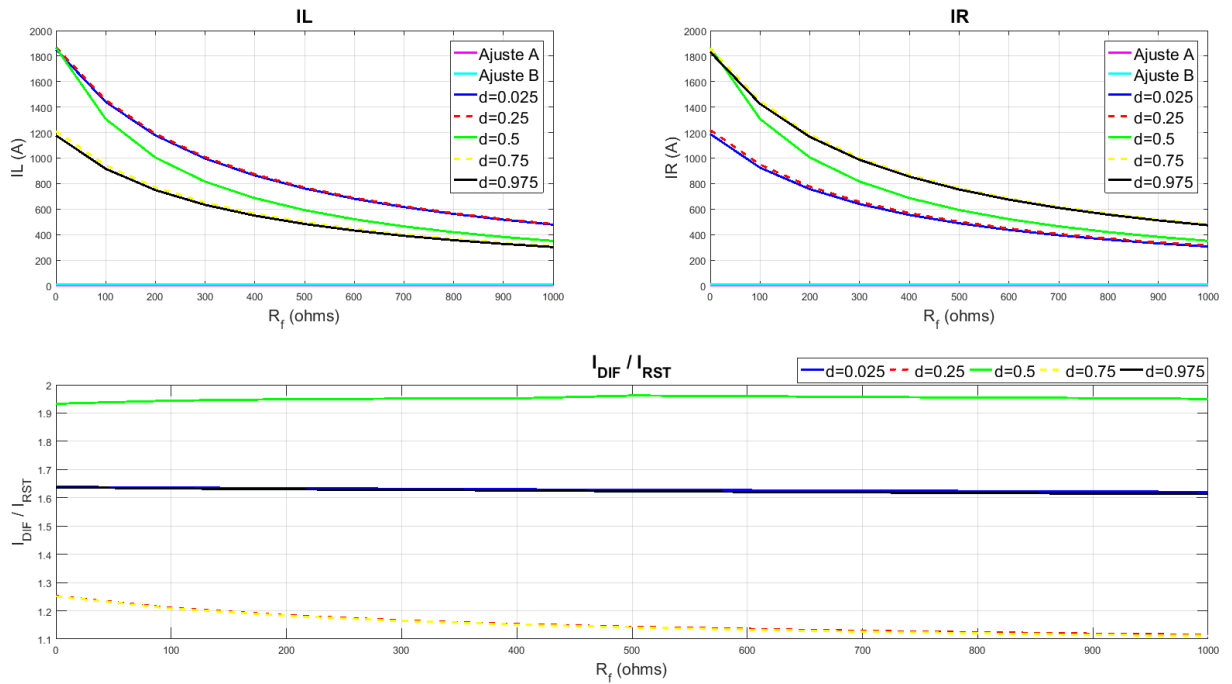


Figura 5.3 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.



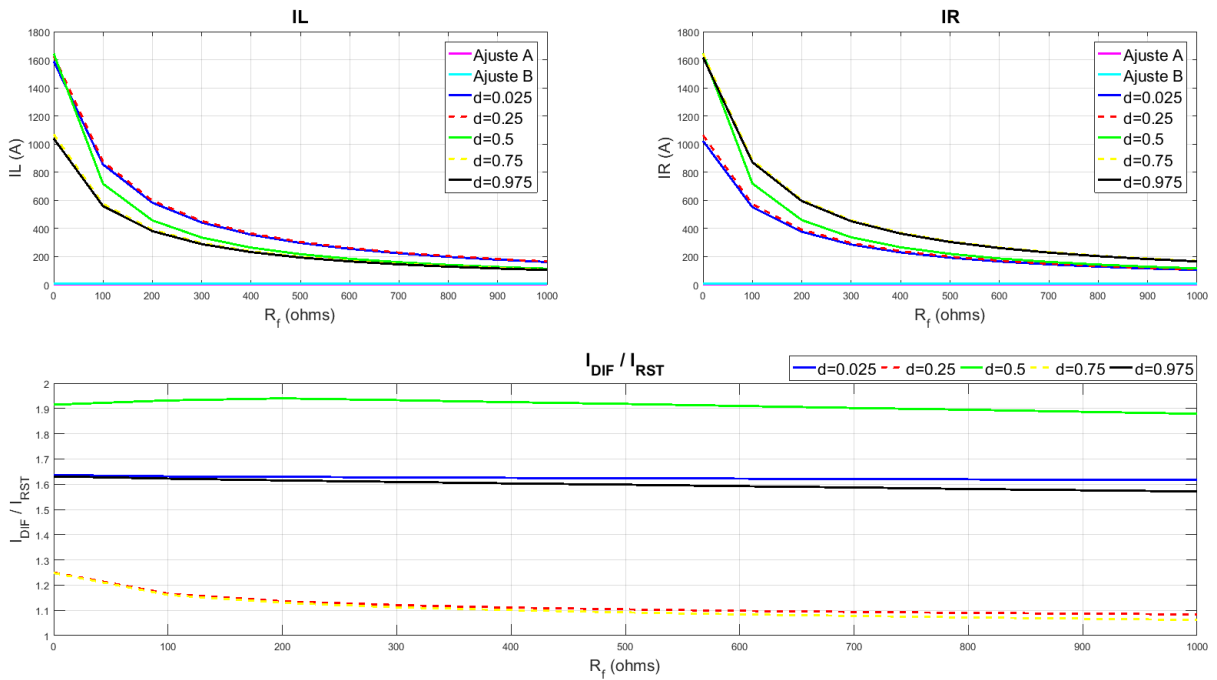


Figura 5.4 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como representado pela figura adiante.

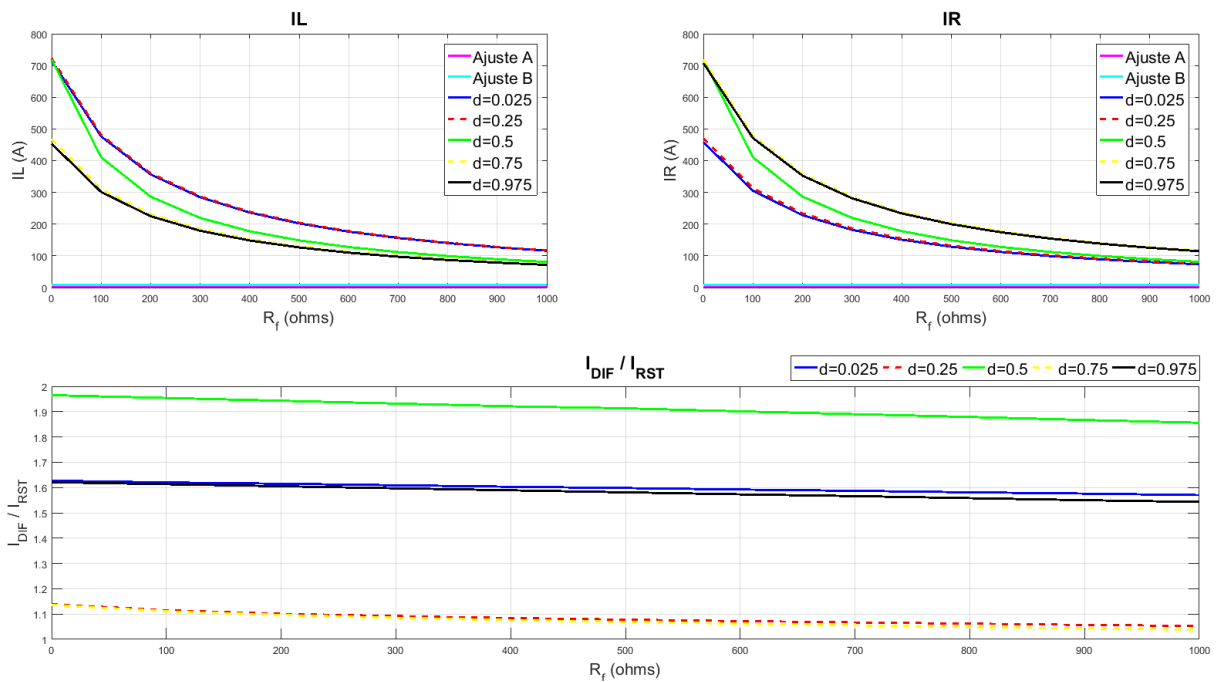


Figura 5.5 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Em primeiro lugar, vale observar alguns comportamentos semelhantes entre as ondas apresentadas nos variados tipos de falta. Percebe-se uma relação inversa entre as correntes  $I_L$  e  $I_R$ , no sentido de que as correntes  $I_L$  com maior magnitude acontecem para faltas a esquerda do ponto P e as correntes  $I_R$  com maior magnitude acontecem para faltas a direita do ponto P. O que se explica por dois motivos: primeiro pela atenuação que a onda sofre ao atravessar um trecho de linha maior, segundo pelo efeito já previsto na seção 3.4.1, onde os terminais localizados após o ponto central da LT, em relação ao local da falta, têm suas correntes incidentes divididas por uma razão de dois

Outro fato comum importante a ser percebido é a diminuição das magnitudes com o aumento da resistência de falta. Esta característica tem sentido físico e pode ser explicada pela lei de Ohm, a qual enuncia que, para um mesmo valor de tensão, quão maior for a resistência, menor será a corrente que a atravessa. Em resumo, para resistências mais elevadas de falta, as ondas de tensão lançadas são menores e, conseqüentemente, as ondas de corrente também são atenuadas.

Pensando agora nas condições de atuação de trip para a TW87, vale a pena fazer uma análise de sensibilidade da função. Pelas imagens, percebe-se que mesmo para o ajuste mais conservador (ajuste 9), com  $K = 0,1$ ,  $SLP = 0,7$  e  $i_{pickup} = 0,05 \cdot i_{base}$ , todas as condições são satisfeitas. Considerando o par de terminais 1-2, as OVs de menor amplitude aconteceram para uma falta AT em 0.5 p.u. com máxima resistência de falta. Ainda assim, as curvas de falta se mantiveram sempre bem acima dos dois limiares de atuação para a condição 1 (Ajustes A e B).

Com relação ao gráfico de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$ , faltas em 0,5 p.u. se mostram mais acima do limiar de atuação. Para os outros locais de falta percebe-se também uma larga confiabilidade de atuação, as curvas se mantiveram sempre bem acima da constante SLP, mesmo para os ajustes 7, 8 e 9, mais sensíveis. Nos cenários restantes, onde mais de uma fase é envolvida na falta, as condições também são satisfeitas, ainda com uma maior margem de confiabilidade já que os níveis de corrente aumentam. Esse efeito se repete nos casos 2 e 3 para aplicação da função ao par 1-2.

Outra observação pertinente é que as correntes obtidas a partir da falta ABT, embora iniciem com magnitude semelhante à observada para faltas AB, caem de forma muito mais rápida. Uma determinada magnitude vista numa resistência de falta  $x$  para uma falta AB será alcançada numa resistência de falta  $\frac{x}{2}$  para uma falta ABT. Essa característica pode ser

verificada, já que, neste cenário, com duas fases sendo colocadas no mesmo potencial  $V_{TERRA}$ , surgem duas resistências  $R_f$  iguais em paralelo, resultando assim numa resistência final com metade do nível das duas anteriores, ou seja, é um comportamento esperado para o modelo de falta adotado.

Quanto à precisão da grandeza  $m_{g7}$  em determinar o local da falta, não se perceberam variações das medições entre diferentes fases envolvidas, logo o resultado apresentado na tabela abaixo é igual para faltas AT, AB, ABT e ABC.

Tabela 5.4 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-2 para o Caso 1.

<b>Resultados <math>m_{g7}</math></b>	
Localidade simulada	Localidade detectada ( $m_{g7}$ )
0,025 p.u.	0,0256 p.u.
0,25 p.u.	0,2491 p.u.
0,5 p.u.	0,5 p.u.
0,75 p.u.	0,7509 p.u.
0,975 p.u.	0,9744 p.u.

Observou-se então estimativas precisas na localização das faltas.

### 5.2.1.2 Par de Terminais 1-3

O par de terminais 1-3 terá análise semelhante à que foi apresentada sobre os terminais 1-2, mais precisamente quanto à atenuação das ondas para maiores resistências de falta e maiores distância da barra de referência ao curto. A diferença agora é que, para faltas que acontecem a direita do ponto comum da LT, o terminal remoto (barra 3) enxergará menores níveis de corrente do que o terminal remoto (barra 2) enxergava na seção do caso anterior. Isso é certo, já que, para este par, ocorre o efeito de divisão da OV no ponto de derivação e o caminho que ela irá percorrer é maior, pois cruzará primeiro um trecho compreendido entre o ponto de falta e o ponto comum da LT para depois atravessar um segundo trecho, do ponto comum até a extremidade inferior, atenuando assim o sinal  $IR$ .

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

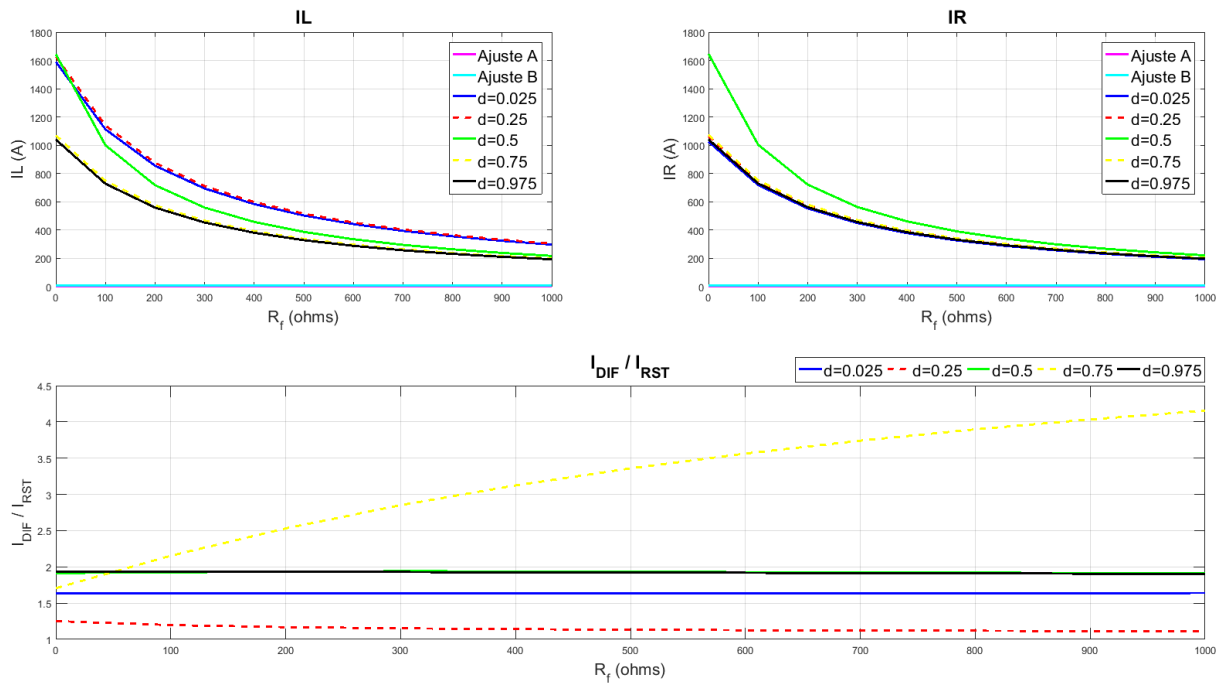


Figura 5.6 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

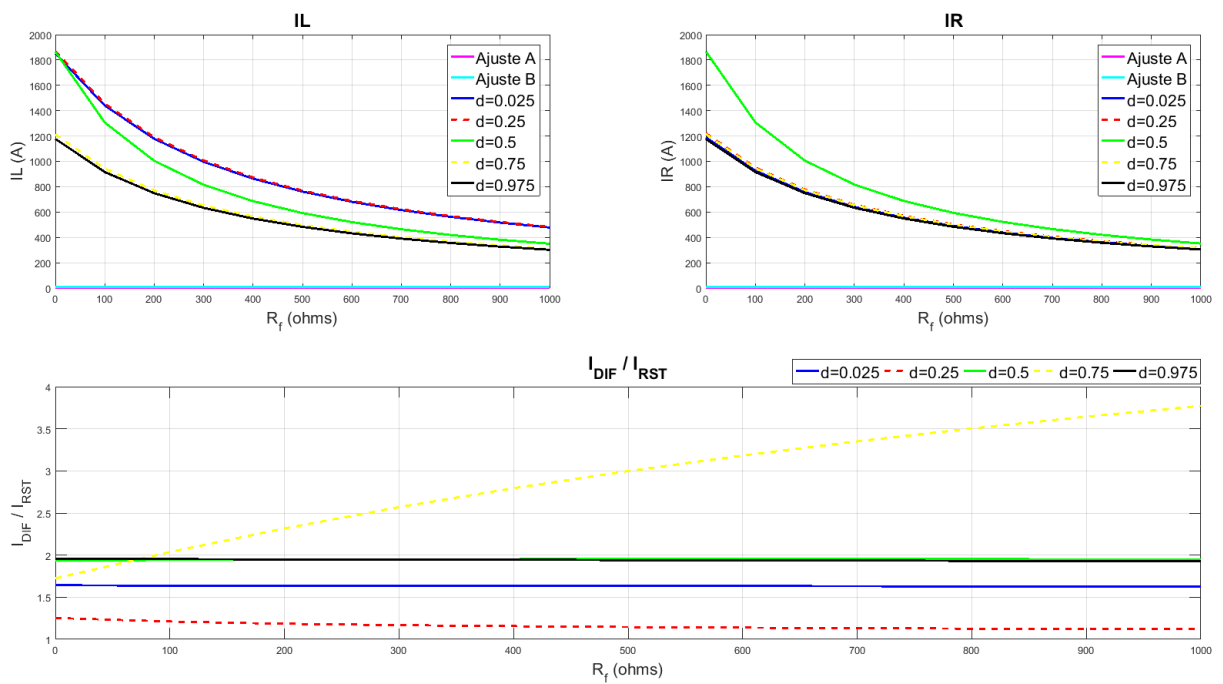


Figura 5.7 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

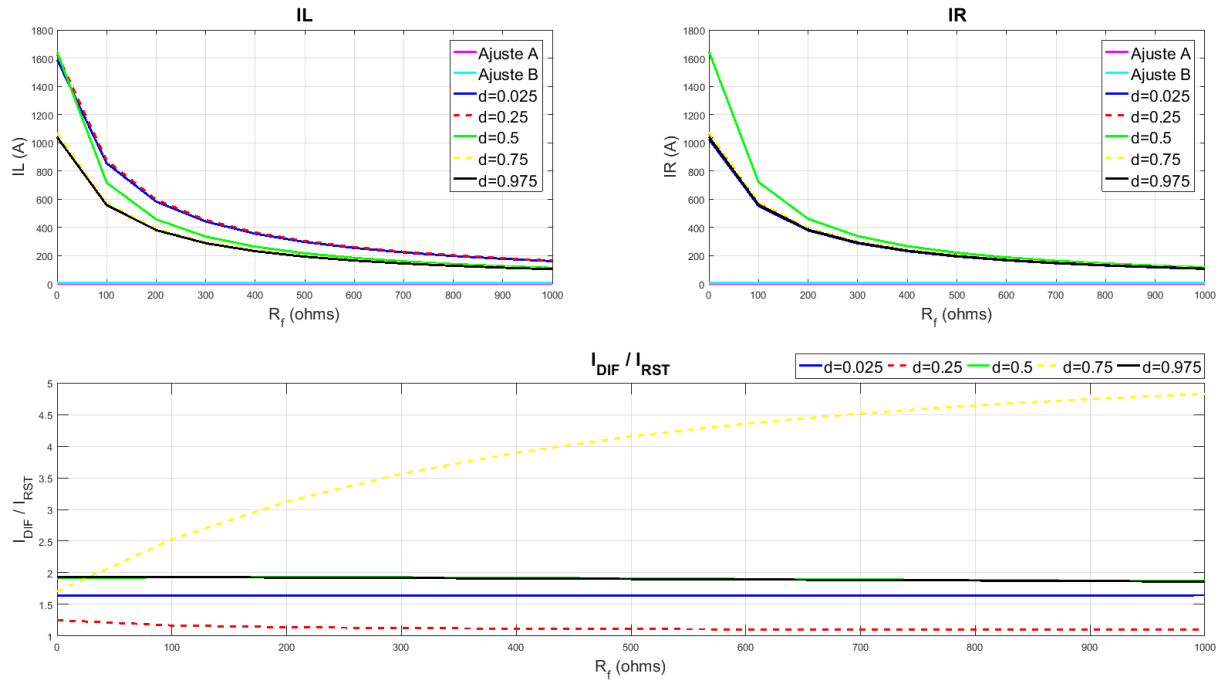


Figura 5.8 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

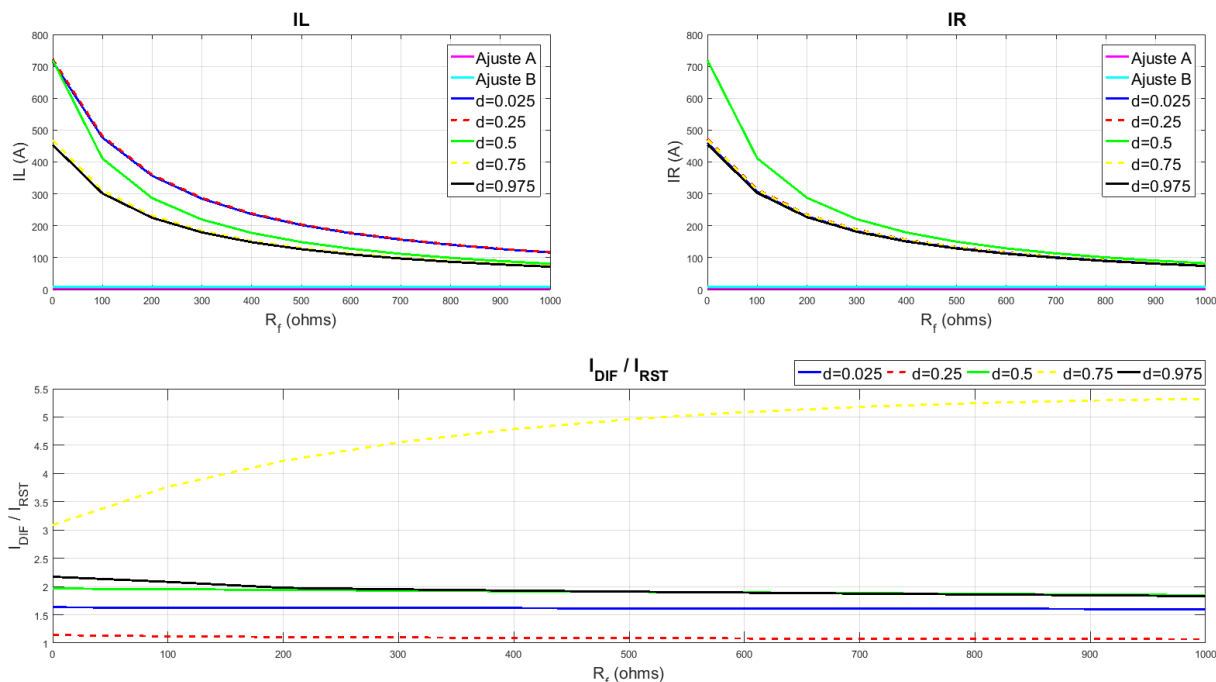


Figura 5.9 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Como na seção anterior, a relação entre as faltas ABT e AB continua válida.

