

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG**

**ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
CPDEE - CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Adaptação do Método de Wiszniewski para Agregar Maior  
Exatidão à Localização de Faltas em Linhas de  
Transmissão com Dados de Um Terminal**

**WANDERSON MENDES ALVES**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte, MG – Brasil

Dezembro de 2008

## Dedicatória

*Dedico este trabalho*

*Aos meus pais  
José Mendes e Maria José Alves*

*A minha esposa  
Daniela*

## Agradecimentos

*A Deus, que me concedeu luz e força para realizar este trabalho.*

*À minha mãe, que sempre incentivou meus estudos e contribuiu decisivamente para que este trabalho se tornasse realidade.*

*A meu pai, pelo exemplo de vida.*

*À minha esposa Daniela, pelo carinho e incentivo.*

*Ao professor Clever, pela sua dedicação como orientador, concorrendo para que a realização desta dissertação fosse bem-sucedida.*

*À Companhia Energética de Minas Gerais, que tornou possível a realização deste trabalho.*

*A todos que, de alguma forma, colaboraram na execução desta dissertação.*

# Índice

<b>Resumo .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	<b>IX</b>
<b>1.1 – Considerações iniciais.....</b>	<b>IX</b>
<b>1.2 – Estrutura da dissertação.....</b>	<b>X</b>
<b>Capítulo 2 Apresentação dos Métodos de Takagi e Wiszniewski.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 – Circuitos unifilares .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 – Método de Takagi .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 – Método de Wiszniewski.....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo 3 Propostas para Melhoria do Algoritmo .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 – Correção da corrente no ponto de falta.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 – Correção do fator de distribuição – fator K.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.1 – Obtenção das correntes no ponto de falta.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 – Introdução do efeito capacitivo da LT .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1 – Correção da reatância.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2 – Correção da resistência.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4 – Estimação da resistência de falta - RF .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5 – Compensação da corrente do reator .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 – Considerações sobre o processo de filtragem.....</b>	<b>48</b>
<b>3.6.1 – Casos estudados para aplicação de média e mediana .....</b>	<b>50</b>

<b>Capítulo 4</b>	<b>Estudo Paramétrico .....</b>	<b>60</b>
4.1	– Perfil do fator K para as topologias apresentadas .....	63
4.2	– Perfil do fator K para várias outras topologias.....	67
<b>Capítulo 5</b>	<b>Influência da Variação de Parâmetros na Localização da Falta....</b>	<b>76</b>
5.1	– Considerações sobre as simulações e cálculos .....	77
5.1.1	– Variação de parâmetros .....	77
5.1.2	– Estimação dos fasores.....	78
5.1.3	– Seqüência dos cálculos .....	79
5.1.4	– Circuitos simulados .....	81
5.1.5	– Nomenclatura dos casos simulados.....	82
5.2	– Resultados das simulações no ATP .....	83
5.3	– Desempenho do algoritmo frente às adaptações propostas.....	110
5.4	– Desempenho com terminal remoto aberto.....	116
5.5	– Sensibilidade do algoritmo frente à variação angular do fator K.....	119
5.6	– Análise dos resultados dos casos simulados .....	121
5.7	– Resultados de casos reais.....	122
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>124</b>
6.1	– Conclusões .....	124
6.2	– Sugestões de continuidade .....	127
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>128</b>

# Resumo

Localização automática de faltas em linhas de transmissão utilizando dados de apenas um dos terminais (terminal local) leva em consideração algumas simplificações para possibilitar o equacionamento sem as informações de tensão e corrente do terminal remoto. A utilização destes métodos em casos de faltas com considerável resistência de falta resulta normalmente em estimativas com elevados erros, inaceitáveis para as tarefas de localização.

Neste trabalho, foram desenvolvidas adaptações para o método de localização automática de faltas em linhas de transmissão proposto por Wiszniewski, que utiliza medições de apenas um dos terminais, possibilitando uma maior exatidão à rotina de cálculo do ponto de falta.

Essas adaptações consistem basicamente na reformulação das equações originariamente propostas, de modo a se considerar o efeito capacitivo da LT e a contribuição de corrente de cada um dos terminais da LT para o ponto de falta, sendo a contribuição do terminal remoto estimada a partir da utilização de programa clássico de cálculo de curto-circuito. Estas duas adaptações, em conjunto, mostraram ser eficazes no sentido de melhorar a estimativa do ponto de falta, especialmente nos casos de elevada resistência de falta, mesmo quando a topologia do sistema real e a modelada no programa de curto-circuito apresentam algumas diferenças.

O objetivo deste trabalho é apresentar a formulação destas adaptações e os resultados de suas aplicações em casos simulados via ATP (Alternative Transient Program), bem como em alguns casos reais do sistema elétrico brasileiro, comprovando que as adaptações propostas podem melhorar sensivelmente o desempenho do método originalmente proposto por Wiszniewski. Os resultados obtidos demonstram a boa eficiência das adaptações propostas, sendo que em grande maioria dos casos simulados, os erros de estimativa do ponto de falta são inferiores a dois por cento do comprimento total da LT, ficando o erro máximo abaixo

de cinco por cento. Erros esses, adequados nas tarefas práticas de localização automática de faltas em linhas de transmissão.

# Abstract

Transmission line automatic fault location using data from only one terminal (local terminal) takes into consideration some simplifications to allow the estimation without data from other terminal (remote terminal). The use of these methods, when the fault has high fault resistance, generally produces estimative with unacceptable high errors intended to practical localization.

In this work, adaptations were developed for the transmission line automatic fault location method proposed by Wiszniewski, which uses data from only local terminal, enabling greater accuracy to fault location routine.

These adaptations are mainly based on the reformulation of the originally proposed equations in order to consider transmission line capacitive effect and the estimation of the current contribution of each terminal to the fault current, being the contribution from remote terminal estimated by mean of a classic short-circuit program. These two adaptations, specially the use of voltage and current values of remote terminal obtained from a classic short-circuit program, proved their efficiency improving the fault location result, even in high fault resistance events, and when the topology of real system and the modeled inside the short-circuit program are not the strictly the same.

The objective of this work is to present the proposed adaptations and the obtained results from ATP (Alternative Transient Program) simulated cases and also from some real cases from Brazilian electric power system, corroborating that the proposed adaptations can improve the performance of the method originally proposed by Wiszniewski. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed adaptations, since fault location errors were less than five percent when the proposed method was used, errors that are adequate to practical transmission line fault location tasks.



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Considerações iniciais

A localização de faltas em linhas de transmissão pode ser feita utilizando informações de um ou mais terminais, sendo para isso necessários registros de oscilografias.

Nos casos em que a linha possui dois terminais, e que representa a maioria dos casos, a localização com dois terminais é mais exata que a que utiliza dados de apenas um terminal. Entretanto em algumas situações, o registro oscilográfico não é disponibilizado em ambos os terminais, por exemplo: interligações entre empresas diferentes, falhas na aquisição dos dados de um dos terminais, casos de falta para a terra com elevada impedância e conseqüente disparo de apenas um dos

registradores de oscilografia e nos casos em que é projetado apenas um registrador por motivo de economia, dentre outros casos. Nesses casos, a localização somente pode ser feita com dados do terminal onde a oscilografia está disponível.

Entretanto, os algoritmos de localização automática de faltas em linhas de transmissão que utilizam dados de apenas um terminal encontram limitações na sua exatidão quando aplicados em faltas originadas por curtos-circuitos que envolvam a terra com alta impedância de falta, quando a falta, ainda que de baixa resistência, ocorre nas porções finais da linha, ou ainda quando a fonte do terminal em análise é fraca, se comparada com a fonte do terminal remoto.

Na expectativa de proporcionar melhores resultados na aplicação de métodos baseados em dados de apenas um terminal, este trabalho apresenta adaptações para melhorar o desempenho do método proposto por Wiszniewski [7], método robusto de estimação do local da falta através de dados de apenas um dos terminais e que, como diversos outros métodos, apresenta as limitações citadas no parágrafo anterior.

Além das adaptações no algoritmo, com o intuito de melhorar ainda mais os resultados obtidos com a sua aplicação, este trabalho expõe algumas considerações sobre o processo de estimação dos fasores, faz algumas análises sobre a utilização de valores médios ou medianos de um conjunto de amostras de fasores, apresenta uma formulação para compensação da corrente do reator shunt, para as topologias em que ele é conectado diretamente na LT, e ainda apresenta uma formulação para cálculo da resistência de falta.

## **1.2 – Estrutura da dissertação**

No Capítulo 2, é apresentada a formulação original proposta por Wiszniewski [7], mencionando-se também a formulação de Takagi [6].

Já, no Capítulo 3, são apresentadas as três adaptações propostas para melhorar o desempenho do método proposto por Wiszniewski. Na seqüência, é apresentada a formulação para estimação da resistência de falta.

Ainda, no Capítulo 3, é mostrada a formulação para compensação da corrente do reator, para as topologias em que o reator shunt é conectado diretamente na LT. Nessas topologias, o reator produz erros significativos na estimação do ponto da falta, pois a corrente obtida pela medição é composta de uma parcela proveniente do reator e outra proveniente da LT, tornando-se necessária a identificação de cada parcela separadamente para a aplicação correta no algoritmo. Na seqüência, são apresentados os resultados obtidos em alguns casos reais com a aplicação da citada compensação, separando a corrente da LT da corrente do reator para aplicação no algoritmo. Essa metodologia se mostra muito eficiente, uma vez que a estimação da corrente do reator se baseia em valores nominais do reator, que não variam muito ao longo do tempo, e os cálculos são feitos por equações simples e de cômputo pouco complexo.

Esse capítulo é finalizado com os comentários sobre o processo de filtragem e a demonstração dos resultados da aplicação de valores médios e medianos em fasores obtidos por dois métodos de filtragem (Fourier e Mínimos Quadrados – MMQ).

Para subsidiar a aplicação do algoritmo, é apresentado um estudo paramétrico no Capítulo 4, mostrando o perfil – ao longo da LT – do ângulo de fase entre as correntes de cada um dos dois terminais, tomadas no ponto de falta, em relação à corrente total de falta e denominado neste trabalho ângulo do fator K, ângulo do fator de distribuição ou ângulo  $\lambda$ , indiscriminadamente. Tal estudo se torna importante para avaliação do algoritmo frente a faltas de alta impedância, uma vez que a assimetria das impedâncias dos terminais e da linha de transmissão pode produzir diferenças angulares significativas entre as correntes terminais e, conseqüentemente, produzir variações significativas na estimação do ponto de falta.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações sobre os casos simulados no ATP. Também são apresentadas várias tabelas para análises comparativas dos resultados obtidos frente a variações de alguns parâmetros do sistema e do curto-circuito. Nesse capítulo também é apresentado o desempenho do algoritmo separadamente para cada uma das adaptações propostas. Também são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo proposto em alguns casos reais, mostrando o bom desempenho alcançado, mesmo para faltas de alta resistência.

No último capítulo são apresentadas as principais conclusões, juntamente com algumas considerações sobre a aplicação do algoritmo e as sugestões de continuidade desse trabalho.

---

## Capítulo 2

# Apresentação dos Métodos de Takagi e Wiszniewski

Neste capítulo é apresentada a formulação de Takagi [6] e, em seguida, a formulação de Wiszniewski [7] para localização automática de faltas em LTs com dados de apenas um terminal. Essa ordem – primeiro Takagi e por último Wiszniewski – foi escolhida visando a facilitar o entendimento do capítulo seguinte, que trata das adaptações propostas neste trabalho e que são relativas ao método de Wiszniewski.

Tais formulações apresentam desempenhos diferentes. Em algumas situações, os resultados da estimação proposta pela formulação de Takagi são superiores aos de Wiszniewski, mas, em outras, inferiores [3, 5]. Não é objetivo deste

trabalho apresentar um estudo comparativo do desempenho entre esses dois algoritmos, no entanto, no Capítulo 5, onde são apresentadas as influências da variação de parâmetros na localização da falta frente a várias simulações de curtos-circuitos feitas no ATP, são apresentadas tabelas nas quais foram compilados os resultados obtidos com a aplicação de ambas as formulações, sendo possível uma comparação entre elas.

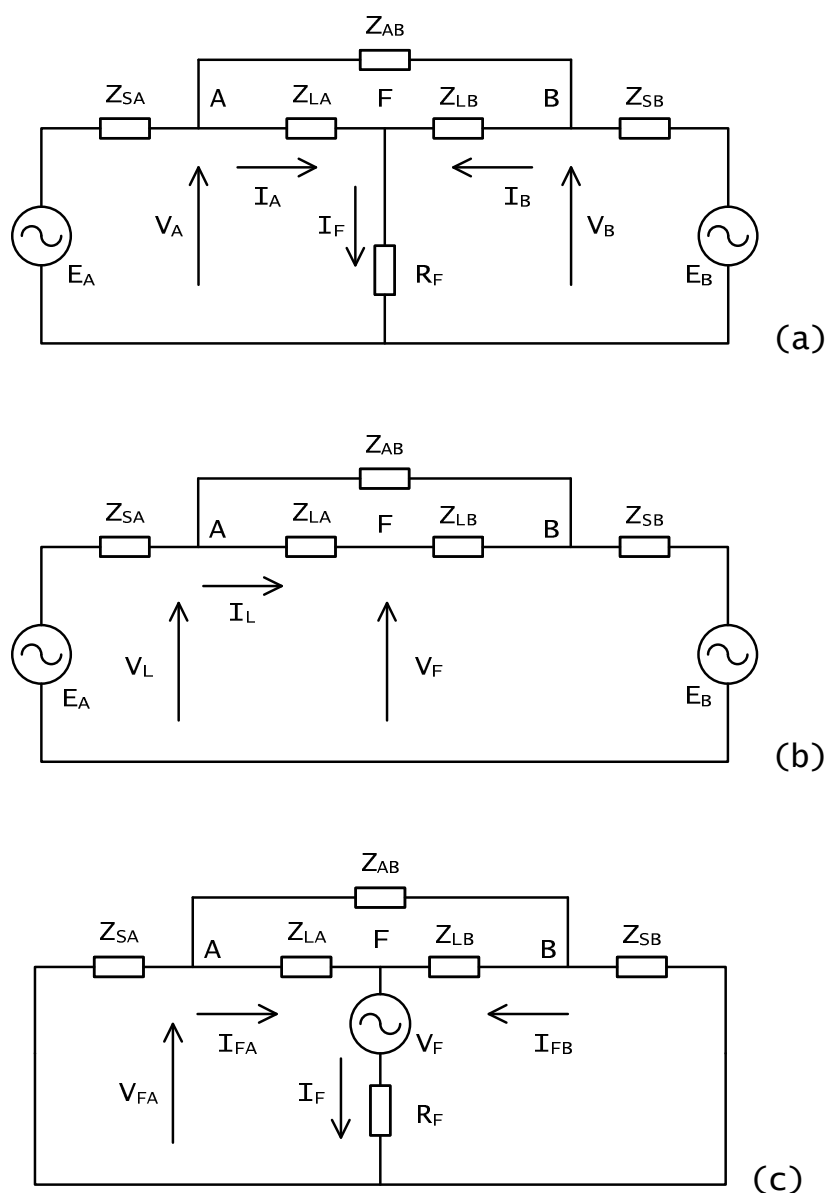


Figura 2.1 - (a) - Circuito de falta  
 (b) - Circuito pré-falta  
 (c) - Circuito puro de falta

## 2.1 – Circuitos unifilares

A Figura 2.1(a) mostra um circuito equivalente a um sistema monofásico, sob falta, no qual as fontes  $E_A$  e  $E_B$  constituem-se de partes do sistema representadas pelos seus equivalentes de Thevenin. A linha de transmissão entre as barras A e B é representada pelas impedâncias  $Z_{LA}$  e  $Z_{LB}$ . A impedância  $Z_{AB}$  representa qualquer possível interligação entre as barras A e B que não a própria linha AB.

As impedâncias  $Z_{SA}$  e  $Z_{SB}$  representam os equivalentes de todo o sistema que se conecta nas barras A e B respectivamente, excetuando-se as conexões entre essas barras.

A Figura 2.1(b) apresenta o mesmo circuito, agora sem falta ou, em outras palavras, no instante pré-falta.

Um circuito puro de falta é apresentado na Figura 2.1(c), no qual se representam apenas as grandezas relacionadas com a falta. Utilizando-se do teorema da superposição, é possível provar que esse circuito pode ser representado pela diferença entre os outros dois circuitos apresentados nas figuras 2.1(a) e (b). Maiores detalhes sobre esses circuitos, bem como a prova da validade do teorema da superposição nesses circuitos podem ser obtidos na referência [5].

## 2.2 – Método de Takagi

O método de Takagi [3, 6] apresenta uma técnica que se baseia nas equações hiperbólicas para linhas longas. Considerando-se a Figura 2.1(a), a tensão no ponto de falta pode ser expressa pela seguinte equação:

$$V_A(d) = R_F \cdot I_F \quad (2.1)$$

A corrente de falta, a partir da Figura 2.1(c), pode ser definida por:

$$I_F = [I_{FA}(d) + I_{FB}(d)] \quad (2.2)$$

Onde  $I_{FA}(d)$  e  $I_{FB}(d)$  são as correntes puras de falta que fluem no ponto de falta.

Substituindo (2.2) em (2.1), obtém-se:

$$V_A(d) = R_F [I_{FA}(d) + I_{FB}(d)] \quad (2.3)$$

A relação entre as correntes puras de falta é função da distância ( $d$ ) entre o terminal local e a falta, e pode ser calculada pela Equação (2.4).

$$k_t(d) = \frac{I_{FB}(d)}{I_{FA}(d)} \quad (2.4)$$

Substituindo-se a Equação (2.4) na Equação (2.3), chega-se à expressão da tensão no ponto de falta:

$$V_A(d) = R_F \cdot I_{FA}(d) [1 + k_t(d)] \quad (2.5)$$

Os valores de  $V_A(d)$  e  $I_{FA}(d)$  podem ser determinados utilizando-se as equações (2.6) e (2.7).

$$V_A(d) = A(d)V_A - B(d)I_A \quad (2.6)$$

$$I_{FA}(d) = C(d)V_{FA} - D(d)I_{FA} \quad (2.7)$$

Sendo  $A(d)$ ,  $B(d)$ ,  $C(d)$  e  $D(d)$  as constantes generalizadas do quadripolo associado ao trecho da linha de transmissão compreendido entre o terminal A e o ponto de falta, definidas para um sistema distribuído, como:



$$A(d) = D(d) = \cosh(\gamma d) \quad (2.8)$$

$$B(d) = Z_C \sinh(\gamma d) \quad (2.9)$$

$$C(d) = \frac{\sinh(\gamma d)}{Z_C} \quad (2.10)$$

As variáveis  $\gamma$  e  $Z_C$  são, respectivamente, a constante de propagação e a impedância característica da linha de transmissão, definidas por:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.11)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.12)$$

Onde  $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$  são, respectivamente, resistência, indutância, condutância e capacitância unitárias da linha de transmissão.

Na aplicação do algoritmo, os valores de  $I_A$ ,  $I_L$ ,  $V_A$  e  $V_L$  apresentados na Figura 2.1 são medidos diretamente no terminal A, enquanto  $I_{FA}$  e  $V_{FA}$  são calculados a partir das equações (2.13) e (2.14), aplicando-se o teorema da superposição.

$$I_{FA} = I_A - I_L \quad (2.13)$$

$$V_{FA} = V_A - V_L \quad (2.14)$$

Substituindo-se as equações (2.6) e (2.7) na expressão (2.5), obtém-se a Equação (2.15).

$$R_F [1 + k_t(d)] = \frac{A(d)V_A - B(d)I_A}{C(d)V_{FA} - D(d)I_{FA}} \quad (2.15)$$

Uma vez que a resistência de falta é puramente resistiva,  $R_F$  é uma variável real. Supondo-se também que a razão  $k_f(d)$  é um valor real, ou seja, que as correntes provenientes das barras A e B estão em fase, o lado direito da Equação (2.15) deve ser real para que a equação seja verdadeira. Com isso obtém-se a expressão (2.16).

$$\text{Im} \left[ \frac{A(d)V_A - B(d)I_A}{C(d)V_{FA} - D(d)I_{FA}} \right] = 0 \quad (2.16)$$

O valor de  $d$  obtido na resolução da Equação (2.16) é o local estimado da falta. Entretanto a equação é não linear, necessitando de uma solução iterativa – nesse trabalho foi utilizado o método de *Newton-Raphson*. Para um sistema trifásico, as tensões e correntes da Equação (2.16) devem ser calculadas de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tensões e correntes para o método de Takagi

GRANDEZA \ FALTA	AT	BT	CT	AB	BC	AC	ABC
$V_A$	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$V_a - V_b$	$V_b - V_c$	$V_a - V_c$	$V_a$
$I_A$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_a - I_b$	$I_b - I_c$	$I_a - I_c$	$I_a$
$V_L$	$V_{La}$	$V_{Lb}$	$V_{Lc}$	$V_{La} - V_{Lb}$	$V_{Lb} - V_{Lc}$	$V_{La} - V_{Lc}$	$V_{La}$
$I_L$	$I_{La}$	$I_{Lb}$	$I_{Lc}$	$I_{La} - I_{Lb}$	$I_{Lb} - I_{Lc}$	$I_{La} - I_{Lc}$	$I_{La}$

### 2.3 – Método de Wiszniewski

A formulação original proposta por *Wiszniewski* [7] consiste na determinação da reatância de seqüência positiva da linha de transmissão através da tensão e corrente da fase sob falta em um dos terminais, conforme se segue:

Da relação entre corrente e tensão da Figura 2.1(a), medidas no terminal A, determina-se a impedância total vista por esse terminal:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} \quad (2.17)$$

Que também pode ser representada por:

$$Z_A = \frac{Z_{LA}I_A + R_F I_F}{I_A} \quad (2.18)$$

ou:

$$Z_A = Z_{LA} + \frac{R_F I_F}{I_A} \quad (2.19)$$

Definindo  $I_{FA}$  como uma parcela de  $I_F$ , tem-se:

$$I_{FA} = K e^{j\lambda} I_F \quad (2.20)$$

Pela Figura 2.1(c), calcula-se a corrente total que flui no ponto de falta, assim:

$$I_F = I_{FA} + I_{FB} \quad (2.21)$$

A corrente pura de falta  $I_{FA}$  pode ser determinada pela Equação (2.13).

Substituindo-se a Equação (2.20) na Equação (2.19), tem-se:

$$Z_A = Z_{LA} + \frac{R_F}{I_A} \frac{I_{FA}}{K e^{j\lambda}} \quad (2.22)$$

Rearranjando os termos:

$$Z_A = Z_{LA} + \frac{R_F}{K} \frac{I_{FA}}{I_A e^{j\lambda}} \quad (2.23)$$

Onde

$I_L$  = Corrente pré-falta;

$K$  = Módulo do Fator de distribuição;

$I_A$  = Corrente da LT medida no terminal A;

$I_{FA}$  = Corrente pura de falta do terminal A;

$I_{FB}$  = Corrente pura de falta do terminal B;

$\lambda$  = Ângulo entre a corrente total de falta ( $I_F$ ) e a corrente pura de falta do

terminal A ( $I_{FA}$ ) no ponto de falta. Este ângulo é também denominado, neste

trabalho, ângulo do fator K ou ângulo do fator de distribuição.

Se as partes real e imaginária de  $Z_A$  são representadas separadamente, tem-se:

$$X_A = X_{LA} + \frac{R_F}{K} b \quad (2.24)$$

$$R_A = R_{LA} + \frac{R_F}{K} a \quad (2.25)$$

Onde

$$a = \operatorname{Re}\left(\frac{I_{FA}}{I_A e^{j\lambda}}\right) \quad b = \operatorname{Im}\left(\frac{I_{FA}}{I_A e^{j\lambda}}\right) \quad (2.26)$$

Reagrupando em função de  $X_{LA}$  e  $R_{LA}$ ,

$$X_{LA} = X_A - \frac{R_F}{K} b \quad (2.27)$$

$$R_{LA} = R_A - \frac{R_F}{K} a \quad (2.28)$$

Assumindo o ângulo  $\lambda$  um valor igual a zero (correntes dos terminais em fase no ponto de falta) e conhecendo-se o ângulo  $\phi_L$  da impedância série da LT, determina-se  $\frac{R_F}{K}$  em função de grandezas conhecidas e, em seguida, é definida a expressão para cálculo de  $X_{LA}$ ,

$$\frac{X_{LA}}{R_{LA}} = \tan(\phi_L) \quad (2.29)$$

Substituindo-se (2.27) e (2.28) em (2.29), tem-se:

$$\left( \frac{X_A - \frac{R_F}{K} b}{R_A - \frac{R_F}{K} a} \right) = \tan(\phi_L) \quad (2.30)$$

Em seguida, colocando-se a resistência de falta em evidência,

$$\frac{R_F}{K} = \frac{R_A \tan(\phi_L) - X_A}{a \cdot \tan(\phi_L) - b} \quad (2.31)$$

E finalmente substituindo-se (2.31) em (2.27), é obtida a expressão final para cálculo da reatância de seqüência positiva vista pelo terminal até o ponto de falta, a saber:

$$X_{LA} = X_A - \frac{R_A \tan(\phi_L) - X_A}{\left(\frac{a}{b}\right) \tan(\phi_L) - 1} \quad (2.32)$$

Sendo a estimativa do ponto de falta dada por:

$$d = \frac{X_{LA}}{X_{LT}} L \quad (2.33)$$

Onde  $X_{LT}$  é a reatância série de seqüência positiva total e L o comprimento da LT.

O equacionamento apresentado foi elaborado para um circuito monofásico. Para permitir a sua aplicação em circuitos trifásicos é necessária a definição das tensões e correntes a serem utilizadas nas equações (2.17) a (2.32), para cada tipo de falta. A tabela a seguir indica esses valores para cada tipo de curto-circuito.

Tabela 2.2 – Valores de tensão e corrente utilizados para cada tipo de falta

FALTA \ GRANDEZA	AT	BT	CT	AB	BC	AC	ABC
$V_A$	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$V_a - V_b$	$V_b - V_c$	$V_a - V_c$	$V_a$
$I_{FA}$	$I_a - I_{La}$	$I_b - I_{Lb}$	$I_c - I_{Lc}$	$I_a - I_L$	$I_a - I_L$	$I_a - I_L$	$I_a - I_L$
$I_A$	$I_a + 3I_0 \cdot K_0$	$I_b + 3I_0 \cdot K_0$	$I_c + 3I_0 \cdot K_0$	$I_a - I_b$	$I_b - I_c$	$I_a - I_c$	$I_a$
$I_L$	$I_{La}$	$I_{Lb}$	$I_{Lc}$	$I_{La} - I_{Lb}$	$I_{Lb} - I_{Lc}$	$I_{La} - I_{Lc}$	$I_{La}$

Onde o fator  $K_0$  é dado por:

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (2.34)$$

Sendo  $Z_1$  e  $Z_0$  as impedâncias de seqüência positiva e seqüência zero da LT respectivamente.

Na Tabela 2.2 foram apresentados apenas valores de fase, podendo, alternativamente, ser utilizada a corrente de neutro  $3I_0$  como corrente pura de falta  $I_{FA}$  para os curtos-circuitos entre uma fase e a terra nessa tabela.

Para o curto-circuito trifásico, os valores de seqüência positiva podem ser utilizados em substituição aos valores de fase, resultando em uma maior exatidão na estimação da falta quando a medição já apresenta valores de seqüência zero e negativa na pré-falta.

As grandezas utilizadas para curto-circuito entre duas fases e a terra podem ser as mesmas utilizadas na Tabela 2.2 para curto-circuito entre duas fases.

Apresentado o método, agora o leitor pode observar que, no algoritmo original de Wiszniewski, são consideradas algumas aproximações para permitir a simplificação das equações:

- ✓ A linha é modelada por parâmetros concentrados e não se levam em conta seus parâmetros transversais, em especial, suas capacitâncias transversais unitárias;

- ✓ A informação de corrente do terminal remoto está embutida no fator  $K$  (considerado um número real, ou seja, correntes terminais consideradas em fase no ponto de falta) e seu módulo é desconhecido;
- ✓ A terceira aproximação utilizada faz considerar que a corrente pura de falta no terminal local  $I_{FA}$  e sua correspondente no ponto de falta  $I_{FA}(d)$  são idênticas. Tal aproximação somente é aceitável para distâncias curtas em linhas de transmissão, onde a presença da capacitância não produz distorção de fase e atenuação na corrente significativas. Para o caso de longas distâncias em linhas de transmissão, a atenuação e distorção de fase passam a ser significativas, a ponto de provocar erros elevados na estimação do ponto da falta.

Diante das aproximações apresentadas, no capítulo seguinte são anunciadas as propostas para melhorá-las, visando a aprimorar o grau de exatidão das estimativas de localização do ponto de falta utilizando a formulação de Wiszniewski.

Na perspectiva de otimizar os resultados da aplicação dessas melhorias no algoritmo, no capítulo seguinte também são apresentadas considerações sobre o processo de obtenção dos fasores da frequência fundamental e sobre o tratamento estatístico dos cálculos amostrais para apresentação do resultado final da estimativa de localização da falta.

---

## Capítulo 3

# Propostas para Melhoria do Algoritmo

Neste capítulo são apresentadas as adaptações para melhorar as aproximações existentes no algoritmo original de Wiszniewski, citadas no final do Capítulo 2. Na seqüência, é apresentada a formulação para estimação da resistência de falta.

Visando a melhorar ainda mais os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo, também é mostrada uma formulação para compensação da corrente do reator, e ao final são apresentados comentários sobre o processo de filtragem e a demonstração dos resultados da aplicação de valores médios e



medianos em fasores obtidos por dois métodos de filtragem (Fourier e Mínimos Quadrados – MMQ).

### 3.1 – Correção da corrente no ponto de falta

Primeiramente é incluída a correção da fase para a corrente pura de falta  $I_{FA}$  que flui pelo ponto de falta.

Conhecido o ponto de falta aproximado, estimado pelo método original, calcula-se, por meio dos parâmetros distribuídos da linha, o valor da corrente no ponto de falta  $I_{FA}(d)$  que deve ser usada em todas as equações apresentadas em substituição à  $I_{FA}$ .

Na figura a seguir é mostrada a corrente  $I_{FA}$  no terminal A, e sua correspondente,  $I_{FA}(d)$ , no ponto de falta F.

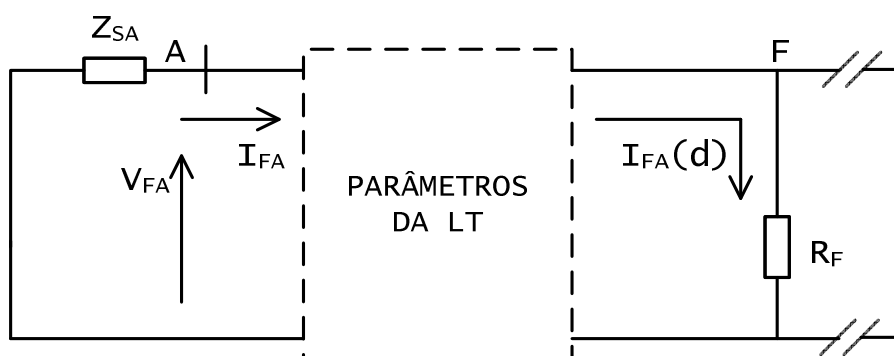


Figura 3.2 – Contribuição de corrente do terminal A para a falta.

