



**Adriano Luís Durão Martins**

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Proteção baseada em Ondas Viajantes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins, Prof. Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professora Doutora Anikó Katalin Horváth da Costa  
Arguente: Engenheiro Rui Miguel Martinho Dias Jorge



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2021**



## **Proteção baseada em Ondas Viajantes**

Copyright © Adriano Luís Durão Martins, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Ao meu avô Manuel Paula*



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, o meu sincero obrigado pela oportunidade de realizar esta dissertação, pela disponibilidade demonstrada desde o primeiro dia e por todos os conselhos transmitidos neste último ano.

Ao Engenheiro Rui Jorge e ao Engenheiro João Peres pela disponibilidade demonstrada e pela oportunidade de desenvolver esta tese em parceria com a EFACEC

Aos meus pais, um enorme obrigado pelas condições que me proporcionaram para que fosse possível realizar os meus objetivos, por todo o apoio e força que me deram ao longo vida.

À minha irmã, pela pessoa importante que é para mim, pelos momentos partilhados em toda a vida e pelos conselhos e apoio dado ao longo deste percurso, principalmente nos momentos mais difíceis.

À Mariana pelo seu amor, apoio, motivação, conselhos e paciência ao longo do meu percurso académico, tornando-se num pilar fundamental para atingir os meus objetivos.





## RESUMO

---

As linhas de transporte são parte fundamental de um sistema de energia elétrico, possibilitando o transporte de energia das fontes de geração para os centros de carga. O desenvolvimento tecnológico existente nos últimos anos, levou ao aumento do consumo de energia e como consequência, houve a necessidade de aumentar o número de linhas. Esse aumento resulta numa maior probabilidade de existência de defeitos, pelo que é importante o estudo da localização desses mesmos defeitos. Esta detecção tem de ser rápida e eficaz, por forma a permitir uma resposta rápida, diminuindo assim o tempo de interrupção.

Atualmente os métodos de localização de defeitos em linhas de transporte classificam-se em quatro categorias: métodos baseados na impedância, métodos baseados em ondas viajantes, métodos baseados em frequências elevadas e métodos baseados em inteligência artificial. No presente trabalho realiza-se uma comparação entre os métodos mais clássicos, baseados na impedância, e os métodos baseados em ondas viajantes, de modo a aferir a precisão destes últimos e a comprovar algumas das suas vantagens e desvantagens.

Esta dissertação apresenta resultados sobre a influência da frequência de amostragem, ação do disjuntor e resistência de defeito, para três casos de estudo (linha simples, linhas paralelas e linhas em T). Os resultados mostram que a precisão dos métodos baseados nas ondas viajantes está relacionada com a frequência de amostragem, enquanto que nos métodos baseados na impedância verifica-se que a resistência de defeito afeta a precisão, principalmente dos métodos que apenas utilizam medições num dos terminais.

**Palavras-chave:** Linhas de Transporte de Energia; Métodos baseados na Impedância, Métodos baseados nas ondas viajantes, Disjuntor, Frequência de Amostragem, Resistência de Defeito.

---



## ABSTRACT

---

The power transmission lines are a fundamental part of an electrical energy system, making possible to transport energy from the generation source to the load centers. The technological development in the past years has led to an increase in energy consumption, and as a consequence, there was a need to increase the number of lines. This increase brings an higher probability of faults, therefore it is important to study the location of those faults. This detection has to be fast and efficient, in order to provide a quick response, thereby reducing the interruption time.

Currently, the methods of fault locations in power transmission lines are classified in four categories: impedance-based methods, travelling waves methods, high frequencies methods and artificial intelligence methods. The present work makes a comparison between the more classical methods, impedance-based and the travelling waves method, in order to measure their accuracy and to prove some of their advantages and disadvantages.

This dissertation provides results regarding the influence of sampling frequency, circuit-breaker action and fault resistance, for three study cases (single line, parallel lines and T lines). The results show that the accuracy of travelling waves methods are related to the sampling frequency, while in impedance-based methods are verified that the fault resistance affects the accuracy, mainly in methods that only use measurements from one terminal.

**Keywords:** Power Transmission Line; Impedance-based Method; Traveling Waves Method; Circuit-breaker; Sampling Frequency; Fault Resistance

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Siglas</b>	<b>xxiii</b>
<b>Símbolos</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivos e metodologia . . . . .	2
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Conhecimento Prévio</b>	<b>5</b>
2.1 Métodos de Localização de Defeitos em Linhas . . . . .	5
2.1.1 Métodos baseados na Impedância . . . . .	5
2.1.2 Métodos baseados em Ondas Viajantes . . . . .	7
2.1.3 Métodos baseados em Frequências Elevadas . . . . .	7
2.1.4 Métodos baseados em Inteligência Artificial . . . . .	7
2.2 Modelo de Linha . . . . .	8
2.3 Tipos de Defeitos . . . . .	10
2.4 Disjuntor . . . . .	12
<b>3 Metodologias utilizadas</b>	<b>17</b>
3.1 Métodos baseados na Impedância . . . . .	17
3.1.1 Método de <i>Takagi</i> . . . . .	17
3.1.2 Método impedância dois terminais . . . . .	19
3.1.3 Método de <i>Girgis</i> . . . . .	21
3.1.4 Método de <i>Radojevic</i> . . . . .	23
3.2 Métodos Baseados nas Ondas Viajantes . . . . .	25
3.2.1 Método das ondas viajantes nos dois terminais . . . . .	25

3.2.2	Método das ondas viajantes num só terminal . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Casos de aplicação dos métodos</b>	<b>29</b>
4.1	Linha Simples . . . . .	29
4.2	Linhas em Paralelo . . . . .	30
4.3	Linhas em T . . . . .	30
4.4	Influência da ação do disjuntor . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
5.1	Influência da ação do disjuntor . . . . .	35
5.1.1	Linhas Curtas . . . . .	36
5.1.2	Linha Média . . . . .	36
5.1.3	Linha Longa . . . . .	37
5.1.4	Discussão . . . . .	38
5.2	Influência da resistência de defeito . . . . .	39
5.2.1	Linha Curta . . . . .	39
5.2.2	Linha Média . . . . .	40
5.2.3	Linha Longa . . . . .	41
5.2.4	Discussão . . . . .	41
5.3	Influência da frequência de amostragem . . . . .	43
5.3.1	Linhas Curtas . . . . .	44
5.3.2	Linha Média . . . . .	52
5.3.3	Linha Longa . . . . .	59
5.3.4	Discussão . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>67</b>
6.1	Síntese do Trabalho . . . . .	67
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	68
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>
	<b>Anexos</b>	<b>73</b>
<b>I</b>	<b>Influência do Disjuntor</b>	<b>73</b>
I.1	Linhas em Paralelo . . . . .	73
I.2	Linhas em T . . . . .	75
<b>II</b>	<b>Influência da Resistência de defeito</b>	<b>79</b>
II.1	Linhas em Paralelo . . . . .	79
II.2	Linhas em T . . . . .	82

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema dos parâmetros distribuídos da linha . . . . .	8
2.2	Tipo de defeitos curto-circuito . . . . .	11
2.3	Tensão da rede, corrente de curto-circuito, tensão do arco e tensão entre os contatos do disjuntor . . . . .	13
2.4	Circuito equivalente do corte de uma corrente de curto-circuito . . . . .	13
2.5	Tensão transitória de restabelecimento . . . . .	15
3.1	Esquema utilizado para o método de <i>Takagi</i> . . . . .	18
3.2	Esquema utilizado para o método impedância dois terminais . . . . .	20
3.3	Esquema utilizado para o método de <i>Girgis</i> . . . . .	21
3.4	Possíveis localizações de defeitos numa linha de três terminais . . . . .	22
3.5	Esquema utilizado para o método de <i>Radojevic</i> . . . . .	24
3.6	Circuitos equivalente sequência direta e inversa . . . . .	24
3.7	Diagrama de <i>Bewley</i> para o método OV nos dois terminais . . . . .	26
3.8	Diagrama de <i>Bewley</i> para o método OV num só terminal . . . . .	27
4.1	Esquema representativo de uma linha simples . . . . .	30
4.2	Esquema representativo de uma linhas em paralelo . . . . .	30
4.3	Esquema representativo de uma linha em T . . . . .	31
4.4	Andamento temporal da tensão e corrente sem ação do disjuntor . . . . .	32
4.5	Resultado da aplicação do método impedância dois terminais sem ação do disjuntor . . . . .	33
4.6	Andamento temporal da tensão e corrente com ação do disjuntor . . . . .	33
4.7	Resultado da aplicação do método impedância dois terminais com ação do disjuntor . . . . .	34
5.1	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 10km . . . . .	39
5.2	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 10km . . . . .	40

5.3	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 28km . . . . .	41
5.4	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 28km . . . . .	42
5.5	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 100km . . . . .	43
5.6	Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 100km . . . . .	44
5.7	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 10km . . . . .	46
5.8	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 10km . . . . .	47
5.9	Comparação do erro relativo ao local para uma linha em paralelo geração-geração de 10km . . . . .	48
5.10	Comparação do erro relativo ao local para uma linha em paralelo geração-carga de 10km . . . . .	49
5.11	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 28km . . . . .	53
5.12	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 28km . . . . .	54
5.13	Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-geração de 28km . . . . .	55
5.14	Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-carga de 28km . . . . .	57
5.15	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 100km . . . . .	60
5.16	Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 100km . . . . .	61
5.17	Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-geração de 100km . . . . .	61
5.18	Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-carga de 100km . . . . .	63
II.1	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 10km . . . . .	79
II.2	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 10km . . . . .	80



---

II.3	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 28km . . . . .	80
II.4	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 28km . . . . .	81
II.5	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 100km . . . . .	81
II.6	Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 100km . . . . .	82
II.7	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-geração de 14km . . . . .	82
II.8	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 14km . . . . .	83
II.9	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 28km . . . . .	83
II.10	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 28km . . . . .	83
II.11	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-geração de 100km . . . . .	84
II.12	Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 100km . . . . .	84



## LISTA DE TABELAS

3.1	Valores de $V_s$ , $\Delta I_s$ e $I_s$ para os diferentes tipos de defeito . . . . .	19
4.1	Parâmetros distribuídos da linha . . . . .	29
5.1	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- geração de 10km . . . . .	36
5.2	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- carga de 10km . . . . .	36
5.3	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- geração de 28km . . . . .	37
5.4	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- carga de 28km . . . . .	37
5.5	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- geração de 100km . . . . .	37
5.6	Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração- carga de 100km . . . . .	38
5.7	Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 10km . . . . .	45
5.8	Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 10km . . . . .	46
5.9	Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha em paralelo geração-geração de 10km . . . . .	47
5.10	Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha em paralelo geração-carga de 10km . . . . .	49
5.11	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 14km . . . . .	51
5.12	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 14km . . . . .	51
5.13	Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 28km . . . . .	52

5.14	Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 28km . . . . .	53
5.15	Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-geração de 28km . . . . .	55
5.16	Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-carga de 28km . . . . .	56
5.17	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 28km . . . . .	58
5.18	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 28km . . . . .	58
5.19	Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 100km . . . . .	59
5.20	Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 100km . . . . .	60
5.21	Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-geração de 100km . . . . .	62
5.22	Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-carga de 100km . . . . .	63
5.23	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 100km . . . . .	64
5.24	Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 100km . . . . .	64
I.1	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 10km . . . . .	73
I.2	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 10km . . . . .	73
I.3	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 28km . . . . .	74
I.4	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 28km . . . . .	74
I.5	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 100km . . . . .	74
I.6	Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 100km . . . . .	74
I.7	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 14km . . . . .	75

---

I.8	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 14km . . . . .	75
I.9	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 28km . . . . .	76
I.10	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 28km . . . . .	76
I.11	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 100km . . . . .	77
I.12	Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 100km . . . . .	77



## SIGLAS

DFE	Defeito fase-fase
DFFF	Defeito fase-fase-fase
DFFFT	Defeito fase-fase-fase para terra
DFFT	Defeito fase-fase para terra
DFT	Defeito fase para terra
IEC	International Electrotechnical Commission
OV	Ondas Viajantes
TTR	Tensão transitória de restabelecimento





## SÍMBOLOS

$a$	Fator de amortecimento
$\alpha$	Constante de atenuação
$\beta$	Constante de fase
$C$	Capacidade
$C_0$	Capacitância de sequência homopolar
$C_1$	Capacitância de sequência direta
$M, D, m, d$	Distância do defeito
$G$	Condutância
$\gamma$	Constante de propagação
$I, i$	Corrente
$I_{abc1}$	Matriz correntes terminal 1
$I_{abc2}$	Matriz correntes terminal 2
$I_{abc3}$	Matriz correntes terminal 3
$I_{AF}$	Corrente de defeito fase A
$I_{Aprev}$	Corrente pré-defeito fase A
$I_{BF}$	Corrente de defeito fase B
$I_{Bprev}$	Corrente pré-defeito fase B
$I_{CF}$	Corrente de defeito fase C
$I_{Cprev}$	Corrente pré-defeito fase C
$I_F$	Corrente de defeito
$I_{F2}$	Corrente de defeito de sequência inversa
$I_{G1}$	Corrente de sequência direta terminal G

## SÍMBOLOS

---

$I_{G2}$	Corrente de sequência inversa terminal G
$I_{H1}$	Corrente de sequência direta terminal H
$I_{H2}$	Corrente de sequência inversa terminal H
$I_R$	Corrente medida no terminal R
$I_r$	Corrente no terminal recetor
$I_S$	Corrente medida no terminal S
$I_e$	Corrente no terminal emissor
$I_{S0}$	Corrente pré-defeito
$j$	Unidade imaginária
$k_d$	Fator distribuição das correntes
$\ell$	Comprimento da linha
$L$	Coefficiente de auto-indução
$L_0$	Indutância de sequência homopolar
$L_1$	Indutância de sequência direta
$PV$	Velocidade de Propagação
$R$	Resistência
$R_0$	Resistência de sequência homopolar
$R_1$	Resistência de sequência direta
$\Re$	Conjunto de números reais
$R_F$	Resistência de defeito
$t_r$	Instante que a onda chega ao terminal R
$t_s$	Instante que a onda chega ao terminal S
$TWLPT$	Tempo de propagação das ondas viajantes
$U_R$	Fonte de tensão do terminal R
$U_S$	Fonte de tensão do terminal S
$V$	Tensão

---

$V_a$	Tensão do arco
$V_{abc1}$	Matriz tensões terminal 1
$V_{abc2}$	Matriz tensões terminal 2
$V_{abc3}$	Matriz tensões terminal 3
$V_{AF}$	Tensão de defeito fase A
$V_{BF}$	Tensão de defeito fase B
$V_C$	Tensão aos terminais do condensador
$V_{CF}$	Tensão de defeito fase C
$V_D$	Tensão aos terminais do disjuntor
$V_{F2}$	Tensão de defeito de sequência inversa
$V_{G1}$	Tensão de sequência direta terminal G
$V_{G2}$	Tensão de sequência inversa terminal G
$V_{H1}$	Tensão de sequência direta terminal H
$V_{H2}$	Tensão de sequência inversa terminal H
$V_R$	Tensão medida no terminal R
$V_r$	Tensão no terminal recetor
$V_S$	Tensão medida no terminal S
$V_e$	Tensão no terminal emissor
$\omega$	Frequência angular
$\omega_n$	Frequência angular própria com amortecimento
$\omega_p$	Frequência angular própria sem amortecimento
$Y_L$	Admitância complexa da linha
$Y_T$	Admitância transversal da linha
$Y_{abc}$	Matriz admitância
$Z_l$	Impedância desconhecida da linha de transmissão
$Z_L$	Impedância longitudinal da linha
$Z_W$	Impedância característica da onda
$Z_{abc}$	Matriz impedância
$Z_{L0}$	Impedância de sequência homopolar
$Z_{L1}$	Impedância de sequência direta
$Z_{L2}$	Impedância de sequência inversa

## SÍMBOLOS

---

$Z_R$  Impedância terminal equivalente terminal R

$Z_S$  Impedância equivalente terminal S

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O sistema de energia elétrica é uma infraestrutura essencial para o funcionamento de uma sociedade moderna. As linhas de transporte de energia são parte fundamental deste sistema, possibilitando o transporte de energia das fontes de geração para os centros de carga. As linhas aéreas são as mais utilizadas, visto que o seu custo é substancialmente menor que as linhas subterrâneas.

O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos levou o consumo de energia a aumentar e, conseqüentemente, o número de linhas também aumentou. Dada a sua exposição estas estão frequentemente sujeitas a defeitos, devido a descargas atmosféricas, contacto com animais ou árvores ou mesmo negligência humana.

Nos dias de hoje os consumidores e as entidades reguladoras são cada vez mais exigentes com as empresas responsáveis pelo transporte de energia, pelo que uma rápida e precisa localização dos defeitos é fundamental para diminuir o tempo de resposta, reduzindo assim o tempo de interrupção.

Dada a importância deste tema, vários métodos foram desenvolvidos e outros ainda continuam em desenvolvimento, na tentativa de obter melhores resultados para uma localização mais precisa do defeito, tendo em conta os vários fatores que podem afetar os algoritmos desenvolvidos. Atualmente os métodos existentes podem ser agrupados em quatro grupos: métodos baseados na impedância, métodos baseados em frequências elevadas, métodos baseados em ondas viajantes (OV) e métodos baseados em inteligência artificial, este último, o mais recente na literatura.

Os métodos baseados na impedância apresentam algumas limitações como a influência da resistência de defeito, necessidade de selecionar previamente o tipo de defeito e imprecisões associadas à impedância da linha [1]. Em linhas mais longas este método pode apresentar um erro considerável. Por outro lado, os métodos baseados em OV mostram-se bastante precisos e podem ser uma solução plausível e competitiva com os métodos baseados na impedância.

### 1.2 Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como objetivo aferir os resultados obtidos pelos métodos mais clássicos para o cálculo da localização de defeitos, nomeadamente os métodos baseados na impedância e comparar com os resultados obtidos através dos métodos baseados em OV.

Dada a grande quantidade de métodos baseados na impedância existentes na literatura, selecionaram-se quatro métodos que vão ser analisados ao longo deste trabalho. Para a escolha destes métodos verificou-se na literatura quais os mais usados, tentando alguma diversidade no modo como os dados são adquiridos e no modo como é realizado o cálculo para obter a localização do defeito. O método de *Takagi* estima a distância do defeito apenas com os dados de um terminal [2], enquanto que o método de *Tziouvaras* necessita de dados dos dois terminais para obter o local do defeito [3]. Ambos os métodos mencionados anteriormente necessitam dos parâmetros de linhas para calcular a distância ao defeito, desse modo foi selecionado o método de *Radojevic*, pois este método não necessita dos parâmetros de linha para obter o local de defeito [4]. Na literatura existem alguns métodos que necessitam de sincronismo de dados entre os vários terminais, como o método de *Girgis*, embora em [5] seja apresentada uma variação do método para obter o local de defeito com dados não sincronizados. No presente trabalho apenas se vai utilizar o modelo que necessita de dados sincronizados.

Para comparar e avaliar os resultados de cada método, vão ser realizados três estudos diferentes. Primeiramente verifica-se a influência da ação do disjuntor nos métodos baseados na impedância. Ainda nestes métodos vai avaliar-se até que ponto o valor da resistência de defeito afeta a precisão dos métodos. Por fim, os métodos baseados em OV, vão ser submetidos a simulações com várias frequências de amostragem de forma a verificar, para que valores de frequência a precisão dos métodos se aproxima da precisão dos métodos baseados na impedância.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, organizados em diversas seções e subseções.

No Capítulo 1 tem-se a introdução onde é apresentado o enquadramento, os objetivos e a estrutura do documento.

No Capítulo 2 apresenta-se um resumo dos métodos existentes na literatura, a teoria sobre o modelo de linha, tipos de defeitos, assim como alguma informação do disjuntor e a sua importância.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento dos métodos alvo de estudo para comparação dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os tipos de linha considerados para o estudo, assim como os parâmetros utilizados em cada caso. No final realiza-se uma explicação do estudo realizado para verificar a influência da ação do disjuntor.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da influência da ação do disjuntor, frequência de amostragem e da resistência de defeito. No final de cada estudo é apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos.

No Capítulo 6, o último desta dissertação, é apresentada uma síntese do trabalho desenvolvido, as conclusões obtidas e sugestões de futuros trabalhos a realizar a partir desta dissertação.





## CONHECIMENTO PRÉVIO

Neste capítulo é apresentada uma análise sobre as várias categorias dos métodos existentes, de forma a identificar as principais características de cada uma, assim como as diferenças entre métodos da mesma categoria. São abordados outros assuntos como o modelo de linha e os tipos de defeitos, temas que estão inevitavelmente ligados à localização de defeitos em linhas de transporte de energia. Por último, é apresentada a importância que o disjuntor tem num sistema de energia e as suas principais funções.

### 2.1 Métodos de Localização de Defeitos em Linhas

Existem na literatura vários métodos para a localização de defeitos nas linhas de transporte de energia. Ao longo dos anos o aparecimento de novos métodos foi constante, surgindo estes com o intuito de obter melhores resultados, assim como corrigir lacunas encontradas nos métodos já existentes. Atualmente, os métodos são agrupados em quatro categorias: métodos baseados na impedância, métodos baseados em ondas viajantes, métodos baseados em inteligência artificial e métodos baseados em frequências elevadas. Esta divisão de categorias está relacionada o tipo de análise efetuada pelos métodos no processo de localização de defeitos.

#### 2.1.1 Métodos baseados na Impedância

Os algoritmos baseados na impedância são os mais utilizados a nível mundial, devido à sua simples implementação e baixo custo. Estes métodos utilizam

parâmetros de linha, assim como a corrente e tensão de um ou mais terminais, sincronizados ou não sincronizados. As medições aos terminais são realizadas através de relés na frequência fundamental.

Os primeiros métodos a surgir utilizavam apenas dados de um terminal, cuja a principal vantagem é o fato de não necessitar de canais de comunicação entre os vários terminais, como apresenta o método de *Takagi*, um método bastante difundido na literatura, que embora apresente algumas limitações, tornou-se uma opção bastante atrativa e a base para o desenvolvimento de novas metodologias [2]. Um desses exemplos é o método modificado de *Takagi*, que em relação ao anterior, apresenta uma forma de calcular o ângulo de correção, para corrigir a não homogeneidade do sistema, ao invés de utilizar o valor constante igual a zero, o que demonstrou ser uma melhoria nos resultados, pois o antigo método exigia que o sistema fosse homogêneo [6]. Outros desenvolvimentos nos métodos que usam apenas um terminal estão relacionados com a inclusão da impedância da fonte no cálculo da distância, como mostra o método de *Eriksson*, enquanto que o método de *Novosel* apresenta uma equação quadrática complexa para determinar o valor da impedância na fonte [7]. No geral estes métodos apresentam menor precisão quando comparados com os métodos baseados em dois terminais, porque são severamente influenciados pela resistência de defeito.

Nos métodos baseados em dois terminais destaca-se o método de *Johns & Jamali* que utiliza medidas de tensão e corrente sincronizadas, sendo um dos mais precisos, devido ao facto de considerar o efeito capacitivo da linha de transporte de energia [8]. Outro método bastante difundido na literatura é o método de *Tziouvaras*, que faz uso de dados sincronizados e não sincronizados de dois a três terminais. Destaca-se pela sua precisão e simplicidade, assim como pelo uso de componentes simétricos de sequência inversa, evitando assim dificuldades associadas ao fluxo de potência pré-defeito e acoplamento mútuo homopolar entre fases [3]. Um ponto em comum entre vários métodos, é a necessidade dos parâmetros de linha, que nem sempre estão disponíveis, ou podem sofrer alterações ao longo do comprimento de linha. Desse modo, de forma a minimizar a influência de imprecisões relacionadas com os parâmetros de linha, surge o método de *Radojevic*, que se distingue por não utilizar parâmetros de linha na localização de defeitos, apenas se baseia nas medidas sincronizadas de tensão e corrente de ambos os terminais [4]. Para contornar os erros derivados da sincronização entre terminais, vários métodos que utilizam dados não sincronizados foram desenvolvidos, no entanto a grande maioria dos métodos utiliza processos iterativos para o cálculo do ângulo de sincronismo entre terminais, portanto embora apresente resultados bastantes precisos, os algoritmos são mais complexos e lentos.

### 2.1.2 Métodos baseados em Ondas Viajantes

Os métodos baseados em OV têm como base a teoria da propagação e reflexão das ondas. Após a ocorrência de um defeito, sinais de tensão e corrente propagam-se, na forma de onda em direção aos terminais da linha a uma velocidade próxima da velocidade da luz [9]. Através de medições precisas dos tempos de chegada das ondas aos terminais e da análise das propriedades físicas dessas ondas, pós defeito, é possível obter a localização do defeito [10]. Estes métodos apresentam uma maior precisão relativamente aos métodos baseados na impedância e não necessitam de uma classificação prévia do tipo de defeito, no entanto, esta técnica requer frequências de amostragem elevadas para resultados mais precisos, o que torna o método mais dispendioso. Nesta categoria os métodos podem dividir-se em dois tipos: método ondas viajantes num só terminal e o método ondas viajantes dois terminais, que respetivamente utilizam um e dois terminais da linha para o cálculo dos tempos de chegada das ondas.

### 2.1.3 Métodos baseados em Frequências Elevadas

Os métodos baseados em frequências elevadas determinam a localização de defeito com base na identificação dos componentes de alta frequência dos sinais de tensão e corrente. É assim possível distinguir duas abordagens: métodos no domínio do tempo e métodos no domínio da frequência [11]. Nesta categoria destaca-se o facto de os métodos se mostrarem insensíveis ao tipo de defeito e à resistência do defeito, sendo capazes de oferecer uma precisão muito elevada. No entanto, a precisão é proporcional à frequência de amostragem [12] o que faz com que o método necessite de frequências de amostragem elevadas para obter resultados confiáveis, tornando esta técnica muito dispendiosa, devido à necessidade de filtros especializados para a medição das componentes de frequência elevada, além de ser uma técnica bastante complexa, pelo que não é muito utilizada [13].

### 2.1.4 Métodos baseados em Inteligência Artificial

Nos últimos anos os métodos baseados em inteligência artificial tem recebido alguma atenção por parte dos investigadores, na busca de soluções para alguns dos problemas encontrados nos métodos mais convencionais, como por exemplo a incerteza que os parâmetros de linha pode causar na localização de defeitos [13]. Esta técnica, recolhe informações do estado dos disjuntores e subestação, parâmetros ao longo da linha e condições atmosféricas. Embora seja relatado um bom desempenho destes métodos, estes necessitam grande esforço computacional,

além de que são bastantes dependentes de atualizações periódicas das características do sistema. Os métodos mais utilizados são: *Artificial Neural Networks*, *Fuzzy Logic*, *Support Vector Machine*, *Genetic Algorithm* e *Matching approach* [9].

## 2.2 Modelo de Linha

Os métodos de localização de defeitos em linhas de transporte de energia, estão diretamente relacionados com o modelo de linha utilizado, pois dependendo deste e das aproximações realizadas, o método pode apresentar maior ou menor precisão. As linhas de transporte de energia podem ser representadas por modelo de parâmetros concentrados ou parâmetros distribuídos, sendo que nesta dissertação se vai utilizar o modelo de parâmetros distribuídos.