Analisando agora a sensibilidade da função, percebe-se que mesmo para o ajuste 9, mais conservador, todas as condições são satisfeitas. Considerando o par de terminais 1-3, as OVs de menor amplitude aconteceram para uma falta AT em 0.5 p.u. com máxima resistência de falta. Ainda assim, as curvas de falta se mantiveram sempre bem acima dos dois limiares de atuação para a condição 1 (Ajustes A e B). Com relação ao gráfico de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  percebe-se também uma larga confiabilidade de atuação, as curvas se mantiveram sempre bem acima da constante SLP, mesmo para os ajustes 7, 8 e 9, mais sensíveis. Nos cenários restantes, onde mais de uma fase é envolvida na falta, as condições também são satisfeitas, ainda com uma maior margem de confiabilidade já que os níveis de corrente aumentam.

Ainda com relação ao gráfico de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  vale comentar sobre a maior margem de confiabilidade observada para as faltas em 0,75 p.u., essa margem cresce com a resistência de falta e tende a ficar constante. Esse efeito é bastante interessante e mostra que, para o par de terminais 1-3, a corrente diferencial diminui mais lentamente que a de restrição a medida que a resistência de falta aumenta.

Outro ponto importante para este par de terminais é a percepção da função em relação à estimativa de local da falta, esta é apresentada pela tabela abaixo. Vale lembrar que as faltas foram feitas ao longo do trecho entre as barras 1 e 2.

Tabela 5.5 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-3 para o Caso 1.

<b>Resultados <math>m_{87}</math></b>	
Localidade simulada	Localidade detectada ( $m_{87}$ )
0,025 p.u.	0,0256 p.u.
0,25 p.u.	0,2491 p.u.
0,5 p.u.	0,5 p.u.
0,75 p.u.	0,5 p.u.
0,975 p.u.	0,5 p.u.

Para faltas à direita do ponto  $P$ , a função enxerga seu acontecimento sempre no centro da linha. Tal comportamento faz sentido e pode ser rapidamente verificado pela teoria de ondas viajantes. A localização da falta pela função TW87 acontece a partir da detecção dos instantes iniciais de incidência das OV's sobre os terminais local e remoto. No entanto, sabendo que cada subseção da linha demonstrada na Figura 4.7 tem o mesmo tamanho e configuração, entende-se que a OV regressiva será dividida em duas no ponto de encontro  $P$  das subseções e estas chegarão ao mesmo tempo nos dois terminais, local e remoto, dessa forma  $NL_{first} = NR_{first}$ , resultando em  $m_{87} = 0,5$ . Deve se compreender que, estando o ponto comum de conexão dos trechos em outra localização, a variável  $m_{87}$  tenderia a indicar a distância desse ponto comum em relação ao terminal de referência para faltas além do ponto de tap.

### 5.2.1.3 Par de Terminais 2-3

A análise do par de terminais 2-3 tem uma relação muito próxima com a feita para o par 1-3, mas neste caso o efeito relativo à localização das faltas, que antes era causado por faltas à direita de  $P$ , agora será causado por faltas à esquerda.

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

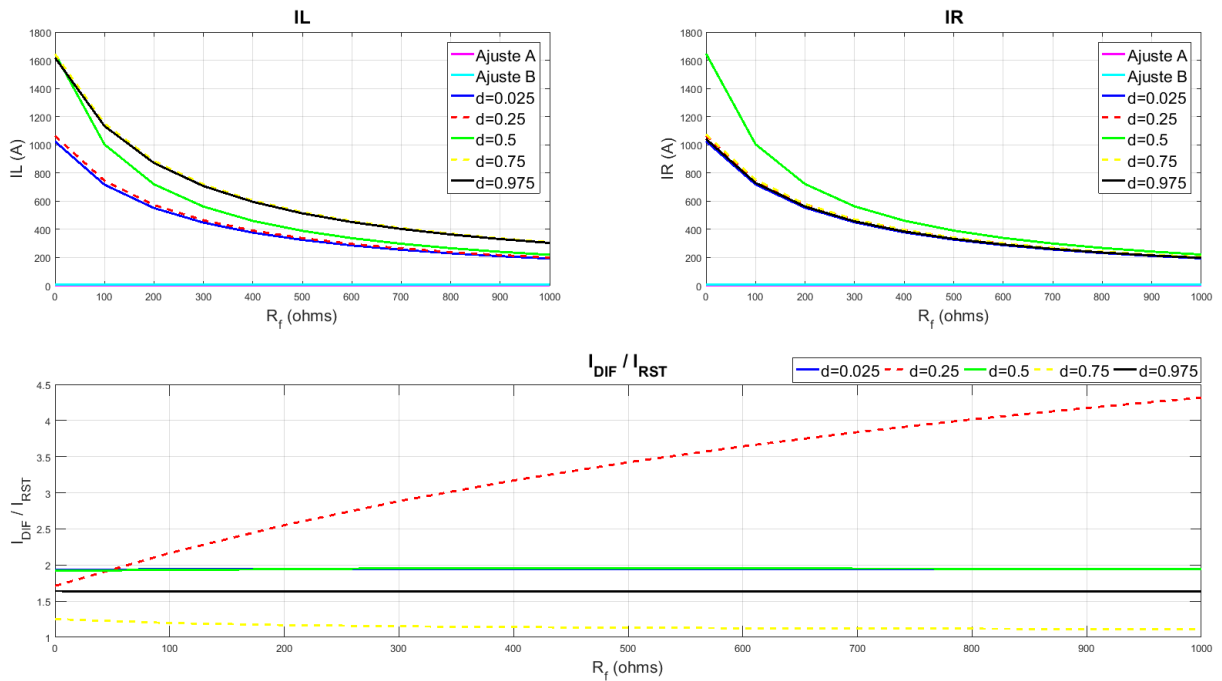


Figura 5.10 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

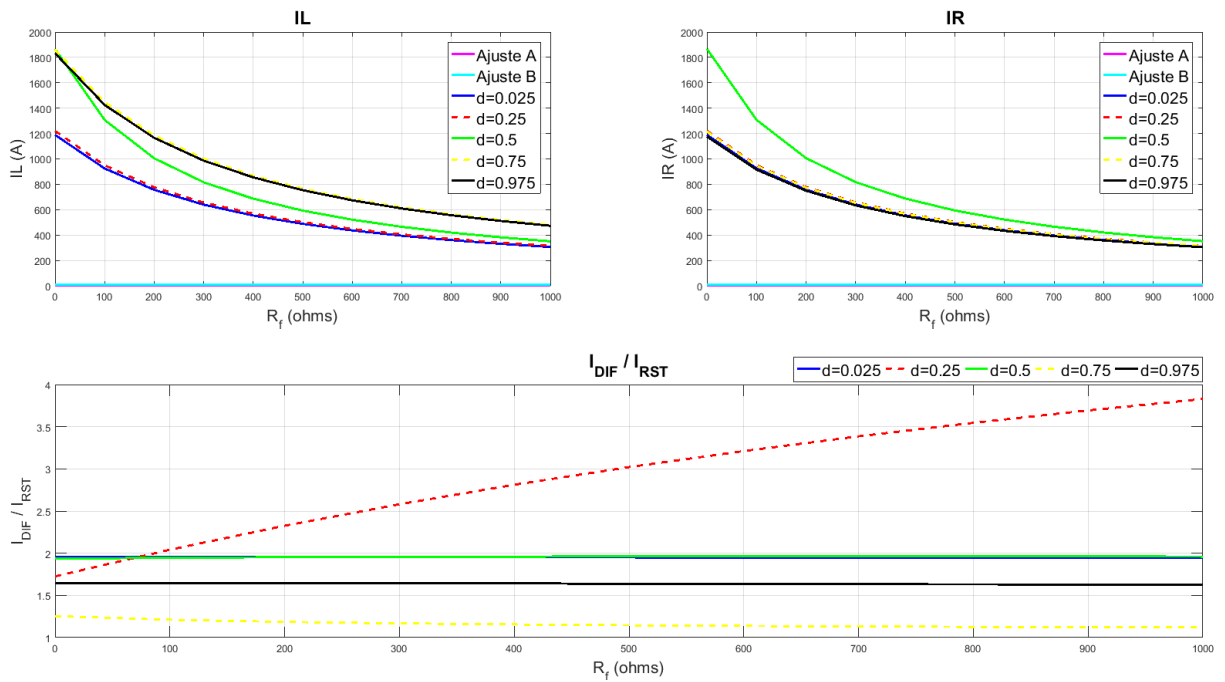


Figura 5.11 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.



Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

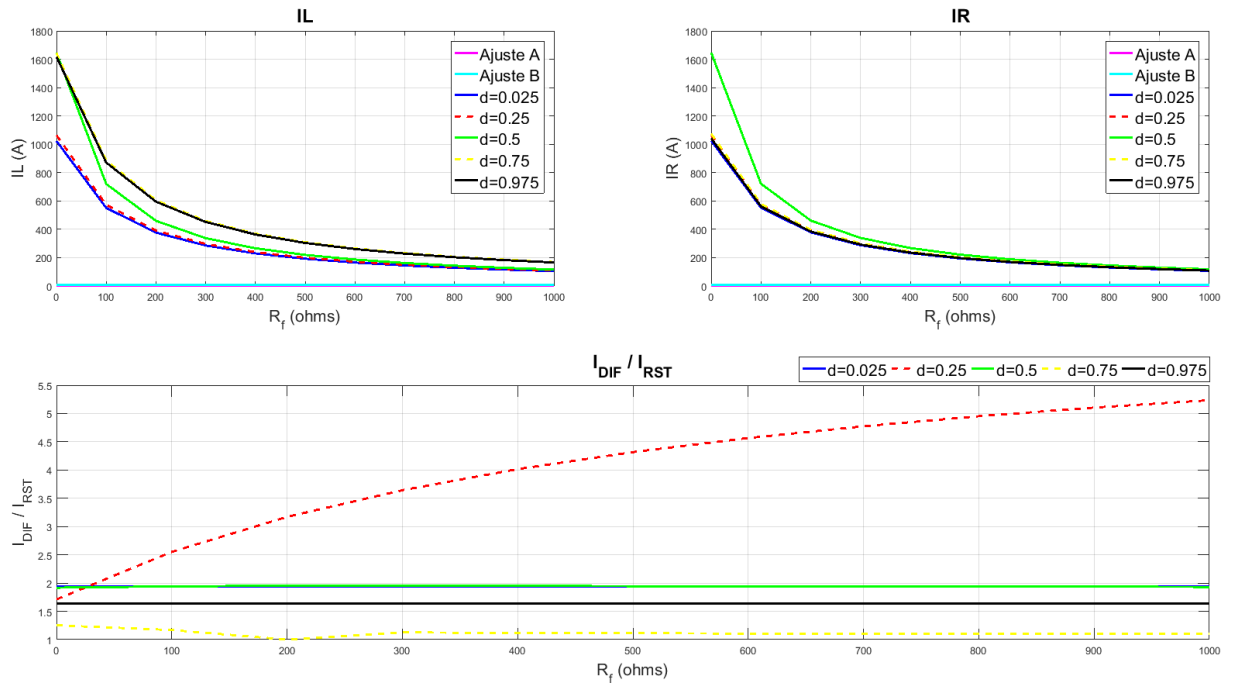


Figura 5.12 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

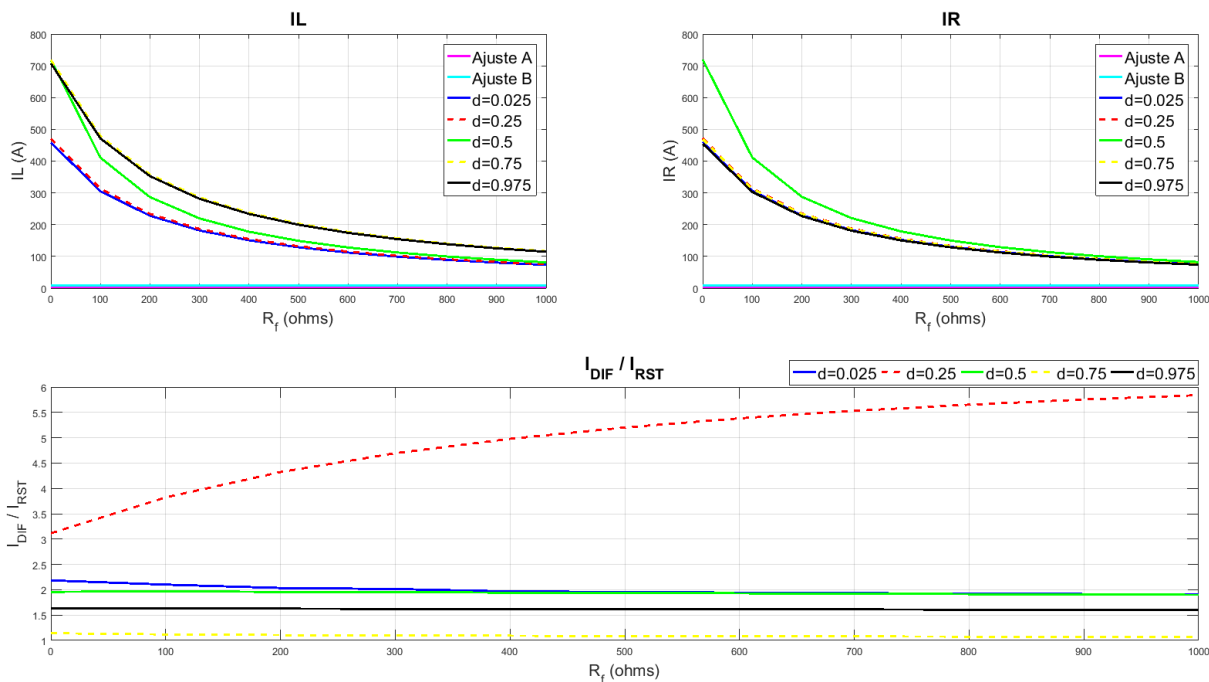


Figura 5.13 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento leve e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Com relação a localização do ponto da falta, a análise dos terminais 1-3 e 2-3 apresenta uma relação curiosa, mas esperada. Para 1-3, faltas à direita do ponto  $P$  são detectadas em 0,5 p.u., já para 2-3, as faltas detectadas em 0,5 p.u. acontecem à esquerda de  $P$ . Para demonstrar tal constatação segue tabela da estimativa do local da falta pela função TW87 para análise dos terminais 2-3.

Tabela 5.6 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 2-3 para o Caso 1.

Resultados $m_{87}$	
Localidade simulada	Localidade detectada ( $m_{87}$ )
0,025 p.u.	0,5 p.u.
0,25 p.u.	0,5 p.u.
0,5 p.u.	0,5 p.u.
0,75 p.u.	0,2491 p.u.
0,975 p.u.	0,0256 p.u.

Percebe-se então, como esperado, que faltas à esquerda do ponto  $P$  são enxergadas pela função TW87 aplicada aos terminais 2-3 em 0.5 p.u. (ponto comum de conexão). novamente a explicação para esse efeito é a chegada simultânea da OV, agora progressiva que se dividiu no centro da LT, sobre os terminais 2 e 3. Outro efeito importante é que, nesta análise, o terminal

local é considerado na barra 2 e, embora a falta esteja localizada em 0,975 p.u. ao longo do trecho principal da LT (entre os terminais 1 e 2), é vista como no começo do trecho que liga os terminais 2 e 3, pois a referência para o valor da distância de falta real é a barra 1.

Sobre a sensibilidade de da função, os resultados encontrados aqui são muito próximos dos obtidos nos casos anteriores. É interessante então fazer uma comparação entre os valores de  $IL$ ,  $IR$ ,  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  para os terminais 1-3 e 2-3, para faltas em 0,975 p.u. e 0,025 p.u., respectivamente, e dessa forma observar que os valores diferem em apenas cerca de 1%. Consequentemente, todas as condições foram satisfeitas, mesmo para todos os ajustes aplicados.

Para esse par de terminais são as faltas em 0,25 p.u. que geram maior margem de confiabilidade quanto a atuação da segunda condição. Novamente constata-se um decaimento da corrente diferencial mais lento que de corrente de restrição para um aumento na resistência de falta.

## **5.2.2 Caso 2**

Como contido na Tabela 5.2, nesta seção serão abordados os casos de falta com carregamento pesado, além disso, será considerado um valor de ' $\theta$ ' igual à 90°. As representações provenientes da TW87 são representadas abaixo.