Para cálculo dessa corrente, são utilizados os parâmetros distribuídos da LT, conforme se segue:

$$I_{FA}^s(d) = I_{FA}^s \cosh(\gamma^s d) - Y_C^s V_{FA}^s \sinh(\gamma^s d) \tag{3.35}$$

Lembrando que para obtenção de valores de fase, em um sistema trifásico, a corrente no ponto de falta é dada pela soma das contribuições de seqüência, conforme se segue:

$$I_{FA}(d) = I_{FA}^p(d) + I_{FA}^n(d) + I_{FA}^z(d) \quad (3.36)$$

Sendo

$$Z_C^s = \sqrt{\frac{Z_{km}^s}{Y_{km}^s}} \quad (3.37)$$

$$Y_C^s = \frac{1}{Z_C^s} \quad (3.38)$$

$$\gamma^s = \sqrt{Z_{km}^s \cdot Y_{km}^s} \quad (3.39)$$

e

$$Y_{km}^s = \frac{Y_{LT}^s}{L} \quad (3.40)$$

$$Z_{km}^s = \frac{Z_{LT}^s}{L} \quad (3.41)$$

Onde  $L$ ,  $Z_{LT}^s$  e  $Y_{LT}^s$  são respectivamente o comprimento, a impedância e a admitância totais da LT. O sobrescrito “s” denota valores de seqüência e os sobrescritos  $z$ ,  $p$  e  $n$  denotam, respectivamente, as seqüências zero, positiva e negativa.

A referência [8] apresenta maiores detalhes sobre a utilização de parâmetros distribuídos para obtenção de valores de corrente e tensão ao longo da LT.

### 3.2 – Correção do fator de distribuição – fator K

Nesta segunda etapa das adaptações propostas é incluída a correção do fator K, que aqui se faz com o auxílio de um programa de cálculo de curto-circuito ou transitório eletromagnético (tipo ATP – Alternative Transients Program).

De posse do cálculo aproximado do ponto de falta, estimado pelo algoritmo original, simula-se um curto-circuito para esse ponto, e então podem ser obtidas as impedâncias  $Z_{AB}$ ,  $Z_{SA}$  e  $Z_{SB}$  (dados de saída do programa). Após obtenção dessas impedâncias, visando a facilitar o equacionamento das correntes que fluem no ponto de falta, o circuito da Figura 3.3(a) pode ser substituído por seu equivalente, representado pelo circuito da Figura 3.3(b).

As impedâncias equivalentes  $Z_{SAeq}$  e  $Z_{SBeq}$ , são calculadas pela Equação (3.43), e utilizadas em conjunto com os parâmetros distribuídos da linha para determinar as contribuições de corrente de ambos os terminais para a falta –  $I_{FA}(d)$  e  $I_{FB}(d)$ . Essas contribuições de corrente dos terminais são ilustradas na Figura 3.4 e as equações (3.67) e (3.68) são usadas para determiná-las.

Em seguida, aplicando essas correntes na Equação (2.21) de modo a obter  $I_F$ , rearranjando a Equação (2.20) e substituindo a corrente terminal  $I_{FA}$  por sua correspondente  $I_{FA}(d)$ , tem-se o fator  $K$  complexo, em módulo ( $K$ ) e ângulo ( $\lambda$ ):

$$Ke^{j\lambda} = \frac{I_{FA}(d)}{I_F} \quad (3.42)$$

Nos casos em que a impedância  $Z_{AB}$  é muito maior que as impedâncias  $Z_{SA}$  e  $Z_{SB}$ , não é necessária a obtenção de  $Z_{SAeq}$  e  $Z_{SBeq}$  para cada curto-circuito, pois nesses casos a Equação (3.43) se torna praticamente constante para curto-circuito em qualquer ponto da LT, ou seja, basta um curto-circuito em qualquer ponto da LT para obtenção das impedâncias equivalentes.

$$Z_{SAeq} = \frac{E_A - V_{FA}}{I_{FA}} \quad (3.43)$$

De forma análoga é obtida a impedância  $Z_{SBeq}$ , substituindo-se os valores do terminal A pelos do terminal B na Equação (3.43).

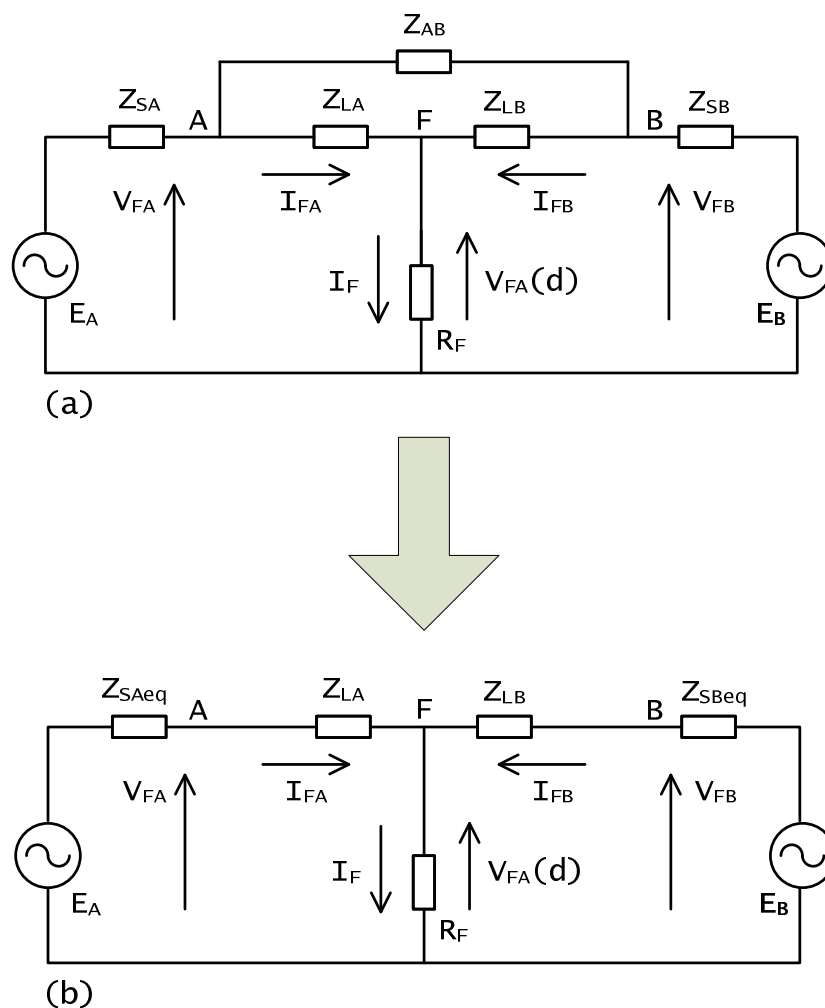


Figura 3.3 – (a) circuito completo  
(b) circuito equivalente

### 3.2.1 – Obtenção das correntes no ponto de falta

A Figura 3.4 ilustra o circuito completo com as fontes de tensão, as impedâncias equivalentes obtidas no programa de curto-circuito, a LT representada pelos seus parâmetros distribuídos e o curto-circuito limitado por uma resistência de falta  $R_F$ . De posse desse circuito é possível determinar as correntes no ponto de falta provenientes de ambos os terminais, desde que conhecidas as tensões e correntes terminais e a distância entre um dos terminais e o ponto de falta.

Considerando que no circuito da Figura 3.4 sejam conhecidas as impedâncias equivalentes  $Z_{SAeq}$  e  $Z_{SBeq}$ , um suposto ponto da falta  $F$  e a tensão nesse ponto

que pode ser dada pela Equação (2.14), utilizando-se dos valores de tensão e corrente pré-falta da Figura 2.1(b), é possível determinar as fontes de tensão  $E_A$  e  $E_B$ . Daí as correntes  $I_{FA}$  e  $I_{FB}$  são determinadas, e utilizando-se dos parâmetros distribuídos da LT, chega-se aos valores de  $I_{FA}(d)$  e  $I_{FB}(d)$ .

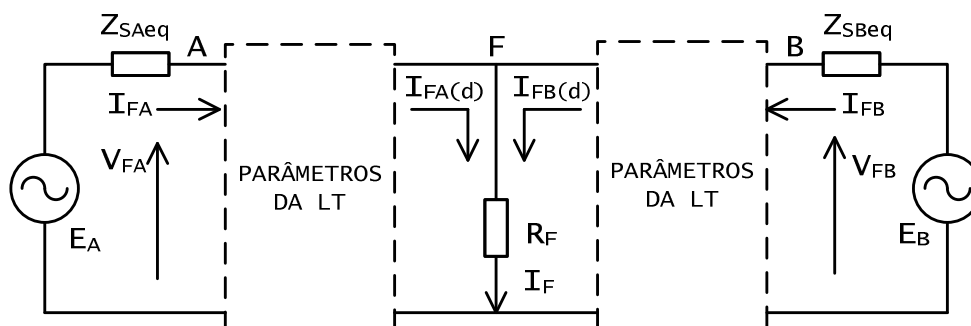


Figura 3.4 - Propagação das correntes terminais até o ponto de falta

A Figura 3.5 mostra um circuito auxiliar com foco em apenas um dos terminais, que será utilizado para desenvolvimento do equacionamento para obtenção da corrente terminal e sua correspondente no ponto de falta.

Sendo conhecidos  $Z_S$ ,  $V_R$ , a distância  $d$  e os valores de corrente e tensão pré-falta, então é possível calcular a corrente  $I_S$  e posteriormente, pela utilização do modelo e dos parâmetros distribuídos da LT, é determinada a corrente  $I_R(d)$  conforme se segue:

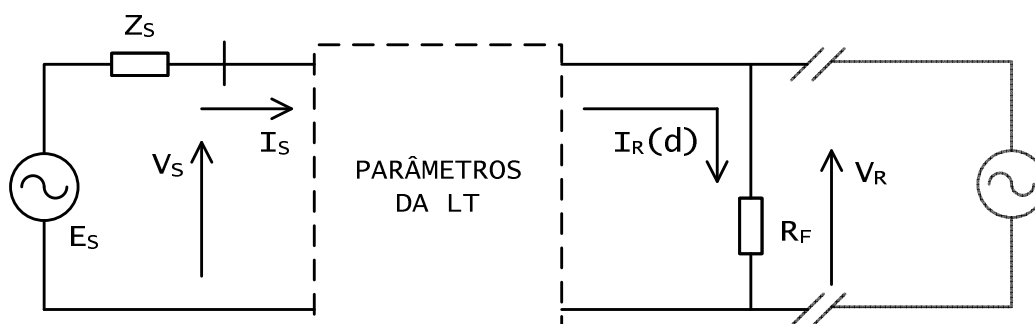


Figura 3.5 - Circuito auxiliar para cálculo da corrente no terminal e no ponto de falta

Inicialmente, as expressões para cálculo da tensão e a corrente na barra são determinadas,

$$V_S = E_S - I_S \cdot Z_S \quad (3.44)$$

$$I_S = \frac{E_S - V_S}{Z_S} \quad (3.45)$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$A = D = \cosh(\gamma d) \quad (3.47)$$

$$B = -Z_C \sinh(\gamma d) \quad (3.48)$$

$$C = -\frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma d) \quad (3.49)$$

$$V_R = A.V_S + B.I_S \quad (3.50)$$

$$I_R = C.V_S + D.I_S \quad (3.51)$$

$$B.I_S = V_R - A.V_S \quad (3.52)$$

$$I_S = \frac{V_R - A.V_S}{B} \quad (3.53)$$

$$V_S = \frac{V_R - B.I_S}{A} \quad (3.54)$$

Substituindo (3.54) em (3.45), tem-se:

$$I_S = \frac{\frac{B.I_S - V_R}{A} + E_S}{Z_S} \quad (3.55)$$

$$I_S \cdot Z_S - \frac{B.I_S}{A} = E_S - \frac{V_R}{A} \quad (3.56)$$

$$I_S \cdot Z_S - \frac{B.I_S}{A} = E_S - \frac{V_R}{A} \quad (3.57)$$

$$I_S \cdot \left( Z_S - \frac{B}{A} \right) = E_S - \frac{V_R}{A} \quad (3.58)$$

Finalmente é obtida a expressão para cálculo da corrente do terminal local em função de parâmetros conhecidos, exceto  $E_S$ , que é determinada pela Equação (3.60):

$$I_S = \frac{\left( E_S - \frac{V_R}{A} \right)}{\left( Z_S - \frac{B}{A} \right)} \quad (3.59)$$

Como se pode perceber, a Equação (3.59) usa os parâmetros distribuídos da LT, implicando em sua utilização apenas para as grandezas de seqüência – positiva, negativa e zero.

Assim, são calculados os valores de seqüência para  $I_S$ , utilizando-se as respectivas grandezas de seqüência na Equação (3.59), ou seja:

$V_R$  – tensão no ponto de falta, calculada pela Equação (3.50), utilizando-se como  $V_S$  e  $I_S$ , respectivamente a tensão e a corrente medidas na barra local durante a falta;

$Z_S$  – impedância equivalente da barra local, calculada a partir do programa de cálculo de curto-circuito;

A/B – parâmetros distribuídos da LT, grandezas calculadas pelas equações (3.47) e (3.48);

$E_S$  - fonte de tensão da barra local, que pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_S = V_{SL} + I_{SL} \cdot Z_S \quad (3.60)$$

Onde  $V_{SL}$  e  $I_{SL}$  são respectivamente tensão e corrente pré-falta medidas na barra local.

Analogamente, são calculados os valores para a corrente do terminal remoto:

$$I_{SR} = \frac{\left( E_{SR} - \frac{V_R}{A} \right)}{\left( Z_{SR} - \frac{B}{A} \right)} \quad (3.61)$$

Onde

$V_R$  – mesma grandeza utilizada na Equação (3.59);

$Z_{SR}$  – impedância de seqüência equivalente da barra remota, fornecida pelo programa de cálculo de curto-circuito;

A/B – mesmas grandezas utilizadas na Equação (3.59);

e

$E_{SR}$  - fonte de seqüência da barra remota, que pode ser calculada pela seguinte equação:



$$E_{SR} = V_{SRL} - I_{SRL} \cdot Z_{SR} \quad (3.62)$$

Onde  $V_{SRL}$  e  $I_{SRL}$  são respectivamente a tensão e a corrente pré-falta na barra remota, que podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$I_{SRL} = C \cdot V_{SL} + D \cdot I_{SL} \quad (3.63)$$

$$V_{SRL} = A \cdot V_{SL} + B \cdot I_{SL} \quad (3.64)$$

Agora que já foram determinadas as equações para as correntes terminais de curto-circuito, e após o cálculo dos valores de tensão em cada terminal, a contribuição de cada terminal para a corrente total de curto-circuito no ponto de falta pode ser determinada.

Primeiramente, são calculados os valores das tensões terminais:

$$V_{SR} = E_{SR} - I_{SR} \cdot Z_{SR} \quad (3.65)$$

$$V_S = E_S - I_S \cdot Z_S \quad (3.66)$$

Daí calcula-se a contribuição de corrente de cada terminal para o ponto da falta:

$$I_R(d) = C \cdot V_S + D \cdot I_S \quad (3.67)$$

$$I_{RR}(d) = C \cdot V_{SR} + D \cdot I_{SR} \quad (3.68)$$

Agora é possível determinar o fator K, bastando substituir as correntes terminais da Equação (3.42) pelas correntes das equações (3.67) e (3.68), onde  $I_R(d)$  substitui  $I_{FA}(d)$  e  $I_{RR}(d)$  substitui  $I_{FB}(d)$ .

Na perspectiva de utilização do equacionamento apresentado para determinação do fator K, são definidos valores de seqüência a serem empregados para cada tipo de curto-circuito, a saber:

- Para curto-circuito envolvendo uma fase e a terra, o fator K é obtido pela utilização apenas de valores de seqüência zero, no caso em que  $I_{FA}$  for dada apenas pela corrente de neutro. Porém, quando  $I_{FA}$  for dada pela corrente de fase, o fator K deve ser obtido pela utilização de todos os valores de seqüência para composição do valor de fase;
- Para curto-circuito envolvendo duas fases ou entre duas fases e a terra, utilizam-se os valores de seqüência positiva e negativa;
- E, para curto-circuito trifásico, são utilizados apenas os valores de seqüência positiva.

Resumindo, os valores de seqüência a serem utilizados na determinação do fator K devem ser os mesmos utilizados para obtenção de  $I_{FA}$  na Tabela 2.2 .

### 3.3 – Introdução do efeito capacitivo da LT

A terceira etapa das adaptações propostas constitui na inclusão da contribuição do efeito capacitivo da LT, buscando uma maior proximidade com a realidade. Para tal, utiliza-se inicialmente o cálculo do ponto de falta pelo método original e, a partir daí, é introduzida a contribuição do efeito capacitivo.

Na verdade, a inclusão do efeito capacitivo é uma tentativa de adaptação dos parâmetros de uma LT completa (RLC) para uma LT reduzida (RL série), ou

seja, busca-se determinar qual é o circuito RL série equivalente ao circuito RLC que – a partir da aplicação, em ambos os circuitos, da corrente e tensão de um dado terminal – permite obter a mesma tensão no ponto de falta.

Lembrando que o algoritmo só permite a utilização de resistência e reatância, procede-se à inclusão, conforme é mostrado nos itens a seguir.

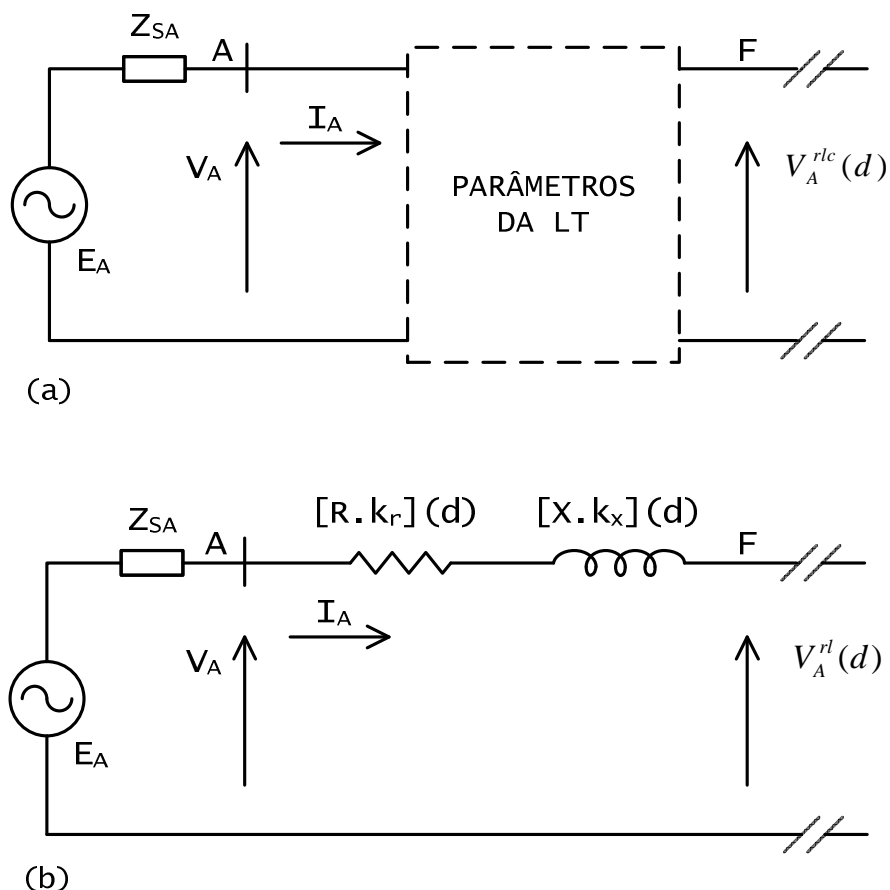


Figura 3.6– (a) Circuito RLC  
(b) Circuito RL Equivalente

### 3.3.1 – Correção da reatância

A correção da reatância correspondente ao trecho de LT compreendido entre o terminal A e o ponto de falta F é basicamente feita pela equivalência entre os circuitos da Figura 3.6. A Figura 3.6(a) apresenta o modelo do trecho de LT compreendido entre o terminal A e o ponto de falta, no qual é considerado o efeito capacitivo da LT; e a Figura 3.6(b) apresenta o modelo do mesmo trecho, considerando-se também tal efeito, porém agora representado por um circuito

RL série que é equivalente (devido à aplicação das constantes  $k_x$  e  $k_r$ ) ao circuito RLC da Figura 3.6(a), ou seja, se aplicados os mesmos valores de tensão e corrente no terminal A de ambos os circuitos, obtém-se o mesmo valor de tensão no ponto F. Em outras palavras,  $V_A^{rl}(d)$  é igual  $V_A^{rlc}(d)$ , doravante denominadas  $V_A(d)$ .

De acordo com a Figura 3.6(a), pode-se expressar a reatância até o ponto de falta F por:

$$X_{LA}^{rlc} = \text{Im} \left( \frac{V_A - V_A(d)}{I_A} \right) \quad (3.69)$$

Onde  $V_A(d)$  representa a tensão no ponto de falta F a uma distância  $d$  do terminal A, e pode ser calculada utilizando-se parâmetros distribuídos da LT, conforme se segue:

$$V_A^S(d) = V_A^S \cosh(\gamma.d) - Z_c I_A^S \sinh(\gamma.d) \quad (3.70)$$

Sendo,

$$\gamma = \sqrt{Z_{km} \cdot Y_{km}} \quad (3.71)$$

$$Z_{km} = \frac{Z_{LT}}{L} \quad (3.72)$$

$$Y_{km} = \frac{Y_{LT}}{L} \quad (3.73)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_{km}}{Y_{km}}} \quad (3.74)$$

e

$Z_{LT}$  – Impedância de seqüência, total da LT;

$Y_{LT}$  – Admitância de seqüência, total da LT;

$L$  - Comprimento total da LT.

Lembrando que para um circuito trifásico o valor de fase é dado pela soma dos três valores de seqüência, tem-se:

$$V_A(d) = V_A^p(d) + V_A^n(d) + V_A^z(d) \quad (3.75)$$

Nas equações (3.70) e (3.75) os subscritos  $s, p, n$  e  $z$  indicam respectivamente grandezas seqüenciais, seqüência positiva, seqüência negativa e seqüência zero. Assim, a Equação (3.70) é utilizada para calcular as três tensões de seqüência no ponto de falta, e a Equação (3.75) é utilizada para calcular o valor da tensão de fase nesse mesmo ponto, sendo obtida pela soma dos valores de seqüência positiva, negativa e zero calculados na Equação (3.70).

Para demonstrar a necessidade da correção da reatância, considere que, na Equação (2.19), sejam conhecidas a resistência de falta  $R_F$  e a corrente total no ponto de falta  $I_F$ . Dessa forma, o valor da tensão no ponto de falta  $V_A(d)$ , dado pela Equação (2.1), pode ser determinado com exatidão.

Reescrevendo a Equação (2.18) e tomando sua parte imaginária, é possível determinar a parcela da reatância da LT compreendida entre a barra A e o ponto de falta F:

$$X_{LA} = \text{Im} \left( \frac{Z_A I_A - R_F I_F}{I_A} \right) \quad (3.76)$$

Essa equação é equivalente à Equação (3.69) e também já leva em conta o efeito capacitivo da LT. Isso significa dizer que, na reatância calculada pelo algoritmo original de Wiszniewski, está embutido o efeito capacitivo da LT, logo, essa não pode ser comparada com a reatância série da LT para estimação do ponto de falta, sendo antes necessária a determinação da relação entre elas.

Pelo método original, a estimação do ponto de falta é feita pela comparação entre a reatância calculada pela Equação (2.32), na qual está embutido o efeito

capacitivo da LT, e a reatância de seqüência positiva da LT  $X_{LT}$ , na qual não se considera o efeito capacitivo, sendo esta apenas a reatância série da LT. Se o leitor observar bem, pode perceber que, na Equação (2.33), são comparadas grandezas de naturezas diferentes: uma reatância – oriunda da Equação (2.32) – composta de parcela indutiva e capacitiva (reatância obtida num circuito RLC) e a outra composta apenas pela indutância série da LT (reatância obtida num circuito RL série).

Para indicação correta do ponto de falta, torna-se necessária a comparação de reatâncias de um mesmo circuito, ou seja, ambas obtidas no circuito RLC ou no circuito RL.

Diante da necessidade de se estabelecer a relação entre as reatâncias desses circuitos, foi utilizada a Equação (3.69) para cálculo da reatância  $X_{LA}^{rlc}$  correspondente ao trecho compreendido entre o terminal A e o suposto ponto de falta localizado na LT a uma distância  $d$  do terminal A. Pelos parâmetros série da LT, é obtida a reatância série  $X_{LA}^{rl}$  correspondente a esse mesmo trecho da LT. Da razão entre essas duas reatâncias, é extraída uma constante denominada  $k_x$ , que é apresentada na Equação (3.77). De posse dessa constante é possível alternar entre reatâncias, possibilitando obter uma delas quando a outra for conhecida.

$$X_{LA}^{rl} = \frac{X_{LA}^{rlc}}{k_x} \quad (3.77)$$

Para cada ponto da LT existe uma relação entre a reatância  $X_{LA}^{rlc}$  calculada pela Equação (3.69) e a reatância  $X_{LA}^{rl}$  obtida pelos parâmetros série da LT.

Substituindo a Equação (3.69) na Equação (3.77), colocando as grandezas em função da distância e rearranjando os termos, tem-se:

$$k_x(d) = \frac{X_{LA}^{rlc}(d)}{X_{LA}^{rl}(d)} = \text{Im} \left( \frac{V_A - V_A(d)}{I_A} \right) \cdot (X_{LA}^{rl}(d))^{-1} \quad (3.78)$$

Onde  $X_{LA}^{rl}$  é a reatância de seqüência positiva da LT obtida nos parâmetros série.

Neste trabalho, optou-se por comparar as grandezas do circuito RL, sendo necessário antes, adaptar a reatância  $X_{LA}^{rlc}$  para sua correspondente  $X_{LA}^{rl}$  no circuito RL, dada pela Equação (3.77).

### 3.3.2 – Correção da resistência

De forma análoga, para correção da resistência, procede-se:

$$R_{LA}^{rl} = \frac{R_{LA}^{rlc}}{k_r} \quad (3.79)$$

onde

$$R_{LA}^{rlc} = \text{Re} \left( \frac{V_A - V_A(d)}{I_A} \right) \quad (3.80)$$

e

$$k_r(d) = \text{Re} \left( \frac{V_A - V_A(d)}{I_A} \right) (R_{LA}^{rl}(d))^{-1} \quad (3.81)$$

Nas sucessivas estimativas do ponto de falta, esse valor aproxima-se cada vez mais do valor exato da resistência da LT entre o terminal A e o ponto de falta real F.

Feitas as correções da reatância e da resistência, segue-se com a correção da tangente do ângulo da impedância da LT:

Substituindo (3.77) e (3.79) em (2.29),

$$\frac{\left( X_{LA}^{rlc} / k_x \right)}{\left( R_{LA}^{rlc} / k_r \right)} = \tan(\phi_L) \quad (3.82)$$

Rearranjando os termos,

$$\frac{X_{LA}^{rlc}}{R_{LA}^{rlc}} = \tan(\phi_L) \frac{k_x}{k_r} \quad (3.83)$$

Fazendo  $\frac{k_x}{k_r} = k_{xr}$  e aplicando a Equação (3.83) com essa correção em (2.31),

$$\frac{R_F}{K} = \frac{R_A \tan(\phi_L) k_{xr} - X_A}{a \cdot \tan(\phi_L) k_{xr} - b} \quad (3.84)$$

Computando a correção de (3.84) em (2.27), obtém-se:

$$X_{LA}^{rlc} = \left[ X_A - \frac{R_A \tan(\phi_L) k_{xr} - X_A}{\left( \frac{a}{b} \right) \tan(\phi_L) k_{xr} - 1} \right] \quad (3.85)$$

E, finalmente, substituindo (3.85) em (3.77), tem-se a expressão final corrigida para cálculo da reatância série até o ponto de falta:

$$X_{LA}^{rl} = \left[ X_A - \frac{R_A \tan(\phi_L) k_{xr} - X_A}{\left( \frac{a}{b} \right) \tan(\phi_L) k_{xr} - 1} \right] k_x^{-1} \quad (3.86)$$

Nas sucessivas estimativas do ponto de falta, esse valor de reatância aproxima-se cada vez mais do valor exato da reatância da LT entre o terminal A e o ponto de falta real F.

Sendo a estimativa do ponto de falta dada por:



$$d = \frac{X_{LA}^r}{X_{LT}} L \tag{3.87}$$

Onde  $X_{LT}$  é a reatância série de seqüência positiva total e L o comprimento da LT.

Apresentadas as três adaptações (que se constituem no método proposto), a seguir é mostrado um fluxograma que ilustra o processo de estimação do ponto de falta por meio dessa metodologia.

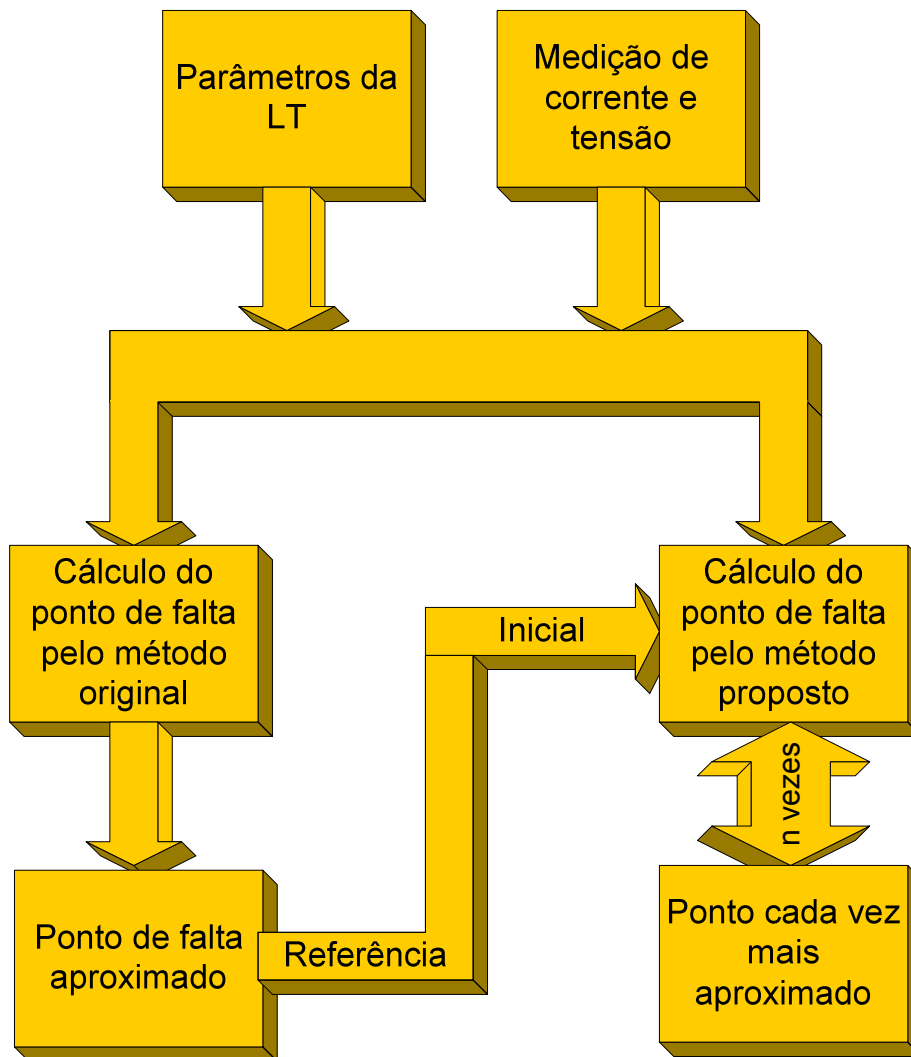


Figura 3.7 - Fluxograma de cômputo do ponto de falta pelo método proposto

Na Figura 3.7 o critério de parada pode ser dado por um número  $n$  de interações ou quando o valor da estimativa do ponto de falta atual subtraído do anterior, apresentar um diferença muito pequena.