Neste modelo, a linha pode ser caracterizada pelos parâmetros transversais e longitudinais distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da linha [14].

Os parâmetros transversais são:

- Condutância transversal entre condutores,  $G(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$ ;
- Capacidade entre condutores,  $C(F \cdot m^{-1})$ .

Os parâmetros longitudinais são:

- Resistência longitudinal total dos dois condutores,  $R(\Omega \cdot m^{-1})$ ;
- Coeficiente de auto-indução total da linha,  $L(H \cdot m^{-1})$ .

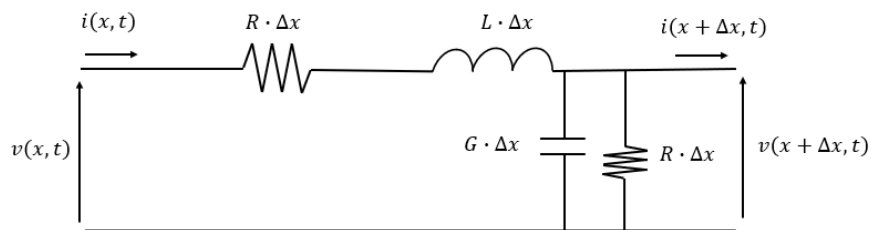


Figura 2.1: Esquema dos parâmetros distribuídos da linha (adaptado de [15])

A figura 2.1 apresenta o esquema dos parâmetros distribuídos, a partir da qual se pode obter as seguintes equações diferenciais da linha[16],

$$-\frac{dV(x)}{dx} = (R + j\omega L)I(x) \quad (2.1)$$

$$-\frac{dI(x)}{dx} = (G + j\omega C)V(x) \quad (2.2)$$

onde  $V$  e  $I$  representam os fasores de tensão e corrente respetivamente. Derivando as equações (2.1) e (2.2) em ordem a  $x$ , obtém-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(x) \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I(x) \quad (2.4)$$

A impedância característica da onda  $Z_W(\Omega)$  e a constante de propagação  $\gamma(m^{-1})$  definem-se por:

$$Z_W = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{Z_L}{Y_T}} \quad (\Omega) \quad (2.5)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \sqrt{Z_L Y_T} \quad (m^{-1}) \quad (2.6)$$

Onde  $Z_L$  representa a impedância longitudinal e  $Y_T$  a admitância transversal. Substituindo a última equação (2.6) nas equações (2.3) e (2.4), estas rescrevem-se da seguinte forma:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \gamma^2 V(x) \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = \gamma^2 I(x) \quad (2.8)$$

As equações não lineares (2.7) e (2.8) segundo [16] admitem soluções do tipo:

$$V(x) = C_1 e^{-\gamma x} + C_2 e^{\gamma x} \quad (2.9)$$

$$I(x) = \frac{C_1 e^{-\gamma x} + C_2 e^{\gamma x}}{Z_W} \quad (2.10)$$

Admitindo que  $C_1$  e  $C_2 \in \mathbb{R}$ , ao usar valores de fronteira ( $x = 0$ ) nas equações (2.9) e (2.10) obtém-se soluções para  $C_1$  e  $C_2$ . Após a substituição desses valores obtém-se as equações de propagação de tensão e corrente para uma linha de comprimento  $\ell$ .

$$V_r = V_e \cosh \gamma \ell - Z_0 I_e \sinh \gamma \ell \quad (2.11)$$

$$I_r = -\frac{V_e}{Z_0} \sinh \gamma \ell + I_e \cosh \gamma \ell \quad (2.12)$$

onde  $V_r$  e  $I_r$  representam a tensão e corrente no terminal recetor da linha,  $V_e$  e  $I_e$  são a tensão e corrente no terminal emissor.

Por fim, a equação da velocidade de propagação da onda pode ser escrita da seguinte forma:

$$PV = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.13)$$

Atendendo que a equação (2.6) é composta por uma parte real, a constante de atenuação,  $\alpha$ , e por uma parte imaginária a constante de fase,  $\beta$ , esta pode ser representada por:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.14)$$

Numa linha sem perdas,  $R = G = 0$ , como é o caso utilizado nesta tese, a velocidade de propagação da onda é dada pela equação (2.17).

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.15)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (2.16)$$

$$PV = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.17)$$

## 2.3 Tipos de Defeitos

A grande maioria dos defeitos existentes numa rede de energia acontecem nas linhas aéreas dada a sua grande exposição a fenómenos naturais, portanto é extremamente importante continuar o desenvolvimento deste tema de modo a evitar e reduzir a ocorrência de defeitos. De acordo com *International Electrotechnical Commission* (IEC) [17] um defeito é uma anormalidade na rede de energia, resultante de uma falha no sistema primário ou de um elemento deste, que requer no imediato a interrupção através do disparo dos disjuntores. Os defeitos podem classificar-se como temporários ou permanentes.

Os defeitos temporários são principalmente originados pelo contato de animais ou árvores, descargas atmosféricas ou colisão de condutores, são defeitos em que a rede de energia está interrompida por um curto período de tempo. Por outro lado, os defeitos permanentes podem causar uma interrupção mais prolongada da linha de transporte e podem ter como origem danos provocados pelo homem, exposição ao meio ambiente ou resultantes da idade dos componentes.

Os defeitos nas linhas de transporte de energia podem ser divididos em três tipos:

- Defeito por curto-circuito;
- Defeito por circuito aberto;
- Defeito combinado.

Um defeito por curto-circuito é definido pelo IEC [18] pela existência de corrente entre duas ou mais fases ou entre fases e a terra, podendo ser classificado pelos seguintes tipos (Figura 2.2).

- Defeito fase para terra (DFT);
- Defeito fase-fase para terra (DFFFT);
- Defeito fase-fase (DFF);
- Defeito fase-fase-fase para terra (DFFFTT);
- Defeito fase-fase-fase (DFFF).

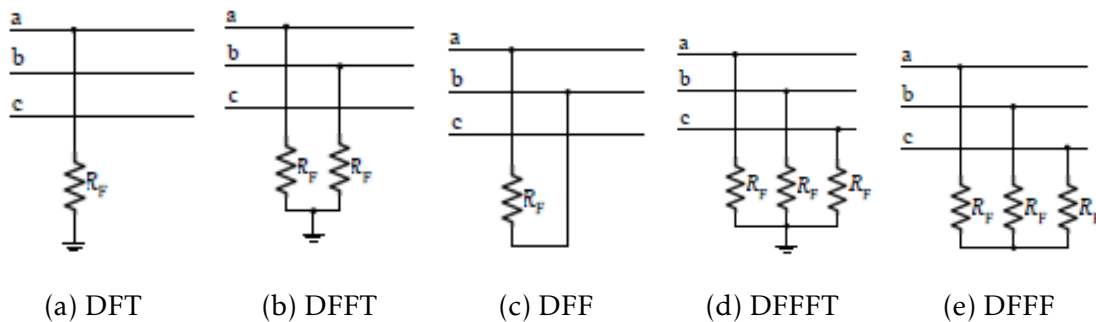


Figura 2.2: Tipo de defeitos curto-circuito (adaptado de [19])

Nos defeitos do tipo DFFFT (2.2d) e DFFF (2.2e) as três fases continuam em equilíbrio, pelo que se está perante um defeito simétrico. Nos outros tipos de defeito esta situação não se verifica, pelo que são classificados como defeitos assimétricos.

Defeito por circuito aberto segundo o IEC ocorre quando a impedância de cada uma das três fases são diferentes, geralmente é originado pela interrupção de uma ou duas fases [20].

Defeito combinado é definido pelo IEC [21] pela ocorrência de um defeito em curto-circuito e de um defeito em serie simultaneamente.

## 2.4 Disjuntor

Os disjuntores são elementos fundamentais para o funcionamento de uma rede de energia, estes podem funcionar de forma manual ou automática, de modo a manter os circuitos ligados ou desligados. Por norma, os disjuntores encontram-se na posição fechada e ocasionalmente, perante uma situação de defeito são chamados a atuar, interrompendo a corrente para proteger os equipamentos das elevadas amplitudes desta. Face esta razão os disjuntores são equipamentos aos quais tem que estar associada uma elevada fiabilidade, devido aos largos períodos sem alternar posição e à rápida necessidade de atuação quando necessário [22].

O disjuntor é essencialmente constituído por um par de contatos, um fixo e outro móvel, dentro de uma câmara de corte que contem um meio isolante (óleo, ar comprimido, hexafluoreto de enxofre ou o vácuo). Dada a natureza indutiva dos sistemas de energia é impossível interromper a corrente de forma instantânea. Quando os contatos se afastam existe a formação de um arco elétrico, resultado da disrupção do meio isolante e que permite a continuação do fluxo de corrente até ao momento em que é interrompido. As altas temperaturas que o arco elétrico pode atingir causam danos nos contatos, pelo que possuem um ciclo de vida limitado ao número de manobras efetuadas pelo disjuntor [23].

Para interromper o arco elétrico é necessária a conjugação simultânea de dois requisitos. O primeiro é que a corrente seja nula, de forma a que o arco não se reestabeleça. Nos sistemas de corrente alternada, a corrente toma o valor zero duas vezes por cada ciclo, então nessa situação, para impedir que o arco se reestabeleça, é necessário que o meio onde os contatos se encontram seja arrefecido de modo a inibir a sua condutividade. O segundo requisito é que após a anulação da corrente e a consequente extinção do arco, o meio onde se encontram os contatos tenha a capacidade de reestabelecer o regime dielétrico de modo a suportar a tensão transitória de restabelecimento (TTR), que pode atingir valores desde 1,5 a 3 vezes o valor da tensão do sistema [22].

Na figura 2.3 observa-se a evolução gráfica da tensão,  $V$ , corrente de curto-circuito,  $i$ , tensão do arco,  $V_a$ , e a tensão entre os contatos do disjuntor,  $V_D$ , de notar que as oscilações ocorrem a cada variação brusca da tensão do arco e em particular quando a corrente é finalmente interrompida.

Os contatos do disjuntor começam a afastar-se no instante  $t_0$  criando o arco entre eles, à medida que estes se vão afastando a tensão vai subindo ao longo das várias alternâncias da corrente. No instante  $t_1$ , a distância já é o suficiente para o arco se extinguir, ficando a corrente nula.

Para o cálculo da TTR, pode considerar-se o circuito da figura 2.4, no qual  $R_1$ ,



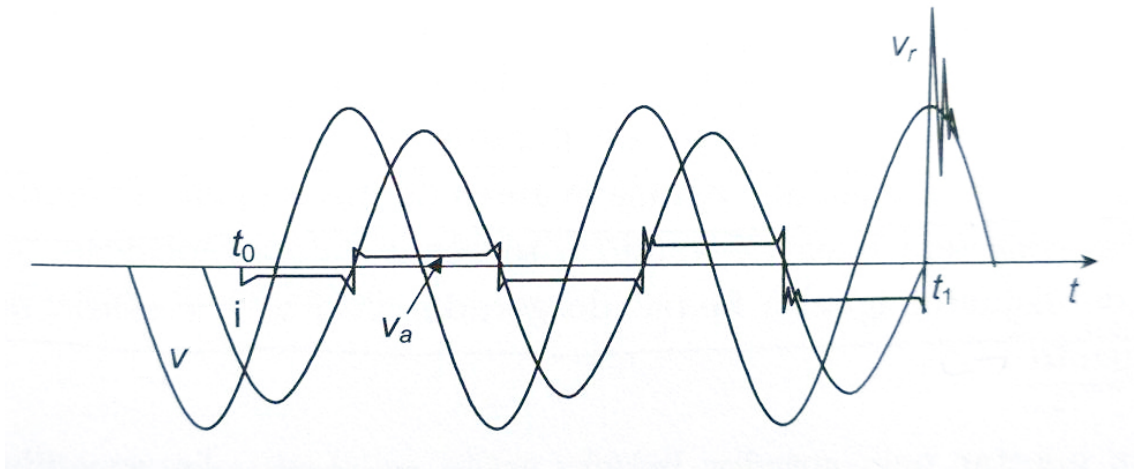


Figura 2.3: Tensão da rede, corrente de curto-circuito, tensão do arco e tensão entre os contatos do disjuntor (adaptado de [16])

$L_1$  e  $C_1$  são respetivamente, a resistência, indutância e a capacidade da linha.

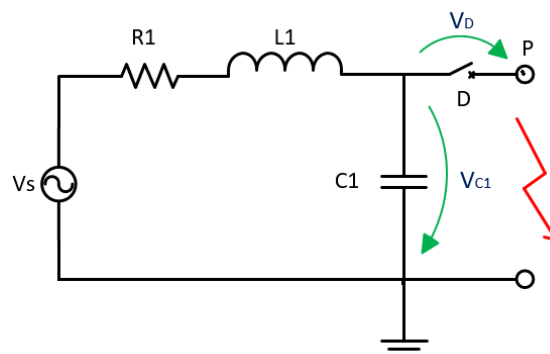


Figura 2.4: Circuito equivalente do corte de uma corrente de curto-circuito (adaptado de [16])

Após a ocorrência do defeito no ponto  $P$ , o circuito é interrompido pela abertura do disjuntor  $D$  e a tensão verificada aos terminais deste ( $V_D$ ) é igual à tensão aos terminais da capacidade ( $V_{C1}$ ). Resolvendo as equações do circuito em ordem a  $V_D$ , obtém-se a seguinte equação no domínio do tempo [16].

$$V_D(t) = \sqrt{2}V_s \sin \phi \left[ \cos \theta - \sqrt{\cos^2 \theta + \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2 \sin^2 \theta} e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t - \gamma) \right] \quad (2.18)$$

onde:

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{\omega L_1}{R_1}\right)$$

$$a = \frac{R_1}{2L_1}, \text{ fator de amortecimento.}$$

$\omega_n = \sqrt{\omega_p^2 - \alpha^2}$ , frequência angular própria com amortecimento.

$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ , frequência angular própria sem amortecimento.

$\gamma = \text{atan}\left(\frac{\omega_n}{\omega} \tan \theta\right)$

No caso de a interrupção da corrente acontecer no preciso instante em que esta se anula ( $\theta = 0$ ), caso ideal, a equação (2.18) simplifica-se para:

$$V_D(t) = \sqrt{2} \sin \phi \left(1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_n t\right) \quad (2.19)$$

Ignorando o amortecimento das oscilações ( $a = 0$ ), a máxima tensão aos terminais do disjuntor é dada por:

$$V_D^{\max} = 2\sqrt{2}V_S \sin \phi \quad [\text{V}] \quad (2.20)$$

Em alta e muito alta tensão verifica-se que a corrente curto-circuito possui uma componente indutiva predominante, tem-se no caso limite em que  $\cos \phi = 0$ :

$$V_D^{\max} = 2\sqrt{2}V_S \quad (2.21)$$

Considerando agora que a interrupção acontece com corrente máxima (caso não-ideal) ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ), supondo um circuito indutivo e desprezando o amortecimento como foi feito anteriormente, obtém-se:

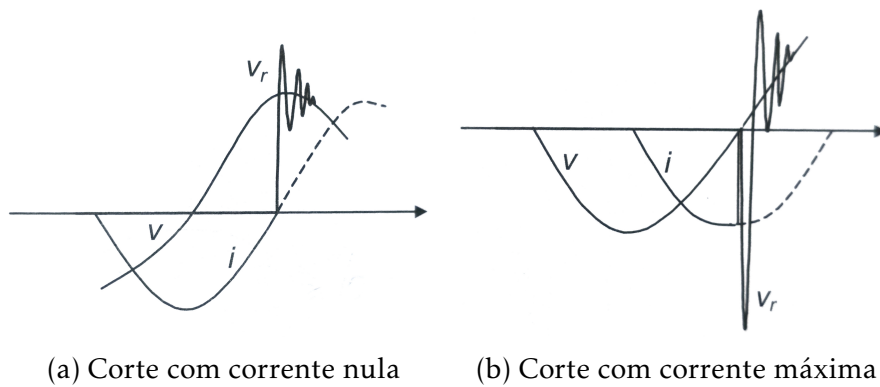
$$V_D^{\max} = \sqrt{2}V_S \frac{\omega_n}{\omega} \quad (2.22)$$

Tendo em conta que a frequência de um circuito ( $\omega_n$ ) é da ordem das dezenas de *kHz* para redes de alta tensão, a sobretensão é, no caso da interrupção não-ideal, substancialmente superior aquela que se verifica com uma interrupção ideal.

Na figura 2.5 observa-se a o andamento da TTR para o caso do corte com corrente nula em 2.5a e para corrente máxima em 2.5b. É importante referir que o corte com corrente máxima nunca se verifica na prática[16].

Além da sua principal função, que é interromper situações de defeito na rede, o disjuntor também é utilizado para realizar um conjunto de diferentes manobras, que fazem parte da exploração normal da rede, como por exemplo:

- Ligação de transformadores;
- Abertura de linhas em vazio;
- Ligação de reactâncias *shunt*;
- Ligação de baterias de condensadores.



(a) Corte com corrente nula

(b) Corte com corrente máxima

Figura 2.5: Tensão transitória de restabelecimento (adaptado de [16])



## METODOLOGIAS UTILIZADAS

Neste capítulo os métodos selecionados para realizar o presente estudo são alvo de uma análise mais detalhada, de forma a identificar as principais diferenças entre cada um, assim como o modo de cada um para obter a distância do defeito. Primeiramente são analisados os métodos baseados na impedância e depois os métodos baseados nas ondas viajantes.

### 3.1 Métodos baseados na Impedância

#### 3.1.1 Método de *Takagi*

O método de *Takagi* tem sido largamente utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo, mas principalmente por não necessitar de sincronização de dados nem canais de comunicação entre os terminais da linha, pois apenas utiliza dados de um terminal [24].

A grande novidade deste método em relação aos já existentes foi a subtração da corrente pré-defeito à corrente de defeito, cancelando assim os efeitos da corrente de carga. Portanto, este método necessita de dados pré-defeito e pós-defeito [25].

O desenvolvimento do método foi realizado com o modelo monofásico da linha como se pode observar na figura 3.1, que apresenta um defeito resistivo à terra no ponto F.

- $Z_l$  - impedância desconhecida da linha de transmissão;
- $R_F, I_F$  - resistência de defeito e corrente de defeito;

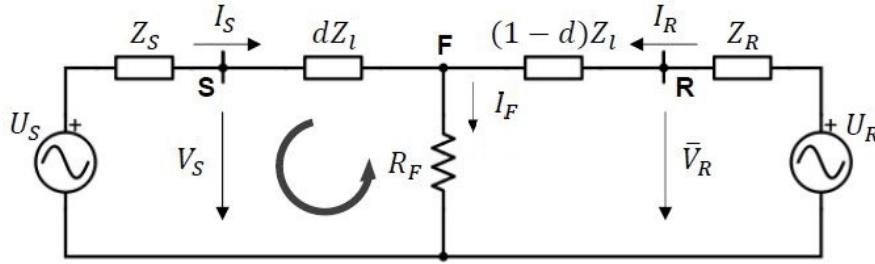


Figura 3.1: Esquema utilizado para o método de *Takagi* (adaptado de [24])

- $d$  - distância do defeito, vista do ponto S;
- $U_S, U_R$  - fontes de tensão nas extremidades da linha;
- $Z_S, Z_R$  - impedâncias equivalente de rede;
- $V_S, I_S$  - tensão e corrente medidas na extremidade S;
- $V_R, I_R$  - tensão e corrente desconhecidas da extremidade R;

Tendo em conta as medidas de tensão e corrente apenas da extremidade S,  $V_S$  e  $I_S$ , da análise da malha representada na figura 3.1, resulta a seguinte equação:

$$V_S = d Z_l I_S + R_F I_F \quad (3.1)$$

Onde a corrente de defeito é dada por:

$$I_F = I_S + I_R \quad (3.2)$$

A corrente  $I_R$  é desconhecida, então  $I_F$  também, portanto não é possível determinar a distância a partir da equação (3.1). De notar que  $R_F$  também é desconhecida.

Uma forma de contornar este problema assume-se que a corrente de defeito  $I_F$ , é proporcional à variação da corrente no ponto S no momento em que se dá o defeito.

$$\Delta I_S = I_S - I_{S0} = k_d I_F \quad (3.3)$$

onde  $k_d$ , é o fator de distribuição das correntes no circuito de defeito puro quando este é decomposto pelo teorema da sobreposição e  $I_{S0}$  é a corrente pré-defeito no ponto S.

$$\Delta I_S = \frac{Z_R + (1-d)Z_l}{Z_R + Z_S + Z_l} I_F \quad (3.4)$$

Neste caso,  $k_d$  é dado por:

$$k_d = \frac{\Delta I_S}{I_F} = \frac{Z_R + (1-d)Z_L}{Z_S + Z_l + Z_R} \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (3.3) na equação (3.1), obtém-se:

$$V_S = d Z_l I_S + \frac{R_F}{k_d} \Delta I_S \quad (3.6)$$

Multiplicando ambos os lados pelo complexo conjugado de  $\Delta I_S$  obtém-se seguinte resultado:

$$V_S \Delta I_S = d Z_l I_S \Delta I_S + \frac{R_F}{k_d} \Delta I_S \quad (3.7)$$

O método de *Takagi* assume que as impedâncias da fonte apresentam o mesmo ângulo que a linha de transmissão, quer isto dizer que  $k_d$  é um número real com magnitude igual a zero, o que implica que o termo  $\frac{R_F}{k_d}$  se reduz a um número real [25][2]. Igualando apenas as componentes imaginárias da equação (3.7) a distância do defeito é dada por:

$$d = \frac{Im(V_S \Delta I_S)}{Im(Z_l I_S \Delta I_S)} \quad (3.8)$$

No método de *Takagi* a classificação do defeito é necessária, portanto, na tabela 3.1 encontram-se as fórmulas para obter os valores de  $V_s$ ,  $\Delta I_s$  e  $I_s$  de acordo com o tipo de defeito.

Onde:

$$k = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1 \quad (3.9)$$

Tabela 3.1: Valores de  $V_s$ ,  $\Delta I_s$  e  $I_s$  para os diferentes tipos de defeito

Tipo de defeito	$V_s$	$I_s$	$\Delta I_s$
A-G	$V_{AF}$	$I_{AF} + kI_{G0}$	$I_{AF} - I_{Aprev}$
B-G	$V_{BF}$	$I_{BF} + kI_{G0}$	$I_{BF} - I_{Bprev}$
C-G	$V_{CF}$	$I_{CF} + kI_{G0}$	$I_{CF} - I_{Cprev}$
AB, AB-G, ABC	$V_{AF} - V_{BF}$	$I_{AF} - I_{BF}$	$(I_{AF} - I_{Aprev}) - (I_{BF} - I_{Bprev})$
BC, BC-G, ABC	$V_{BF} - V_{CF}$	$I_{BF} - I_{CF}$	$(I_{BF} - I_{Bprev}) - (I_{CF} - I_{Cprev})$
CA, CA-G, ABC	$V_{CF} - V_{AF}$	$I_{CF} - I_{AF}$	$(I_{CF} - I_{Cprev}) - (I_{AF} - I_{Aprev})$

### 3.1.2 Método impedância dois terminais

O princípio para a localização de defeitos deste método é semelhante ao do método de *Takagi*, mas neste caso são recolhidos dados sincronizados de ambos

os terminais. A partir dos valores pós-defeito de tensão e corrente, calcula-se a impedância aparente, que posteriormente é utilizada para calcular o local de defeito. Com a utilização de medidas de ambos os terminais da linha, os erros originados pela resistência de defeito ou a não homogeneidade do sistema são eliminados [25].

Este método utiliza ainda componentes simétricas para obter a distância. Os resultados podem ser alcançados com as três componentes simétricas: direta (1), inversa (2) e homopolar (0). No entanto a utilização da componente de sequência inversa apresenta mais vantagens, uma vez que não é afetada pela corrente de carga, acoplamento mútuo de sequência homopolar ou pela incerteza da impedância homopolar da linha [25].

Na figura 3.2 observa-se o esquema de um defeito assimétrico, com a representação das componentes de sequência inversa.

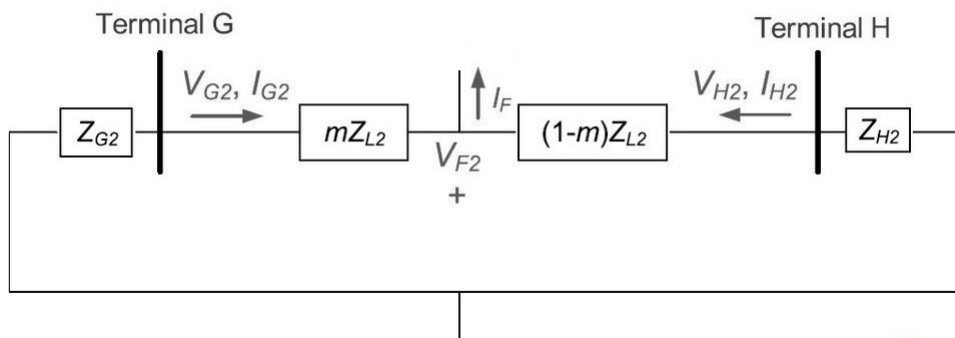


Figura 3.2: Esquema utilizado para o método impedância dois terminais (adaptado de [25])

$V_{F2}$  representa a tensão de sequência inversa no ponto de defeito, F, e pode ser calculada a partir de ambos os terminais.

Terminal G:

$$V_{F2} = V_{G2} - mZ_{L2}I_{G2} \quad (3.10)$$

Terminal H:

$$V_{F2} = V_{H2} - (1 - m)Z_{L2}I_{H2} \quad (3.11)$$

A tensão  $V_{F2}$  não varia quando calculada a partir de ambos os terminais, então, das equações (3.10) e (3.11), a distância de defeito,  $m$ , pode-se representar por:

$$m = \frac{V_{G2} - V_{H2} + Z_{L2}I_{H2}}{(I_{G2} + I_{H2})Z_{L2}} \quad (3.12)$$

Quando estamos perante um defeito simétrico a componente de sequência inversa não existe. Nesse caso, utiliza-se a componente de sequência direta para calcular a distância.



$$m = \frac{V_{G1} - V_{H1} + Z_{L1}I_{H1}}{(I_{G1} + I_{H1})Z_{L1}} \quad (3.13)$$

De notar, que não é necessária uma prévia classificação do tipo de defeito e que a partir da presença ou não das componentes de sequência inversa, pode-se identificar se está perante um defeito simétrico ou assimétrico.

### 3.1.3 Método de Girgis

O método de *Girgis* baseado na matriz de impedância trifásica, mostra-se independente ao tipo de defeito e insensível à impedância da fonte ou resistência do defeito [26]. Este método utiliza dados de dois a três terminais, sincronizados ou não sincronizados [5]. Nesta dissertação, apenas se vai considerar o método com dados sincronizados. Na figura 3.3, está representado o esquema usado para a análise deste método.