### **5.2.2.1 Par de Terminais 1-2**

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

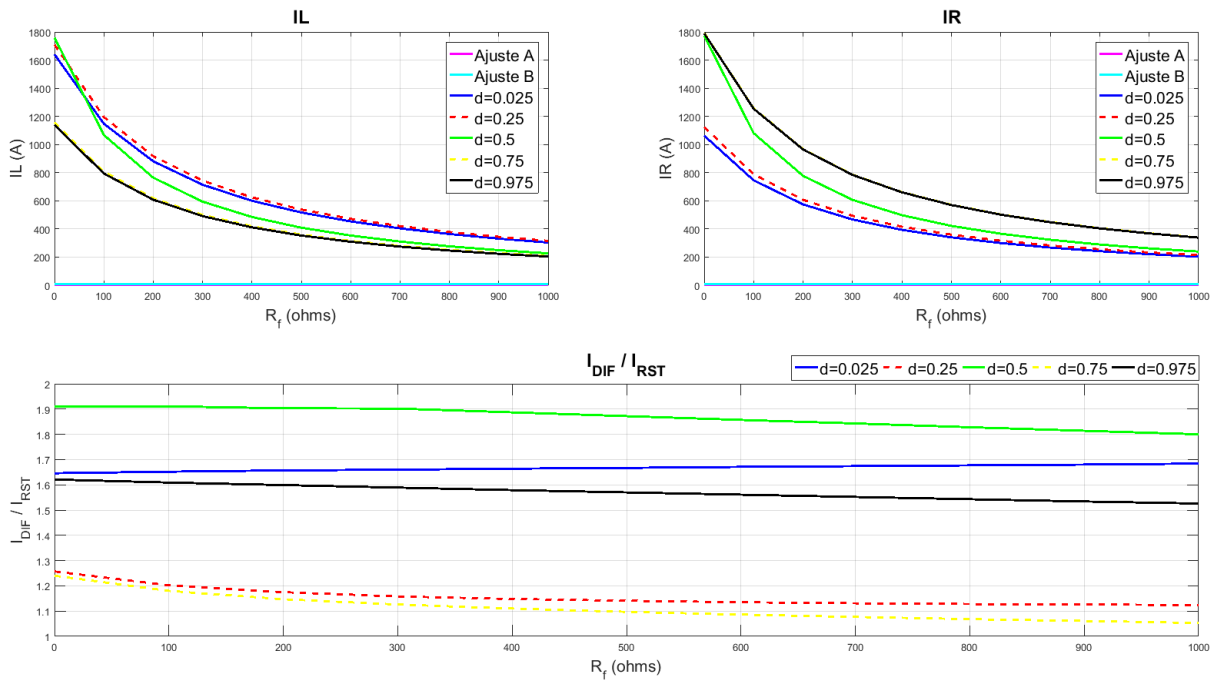


Figura 5.14 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

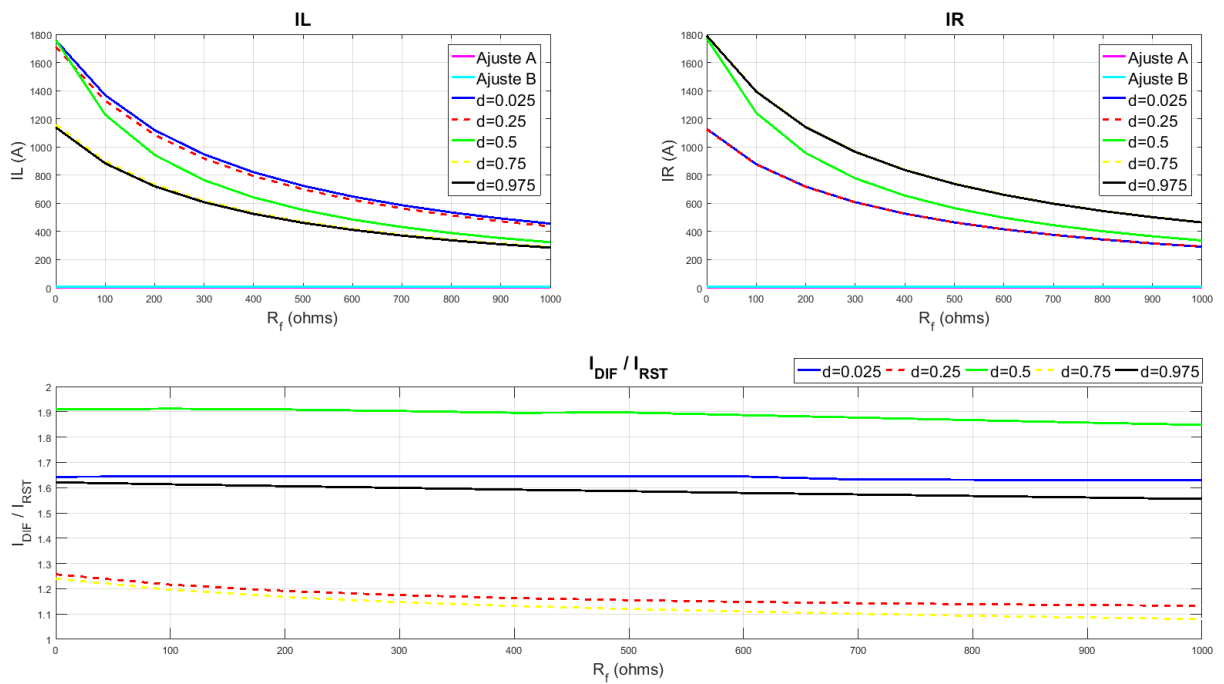


Figura 5.15 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

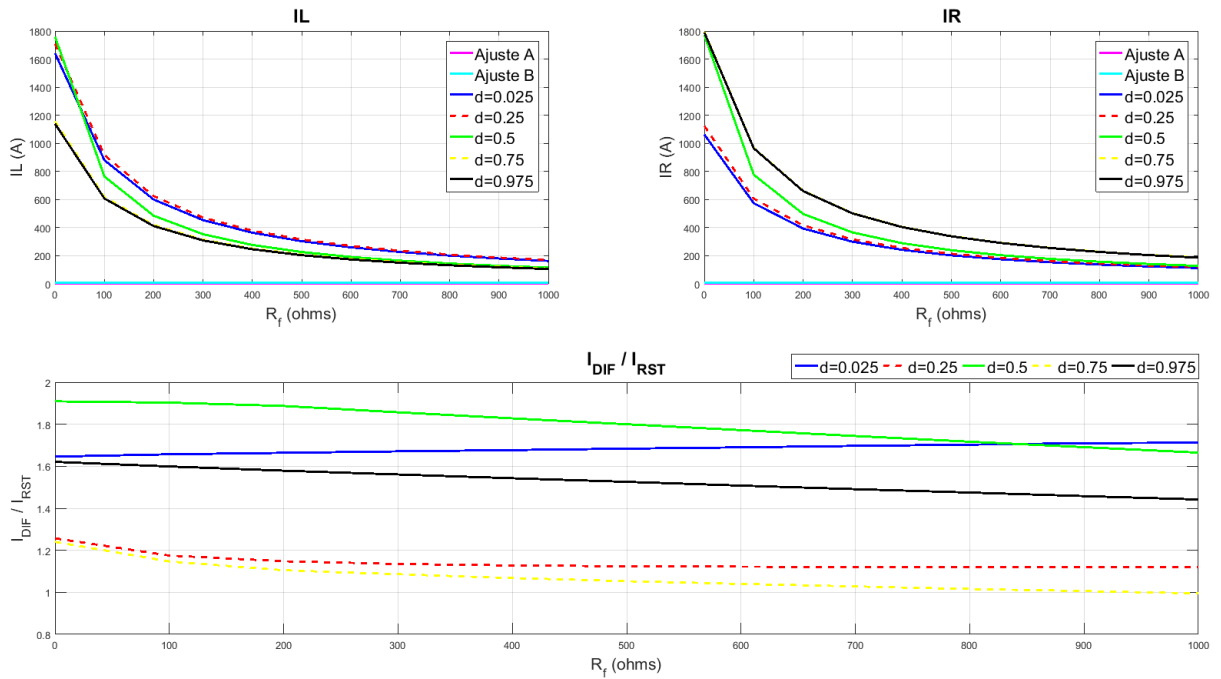


Figura 5.16 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

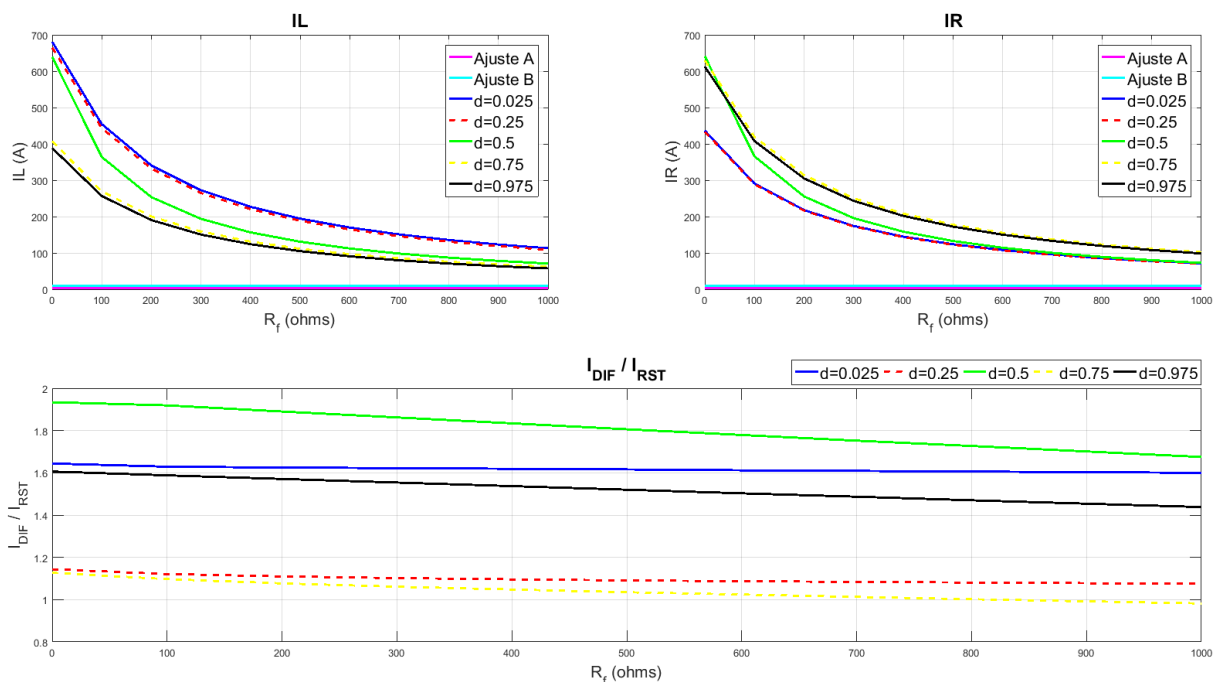


Figura 5.17 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

As magnitudes das correntes geradas pelas faltas AB e ABT são maiores para o carregamento pesado do que para o carregamento leve, o mesmo não é verificado para faltas AT e ABC, as quais demonstram justamente o contrário e tornam mais difícil a atuação da função, que mesmo assim atuou sempre que necessário e para todos os ajustes aplicados.

Outro efeito importante a ser observado é a variação das correntes em relação à distância da falta. Para cenários com carregamento pesado existe um espaçamento maior entre as curvas. Este efeito é esperado para um carregamento deste nível, pois com uma maior corrente circulando no sistema, a queda de tensão, que é proporcional à corrente, também aumenta. Portanto, considerando que o surgimento das OV's está intrinsecamente ligado à tensão no ponto da falta, é natural que as variações das magnitudes das correntes sejam maiores.

No que diz respeito à atuação para segunda condição da função TW87, com base nas curvas de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$ , percebe-se uma maior margem de confiabilidade para este caso, com carregamento pesado, que para o caso anterior.

Quanto à localização da falta, os resultados obtidos em nada diferem dos demonstrados na seção 5.2.1.1 e, portanto, também demonstram uma ótima precisão de localização de falta para LT com carregamentos pesados.

### 5.2.2.2 Par de Terminais 1-3

Nesta etapa são feitas as mesmas considerações colocadas na seção 5.2.1.2, salvo o fato de se tratar agora de um carregamento pesado.

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

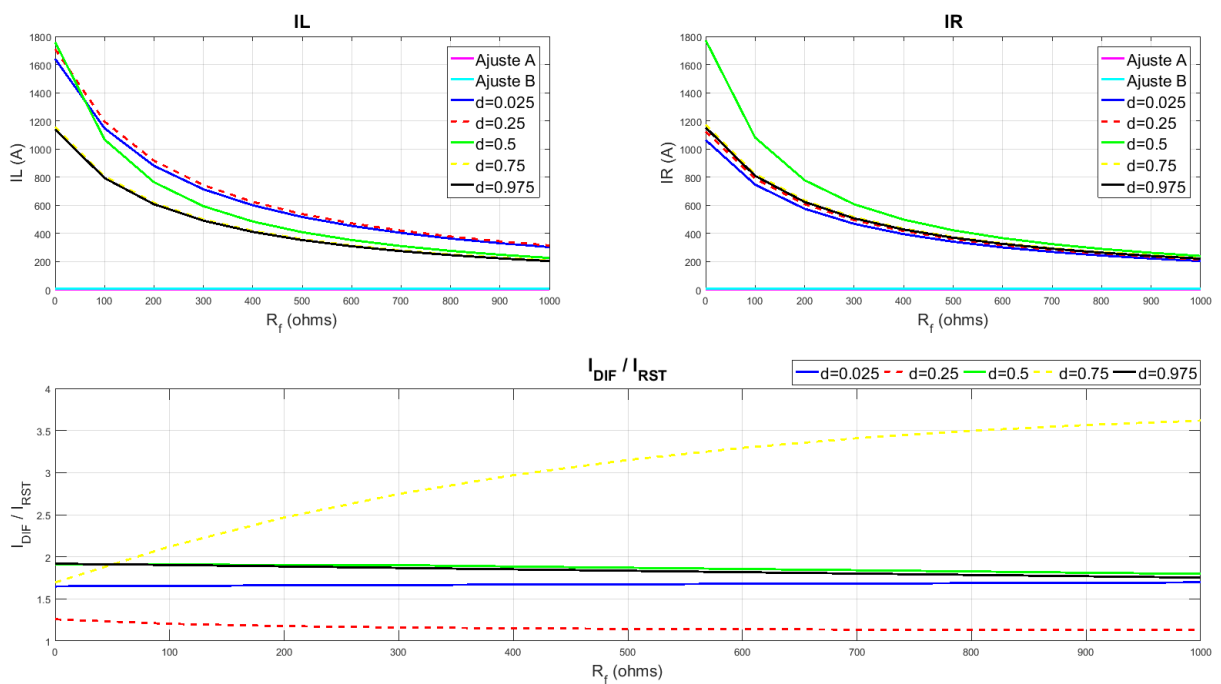


Figura 5.18 Variação das correntes em função de R<sub>f</sub> entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

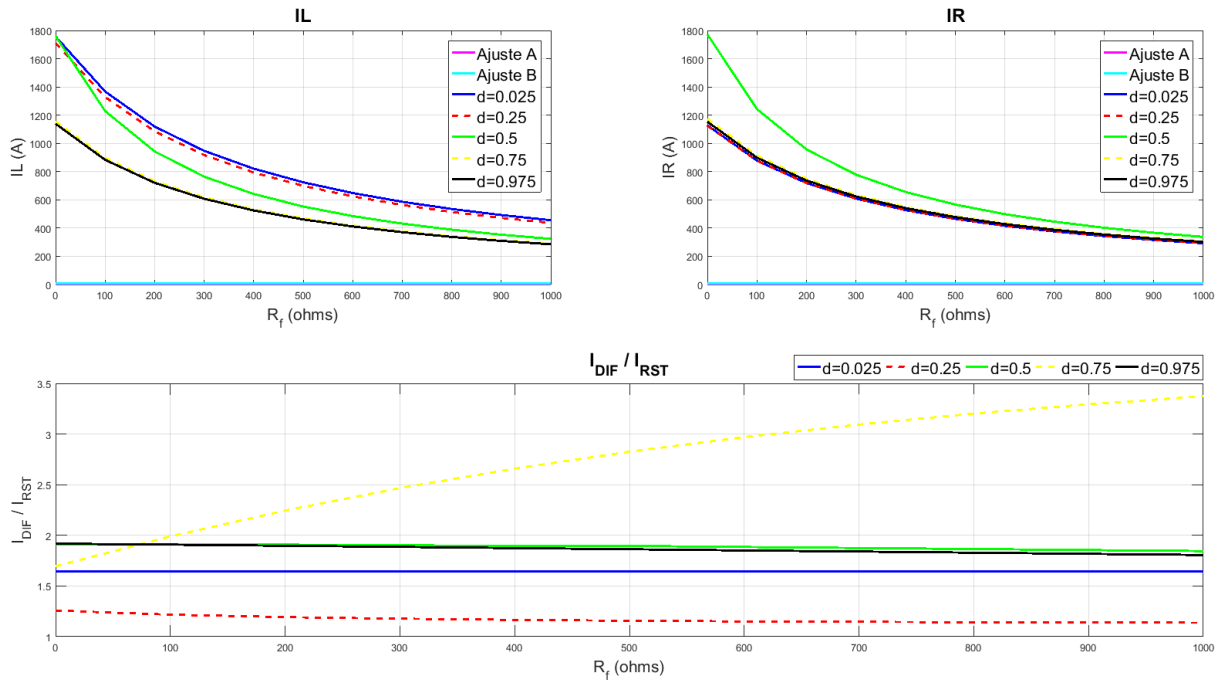


Figura 5.19 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

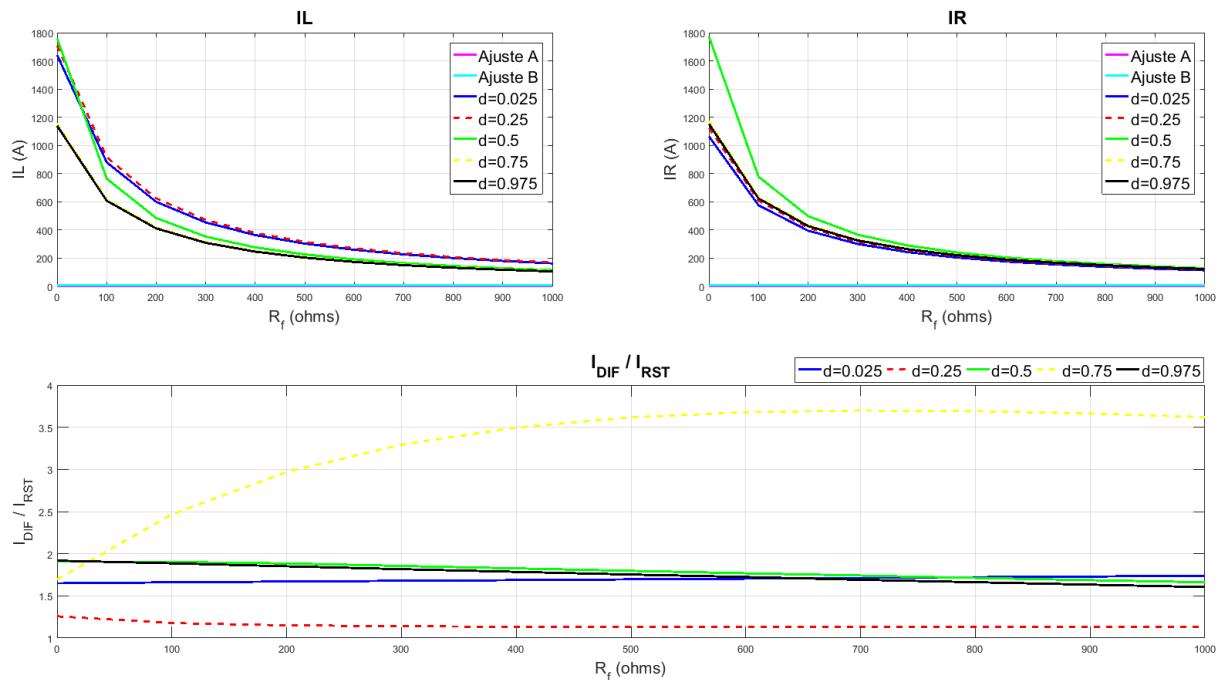


Figura 5.20 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.



Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

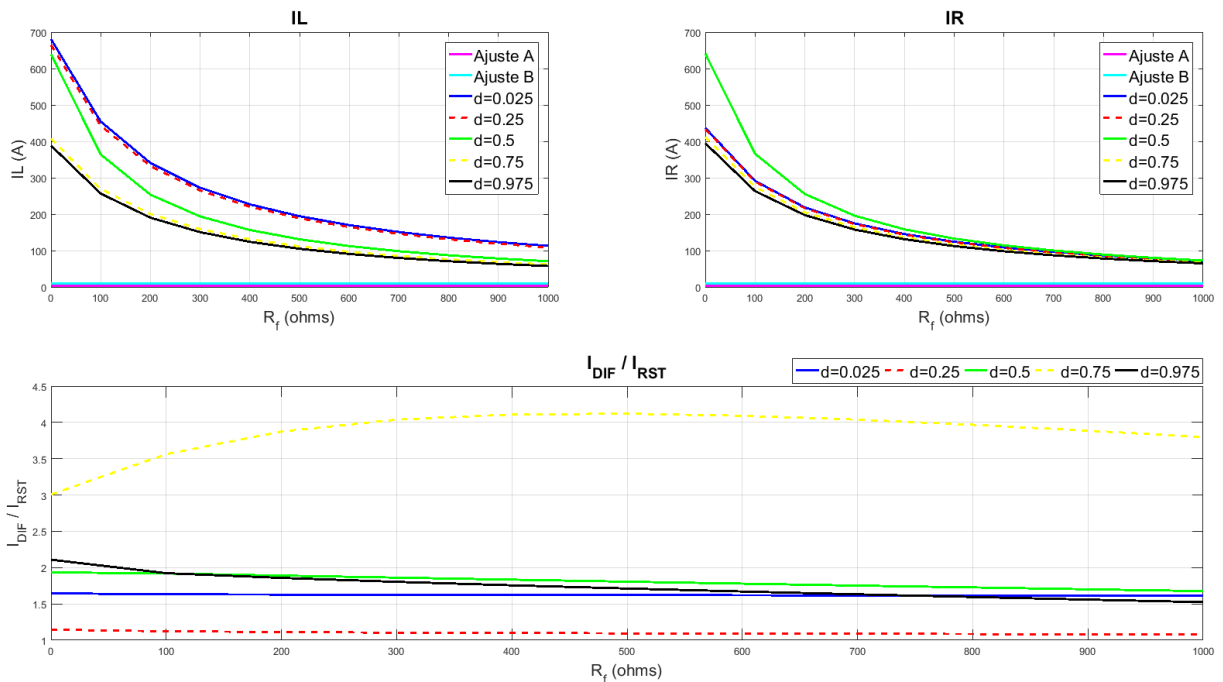


Figura 5.21 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Lembrando que faltas fora da região compreendida entre as barras que estão sendo analisadas causam uma maior atenuação das OV's uma vez que, conforme já explicado na seção 5.2.1.2, as ondas regressivas lançadas para faltas à direita de  $P$  são divididas pela metade antes de chegar aos terminais 1 e 3 e, assim, ocorre uma diminuição da magnitude de corrente para faltas sob carregamento pesado. Nessas condições, as menores grandezas resultantes aconteceram para uma falta AT em 0,975, como era de se esperar. Contudo, as curvas se mantiveram sempre bem acima dos limiares e a função TW87 não foi comprometida, atuando corretamente sempre que necessário e mediante todos os ajustes.

Assim como em 5.2.1.2, a maior margem de confiabilidade quanto à segunda condição foi observada para as faltas em 0,75 p.u., essa margem cresce com a resistência de falta e tende a ficar constante. Esse efeito é bastante interessante e mostra que, para o par de terminais 1-3, a corrente diferencial diminui mais lentamente que a de restrição, mesmo para um carregamento pesado, à medida que a resistência de falta aumenta.

Quanto à precisão na localização do ponto de falta,  $m_{87}$  assumiu os mesmos valores vistos na seção 5.2.1.2.

### 5.2.2.3 Par de Terminais 2-3

Nesta etapa são feitas as mesmas considerações colocadas na seção 5.2.1.3, salvo o fato de se tratar agora de um carregamento pesado.