O método proposto neste capítulo é constituído de três adaptações que, aplicadas em conjunto, proporcionam significativas melhorias no desempenho desse algoritmo quando comparado com o original.

A figura a seguir mostra a seqüência para aplicação das adaptações propostas nas equações apresentadas nesse capítulo.

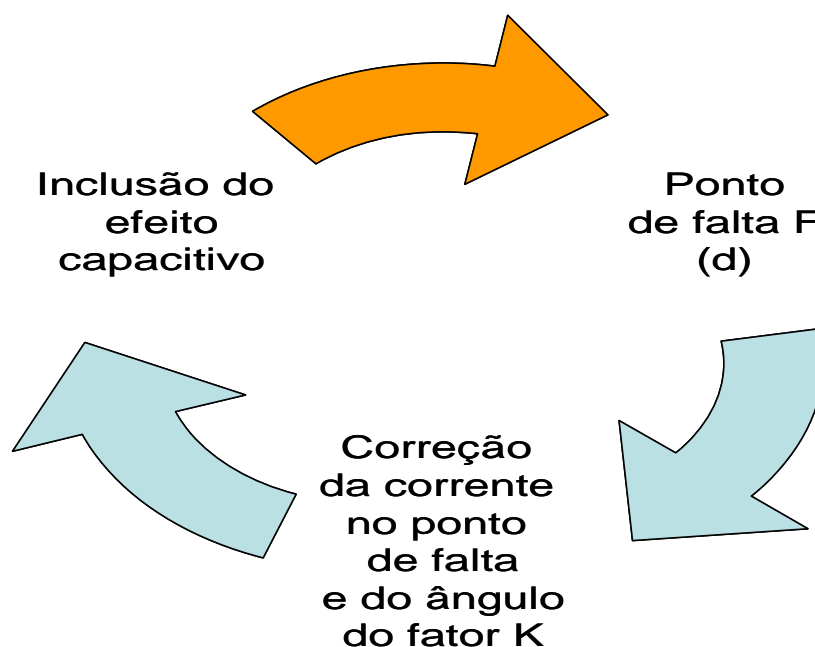


Figura 3.8 – Seqüência do equacionamento das adaptações

### 3.4 – Estimação da resistência de falta - $R_F$

Em alguns casos a identificação do valor da resistência de falta, mesmo que aproximado, é tão importante quanto a estimação do local da falta. Por exemplo, um curto-circuito entre duas fases sem envolver a terra e de alta impedância pode estar relacionado com *galhos de árvore lançados diretamente sobre a linha de transmissão*, para esse mesmo curto-circuito se a resistência de falta for baixa, a suspeita da causa se torna outra: *fogo sob a linha de*

*transmissão (queimada)*. Neste exemplo a prioridade para inspeção da linha pela equipe de manutenção pode ser totalmente diferenciada.

Outro ponto importante na determinação da resistência de falta é a avaliação da qualidade da localização da falta, quanto maior a resistência, maior atenção deve ser dispensada para avaliar a consistência da estimativa.

Além das melhorias propostas para o algoritmo, o conjunto de adaptações propostas neste trabalho permite estimar a resistência de falta.

Após a obtenção do fator K já descrita nesse capítulo, é possível estimar com boa exatidão a resistência existente no ponto de falta.

O equacionamento para obtenção de  $R_F$  é mostrado a seguir, e é o mesmo para todos os quatro tipos de falta apresentados na figura a seguir.

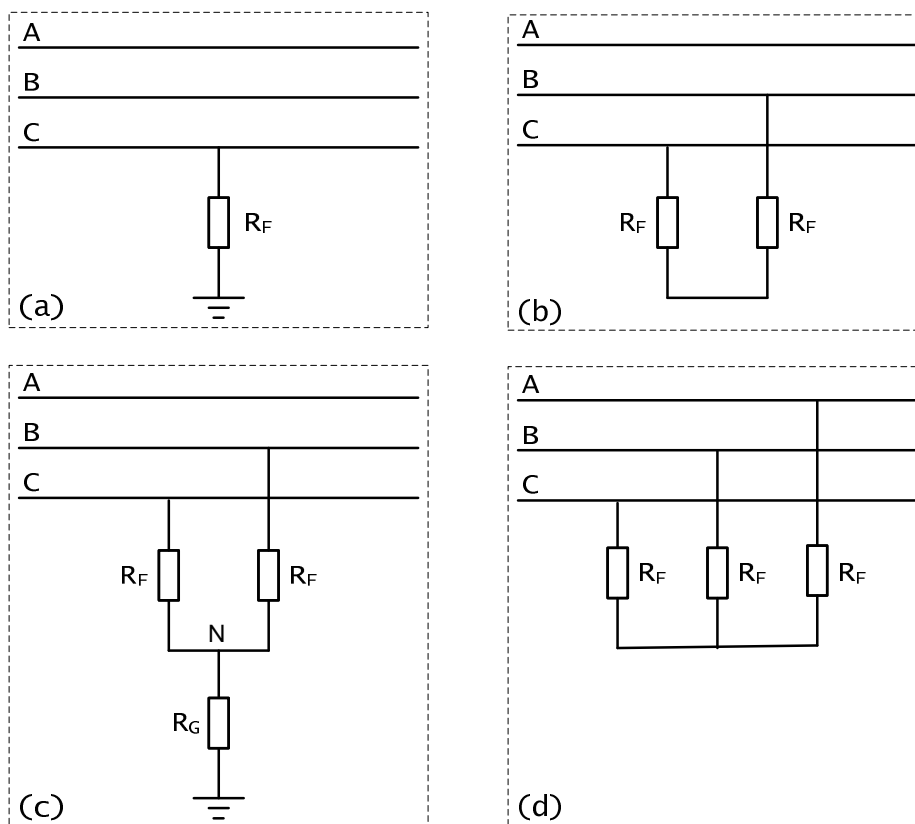


Figura 3.9 – Tipos de falta

(a) monofásico (b) bifásico (c) bifásico e terra (d) trifásico

Conhecido o valor do fator K dado pela Equação (3.42), aplicando esse valor na Equação (3.84) e rearranjando os termos, resulta:

$$R_F = \frac{R_A \tan(\phi_L) k_{xr} - X_A}{a \cdot \tan(\phi_L) k_{xr} - b} K \quad (3.88)$$

Onde todas as variáveis são conhecidas, logo a resistência  $R_F$  pode ser determinada.

A resistência  $R_G$  indicada na Figura 3.9(c) também pode ser estimada, conforme se segue:

Primeiramente é determinada a tensão no ponto N da Figura 3.9(c) utilizando-se das grandezas da fase C:

$$V_N^C = V_C' - I_C'' \cdot R_F \quad (3.89)$$

Em seguida determina-se essa mesma tensão utilizando-se das grandezas da fase B:

$$V_N^B = V_B' - I_B'' \cdot R_F \quad (3.90)$$

Agora a tensão no ponto N pode ser calculada pela média entre essas duas tensões:

$$V_N = \frac{V_N^B + V_N^C}{2} \quad (3.91)$$

E a expressão de  $R_G$  pode ser dada por:

$$R_G = \frac{V_N}{I_G} \quad (3.92)$$

Sendo, as tensões  $V'_B$  e  $V'_C$  obtidas no ponto de falta pela utilização dos parâmetros distribuídos da LT e as correntes  $I''_B$  e  $I''_C$  se referem as correntes puras de falta que fluem pela resistência  $R_F$ , sendo também obtidas pelos parâmetros distribuídos da LT. A corrente  $I_G$  refere-se à corrente de terra ou  $3I_0$ .

Para calcular  $R_G$  é necessário antes, calcular  $R_F$ , cujo valor é considerado o mesmo para ambas as fases na Figura 3.9(c). Entretanto, em casos reais, os valores de  $R_F$  podem ser diferentes para cada uma das fases, logo, o valor estimado de  $R_G$  pode apresentar discrepâncias em relação ao valor real. da mesma forma, as tensões  $V_N^B$  e  $V_N^C$  podem apresentar significativas diferenças, indicando que as resistências das fases são diferentes.

### 3.5 – Compensação da corrente do reator

Em algumas topologias do sistema, existem certas situações que não são ideais para aplicação direta dos algoritmos de localização de faltas. Uma delas – e que não é rara em linhas de transmissão longas – consiste na presença de reatores conectados diretamente na linha de transmissão e localizados após o transformador de corrente da medição (sentido da barra para a LT), promovendo, assim, uma “contaminação” da medição e, conseqüentemente, erros na localização da falta.

Para permitir a aplicação correta dos algoritmos, é necessário retirar a contribuição de corrente do reator da medição da linha.

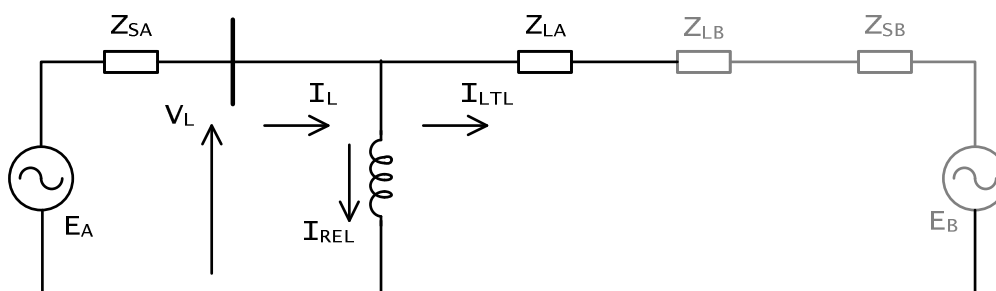


Figura 3.10 – Corrente no reator na pré-falta

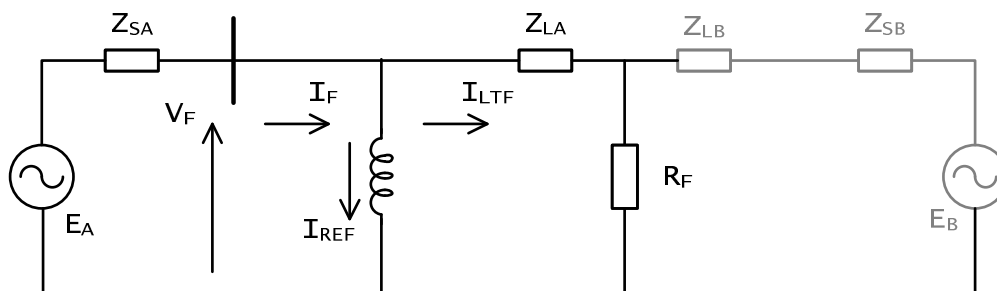


Figura 3.11 – Corrente no reator durante a falta

A seguir, são apresentadas as equações e exemplos de ganhos obtidos com a sua aplicação.

De posse da sua potência e tensão nominais, é calculado o valor da contribuição de cada reator na pré-falta e durante a falta.

Sendo a contribuição na pré-falta representada por:

$$I_{REL} = \frac{V_L \cdot P_{RE}}{V_{RE}^2 \cdot j} \quad (3.93)$$

E a contribuição durante a falta por:

$$I_{REF} = \frac{V_F \cdot P_{RE}}{V_{RE}^2 \cdot j} \quad (3.94)$$

Onde

$V_L$  é a tensão pré-falta de cada fase no terminal onde está conectado o reator, em kV;

$V_F$  é a tensão de cada uma das fases durante a falta, em kV;

$P_{RE}$  é a potência trifásica nominal do reator, em Mvar;

$V_{RE}$  é a tensão nominal do reator, em kV.

Conhecida a contribuição por fase, agora é só retirá-la da medição. O resultado é uma corrente que passa somente na linha, conforme mostrado a seguir:

Corrente pré-falta pura da LT:

$$I_{LTL} = I_L - I_{REL} \tag{3.95}$$

E, corrente pura da LT durante a falta:

$$I_{LTF} = I_F - I_{REF} \tag{3.96}$$

Nas equações (3.95) e (3.96) são fornecidas as expressões para obtenção da corrente pura que realmente é injetada na LT, lembrando que na primeira parcela após a igualdade a corrente de fase é “contaminada” com a contribuição do reator, e na segunda é a contribuição pura do reator.

Como o reator é conectado logo no início da LT, o valor de tensão é praticamente o mesmo de onde está conectado o transformador de potencial da medição, dispensando cálculos para sua compensação.

*Tabela 3.3 – Efeito da corrente do reator na localização da falta*

Caso	Tipo de falta	Compensação da corrente do reator	Novo Wiszniewski			Wiszniewski original		
			km	% da LT	Diferença %	km	% da LT	Diferença %
1	Fase BR com Terra	Não	312,6	91,2	4,2	317,0	92,5	3,2
1	Fase BR com Terra	Sim	298,1	87,0		306,0	89,2	
2	Fase AZ com Terra	Não	318,8	93,0	4,0	322,6	94,1	3,2
2	Fase AZ com Terra	Sim	305,1	88,9		311,6	90,8	

Avaliando-se os valores de contribuições da LT e do reator para um curto-circuito, é possível inferir que quanto menor a contribuição do terminal, maior se torna o erro imposto na localização pela corrente do reator, ou seja, para faltas de elevada resistência ou muito distantes do terminal local, maior a influência da corrente do reator na localização.

Para faltas de baixa impedância ou próximas ao terminal local, são esperadas contribuições de corrente elevadas. Nesses casos, a influência da corrente do reator na localização da falta é reduzida.

### 3.6 – Considerações sobre o processo de filtragem

Já foram citadas as três adaptações que contribuem para a melhoria da exatidão do algoritmo. Na perspectiva de aplicação desse algoritmo adaptado, ainda é possível incluir algumas considerações ao processo de filtragem para obtenção dos fasores de modo a melhorar a exatidão da estimativa do ponto de falta.

O processo de obtenção dos fasores para uma frequência específica a partir de uma onda no domínio do tempo é chamado de estimação de fasores.

Uma metodologia usada para estimação de fasores é a aplicação de uma janela de amostras que permita a obtenção do fasor em determinada frequência, e que é feita pela movimentação dessa janela ao longo da onda no domínio do tempo, de modo a obter um fasor para cada posição da janela na onda.

Sabe-se que a utilização da transformada de Fourier para estimação de fasores de uma onda não estacionária no tempo (por exemplo, uma senóide sobreposta a uma onda exponencial) resulta em oscilação do fasor em torno do seu valor real ou estabilizado. Entende-se aqui por valor real o resultante da estimação dos fasores da onda senoidal pura, quando o efeito da exponencial ou de outra forma de onda associada já tenha sido completamente atenuado, ou seja, quando a onda senoidal se encontre plenamente estabilizada.

Através de simulações em programas de cálculo de transitórios eletromagnético e também na aplicação de filtros no Matlab® é possível verificar que, para ondas senoidais sobrepostas a exponenciais – caso típico que ocorre nos primeiros ciclos de um curto-circuito em uma linha de transmissão –, o fasor extraído pela aplicação do método de Fourier oscila em torno do valor real ou estabilizado, conforme pode ser visto na Figura 3.18 ou 3.22, nas quais o valor estabilizado seria 707,1.

---



Para aplicação no algoritmo é importante obter o valor do fasor estabilizado, o qual representa o valor de real interesse ou, na falta desse, aplicar os valores de fasores disponíveis (que podem conter oscilações em torno do valor estabilizado), e somente depois, fazer um tratamento estatístico para determinação do ponto de falta.

Entretanto, nem sempre esse tratamento estatístico proporciona bons resultados. Por outro lado, em muitos casos não é possível obter o valor do fasor estabilizado, uma vez que o tempo típico de eliminação de falta pela proteção de linhas de transmissão – relé mais disjuntor – em sistemas de alta e extra alta tensão está entre dois ciclos e meio e cinco ciclos, dessa forma, o efeito da exponencial presente na onda de corrente pode ainda se mostrar atuante.

Não sendo possível a obtenção direta do fasor estabilizado, a solução passa então, pela aproximação do conjunto de amostras de fasores disponíveis pela utilização de alguma função estatística.

Neste trabalho optou-se por comparar a aplicação de duas funções estatísticas: *média e mediana*.

A média pode ser determinada de diversas maneiras, sendo a mais utilizada a média aritmética, calculada pela soma dos valores dividida pelo número de observações [3].

Já a mediana é uma medida de localização do centro da distribuição das amostras de um conjunto, que é calculada do seguinte modo: ordenadas as amostras no conjunto, a mediana é o valor, pertencente ou não ao conjunto, que o divide ao meio, isto é, 50% das amostras do conjunto são menores ou iguais à mediana e os outros 50% são maiores ou iguais à mediana. Se o número de amostras do conjunto foi ímpar, a mediana é o valor central, ou seja, se tivermos, por exemplo, nove amostras, a mediana será a quinta amostra. Se o número de amostras do conjunto for par, a mediana é a semi-

---

soma das duas amostras centrais, ou seja, se tivermos, por exemplo, dez amostras, a mediana será a média aritmética da quinta e da sexta amostra [3].

De posse dessas considerações, a utilização da mediana parece mais adequada para obtenção do fasor estabilizado, uma vez que as oscilações presentes nos fasores não são simétricas (oscilação com atenuação exponencial, vide Figura 3.22).

### 3.6.1 – Casos estudados para aplicação de média e mediana

A seguir são apresentados três casos para estudo, onde pode ser atestado o melhor desempenho da mediana frente à média na obtenção de fasores estabilizados para os métodos de Fourier e de Mínimos Quadrados – MMQ (o método de MMQ aplicado foi o mesmo utilizado na referência [3]).

Foi utilizada uma frequência de 32 amostras por ciclo para obtenção das ondas apresentadas, sendo, também essa frequência utilizada na janela para estimação dos fasores.

Para o *caso 1* o valor de pico da onda senoidal é 100 e o valor do fasor eficaz (RMS) estabilizado esperado é 70.71. Para os *casos 2* e *3*, esses valores são 1000 e 707.1 respectivamente, e foram diferenciados do *caso 1* para verificar a influencia da amplitude na estimação e na oscilação dos fasores, não sendo percebida nenhuma influencia significativa nesse sentido. Os valores nas figuras seguintes não foram associados a nenhuma grandeza, pois não acrescenta melhorias em termos de análise. Entretanto podem ser entendidos como valores de corrente, uma vez que a assimetria apresentada nessas figuras é observada em corrente de curto-circuito.

As referências [3, 4] apresentam formulações para estimação de fasores pelos métodos de Mínimos Quadrados e Fourier, respectivamente.

---

**Caso 1 – Rampa + senóide + exponencial**

Nesse caso é apresentada uma onda senoidal acrescida de uma rampa e uma exponencial, representando a onda fundamental, o efeito de uma resistência variando no tempo e a assimetria presente no início de um curto-circuito, respectivamente.

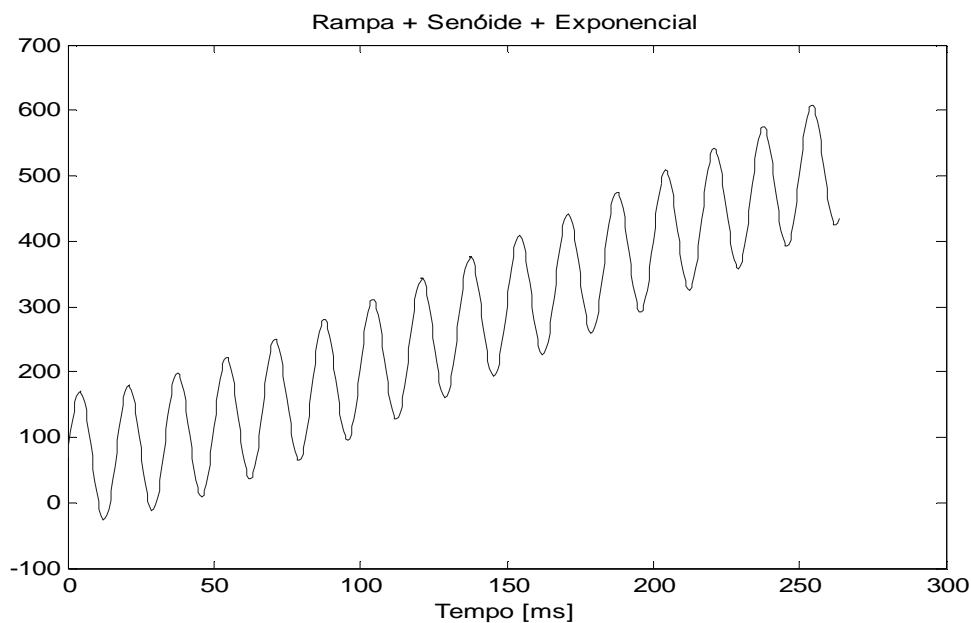


Figura 3.12 – Onda composta de rampa, senóide e exponencial

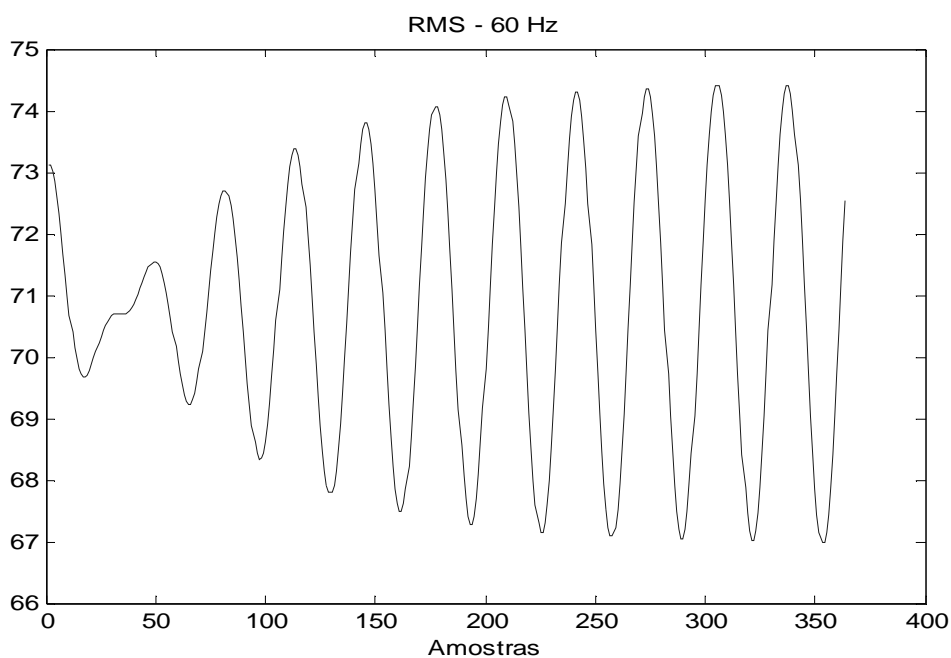


Figura 3.13 – Módulo do fasor Fourier – 360 amostras

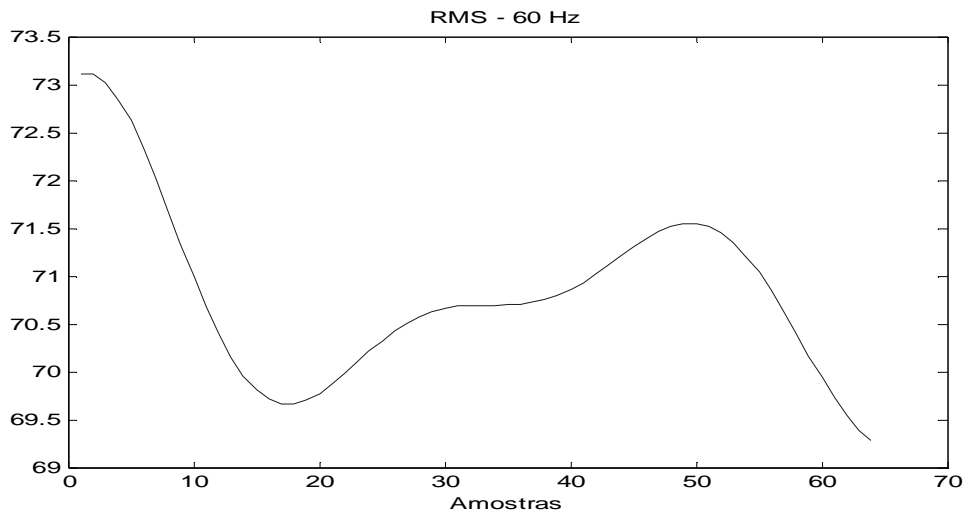


Figura 3.14 - Módulo do fasor Fourier 64 amostras (dois ciclos)

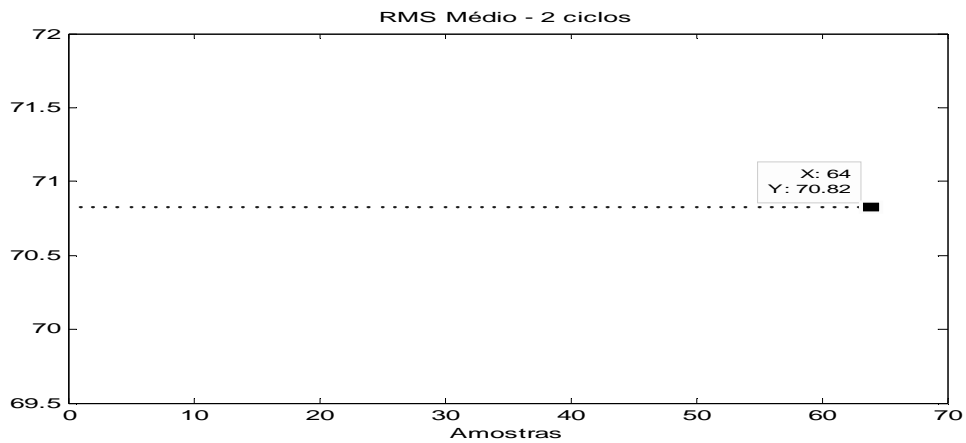


Figura 3.15 - Módulo do fasor Fourier médio 64 amostras (dois ciclos)

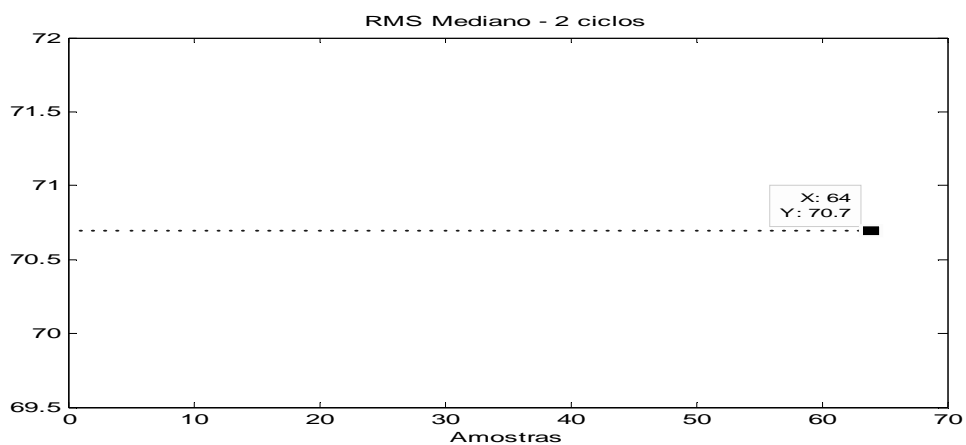


Figura 3.16 - Módulo do fasor Fourier mediano 64 amostras (dois ciclos)

*Caso 2 – Senóide + exponencial (curto-circuito com moderada assimetria)*

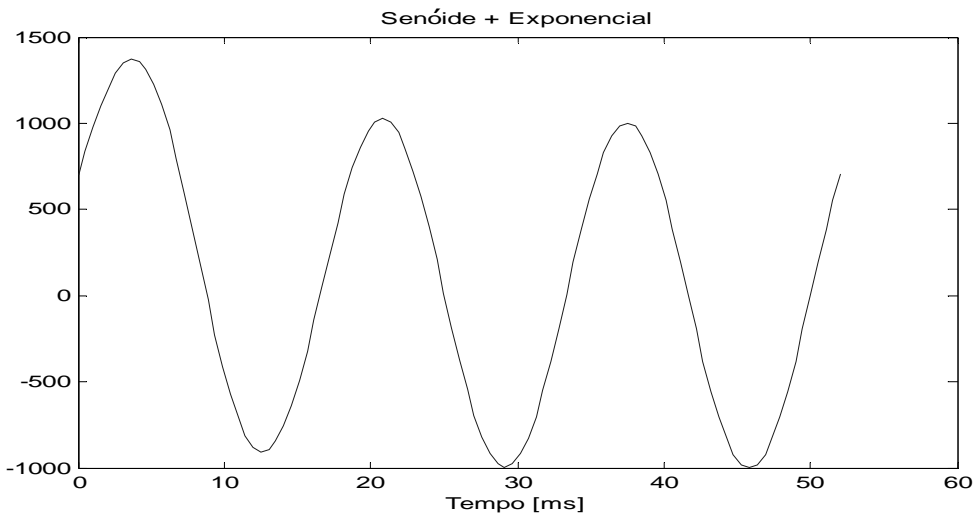


Figura 3.17 - Onda composta de senóide e exponencial

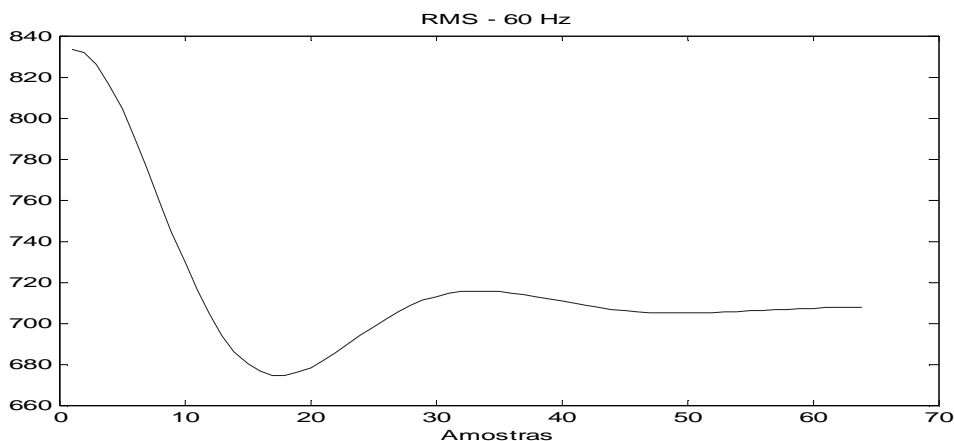


Figura 3.18 - Módulo do fasor Fourier 64 amostras (dois ciclos)