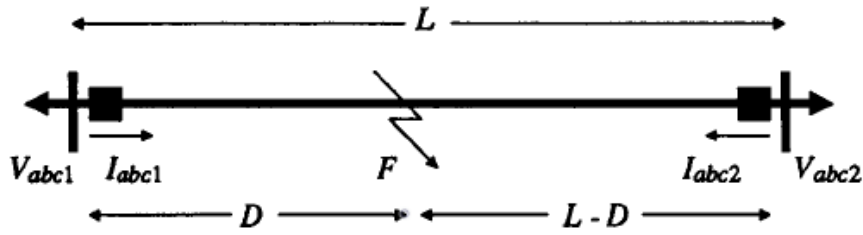


Figura 3.3: Esquema utilizado para o método de *Girgis* (adaptado de [5])

Assumindo que são adquiridos os fasores de tensão e corrente de ambos os terminais e tendo em conta a figura 3.3 obtém-se o seguinte conjunto de equações.

$$\begin{cases} V_{abc1} = VF_{abc} + D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \\ V_{abc2} = VF_{abc} + (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \end{cases} \quad (3.14)$$

Onde  $Z_{abc}$  é a matriz impedância em série trifásica por unidade de comprimento e  $VF_{abc}$  é o vetor de tensão do defeito.

A matriz  $Z_{abc}$  é calculada a partir dos parâmetros de sequência direta ( $ZL_1$ ) e homopolar ( $ZL_0$ ) da linha [27].

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} Z_m = (Z_0 - Z_1)/3 \\ Z_s = Z_m + Z_1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Do sistema de equações (3.14) resulta:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc}(I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (3.16)$$

A equação (3.16) pode ser escrita da seguinte forma:

$$Y_{abc} = M_{abc} \cdot D \Rightarrow \begin{cases} Y_{abc} = V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \\ M_{abc} = Z_{abc} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2}) \end{cases} \quad (3.17)$$

A solução de D, segundo [5], é obtida ao usar o método dos mínimos quadrados com:

$$D = (M^+M)^{-1}M^+Y \quad (3.18)$$

Onde  $M^+$  é a matriz transposta conjugada de M.

Como já foi mencionado anteriormente, este método também pode ser utilizado para a localização de defeitos em linhas com três terminais. No entanto, algumas alterações são necessárias realizar no modo como se analisa e calcula a localização do defeito, embora o princípio seja o mesmo.

Considerando a linha com três terminais representada na figura 3.4, pode-se observar as diferentes condições em que pode ocorrer o defeito.

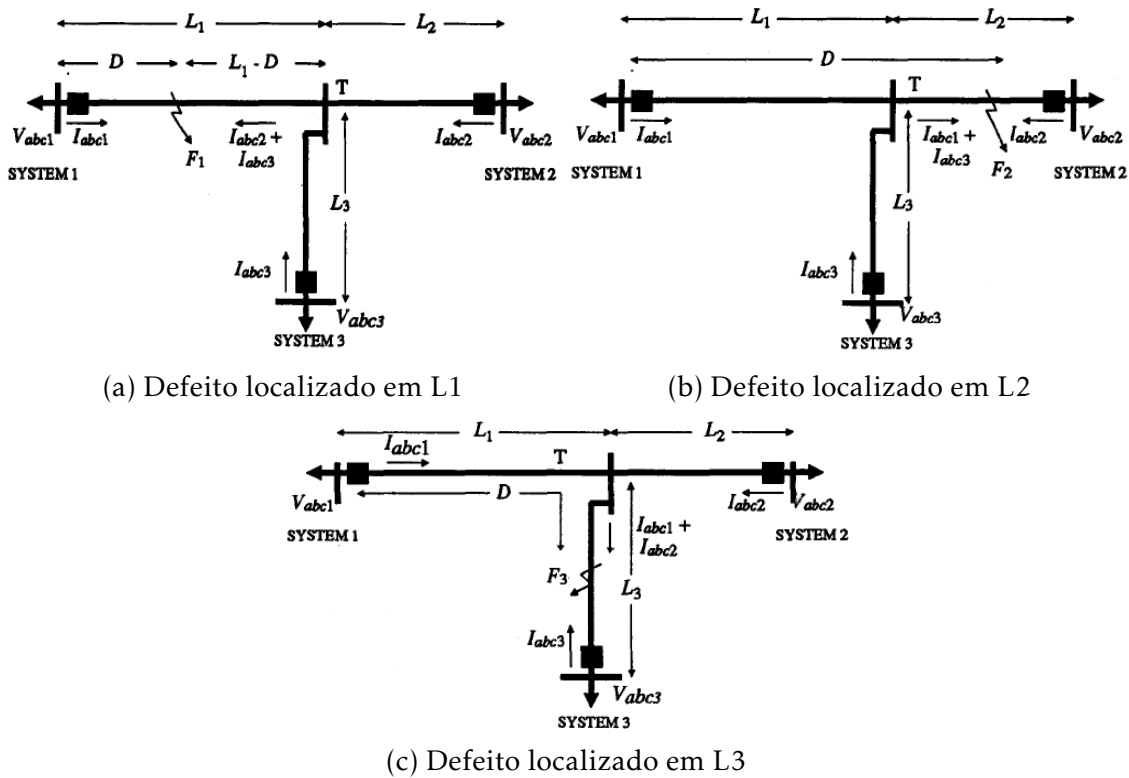


Figura 3.4: Possíveis localizações de defeitos numa linha de três terminais (adaptado de [5])

Para um defeito em L1, como é representado na figura 3.4a, as tensões aos terminais da linha podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} V_{abc1} = VF_{abc} + D \cdot Z_{abc1} \cdot I_{abc1} \\ V_{abc2} = VF_{abc} + L_2 \cdot Z_{abc2} \cdot I_{abc2} + (L_1 - D) \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc2} + I_{abc3}) \\ V_{abc3} = VF_{abc} + L_3 \cdot Z_{abc3} \cdot I_{abc3} + (L_1 - D) \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc2} + I_{abc3}) \end{cases} \quad (3.19)$$

Ao igualar a equação de  $(V_{abc1})$  a  $(V_{abc2})$  e a equação de  $(V_{abc1})$  a  $(V_{abc3})$  do sistema (3.19), obtém-se o seguinte resultado:

$$\begin{cases} V_{abc1} - V_{abc2} + (L_1 \cdot Z_{abc1} + L_2 \cdot Z_{abc2}) \cdot I_{abc2} + L_1 \cdot Z_{abc1} \cdot I_{abc3} = D \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2} + I_{abc3}) \\ V_{abc1} - V_{abc3} + (L_1 \cdot Z_{abc1} + L_3 \cdot Z_{abc3}) \cdot I_{abc3} + L_1 \cdot Z_{abc1} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2} + I_{abc3}) \end{cases} \quad (3.20)$$

De modo similar ao que aconteceu na análise do método para apenas dois terminais, as equações do sistema (3.20) podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{cases} Y1_{abc} = M_{abc} \cdot D \\ Y2_{abc} = M_{abc} \cdot D \end{cases} \quad (3.21)$$

O que resulta em duas soluções para a distância:

$$\begin{cases} D = (M^+M)^{-1}M^+Y1 \\ D' = (M^+M)^{-1}M^+Y2 \end{cases} \quad (3.22)$$

Ao realizar o desenvolvimento das equações para defeitos em L2 e L3 (3.4b e 3.4c) e assumindo que a impedância da linha é igual em todos os troços, pode concluir-se que:

Se  $D < L1$  e  $D' < L1$  a falha acontece na Linha1;

Se  $D > L1$  e  $D' = L1$  a falha acontece na Linha2;

Se  $D = L1$  e  $D' > L1$  a falha acontece na Linha3;

### 3.1.4 Método de Radojevic

Os métodos analisados anteriormente têm em comum o facto de necessitarem dos parâmetros da linha para determinar a localização do defeito. No entanto, estes parâmetros apenas são conhecidos de forma aproximada, pelo que podem sofrer variações devido às condições meteorológicas ou pela variação da carga. O método proposto por *Radojevic* não necessita dos parâmetros de linha, assumindo que a localização da falha é determinada apenas pelos fasores de corrente e tensão, medidos de forma sincronizada nos dois terminais [4].

Neste método a distância de defeito é calculada através das componentes direta(p) e inversa(n) dos fasores de tensão e corrente do circuito equivalente 3.5.

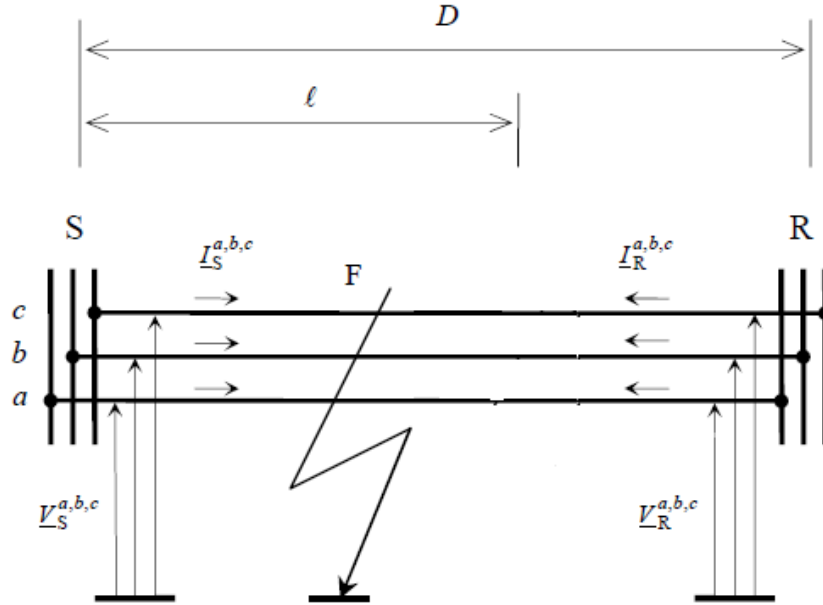
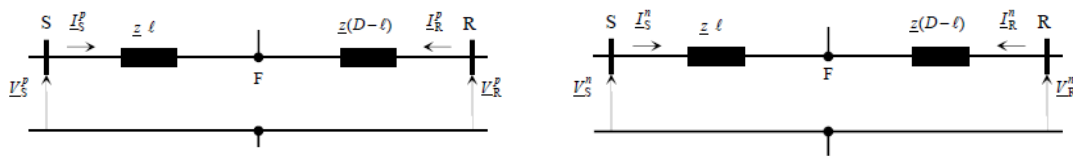


Figura 3.5: Esquema utilizado para o método de *Radojevic* (adaptado de [4])

O circuito representado na figura 3.5 é um circuito trifásico que representa uma falha no ponto F, do tipo DFT.

O circuito pode ser representado por três circuitos monofásicos, com as componentes direta (3.6a), inversa (3.6b) e homopolar.



(a) Circuito equivalente sequência direta (b) Circuito equivalente sequência inversa

Figura 3.6: Circuitos equivalente sequência direta e inversa (adaptado de [4])

Nas figuras 3.6a e 3.6b a impedância direta e inversa da linha é igual em ambos os casos, pelo que da análise do circuito pode-se retirar as seguintes equações:

$$\bar{V}_S^p - \bar{Z} \cdot \ell \cdot \bar{I}_S^p = \bar{V}_R^p - \bar{Z} \cdot (D - \ell) \cdot \bar{I}_R^p \quad (3.23)$$

$$\bar{V}_S^n - \bar{Z} \cdot \ell \cdot \bar{I}_S^n = \bar{V}_R^n - \bar{Z} \cdot (D - \ell) \cdot \bar{I}_R^n \quad (3.24)$$

Onde:

$\bar{V}_S^{p,n}, \bar{V}_R^{p,n}$  componente direta e inversa da tensão em ambos os terminais;  
 $\bar{I}_S^{p,n}, \bar{I}_R^{p,n}$  componente direta e inversa da corrente em ambos os terminais;  
 $\bar{Z}$ , componente direta ou inversa da impedância da linha, são iguais.

Os termos  $\bar{Z} \cdot \ell$  e  $\bar{Z} \cdot (D - \ell)$  são desconhecidos e podem ser determinados a partir das equações (3.23) e (3.24). A solução é dada pelas seguintes equações:

$$\bar{Z} \cdot \ell = \frac{(\bar{V}_S^p - \bar{V}_R^p) \cdot \bar{I}_R^n - (\bar{V}_S^n - \bar{V}_R^n) \cdot \bar{I}_R^p}{\bar{I}_S^p \cdot \bar{I}_R^n - \bar{I}_S^n \cdot \bar{I}_R^p} \quad (3.25)$$

$$\bar{Z} \cdot (D - \ell) = \frac{(\bar{V}_S^p - \bar{V}_R^p) \cdot \bar{I}_S^n - (\bar{V}_S^n - \bar{V}_R^n) \cdot \bar{I}_S^p}{\bar{I}_S^p \cdot \bar{I}_R^n - \bar{I}_S^n \cdot \bar{I}_R^p} \quad (3.26)$$

Como mencionado anteriormente, a localização do defeito é calculada independentemente dos parâmetros da linha, então a distância é calculada como uma porcentagem do comprimento da linha,  $D$ , através da seguinte fórmula:

$$\ell\% = \frac{\ell}{D} \cdot 100 \quad (3.27)$$

A fórmula 3.27 também pode ser representada da seguinte forma:

$$\ell\% = \frac{\bar{Z} \cdot \ell}{\bar{Z} \cdot \ell + \bar{Z} \cdot (D - \ell)} \cdot 100 \quad (3.28)$$

Após incluir  $\bar{Z} \cdot \ell$  e  $\bar{Z} \cdot (D - \ell)$  na equação (3.28), obtém-se a seguinte equação para a distância:

$$\ell = \frac{(\bar{V}_S^p - \bar{V}_R^p) \bar{I}_R^n - (\bar{V}_S^n - \bar{V}_R^n) \bar{I}_R^p}{(\bar{V}_S^p - \bar{V}_R^p)(\bar{I}_S^n + \bar{I}_R^n) - (\bar{V}_S^n - \bar{V}_R^n)(\bar{I}_S^p + \bar{I}_R^p)} \quad (3.29)$$

## 3.2 Métodos Baseados nas Ondas Viajantes

### 3.2.1 Método das ondas viajantes nos dois terminais

O método OV nos dois terminais utiliza medições de ambas as extremidades da linha para calcular a distância que ocorreu o defeito. Após a ocorrência da falha, são identificados os tempos de chegada das ondas refletidas no local de defeito em cada uma das extremidades da linha. Neste método, a sincronização entre os aparelhos de medição é extremamente importante, sendo fundamental que ambos utilizem a mesma referência temporal para minimizar os erros [15]. A sincronização é normalmente obtida através de relógios sincronizados por satélite ou através de um canal de fibra ótica ponto-a-ponto [28].

A figura 3.7 mostra o diagrama de *Bewley* que é amplamente usado para explicar o princípio do método OV nos dois terminais na localização de defeitos. No diagrama está representada uma linha de comprimento  $LL$ , onde ocorre um defeito  $F$  à distância  $M$  do terminal  $S$  e  $LL-M$  do terminal  $R$ . Os tempos de chegada das ondas aos terminais estão representados por  $t_s$  e  $t_r$ .

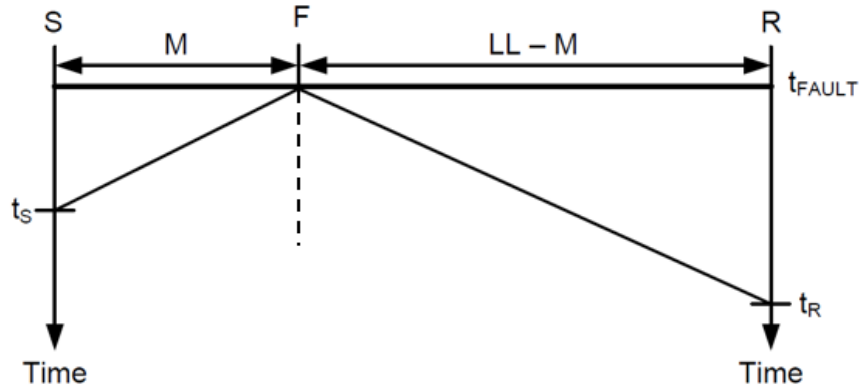


Figura 3.7: Diagrama de *Bewley* para o método OV nos dois terminais (adaptado de [28])

Através dos parâmetros distribuídos da linha é possível calcular a velocidade de propagação da onda ( $PV$ ), equação (2.13) e, sabendo o comprimento total da linha  $LL$ , consegue-se calcular o tempo de propagação das ondas viajantes ( $TWLPT$ ) através da equação (3.30).

$$TWLPT = \frac{LL}{PV} \quad (3.30)$$

O tempo da primeira onda a chegar ao terminal  $S$  é obtido por:

$$t_s = \frac{M}{PV} \quad (3.31)$$

O tempo da primeira onda a chegar ao terminal  $R$  é obtido por:

$$t_r = \frac{LL - M}{PV} \quad (3.32)$$

Resolvendo as equações 3.31 e 3.32 em ordem à distância  $M$ , e tendo em conta a velocidade de propagação, obtém-se a equação 3.33 para a distância do defeito.

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_s - t_r}{TWLPT}\right) \quad (3.33)$$

É de referir que após as medições, os dados recolhidos são submetidos a um filtro passa-alto, com o objetivo de eliminar as ondas provocadas pelas componentes harmónicas presentes na rede. Para simplificar a análise e tirando partido de relações específicas entre os parâmetros do sistema trifásico ou de relações específicas entre os sinais de fase, utiliza-se a transformada de *Clarke* para fazer a conversão do referencial natural (a,b,c) para o referencial estacionário (0, $\alpha$ , $\beta$ ) [10][28][15].

### 3.2.2 Método das ondas viajantes num só terminal

O método OV num só terminal utiliza apenas medidas de um terminal, pelo que não necessita de canais de comunicação nem de uma referência temporal comum, mas o princípio do método é um pouco mais complexo [29].

Este método baseia-se na diferença de tempo entre a chegada ao terminal da primeira onda pós defeito e a chegada da onda refletida no local onde ocorreu o defeito. A precisão deste método está relacionada com a correta identificação da onda que reflete no local de defeito, uma vez que podem surgir ondas refletidas pelo terminal oposto antes da chegada desta [29][10].

Na figura 3.8 observa-se que para o caso do defeito se localizar na primeira metade da linha ( $M < LL - M$ ) ou no centro linha ( $M = LL - M$ ) as ondas refletidas no terminal oposto não apresentam influência, enquanto que, quando o defeito se localiza na metade da linha mais distante do terminal onde são realizadas as medições ( $M > LL - M$ ), as reflexões das ondas na extremidade oposta chegam primeiro que a reflexão da onda no local de defeito, pelo que é necessário ter em atenção este cenário.

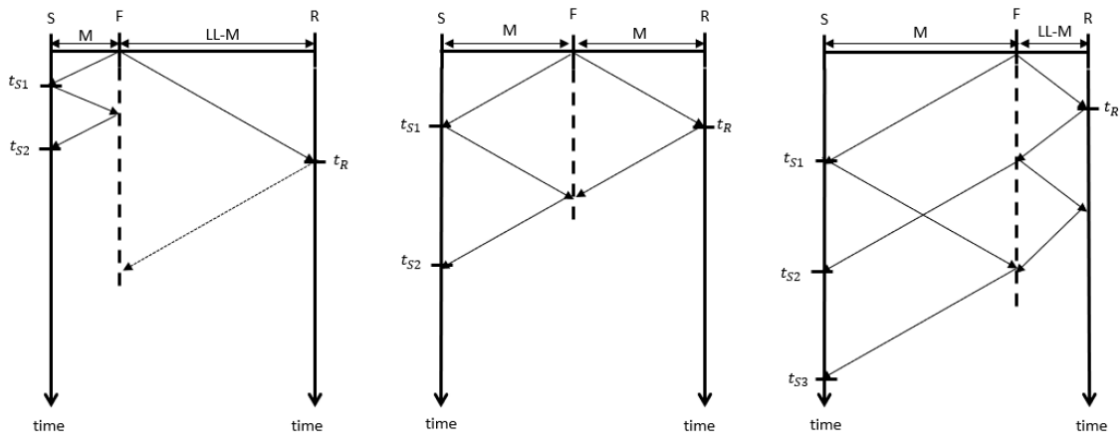


Figura 3.8: Diagrama de *Bewley* para o método OV num só terminal (adaptado de [10])

O cálculo da localização do defeito é semelhante ao do método OV nos dois terminais, através da equação (3.30) pode obter-se o tempo de propagação da onda viajante (TWLPT).

Quando a onda refletida no local de defeito é a segunda a chegar ao terminal, a distância é obtida através da equação

$$M = \frac{PV}{2} \cdot (t_{S1} - t_{S2}) \quad (3.34)$$

Por outro lado, quando  $M < (LL - M)$ , é necessário ter em conta as reflexões no terminal oposto como foi mencionado anteriormente e o local de defeito é obtido por:

$$M = LL - \frac{PV}{2} \cdot (t_{S1} - t_{S3}) \quad (3.35)$$

No método OV num só terminal, tal como aconteceu no método anterior, alguns passos intermédios são realizados de modo a facilitar a análise do método. Primeiramente é realizado desacoplamento do sistema trifásico, os sinais do domínio de fase são transformados em componentes modais através da transformada de *Karrenbauer*. Além disso, a transformada discreta da onda (DWT) é utilizada, pois a partir dos coeficientes de detalhe é possível identificar as amostras da chegada ao terminal e da reflexão do defeito. Por fim, através da polaridade da onda viajante, identifica-se em que metade da linha ocorreu o defeito, pois, a onda que reflete no terminal oposto apresenta uma polaridade contrária à onda que reflete no local do defeito [10] [30].



## CASOS DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Neste capítulo são identificadas as condições para as quais os métodos vão ser estudados e simulados de modo a aferir a sua precisão.

Todos os métodos analisados anteriormente foram implementados em *MATLAB* e foi utilizada uma ferramenta integrada do mesmo programa para implementar o modelo representativo de uma linha de transporte de energia para realizar as simulações.

Os métodos vão ser simulados e estudados para os seguintes três casos: linha simples, linhas em paralelo e linhas em T. Além disso, os resultados são ainda obtidos para três comprimentos de linha, 10km, 28km e 100km que podem ser considerados representativos de linhas curtas, linhas médias e linhas longas, respetivamente.

Para a realização das simulações, consideram-se que todas as linhas a operar com uma tensão de 150 kV e uma frequência de 50 Hz. Na tabela 4.1 são apresentados os parâmetros distribuídos utilizados em todas as linhas.

Tabela 4.1: Parâmetros distribuídos da linha

$R_1(\Omega/\text{km})$	$R_0(\Omega/\text{km})$	$L_1(\text{mH}/\text{km})$	$L_0(\text{mH}/\text{km})$	$C_1(\text{nF}/\text{km})$	$C_0(\text{nF}/\text{km})$
0,01273	0,3864	0,9337	4,1264	12,74	7,751

### 4.1 Linha Simples

Uma linha simples pode ser considerada como o caso mais simples para a simulação dos métodos, onde são encontrados menos obstáculos no estudo da

localização de defeitos.

Na figura 4.1 observa-se um esquema para uma linha simples de dupla geração, sendo que, os métodos também foram simulados para uma linha do tipo geração-carga, considerando uma carga de 50 MW numa das extremidades da linha.

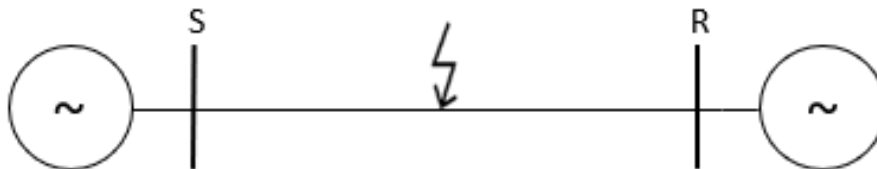


Figura 4.1: Esquema representativo de uma linha simples

## 4.2 Linhas em Paralelo

No caso de linhas em paralelo, o modelo utilizado é semelhante ao modelo usado anteriormente, diferindo apenas numa linha paralela que foi adicionada à linha já existente, como se apresenta na figura 4.2. Em todas as simulações ambas as linhas apresentam o mesmo comprimento e os mesmos parâmetros.

Da mesma forma que aconteceu para uma linha simples, também neste caso as simulações são realizadas para linhas de dupla geração e linhas geração-carga, substituindo o elemento ligado no terminal R por uma carga no valor de 50 MW.

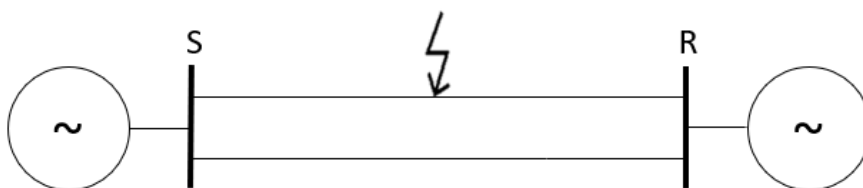


Figura 4.2: Esquema representativo de uma linhas em paralelo

## 4.3 Linhas em T

Por último, o caso de uma linha em T, que pode ser considerado mais complexo que os anteriores. Este cenário consiste em interligar uma linha no meio de uma linha simples, ficando este em forma de um T, tal como apresenta a figura 4.3.

Neste caso existem três troços onde o defeito pode ocorrer, troço 1 (S-T), troço 2 (T-R) e troço 3 (K-T), pelo que é necessária a existência de um relé em cada

um dos terminais, pois neste tipo de linha com medições de apenas um terminal é impossível saber em que trecho ocorreu o defeito e como tal, a distância deste. Posto isto, apenas se realizaram simulações para o método OV dois terminais.

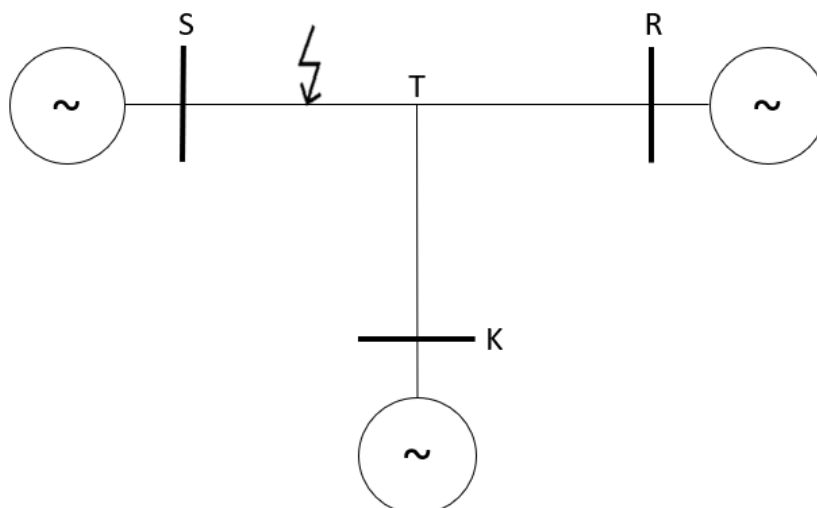


Figura 4.3: Esquema representativo de uma linha em T

Na categoria dos métodos baseados na impedância, apenas o método de *Girgis* se mostra aplicável a linhas de três terminais pelo que apenas se realizam simulações para este método.