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

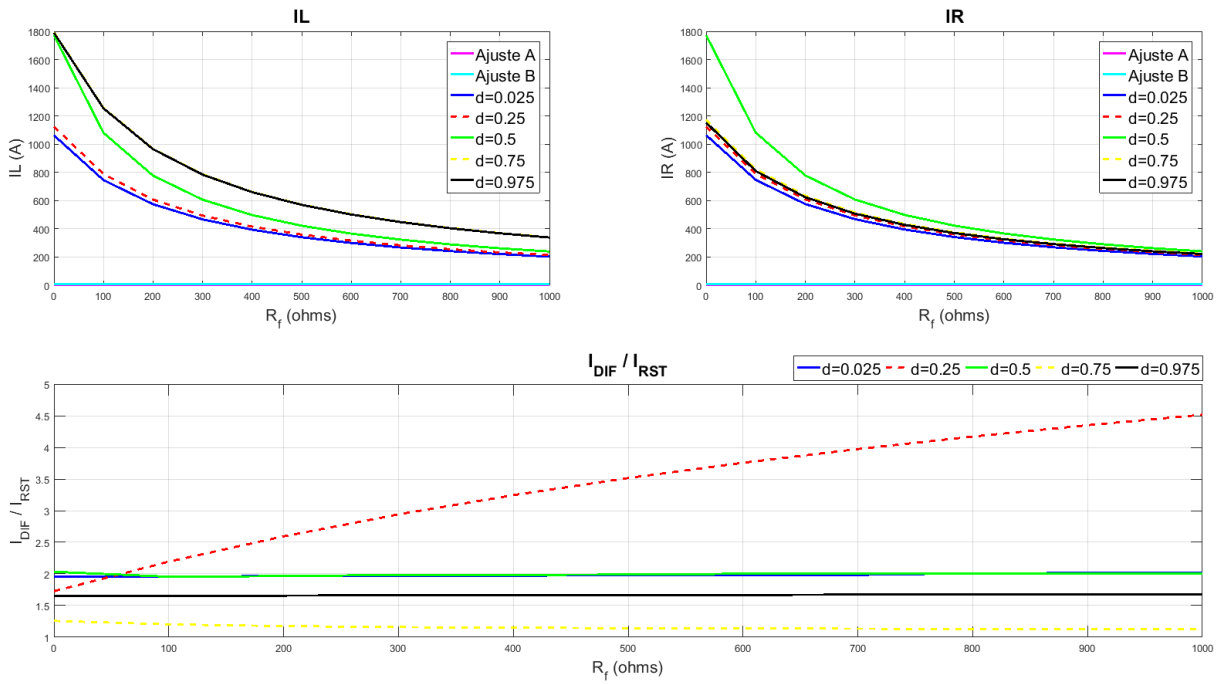


Figura 5.22 Variação das correntes em função de R<sub>f</sub> entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

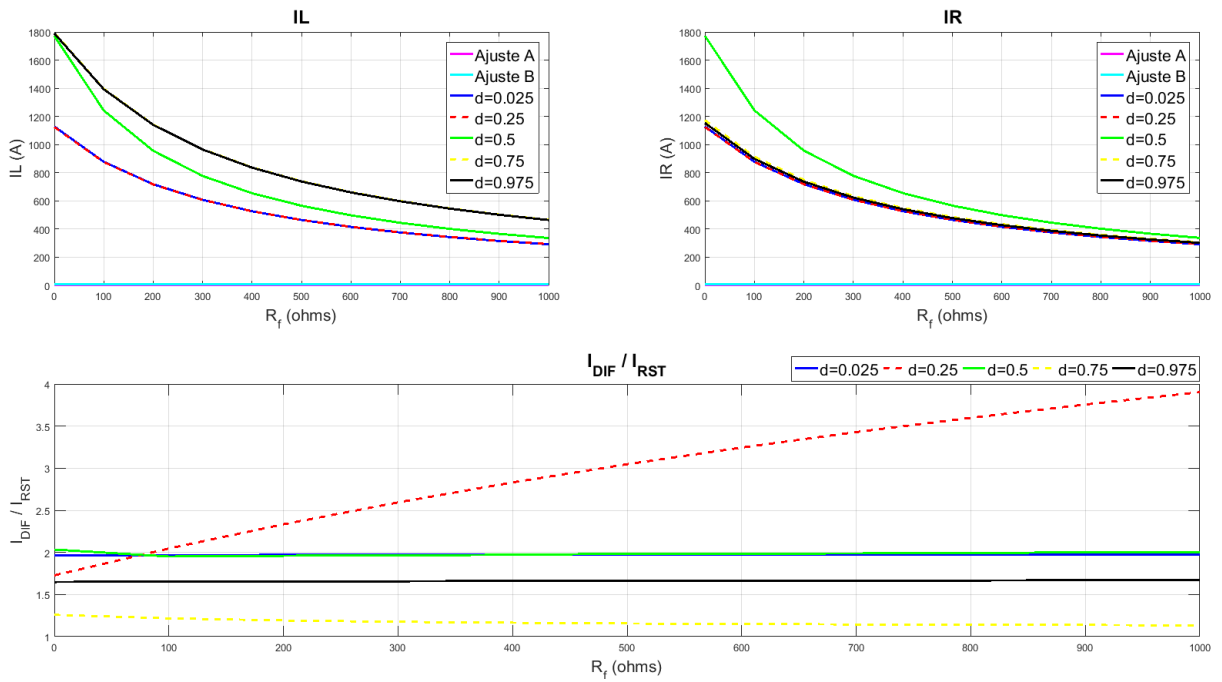


Figura 5.23 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

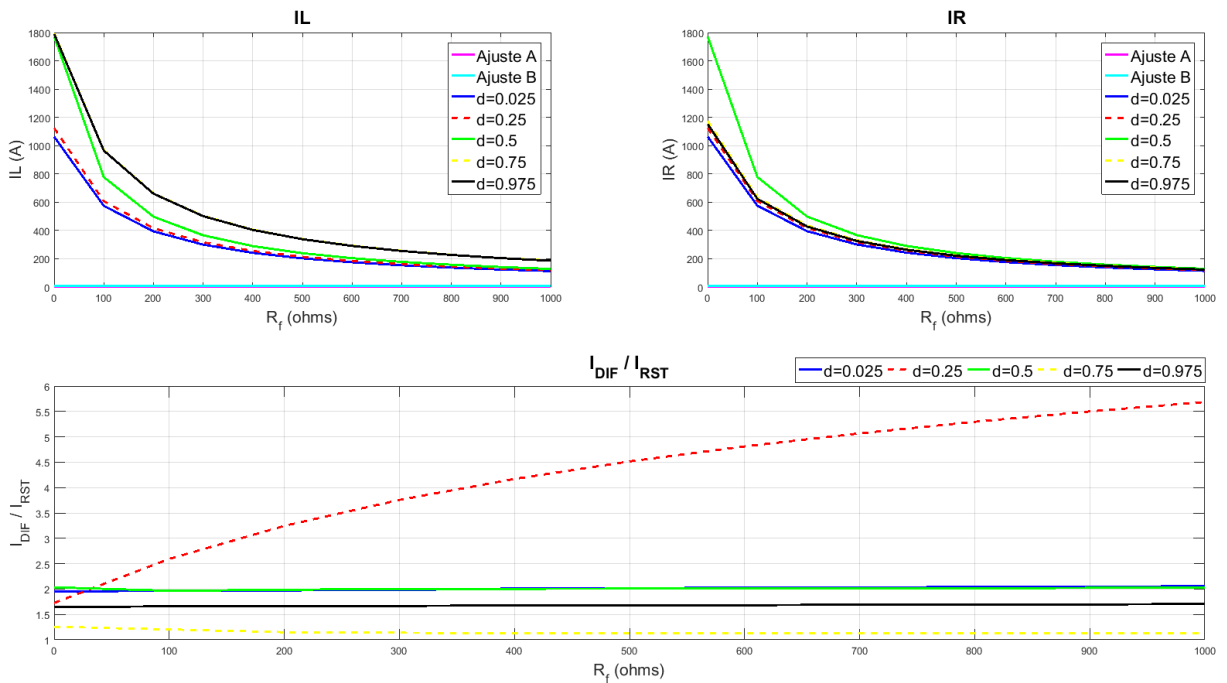


Figura 5.24 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

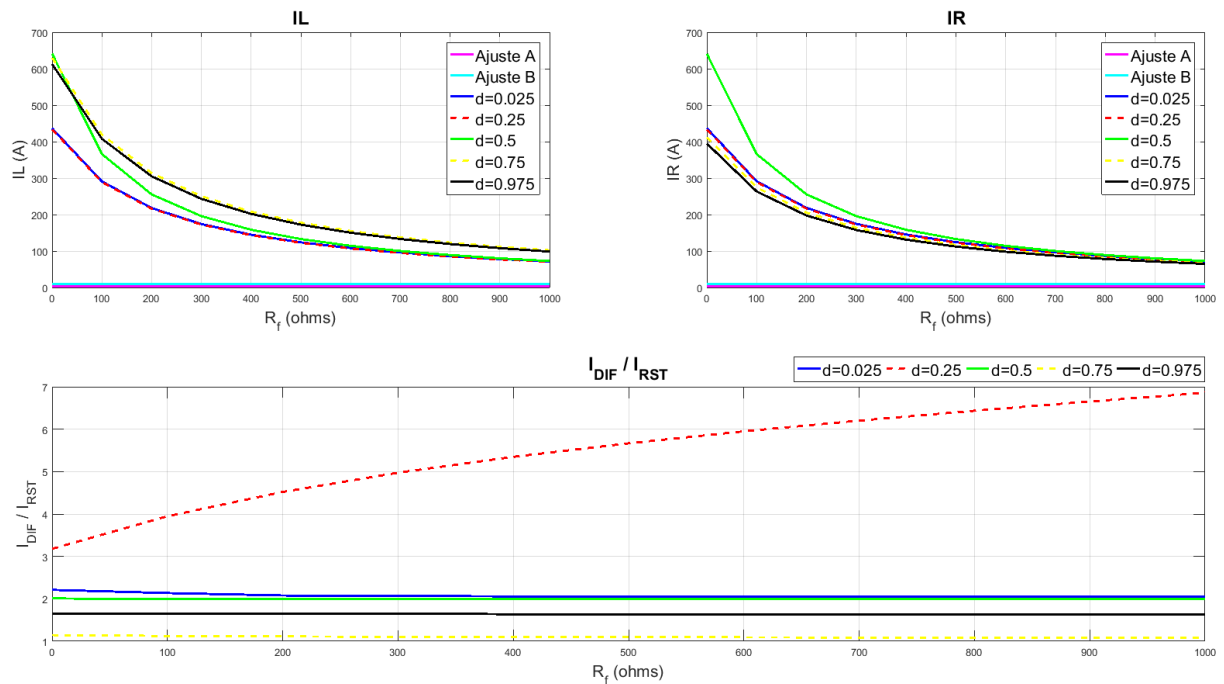


Figura 5.25 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento pesado e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Nesta análise uma excentricidade acontece e as OV's de menor amplitude não mais são geradas por faltas em 0.025 p.u., mas em 0.25 p.u., ainda para uma falta AT. Contudo, as curvas de  $IL$ ,  $IR$  e  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  se mantiveram sempre bem acima dos limiares e a função TW87 não foi comprometida, atuando corretamente sempre que necessário e mediante todos os ajustes.

Quanto à precisão na localização da falta, os resultados obtidos foram iguais aos demonstrados na seção 5.2.1.3.

### 5.2.3 Caso 3

Para o Caso 3, conforme Tabela 5.2 foram consideradas variações no ângulo de incidência da falta  $\theta$ , tomando como referência a fase A. Com relação à abertura angular  $\delta$ , simulou-se um carregamento intermediário, com  $0^\circ$  para a fonte 1,  $-10^\circ$  para a fonte 2 e  $-15^\circ$  para a fonte 3. Além disso, o cenário era de falta franca, com  $R_f \cong 0$ .

Os resultados serão apresentados na mesma estrutura das subseções anteriores, um par de terminais por vez.

### 5.2.3.1 Par de Terminais 1-2

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

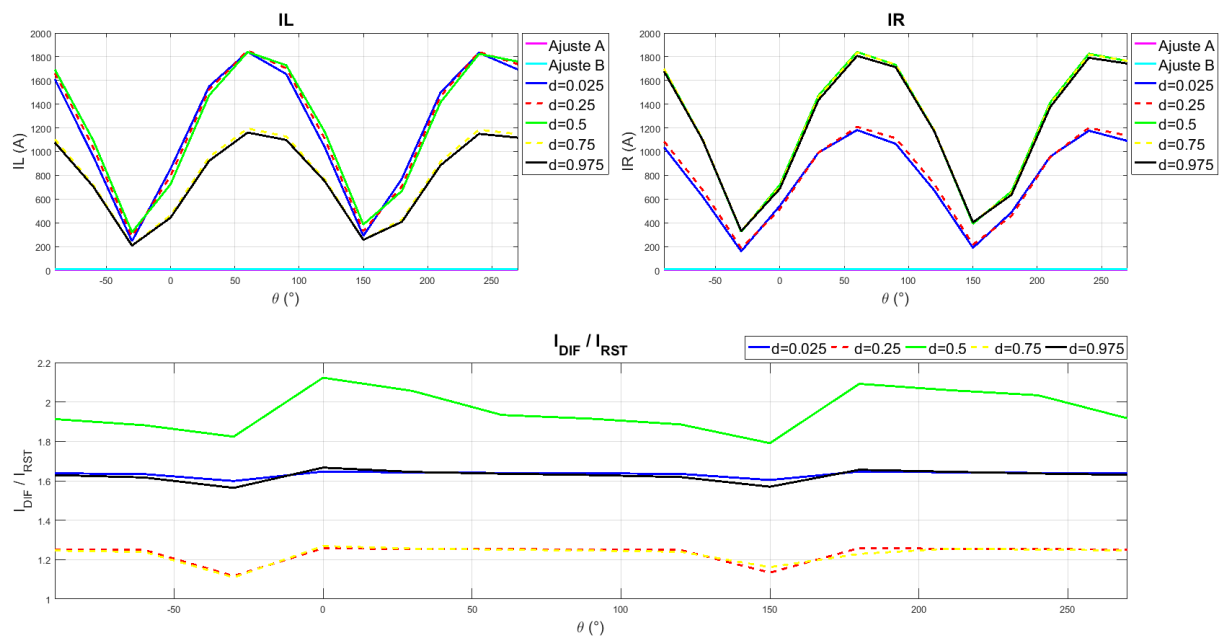


Figura 5.26 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

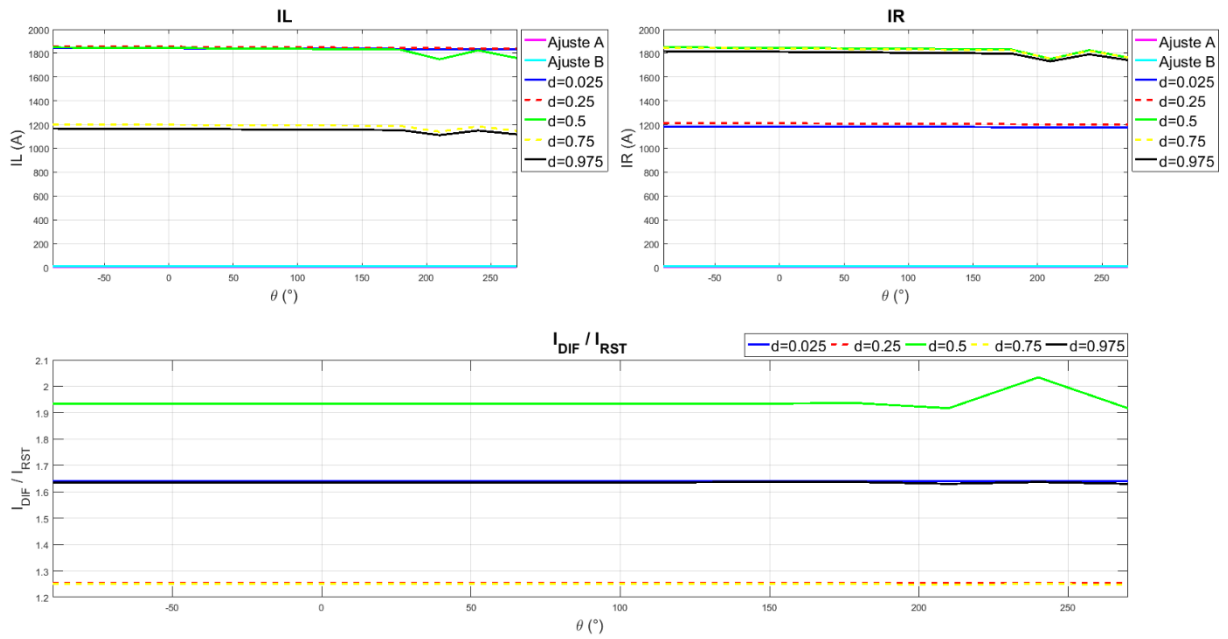


Figura 5.27 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

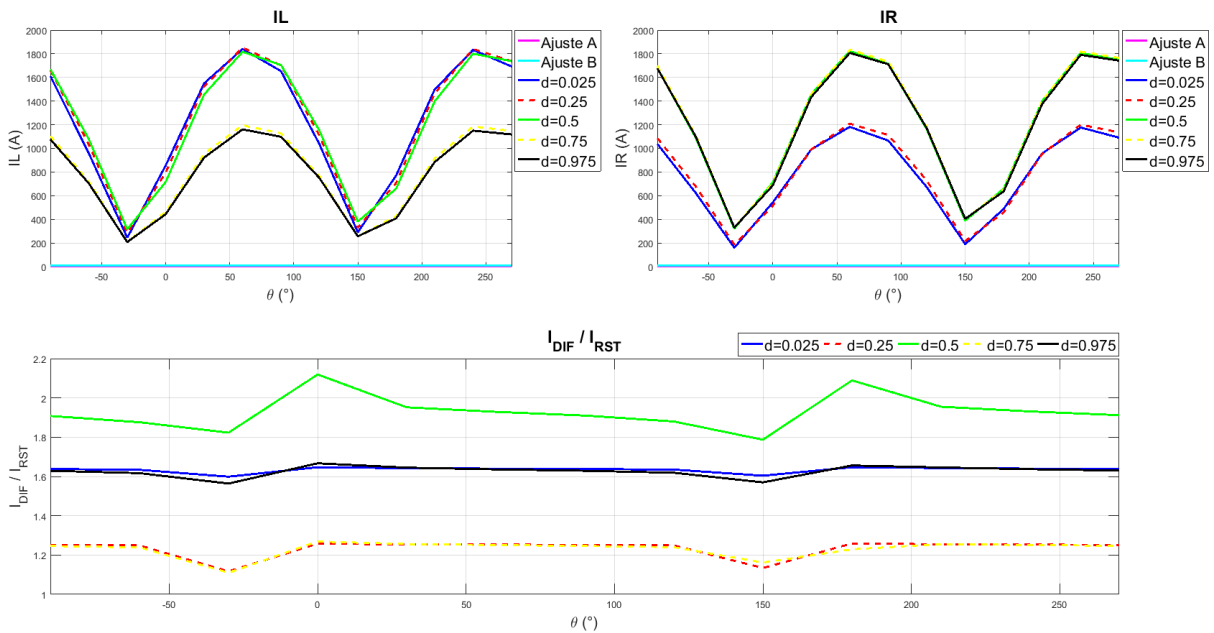


Figura 5.28 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

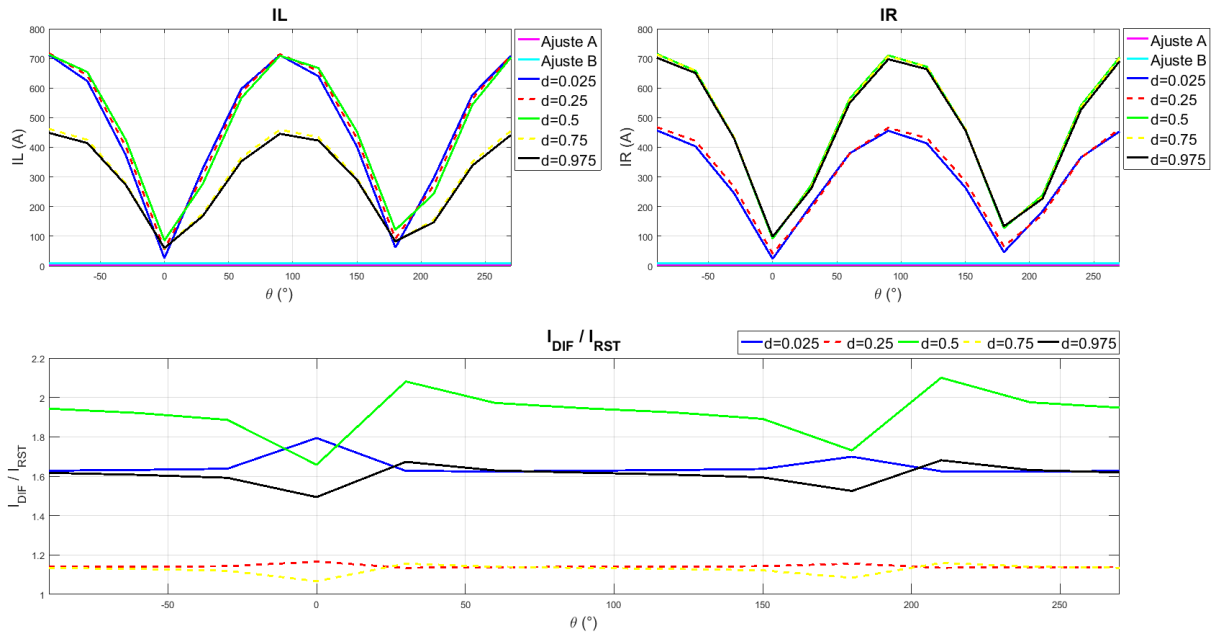


Figura 5.29 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AT.

Como foram testados cenários de falta que envolvem mais de uma fase, é necessária uma atenção extra quanto à análise desse caso. Sabendo que a fase A foi tomada como referência é natural esperar que, para faltas AT, os sinais  $IL$  e  $IR$  de menor valor se encontravam em  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , enquanto os de maior valor estavam em  $90^\circ$  e  $270^\circ$ . Gerando assim sinais  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  mínimos e máximos nestes mesmos ângulos, respectivamente.

Mesmo com mínimas magnitudes para os ângulos de incidência citados no parágrafo anterior, as curvas se mantiveram acima dos limiares de atuação e a função atuou corretamente para todos os ajustes aplicados.

Com relação a satisfação da segunda condição ocorre o que vinha sendo observado, faltas em 0,5 p.u. para análise dos terminais 1-2, geram uma razão  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  mais elevada, fazendo a função atuar com maior margem de confiabilidade.

Quando se trata de faltas que envolvem outras fases além da A, os sinais mínimos e máximos gerados pelo curto não mais se apresentam nos ângulos citados, pois agora ocorre uma interação com outras fases, ou seja, embora a fase A apresente menor valor de tensão em  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , as fases B e C não estavam com suas tensões mínimas nestes instantes. Por isso, é perceptível pelas outras imagens que os sinais  $IL$ ,  $IR$ ,  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  estão mais altos. Nesses

cenários, para todos os ajustes e variações angulares de incidência, as condições de falta são satisfeitas.