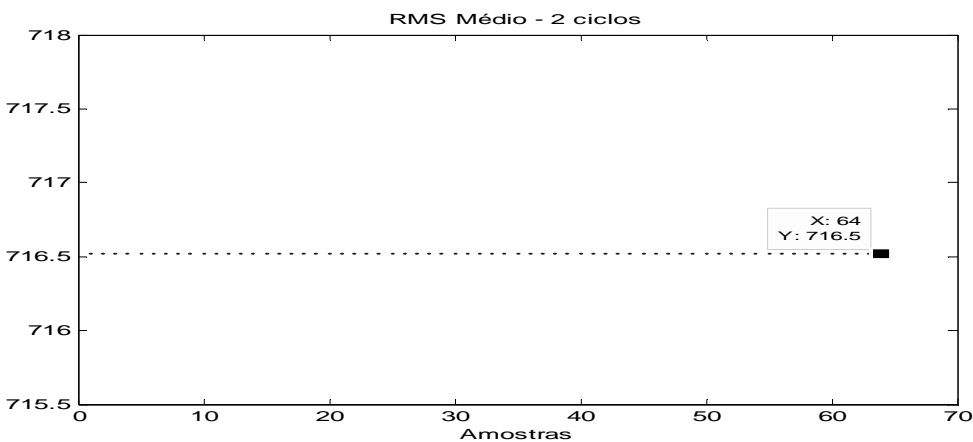


Figura 3.19 - Módulo do fasor Fourier médio 64 amostras (dois ciclos)

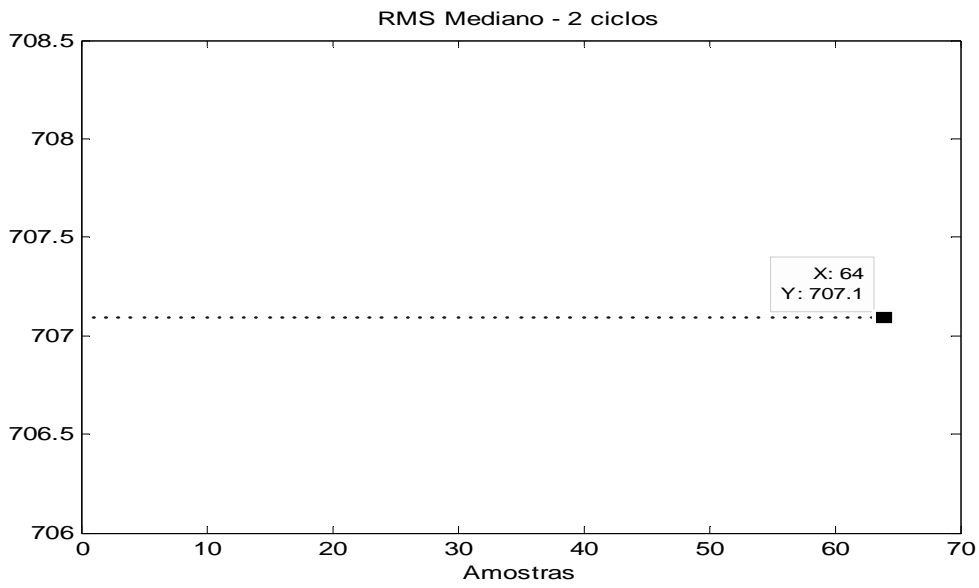


Figura 3.20 - Módulo do fasor Fourier mediano 64 amostras (dois ciclos)

*Caso 3 – Senóide + exponencial (curto-circuito com elevada assimetria)*

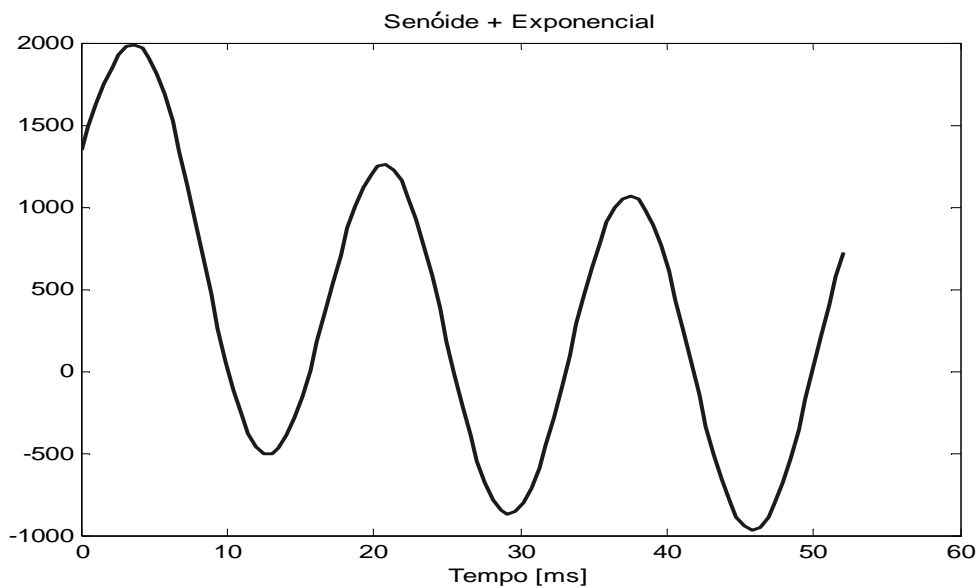


Figura 3.21 - Onda composta de senóide e exponencial

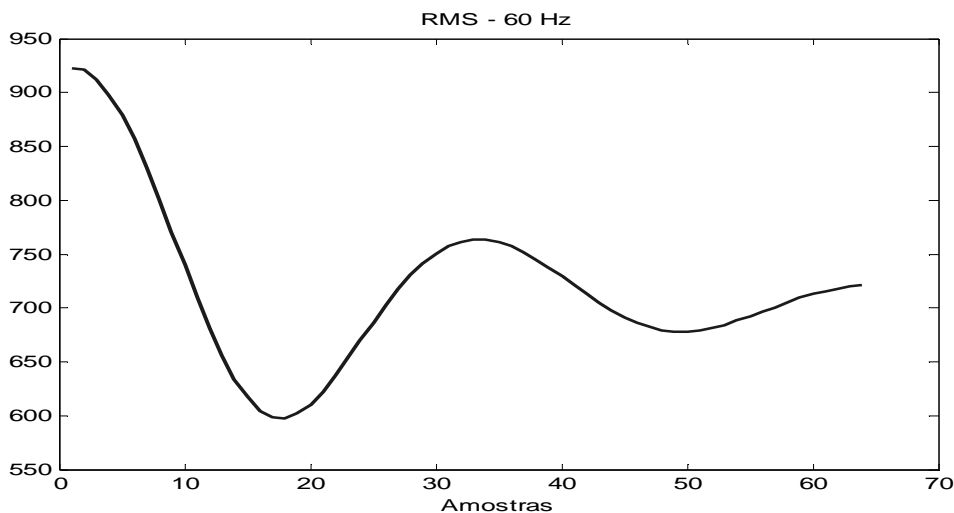


Figura 3.22 - Módulo do fasor Fourier 64 amostras (dois primeiros ciclos)

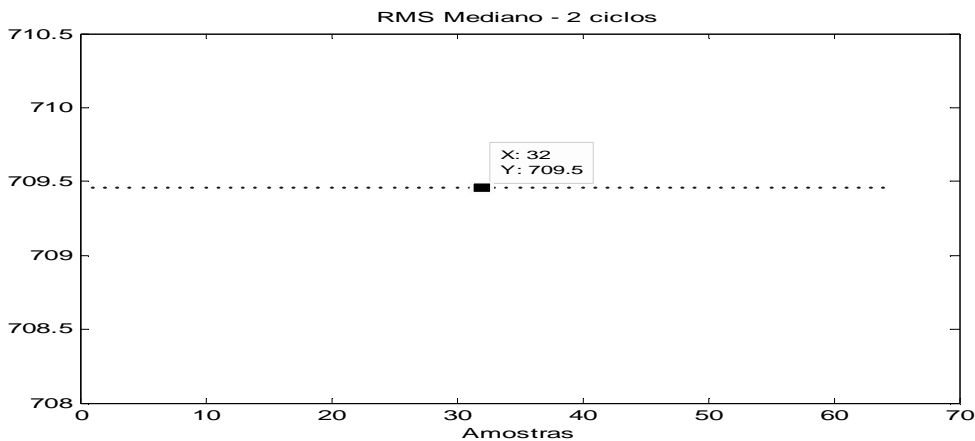


Figura 3.23 - Módulo do fasor Fourier mediano 64 amostras (dois primeiros ciclos)

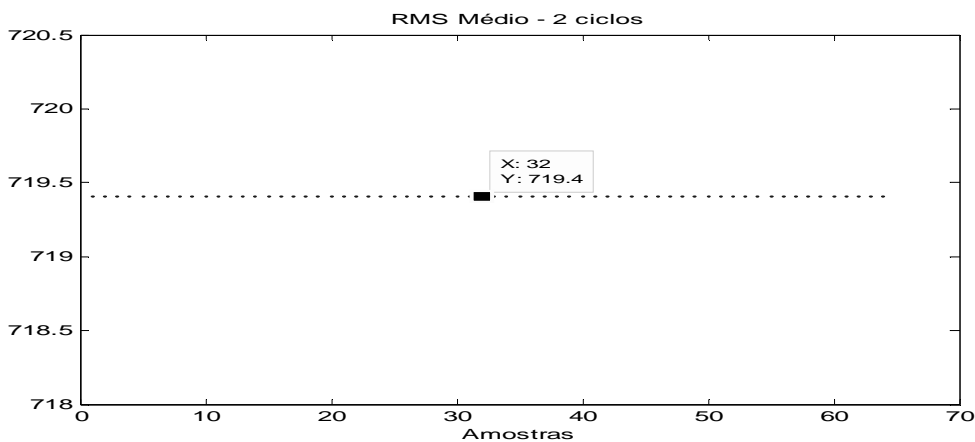


Figura 3.24 - Módulo do fasor Fourier médio 64 amostras (dois primeiros ciclos)

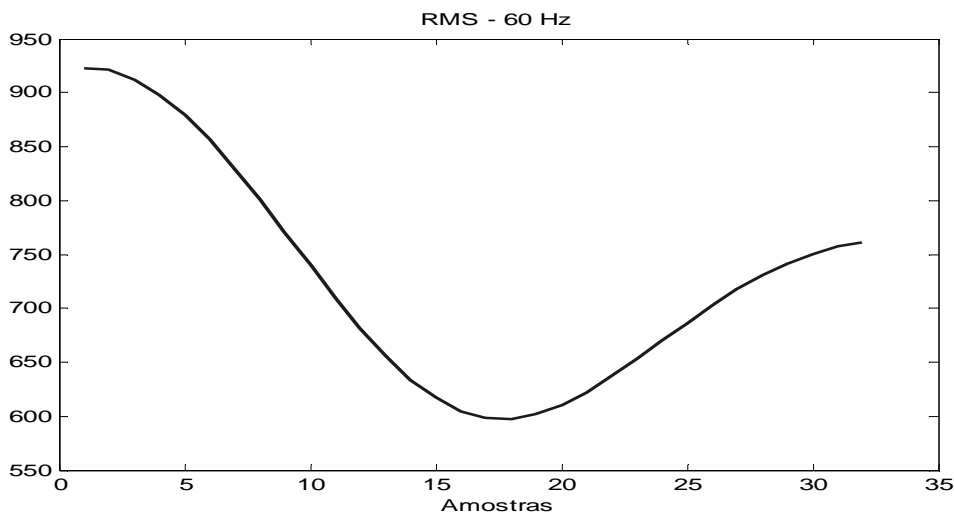


Figura 3.25 - Módulo do fasor Fourier 32 amostras (primeiro ciclo)

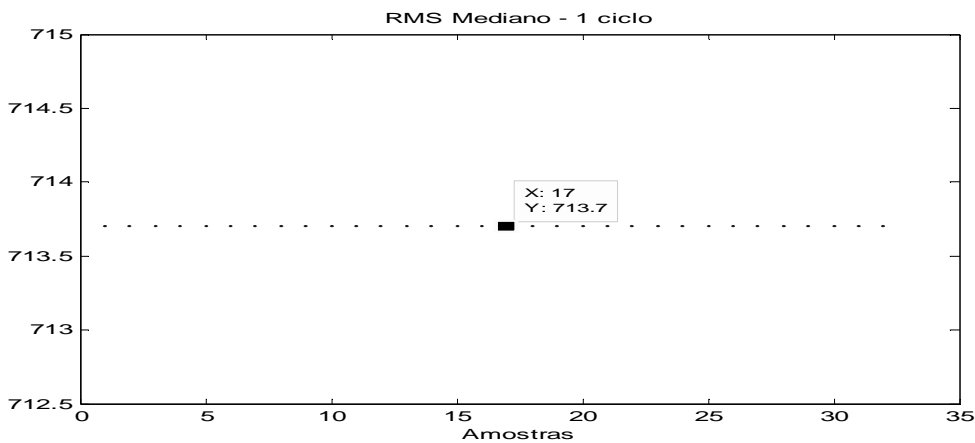


Figura 3.26 - Módulo do fasor Fourier mediano 32 amostras (primeiro ciclo)

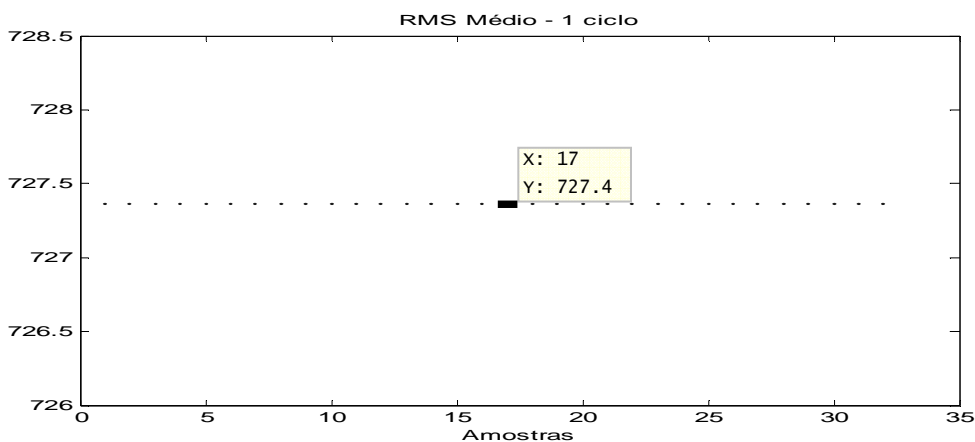


Figura 3.27 - Módulo do fasor Fourier médio 32 amostras (primeiro ciclo)



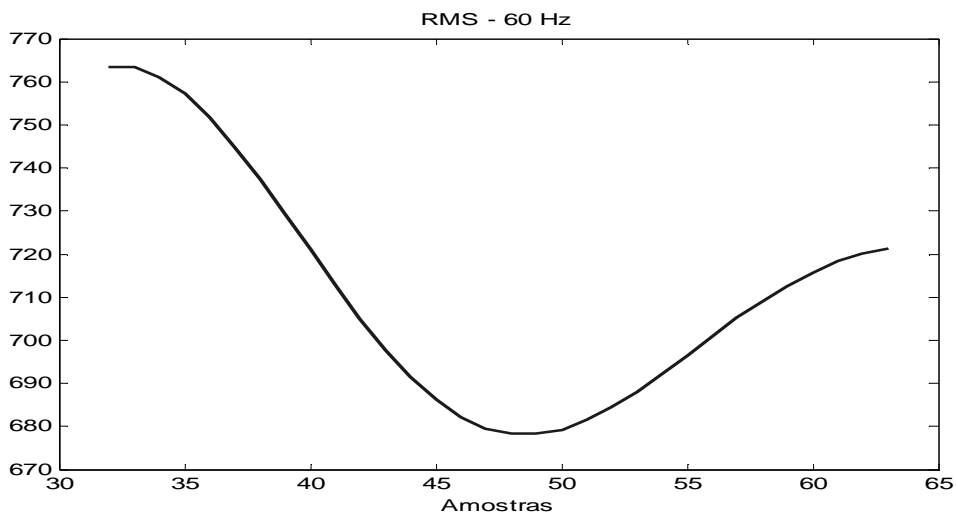


Figura 3.28 - Módulo do fasor Fourier 32 amostras (segundo ciclo)

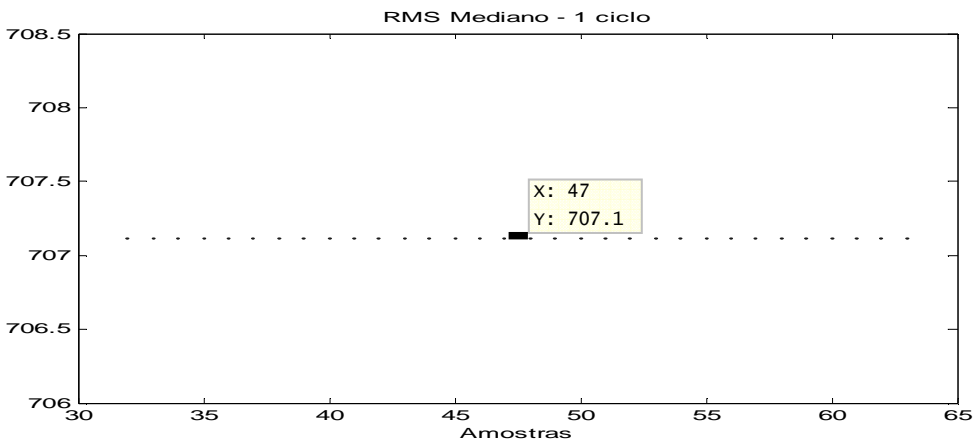


Figura 3.29 - Módulo do fasor Fourier mediano 32 amostras (segundo ciclo)

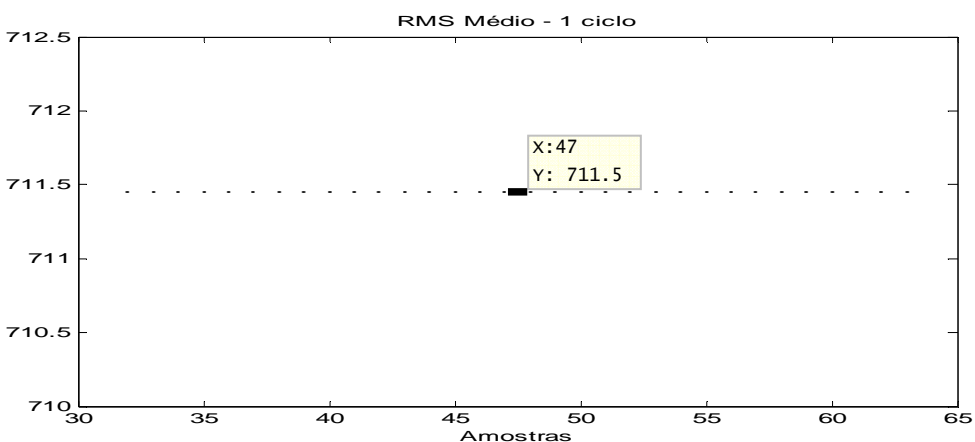


Figura 3.30 - Módulo do fasor Fourier médio 32 amostras (segundo ciclo)

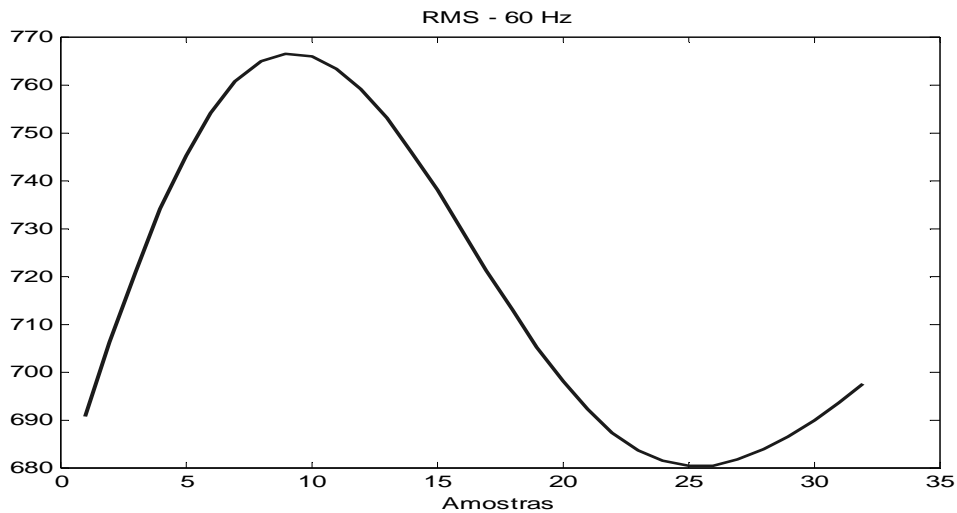


Figura 3.31 - Módulo do fasor MMQ 32 amostras (primeiro ciclo)

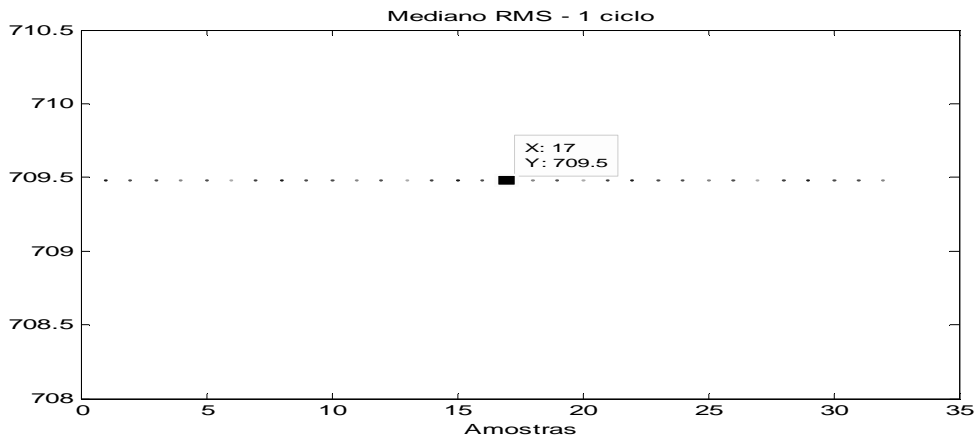


Figura 3.32 - Módulo do fasor MMQ mediano 32 amostras (primeiro ciclo)

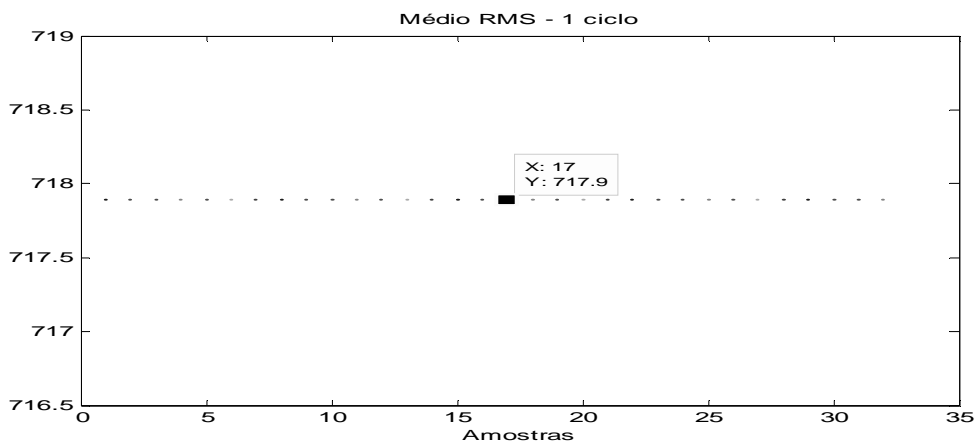


Figura 3.33 - Módulo do fasor MMQ médio 32 amostras (primeiro ciclo)

Nas figuras apresentadas fica evidente que, para as assimetrias de até cem por cento da corrente de pico, a mediana é mais exata que a média do valor estimado e representa muito bem o valor estabilizado ou real: 70,71 para o caso 1 e 707,1 para os casos 2 e 3.

Se o leitor observar as figuras 3.26 e 3.29, pode perceber que, quanto mais distante do instante de início do curto-circuito, menor será a assimetria, e mais exata a mediana se torna.

Comparando as figuras 3.25 e 3.31 – casos mais severos – fica evidente que o fasor obtido pelo método de Mínimos Quadrados oscila menos que o obtido pelo método de Fourier, por isso, optou-se neste trabalho pela utilização do método de Mínimos Quadrados.

Para obter os melhores resultados com a aplicação da mediana, devem ser utilizados intervalos múltiplos de um ciclo de amostras, uma vez que a frequência de oscilação do fasor estimado, verificada nos casos apresentados, foi muito próxima da fundamental.

---

---

# Capítulo 4

## Estudo Paramétrico

Neste capítulo é avaliado o perfil do fator K ao longo da LT para diversas topologias de sistema. Tal fator é obtido pela utilização de programa clássico de cálculo de curto-circuito e foi estudado no Capítulo 3.

Em algum momento, a topologia real do sistema e a do programa de cálculo de curto-circuito podem apresentar diferenças, já que geralmente alguns componentes que se encontram desligados para manutenção ou por conveniência operativa nem sempre são atualizados durante os cálculos das correntes de curto-circuito.

Para essas diferenças entre topologias do sistema são esperadas pequenas variações do ângulo relativo entre as correntes dos terminais de uma dada linha de transmissão, pois para pequenas alterações na topologia do sistema -

---

desligamento de uma linha de transmissão ou transformador - o ângulo do fator de distribuição (fator K) ao longo da linha deve permanecer muito próximo do valor real. Considerando-se que o equipamento desligado possui impedância com características muito próximas da impedância equivalente do terminal, então esta apresentará pequena ou nenhuma variação angular em relação à sua configuração real, viabilizando a utilização das correntes calculadas. Esses dados provenientes do curto-circuito calculado são determinantes para localização de faltas de alta resistência pelo algoritmo adaptado.

Nos casos de baixa impedância ou ainda no caso de o terminal remoto já se encontrar aberto, o ângulo entre as correntes no ponto de falta possui pouca influência na exatidão da localização, ou seja, não é necessário utilizar as correntes obtidas em um programa de cálculo de curto-circuito para uma boa estimativa da localização da falta.

Para faltas de elevada resistência, acima de 40 ohms, pequenas variações angulares entre as correntes no ponto de falta podem provocar grandes erros na localização pelo terminal menos potente. Nesse caso, geralmente o terminal da linha de transmissão menos potente (mais fraco) permanece por um tempo maior que o terminal remoto alimentando o curto-circuito. Apesar da elevada impedância, esse terminal, nessa condição, permite uma boa estimativa da localização da falta, pois nessa configuração não existe acoplamento entre os terminais, tornando-se o sistema radial e a estimativa bastante simplificada e mais exata.

Nas figuras a seguir é mostrado o perfil do ângulo do fator K ao longo da LT para diversas topologias de sistema, utilizando-se de dois gráficos para cada uma delas: *Ângulo K cheio* e *Ângulo K líquido*.

O *Ângulo K cheio* representa apenas a relação entre as correntes terminais no ponto de falta dada pela Equação (3.42) invertida (ou seja, ângulo do fator K com sinal invertido) e apresentada nos gráficos em relação a cada terminal separadamente. Assim, na escala horizontal dos gráficos, trinta por cento da LT

significa que é trinta por cento para ambos os terminais e não trinta para um e seu complemento, setenta para o outro.

Para efeito de comparação são apresentadas duas curvas por terminal: “Terminal A – Direto” representa a curva resultante da aplicação da corrente terminal, sem correção, diretamente na Equação (2.20); e “Terminal A – Adaptado” é o resultado da aplicação da corrente terminal corrigida na Equação (3.42) – correção essa apenas do fator K. A mesma idéia é aplicada para o terminal B.

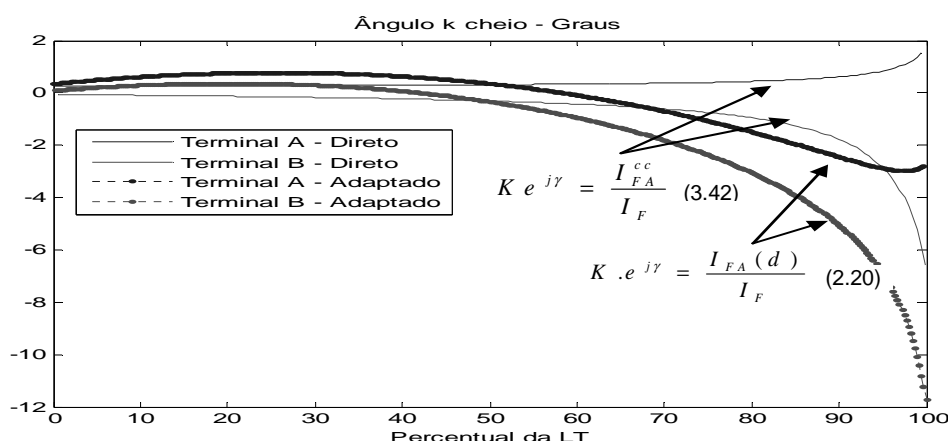


Figura 4.34 – Exemplo de gráfico com *Ângulo K cheio*

Já o *Ângulo K líquido* é o ângulo resultante da já citada relação entre as correntes terminais na Equação (3.42) – com o fator K corrigido –, adicionado da correção da corrente do terminal local para o ponto de falta  $I_{FA}(d)$ , para aplicação na Equação (2.22), ou seja, nesse gráfico é apresentado o verdadeiro efeito, em termos de fase, dessas duas correções propostas neste trabalho.