## 4.4 Influência da ação do disjuntor

Os disjuntores são elementos fundamentais para o bom funcionamento da rede elétrica pelas várias razões já mencionadas na secção 2.4.

A deteção de um defeito exige o imediato disparo do disjuntor, de forma a efetuar o corte da corrente para minimizar as consequências provenientes das altas magnitudes desta.

Nos métodos baseados na impedância, quanto maior a distância temporal desde o início do defeito até ao ponto de utilizado pelos algoritmos para obter o local de defeito, maior a precisão apresentada pelos métodos, dado que o sinal se encontra mais "limpo", com menos harmónicas. No entanto, como se requer a rápida ação do disjuntor os dados recolhidos ainda têm presentes componentes harmónicas que afetam as características do sinal, pelo que a precisão dos métodos pode ser afetada. Portanto, vai verificar-se até que ponto o tempo utilizado para o disjuntor reagir tem influência nos resultados.

Nas simulações realizadas, o defeito do tipo DFT acontece aos 0,1s e a abertura do disjuntor aos 0,2s. Este intervalo entre o início do defeito e a ação do disjuntor corresponde aos tempos habituais de reação e seletividade.

Na figura 4.4 observa-se o andamento temporal da corrente e da tensão para uma linha simples de dupla-geração, sem atuação do disjuntor. A simulação foi realizada com um defeito do tipo DFT a uma distância de 40 km do terminal S com uma resistência de  $30\Omega$ . De notar, que o defeito ocorre aos 0,1s da simulação e dado que o disjuntor não atua, a corrente continua com valores elevados durante toda a simulação.

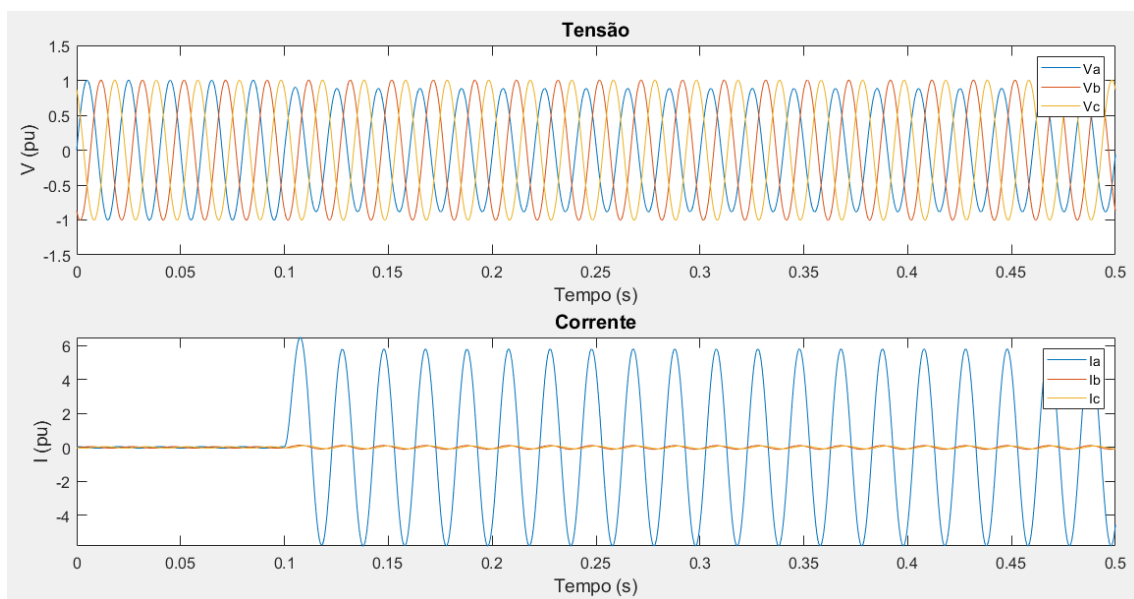


Figura 4.4: Andamento temporal da tensão e corrente sem ação do disjuntor

Ao aplicar o algoritmo do método impedância dois terminais aos valores de tensão e corrente da figura 4.4 obtém-se o resultado apresentado na figura 4.5. Observa-se que a partir do instante em que ocorreu o defeito, os valores obtidos para a distância começam a aproximar-se dos 40km. Não é de todo perceptível pela imagem, mas à medida que se avança no tempo, a linha aproxima-se cada vez mais da distância exata, até que em determinado momento o valor estabiliza. No instante 0,4s, como está assinalado no gráfico, é o valor utilizado para obter os resultados nas simulações sem disjuntor.

Em contrapartida quando o disjuntor é incluído na simulação, a forma de analisar sofre algumas alterações. Na figura 4.6 observa-se o andamento temporal da tensão e corrente, com as mesmas condições que foram mencionadas anteriormente.

Neste caso, é de notar que 0,1s após a ocorrência do defeito verifica-se a interrupção da tensão e da corrente.

#### 4.4. INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO DISJUNTOR

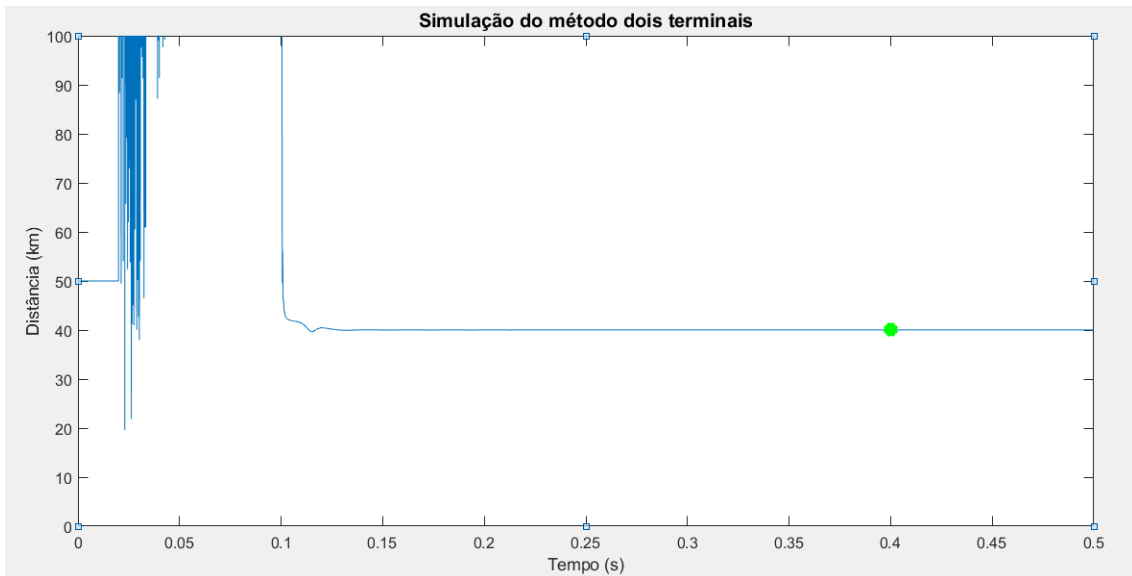


Figura 4.5: Resultado da aplicação do método impedância dois terminais sem ação do disjuntor

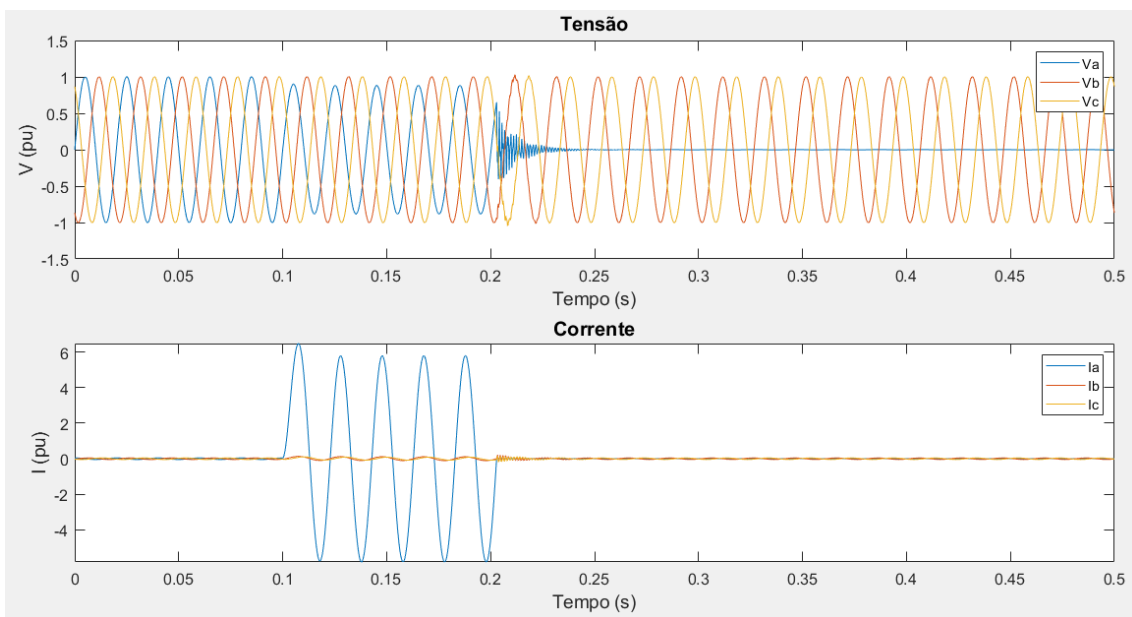


Figura 4.6: Andamento temporal da tensão e corrente com ação do disjuntor

Na figura 4.7 é apresentado o resultado para o método impedância dois terminais com os dados observados anteriormente. Aos 0,2s verifica-se que após a abertura do disjuntor os resultados do algoritmo sofrem oscilações significativas, pelo que o espaço temporal utilizado para a análise do algoritmo fica reduzido dos 0,1s ao 0,2s. Visto isto, conclui-se que quando a simulação tem presente o disjuntor, a estimativa do local do defeito sofre uma redução de tempo e o sinal ainda apresenta componentes harmónicas, pelo que os resultados podem ser afetados. Para obter a distância nas simulações com disjuntor, utilizou-se o ponto imediatamente antes da abertura deste, como está marcado na figura, pois é o que apresenta o resultado mais preciso.

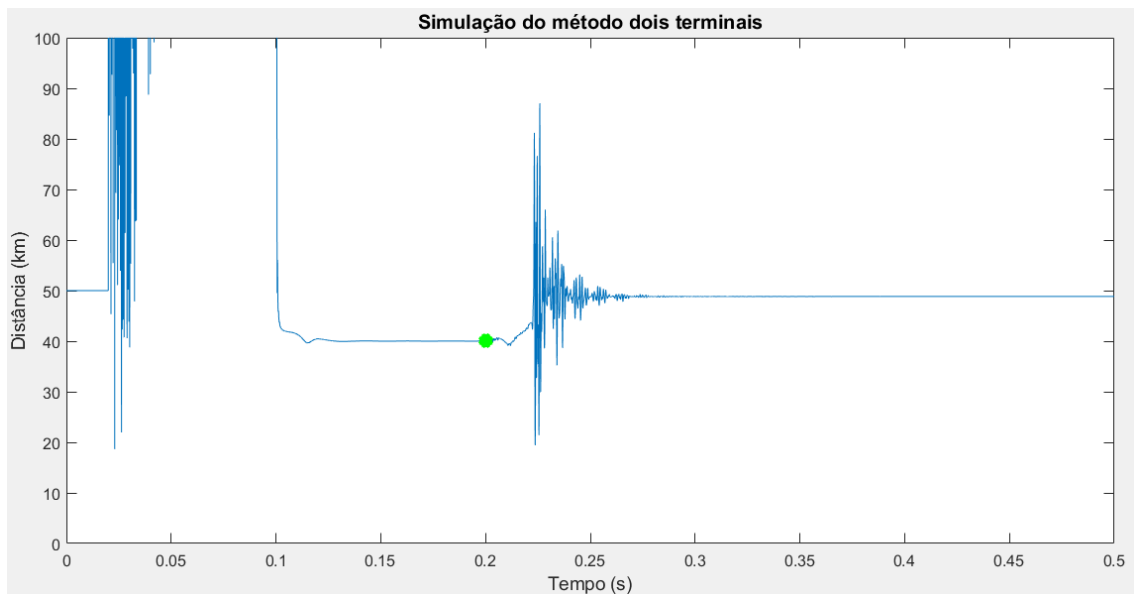


Figura 4.7: Resultado da aplicação do método impedância dois terminais com ação do disjuntor

Para compreender melhor os resultados obtidos em alguns dos estudos realizados é usado, como forma de comparação o erro relativo ao local de acordo com a equação (4.1).

$$\text{Erro relativo ao local(\%)} = \frac{|\text{Local estimado} - \text{Local exato do defeito}|}{|\text{Local exato do defeito}|} \cdot 100 \quad (4.1)$$

## RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos vários estudos realizados por forma a aferir o desempenho de cada método. Nas primeiras simulações vai avaliar-se a influência do disjuntor e influência da resistência de defeito na precisão dos métodos baseados na impedância. Por fim, a influência da frequência de amostragem nos métodos baseados em ondas viajantes.

### 5.1 Influência da ação do disjuntor

Nesta secção, analisa-se a influência da ação do disjuntor para os vários métodos baseados na impedância, como foi descrito na secção 4.4. Este estudo destina-se a verificar até que ponto a rápida ação do disjuntor e a consequente diminuição de dados a analisar pelo algoritmo, influência ou não, o cálculo da distância do defeito.

Os métodos são simulados para linha simples, linhas em paralelo e linhas em T, com os comprimentos de 10km, 28km e 100km, que correspondem a uma linha curta, média e longa, respetivamente. O defeito utilizado nas simulações foi do tipo DFT com uma resistência de defeito de  $30\Omega$ .

Os resultados para linha simples são apresentados nas próximas tabelas, 5.1 a 5.6, enquanto que os dados para linhas em paralelo e linhas em T, encontram-se em anexo I.

### 5.1.1 Linhas Curtas

Nas tabelas 5.1 e 5.2 apresentam-se os resultados para a influência do disjuntor em linhas curtas, com os defeitos localizados nas distâncias: 2km, 4km, 6km, 8km.

Tabela 5.1: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-geração de 10km

Linha Simples Geração-Geração								
Comprimento (km)	10							
Local de defeito (km)	2		4		6		8	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	1,832	1,787	3,928	3,874	6,104	6,037	8,442	8,357
Método dois terminais	2,000	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	7,999
Método de <i>Girgis</i>	2,000	2,000	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000
Método de <i>Radojevic</i>	2,001	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000

Tabela 5.2: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-carga de 10km

Linha Simples Geração-Carga								
Comprimento (km)	10							
Local de defeito (km)	2		4		6		8	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	2,664	2,664	4,794	4,794	6,924	6,924	9,054	9,054
Método dois terminais	2,001	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	7,999	7,999
Método de <i>Girgis</i>	2,001	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000
Método de <i>Radojevic</i>	2,000	2,000	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000

Numa linha simples de dupla geração, tabela 5.1, verifica-se que na maioria das situações os resultados são iguais com a utilização ou não do disjuntor. O método de *Takagi* é o único onde se faz notar uma queda na precisão, por exemplo para as distâncias 2km e 4km. Nas distâncias de defeito 6km e 8km os resultados vão contra o esperado, pois o método apresenta melhores resultados com disjuntor.

Na tabela 5.2 observa-se que numa linha simples geração-carga, a ação do disjuntor não tem influência nos resultados.

### 5.1.2 Linha Média

Nas tabelas 5.3 e 5.4 observa-se os resultados para a influência do disjuntor numa linha média, com os defeitos localizados nas distâncias: 6km, 11km, 17km, 22km.

A partir dos dados da tabela 5.3 verifica-se uma diminuição da precisão quando a ação do disjuntor é contabilizada nas simulações, embora se mantenham bastante precisos, a diferença entre a distância calculada com e sem disjuntor não vai além de 1/2 metros, exceto para o método de *Takagi* onde se observa uma diferença maior.



## 5.1. INFLUÊNCIA DA AÇÃO DO DISJUNTOR

Tabela 5.3: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-geração de 28km

Linha Simples Geração-Geração								
Comprimento (km)	28							
Local de defeito (km)	6		11		17		22	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	5,585	5,559	10,782	10,749	17,389	17,339	23,817	23,739
Método dois terminais	6,002	6,004	11,001	11,002	16,999	16,998	21,998	21,995
Método de <i>Girgis</i>	6,002	6,002	11,001	11,001	16,999	16,999	21,998	21,998
Método de <i>Radojevic</i>	6,002	6,001	11,002	11,003	16,999	16,999	21,002	22,000

Tabela 5.4: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-carga de 28km

Linha Simples Geração-Carga								
Comprimento (km)	28							
Local de defeito (km)	6		11		17		22	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	6,914	6,914	12,236	12,236	18,627	18,627	23,956	23,956
Método dois terminais	6,006	6,006	11,003	11,003	16,999	16,999	21,994	21,994
Método de <i>Girgis</i>	6,007	6,007	11,005	11,005	17,000	17,000	21,996	21,996
Método de <i>Radojevic</i>	6,000	6,000	11,000	11,000	17,000	17,000	21,997	21,997

Por outro lado, em linhas de geração-carga, tabela:5.4, os resultados mostram que a ação do disjuntor não apresenta influência na precisão dos métodos.

### 5.1.3 Linha Longa

Por fim, são apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 os resultados para a influência do disjuntor numa linha de grandes dimensões com os defeitos localizados nas distâncias: 20km, 40km, 60km, 80km.

Tabela 5.5: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-geração de 100km

Linha Simples Geração-Geração								
Comprimento (km)	100							
Local de defeito (km)	20		40		60		80	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	19,667	19,663	39,856	39,844	60,479	60,450	83,370	83,282
Método dois terminais	20,043	20,056	40,017	40,022	59,983	59,978	79,958	79,944
Método de <i>Girgis</i>	20,044	20,046	40,021	40,021	59,979	59,979	79,956	79,955
Método de <i>Radojevic</i>	20,134	20,148	40,028	40,033	59,988	59,984	80,019	80,007

Na tabela 5.5 observa-se que os dados calculados sem disjuntor apresentam uma maior precisão, quer isto dizer que a distância sem ação do disjuntor é mais próxima do local exato do defeito, exceto no método de *Takagi* para a distância de 60km e 80km.

De notar, que uma vez mais para linhas do tipo geração-carga, tabela 5.6, a utilização ou não do disjuntor não mostrou diferença nos resultados.

Tabela 5.6: Resultados da influência do disjuntor para uma linha simples geração-carga de 100km

Linha Simples Geração-Carga								
Comprimento (km)	100							
Local de defeito (km)	20		40		60		80	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de <i>Takagi</i>	21,710	21,710	42,974	42,974	64,310	64,310	85,740	85,740
Método dois terminais	20,135	20,135	40,091	40,091	59,993	59,993	79,858	79,858
Método de <i>Girgis</i>	20,173	20,173	40,150	40,150	60,031	60,031	79,861	79,861
Método de <i>Radojevic</i>	19,990	19,990	40,003	40,003	59,981	59,981	79,865	79,865

### 5.1.4 Discussão

Após a realização das simulações para verificar a influência da ação do disjuntor nos métodos em estudo, conclui-se que no caso de uma linha simples do tipo geração-carga, independentemente do comprimento de linha, os resultados não sofrem qualquer alteração, com ou sem disjuntor.

Numa linha simples de dupla geração, a ação do disjuntor já se faz notar nos resultados, principalmente em linhas de grandes dimensões, na tabela 5.5 observa-se que os resultados com disjuntor apresentam uma diferença ao valor real superior quando comparados com os resultados sem disjuntor. Conclui-se que com o aumento do comprimento de linha a precisão dos métodos diminui e a diferença entre a distância obtida com e sem disjuntor aumenta. Apesar desta diminuição, o método impedância dois terminais, método de *Girgis* e o método de *Radojevic* apresentam uma precisão bastante aceitável.

Os resultados para as linhas em paralelo presentes no anexo I.1, mostram-se idênticos aos verificados para linhas simples. De referir que, o método de *Takagi* no geral apresenta uma precisão maior em comparação aos resultados obtidos para linhas simples.

No anexo I.2 estão presentes as tabelas com os resultados para as linhas de três terminais. Em linhas do tipo geração-geração-carga, quando o terminal K (carga) é considerado para as medições os resultados são semelhantes ao obtidos para uma linha simples do tipo geração-carga, pois os resultados mostram-se iguais, com ou sem disjuntor. No geral, o método de *Girgis* para linhas em T, mostra-se insensível à ação do disjuntor.

Em resumo, conclui-se que o disjuntor não apresenta uma influência significativa no resultado dos métodos pelo que nos próximos estudos apenas se vai realizar simulações com a inclusão da ação disjuntor.

## 5.2 Influência da resistência de defeito

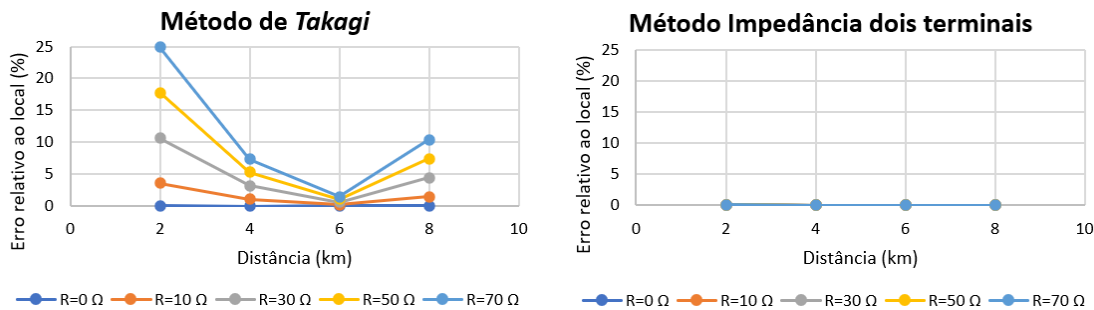
Nesta secção é analisada a influência da resistência de defeito nos métodos baseados na impedância, pois nos métodos baseados em ondas viajantes os resultados não são afetados, como mostra os resultados em [31].

O estudo é realizado para linhas simples, linhas em paralelo e linhas em T, para os comprimentos de 10km, 28km, 100km. Vai utilizar-se um defeito do tipo DFT com os seguintes valores de resistência:  $0\Omega$ ,  $10\Omega$ ,  $30\Omega$ ,  $50\Omega$ ,  $70\Omega$ . De referir ainda que as simulações vão ser feitas para linhas de geração dupla e geração-carga.

Os dados para linhas em paralelo e linhas de três terminais, são apresentados no anexo II.

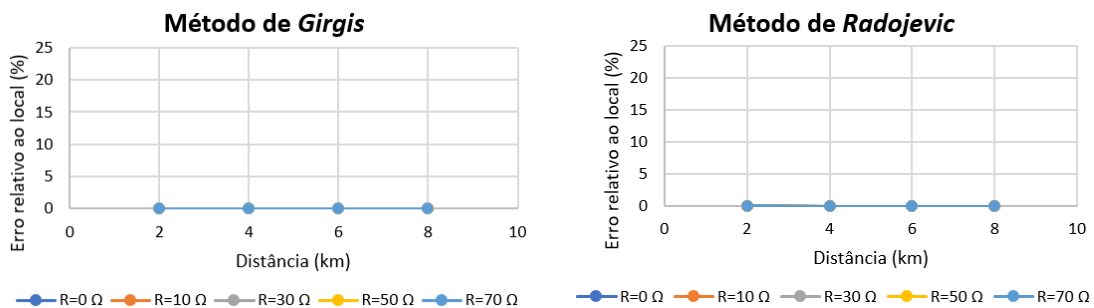
### 5.2.1 Linha Curta

Nas figuras 5.1 e 5.2 observa-se a variação do erro relativo ao local em função da distância, para os vários valores de resistência de defeito numa linha de curta dimensão.



(a) Resultados para o método de *Takagi*

(b) Resultados para o método impedância dois terminais



(c) Resultados para o método de *Girgis*

(d) Resultados para o método de *Radojevic*

Figura 5.1: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 10km

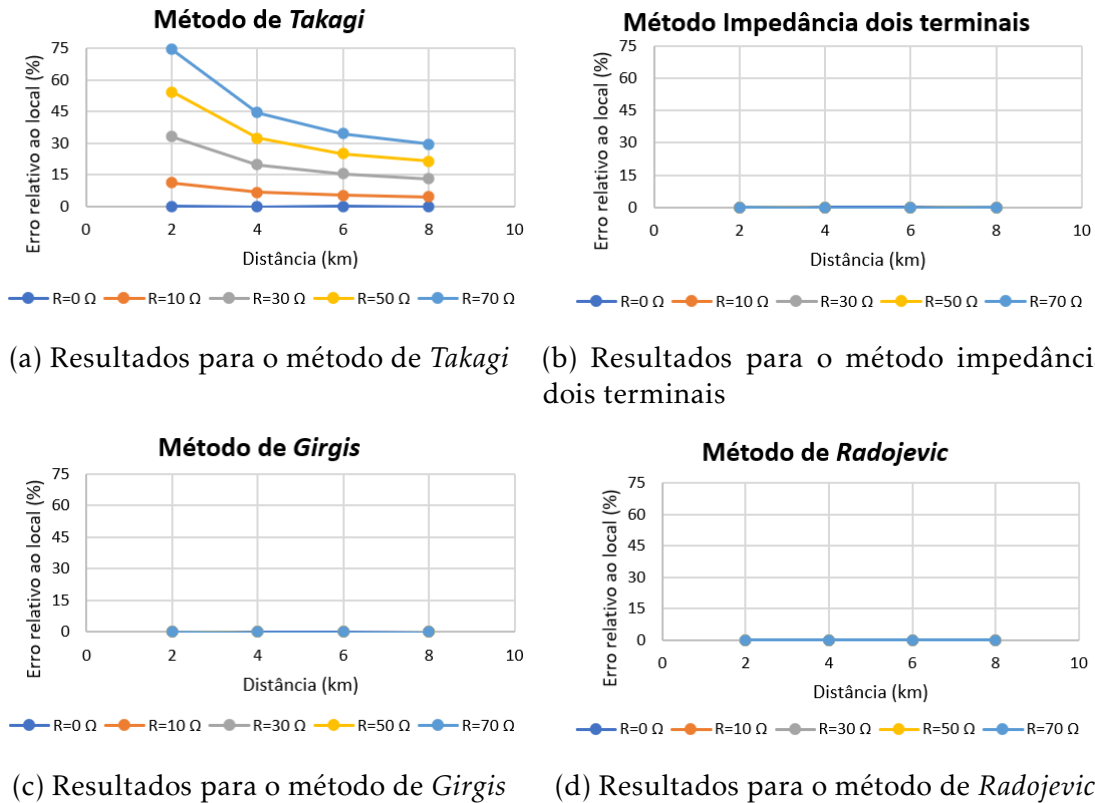


Figura 5.2: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 10km

No método de *Takagi* é bem visível a influência que a resistência de defeito apresenta nos resultados, nomeadamente em distâncias próximas do local onde são realizadas as medições, tanto em linhas de dupla geração como em linhas geração-carga.