Nas imagens que representam as grandezas resultantes de uma falta que envolvem as fases A, B e C é possível ver uma linha que se mantém quase que constante ao longo das variações angulares. Esse fenômeno pode ser explicado a partir da interação entre as três fases ligadas ao mesmo potencial, dessa forma, sempre que uma das fases está com tensão mínima ou máxima, ocorre uma compensação pelas outras duas de maneira a gerar sinais de  $I_L$ ,  $I_R$ ,  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  quase que constantes. Devido à essa interação, uma segunda observação é válida. Na seção 4.3 comentou-se sobre a consideração dos valores adequados no loop de falta de maneira a tornar a análise independente do tipo de falta que esteja acontecendo. Entretanto, nas faltas que envolviam mais de uma fase, essa detecção de loop nem sempre funcionou como esperado. Nos ângulos de  $-30^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$  em faltas AB e ABT, foram identificados como faltas CA, AT e BT, respectivamente. Já para faltas ABC a classificação foi ainda mais difusa e, além de variar com o ângulo de incidência, também variou com o local da falta. Esses problemas foram identificados nas faltas com ângulos de incidência em torno da passagem da tensão da fase A por zero, o que ocasionou tais erros. Alguns dispositivos até bloqueiam a função a depender das amplitudes. Ainda assim, as condições de atuação continuaram sendo satisfeitas e não foram gerados mais prejuízos à segurança da linha.

Com relação à precisão na localização das faltas, os valores de  $m_{87}$  resultantes são iguais aos apresentados na seção 5.2.1.1., salvo os casos em que a função não atuou, para estes, não houve localização da falta.

### 5.2.3.2 Par de Terminais 1-3

Como esperado, faltas à direita de  $P$  são caracterizadas por menores magnitudes nas grandezas da função aplicada aos terminais 1 e 3, devido aos mesmos fatores já detalhados em seções anteriores.

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.



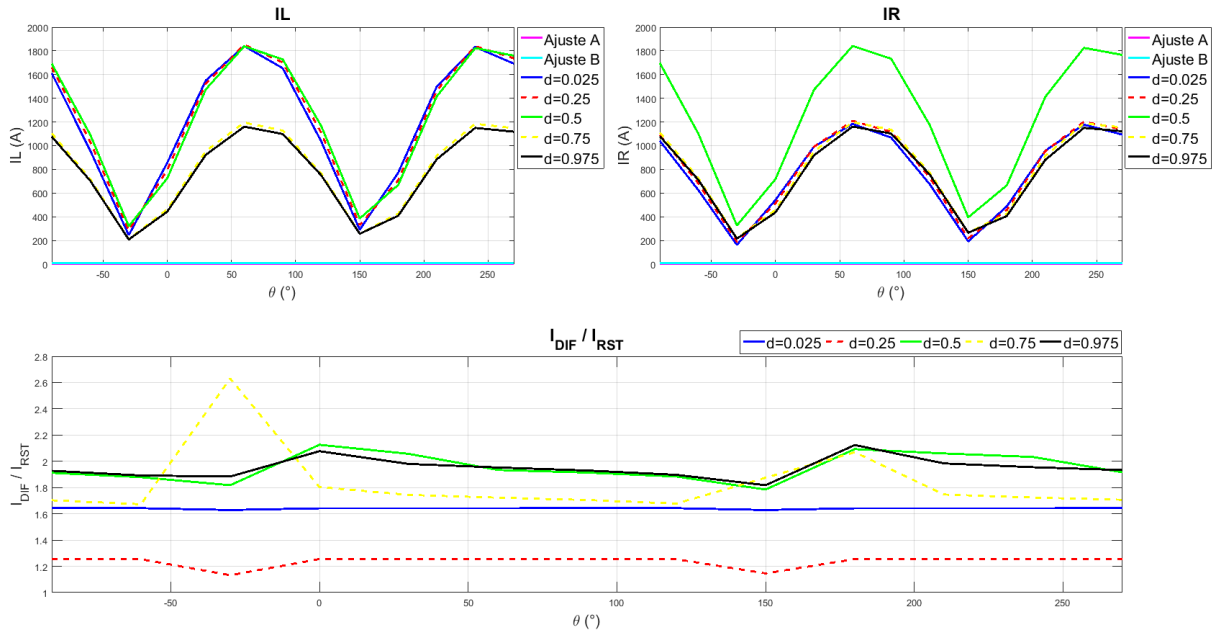


Figura 5.30 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

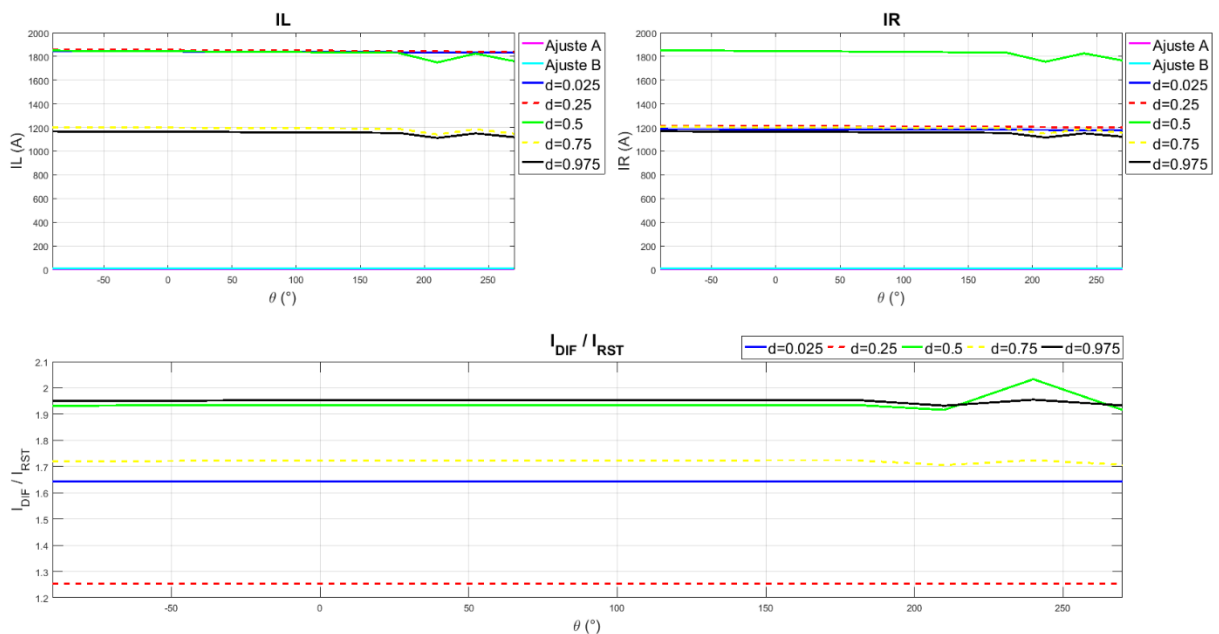


Figura 5.31 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

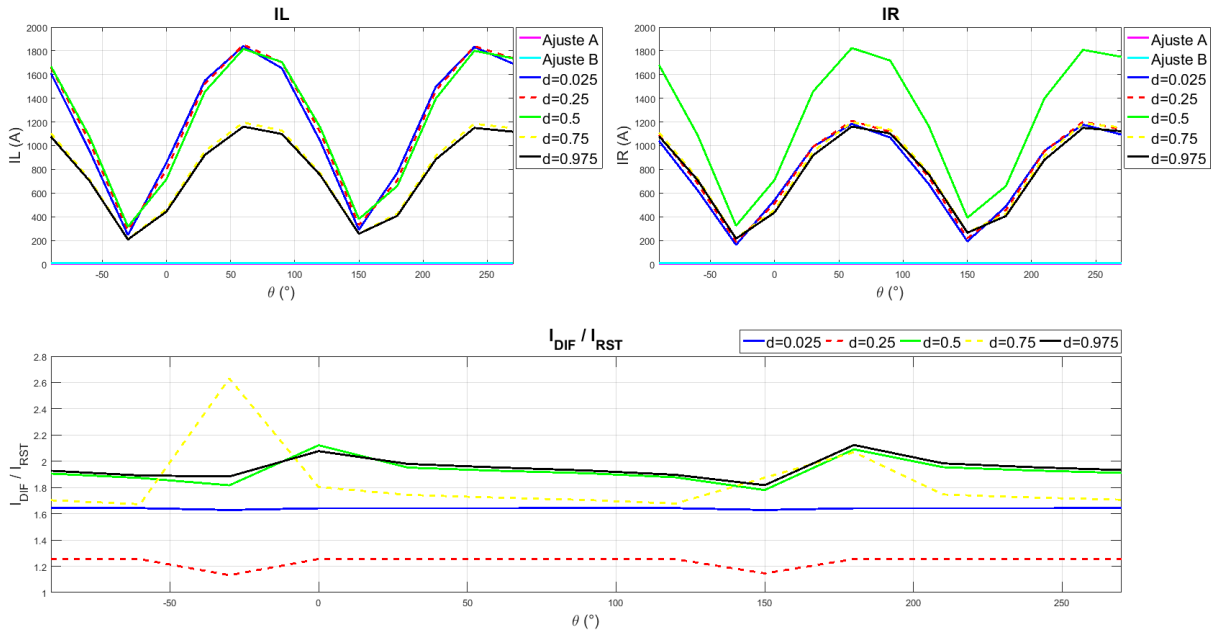


Figura 5.32 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

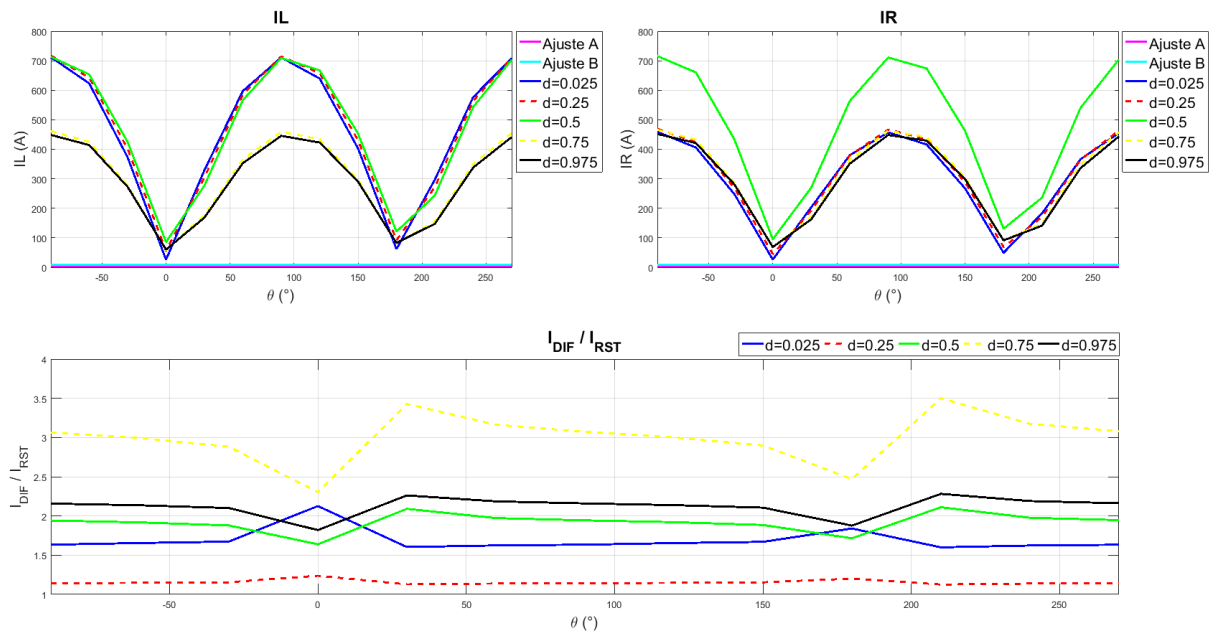


Figura 5.33 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AT.

Uma característica nítida que difere a análise desse par de terminal da anterior é o espaçamento entre as curvas demonstradas no gráfico de ***IL*** e ***IR***, isso acontece devido às perdas por atenuação que agora se tornam maiores para faltas em 0.75 p.u. e 0.975 p.u.. Ainda para estes gráficos, percebe-se que as linhas amarela e preta se encontram na parte inferior do gráfico de ***IL*** e ***IR***, já que sofrem uma maior atenuação por estarem mais distantes de ambas as barras (local e remota).

No mais, todas as curvas se mostraram acima dos limiares de atuação e a função protegeu devidamente a linha.

Quanto à percepção da função sobre o local de acontecimento da falta, o resultado obtido foi igual ao apresentado na seção 5.2.1.2. , salvo os casos em que a função não atuou, para estes, não houve localização da falta.

### **5.2.3.3 Par de Terminais 2-3**

A análise do par de terminais 2-3 tem uma relação muito próxima com a feita para o par 1-3 na seção 5.2.3.2, mas neste caso o efeito relativo à localização das faltas, que antes era causado por faltas à direita de ***P***, agora será causado por faltas à esquerda.

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

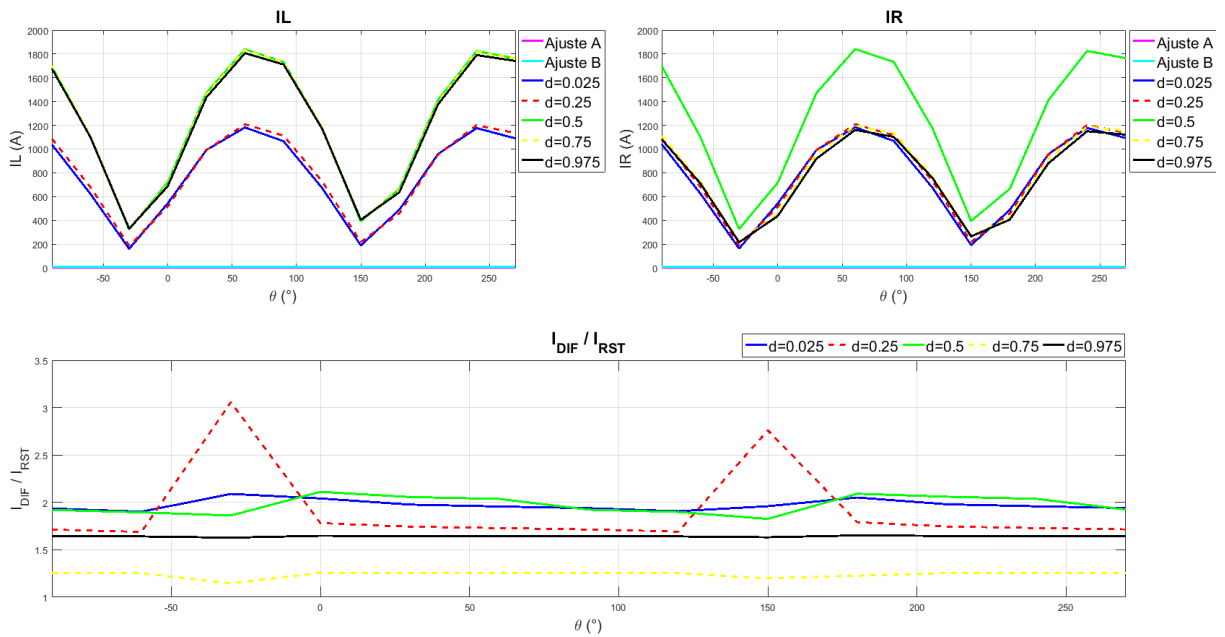


Figura 5.34 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

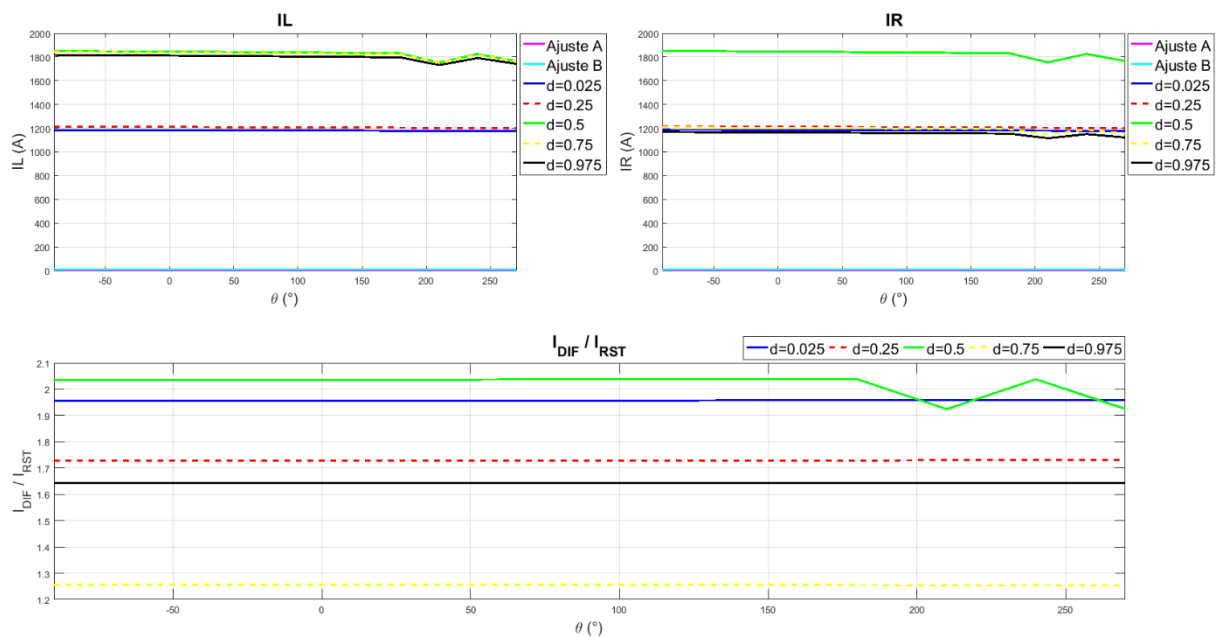


Figura 5.35 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

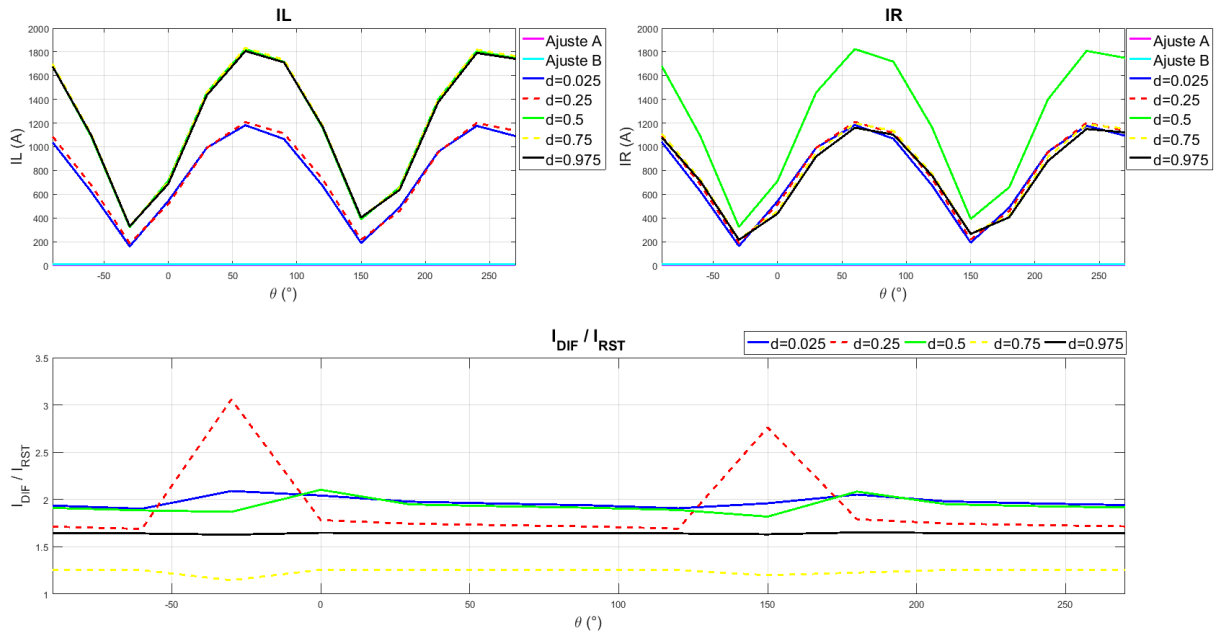


Figura 5.36 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

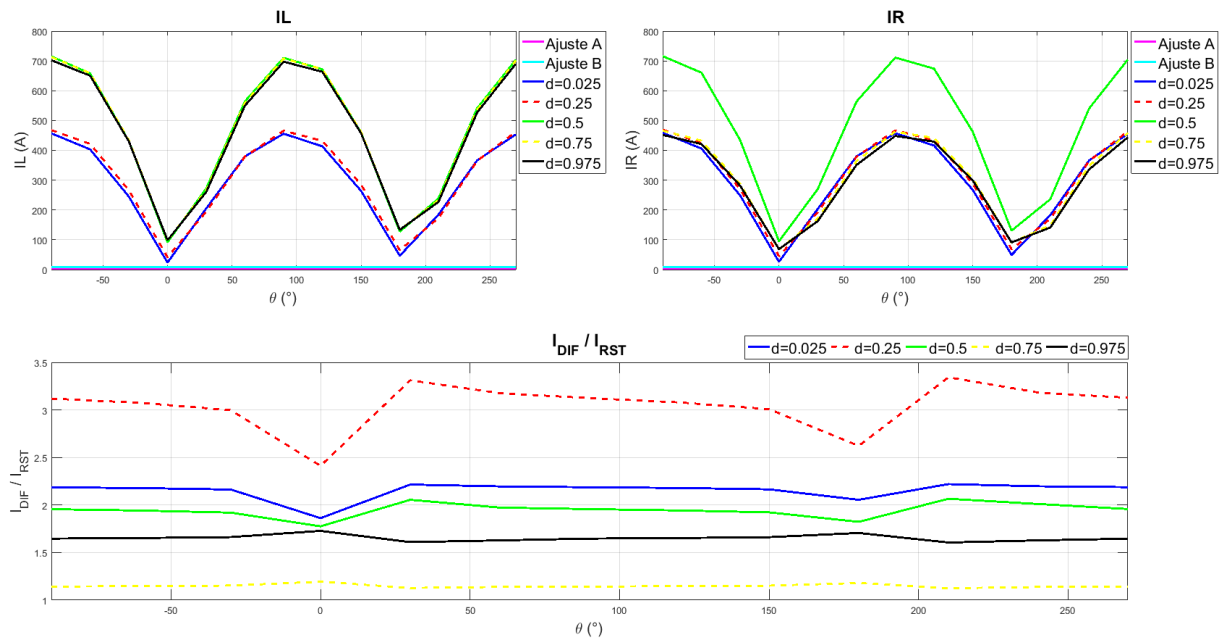


Figura 5.37 Variação das correntes em função de  $\theta$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $R_f = 0$  para uma falta AT.