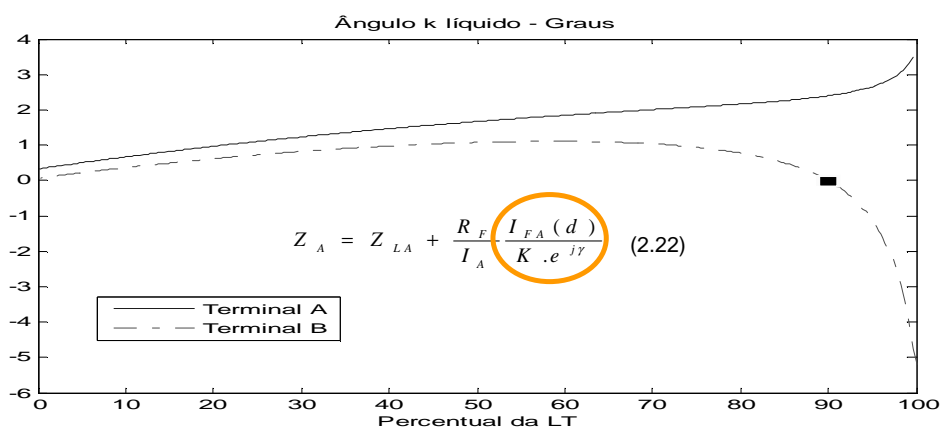
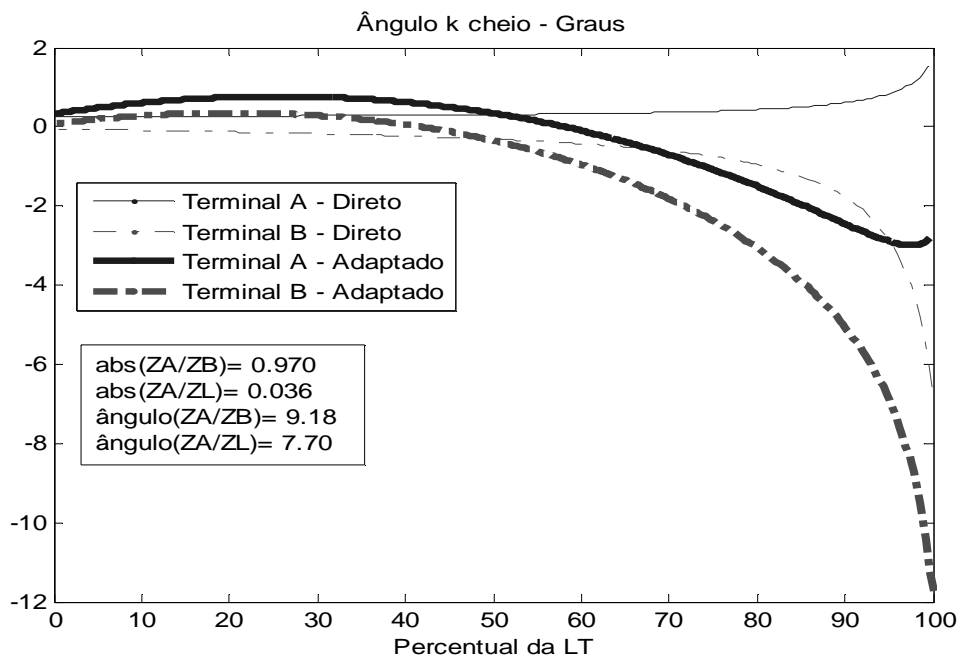


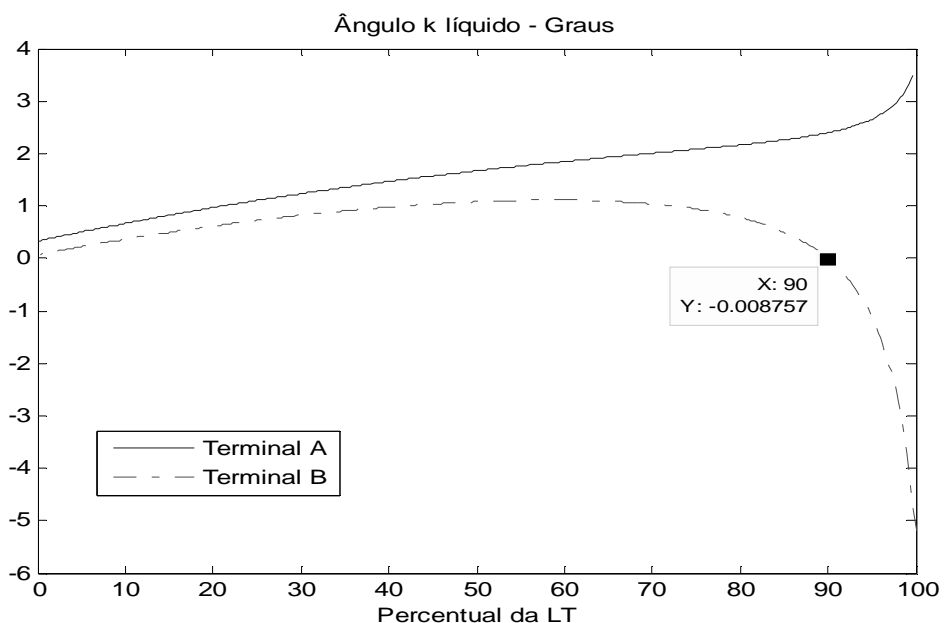
Figura 4.35 – Exemplo de gráfico com *Ângulo K líquido*

### 4.1 – Perfil do fator K para as topologias apresentadas

Nas figuras a seguir é mostrado o perfil do ângulo do fator K (ângulo  $\lambda$ ) ao longo da LT estudada neste trabalho, para as três topologias de sistema apresentadas no Capítulo 5.

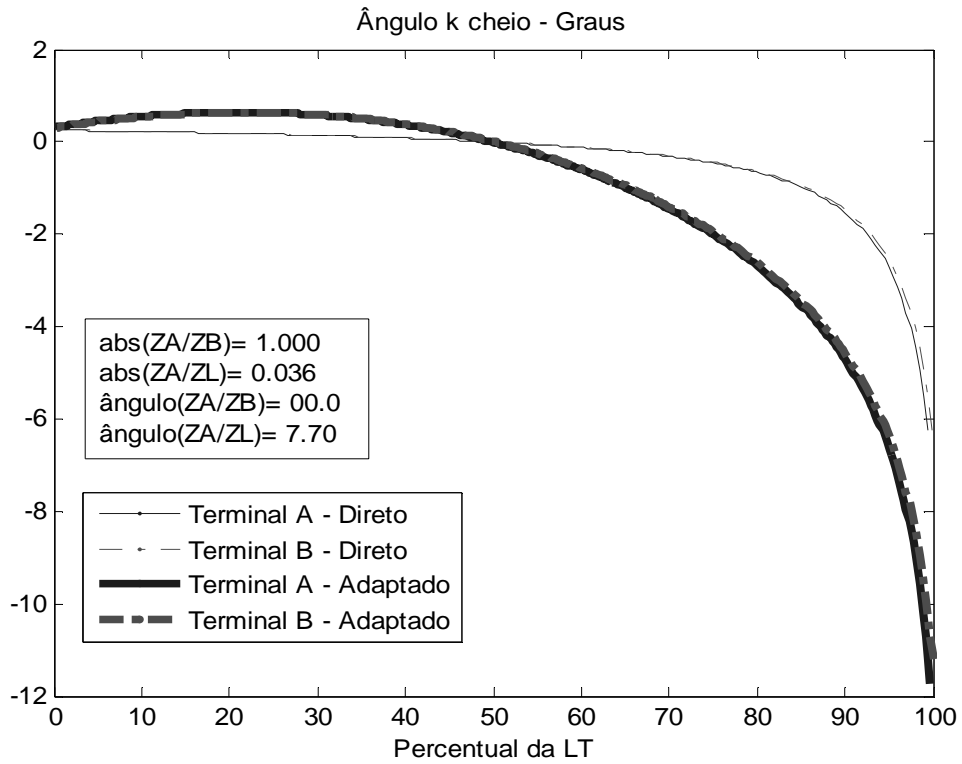


(a)

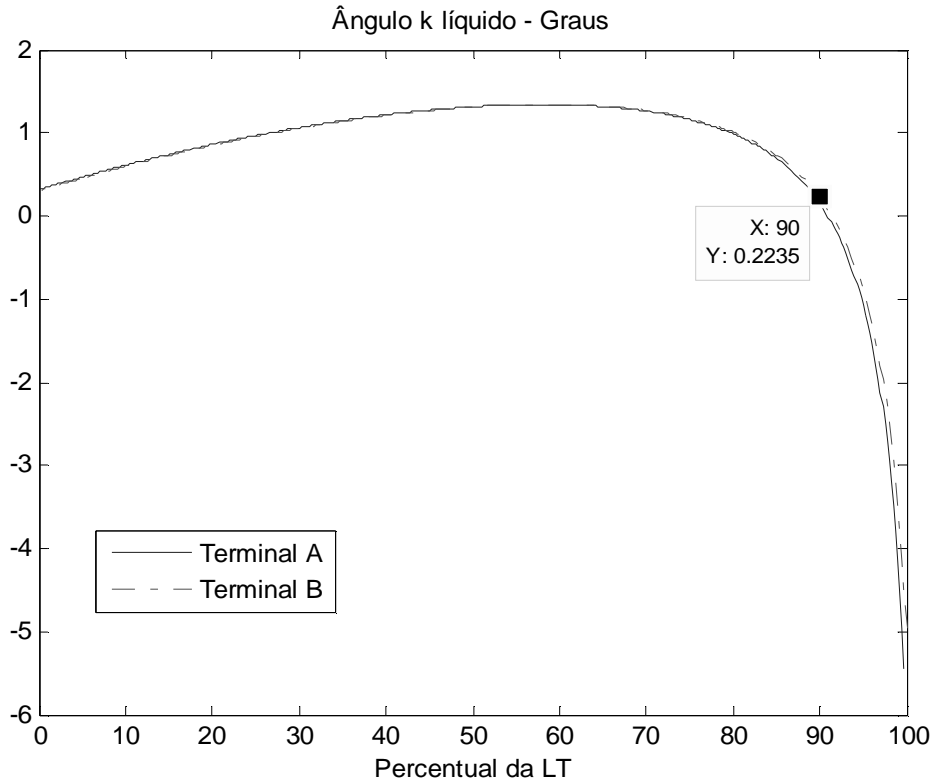


(b)

Figura 4.36 – Fontes semelhantes com diferença angular



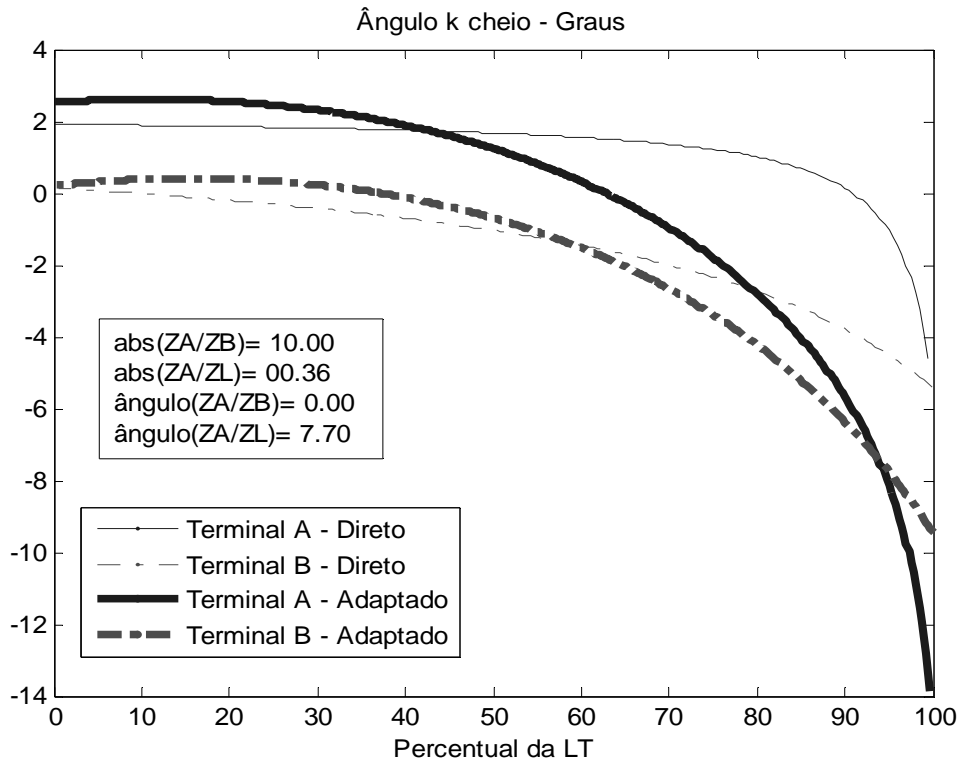
(a)



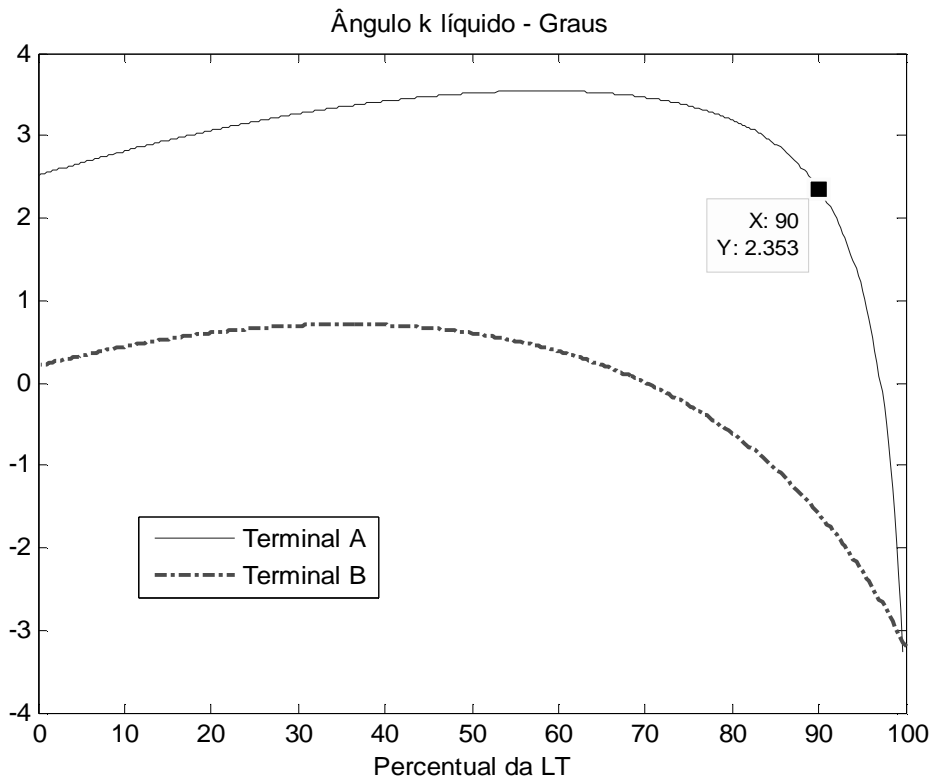
(b)

Figura 4.37 - Fontes iguais





(a)



(b)

Figura 4.38 - Fonte fraca contra fonte forte

Analisando as figuras apresentadas, pode-se perceber que não existem grandes diferenças angulares no perfil do fator K ao longo do trecho compreendido entre zero e oitenta por cento do comprimento da LT, ao passo que diferenças mais acentuadas somente são percebidas nas porções finais da LT, onde a assimetria entre impedâncias terminais e a impedância da LT podem provocar variações angulares mais significativas.

No Capítulo 5, são apresentadas tabelas com o resultado das estimativas do local da falta, utilizando o método original e o método proposto com as adaptações. Em tais tabelas, fica evidente o impacto causado pela variação da fase do fator K na estimativa do ponto de falta, sendo justamente nas porções finais da LT – isto é, no trecho a partir de noventa por cento do seu comprimento –, onde o algoritmo apresenta os maiores erros para faltas de alta impedância.

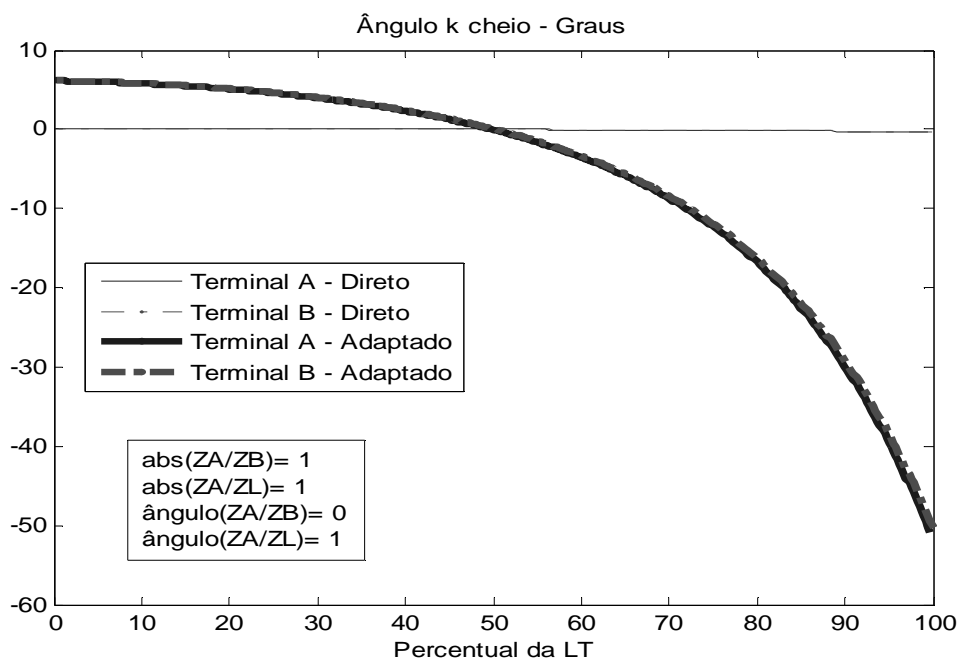
Nas tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os resultados das estimativas para as topologias dos sistemas apresentadas nas figuras 4.36 e 4.37. Comparando o desempenho do algoritmo original de Wiszniewski frente às variações de fase do fator K líquido, é possível verificar que o ângulo K líquido da Figura 4.36 para noventa por cento do terminal A – aproximadamente 2.4 graus, é maior que o ângulo K líquido para o mesmo percentual e terminal da Figura 4.37 – aproximadamente 0.2 graus. Como se trata de uma falta de elevada resistência, então é esperado um erro maior na estimativa do ponto da falta pelo método original para o caso da Figura 4.36, pois, enquanto o método original considera zero grau para o ângulo  $\lambda$ , nesta topologia o valor calculado foi de 2.4 graus.

O estudo paramétrico do perfil do fator K pode auxiliar na indicação de qual terminal é mais indicado para se efetuar uma determinada localização de falta, e ainda atribuir um grau de confiabilidade para uma dada estimativa de ponto de falta.

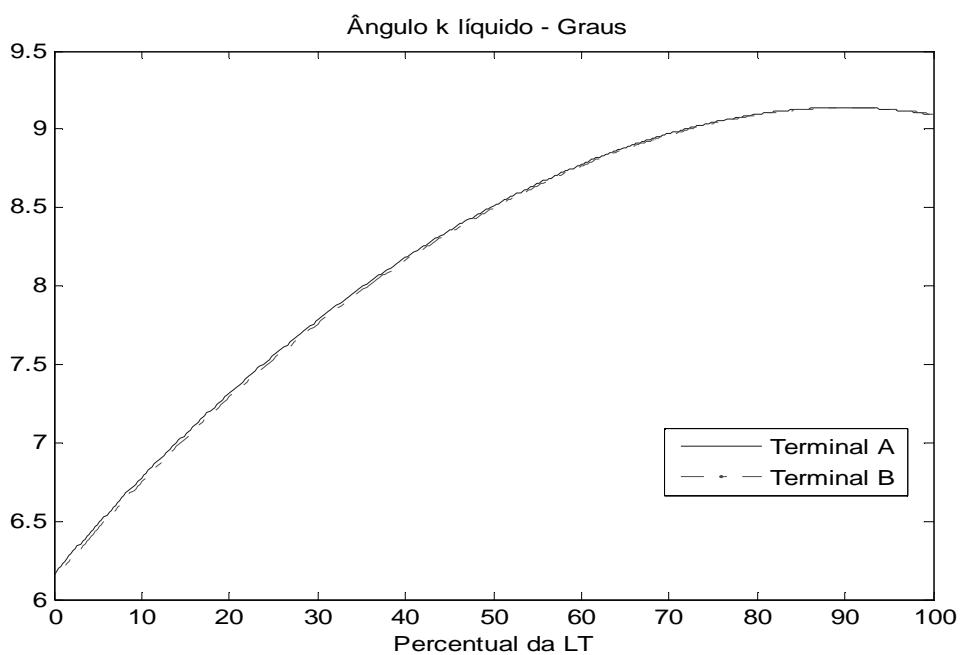
---

### 4.2 – Perfil do fator K para várias outras topologias

Nas figuras a seguir é mostrado o perfil do ângulo do fator K (ângulo  $\lambda$ ) ao longo da LT estudada neste trabalho, para várias outras topologias de sistema.

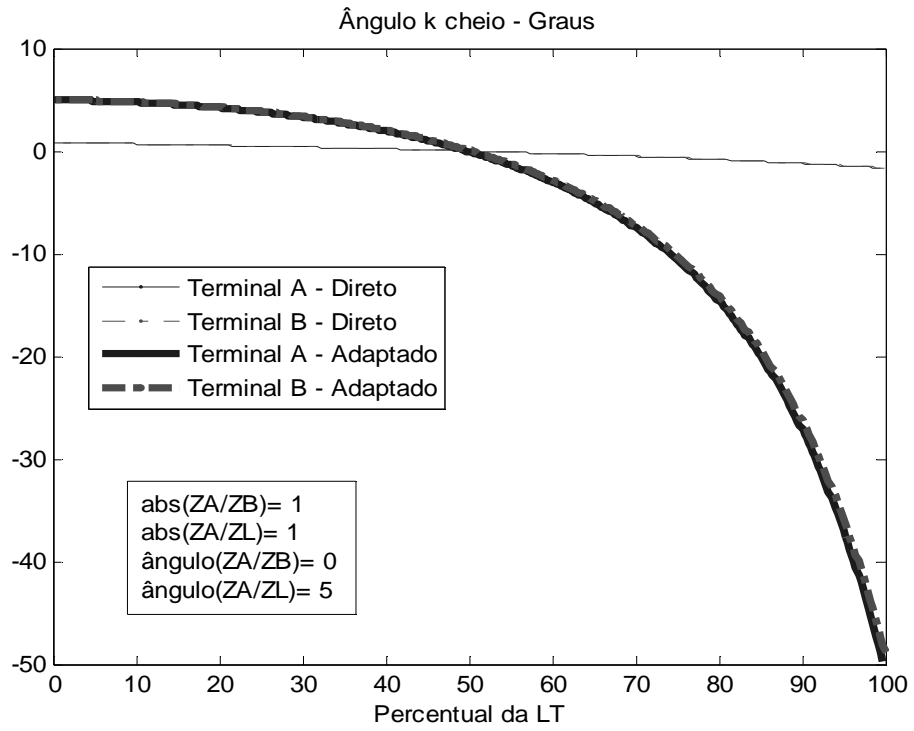


(a)

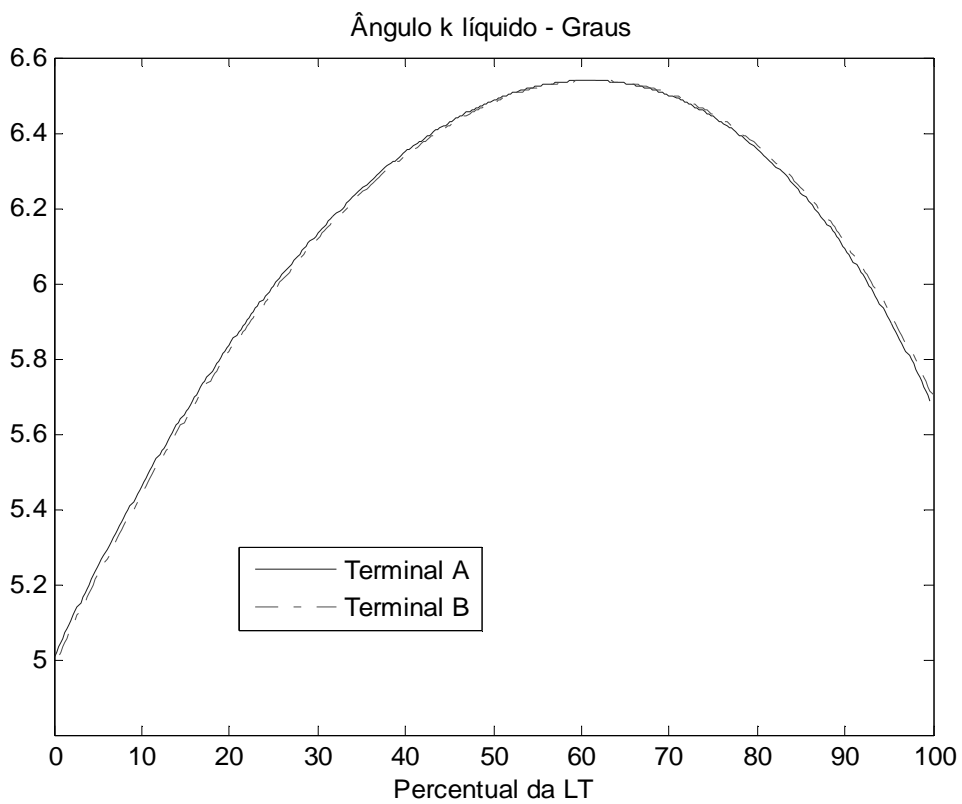


(b)

Figura 4.39 – Fontes iguais e fracas caso 1

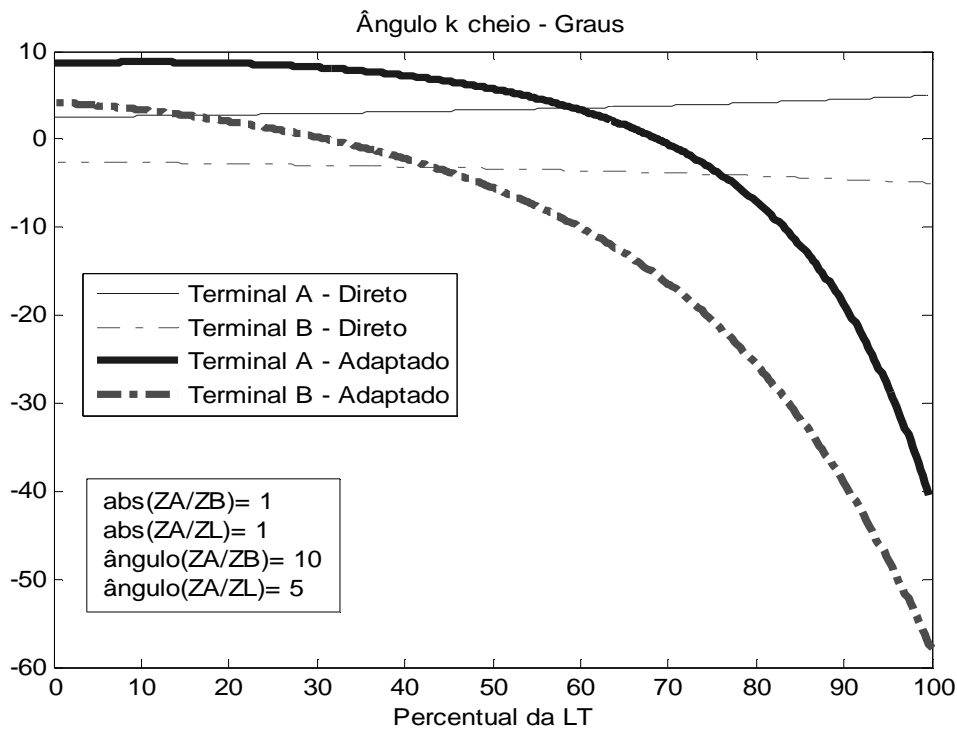


(a)

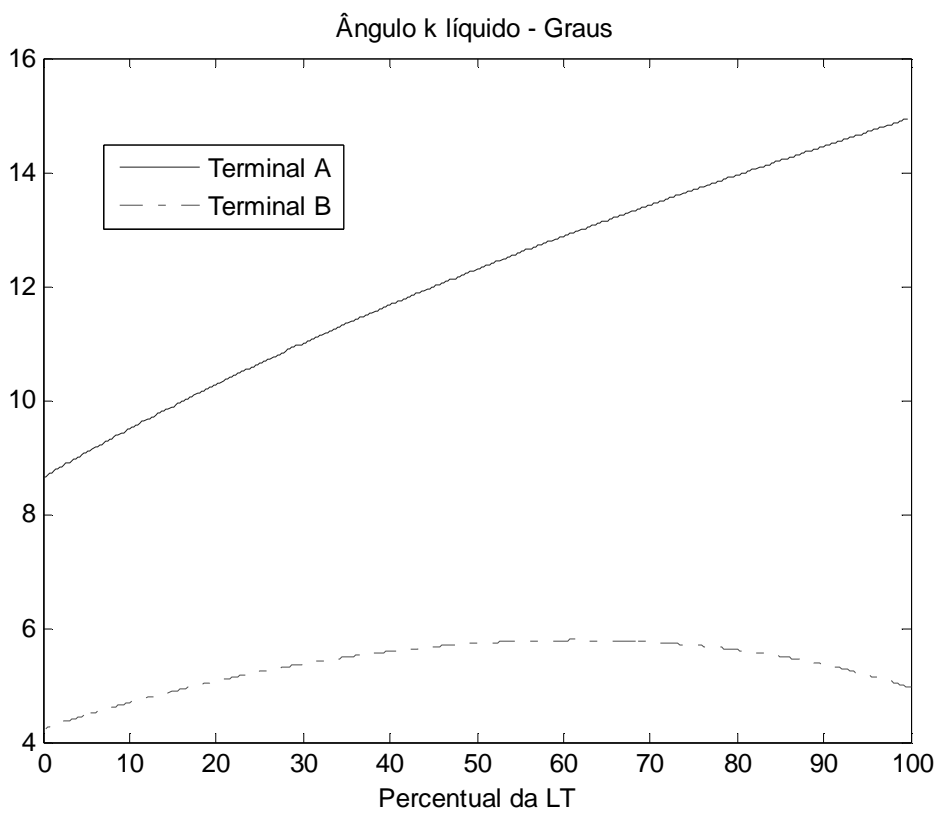


(b)

Figura 4.40 - fontes iguais e fracas caso 2

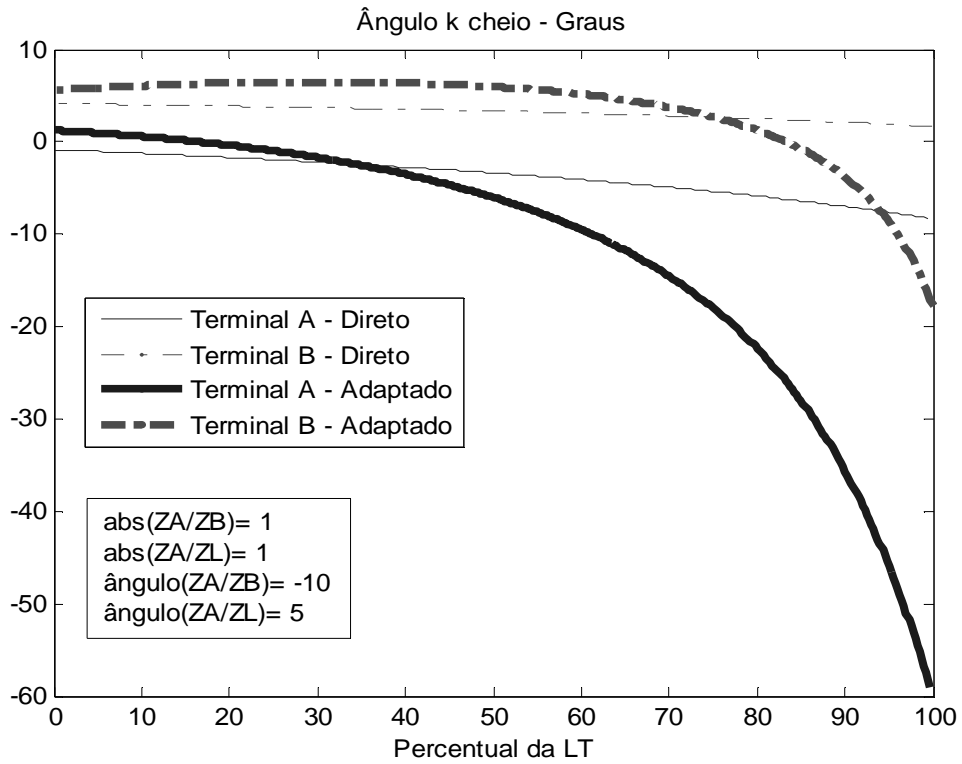


(a)