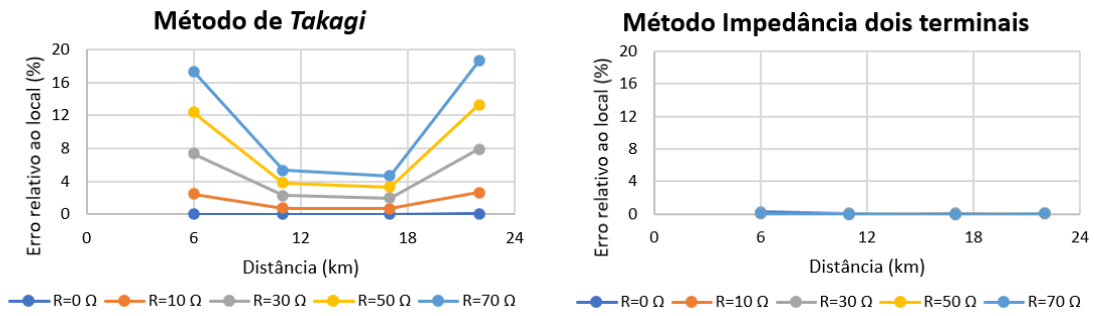
Nos outros métodos as alterações não são significativas, pelo que se conclui que os métodos são insensíveis a variações da resistência de defeito.

### 5.2.2 Linha Média

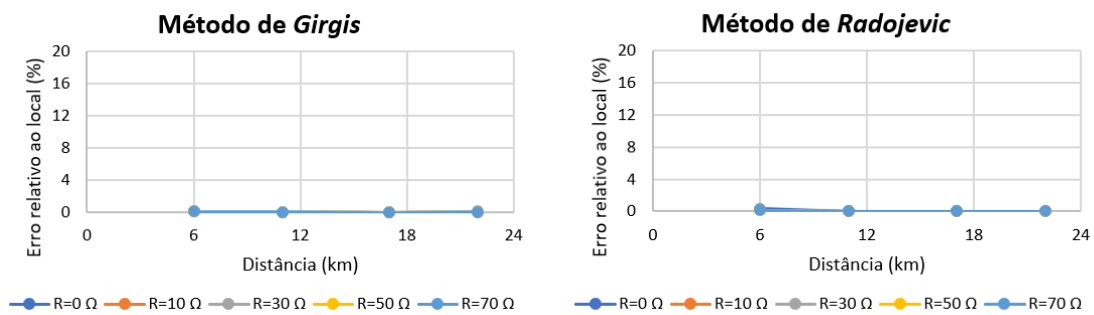
Nos gráficos das figuras 5.3 e 5.4 são apresentados os resultados para a influência da resistência de defeito, numa linha média.

No método de *Takagi* volta a verificar-se que a resistência de defeito apresenta grande influência nos resultados, quer em linhas de dupla geração como em linhas de geração-carga. De notar que, em linhas de geração-geração a resistência de defeito mostra maior influência em distâncias próximas das extremidades da linha.

Nos outros métodos em análise, verifica-se que a resistência de defeito não influencia os resultados.



(a) Resultados para o método de *Takagi* (b) Resultados para o método impedância dois terminais



(c) Resultados para o método de *Girgis* (d) Resultados para o método de *Radojevic*

Figura 5.3: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 28km

### 5.2.3 Linha Longa

Por fim, nas figuras 5.5 e 5.6 observa-se os resultados para linhas de grandes dimensões, para os diversos valores de resistência de defeito.

Em linhas longas verifica-se que o método de *Takagi* volta a mostrar um aumento do erro relativo ao local com o aumento da resistência.

Nos outros métodos em análise observa-se uma pequena variação na distância de 20km, que pode estar relacionada com as grandes dimensões da linha e não com a resistência de defeito.

### 5.2.4 Discussão

Após analisar os resultados sobre a influência da resistência de defeito nos métodos baseados na impedância, conclui-se que o método de *Takagi* é o mais afetado pela resistência, portanto, confirma-se o esperado, os métodos baseados em dados de apenas um terminal são mais sensíveis à resistência de defeito. A partir das simulações pode-se concluir que linhas do tipo geração-geração apresentam um erro menor em relação às linhas do tipo geração-carga, por exemplo,

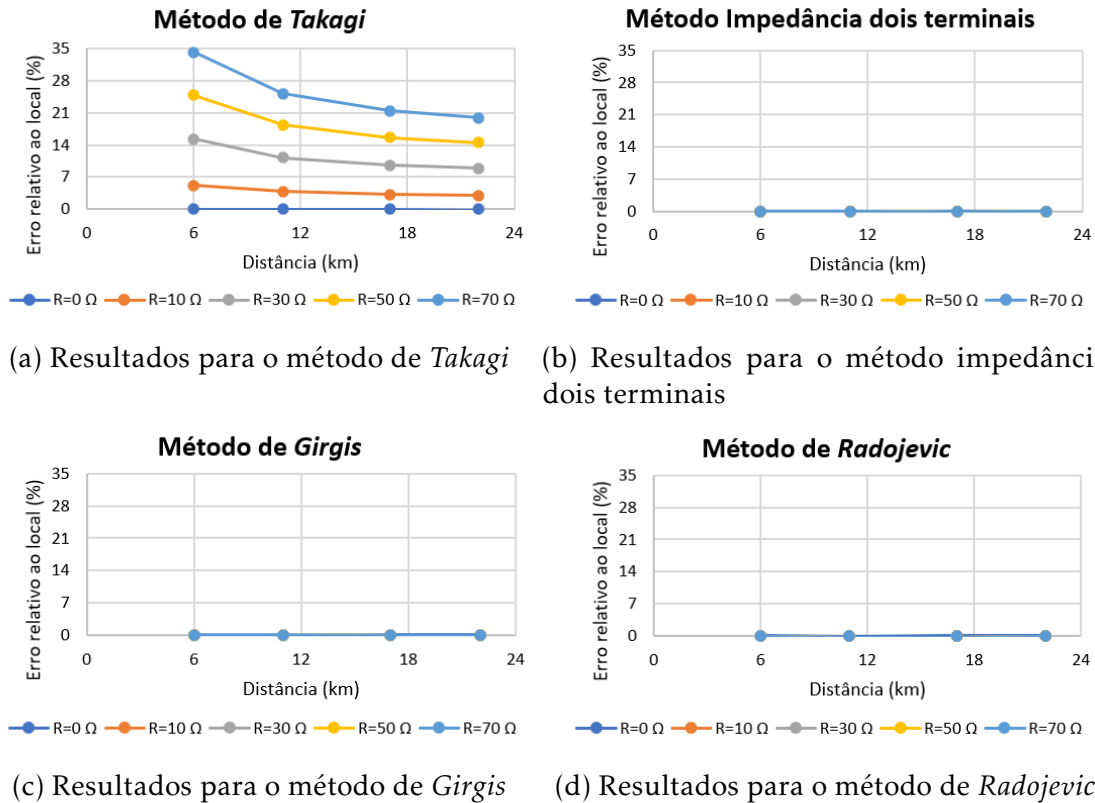


Figura 5.4: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 28km

para a distância de 28km, o erro relativo ao local para linhas de dupla geração apresenta valores máximos próximos do 20% enquanto para linhas de geração-carga o valor máximo é próximo de 35%. Ainda no método de Takagi verifica-se que com o aumento do comprimento de linha o erro relativo ao local diminui, por exemplo em linhas de dupla geração, para a distância de 10km têm-se erros de 25% enquanto que para linhas de 100km o erro relativo é no máximo 10%. Notar ainda que o método de Takagi para uma resistência de defeito de  $0\Omega$  apresenta resultados bastante precisos, pelo que se pode afirmar que o erro observado no estudo anterior por este método, está relacionado com o valor de resistência de defeito utilizado na simulação.

Já o método impedância dois terminais, método de Girgis e o método de Radojevic mostram ser insensíveis à resistência de defeito, pelo que se confirma que uma das principais vantagens de utilizar medidas de ambos os terminais é uma diminuição dos efeitos da resistência.

Nas linhas em paralelo os resultados no anexo II.1 mostram-se semelhantes aos observados para linhas simples. O método de Takagi é novamente o mais afetado e as linhas do tipo geração-carga voltam a mostrar um erro superior às linhas

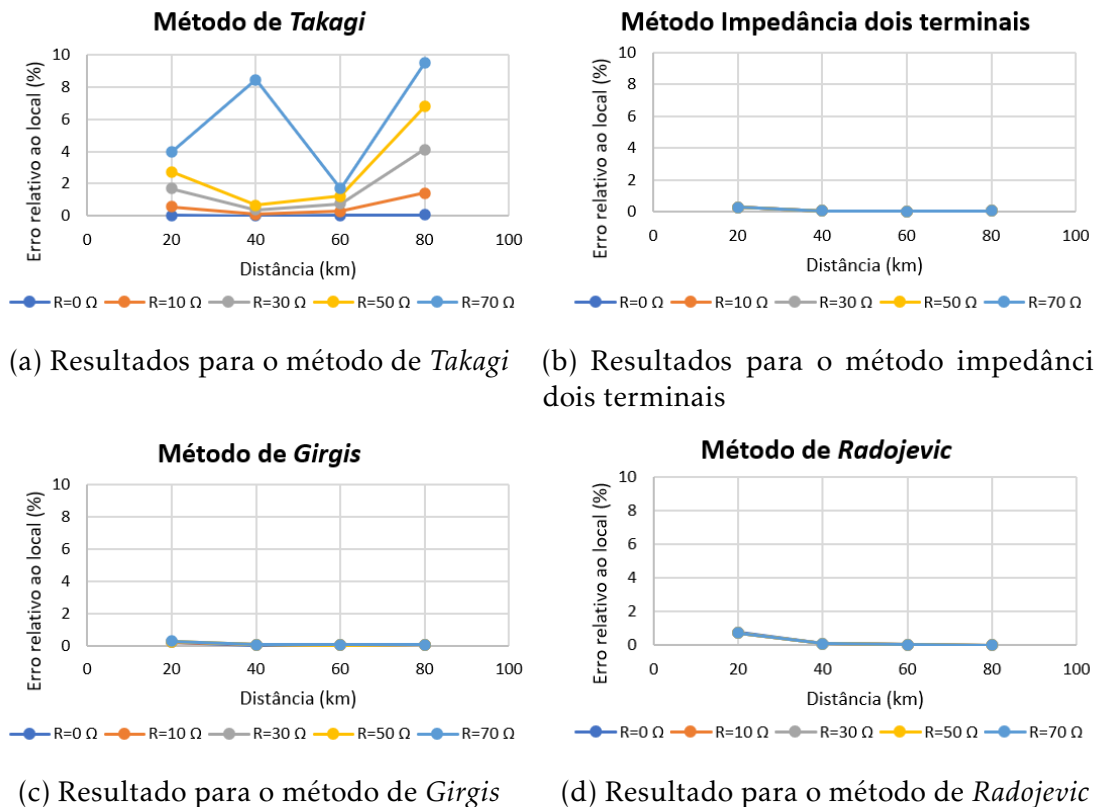


Figura 5.5: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-geração de 100km

geração-geração. Os métodos baseados em medidas de dois terminais mostram-se insensíveis à variação da resistência.

Nas linhas com três terminais apenas o método de Girgis se aplica e os resultados presentes em II.2 são idênticos aos observados nos outros tipos de linha. O método mostra-se insensível à resistência de defeito, as variações apresentadas nos gráficos são mínimas.

### 5.3 Influência da frequência de amostragem

Os métodos para localização de defeitos podem muitas vezes ver a sua precisão influenciada pela frequência de amostragem, nomeadamente os métodos baseados em OV, desse modo, nesta secção verifica-se a precisão dos métodos para vários valores de frequência. Para realizar este estudo são utilizados três comprimentos de linha, 10km, 28km e 100km que correspondem a uma linha curta, linha média e linha longa, respetivamente. Para os três comprimentos, o estudo é realizado para linha simples, linhas em paralelo e linhas em T, com dupla geração e geração-carga.

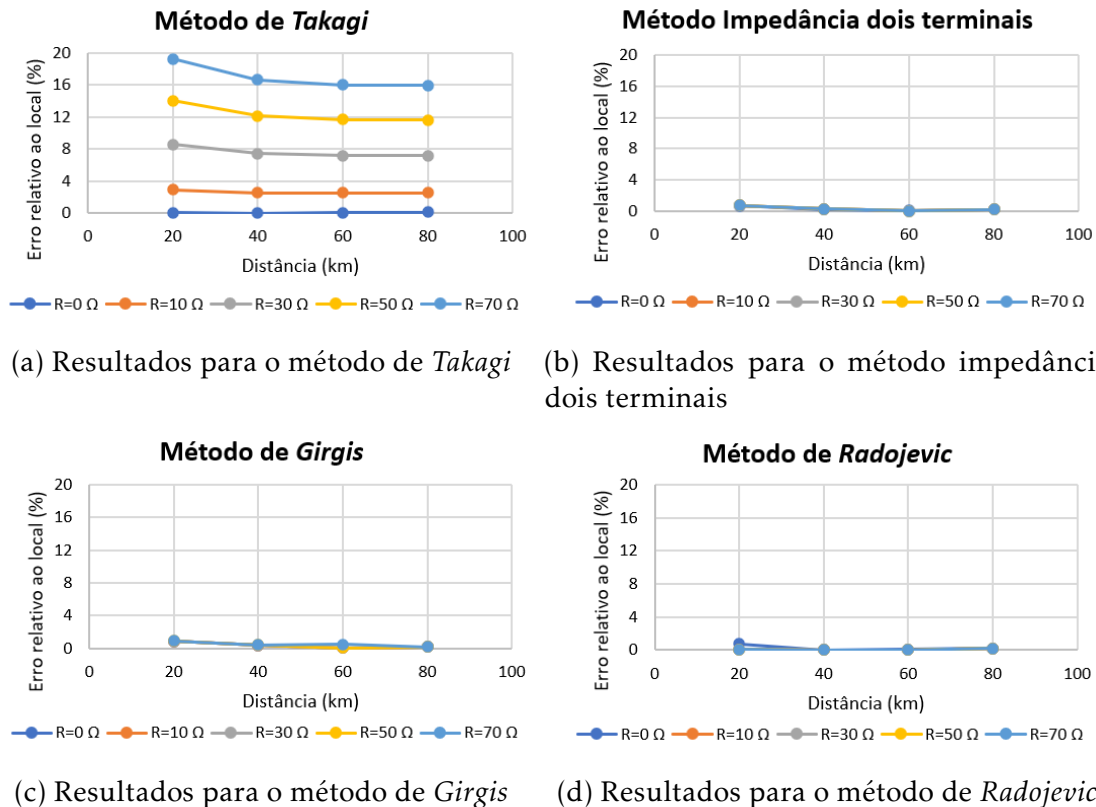


Figura 5.6: Resultados da variação da resistência de defeito para uma linha simples geração-carga de 100km

Nas simulações foi utilizado um defeito do tipo DFT, com uma resistência de defeito de  $30\Omega$ , que corresponde ao valor médio das resistências de defeitos ocorridas em linhas de 150 kV de acordo com [32].

A frequência de amostragem não altera os resultados para os métodos baseados na impedância pelo que apenas foram simulados para um único valor de frequência de amostragem de 50kHz.

### 5.3.1 Linhas Curtas

Nas próximas tabelas são apresentados os resultados para o estudo da influência da frequência de amostragem em linhas curtas, com defeitos nas distâncias, 2km, 4km, 6km e 8km.

Na tabela 5.7 verifica-se a influência da frequência de amostragem numa linha simples de dupla geração. Para frequências superiores a 5 MHz, o método OV num só terminal mostra-se bastante competitivo com os métodos baseados na impedância, nomeadamente o método impedância dois terminais, método de *Girgis* e o método de *Radojevic*. Por outro lado, o método OV dois terminais apresenta



Tabela 5.7: Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 10km

		Linha Simples Geração-Geração				
		Comprimento (km)	10			
		Local de defeito (km)	2,000	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		1,787	3,874	6,037	8,357
	Método dois terminais		2,001	4,000	6,000	7,999
	Método de <i>Girgis</i>		2,000	4,000	6,000	8,000
	Método de <i>Radojevic</i>		2,001	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,5 MHz)		1,921	3,911	5,941	7,910
	Um terminal (1 MHz)		2,030	4,059	5,941	7,970
	Um terminal (3 MHz)		2,005	4,011	5,992	7,970
	Um terminal (5 MHz)		2,001	4,001	5,999	7,999
	Um terminal (10 MHz)		2,001	4,001	5,999	7,999
	Dois terminais (0,5 MHz)		0,941	2,391	7,610	9,059
	Dois terminais (1 MHz)		0,796	2,246	7,756	9,204
	Dois terminais (3 MHz)		0,748	2,149	7,851	9,253
	Dois terminais (5 MHz)		0,767	2,159	7,841	9,233
	Dois terminais (10 MHz)		0,738	2,144	7,856	9,262

uma grande discrepância entre os valores obtidos e os valores exatos, independentemente do valor de frequência utilizado.

Em resumo, no gráfico 5.7 observar-se o erro relativo ao local do método OV num só terminal comparado com os métodos baseados na impedância, embora superior em algumas distâncias, a diferença entre a percentagem de erro é mínima.

De acordo com a tabela 5.8 o método OV dois terminais volta a manifestar resultados bastante distantes dos valores exatos, revelando-se assim bastante impreciso para linhas simples de pequenas dimensões. No método OV num só terminal verifica-se que com o aumento da frequência de amostragem os resultados apresentam um aumento na precisão. Para valores de 10MHz o método já apresenta resultados bastante próximos da distância exata do defeito.

O gráfico 5.8 apresenta o erro relativo ao local em função da distância entre os métodos que se mostram mais precisos na tabela 5.8, como mencionado anteriormente verifica-se que o método OV num só terminal para frequências de amostragem elevadas é tão preciso quanto os métodos baseados na impedância.

Nas próximas tabelas são apresentados os dados para linhas em paralelo, primeiramente para linhas de dupla geração e depois para linhas do tipo geração-carga.

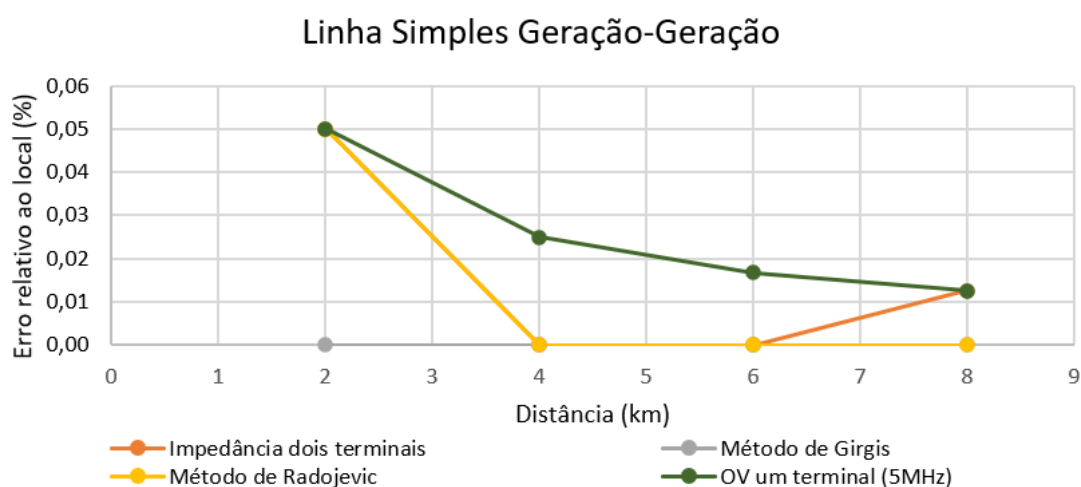


Figura 5.7: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 10km

Tabela 5.8: Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 10km

<b>Linha Simples Geração-Carga</b>					
<b>Comprimento (km)</b>		<b>10</b>			
<b>Local de defeito (km)</b>		<b>2,000</b>	<b>4,000</b>	<b>6,000</b>	<b>8,000</b>
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	2,664	4,794	6,924	9,054
	Método dois terminais	2,001	4,000	6,000	7,999
	Método de <i>Girgis</i>	2,001	4,000	6,000	8,000
	Método de <i>Radojevic</i>	2,000	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,5 MHz)	1,921	3,911	5,941	7,910
	Um terminal (1 MHz)	2,030	4,059	6,088	7,970
	Um terminal (3 MHz)	2,030	4,011	5,989	7,970
	Um terminal (5 MHz)	2,015	4,001	6,002	8,002
	Um terminal (10 MHz)	2,001	4,001	5,999	7,999
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Dois terminais (0,5 MHz)	4,130	7,030	9,059	11,669
	Dois terminais (1 MHz)	3,985	7,175	9,204	11,959
	Dois terminais (3 MHz)	3,985	7,126	9,156	11,910
	Dois terminais (5 MHz)	4,014	7,175	9,204	11,929

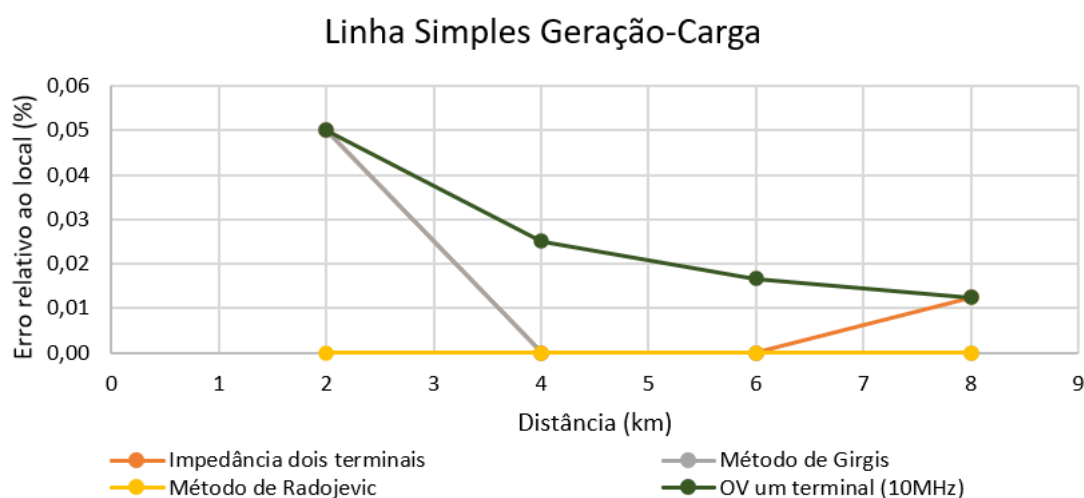


Figura 5.8: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 10km

Tabela 5.9: Resultados influência da frequência de amostragem para uma linha em paralelo geração-geração de 10km

		<b>Linha em Paralelo Geração-Geração</b>			
		<b>Comprimento (km) 10</b>			
		<b>Local de defeito (km)</b>			
		<b>2,000</b>	<b>4,000</b>	<b>6,000</b>	<b>8,000</b>
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	1,988	3,976	5,953	7,889
	Método dois terminais	2,000	4,000	6,000	8,000
	Método de <i>Girgis</i>	2,000	4,000	6,000	8,000
	Método de <i>Radojevic</i>	2,001	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,5 MHz)	1,592	4,781	5,641	6,811
	Um terminal (1 MHz)	2,027	3,911	6,176	7,970
	Um terminal (3 MHz)	1,978	4,008	6,086	8,067
	Um terminal (5 MHz)	1,998	4,008	5,999	7,999
	Um terminal (10 MHz)	2,001	4,001	5,999	7,999
	Dois terminais (0,5 MHz)	2,101	3,840	6,160	7,899
	Dois terminais (1 MHz)	1,956	3,985	6,015	8,044
	Dois terminais (3 MHz)	2,004	3,985	6,015	7,996
	Dois terminais (5 MHz)	2,004	3,985	6,015	7,996
	Dois terminais (10 MHz)	1,999	4,000	6,000	8,001

A partir dos dados da tabela 5.9 observa-se que em ambos os métodos baseados em ondas viajantes o aumento da frequência de amostragem leva ao aumento de precisão. Para frequências na ordem dos 3MHz ou 5 MHz os resultados são idênticos aos obtidos pelo método de *Takagi*, no entanto, para obter dados semelhantes ao método impedância dois terminais, método de *Girgis* e o método de *Radojevic* são necessárias frequências de 10MHz.

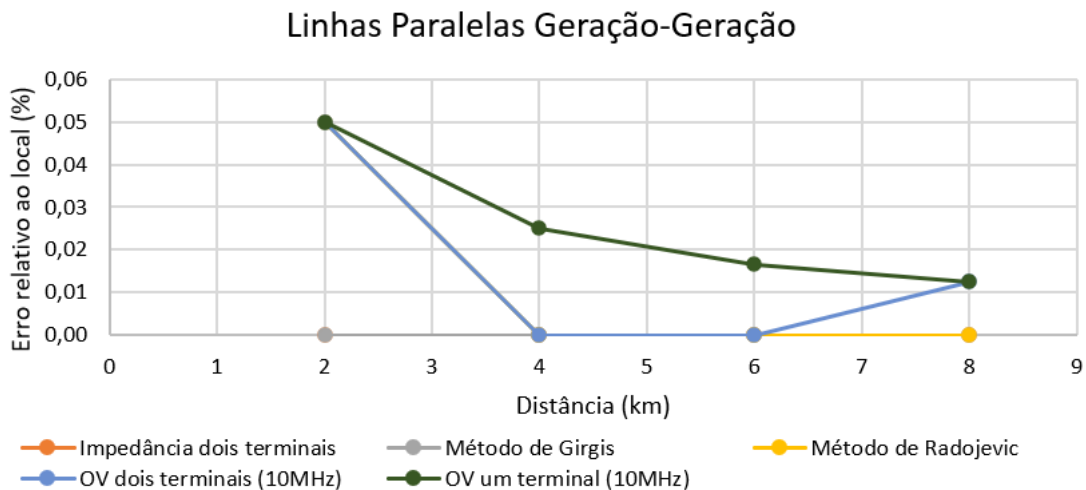


Figura 5.9: Comparação do erro relativo ao local para uma linha em paralelo geração-geração de 10km

Em resumo, no gráfico 5.9 confirma-se que para frequências de 10MHz o erro relativo ao local é próximo do erro apresentado pelos métodos baseados na impedância citados anteriormente.

Na tabela 5.10 estão presentes os dados para uma linha em paralelo do tipo geração-carga. Nos métodos OV num só terminal e OV dois terminais volta a verificar-se um aumento da precisão com o aumento da frequência de amostragem. Para frequências de 10MHz, os valores alcançados nas simulações são muito próximos dos valores dos métodos baseados em impedância, exceto para o método de *Takagi*, que volta a apresentar distâncias distantes do valor exato.