Novamente observa-se um espaçamento entre as curvas demonstradas no gráfico de **IL** e **IR**, isso acontece devido às perdas por atenuação que agora se tornam maiores para faltas em 0.25 p.u. e 0.025 p.u.. Ainda para estes gráficos, percebe-se que as linhas azul e vermelha se encontram na parte inferior do gráfico de **IL** e **IR**, já que sofrem uma maior atenuação por estarem mais distantes de ambas as barras (local e remota).

No mais, todas as curvas se mostraram acima dos limiares de atuação e a função protegeu devidamente a linha.

Quanto à percepção da função sobre o local de acontecimento da falta, o resultado obtido foi igual ao apresentado na seção 5.2.1.3. , salvo os casos em que a função não atuou, para estes, não houve localização da falta.

### **5.3 FALTAS EXTERNAS**

Como previsto na seção 4.2, condição 3, o relé não deve atuar para faltas fora do trecho compreendido entre os terminais analisados, ou seja, para faltas externas. Como forma de simular esta funcionalidade o bloco de falta foi posto nos três extremos da linha.

Primeiro na extremidade esquerda, lado de fora, do trecho compreendido entre os terminais 1-2, esta curva recebe a cor azul e é classificada pela legenda como “ext esquerda”.

Segundo na extremidade direita, lado de fora, do trecho compreendido entre os terminais 1-2, esta curva recebe a cor amarela e é classificada pela legenda como “ext direita”.

Por último, na extremidade inferior, lado de fora, do trecho compreendido entre os terminais 1-3 ou 2-3, esta curva recebe a cor preta e é classificada pela legenda como “ext inferior”.

A abertura angular considerada para essas faltas tenta simular novamente um carregamento intermediário, além disso, manteve-se também o ângulo de incidência da falta em 90° tendo como referência a fase A. Variou-se, portanto, apenas a resistência de falta para cada localidade do curto e fases envolvidas.

Vale ressaltar também que, neste cenário, a divisão da OV que acontece no ponto central da LT ganha ainda mais relevância na análise. Isso se deve ao fato de que, somada à inversão

de fase que as OV's sofrem ao atravessar os barramentos, a diferença entre  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  diminui, portanto, uma consideração especial para o valor da constante  $SLP$  deve ser feita.

### 5.3.1 Par de Terminais 1-2

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

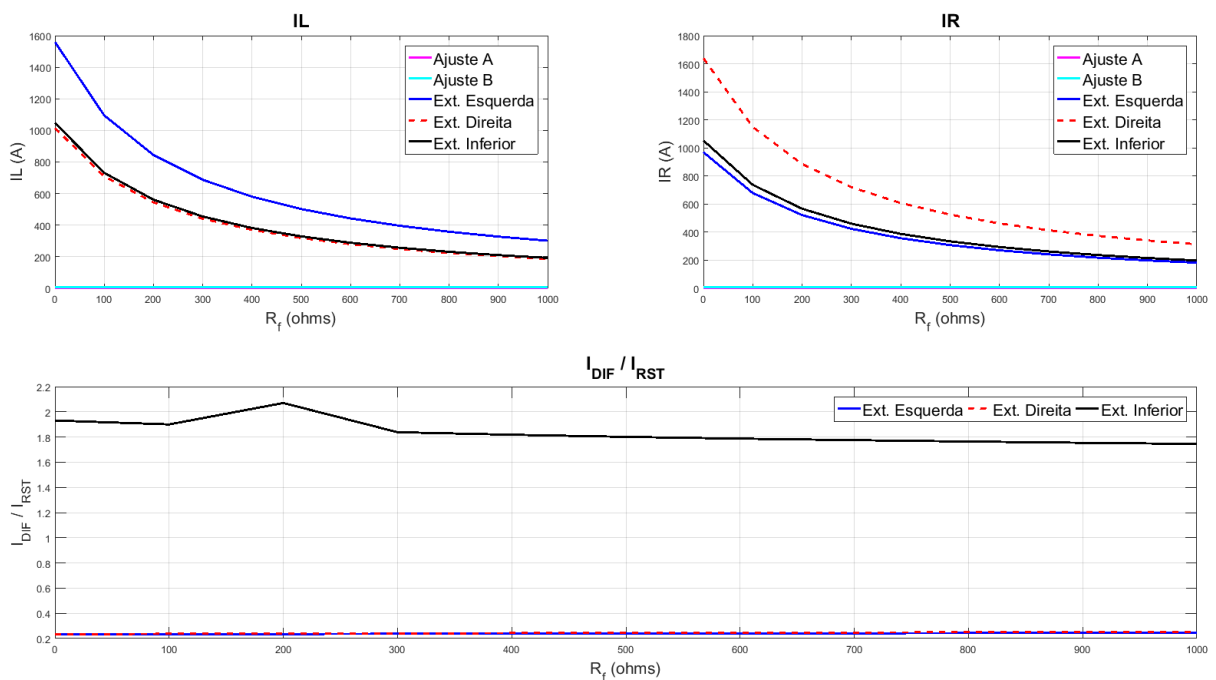


Figura 5.38 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

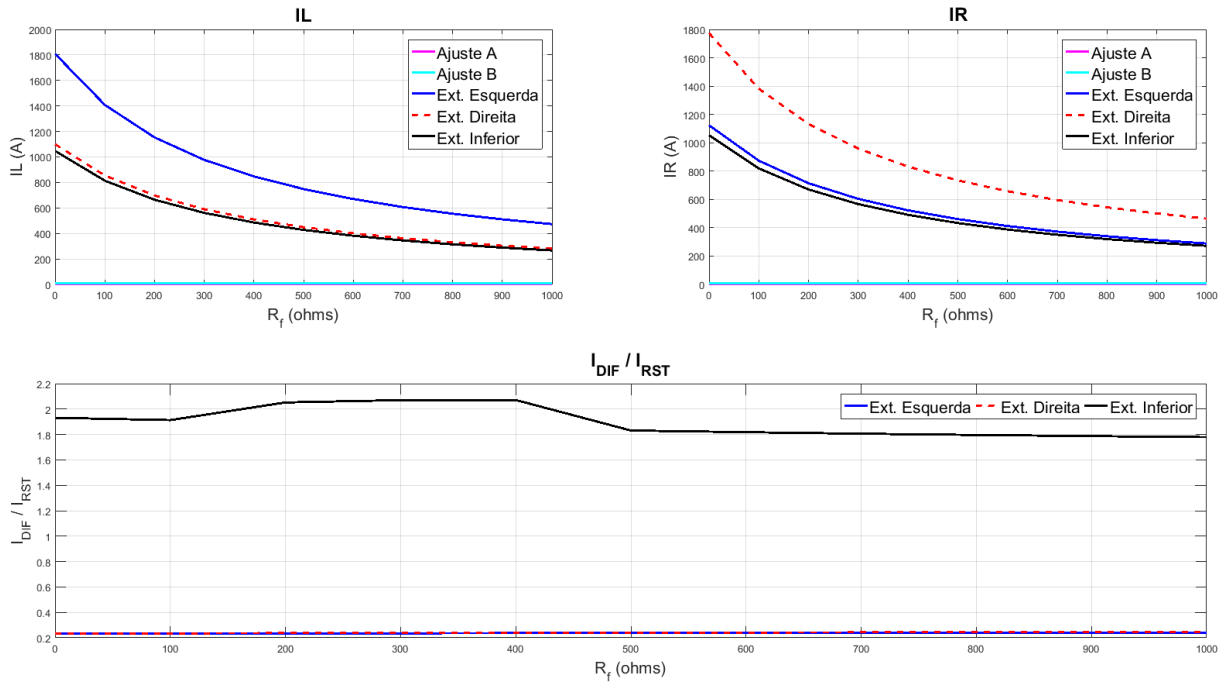


Figura 5.39 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

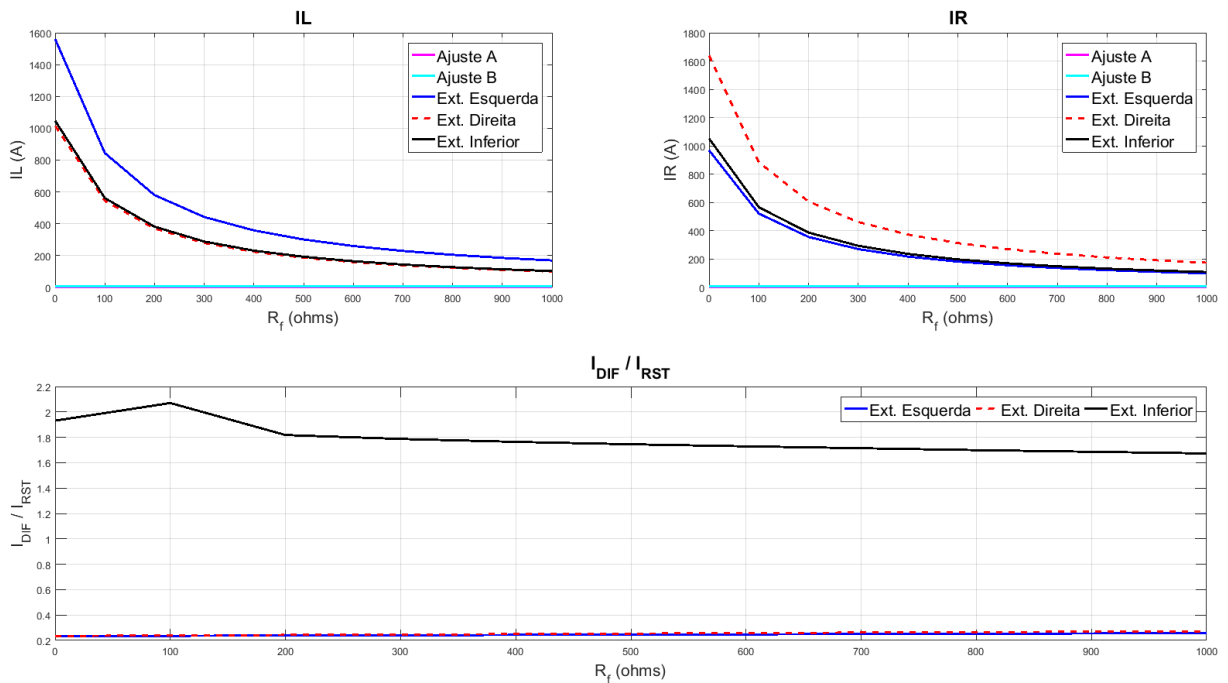


Figura 5.40 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.



Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

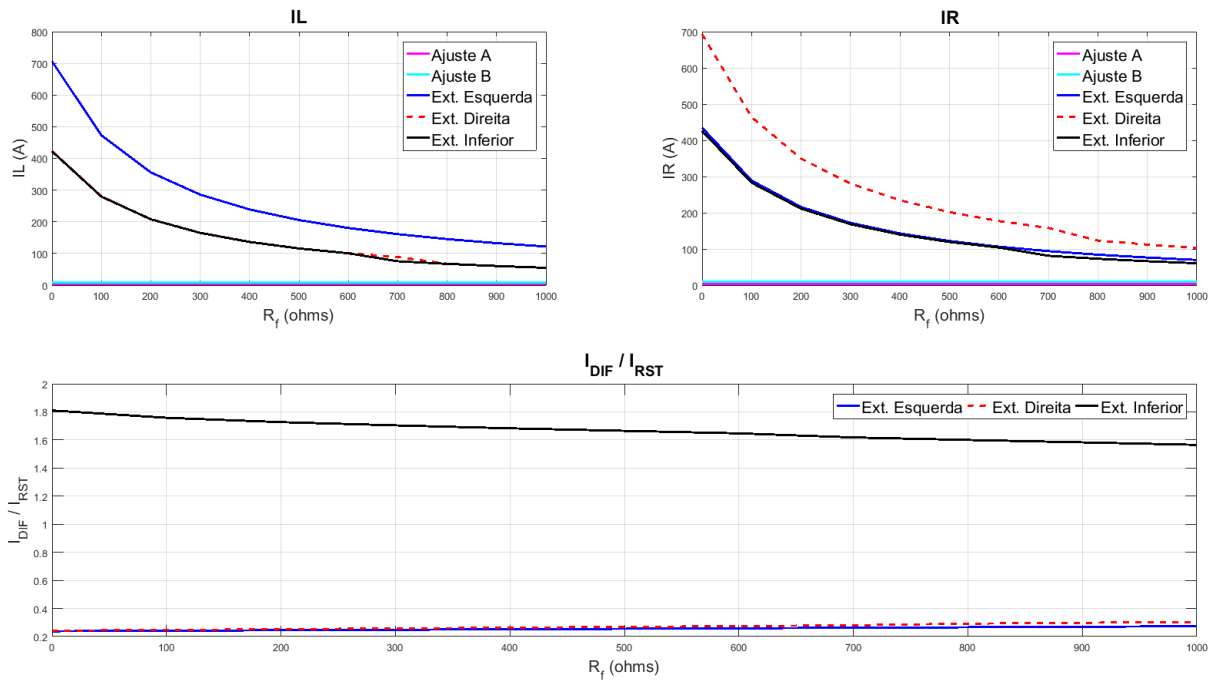


Figura 5.41 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-2, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Em se tratando da análise dos terminais 1-2, as faltas na extremidade direita e inferior geram curvas quase que iguais no terminal local, como pode ser visto no gráfico de **IL**. Para **IR**, as curvas iguais são geradas por faltas na extremidade esquerda e inferior, como já era de se esperar.

Como detalhado na seção 4.1,  $I_{RST}$  para faltas externas é bem maior do que  $I_{DIF}$  gerando níveis de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  menores que 0,3, menor valor de SLP dentre os ajustes aplicados. Esse fato, somado à localização de falta percebida em  $m_{87}$ , fez a função não atuar nas faltas localizadas nas extremidades esquerda e direita. Porém, nas faltas localizadas na extremidade inferior da LT, uma atuação errônea da função acontece. Esse efeito pode ser comprovado a partir do gráfico de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$ , onde em todos os tipos de faltas as curvas traçadas a partir de curtos na extremidade inferior da linha ficam bem acima da constante SLP e fazem a função atuar mesmo a falta sendo externa.

Conforme análises anteriores, sabe-se que a OV se divide ao passar pelo centro da LT. Portanto, como sugere a imagem abaixo, as OVs geradas por faltas na extremidade inferior da linha chegam simultaneamente nos terminais 1 e 2, por consequência, o valor de  $m_{87}$  fica em

0,5 p.u. e a corrente de restrição,  $I_{RST}$ , assume níveis muito menores que a corrente diferencial  $I_{DIF}$ . Comprometendo assim o funcionamento da função para faltas externas nessa posição. Para ilustrar esse acontecimento, segue a imagem abaixo.

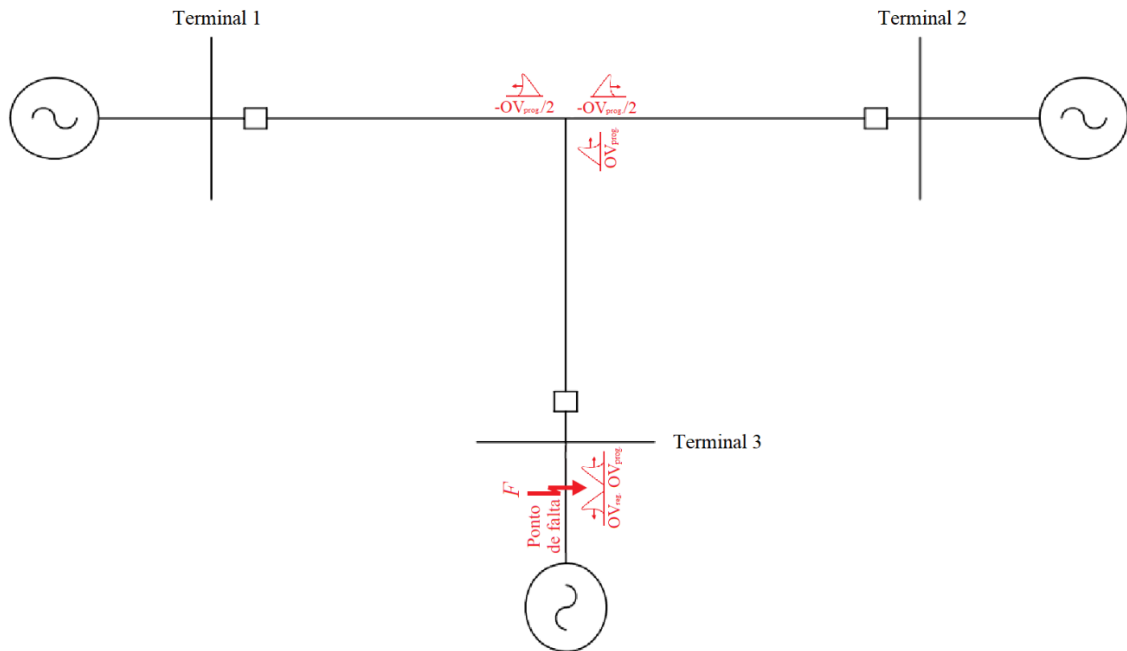


Figura 5.42 Representação da divisão das OVs no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 1-2.

Sendo  $OV_{prog.}$  as ondas viajantes progressivas e  $OV_{reg.}$  as ondas viajantes regressivas.

Ainda com base na divisão da OV comentada no parágrafo anterior, é possível fazer uma análise sobre o valor máximo que a constante  $SLP$  poderia assumir sem prejudicar a avaliação da função.

Por meio das Equações 4.12, (4.13) e da condição (5.1c) pode-se chegar a um fator limitante para o ajuste da constante  $SLP$ , que quando não obedecida poderá classificar uma falta externa como interna, seja qual for o par de terminais em análise. Este fator é representado pela equação abaixo.

$$\frac{1}{3} < slope \tag{5.2}$$

É válido ressaltar ainda que essa condição foi obedecida em todos os ajustes feitos.

Para ilustrar a satisfação ou não da condição 3, a seguinte tabela com os valores de  $m_{87}$  é mostrada:

Tabela 5.7 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-2 para faltas externas.

<b>Resultados <math>m_{87}</math></b>	
<b>Localidade simulada</b>	<b>Localidade detectada (<math>m_{87}</math>)</b>
Ext. esquerda	0,0 p.u.
Ext. direita	1,0 p.u.
Ext. inferior	0,5 p.u.

percebe-se por ela que, de acordo com a lógica de operação mostrada na seção 4.2, entende-se que a função não atuou para faltas na extremidade esquerda ou direita. Entretanto, faltas externas na extremidade inferior são entendidas, erroneamente, como internas.

Uma solução para o problema mencionado acima é implementar uma lógica adicional ao relé de maneira que a decisão de trip só pudesse ser tomada a partir da análise dos resultados verificados nos 3 pares de terminais. Dessa forma, perceber-se-ia que a função só foi vista como interna por um desses pares, enquanto os outros dois a perceberam como externa (em 0.0 p.u. ou 1.0 p.u.). Essa sugestão será comprovada nas próximas páginas e explicada em mais detalhes na seção 5.3.4.

### **5.3.2 Par de Terminais 1-3**

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

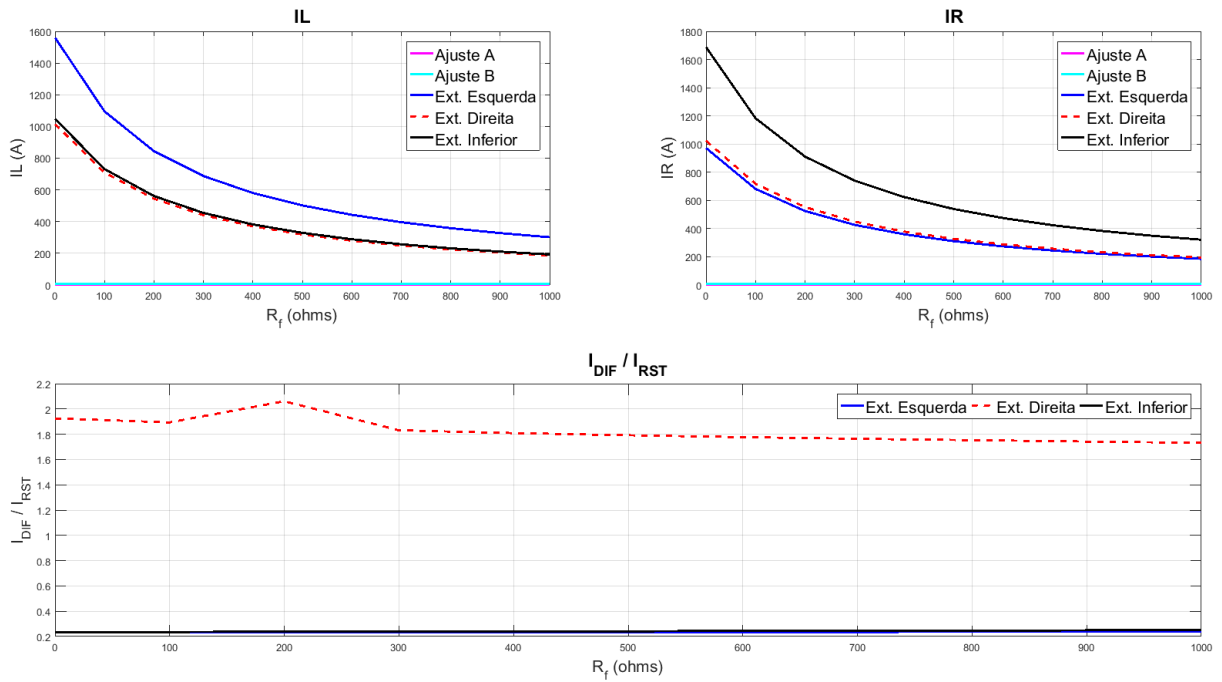


Figura 5.43 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.