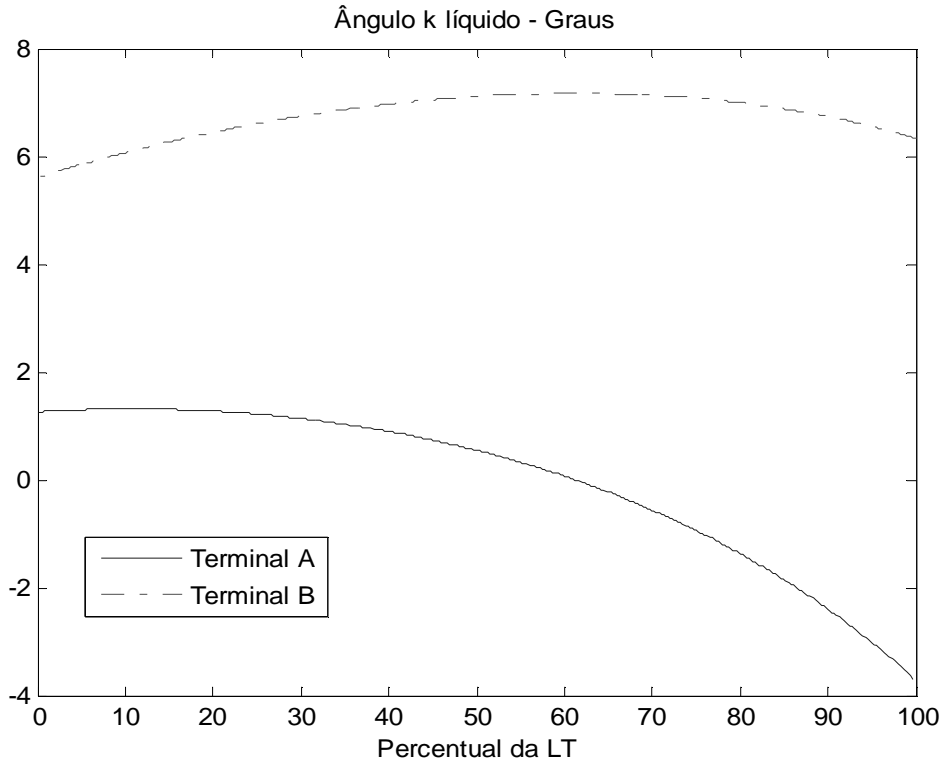


(b)

Figura 4.41 - Fontes semelhantes e fracas caso 1

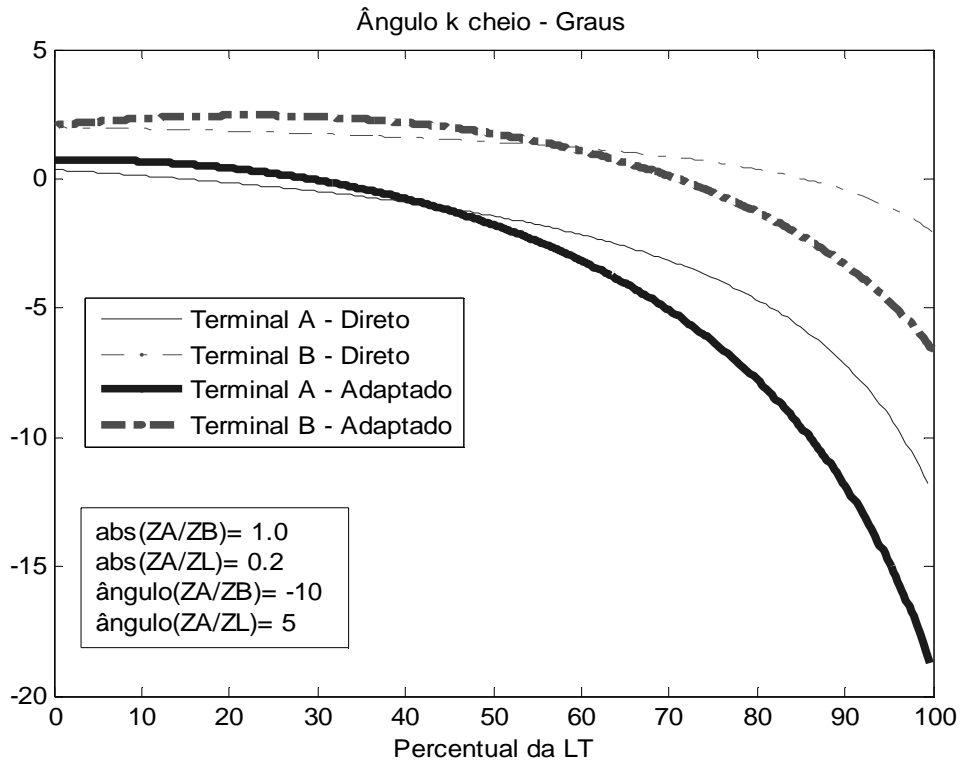


(a)

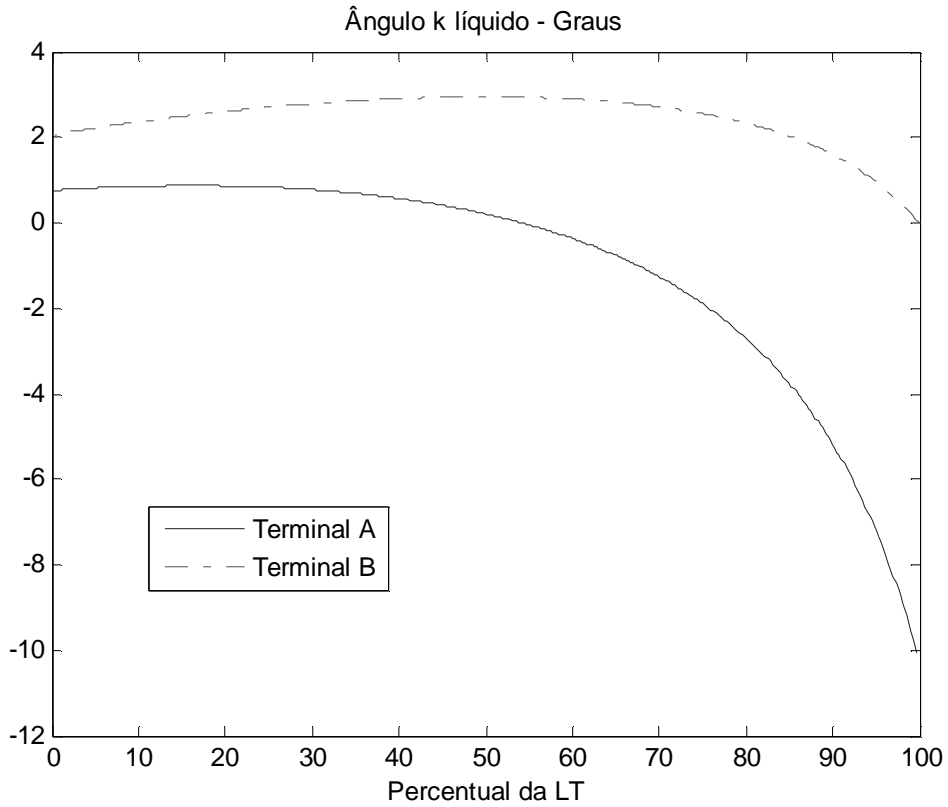


(b)

Figura 4.42 - Fontes semelhantes e fracas caso 2

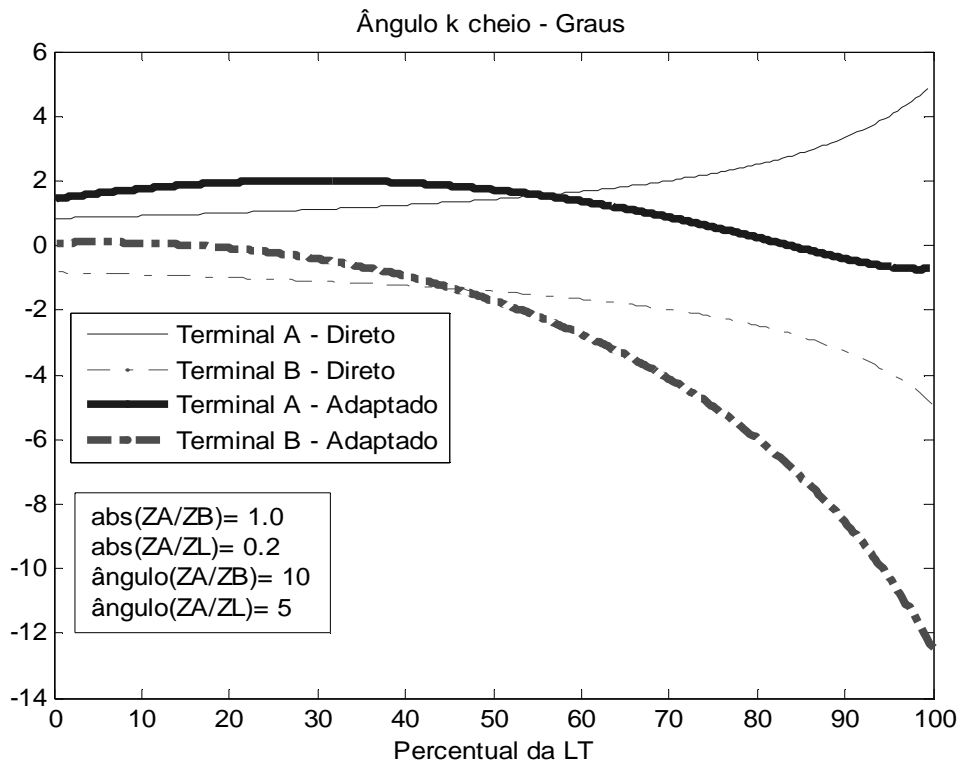


(a)

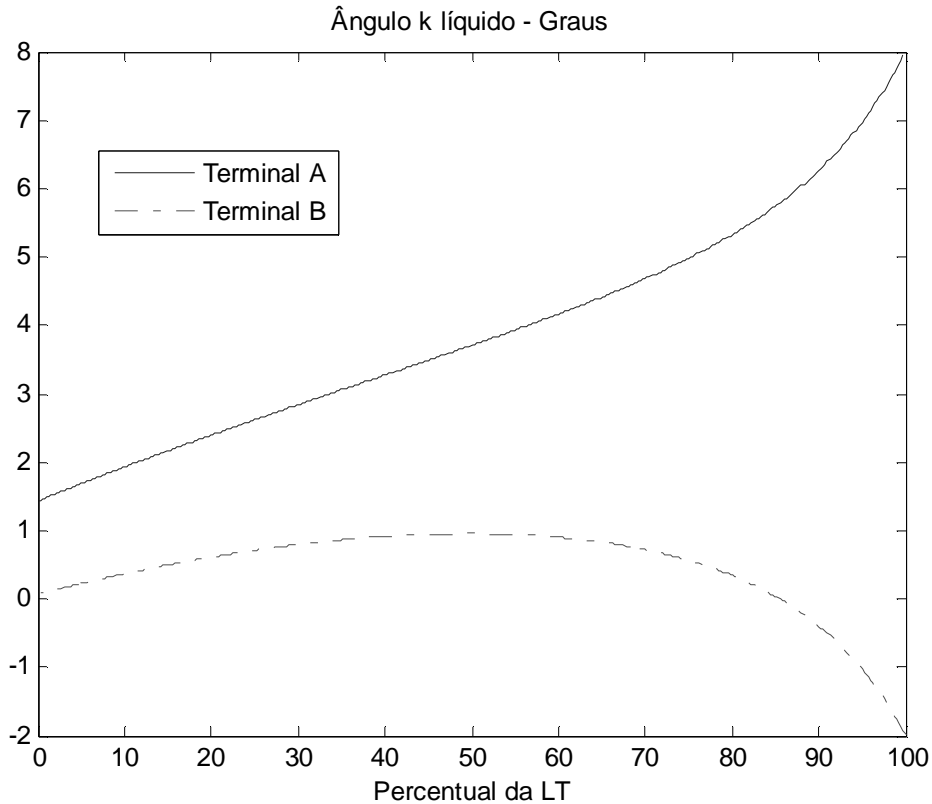


(b)

Figura 4.43 - Fontes semelhantes e moderadas caso 1



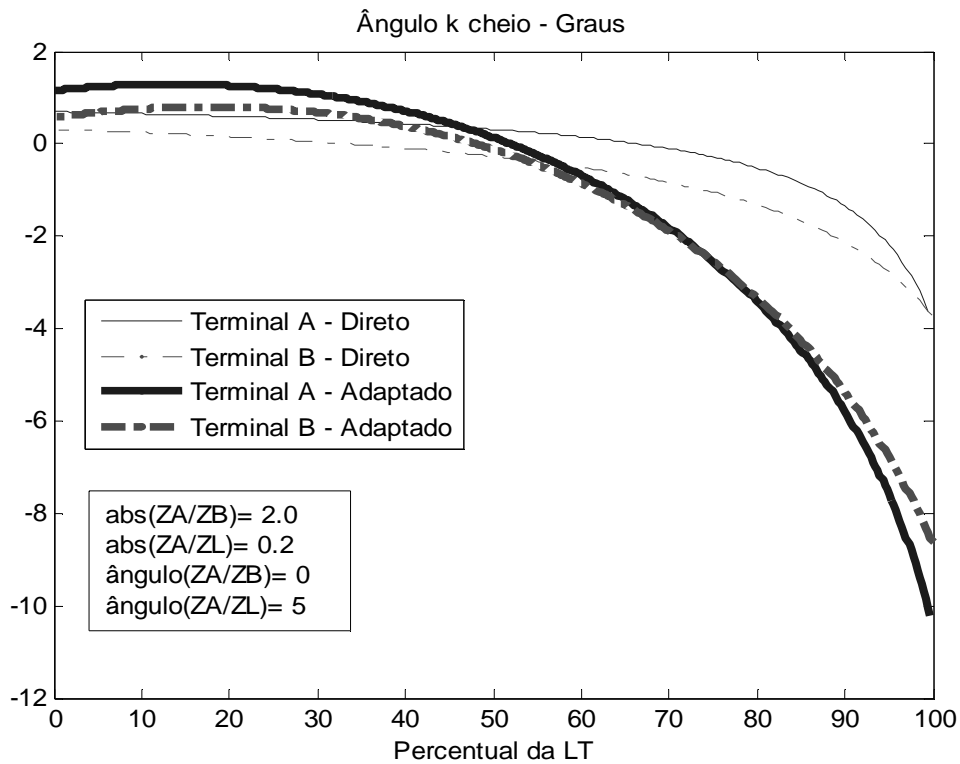
(a)



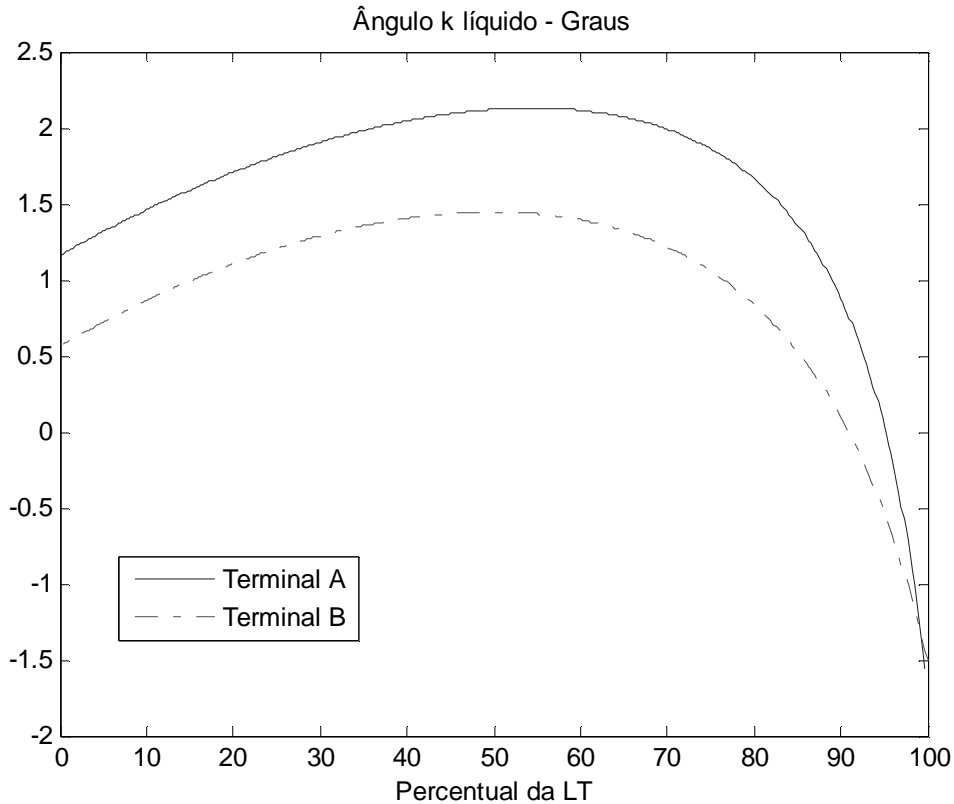
(b)

Figura 4.44 - Fontes semelhantes e moderadas caso 2



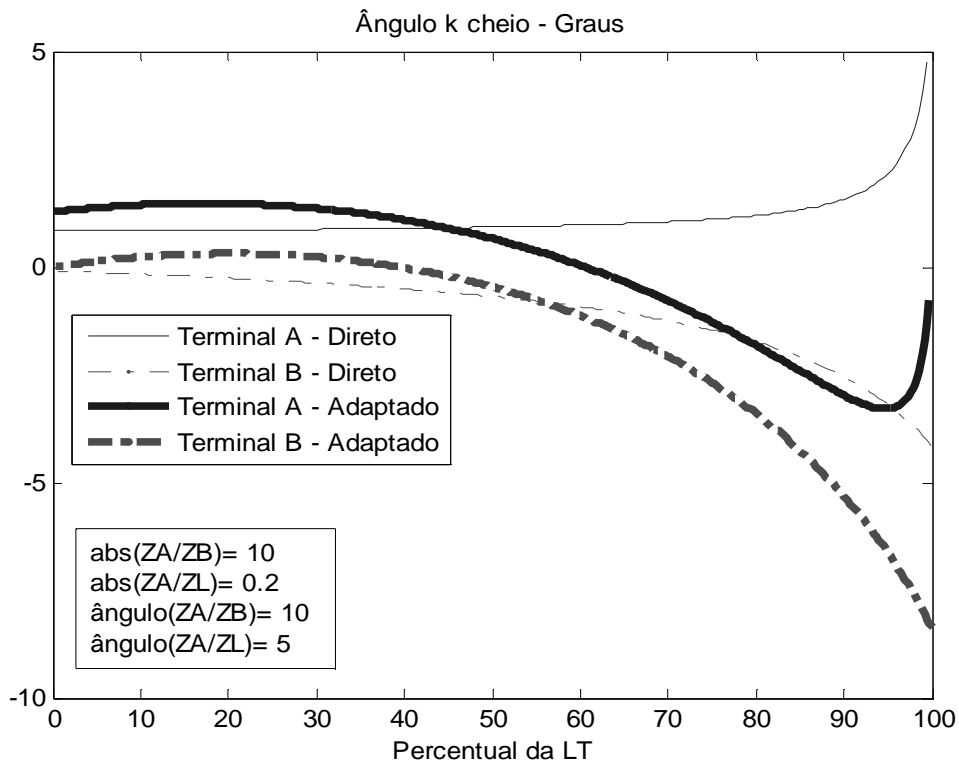


(a)

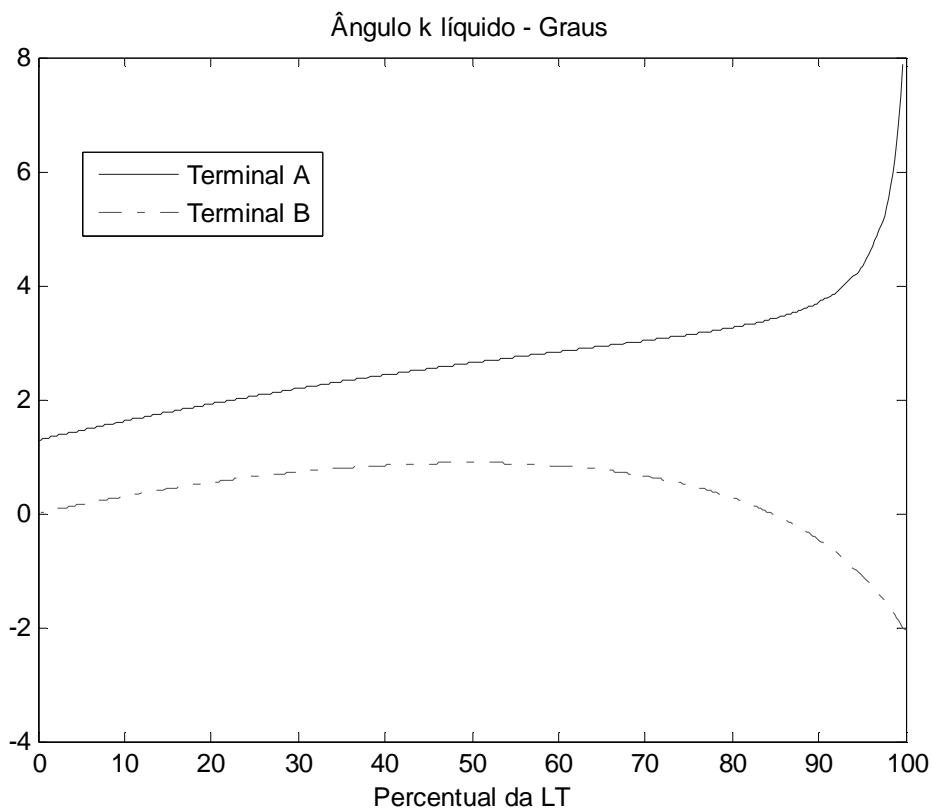


(b)

Figura 4.45 - Fontes semelhantes e moderadas caso 3



(a)



(b)

Figura 4.46 - Fonte fraca X forte com grande diferença angular

Analisando as figuras apresentadas, pode-se perceber que não há variações angulares súbitas (com grande inclinação) para o ângulo K líquido dentro de uma faixa compreendida entre o terminal e oitenta por cento do comprimento da LT, entretanto, no extremo remoto, verificam-se variações significativas em algumas topologias.

O estudo paramétrico do perfil do fator K pode ser determinante para a escolha do terminal a ser utilizado para a estimação e também para conferir um grau de confiabilidade para uma determinada estimação de ponto de falta.

Outra observação importante diz respeito a maior estabilidade do ângulo K líquido quando comparado com o ângulo K cheio, sendo que aquele apresenta menor variação ao longo da LT que este. Na referência [7] é sugerida a correção angular do fator K utilizando a mesma formulação do ângulo K cheio representado pelas curvas denominadas Terminal Direto - apresentadas neste trabalho, as quais representam a aplicação direta da corrente obtida no programa de curto-circuito para a determinação do fator K. A aplicação de tal sugestão pode piorar a estimação da falta em determinadas situações se comparada com a estimação pelo algoritmo original. Por exemplo, pode ser considerada a topologia apresentada na Figura 4.37, onde o ângulo K líquido, a noventa por cento do terminal A, é próximo de zero e o ângulo K cheio representado para pela curva *Terminal A direto* para o mesmo ponto é próximo de dois graus, sendo que para faltas de elevada resistência esses dois graus causariam erros significativos na estimação do ponto da falta.

Diante desses fatos fica evidenciada a importância da determinação correta do ângulo K líquido e não apenas o ângulo K cheio.

---

## Capítulo 5

# Influência da Variação de Parâmetros na Localização da Falta

Neste capítulo, são apresentadas algumas considerações sobre as simulações feitas no ATP, a estimação dos fasores, a seqüência dos cálculos para aplicação das adaptações, e ao final do capítulo, são apresentas várias tabelas com os resultados obtidos pela aplicação dos métodos de Wiszniewski (original e o proposto neste trabalho) e de Takagi.

## 5.1 – Considerações sobre as simulações e cálculos

### 5.1.1 – Variação de parâmetros

Para permitir uma boa avaliação do desempenho das adaptações propostas, foram feitas várias simulações de curtos-circuitos com variação de alguns parâmetros e do ponto da falta, as quais são listadas a seguir:

- Resistência da falta ( $R_F$ );
- Ângulo e módulo das impedâncias equivalentes dos terminais;
- Percentual da LT para incidência do curto-circuito;
- Tipo de curto-circuito.

Foram feitas 81 simulações por terminal, totalizando 162 simulações, sendo:

- ✓ 36 curtos-circuitos entre fase e terra;
- ✓ 36 curtos-circuitos entre duas fases;
- ✓ 54 curtos-circuitos entre duas fases e a terra;
- ✓ 36 curtos-circuitos trifásicos.

As grandezas foram variadas da seguinte forma:

- ✓ Resistência de falta (RF): 1 e 40 ohms;
- ✓ Ângulo de fase entre ZA e ZB: 0 e 9 graus;
- ✓ Relação entre módulos das impedâncias dos terminais (SIR): 0,1 - 1 - 10;
- ✓ Ponto da falta: 10%, 50% e 90% .

Tendo em vista uma maior aproximação com os casos reais, em todos os casos simulados no ATP, foi considerado um fluxo do terminal A para o terminal B proporcional a uma abertura angular de 22 graus entre as tensões desses terminais.

---

Também foi considerada a incidência do curto-circuito quando a tensão no ponto de falta passava bem próximo ao seu valor instantâneo nulo, sendo essa a condição mais crítica para a estimação dos fasores de corrente, pois a onda de corrente sofre forte assimetria nessa condição. Entretanto, em casos reais, essa condição não ocorre com muita frequência, pois boa parte das faltas em LTs tem como origem, fenômenos relacionados com a ruptura da rigidez dielétrica do meio (ar, água, jatos de excrementos de pássaros, entre outros) pela onda de 60 Hz, cujo rompimento tende a ocorrer no pico (valor máximo da onda). Até mesmo nos casos de faltas originadas por descarga atmosférica, na qual o rompimento poderia depender menos do valor da tensão da onda de 60 Hz e mais do instante da descarga atmosférica, verifica-se que grande parte da incidência dos curtos-circuitos ocorre num ponto afastado do valor nulo da onda de tensão de 60 Hz.

Foi utilizada uma linha típica do sistema de transmissão da Cemig de 400 km em 500 kV transposta e representada por seus parâmetros distribuídos no ATP.

### **5.1.2 – Estimação dos fasores**

Foi utilizado o método de Mínimos Quadrados para estimação dos fasores RMS, cuja metodologia utilizada foi a mesma da referência [3]. A frequência de amostragem utilizada foi de 32 amostras por ciclo

Visando uma maior aproximação com os casos reais e tomando como referência o tempo mínimo típico de eliminação da falta pela proteção e disjuntor em sistemas de transmissão em alta tensão (230, 345 e 500 kV) [2], foi estabelecido um intervalo máximo de 2,5 ciclos na onda para estimação dos fasores, sendo desprezando o primeiro 1,5 ciclo e utilizado apenas o ciclo subsequente para os cálculos, ou seja, a mediana é aplicada a partir do meio do segundo ciclo, onde a oscilação esperada é menor que no primeiro ciclo e o resultado se torna mais exato. A figura a seguir ilustra tal intervalo.

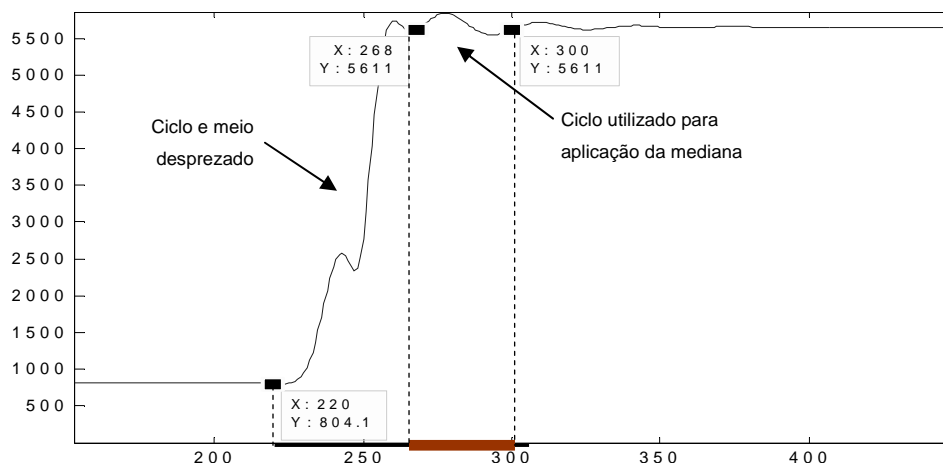


Figura 5.47 – Intervalo para aplicação da mediana na onda

Para sistemas de subtransmissão (abaixo de 230 kV), o tempo mínimo de eliminação da falta tende a ser maior que os dois ciclos e meio citados para o sistema de transmissão, nesses casos, devido a maior quantidade de ciclos disponíveis, é possível a aplicação da mediana a partir do terceiro, quarto ou outro ciclo superior, tornando o resultado da estimativa ainda mais exato.

### 5.1.3 – Seqüência dos cálculos

Para aplicação das adaptações propostas neste trabalho, antes é necessária a estimativa do ponto de falta pelo método original. Após a estimativa desse primeiro ponto de falta, é feita, então, a inclusão das adaptações propostas no Capítulo 3 e em seguida procede-se a estimativa do ponto de falta considerando-se tais adaptações. Cada ponto de falta estimado vai servir de referência para a estimativa do próximo. Para obtenção da estimativa final, que é apresentada como o ponto mais provável, podem ser escolhidos alguns tipos de critérios para parada do ciclo de cálculos. Um possível critério é a definição de um delta (diferença entre a estimativa atual e a anterior), que quando atingido indica que a estimativa final foi encontrada. Outro possível critério é a definição de um número de vezes que a rotina deve ser repetida, sendo que a última estimativa coincide com a final.

Cada estimativa do ponto de falta é obtida pela mediana do conjunto de um ciclo de amostras, da mesma forma as grandezas para aplicação das adaptações são obtidas pela mediana de um ciclo de amostras de cada grandeza.

O fluxograma abaixo representa a seqüência adotada desde a leitura da oscilografia, passando pelos cálculos, até chegar à estimativa do ponto de falta.