No gráfico 5.10 observa-se que para frequências de 10MHz o método OV dois terminais apresenta um erro relativo ao local igual ao método impedância dois terminais e o método de *Girgis*.

Nas tabelas 5.11 e 5.12 são apresentados os resultados para linha com três terminais. Neste caso, apenas o método de *Girgis* e o método OV dois terminais se mostram aplicáveis a esta tipo de linha.

Ao observar os resultados das tabelas conclui-se que o método de *Girgis* se mostra muito preciso, em ambas as situações. Por outro lado, o método de OV

### 5.3. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Tabela 5.10: Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha em paralelo geração-carga de 10km

		Linha em Paralelo Geração-Carga			
		Comprimento (km)			
		10			
		Local de defeito (km)			
		2,000	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	2,377	4,527	6,754	9,113
	Método dois terminais	2,001	4,000	6,000	7,999
	Método de <i>Girgis</i>	2,001	4,000	6,000	7,999
	Método de <i>Radojevic</i>	2,000	4,000	6,000	8,000
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,5 MHz)	1,592	4,781	5,651	6,231
	Um terminal (1 MHz)	1,592	3,911	5,941	7,970
	Um terminal (3 MHz)	2,051	4,008	6,086	8,043
	Um terminal (5 MHz)	1,998	4,008	5,999	7,999
	Um terminal (10 MHz)	2,001	4,001	5,999	7,999
	Dois terminais (0,5 MHz)	2,101	3,840	6,160	7,899
	Dois terminais (1 MHz)	1,956	3,985	6,015	8,044
	Dois terminais (3 MHz)	2,004	3,985	6,015	7,996
	Dois terminais (5 MHz)	1,985	4,014	5,986	8,015
	Dois terminais (10 MHz)	1,999	4,000	6,000	8,001

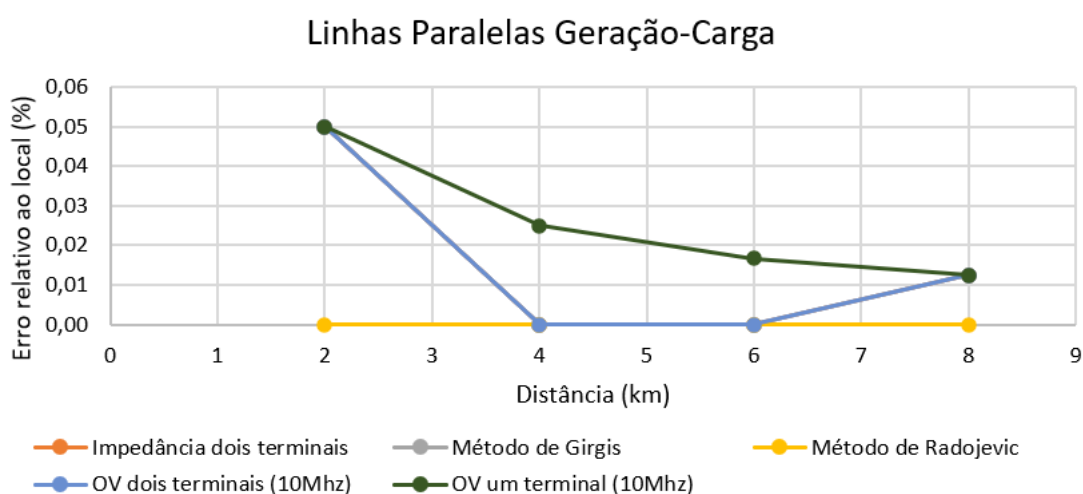


Figura 5.10: Comparação do erro relativo ao local para uma linha em paralelo geração-carga de 10km

dois terminais mostra-se bastante impreciso, com resultados muito distantes da distância exata em ambos os tipos de linha.

Tabela 5.11: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 14km

Linha em T Geração-Geração-Geração												
Comprimento (km)	14 Troço 1				14 Troço 2				14 Troço 3			
	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Visto do troço	3	3	6	6	9	9	12	12	10	4	12	2
Local de defeito (km)	3	3	6	6	9	9	12	12	10	4	12	2
Método de <i>Girgis</i>	3,000		6,000		9,000		12,000		10,000		12,000	
OV dois terminais (0,5 MHz)	1,201	1,201	5,260	5,260	12,509	12,509	13,089	13,089	12,789	1,201	13,089	0,911
OV dois terminais (1 MHz)	1,346	1,346	5,405	5,405	10,624	10,624	13,089	13,089	12,509	1,491	13,089	0,911
OV dois terminais (3 MHz)	1,395	1,395	5,309	5,309	10,769	10,769	13,234	13,234	12,509	1,491	13,234	0,766
OV dois terminais (5 MHz)	1,404	1,404	5,347	5,347	10,740	10,740	13,234	13,234	12,509	1,491	13,234	0,766

Tabela 5.12: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 14km

Linha em T Geração-Geração-Carga												
Comprimento (km)	14 Troço 1				14 Troço 2				14 Troço 3			
	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Visto do troço	3	3	6	6	9	9	12	12	10	4	12	2
Local de defeito (km)	3	3	6	6	9	9	12	12	10	4	12	2
Método de <i>Girgis</i>	3,001		6,000		9,000		11,999		10,000		11,999	
OV dois terminais (0,5 MHz)	1,201	5,260	5,260	8,739	12,509	7,000	13,089	10,189	15,698	-1,698	15,118	-1,118
OV dois terminais (1 MHz)	1,346	5,695	5,405	3,376	10,624	6,710	13,089	10,189	15,843	-1,843	15,263	-1,263
OV dois terminais (3 MHz)	1,395	5,889	5,309	9,078	10,769	11,108	13,234	10,044	15,795	-1,795	15,263	-1,263
OV dois terminais (5 MHz)	1,404	5,927	5,347	9,088	10,740	6,652	13,234	10,044	15,814	-1,814	15,263	-1,263

### 5.3.2 Linha Média

Nesta secção são apresentados os resultados para o estudo da influência da frequência de amostragem numa linha média, com defeitos localizados nas distâncias, 6km, 11km, 17km e 22km.

Tabela 5.13: Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 28km

		Linha Simples Geração-Geração				
		28				
		Comprimento (km)				
		Local de defeito (km)	6,000	11,000	17,000	22,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		5,559	10,749	17,339	23,739
	Método dois terminais		6,004	11,002	16,998	21,995
	Método de <i>Girgis</i>		6,002	11,001	16,999	21,998
	Método de <i>Radojevic</i>		6,011	11,003	16,999	22,000
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)		6,979	12,053	15,947	21,746
	Um terminal (0,5 MHz)		6,234	11,018	16,982	22,210
	Um terminal (1 MHz)		6,089	11,018	16,982	21,911
	Um terminal (3 MHz)		5,992	11,018	16,982	22,008
	Um terminal (5 MHz)		6,002	11,018	16,982	21,998
	Um terminal (10 MHz)		6,002	11,003	16,997	21,998
	Dois terminais (0,1 MHz)		6,800	11,265	16,735	21,200
	Dois terminais (0,5 MHz)		5,882	11,101	16,899	22,118
	Dois terminais (1 MHz)		6,027	10,956	17,044	21,973
	Dois terminais (3 MHz)		5,978	11,004	16,996	22,022
	Dois terminais (5 MHz)		5,998	11,014	16,986	22,002
	Dois terminais (10 MHz)		5,998	10,999	17,001	22,002

Na tabela 5.13 observa-se a variação das distâncias obtidas com o aumento da frequência de amostragem, para uma linha simples de dupla geração. De notar que, para obter resultados semelhantes ao método de *Takagi*, apenas é necessário frequências de amostragem de 1MHz para os métodos OV num só terminal e OV dois terminais. No entanto, com frequências de 10MHz verifica-se que os métodos já apresentam resultados mais precisos que todos os métodos baseados na impedância em estudo na tese, como se pode constatar no gráfico 5.11, que apresenta o erro relativo ao local em função da distância.

Os próximos resultados correspondem a uma linha simples do tipo geração-carga e de acordo com os dados da tabela 5.14 verifica-se que o método OV dois terminais apresenta um erro considerável perante este tipo de linhas, à semelhança do que aconteceu para linhas curtas.



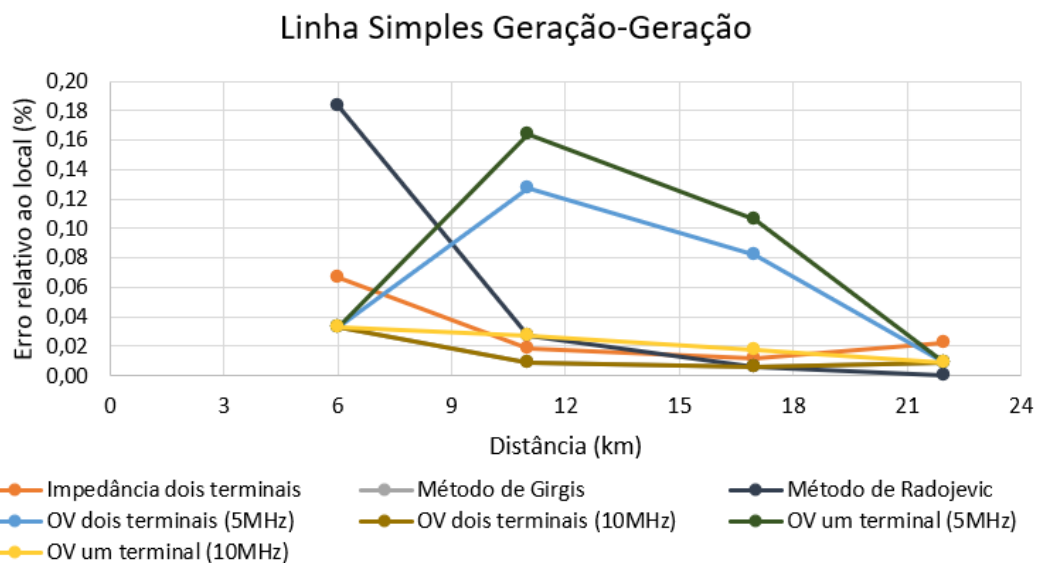


Figura 5.11: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 28km

Tabela 5.14: Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 28km

		<b>Linha Simples Geração-Carga</b>				
		<b>Comprimento (km) 28</b>				
		<b>Local de defeito (km)</b>	<b>6,000</b>	<b>11,000</b>	<b>17,000</b>	<b>22,000</b>
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		6,914	12,236	18,627	23,956
	Método dois terminais		6,006	11,003	16,999	21,994
	Método de <i>Girgis</i>		6,007	11,005	17,000	21,996
	Método de <i>Radojevic</i>		6,000	11,000	17,000	21,997
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)		6,564	10,604	17,397	21,021
	Um terminal (0,5 MHz)		5,944	11,018	17,252	21,456
	Um terminal (1 MHz)		6,016	11,018	16,982	21,911
	Um terminal (3 MHz)		5,992	11,018	17,010	22,008
	Um terminal (5 MHz)		6,002	11,018	17,010	21,998
	Um terminal (10 MHz)		6,002	11,003	16,997	21,998
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Dois terminais (0,1 MHz)		7,613	11,101	16,899	22,199
	Dois terminais (0,5 MHz)		9,071	14,000	20,089	25,018
	Dois terminais (1 MHz)		9,216	14,145	20,234	25,163
	Dois terminais (3 MHz)		9,168	14,193	20,185	25,163
	Dois terminais (5 MHz)		9,168	14,193	20,185	25,163

No gráfico 5.12 estão presentes os métodos com melhores resultados de acordo com a tabela 5.14, onde se observa que o método OV num só terminal para frequências de 10MHz, têm resultados muito precisos, em algumas situações apresenta um erro relativo ao local menor que os métodos baseados na impedância, por outro lado para frequências de 5MHz o erro já é superior na maioria das situações.

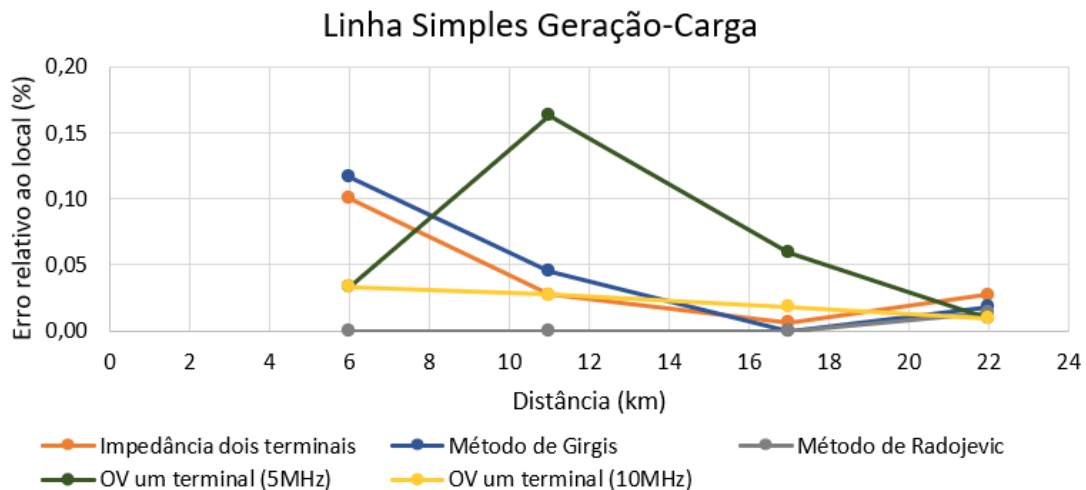


Figura 5.12: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 28km

Nas próximas tabelas são apresentados os dados para linhas em paralelo de comprimento médio.

De acordo com os dados da tabela 5.15 assim como na generalidade das simulações já realizadas, verifica-se que com o aumento da frequência de amostragem, as distâncias obtidas pelos métodos baseados em ondas viajantes aproximam-se do valor exato do local de defeito. Para linhas em paralelo de dupla geração, o método OV dois terminais com frequências superiores a 5MHz, já se mostra bastante competitivo com o método impedância dois terminais, método de *Girgis* e método de *Radojevic*. No entanto, o método OV num só terminal apenas para frequências de 10MHz apresenta resultados semelhantes aos métodos mencionados anteriormente.

No gráfico 5.13 observa-se de forma mais explicita o que foi analisado anteriormente. O método OV dois terminais com uma frequência de amostragem de 10MHz apresenta uma precisão muito boa.

Na tabela 5.16 verifica-se que os resultados obtidos pelos métodos baseados em ondas viajantes, são iguais aos obtidos na para uma linha em paralelo de dupla geração. No gráfico 5.14 observa-se que o método OV dois terminais com

### 5.3. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Tabela 5.15: Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-geração de 28km

		Linha em Paralelo Geração-Geração			
		Comprimento (km)			
		28			
		Local de defeito (km)			
		6,000	11,000	17,000	22,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	5,881	10,924	17,088	22,585
	Método dois terminais	6,003	11,001	16,999	21,997
	Método de <i>Girgis</i>	6,002	11,001	16,999	21,998
	Método de <i>Radojevic</i>	6,009	11,002	16,999	22,002
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)	6,564	10,604	17,397	21,021
	Um terminal (0,5 MHz)	5,509	11,373	16,596	22,491
	Um terminal (1 MHz)	5,964	10,893	16,982	21,911
	Um terminal (3 MHz)	5,964	10,942	16,982	22,008
	Um terminal (5 MHz)	6,051	10,966	16,991	22,008
	Um terminal (10 MHz)	5,979	11,009	16,997	21,998
	Dois terminais (0,1 MHz)	6,697	11,332	16,668	21,303
	Dois terminais (0,5 MHz)	6,172	10,811	17,189	21,828
	Dois terminais (1 MHz)	6,027	10,956	17,044	21,973
	Dois terminais (3 MHz)	6,027	10,985	17,015	21,973
	Dois terminais (5 MHz)	5,998	10,985	16,996	22,002
	Dois terminais (10 MHz)	5,998	10,999	17,001	22,002

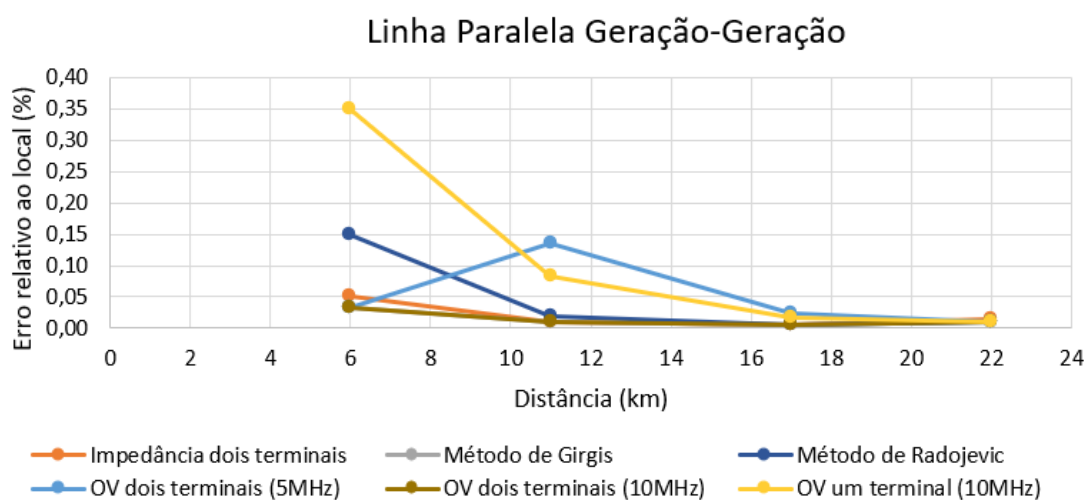


Figura 5.13: Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-geração de 28km

frequências superiores a 5MHz apresenta resultados muito competitivos com os métodos baseados na impedância.

Tabela 5.16: Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-carga de 28km

		Linha em Paralelo Geração-Carga				
		Comprimento (km)	28			
		Local de defeito (km)	6,000	11,000	17,000	22,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		6,467	11,703	18,136	22,714
	Método dois terminais		6,006	11,003	16,998	21,994
	Método de <i>Girgis</i>		6,005	11,003	16,999	21,996
	Método de <i>Radojevic</i>		5,998	10,999	17,002	22,005
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)		6,564	10,604	17,397	21,021
	Um terminal (0,5 MHz)		5,509	11,473	16,596	22,491
	Um terminal (1 MHz)		5,964	10,893	16,982	21,911
	Um terminal (3 MHz)		5,964	10,942	17,058	22,008
	Um terminal (5 MHz)		6,051	11,009	16,991	22,008
	Um terminal (10 MHz)		5,979	11,009	16,997	21,998
	Dois terminais (0,1 MHz)		6,756	11,241	16,754	21,382
	Dois terminais (0,5 MHz)		6,172	10,811	17,189	21,828
	Dois terminais (1 MHz)		6,027	10,956	17,044	21,973
	Dois terminais (3 MHz)		6,027	10,985	17,015	21,973
	Dois terminais (5 MHz)		5,998	10,985	16,996	22,002
	Dois terminais (10 MHz)		5,998	10,999	17,001	22,002

As próximas tabelas, 5.17 e 5.18 apresentam os resultados das simulações para linhas em T.

Para linhas de tripla geração, de acordo com a tabela 5.17 o método de *Girgis* apresenta uma precisão muito boa. O método de OV dois terminais para obter resultados semelhantes necessita de frequências de amostragem elevadas, na ordem dos 10 MHz.

Em linhas do tipo geração-geração-carga, tabela 5.18, os resultados do método OV dois terminais mostram-se bastante precisos para frequências de 3Mhz a 5Mhz, quando as medições são realizadas entre dois terminais geração-geração. Quando as simulações envolvem o terminal K, que corresponde ao terminal que tem a carga, os resultados apresentam um erro considerável.

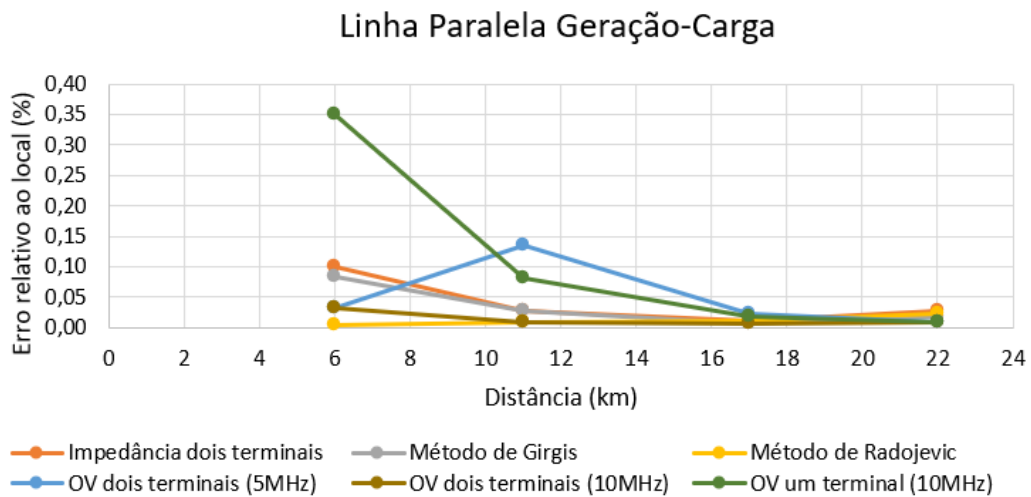


Figura 5.14: Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-carga de 28km

Tabela 5.17: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 28km

Linha em T Geração-Geração-Geração												
Comprimento (km)	28	24	28	24	28	24	28	24	24			
Visto do troço	Troço 1				Troço 2				Troço 3			
Local de defeito (km)	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Método de <i>Girgis</i>	4,002		10,001		17,999		23,998		17,999		19,999	
OV dois terminais (0,1 MHz)	2,402	1,852	8,201	9,101	19,799	14,899	25,898	22,148	20,698	3,302	22,148	1,852
OV dois terminais (0,5 MHz)	2,112	2,142	9,941	9,970	18,059	14,030	25,888	21,858	18,089	5,911	21,858	2,142
OV dois terminais (1 MHz)	3,997	4,027	9,941	9,970	18,059	14,030	24,003	19,973	17,944	6,056	19,973	4,027
OV dois terminais (3 MHz)	3,997	3,978	9,989	9,970	18,011	14,030	24,003	20,022	17,992	6,008	20,022	3,978
OV dois terminais (5 MHz)	3,997	3,998	9,999	9,999	18,001	14,001	24,003	20,002	18,002	5,998	20,002	3,997

Tabela 5.18: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 28km

Linha em T Geração-Geração-Carga												
Comprimento (km)	28	24	28	24	28	24	28	24	24			
Visto do troço	Troço 1				Troço 2				Troço 3			
Local de defeito (km)	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Método de <i>Girgis</i>	4,002		10,001		17,999		23,998		17,999		19,999	
OV dois terminais (0,1 MHz)	2,402	6,201	8,201	6,201	19,799	12,000	25,898	17,799	25,047	-1,047	23,598	0,402
OV dois terminais (0,5 MHz)	2,112	7,071	9,941	12,870	18,059	16,929	25,888	16,929	20,988	3,012	25,337	-1,337
OV dois terminais (1 MHz)	3,997	7,071	9,941	13,015	18,059	10,985	24,003	16,929	21,133	2,867	23,163	-1,337
OV dois terminais (3 MHz)	3,997	7,119	9,989	13,114	18,011	17,122	24,003	16,881	21,133	2,867	23,163	0,837
OV dois terminais (5 MHz)	3,997	7,158	9,999	13,189	18,001	10,811	24,003	16,842	21,191	2,809	23,192	0,808

### 5.3.3 Linha Longa

Nesta secção são apresentados os resultados para o estudo da influência da frequência de amostragem numa linha longa, com defeitos localizados nas distâncias, 20km, 40km, 60km e 80km.

A tabela 5.19 é referente aos resultados para uma linha simples de dupla geração. Observa-se que o método OV num só terminal para frequências de apenas 0,5MHz apresenta resultados mais precisos que os métodos baseados na impedância, mantendo-se iguais para valores de frequência superiores. No método de OV dois terminais para atingir resultados semelhantes são necessárias frequências superiores, na ordem de 1MHz.

Tabela 5.19: Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-geração de 100km

Linha Simples Geração-Geração					
Comprimento (km)		100			
Local de defeito (km)		20,000	40,000	60,000	80,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	19,663	39,844	60,450	83,282
	Método dois terminais	20,056	40,022	59,978	79,944
	Método de <i>Girgis</i>	20,046	40,021	59,979	79,955
	Método de <i>Radojevic</i>	20,148	40,033	59,984	80,007
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)	20,296	40,592	59,408	79,704
	Um terminal(0,5MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(1MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(3MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(5MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Dois terminais(0,1MHz)	19,556	39,852	60,148	80,444
	Dois terminais(0,5MHz)	19,846	40,142	59,858	80,154
	Dois terminais(1MHz)	19,991	39,997	60,003	80,009
	Dois terminais(3MHz)	19,991	39,997	60,003	80,009

No gráfico 5.15 confirma-se o que foi mencionado anteriormente, um erro relativo ao local mais baixo para os métodos baseados em ondas viajantes tendo em conta os métodos baseados na impedância.

O método OV dois terminais, à semelhança do que aconteceu anteriormente, apresenta um erro bastante significativo para linhas simples do tipo geração-carga, tabela 5.20, exceto para o valor de frequência 0,1MHz, um resultado que vai contra o esperado. No entanto no método OV num só terminal os resultados são iguais ao obtidos em linhas simples de dupla geração, para frequências superiores

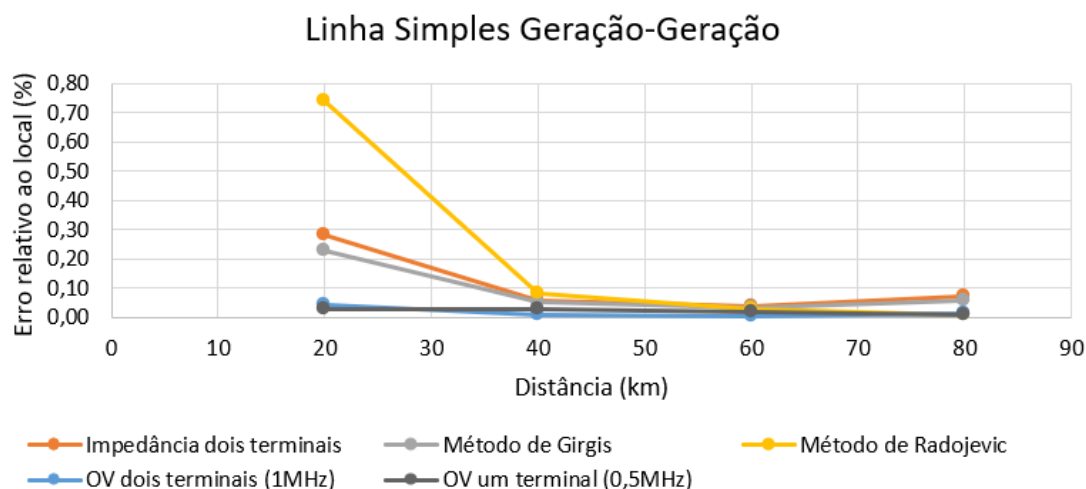


Figura 5.15: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-geração de 100km

a 0,5MHz.