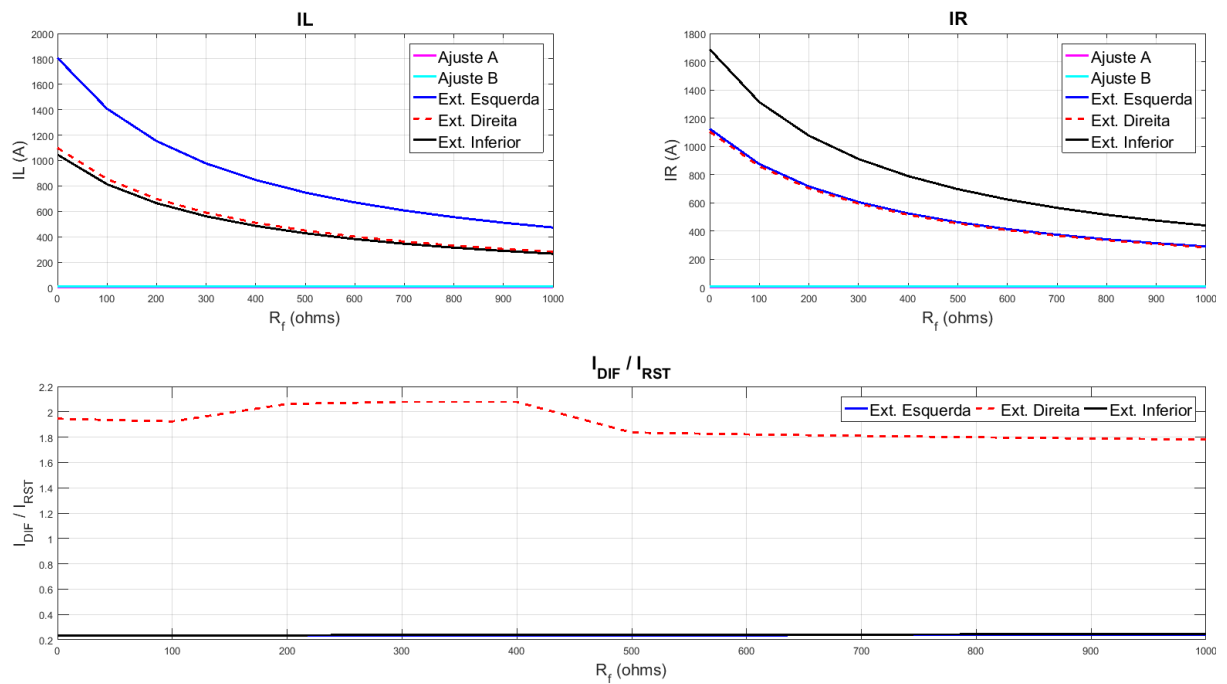


Figura 5.44 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

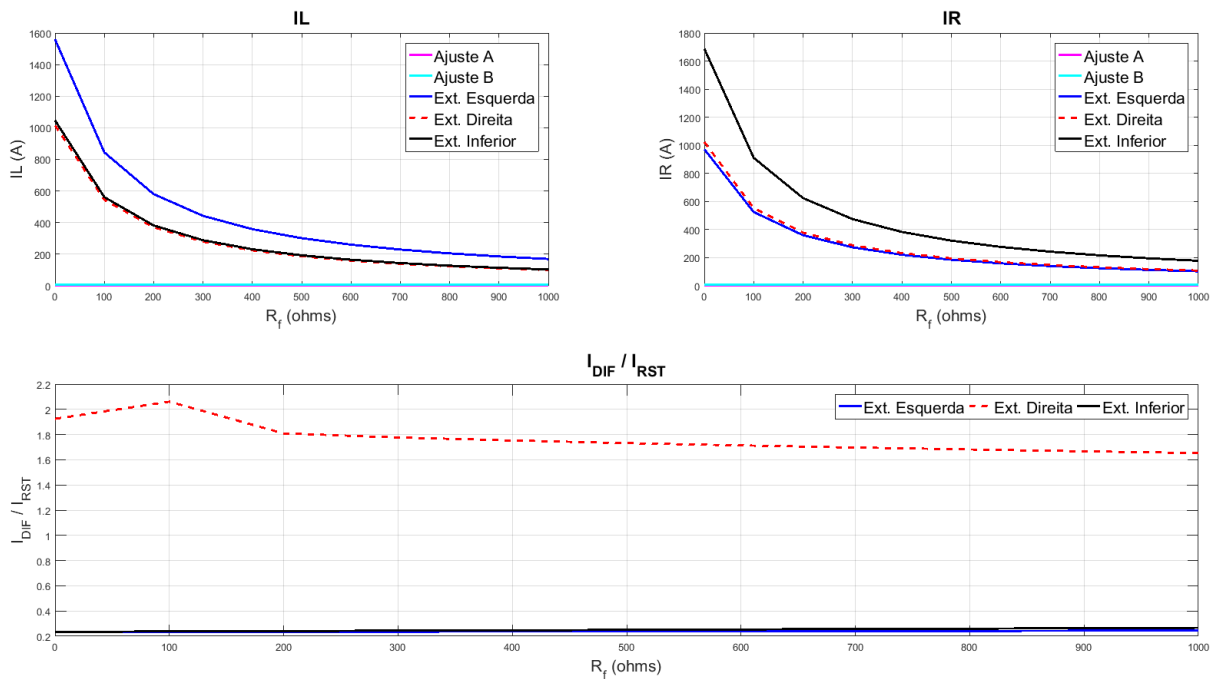


Figura 5.45 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

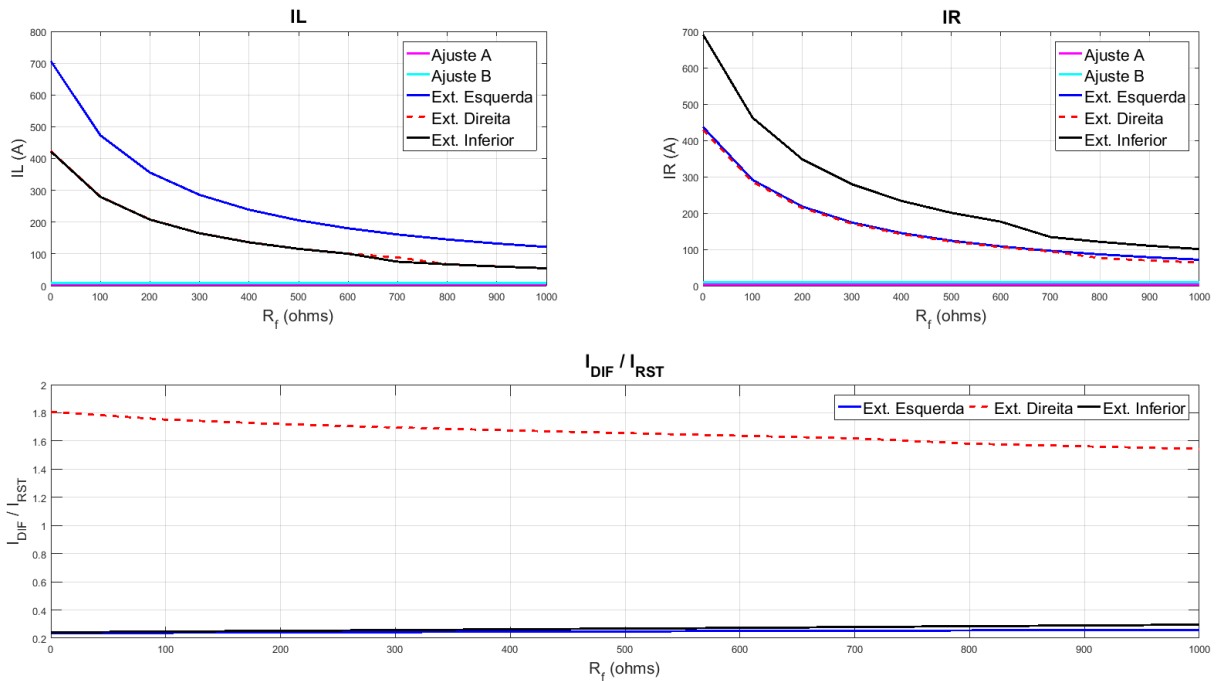


Figura 5.46 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 1-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Novamente, são as faltas na extremidade direita e inferior que geram curvas semelhantes no terminal local, como pode ser visto no gráfico de  $IL$ . Para  $IR$ , entretanto, as curvas iguais são geradas por faltas na extremidade esquerda e direita.

A função identificou corretamente as faltas na extremidade esquerda e inferior da linha como curtos externos, porém, como a análise dos terminais 1-2 já previa, faltas na extremidade direita foram identificadas como no centro da linha, isso somado aos altos valores de níveis de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  gerados, resultaram na atuação da função. Para este par de terminais é esse cenário de falta o gerador das OV's que chegam simultaneamente nos terminais 1 e 3. Novamente as condições 2 e 3 impedem a atuação da função para duas extremidades externas da linha, mas permitem para uma terceira.

Para ilustrar o efeito de divisão da onda no centro da linha e demonstrar o caso em que a função identifica a falta como interna, tem-se a seguinte imagem:

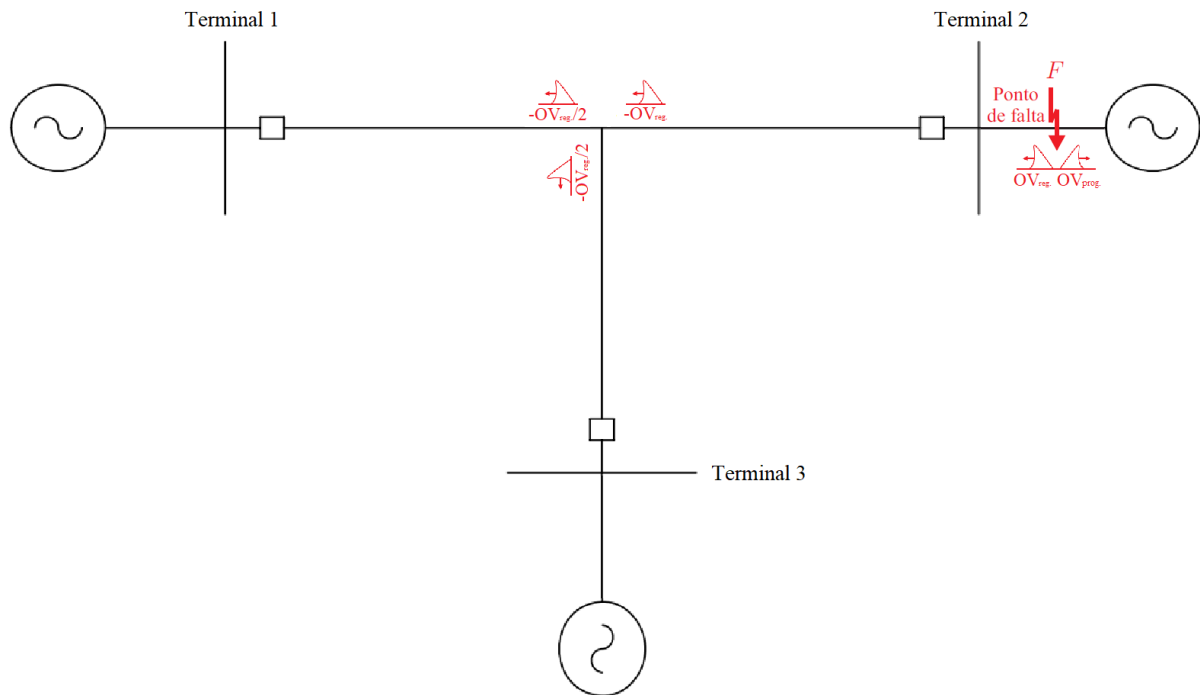


Figura 5.47 Representação da divisão das OV's no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 1-3.

sendo  $OV_{prog}$ , as ondas viajantes progressivas e  $OV_{reg}$ , as ondas viajantes regressivas.

Em relação à precisão de localidade do elemento diferencial TW87, tem-se a tabela abaixo.

Tabela 5.8 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-3 para faltas externas.

Resultados $m_{87}$	
Localidade simulada	Localidade detectada ( $m_{87}$ )
Ext. esquerda	0,0 p.u.
Ext. direita	0,5 p.u.
Ext. inferior	1,0 p.u.

Os resultados apresentados acima já eram esperados e só comprovam o entendimento incorreto que a função, quando aplicada aos terminais 1-3, teve acerca das faltas localizadas na extremidade direita da linha.

A solução proposta na seção 5.3.1 continua valendo. Assim como esta, a Equação 5.2 que evita com que a condição (5.1b) seja erroneamente atendida para faltas externas, ainda vigora.

### 5.3.3 Par de Terminais 2-3

Na imagem abaixo tem-se a representação das grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e a fase B.

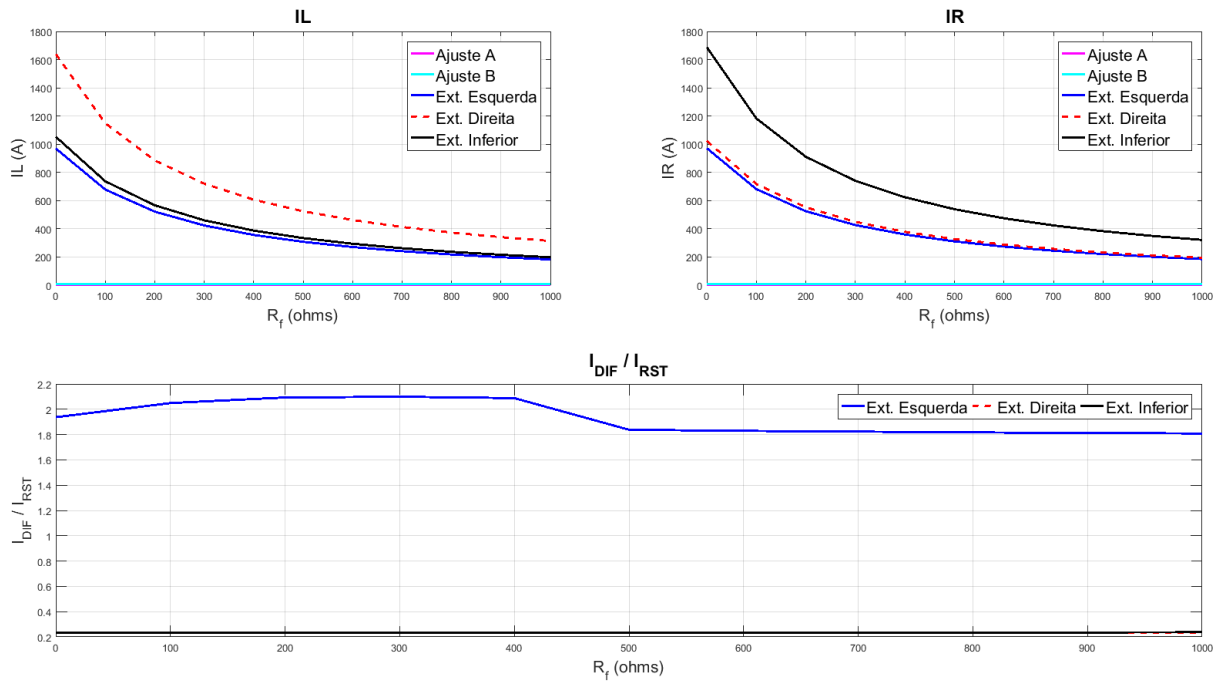


Figura 5.48 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AB.

Já nesta próxima, são representadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre três fases, A, B e C.



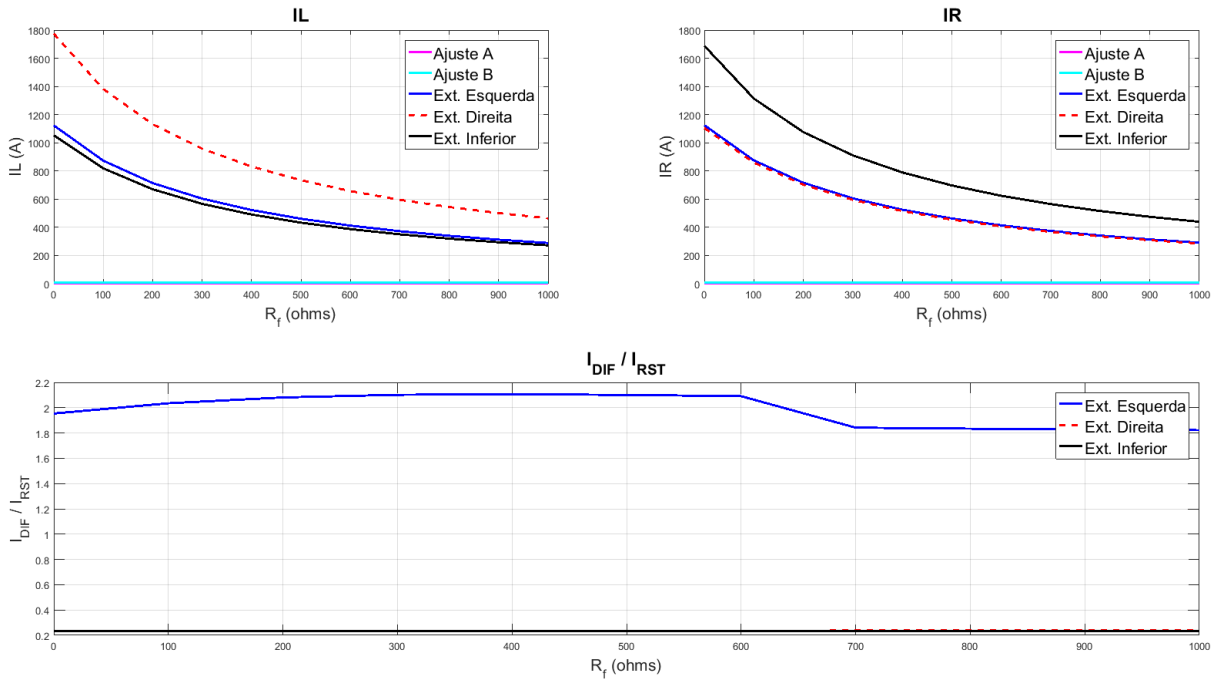


Figura 5.49 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABC.

Para a imagem abaixo, acontece uma falta entre as fases A, B e o terra.

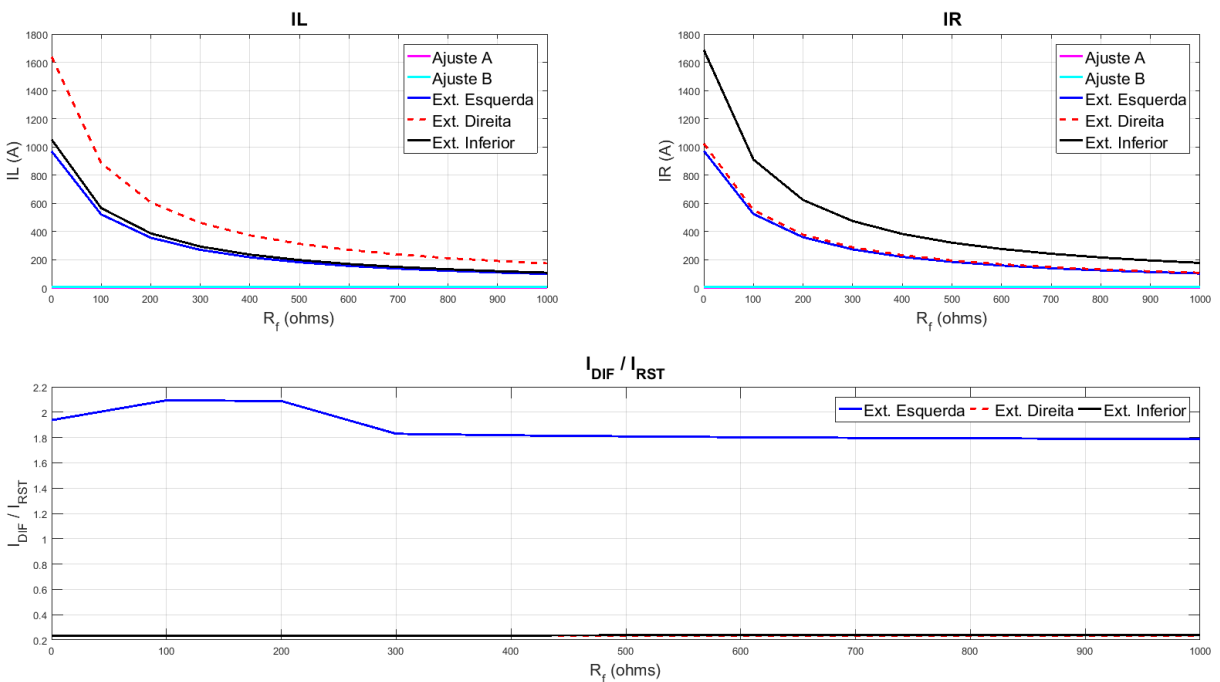


Figura 5.50 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta ABT.

Por último, são apresentadas as grandezas provenientes da função a partir de uma falta entre a fase A e o terra, como demonstrado pela figura adiante.