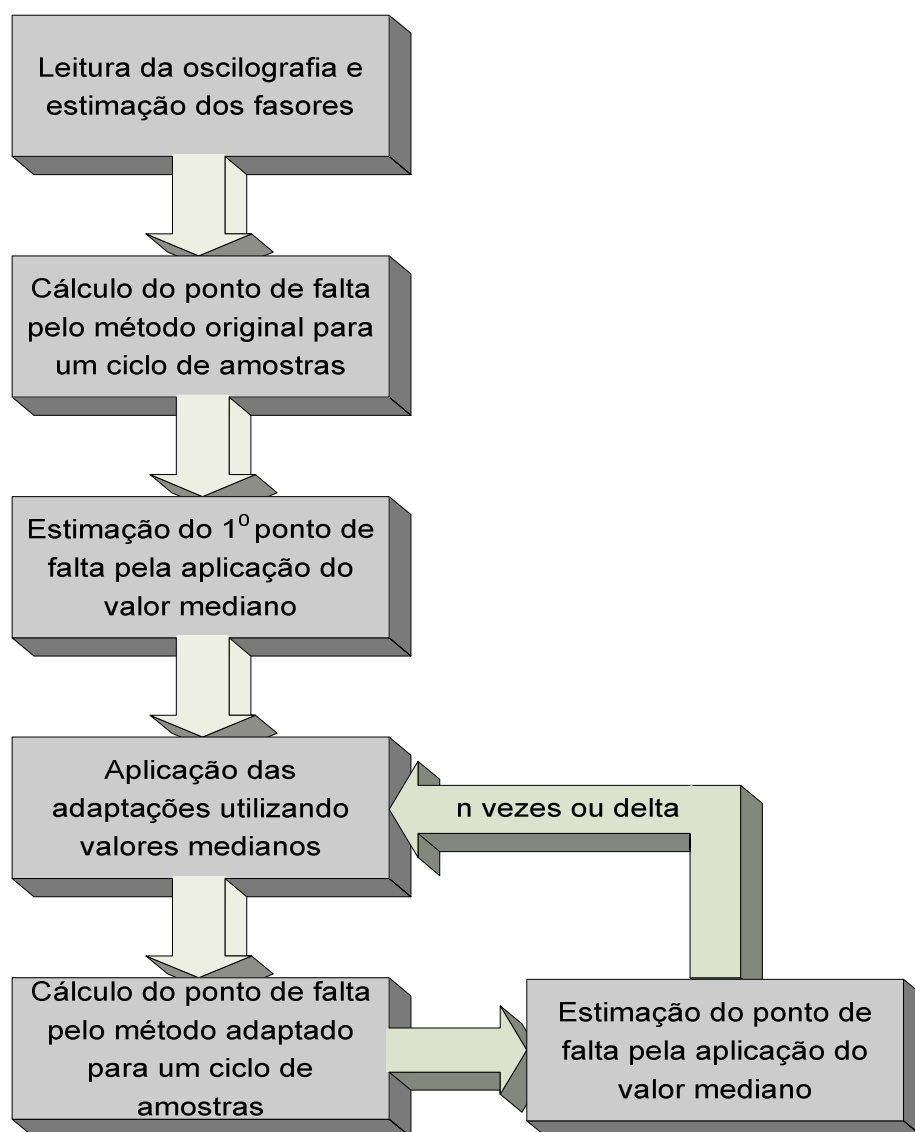


Figura 5.48 – Fluxograma da seqüência dos cálculos



### 5.1.4 – Circuitos simulados

Nas figuras a seguir são mostrados os circuitos simulados.

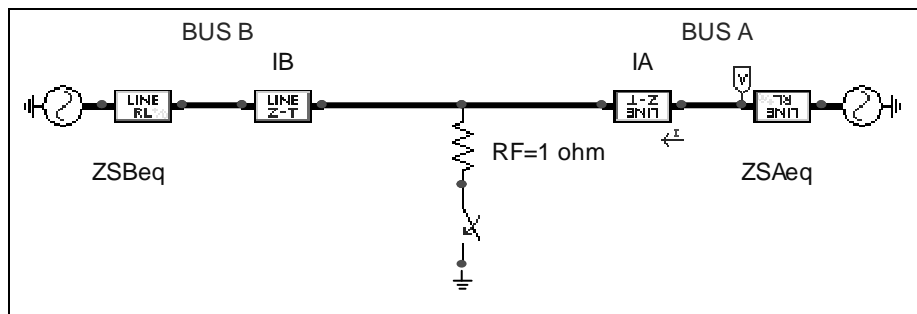


Figura 5.49 - Curto-circuito fase e terra

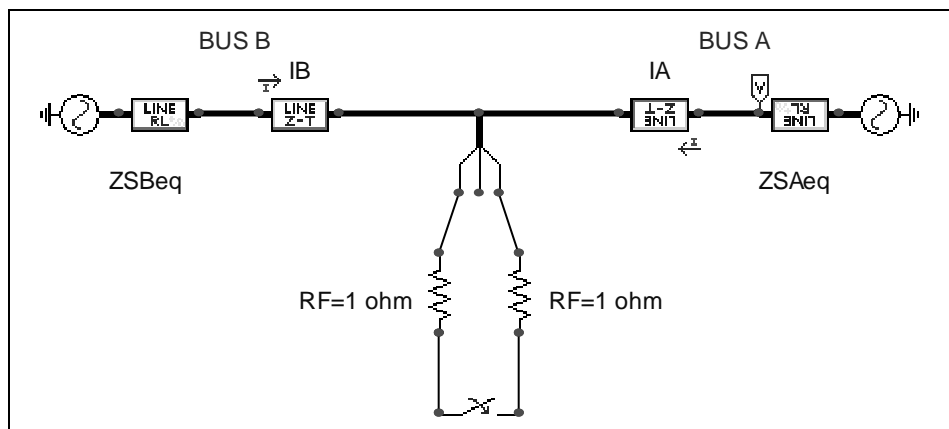


Figura 5.50 - Curto-circuito fase-fase

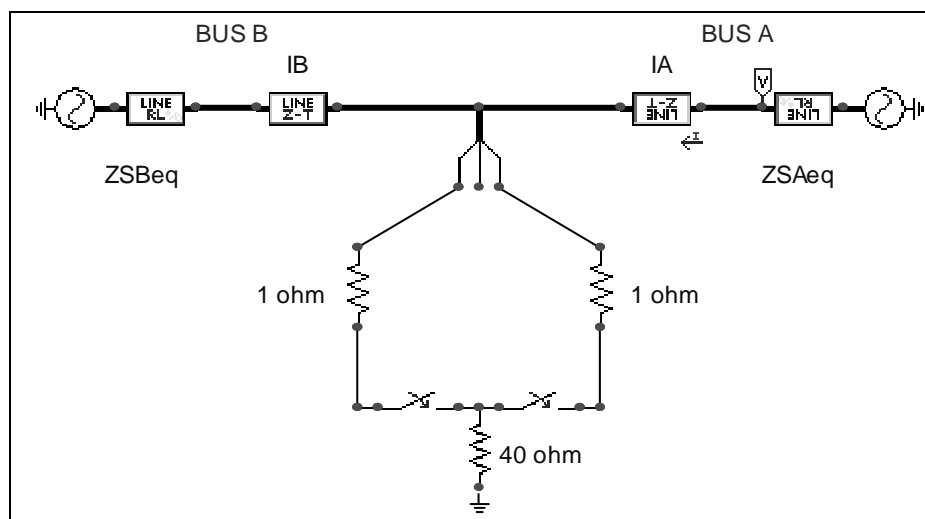


Figura 5.51 - Curto-circuito fase-fase e terra

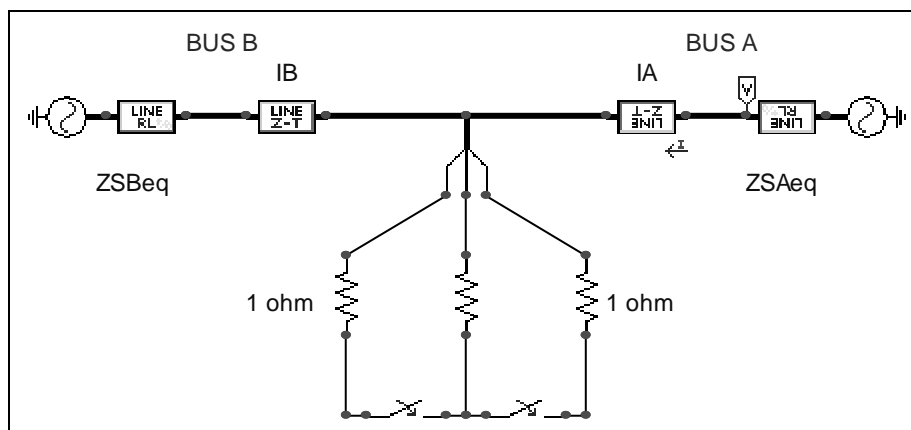


Figura 5.52 – Curto-circuito trifásico

### 5.1.5 – Nomenclatura dos casos simulados

Na figura seguinte é mostrada a nomenclatura adotada para os casos simulados no ATP.

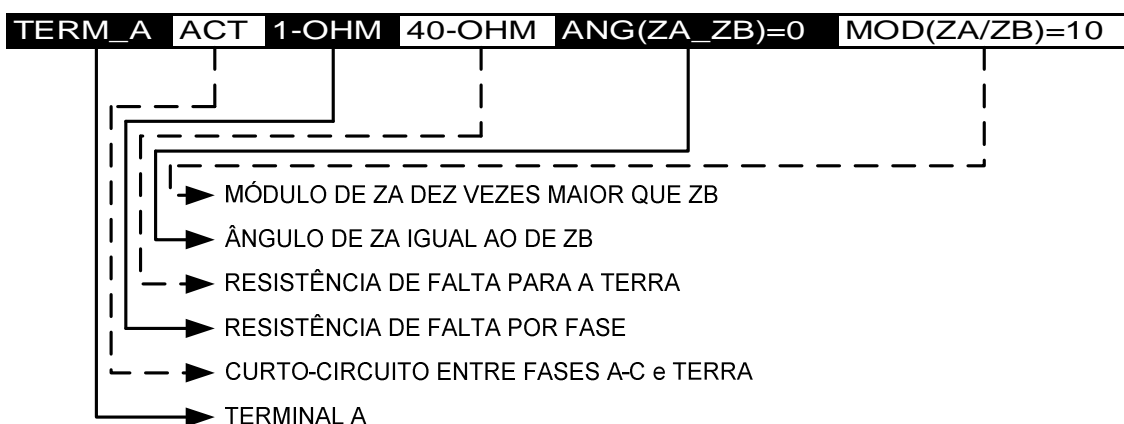


Figura 5.53 – Nomenclatura dos casos

Onde não estiver indicado, o módulo de ZA é igual ao de ZB e, no caso da falta fase-fase e terra, se a resistência de falta para a terra também não estiver indicada, esta será igual à resistência de falta entre fases.

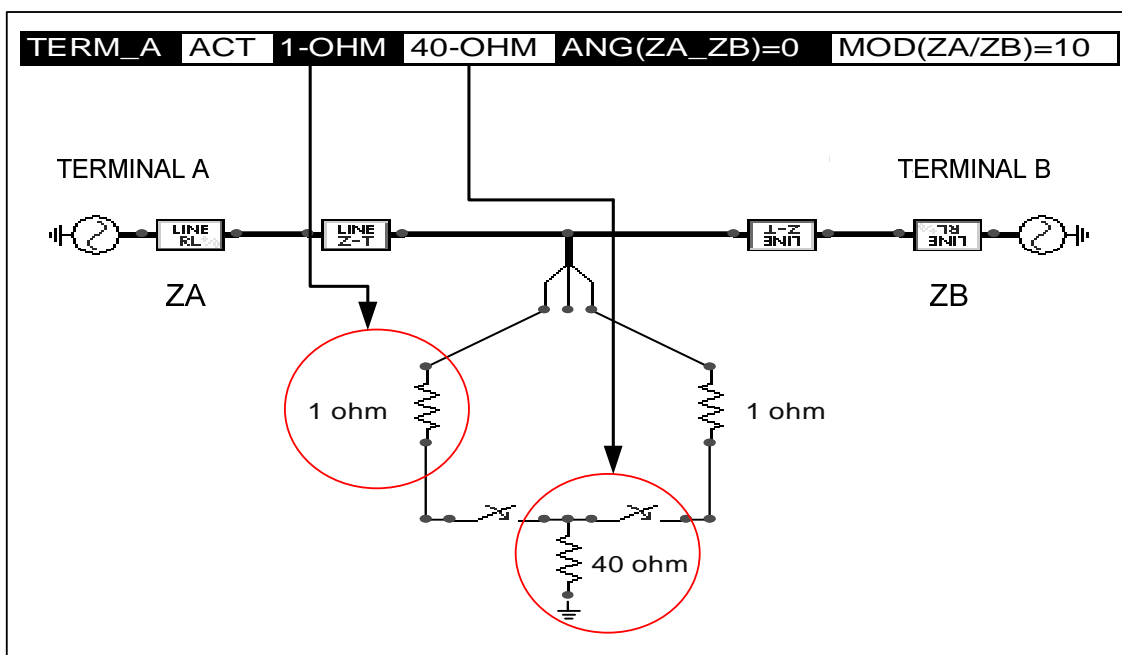


Figura 5.54 – Nomenclatura e caso

## 5.2 – Resultados das simulações no ATP

Foram desenvolvidas e aplicadas as formulações para o método de Wiszniewski original e o proposto neste trabalho.

O método de Takagi utilizado não convergiu em alguns casos, sendo os resultados desses casos apresentados como *inf* nas tabelas seguintes.

Nas tabelas a seguir são apresentadas as estimativas da distância, em quilômetros e percentual, entre o terminal e o ponto de falta. Também é apresentado o erro percentual da estimativa, sendo este dado por:

$$Erro\% = \left| \frac{\text{Ponto estimado} - \text{ponto real}}{\text{comprimento da LT}} \right| \times 100 \quad (5.97)$$

Outra grandeza apresentada é a resistência de falta calculada pelo método proposto (Novo Wiszniewski), sendo expressa em ohms e indicado o erro absoluto da estimativa em relação ao valor real.

---

---

A seguir são apresentados os resultados das localizações pelo terminal A, utilizando as simulações feitas no ATP.

---

---

Tabela 5.4 – Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,4	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,4	10,1	0,1
Localização Takagi	40,0	10,0	0,0
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,7	10,2	0,2
Localização Takagi	40,3	10,1	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,3	49,8	0,2
Localização Wiszniewski original	201,7	50,4	0,4
Localização Takagi	199,6	49,9	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,9	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	354,9	88,7	1,3
Localização Wiszniewski original	369,6	92,4	2,4
Localização Takagi	358,6	89,7	0,3
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	378,7	94,7	4,7
Localização Takagi	358,4	89,6	0,4
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,9	0,9	
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,8	0,2	
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,7	0,3	

Tabela 5.5 - Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,4	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,4	10,1	0,1
Localização Takagi	40,0	10,0	0,0
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,7	10,2	0,2
Localização Takagi	40,6	10,1	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,3	49,8	0,2
Localização Wiszniewski original	201,7	50,4	0,4
Localização Takagi	199,8	49,9	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	200,6	50,2	0,2
Localização Wiszniewski original	205,2	51,3	1,3
Localização Takagi	201,9	50,5	0,5
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	355	88,8	1,2
Localização Wiszniewski original	370,6	92,6	2,6
Localização Takagi	359,5	89,9	0,1
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	391,9	98,0	8,0
Localização Takagi	378,6	94,7	4,7

CASO	Ohm	Erro
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,9	0,9
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,8	0,2
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=9</b>		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,9	0,1

Tabela 5.6 - Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais - SIR = 10

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,2	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,1	10,0	0,0
Localização Takagi	39,6	9,9	0,1
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	44,8	11,2	1,2
Localização Takagi	41,1	10,3	0,3
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	200,2	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	196,9	49,2	0,8
Localização Takagi	199,1	49,8	0,2
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	201,3	50,3	0,3
Localização Wiszniewski original	207,9	52,0	2,0
Localização Takagi	198,8	49,7	0,3
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	361,4	90,4	0,4
Localização Wiszniewski original	358,9	89,7	0,3
Localização Takagi	385,1	96,3	6,3
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	360,9	90,2	0,2
Localização Wiszniewski original	384,7	96,2	6,2
Localização Takagi	323,5	80,9	9,1
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_A_AT_10%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
<b>TERM_A_AT_10%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
<b>TERM_A_AT_50%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
<b>TERM_A_AT_50%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,4	0,6	
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
<b>TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	

Tabela 5.7 – Curto-circuito fase-fase - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	40,0	10,0	0,0
TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,7	9,9	0,1
Localização Takagi	39,6	9,9	0,1
TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,6	51,2	1,2
Localização Takagi	199,3	49,8	0,2
TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	205,1	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	359,6	89,9	0,1
Localização Wiszniewski original	387,7	96,9	6,9
Localização Takagi	359,0	89,7	0,3
TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	360,4	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	396,5	99,1	9,1
Localização Takagi	364,6	91,1	1,1
CASO	ohm	Erro	
TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,0	
TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,2	
TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	



Tabela 5.8 – Curto-circuito fase-fase - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	40,0	10,0	0,0
TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,6	10,1	0,1
Localização Takagi	40,5	10,1	0,1
TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,8	51,2	1,2
Localização Takagi	199,4	49,9	0,1
TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	209,8	52,5	2,5
Localização Takagi	204,4	51,1	1,1
TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	359,8	90,0	0,0
Localização Wiszniewski original	389,1	97,3	7,3
Localização Takagi	360,4	90,1	0,1
TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	360,3	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	434,7	108,7	18,7
Localização Takagi	inf	inf	inf
CASO	ohm	Erro	
TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,0	
TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,8	0,2	
TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	

Tabela 5.9 – Curto-circuito fase-fase - impedâncias terminais – SIR = 10

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,4	9,9	0,1
<b>TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,8	10,2	0,2
Localização Wiszniewski original	35,5	8,9	1,1
Localização Takagi	33,5	8,4	1,6
<b>TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	201,0	50,3	0,3
Localização Wiszniewski original	205,5	51,4	1,4
Localização Takagi	202,1	50,5	0,5
<b>TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,4	49,9	0,1
Localização Wiszniewski original	198,9	49,7	0,3
Localização Takagi	180,4	45,1	4,9
<b>TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	364,0	91,0	1,0
Localização Wiszniewski original	395,0	98,8	8,8
Localização Takagi	inf	inf	inf
<b>TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	362,2	90,6	0,6
Localização Wiszniewski original	396,1	99,0	9,0
Localização Takagi	inf	inf	inf
CASO	ohm	Erro	
<b>TERM_A_AC_10%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
<b>TERM_A_AC_10%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
<b>TERM_A_AC_50%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
<b>TERM_A_AC_50%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,4	0,4	
<b>TERM_A_AC_90%_1OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,4	0,6	
<b>TERM_A_AC_90%_40OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,6	0,4	

Tabela 5.10 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	40,0	10	0,0
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	38,0	9,5	0,5
TERM_A_ACT_10%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,7	9,9	0,1
Localização Takagi	39,6	9,9	0,1
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,6	51,2	1,2
Localização Takagi	199,2	49,8	0,2
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,6	51,2	1,2
Localização Takagi	199,3	49,8	0,2
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	205,1	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	359,5	89,9	0,1
Localização Wiszniewski original	387,8	96,9	6,9
Localização Takagi	359,3	89,8	0,2
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	359,3	89,8	0,2
Localização Wiszniewski original	387,7	96,9	6,9
Localização Takagi	359,0	89,7	0,3
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	360,4	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	396,5	99,1	9,1
Localização Takagi	364,6	91,1	1,1
CASO	Ohm	Erro	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ACT_10%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,8	0,2	
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	

Tabela 5.11 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	40,0	10,0	0,0
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	38,0	9,5	0,5
TERM_A_ACT_10%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,6	10,1	0,1
Localização Takagi	40,5	10,1	0,1
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,8	51,2	1,2
Localização Takagi	199,3	49,8	0,2
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,8	51,2	1,2
Localização Takagi	199,4	49,9	0,1
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	209,8	52,5	2,5
Localização Takagi	204,4	51,1	1,1
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	359,5	89,9	0,1
Localização Wiszniewski original	389,2	97,3	7,3
Localização Takagi	360,7	90,2	0,2
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	359,5	89,9	0,1
Localização Wiszniewski original	389,1	97,3	7,3
Localização Takagi	360,4	90,1	0,1
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	360,3	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	434,7	108,7	18,7
Localização Takagi	inf	inf	inf
CASO	Ohm	Erro	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ACT_10%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	

Tabela 5.12 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais – SIR = 10

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,9	10,0	0,0
Localização Takagi	39,4	9,8	0,2
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	37,4	9,3	0,7
TERMA-ACT-10PC-40OHM.FLUXO30-ANGZAB0-SIL10			
Localização Novo Wiszniewski	39,2	9,8	0,2
Localização Wiszniewski original	35,5	8,8	1,2
Localização Takagi	33,5	8,4	1,6
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	206,8	51,7	1,7
Localização Wiszniewski original	211,9	53,0	3,0
Localização Takagi	inf	inf	inf
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	206,6	51,7	1,7
Localização Wiszniewski original	211,5	52,9	2,9
Localização Takagi	inf	inf	inf
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	200,4	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	198,9	49,7	0,3
Localização Takagi	180,4	45,1	4,9
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	375,0	93,8	3,8
Localização Wiszniewski original	408,1	102,0	12,0
Localização Takagi	inf	inf	inf
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	371,2	92,8	2,8
Localização Wiszniewski original	408,4	102,1	12,1
Localização Takagi	inf	inf	inf
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localização Novo Wiszniewski	365,4	91,3	1,3
Localização Wiszniewski original	396,3	99,1	9,1
Localização Takagi	inf	inf	inf
CASO	Ohm	Erro	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,2	0,2	
TERM_A_ACT_10%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,3	0,3	
TERMA-ACT-10PC-40OHM.FLUXO30-ANGZAB0-SIL10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,2	0,2	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,1	0,9	
TERM_A_ACT_50%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,2	0,8	
TERM_A_ACT_50%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,2	0,2	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
TERM_A_ACT_90%_1OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,0	1,0	
TERM_A_ACT_90%_40OHM_ANG(ZA_ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	38,5	1,5	

Tabela 5.13 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,6	9,9	0,1
TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,8	9,9	0,1
Localização Takagi	39,7	9,9	0,1
TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	198,4	49,6	0,4
TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	205,1	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	390,1	97,5	7,5
Localização Takagi	360,9	90,2	0,2
TERM_A_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Localização Novo Wiszniewski	360,2	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	396,7	99,2	9,2
Localização Takagi	364,5	91,1	1,1
CASO	ohm	Erro	
TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	

Tabela 5.14 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,1	10,0	0,0
Localização Takagi	39,7	9,9	0,1
TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,6	10,1	0,1
Localização Takagi	40,5	10,1	0,1
TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,6	51,2	1,2
Localização Takagi	198,6	49,7	0,4
TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	209,8	52,5	2,5
Localização Takagi	204,4	51,1	1,1
TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	391,4	97,9	7,8
Localização Takagi	362,2	90,6	0,6
TERM_A_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localização Novo Wiszniewski	360,3	90,1	0,1
Localização Wiszniewski original	435,1	108,8	18,8
Localização Takagi	Inf	Inf	inf
CASO	ohm	Erro	
TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	

Tabela 5.15 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais – SIR = 10

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	39,8	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,7	9,9	0,1
Localização Takagi	39,7	9,9	0,1
<b>TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,2	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	35,1	8,8	1,2
Localização Takagi	33,4	8,3	1,7
<b>TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	205,3	51,3	1,3
Localização Wiszniewski original	210,0	52,5	2,5
Localização Takagi	Inf	Inf	inf
<b>TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,1	49,8	0,2
Localização Wiszniewski original	198,8	49,7	0,3
Localização Takagi	180,1	45,0	5,0
<b>TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	377,5	94,4	4,4
Localização Wiszniewski original	410,3	102,6	12,6
Localização Takagi	Inf	Inf	inf
<b>TERM_A_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Localização Novo Wiszniewski	360,6	90,2	0,2
Localização Wiszniewski original	394,1	98,5	8,5
Localização Takagi	Inf	Inf	inf
CASO	ohm	Erro	
<b>TERM_A_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
<b>TERM_A_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
<b>TERM_A_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
<b>TERM_A_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,3	0,3	
<b>TERM_A_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
<b>TERM_A_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	



---

---

A seguir são apresentados os resultados das localizações pelo terminal B utilizando as simulações feitas no ATP.

---

---

Tabela 5.16 – Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,8	10,2	0,2
Localização Wiszniewski original	40,8	10,2	0,2
Localização Takagi	40,3	10,1	0,1
TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,8	10,2	0,2
Localização Takagi	40,1	10,0	0,0
TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	199,4	49,8	0,2
Localização Wiszniewski original	201,3	50,3	0,3
Localização Takagi	199,7	49,9	0,1
TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	199,9	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,3	51,1	1,1
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	358,3	89,6	0,4
Localização Wiszniewski original	367,6	91,9	1,9
Localização Takagi	358,3	89,6	0,4
TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	369,4	92,4	2,3
Localização Wiszniewski original	364,1	91,0	1,0
Localização Takagi	338,5	84,6	5,4
CASO	Ohm	Erro	
TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,7	0,7	
TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,5	0,5	
TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	33,5	6,5	

Tabela 5.17 - Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,7	10,2	0,2
Localização Wiszniewski original	40,7	10,2	0,2
Localização Takagi	40,2	10,0	0,0
<b>TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,4	10,1	0,1
Localização Takagi	39,0	9,7	0,3
<b>TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,0	49,7	0,3
Localização Wiszniewski original	201,3	50,3	0,3
Localização Takagi	199,6	49,9	0,1
<b>TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,8	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	203,8	50,9	0,9
Localização Takagi	197,3	49,3	0,7
<b>TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	355,1	88,8	1,2
Localização Wiszniewski original	367,8	91,9	1,9
Localização Takagi	358,2	89,5	0,5
<b>TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	359,8	90,0	0,0
Localização Wiszniewski original	361,3	90,3	0,3
Localização Takagi	338,1	84,5	5,5
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,7	0,7	
<b>TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,2	0,2	
<b>TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
<b>TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
<b>TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
<b>TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,7	0,7	

Tabela 5.18 - Curto-circuito fase-terra - impedâncias terminais  $SIR = 0,1$

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	41,6	10,4	0,4
Localização Wiszniewski original	41,6	10,4	0,4
Localização Takagi	41,1	10,3	0,3
<b>TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,5	10,1	0,1
Localização Takagi	40,3	10,1	0,1
<b>TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,8	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	201,8	50,5	0,5
Localização Takagi	199,7	49,9	0,1
<b>TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,8	49,9	0,1
Localização Wiszniewski original	202,4	50,6	0,6
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
<b>TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	358,8	89,7	0,3
Localização Wiszniewski original	373,3	93,3	3,3
Localização Takagi	360,2	90,1	0,1
<b>TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Localização Novo Wiszniewski	360,2	90,0	0,0
Localização Wiszniewski original	368,7	92,2	2,2
Localização Takagi	359,3	89,8	0,2
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_B_AT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,7	0,3	
<b>TERM_B_AT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,9	0,1	
<b>TERM_B_AT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
<b>TERM_B_AT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,9	0,1	
<b>TERM_B_AT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
<b>TERM_B_AT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,4	0,4	

Tabela 5.19 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,9	10,0	0,0
TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,6	9,9	0,1
Localização Takagi	39,5	9,9	0,1
TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	199,7	49,9	0,1
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,2	49,8	0,2
TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	205,3	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	361,1	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	386,3	96,6	6,6
Localização Takagi	361,4	90,3	0,3
TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	363,1	90,8	0,8
Localização Wiszniewski original	415,7	103,9	13,9
Localização Takagi	376,4	94,1	4,1
CASO	ohm	Erro	
TERM_B_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,2	0,2	
TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,2	0,1	
TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,2	0,8	

Tabela 5.20 – Curto-circuito fase-fase - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,9	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	10,0	0,0
<b>TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	36,2	9,1	0,9
Localização Takagi	36,0	9,0	1,0
<b>TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	199,7	49,9	0,1
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	198,9	49,7	0,3
<b>TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	199,0	49,8	0,2
Localização Takagi	193,0	48,2	1,8
<b>TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	361,1	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	386,2	96,6	6,6
Localização Takagi	360,7	90,2	0,2
<b>TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	364,0	91,0	1,0
Localização Wiszniewski original	384,9	96,2	6,2
Localização Takagi	342,3	85,6	4,4
CASO	ohm	Erro	
<b>TERM_A_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
<b>TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
<b>TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,3	0,3	
<b>TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,2	0,1	
<b>TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
<b>TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	38,8	1,2	

Tabela 5.21 – Curto-circuito fase-fase - impedâncias terminais – SIR = 0,1

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	10,0	0,0
TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,2	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,8	10,2	0,2
Localização Takagi	40,7	10,2	0,2
TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	198,9	49,7	0,3
TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	200,9	50,2	0,2
Localização Wiszniewski original	207,2	51,8	1,8
Localização Takagi	201,8	50,5	0,5
TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	360,1	90,0	0,0
Localização Wiszniewski original	386,3	96,6	6,6
Localização Takagi	358,8	89,7	0,3
TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	360,6	90,2	0,2
Localização Wiszniewski original	391,9	98,0	8,0
Localização Takagi	362,5	90,6	0,6
CASO	ohm		Erro
TERM_B_AC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0		0,0
TERM_B_AC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0		0,0
TERM_B_AC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0		0,0
TERM_B_AC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,9		0,1
TERM_B_AC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,3		0,7
TERM_B_AC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0		0,0

Tabela 5.22 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,9	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	39,9	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,9	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,6	9,9	0,1
Localização Takagi	39,5	9,9	0,1
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,1	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,4	49,9	0,1
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,2	49,8	0,2
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,5	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	205,3	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	362,4	90,6	0,6
Localização Wiszniewski original	386,2	96,6	6,6
Localização Takagi	360,3	90,1	0,1
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	362,0	90,5	0,5
Localização Wiszniewski original	386,2	96,6	6,6
Localização Takagi	360,3	90,1	0,1
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	363,8	90,9	0,9
Localização Wiszniewski original	414,6	103,7	13,7
Localização Takagi	375,2	93,8	3,8
CASO	Ohm		Erro
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0		0,0
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0		0,0
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1		0,1
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1		0,1
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1		0,1
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1		0,1
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,4		0,6
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,5		0,5
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	38,8		1,3



Tabela 5.23 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,9	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,9	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	36,2	9,1	0,9
Localização Takagi	36,0	9,0	1,0
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,0	49,7	0,3
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	198,9	49,7	0,3
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,4	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	199,0	49,8	0,2
Localização Takagi	193,0	48,2	1,8
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	361,1	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	386,1	96,5	6,5
Localização Takagi	359,6	89,9	0,1
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	362,3	90,6	0,6
Localização Wiszniewski original	386,1	96,5	6,5
Localização Takagi	359,6	89,9	0,1
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	363,3	90,8	0,8
Localização Wiszniewski original	383,9	96,0	6,0
Localização Takagi	341,3	85,3	4,7
CASO	Ohm	Erro	
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,6	0,4	
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,4	0,6	
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,2	0,9	

Tabela 5.24 – Fase-fase-terra - impedâncias terminais – SIR = 0,1

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,9	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,9	10,0	0,0
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,2	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,8	10,2	0,2
Localização Takagi	40,7	10,2	0,2
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	199,9	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	198,9	49,7	0,3
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	199,9	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,0	49,8	0,3
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	201,3	50,3	0,3
Localização Wiszniewski original	207,2	51,8	1,8
Localização Takagi	201,8	50,5	0,5
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	360,2	90,1	0,0
Localização Wiszniewski original	386,3	96,6	6,6
Localização Takagi	358,8	89,7	0,3
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	359,6	89,9	0,1
Localização Wiszniewski original	386,0	96,5	6,5
Localização Takagi	357,9	89,5	0,5
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	359,9	90,0	0,0
Localização Wiszniewski original	391,8	98,0	8,0
Localização Takagi	362,0	90,5	0,5
CASO	Ohm	Erro	
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ACT_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ACT_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,3	0,3	
TERM_B_ACT_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,1	0,1	
TERM_B_ACT_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,7	0,3	
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,3	0,7	
TERM_B_ACT_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,2	0,8	
TERM_B_ACT_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,4	0,4	

Tabela 5.25 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais simétricas

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	9,9	0,1
TERM_B_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	39,6	9,9	0,1
Localização Takagi	39,5	9,9	0,1
TERM_B_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,3	51,1	1,1
Localização Takagi	198,4	49,6	0,4
TERM_B_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	205,3	51,3	1,3
Localização Takagi	200,0	50,0	0,0
TERM_B_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	361,5	90,4	0,4
Localização Wiszniewski original	388,6	97,1	7,1
Localização Takagi	357,7	89,4	0,6
TERM_B_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Localização Novo Wiszniewski	362,9	90,7	0,7
Localização Wiszniewski original	415,7	103,9	13,9
Localização Takagi	375,5	93,9	3,9
CASO	ohm	Erro	
TERM_B_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
TERM_B_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,2	0,8	

Tabela 5.26 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais com 9 graus de diferença

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,7	9,9	0,1
TERM_B_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	40,1	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	36,3	9,1	0,9
Localização Takagi	36,1	9,0	1,0
TERM_B_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,2	51,1	1,1
Localização Takagi	197,7	49,4	0,6
TERM_B_ABC_50%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	200,3	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	199,1	49,8	0,2
Localização Takagi	193,0	48,2	1,8
TERM_B_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	361,0	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	387,6	96,9	6,9
Localização Takagi	356,6	89,2	0,8
TERM_B_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=9			
Localização Novo Wiszniewski	362,7	90,7	0,7
Localização Wiszniewski original	384,7	96,2	6,2
Localização Takagi	341,7	85,42	4,6
CASO	ohm	Erro	
TERM_B_ABC_10%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_10%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ABC_50%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_50%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,1	0,1	
TERM_B_ABC_90%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,9	0,1	
TERM_B_ABC_90%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=9			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	39,2	0,8	

Tabela 5.27 – Curto-circuito trifásico - impedâncias terminais – SIR = 0,1

CASO	km	%	Erro %
TERM_B_ABC_10%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,0	10,0	0,0
Localização Wiszniewski original	40,0	10,0	0,0
Localização Takagi	39,8	10,0	0,0
TERM_B_ABC_10%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	40,3	10,1	0,1
Localização Wiszniewski original	40,9	10,2	0,2
Localização Takagi	40,8	10,2	0,2
TERM_B_ABC_50%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	200,0	50,0	0,0
Localização Wiszniewski original	204,5	51,1	1,1
Localização Takagi	199,2	49,8	0,2
TERM_B_ABC_50%_40-OHMANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	200,4	50,1	0,1
Localização Wiszniewski original	206,9	51,7	1,7
Localização Takagi	201,4	50,4	0,4
TERM_B_ABC_90%_1-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	388,6	97,1	7,1
Localização Takagi	359,6	89,9	0,1
TERM_B_ABC_90%_40-OHM_ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Localização Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localização Wiszniewski original	391,7	97,9	7,9
Localização Takagi	362,2	90,6	0,5
CASO	ohm	Erro	
TERM_B_ABC_10%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_10%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
TERM_B_ABC_50%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	1,0	0,0	
TERM_B_ABC_50%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	
TERM_B_ABC_90%_1-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,7	0,3	
TERM_B_ABC_90%_40-OHM__ANG(ZB-ZA)=0_MOD(ZB/ZA)=0,1			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0	

### 5.3 – Desempenho do algoritmo frente às adaptações propostas

Para se verificar a efetividade das adaptações propostas, mostra-se a seguir estudo do desempenho do algoritmo frente à aplicação de cada adaptação separadamente, tendo sido escolhido um caso crítico para o estudo (curto-circuito entre uma fase e a terra, de alta resistência, localizado nas porções finais da LT e com uma significativa diferença entre impedâncias terminais).