Tabela 5.20: Resultados para a influência da frequência de amostragem para uma linha simples geração-carga de 100km

<b>Linha Simples Geração-Carga</b>					
<b>Comprimento (km)</b>		<b>100</b>			
<b>Local de defeito (km)</b>		<b>20,000</b>	<b>40,000</b>	<b>60,000</b>	<b>80,000</b>
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>	21,716	42,974	64,310	85,740
	Método dois terminais	20,135	40,091	59,993	79,858
	Método de <i>Girgis</i>	20,173	41,150	60,031	79,861
	Método de <i>Radojevic</i>	19,990	40,003	59,981	79,865
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)	18,846	40,592	59,408	79,704
	Um terminal(0,5MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(1MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(3MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
	Um terminal(5MHz)	20,006	40,012	59,988	79,994
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Dois terminais(0,1MHz)	19,556	39,852	60,148	80,444
	Dois terminais(0,5MHz)	23,035	43,041	63,047	83,053
	Dois terminais(1MHz)	23,180	43,186	63,192	83,198
	Dois terminais(3MHz)	23,180	43,186	63,192	83,198

A partir do gráfico 5.16 observa-se que o método OV num só terminal apresenta um erro relativo ao local muito baixo, mostrando-se capaz de competir com os métodos baseados na impedância.



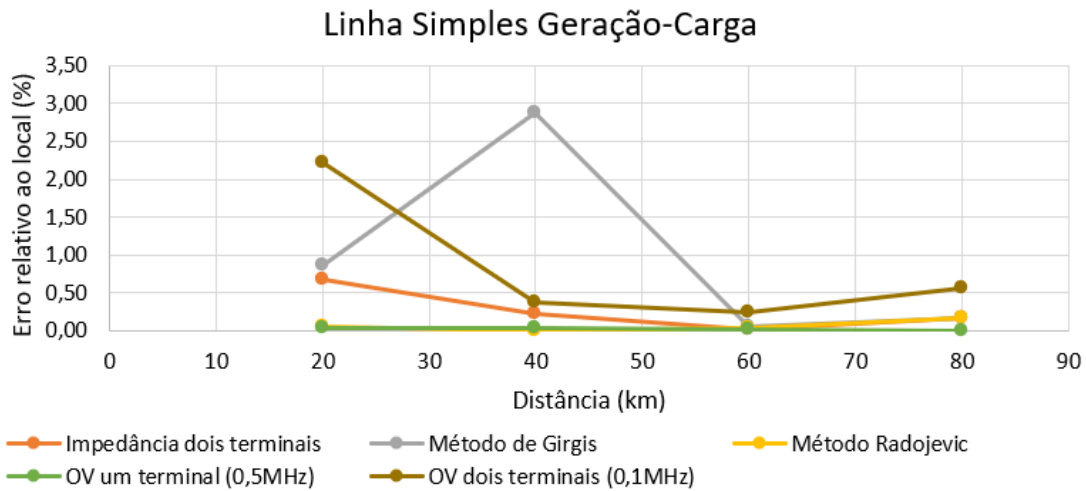


Figura 5.16: Comparação do erro relativo ao local para uma linha simples geração-carga de 100km

Nas próximas tabelas apresentam-se os resultados para linhas em paralelo, primeiramente de dupla geração e depois do tipo geração-carga.

De acordo a tabela 5.21, os métodos baseados em ondas viajantes com frequências na ordem do 1MHz já se mostram bastantes eficazes, apresentando uma proximidade ao local exato superior aos métodos baseados na impedância. Para frequências menores, os resultados do método OV dois terminais ainda são satisfatórios, no entanto o método OV num só terminal já apresenta um erro superior.

No gráfico 5.17 constata-se o que foi mencionado anteriormente, uma grande precisão dos métodos baseados nas ondas viajantes para frequências de 1MHz.

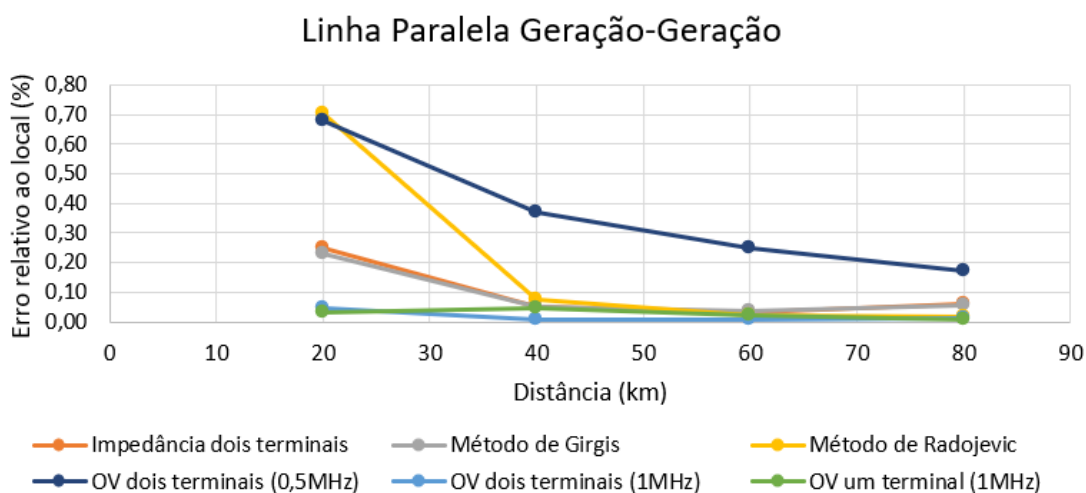


Figura 5.17: Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-geração de 100km

Tabela 5.21: Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-geração de 100km

		Linha em Paralelo Geração-Geração				
		Comprimento (km)	100			
		Local de defeito (km)	20,000	40,000	60,000	80,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		19,813	39,925	60,029	82,142
	Método dois terminais		20,050	40,020	59,980	79,950
	Método de <i>Girgis</i>		20,046	40,021	59,979	79,954
	Método de <i>Radojevic</i>		20,141	40,030	59,986	80,014
<b>Métodos baseados em Ondas Viajantes</b>	Um terminal (0,1 MHz)		15,917	42,042	63,750	84,053
	Um terminal(0,5MHz)		20,846	40,562	59,442	79,704
	Um terminal(1MHz)		20,006	39,982	59,988	79,994
	Um terminal(3MHz)		20,005	40,040	59,988	79,994
	Um terminal(5MHz)		20,005	40,040	59,988	79,994
	Dois terminais(0,1MHz)		19,556	39,852	60,148	80,444
	Dois terminais(0,5MHz)		20,136	39,852	60,148	79,864
	Dois terminais(3MHz)		19,991	39,997	60,003	80,009

Os resultados obtidos para uma linha em paralelo do tipo geração-carga (tabela 5.22) são iguais aos obtidos anteriormente para uma linha em paralelo de dupla geração, nomeadamente nos métodos baseados em ondas viajantes. No gráfico 5.18, pode-se observar isso mesmo, o erro relativo ao local dos métodos OV é igual ao observado no gráfico anterior, mas neste caso os métodos baseados na impedância apresentam erros relativos maiores, pelo que o método OV dois terminais com frequências de 0,5MHz, ainda se mostra mais competitivo.

Nas tabelas 5.23 e 5.24 são apresentados os resultados para linhas em T de longa distância.

Para uma linha de tripla geração, tabela 5.23, verifica-se que método OV dois terminais se mostra mais preciso que o método de *Girgis* para frequências iguais ou superiores a 1MHz. Na tabela 5.23, volta-se a observar o que já foi mencionado anteriormente para linhas em T, do tipo geração-geração-carga, o método OV dois terminais quando é utilizado o terminal K (carga), apresenta resultados pouco precisos.

### 5.3. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Tabela 5.22: Resultados para a influência da frequência de amostragem para linhas em paralelo geração-carga de 100km

		Linha em Paralelo Geração-Carga				
		Comprimento (km)				
		100				
		Local de defeito (km)	20,000	40,000	60,000	80,000
<b>Métodos baseados na impedância</b>	Método de <i>Takagi</i>		20,760	41,483	62,630	84,548
	Método dois terminais		20,109	40,061	59,982	79,888
	Método de <i>Girgis</i>		20,128	40,098	60,005	79,890
	Método de <i>Radojevic</i>		19,894	39,939	60,078	80,253
<b>Métodos baseados em Ondas</b>	Um terminal (0,1 MHz)		15,917	42,042	63,750	84,053
	Um terminal(0,5MHz)		20,846	40,562	59,442	79,704
	Um terminal(1MHz)		19,976	39,982	59,988	79,994
	Um terminal(3MHz)		20,005	40,040	59,988	79,994
	Um terminal(5MHz)		20,005	40,040	59,988	79,994
<b>Viajantes</b>	Dois terminais(0,1MHz)		19,556	39,852	61,148	80,444
	Dois terminais(0,5MHz)		20,136	39,852	60,148	79,864
	Dois terminais(1MHz)		19,991	39,997	60,003	80,009
	Dois terminais(3MHz)		19,991	39,997	60,003	80,009

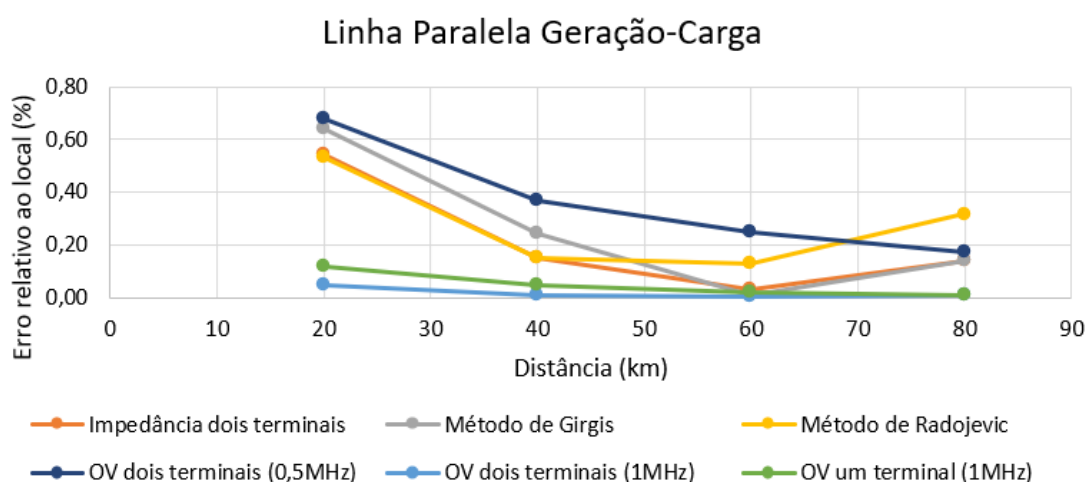


Figura 5.18: Comparação do erro relativo ao local para linhas em paralelo geração-carga de 100km

Tabela 5.23: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-geração de 100km

Linha em T Geração-Geração-Geração												
Comprimento (km)	100 Troço 1				100 Troço 2				100 Troço 3			
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Local de defeito (km)	20	20	40	40	60	60	80	80	90	10	60	40
<b>Método de Girgis</b>	20,041		40,020		59,980		79,959		89,965		59,980	
<b>OV dois terminais (0,1 MHz)</b>	19,556	19,556	39,852	39,852	60,148	60,148	80,444	80,444	89,142	10,858	60,148	39,852
<b>OV dois terminais (0,5 MHz)</b>	19,846	19,846	40,142	40,142	59,858	59,858	80,154	80,154	90,012	9,988	59,858	40,142
<b>OV dois terminais (1 MHz)</b>	19,991	19,991	39,997	39,997	60,003	60,003	80,009	80,009	90,012	9,988	60,003	39,997
<b>OV dois terminais (3 MHz)</b>	19,991	19,991	39,997	39,997	60,003	60,003	80,009	80,009	90,012	9,988	60,003	39,997

Tabela 5.24: Resultados influência de frequência de amostragem para uma linha em T geração-geração-carga de 100km

Linha em T Geração-Geração-Carga												
Comprimento (km)	100 Troço 1				100 Troço 2				100 Troço 3			
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K	S-R	K-R	S-R	K-R	S-K	K-R	S-K	K-R
Local de defeito (km)	20	20	40	40	60	60	80	80	90	10	60	40
<b>Método de Girgis</b>	20,085		40,046		59,955		79,915		89,842		60,013	
<b>OV dois terminais (0,1 MHz)</b>	19,556	22,456	39,852	42,751	60,148	57,249	80,444	77,544	89,142	7,958	60,148	36,953
<b>OV dois terminais (0,5 MHz)</b>	19,846	22,745	40,142	43,041	59,858	56,959	80,154	77,255	92,912	7,089	63,047	36,953
<b>OV dois terminais (1 MHz)</b>	19,991	23,132	39,997	43,138	60,003	56,862	80,009	76,868	93,153	6,847	63,192	36,808
<b>OV dois terminais (3 MHz)</b>	19,991	23,132	39,997	43,138	60,003	56,862	80,009	76,868	93,153	6,847	63,192	36,808

### 5.3.4 Discussão

A partir dos dados obtidos anteriormente confirma-se que no geral a precisão dos métodos baseados em OV está relacionada com a frequência de amostragem utilizada, quando maior esta for, maior a precisão dos métodos.

Através dos resultados conclui-se que os métodos baseados em OV apresentam-se mais vantajosos para linhas de grandes dimensões, visto que não necessitam de frequências tão elevadas para se mostrarem competitivos com os métodos baseados na impedância. Foi possível verificar que para linhas curtas era necessário frequências na ordem dos 10MHz para os métodos baseados em OV apresentarem resultados idênticos com os métodos baseados na impedância. Por outro lado, numa linha de dimensão média, alguns métodos com frequências de 5MHz ou 3MHz já apresentam uma precisão bastante aceitável, quando comparados com os métodos baseados na impedância. Por fim, os métodos baseados em OV para linhas de grandes dimensões mostram que já não é necessária uma frequência de amostragem tão elevada para obter resultados com melhor precisão relativamente aos métodos baseados na impedância, em alguns casos apenas frequências de amostragem de 0,5MHz.

No entanto, verificou-se que o método OV dois terminais apresenta resultados pouco precisos para uma linha simples do tipo geração-carga, independentemente do comprimento da linha, algo que pode estar relacionado com a carga utilizada. O mesmo se verificou para linhas em T, geração-geração-carga, quando considerado o terminal K, pois a tipologia da linha fica do tipo geração-carga.



## CONCLUSÕES

Neste capítulo é apresentada uma síntese do trabalho desenvolvido na dissertação, sendo destacados os principais pontos, assim como as principais conclusões retiradas após a realização das simulações. Por fim, apresentam-se sugestões de trabalhos a desenvolver numa perspectiva de continuar aprofundar este tema.

### 6.1 Síntese do Trabalho

Atualmente é fundamental identificar um defeito numa linha de transporte de energia o mais rápido possível, de forma a restabelecer a rede de energia, no menor tempo possível, diminuindo assim a duração da interrupção.

Nos dias de hoje, os métodos podem dividir-se em quatro categorias: métodos baseados na impedância, métodos baseados em ondas viajantes, métodos baseados em frequências elevada e métodos baseados em inteligência artificial. Após uma análise dos métodos existentes na literatura foram selecionados quatro da categoria dos métodos baseados na impedância, assim como a técnica utilizada para obter a distância de defeito pelos métodos baseados nas ondas viajantes.

Os métodos baseados na impedância foram submetidos a simulações para verificar a influência do disjuntor e a influência da resistência de defeito, enquanto que nos métodos baseados nas ondas viajantes verificou-se a influência da frequência de amostragem na precisão do método.

Relativamente à ação do disjuntor, conclui-se que não apresenta influência nos resultados. Estes mostram que a distância entre a utilização ou não do disjuntor

tem uma diferença mínima, isto com um tempo de reação e seletividade do disjuntor na ordem dos 0,1s. A queda da precisão está principalmente relacionada com o aumento do comprimento de linha.

Nos métodos baseados nas ondas viajantes verificou-se que a frequência de amostragem apresenta uma grande influência nos resultados. Em linhas de curta dimensão conclui-se que são necessárias frequências na ordem dos 10MHz para obter resultados com precisão semelhante aos métodos baseados na impedância. Com o aumento do comprimento das linhas verificou-se que os métodos OV dois terminais e OV num só terminal necessitam de frequências menores para se mostrarem competitivos com os métodos baseados na impedância, no caso de uma linha de 100km, frequências de 1MHz já apresentam um elevado grau de precisão.

Por último, após as simulações para averiguar a influência da resistência de defeito, conclui-se que os métodos baseados em medidas de apenas um terminal são os mais afetados, verificando-se uma grande variação nos resultados obtidos.

Em suma, conclui-se que a utilização dos métodos baseados nas ondas viajantes se mostram mais compensatórios para linhas de grandes dimensões, pois a frequência de amostragem necessária já não é muito elevada. Em linhas de dimensão curta/média as grandes frequências de amostragem necessárias elevam o custo do método, pelo que dada a boa precisão obtida pelos métodos baseados na impedância a utilização dos métodos baseados nas OV pode não compensar.

## 6.2 Trabalhos Futuros

No estudo realizado utilizou-se uma sincronização perfeita entre os terminais, pelo que será interessante verificar o comportamento dos métodos para erros de sincronismo, algo que pode afetar mais uns métodos que outros e pode ser determinante para selecionar qual categoria de métodos se mostra mais viável.

Outro aspeto comum às duas categorias de métodos foi a utilização de relés perfeitos para realizar a leitura dos dados nos terminais, pelo que adicionar erros de leitura na tensão e corrente, certamente irá afetar a precisão dos métodos.

Visto que a maioria dos métodos baseados na impedância estão relacionados com os parâmetros da linha e que estes não são homogêneos ao longo do comprimento da linha, seria útil verificar quanto a incerteza dos parâmetros de linha pode influenciar a precisão dos métodos.

Além das sugestões mencionadas anteriormente, seria importante submeter os métodos a outros tipos de linhas, como por exemplo linhas compensadas.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] G Krzysztof, R. Kowalik, D. D. Rasolomampionona e S. Anwar. “Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview”. Em: *Journal of Electrical Systems* 7 (jan. de 2011), pp. 287–296.
- [2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow e T. Matsushima. “Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data”. Em: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-101.8 (1982), pp. 2892–2898. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317615.
- [3] D. A. Tziouvaras, J. B. Roberts e G. Benmouyal. “New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines”. Em: *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*. 2001, pp. 395–398. DOI: 10.1049/cp:20010183.
- [4] Z. M. Radojević, C. H. Kim, M Popov, G Preston e V Terzija. “New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters”. Em: *International Conference on Power Systems Transients (IPST) May 2014* (2009). URL: <http://www.ipst.org/TechPapers/2009/IPST09Papers.htm>.
- [5] A. A. Girgis, D. G. Hart e W. L. Peterson. “A new fault location technique for two- and three-terminal lines”. Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 7.1 (1992), pp. 98–107. DOI: 10.1109/61.108895.
- [6] E. O. Schweitzer. “Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information”. Em: *Computers Electrical Engineering* 10.4 (1983), pp. 269 –278. ISSN: 0045-7906. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7906\(83\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0045-7906(83)90013-7).
- [7] D. Novosel, D. G. Hart, E. Udren e M. M. Saha. “Fault location using digital relay data”. Em: *IEEE Computer Applications in Power* 8.3 (1995), pp. 45–50. DOI: 10.1109/67.392027.

- [8] A. T. Johns e S. Jamali. “Accurate fault location technique for power transmission lines”. Em: *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution* 137.6 (1990), pp. 395–402. DOI: 10.1049/ip-c.1990.0054.
- [9] S. Gururajapathy, H. Mokhlis e H. Illias. “Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017), pp. 949–958. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021>.
- [10] A. Godinho. “Localização de Defeitos em Linhas Aéreas de Transporte e Distribuição de Energia”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2019.
- [11] E. Personal, A. García, A. Parejo Matos, D. Larios, F. Biscarri e C. León. “A Comparison of Impedance-Based Fault Location Methods for Power Underground Distribution Systems”. Em: *Energies* 9 (dez. de 2016), pp. 1–30. DOI: 10.3390/en9121022.
- [12] Z. Q. Bo, G. Weller e M. A. Redfern. “Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals”. Em: *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* 146.1 (1999), pp. 73–79. DOI: 10.1049/ip-gtd:19990074.
- [13] S. Parmar. “Fault Location Algorithms for Electrical Power Transmission Lines”. Tese de mestrado. Delft University of Technology, 2015.
- [14] V. Neves. *Electrotecnia teórica - Linha de Transmissão*. Rel. téc. FCT.
- [15] E. O. Schweitzer, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny e S. Marx. “Locating faults by the traveling waves they launch”. Em: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 2014, pp. 95–110. DOI: 10.1109/CPRE.2014.6798997.
- [16] J. P. S. Paiva. *Redes de Energia Elétrica: uma análise sistémica*. 3ª. Lisboa: IST press, 2011. ISBN: 978-898-8481-06-1.
- [17] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 448-13-02: "power system fault"*. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-13-02> (acedido em 28/01/2020).
- [18] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 448-13-05: "shunt fault"*. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-13-05> (acedido em 28/01/2020).

- [19] J. Izykowski. *Fault location on power transmission lines*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [20] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 448-13-06: "series fault"*. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-13-06> (acedido em 28/01/2020).
- [21] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 448-13-07: "combination fault"*. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-13-07> (acedido em 28/01/2020).
- [22] H. L. Cruz. “Disjuntores de potência da RNT – Implementação de uma base de dados e desenvolvimento de uma aplicação informática de apoio”. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [23] I. E. Commission e I. E. C. T. C. 17. *High-voltage Switchgear and Controlgear: Guide to IEC 62271-100, IEC 62271-1 and other IEC standards related to alternating current circuit-breakers*. International standard pt. 306. International Electrotechnical Commission, 2012. ISBN: 9782832205587.
- [24] C. C. Gaspar. “Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão de Energia”. Tese de mestrado. Instituto Superior Técnico, 2017.
- [25] S. Das, S. Santoso, A. Gaikwad e M. Patel. “Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application”. Em: *IEEE Access* 2 (2014), pp. 537–557. DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2323353.
- [26] M. Harrysson. “Fault Location Algorithms in Transmission Grids”. Tese de mestrado. Halmstad University, School of Business e Engineering (SET), 2014.
- [27] H. Dommel e B. P. Administration. *Electromagnetic Transients Program: Reference Manual (EMTP Theory Book)*. Bonneville Power Administration, 1986.
- [28] B. Kasztenny, A. Guzmán, M. V. Mynam e T. Joshi. “Locating faults before the breaker opens — Adaptive autoreclosing based on the location of the fault”. Em: *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. 2018, pp. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2018.8349806.
- [29] A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong e M. V. Mynam. “Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications”. Em: *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. 2018, pp. 1–18. DOI: 10.1109/CPRE.2018.8349768.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [30] J. Chang. “Single Ended Traveling Wave Based Fault Location Using Discrete”. Tese de mestrado. University of Kentucky, 2014, p. 92.
- [31] M. da Silva. “Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet”. Tese de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- [32] A. Q. dos Santos. “Stochastic Prediction of Voltage Sags Amplitude and Duration in Transmission Networks”. Tese de doutoramento. Instituto Superior Tecnico (IST), 2015.