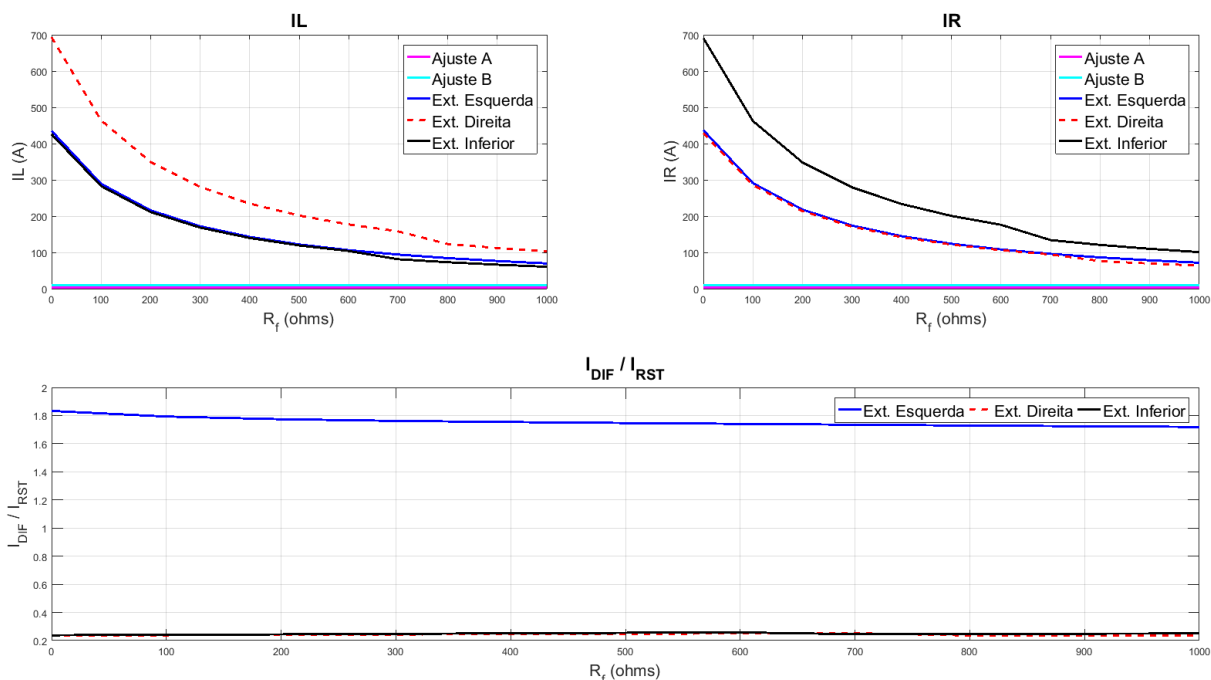


Figura 5.51 Variação das correntes em função de  $R_f$  entre os terminais 2-3, com carregamento intermediário e  $\theta = 90^\circ$  para uma falta AT.

Quanto ao par de terminais 2-3, percebe-se que são as OVs provenientes das faltas na extremidade esquerda e inferior que geram curvas semelhantes no terminal local, como pode ser visto no gráfico de  $IL$ . Para  $IR$ , entretanto, as curvas iguais são geradas por faltas na extremidade esquerda e direita.

Como era de se esperar, a função atuou devidamente para faltas na extremidade direita e inferior da linha, para estas a curva de níveis de  $\frac{I_{DIF}}{I_{RST}}$  sempre ficou bem abaixo da constante SLP, comprometendo assim a condição 2. Quanto à condição 3, também não foi obedecida para esses dois casos, conforme pode ser visto na Tabela 5.9. Porém, como a análise dos terminais 1-2 e 1-3 já previa, as faltas na extremidade esquerda foram erroneamente classificadas. Para este caso, a condição 2 e 3 são satisfeitas, já que  $I_{DIF}$  assume valores muito maiores que  $I_{RST}$  e  $m_{87}$  é igual à 0,5 p.u.

A OV progressiva gerada pela falta neste local se divide no centro da LT e atinge simultaneamente os terminais 2 e 3, sendo entendida como um curto interno. Para ilustrar esse efeito, tem-se a Figura 5.52.

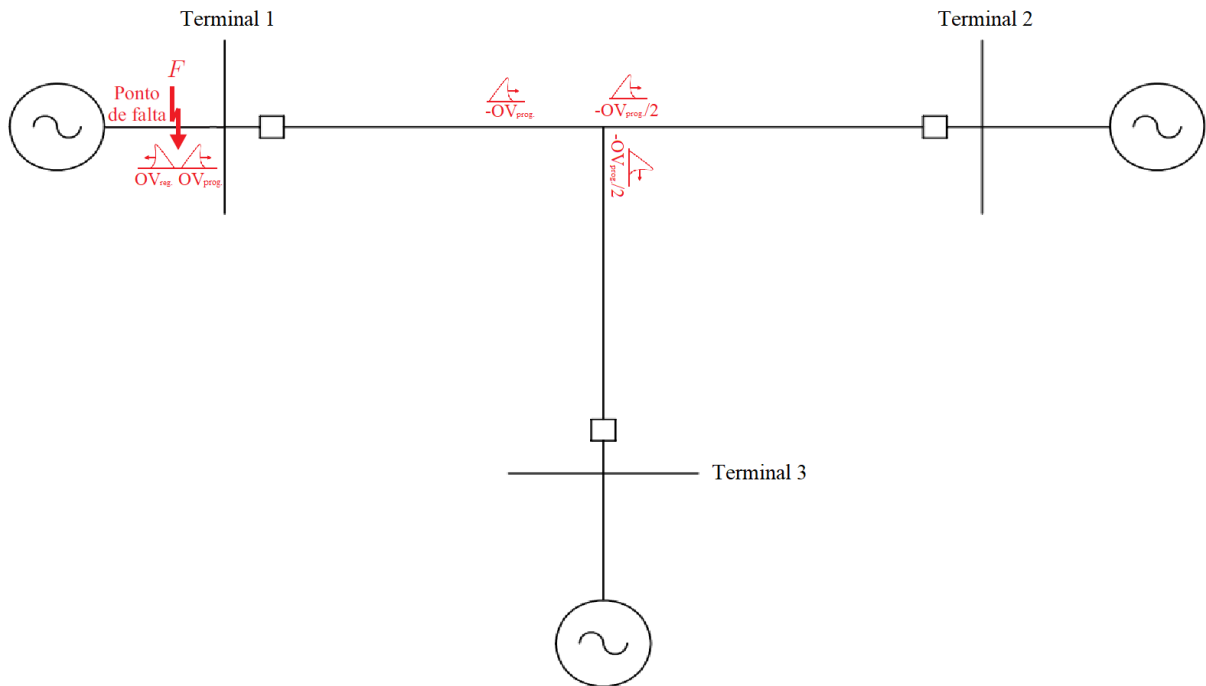


Figura 5.52 Representação da divisão das OV's no centro da LT que causa erro na aplicação da função aos terminais 2-3.

sendo  $OV_{prog}$ . as ondas viajantes progressivas e  $OV_{reg}$ . as ondas viajantes regressivas.

Em relação à precisão de localidade do elemento diferencial TW87, apresenta-se a seguinte tabela.

Tabela 5.9 Localidade da falta detectada pela função TW87 aplicada aos terminais 1-3 para faltas externas.

<b>Resultados <math>m_{87}</math></b>	
Localidade simulada	Localidade detectada ( $m_{87}$ )
Ext. esquerda	0,5 p.u.
Ext. direita	0,0 p.u.
Ext. inferior	1,0 p.u.

Os resultados apresentados acima já eram esperados e só comprovam o entendimento incorreto que a função teve acerca das faltas localizadas na extremidade esquerda da linha.

A solução proposta na seção 5.3.1 continua valendo. Assim como esta, a Equação 5.2 que evitar com que a condição (5.1b) seja erroneamente atendida para faltas externas, ainda vigora.

### **5.3.4 Lógica de comparação da atuação dos trechos para faltas externas**

Nas três últimas subseções foram expostas as atuações dos pares de terminais para faltas externas nas três extremidades da linha. Entretanto, como pode ser visto em todos os casos simulados, a falta foi entendida como interna por pelo menos um dos pares de terminais.

Todavia, um comportamento semelhante entre as atuações pode ser destacado de forma a ser convertida em uma quarta condição para a atuação da função. A falta é realmente interna somente quando as condições 1, 2 e 3 são satisfeitas por pelo menos 2 dos 3 pares de terminais. Dessa forma, a função não atuaria erroneamente em nenhum dos casos apresentados acima (na seção 5.3).

## **5.3 CARACTERÍSTICAS DA ATUAÇÃO**

Além das estimativas de distância e da magnitude das grandezas geradas pela função, analisar o tempo de atuação do elemento TW87 em resposta à falta é de suma importância. Foi feito então um gráfico que demonstra a relação entre o local da falta e o tempo de atuação da função. Vale destacar também que esse tempo resultante entre o acontecimento da falta e a percepção desta pela função se mostrou igual ou extremamente semelhante para todos os níveis de carregamento, número de fases envolvidas, ângulo de incidência ou resistência de falta, variando apenas com o local em que a falta acontecia.



Figura 5.53 Relação entre tempo de atuação e posição da falta.

Pela imagem acima percebe-se que quanto mais próximo do centro da LT a falta acontecer, mais rápida ela será detectada. Isso se explica pelo fato da tomada de decisão só acontecer depois da detecção de todos os índices e sinais.

Conforme mostrado na seção 4.2, quando uma onda incide sobre um terminal, uma janela de busca no terminal adjacente é criada, o tempo  $T_L$  estipulado para essa procura é proporcional ao tamanho da linha. Portanto, o atraso de atuação da função deve conter o tempo que a onda leva para chegar ao terminal somado ao tempo que a janela de busca exige para procurar a onda de saída no terminal adjacente. Logo, quão mais longe do centro da linha a falta acontecer, mais demorada será sua detecção.

Contudo, o tempo máximo para os casos simulados foi da ordem de 2.72 milissegundos. Tal atuação é rápida se comparada com os modelos tradicionais, que são da ordem de aproximadamente um ciclo fundamental, e podem significar uma vantagem considerável em termos de economia, segurança e confiabilidade do SEP (SANTOS e SENGER, 2005).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

Em tempos com SEP cada vez mais complexos e integrados, as LT multiterminais se destacam, apresentando vantagens econômicas, técnicas e ambientais sobre linhas de dois terminais. Dentre as linhas multiterminais, a mais comum é a LT com três terminais. Porém, como pode ser visto no capítulo 2, a presença de uma terceira fonte na rede pode ocasionar diversas complicações à proteção da linha. Pensando nisso, o esquema de proteção diferencial baseado em ondas viajantes aqui discutido vem se mostrando bastante promissor. Os resultados obtidos se somam a essa afirmação e demonstram um alto grau de confiabilidade quanto à aplicação desse tipo de proteção em LT com tal configuração. No entanto, mais testes precisam ser feitos para complementar o tema, ainda carente em seu estado da arte.

Poucos trabalhos científicos abordam o uso desse tipo de proteção em LT com três terminais, de forma que esta composição traz uma contribuição apreciável ao tema. Assim, este trabalho serve como um ponto de partida para trabalhos futuros, no sentido de adaptar a TW87 para linhas com mais de dois terminais.

No Capítulo 2, uma retomada histórica foi feita, destacando o desenvolvimento tanto da teoria de ondas viajantes, quanto das LT com três terminais. Mostram-se os problemas que essas tecnologias estão enfrentando e o que se pode esperar para o futuro. Fica claro também a alta importância da discussão, pois tenta aplicar uma tecnologia relativamente nova, proteção diferencial baseada em ondas viajantes, num conceito mais antigo, linhas de transmissão com três terminais.

No Capítulo 3, expôs-se a base teórica necessária para o desenvolvimento da teoria das ondas viajantes e compreensão das LT com três terminais. Foram apresentados os aspectos básicos desse tipo de linha, assim como uma análise da problemática que ela pode apresentar. Notou-se que as grandezas de corrente e tensão diante de faltas para esse tipo de linha são diferentes dos percebidos em linhas convencionais, isso graças à inserção de uma terceira ramificação no sistema. Visualizou-se também o efeito de divisão da OV no ponto central da linha, o que poderia causar atenuações excessivas nas correntes incidentes sobre os terminais

remotos e, principalmente, atuações indevidas para faltas externas. Felizmente, esse fato não comprometeu a atuação da função em nenhuma das simulações.

No Capítulo 4, um aprofundamento acerca dos fundamentos práticos para detecção e localização de faltas a partir da teoria das OV's é feito. Apresentou-se a lógica de operação do elemento diferencial por OV's (TW87), assim como as adaptações adotadas ao seu funcionamento para aplicação em LT com três terminais. Do descrito, foi possível aprofundar o conhecimento sobre proteção baseada em ondas viajantes e como pode ser feita a implementação prática dessa teoria em um relé comercial.

Por último, no Capítulo 5, os resultados do trabalho ganham forma por meio de uma representação gráfica das grandezas geradas a partir dos vários cenários de faltas testados. Foram 832 simulações com diferentes considerações de ajuste para a função. Dessa forma pôde-se avaliar a sensibilidade da mesma. Ao final de cada subcapítulo uma análise foi feita sobre os pontos mais importantes dos gráficos obtidos com as simulações. Destas, concluiu-se que a função conseguiu representar de maneira bastante fiel as características físicas da LT durante uma falta, demonstrando por consequência uma ótima acurácia na detecção e localização dos curtos. Entretanto, uma ressalva para as faltas externas deve ser feita, pois, dependendo da extremidade da linha onde tenha sido aplicado o curto, a função TW87 as entendeu como internas. Sobre esse defeito, uma simples lógica demonstrada na seção 5.3.4 poderia ser implementada resolvendo os casos de atuação indevida.

Além disso, concluiu-se também que, salvo para faltas externas e em alguns ângulos de incidência para faltas AT, a função operou com uma margem de confiabilidade e segurança relevante, tendo suas condições largamente obedecidas. Essa folga era diminuída apenas durante a aplicação de alguns ajustes.

Para os casos registrados em que os ajustes da função diminuíram significativamente a sua margem de atuação, vale uma ressalva. tais condições de falta não são comuns, de forma que, para curtos com valores típicos de resistência de falta, ângulo de incidência e carregamento a função atuaria corretamente e com alta margem em 100% dos casos simulados. Ainda com relação aos ajustes da função, percebe-se que alterações na constante  $SLP$  e  $i_{pickup}$  possuem grande influência para faltas externas e internos.

Com relação aos tempos de atuação, estes se mostraram vantajosos em relação ao tamanho da linha se comparado com outros esquemas de proteção. Já para a localização estimada da falta, teve-se uma alta precisão dos resultados.

## **6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como proposta para futuros trabalhos seria interessante abordar os seguintes pontos:

- Considerar faltas com carregamentos pesados e leves para curtos externos e para variações nos ângulos de incidência da falta;
- Realizar as simulações em massa de forma que, num maior número de cenários de faltas, seja possível avaliar com mais propriedade a confiabilidade da função na proteção de LT com três terminais.
- Incluir nas análises mais ajustes da função.
- Estudar mais profundamente as possíveis implementações à TW87 para corrigir as falhas de atuação encontradas neste trabalho.
- Avaliar outros métodos de proteção baseados em OV's na proteção de LT com três terminais.
- Avaliar a função TW87 ou outros métodos de proteção diferencial baseados em OV's em uma linha com mais de três terminais.



# Bibliografia

AGGARWAL, R. K. et al. A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 3, July 1993.

ALMEIDA, A. L. V. **Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente**. Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 98. 2008.

BARROS, C. G. **Proteção de sistemas elétricos**, 2017. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/11785849/>>. Acesso em: 05 Maio 2018.

BEWLEY, L. V. **Traveling Waves On Transmission Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1933. 332 p.

BOSTWICK, M. A.; HARDER, E. L. Relay Protection of Tapped Transmission Lines. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 62, p. 6, October 1943.

BRAHMA, S. M. Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n.2, p. 1325-1331, April 2005.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. **Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Delft, Netherlands: [s.n.]. 2011.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. **A wavelet-based algorithm to analyze oscillographic data with single and multiple disturbances**. 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.

DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. High-speed Relaying Using Traveling Wave Transient Analysis. **Iee Pes Winter Meeting**, New York, 1978.

EVRENOSOGLU, C. Y.; ABUR, A. Travelling Wave Based fault location for Teed Circuits. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, April 2005.

FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. **Investigation os frequency dormain traveling wave fault location methods**. 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 1-9.

FENG, Z. et al. **A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line**. Third International Conference on Electral utility Deregulation and Restructuring and Power technologies (DRPT 2008). [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1753-1757.

GALE, P. et al. **Fault Location Based On Travelling Waves**. Fifth International Conference On Developments In Power System Protetion. [S.l.]: [s.n.]. 1993.

GILANY, M.; IBRAHIM, D.; ELDIN, E. Travelling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. **IEE transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 82-89, 2007. ISSN 0885-8977.

GIRGIS, A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. L. A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, January 1992.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power System Analysis and Design**. 4. ed. [S.l.]: CL - Engineering, 2009.

GONG, Q. et al. A Study of the Accurate Fault Location System for Transmissin Line Using Multi-Terminal Signals. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, v. 4, p. 2533-2538, 2000.

IEEE STD C37114. **IEEE guide for determining faul location on AC transmission and distribution lines**. IEEE Power Engineering Society Publ. New York: [s.n.]. 2005.

IURINIC, L. et al. **Transmission lines fault location based on high-frequency components technique: a general formulation for estimation of dominant frequency**. International Conference on Power Systems Transients. Vancouver, Canada: [s.n.]. July, 2013.

JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. **Travellinh Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform, 1998 (Powercon'98)**. International Conference On Power System Technology. [S.l.]: v.1. 1998.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. **IEE Proceedings**, v. 137, pt. C, n. 6, p. 395-402, November 1990.

KALAM, A.; JOHNS, A. T. Accurate Fault Location technique for Multi-terminal EHV Lines. **IEE International Conference on Advantages in Power System Control, Operation and Management**, Hong Kong, p. 420-424, November 1991.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Edição do Autor. Florianópolis. 2005.

LAI, L. L. et al. Application of Wavelet Transform and Neural Networks to Fault Location of a Teed Circuit. **Institute of Electrical Engineers**, Savoy Place, London, UK, 2000.

LEÃO, R. P. S. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade federal do Ceará. Fortaleza - CE, p. 38. 2009.

LIN, D. et al. **Fault location for transmission line based on traveling waves using correlation analysis method**. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2008), 2008. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 681-684.

LIN, Y. H.; LIU, C. W.; YU, C. S. A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines - Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 2, April 2002.

LIU, C.-W. et al. A Universal fault Location Technique for N-Terminal ( $N \geq 3$ ) Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 3, p. 1366-1373, July 2008.

LONG, W. F. Application Aspects of Multiterminais DC Power Transmission. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 2084-2098, 1990.

LOPES, F. V. **Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Campina Grande, Paraíba, Brasil, p. 191. mai. 2014.

LOPES, F. V. et al. **Análise de sensibilidade paramétrica da proteção diferencial de linhas baseada em ondas viajantes**. XIII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE. [S.l.]: [s.n.]. 2016.

MANUELLI, L. C. YouTube - Tipos de Relé e Distância, Definição das Zonas de Atuação., 2018. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=uwBF\\_ZXDgVo](https://www.youtube.com/watch?v=uwBF_ZXDgVo)>. Acesso em: 05 Maio 2018.

MARCEL, F. D. C. P. **Localização de Falhas por Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão de Três Terminais - Abordagem baseada em Decomposição Wavelet.** Universidade federal de Itajubá. Itajubá: [s.n.]. 2006. p. 15-47.

MASON, C. R. **The Art and Science of Protective Relaying.** John Wiley and Sons. New York. 1956.

NAIDU, S. R. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.** João Pessoa - PB: Editora Grafset - Co-edição Eletrobrás/Universidade Federal da Paraíba, 1985.

NERC PLANNING, S. P. C. T. F. **The Complexity of Protecting Three-Terminal Transmission Lines.** North American Electric Reliability Council. [S.l.], p. 35. 2006.

PAULO, M. S. **Identificação e Localização de Falhas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para relés de Linhas de Transmissão.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC , p. 218. 2001.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd. [S.l.]. 1990.

REEV, J. Impedance or Distance-Type. **Impedance or Distance-Type**, p. 99, 1980.

ROSOLOWSKI, M. M. S. A. J. I. A. E. **Fault Location on Power Networks.** Londos, U.K.: Springer, 2010.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks.** London: Ed. Springer. (Power System). 2010. (978-1-84882-885-8).

SANTOS, R. C.; SENGER, E. C. Pesquisa de uma Solução Prática para a Proteção de Linhas de Transmissão com a Utilização de Redes Neurais Artificiais. **SNPTEE - Seminário Nacional e Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Curitiba - PR, n. XVIII, p. 8, Outubro 2005.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL-T400L Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder, Instruction Manual.** [S.l.], p. 452. 2017.

SCHWEITZER, E. O. et al. **Locating Faults by the Traveling Waves They Launch**. 40th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, WA: [s.n.]. October 2013.

SCHWITZER, E. O. et al. **Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations?** 41nd ANNUAL WESTERN PROTECTION RELAY CONFERENCE. Washington, USA: [s.n.]. October 2014. p. 16.

SHEHAB-ELDIN, E. H.; MACLAREN, P. G. Traveling Wave Distance protection - Problem Areas and Solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 894-902, Julho 1988.

SHWEITZER, I. E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. **Performance of time-domain line protection elements on real faults**. 42nd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Washington, USA: [s.n.]. 2015.

SILVA, M. D. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão utilizando a teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidades de São Paulo. São Carlos - SP, p. 231. 2003.

SILVA, M. et al. **An alternative fault location algorithm based on wevelet transforms for three-terminal linas**. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery os Electral Energy in 21st Century. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1-7. ISSN 1932-5517.

SOUZA, B. et al. **Implementação de Técnicas de Inteligência Artificial para Identificação e Análise de Ocorrências no Sistema Elétrico**. Campina Grande - PB. Julho 2004.

TAKAGI, T. et al. Fault Protection Based on Travelling Wave Theory, Part I: Theory. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Mexico, Paper A77, July 1977. 750-753.

TAKAGI, T. et al. Digital Diffrential Relaying System for Transmission Line Primary Protection Using Traveling Wave Theory - Its Theory and Field Experience. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, New York, Paper A79, January/February 1979. 1-9.

THORP, D. C. A. R. G. A. J. Sistemas Multi-agentes Aplicadosà Proteção Adaptativa de Linhas de Transmissão com Três Termianais. **Revista Controle & Automação**, p. 9, 2008.

ZANETTA JR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência São Paulo**. SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.