## INFLUÊNCIA DO DISJUNTOR

### I.1 Linhas em Paralelo

Tabela I.1: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 10km

Linha em Paralelo Geração-Geração								
Comprimento (km)	10							
Local de defeito (km)	2		4		6		8	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	2,009	1,988	4,005	3,976	5,997	5,953	7,969	7,889
Método dois terminais	2,000	2,000	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000
Método de Girgis	2,000	2,000	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000
Método de Radojevic	2,001	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000

Tabela I.2: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 10km

Linha em Paralelo Geração-Carga								
Comprimento (km)	10							
Local de defeito (km)	2		4		6		8	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	2,377	2,377	4,527	4,527	6,754	6,754	9,113	9,113
Método dois terminais	2,001	2,001	4,000	4,000	5,999	5,999	7,999	7,999
Método de Girgis	2,001	2,001	4,000	4,000	6,000	6,000	7,999	7,999
Método de Radojevic	2,000	2,000	4,000	4,000	6,000	6,000	8,000	8,000

## ANEXO I. INFLUÊNCIA DO DISJUNTOR

Tabela I.3: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 28km

Linhas em Paralelo Geração-Geração								
Comprimento (km)	28							
Local de defeito (km)	6		11		17		22	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	5,898	5,881	10,946	10,924	17,123	17,088	22,646	22,585
Método dois terminais	6,003	6,003	11,001	11,001	16,999	16,999	21,998	21,997
Método de Girgis	6,002	6,002	11,001	11,001	16,999	16,999	21,998	21,998
Método de Radojevic	6,008	6,009	11,002	11,002	17,000	16,999	22,002	22,002

Tabela I.4: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 28km

Linha Simples Geração-Carga								
Comprimento (km)	28							
Local de defeito (km)	6		11		17		22	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	6,467	6,497	11,703	11,703	18,136	16,136	22,714	22,714
Método dois terminais	6,006	6,006	11,003	11,003	16,998	16,998	21,994	21,994
Método de Girgis	6,005	6,005	11,003	11,003	16,999	16,999	21,996	21,996
Método de Radojevic	5,998	5,998	10,999	10,999	17,002	17,002	22,005	22,005

Tabela I.5: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-geração 100km

Linha em Paralelo Geração-Geração								
Comprimento (km)	100							
Local de defeito (km)	20		40		60		80	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	19,823	19,813	39,937	39,925	60,032	60,029	82,175	82,142
Método dois terminais	20,044	20,050	40,018	40,020	59,982	59,980	79,956	79,950
Método de Girgis	20,045	20,046	40,021	40,021	59,979	59,979	79,955	79,954
Método de Radojevic	20,134	20,141	40,028	40,030	59,988	59,986	80,019	80,014

Tabela I.6: Resultados da influência do disjuntor para linhas em paralelo geração-carga 100km

Linha em Paralelo Geração-Carga								
Comprimento (km)	100							
Local de defeito (km)	20		40		60		80	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Takagi	20,760	20,760	41,483	41,483	62,630	62,630	84,548	84,548
Método dois terminais	20,109	20,109	40,061	40,061	59,982	59,982	79,888	79,888
Método de Girgis	20,128	20,128	40,098	40,098	60,005	60,005	79,890	79,890
Método de Radojevic	19,894	19,894	39,939	39,939	60,078	60,078	80,253	80,253

## I.2 Linhas em T

Tabela I.7: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 14km

Linha em T Geração-Geração-Geração													
Comprimento (km)	14 Troço 1				14 Troço 2				14 Troço 3				
Visto do troço	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K		
Local de defeito (km)	3		6		9		12		10		12		
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
Método de Girgis	3,000	3,000	6,000	6,000	9,000	9,000	12,000	12,000	10,000	10,000	12,000	12,000	

Tabela I.8: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 14km

Linha em T Geração-Geração-Geração													
Comprimento (km)	14 Troço 1				14 Troço 2				14 Troço 3				
Visto do troço	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K		
Local de defeito (km)	3		6		9		12		10		12		
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	
Método de Girgis	3,001	3,001	6,000	6,000	9,000	9,000	11,999	11,999	10,000	10,000	11,999	11,999	

Tabela I.9: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 28km

Linha em T Geração-Geração-Geração												
Comprimento (km)	28 Troço 1				28 Troço 2				24 Troço 3			
	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K	
Local de defeito (km)	4		10		18		24		18		20	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Girgis	4,001	4,002	10,001	10,001	17,999	17,999	23,999	23,998	17,999	17,999	19,999	19,999

Tabela I.10: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 28km

Linha em T Geração-Geração-Carga												
Comprimento (km)	28 Troço 1				28 Troço 2				24 Troço 3			
	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K	
Local de defeito (km)	4		10		18		24		18		20	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Girgis	4,003	4,003	10,002	10,002	17,998	17,998	23,998	23,998	17,999	17,999	19,998	19,998



Tabela I.11: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-geração 100km

Linha em T Geração-Geração-Geração												
Comprimento (km)	100 Troço 1				100 Troço 2				100 Troço 3			
	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K	
Local de defeito (km)	20		40		60		80		90		60	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Girgis	20,039	20,041	40,020	40,020	59,981	59,980	79,961	79,959	89,965	89,965	59,980	59,980

Tabela I.12: Resultados da influência do disjuntor para linhas em T geração-geração-carga 100km

Linha em T Geração-Geração-Carga												
Comprimento (km)	100 Troço 1				100 Troço 2				100 Troço 3			
	S-R		S-R		S-R		S-R		S-K		S-K	
Local de defeito (km)	20		40		60		80		90		60	
Disjuntor	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Método de Girgis	20,080	20,085	40,040	40,046	59,955	59,955	79,920	79,915	89,842	89,842	60,013	60,013





## INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE DEFEITO

### II.1 Linhas em Paralelo

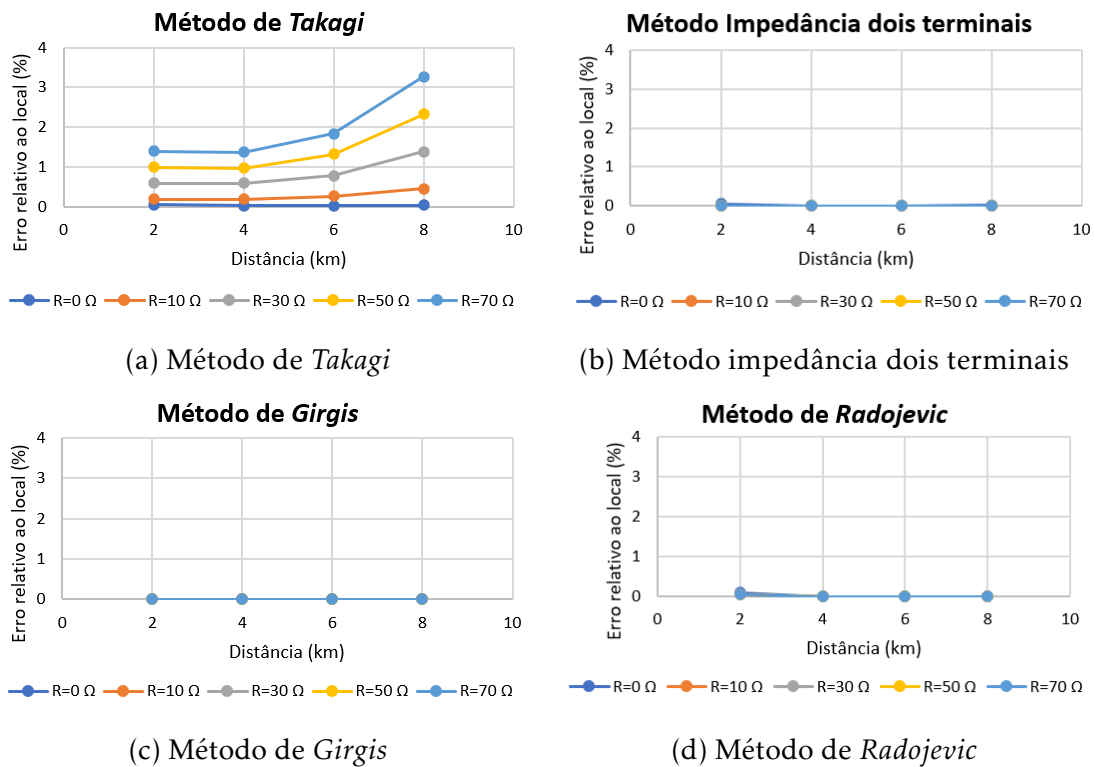


Figura II.1: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 10km

ANEXO II. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE DEFEITO

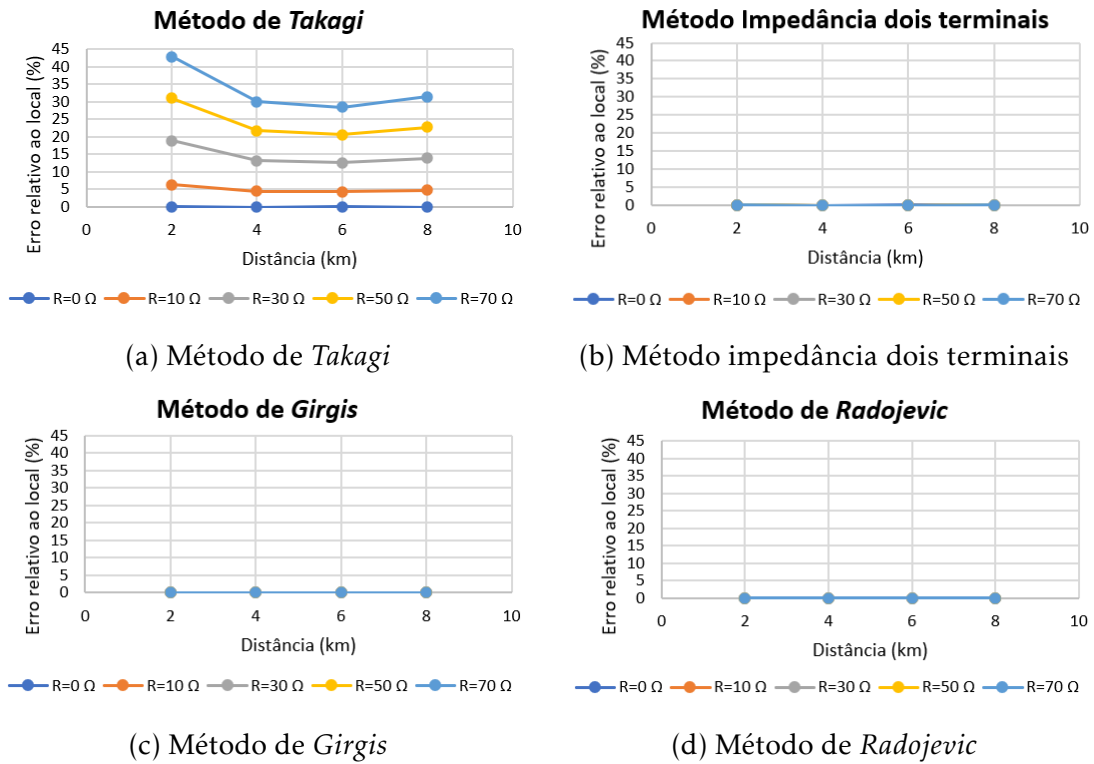


Figura II.2: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 10km

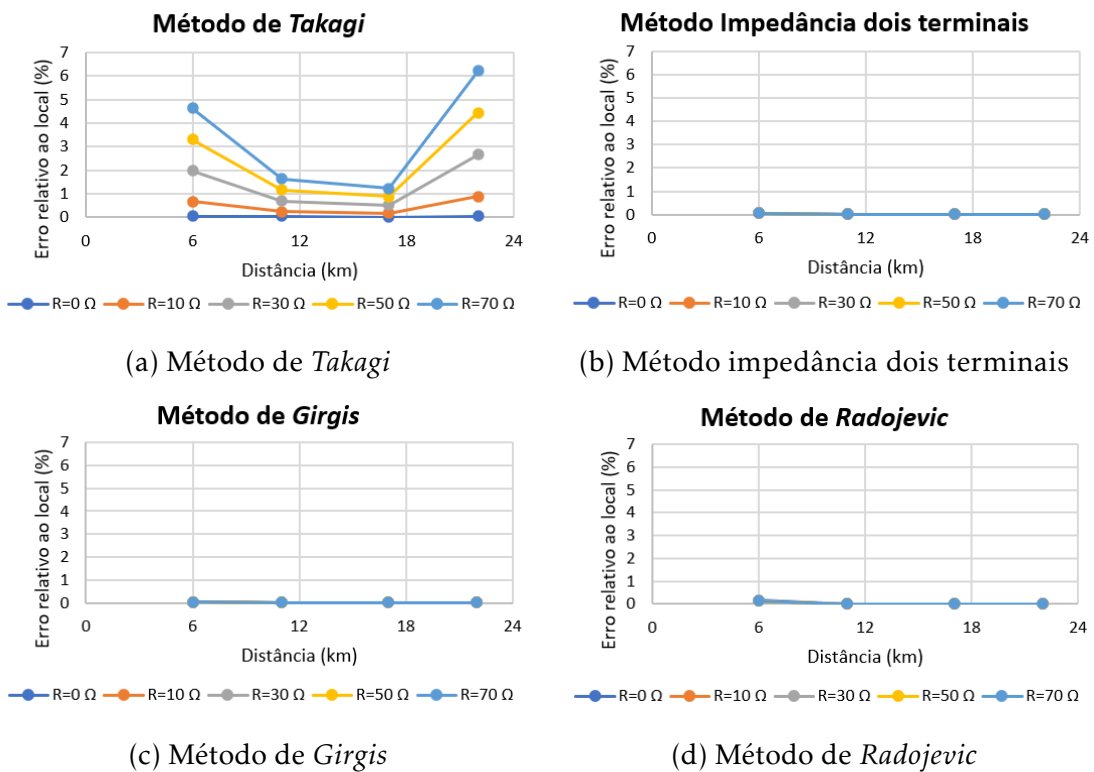


Figura II.3: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 28km

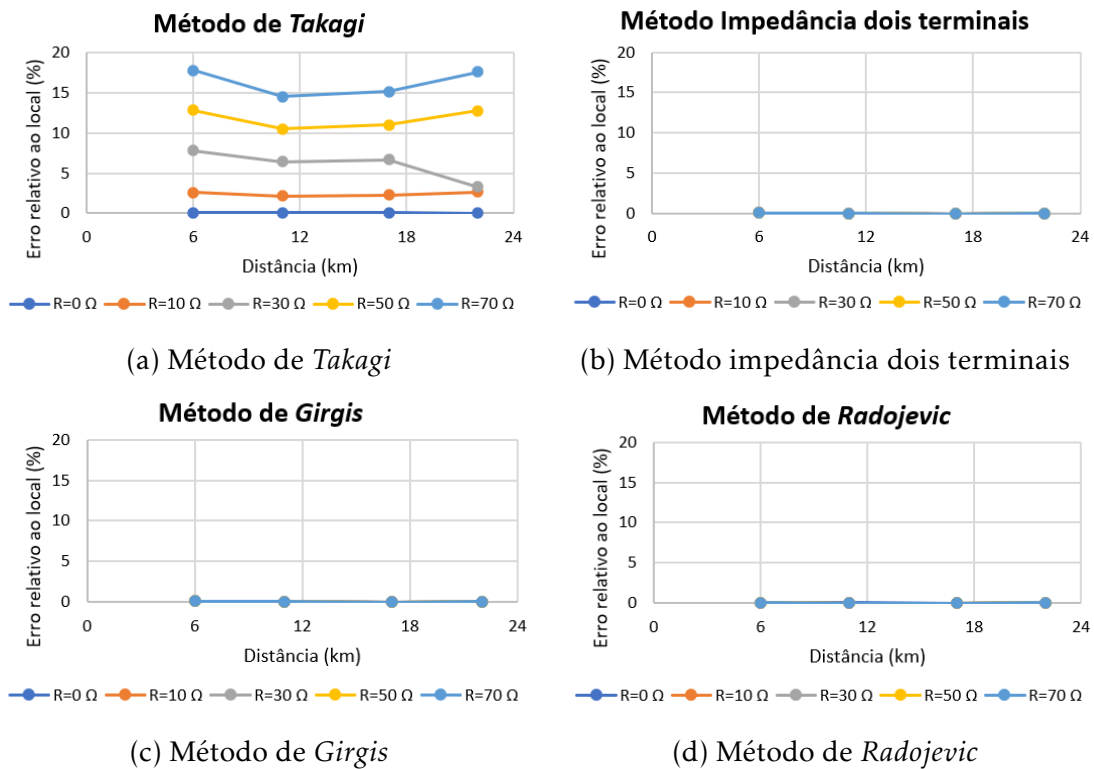


Figura II.4: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 28km

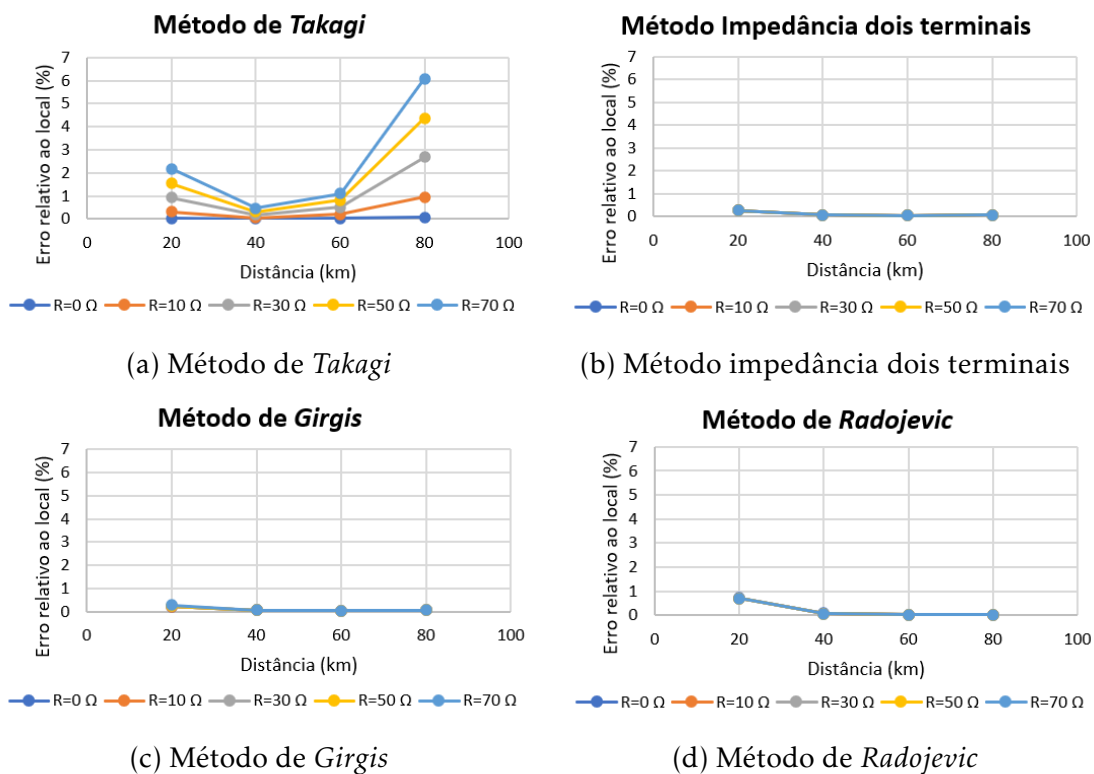


Figura II.5: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-geração de 100km

## ANEXO II. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE DEFEITO

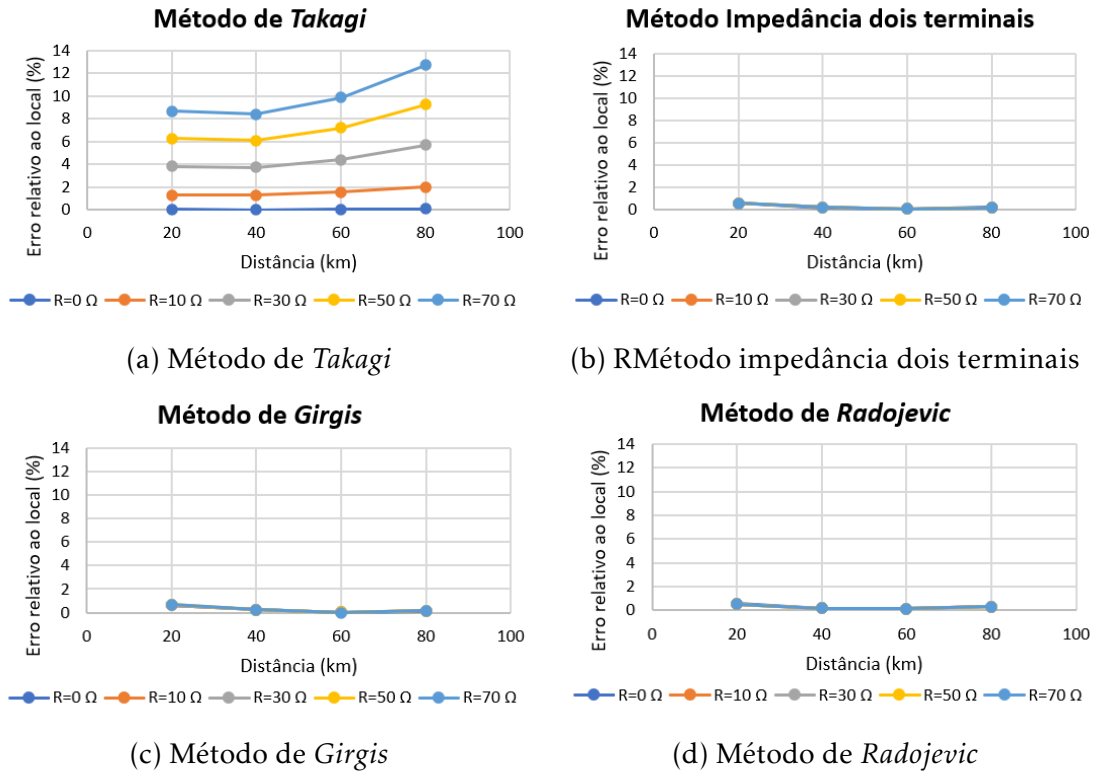


Figura II.6: Resultados da influência da resistência de defeito para linhas em paralelo geração-carga de 100km

## II.2 Linhas em T

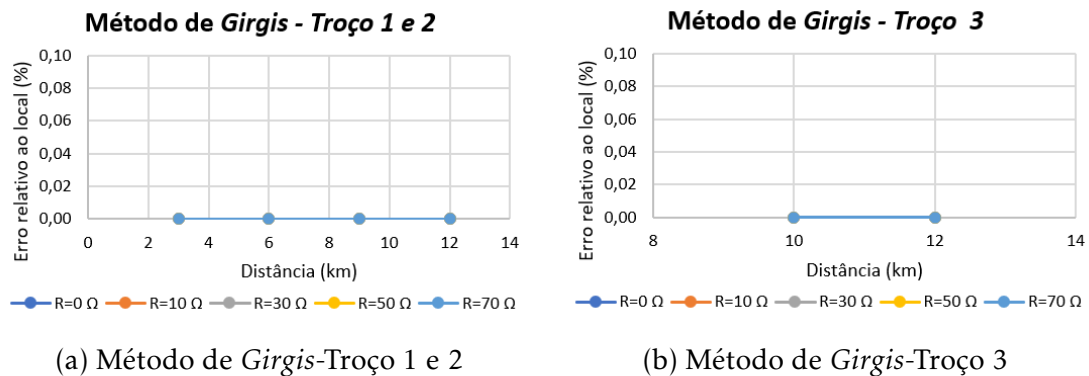


Figura II.7: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-geração de 14km

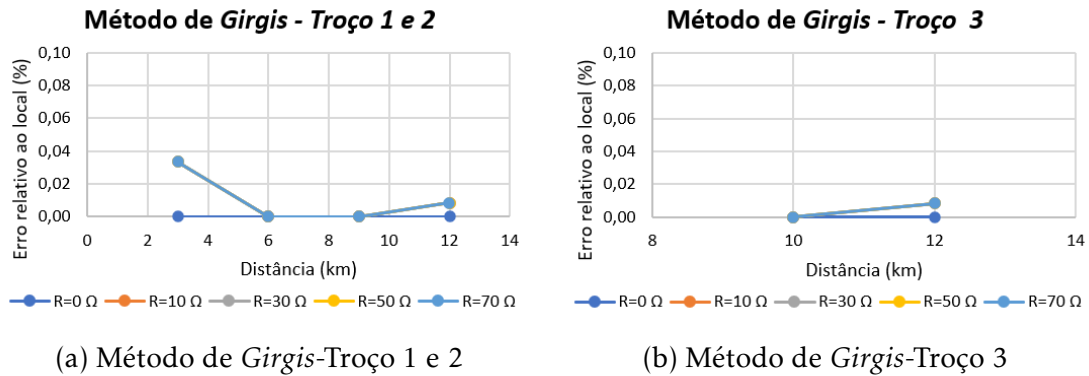


Figura II.8: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 14km

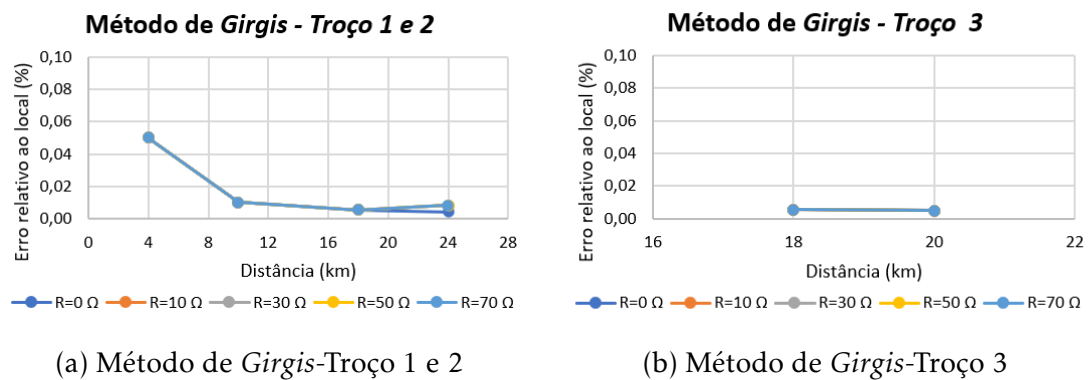


Figura II.9: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 28km

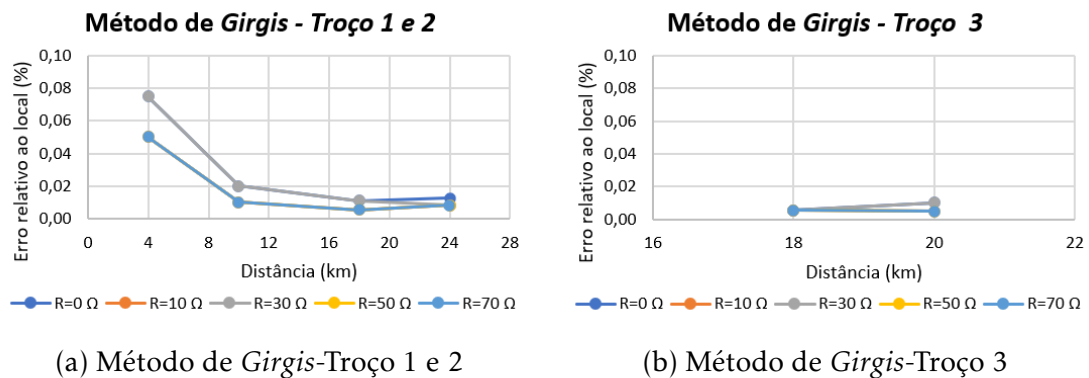


Figura II.10: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 28km

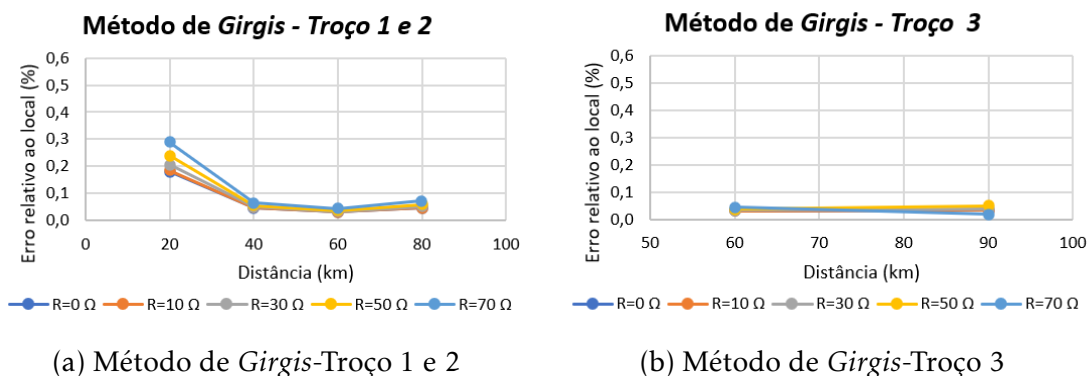


Figura II.11: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-geração de 100km

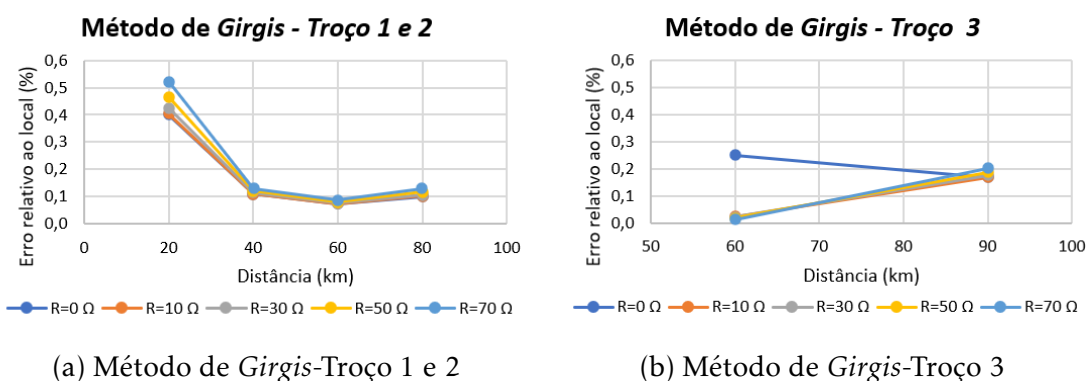


Figura II.12: Resultados da influência da resistência de defeito para uma linha em T geração-geração-carga de 100km