Caso estudado:

TERM\_A\_AT\_90%\_100-OHM\_ANG(ZA-ZB)=9

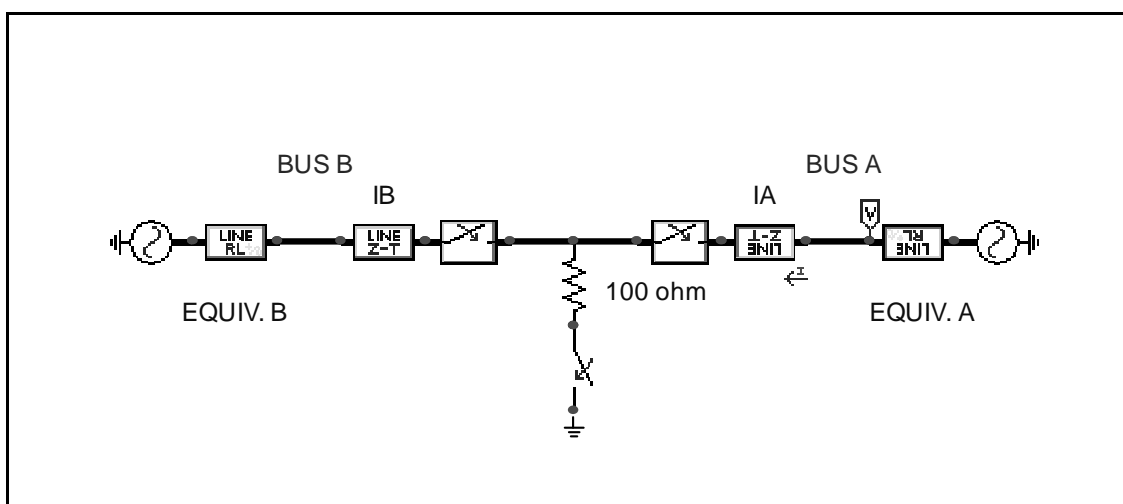
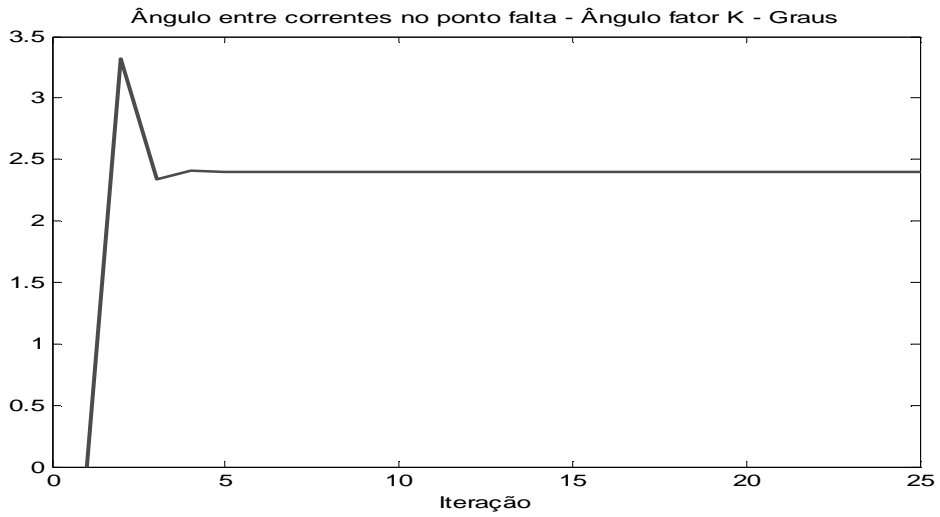
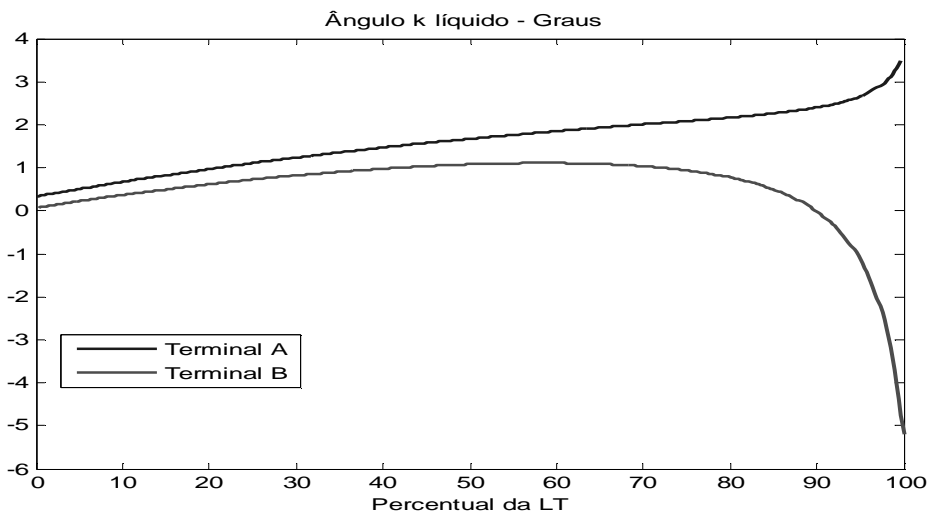


Figura 5.55 – Caso para estudo do desempenho do algoritmo

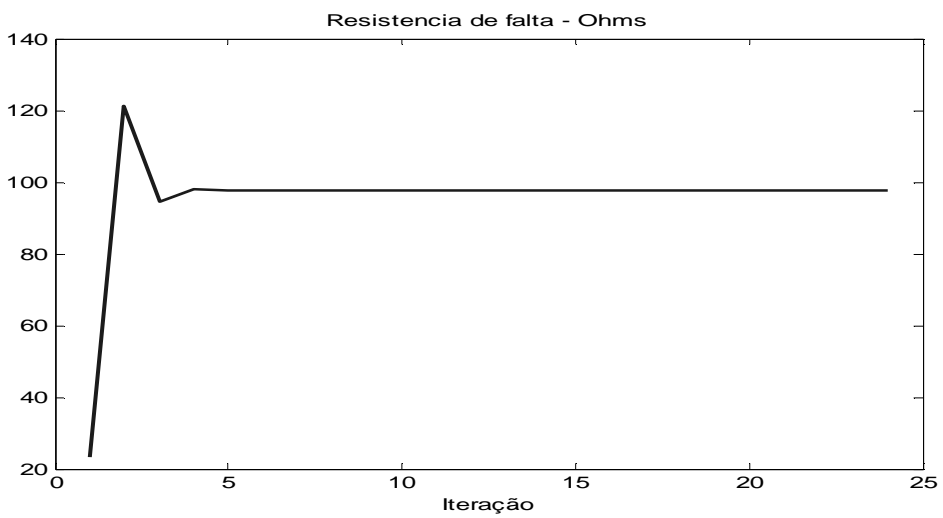
A figura seguinte mostra a eficiência do algoritmo completo, ou seja, com todas as três adaptações propostas.



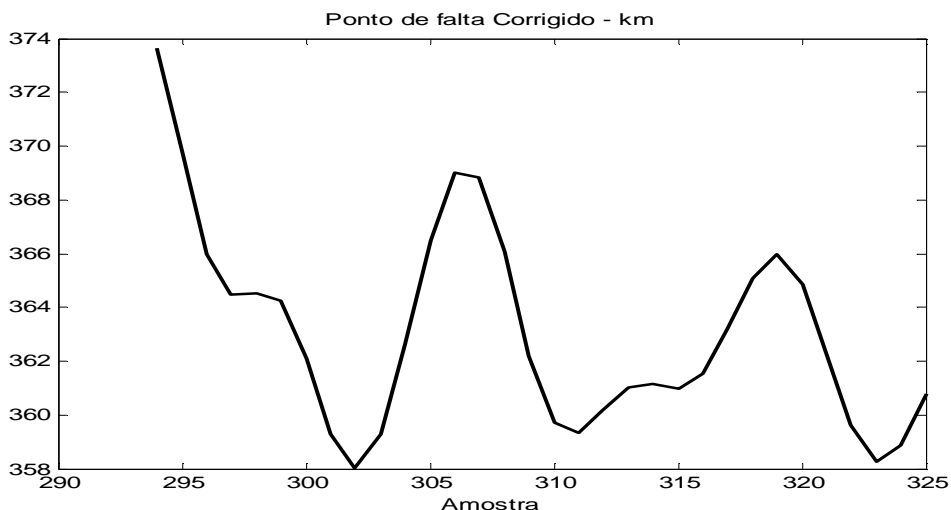
(a)



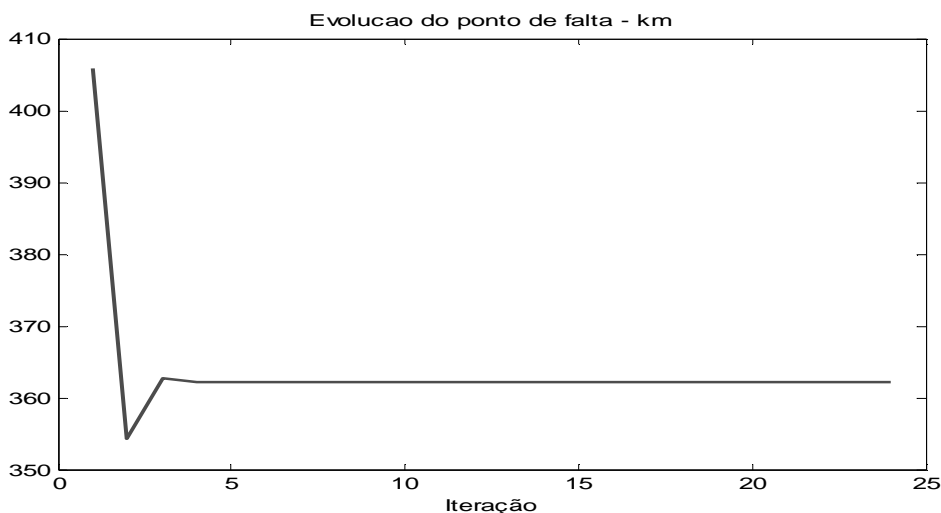
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.56 – Eficiência do algoritmo completo

Pela Figura 5.56(e) pode ser verificado o desempenho das adaptações propostas: o ponto de falta mediano estimado aproxima-se bastante do ponto real de falta – 360 km –, chegando em 362 km praticamente na terceira iteração, ante os 406 km estimado pelo algoritmo original (primeira iteração na figura).

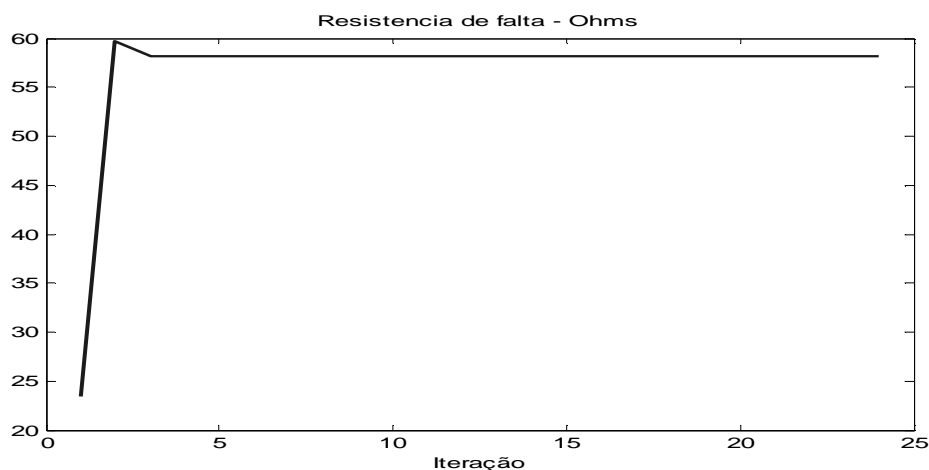
Também o ângulo do fator K (ângulo  $\lambda$ ) calculado pelo algoritmo completo e apresentado na Figura 5.56(a) aproxima-se muito do valor real mostrado na Figura 5.56(b).



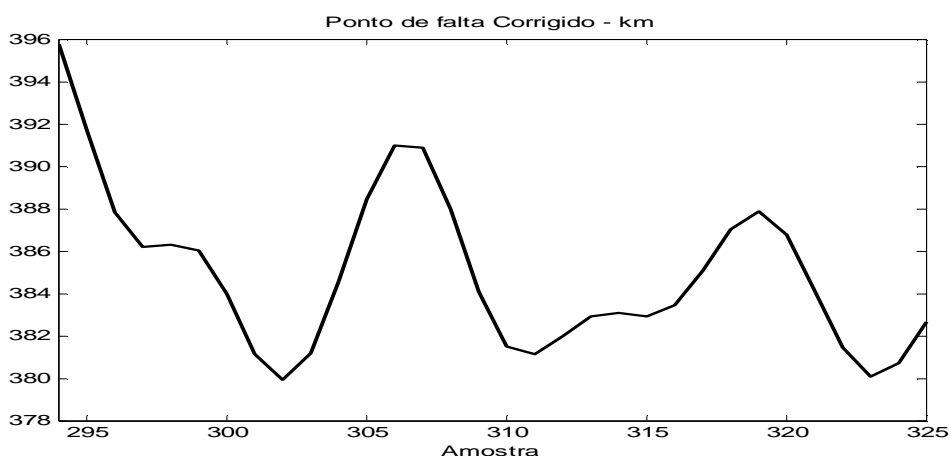
Analisando a Figura 5.56(c), é possível concluir que a resistência de falta também se aproxima muito do valor real – 100 ohms.

A utilização de valores por amostra para estimação do ponto de falta e de valores medianos para os cálculos das adaptações propostas e ainda para apresentação do ponto de falta a partir dos dados da Figura 5.56(d) se mostraram também eficientes, pois, a despeito da grande variação do ponto da falta, aproximadamente de 20 km entre as extremidades, o valor mediano – 362 km – aproxima-se bastante do ponto real – 360 km.

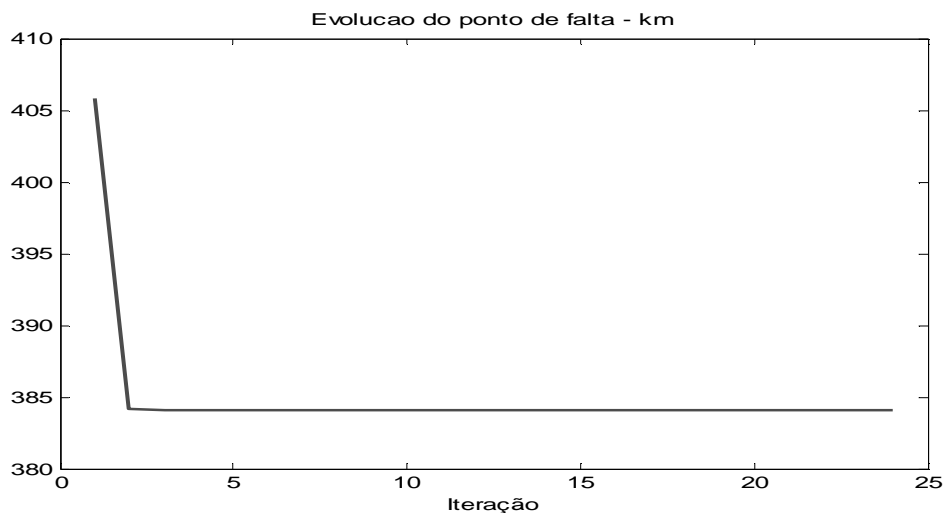
A figura seguinte mostra o desempenho do algoritmo, considerando-se somente a inclusão do efeito capacitivo, ou seja, utiliza-se a Equação (3.86), porém admitindo-se que o fator  $K$  é um número real e que a própria corrente do terminal seja usada como corrente no ponto de falta na Equação (2.22).



(a)



(b)

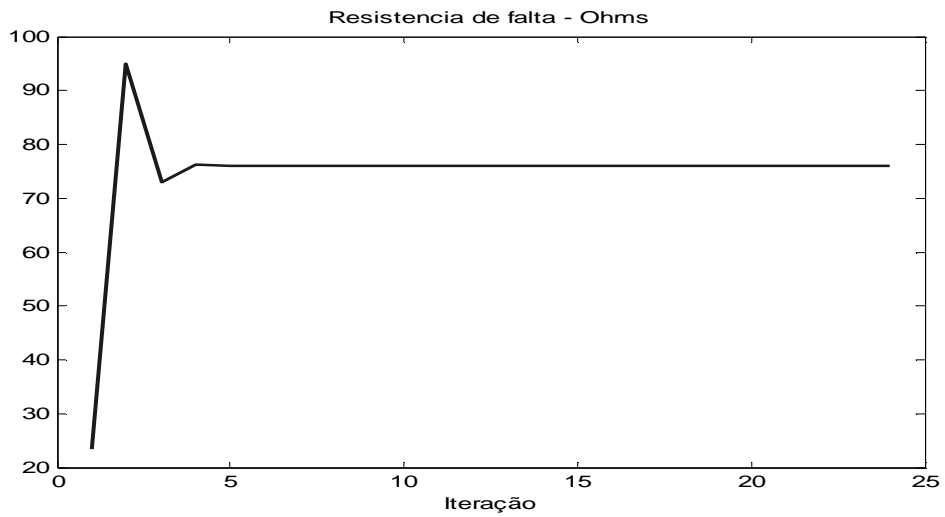


(c)

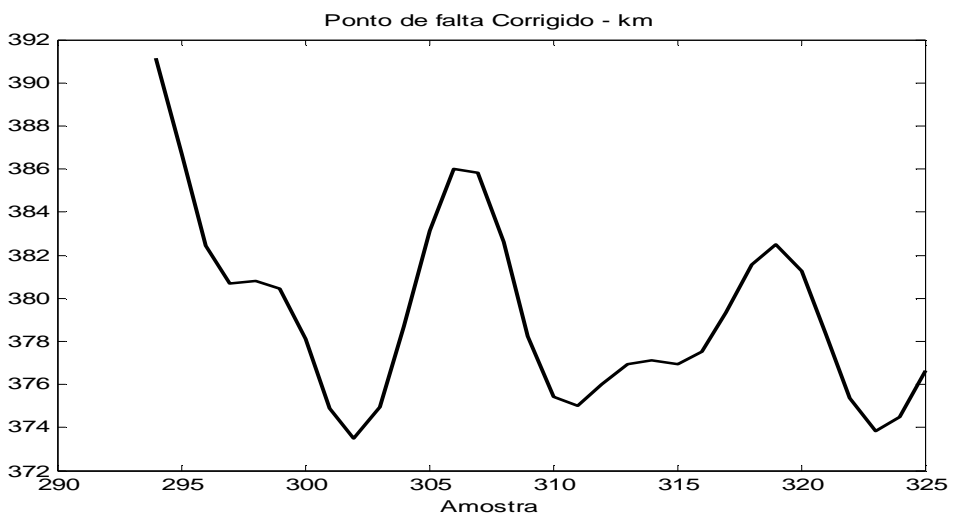
Figura 5.57 – Desempenho da correção do capacitivo no algoritmo

Para o caso apresentado, a inclusão do efeito capacitivo mostra bom desempenho, trazendo o ponto de falta para 384 km e aproximando-se do ponto de falta real – 360 km –, já na segunda iteração, ante os 406 km calculados pelo método original na primeira iteração. A resistência de falta estimada evolui significativamente em direção aos 100 ohms, indicando 58 ohms na terceira iteração, ante os 25 ohms calculados pelo método original considerando  $K=1$  e  $\lambda=0$  grau na Equação (2.23).

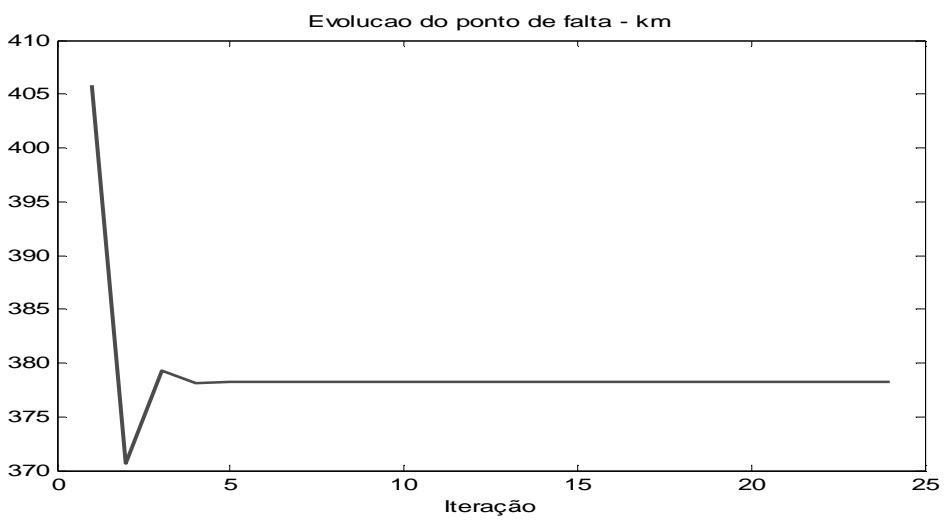
A próxima figura mostra o desempenho do algoritmo, considerando-se somente a correção do fator  $K$ , ou seja, quando utilizadas as equações (3.42) e (3.36) para correção do fator  $K$  e correção da corrente no ponto de falta respectivamente na Equação (2.22), porém aplicando-se na seqüência a Equação (2.32) que não considera a inclusão do efeito capacitivo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.58 - Desempenho da correção do fator K no algoritmo

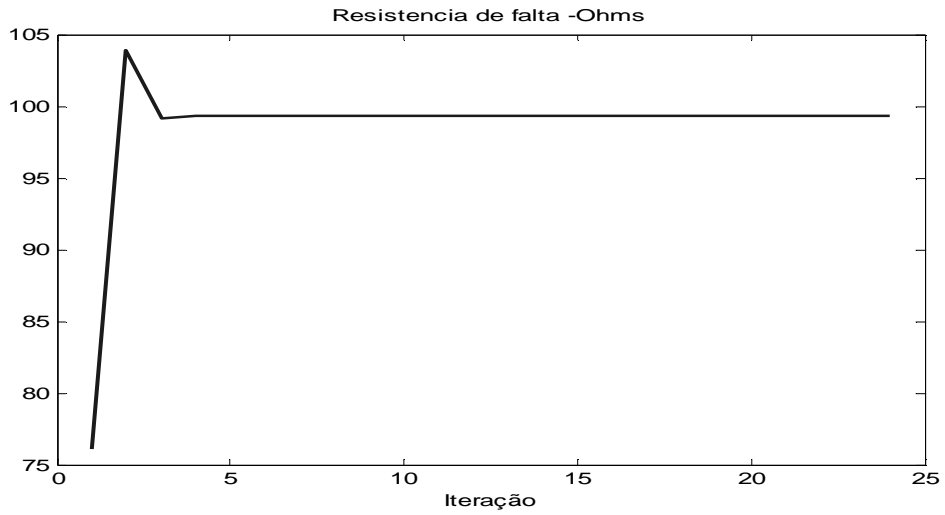
Para o caso apresentado, o cômputo do fator  $K$  também mostra bom desempenho, trazendo o ponto de falta para 378 km e aproximando-se do ponto real de falta – 360 km – já na quarta iteração, ante os 406 km calculados pelo método original na primeira iteração. A resistência de falta estimada evolui significativamente em direção aos 100 ohms, indicando 76.1 ohms na quarta iteração, ante os 25 ohms calculados pelo método original, considerando  $K = 1$  e  $\lambda = 0$  grau na Equação (2.23).

Para o caso estudado, cada correção separadamente mostrou bom resultado, reduzindo o erro significativamente. As correções utilizadas todas simultaneamente se mostraram muito eficazes, trazendo o ponto de falta estimado para bem próximo do ponto real.

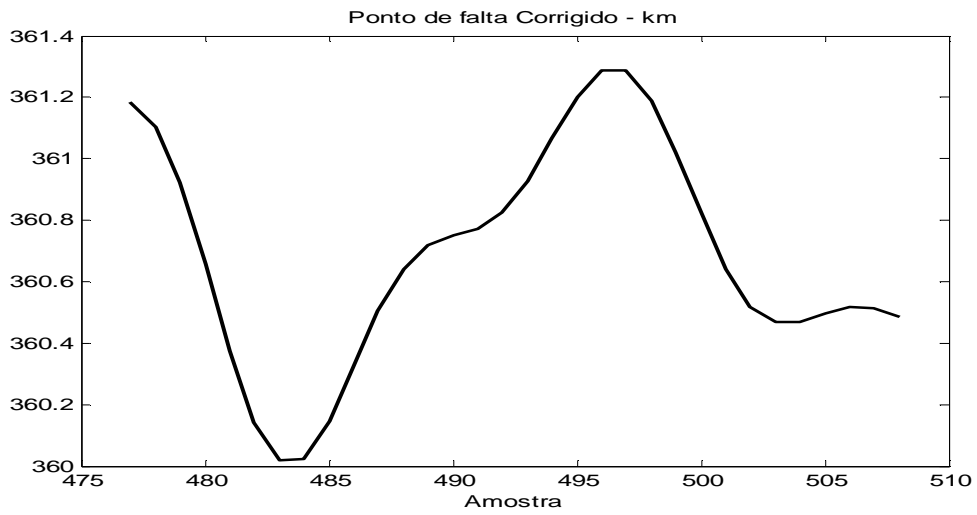
#### **5.4 – Desempenho com terminal remoto aberto**

Em alguns casos especiais, pequenas variações no cálculo do valor do ângulo entre as correntes terminais no ponto de falta podem provocar erros elevados na estimação da falta ou até mesmo impedir a convergência do resultado da estimação pelo algoritmo proposto. Esses casos são basicamente os de elevada resistência de falta e próximos ao terminal remoto. Na prática, em casos como esses, a contribuição reduzida do terminal local para a falta pode provocar atraso na abertura do seu disjuntor, permanecendo o curto-circuito alimentado em radial. Nessa condição, a estimação do ponto de falta se torna extremamente simplificada, mais exata e robusta.

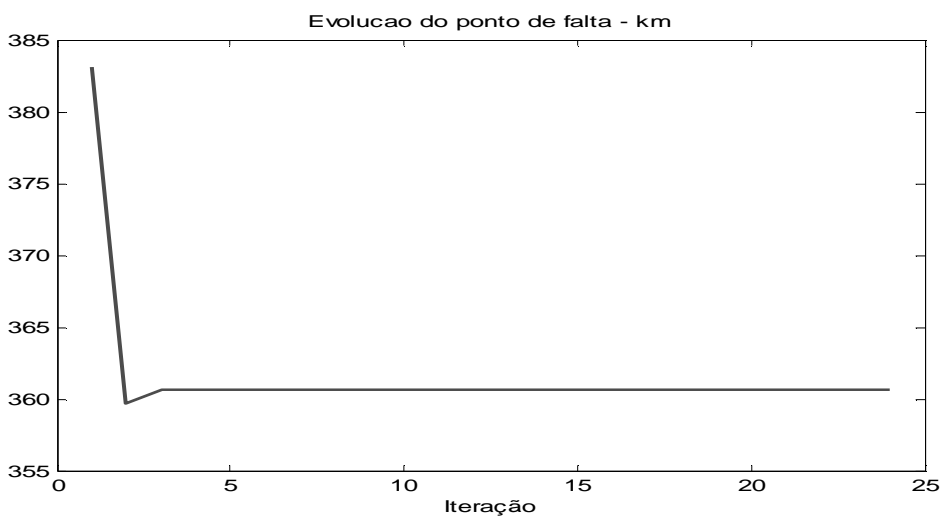
A figura seguinte mostra a eficiência do algoritmo para o caso apresentado, ou seja, curto-circuito com elevada resistência de falta e próximo do terminal remoto, cuja localização é feita com os dados registrados após a abertura do terminal remoto.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.59 - Eficiência do algoritmo com terminal remoto aberto

Com o terminal remoto aberto e contribuição apenas do terminal local para a falta, não é necessário o cômputo das correntes terminais para o fator K, pois não existe acoplamento entre os terminais nesse instante, sendo suficiente apenas o cômputo da corrente desse terminal no ponto de falta. Em outras palavras, não é necessário o auxílio da topologia de um programa de cálculo de curto-circuito na determinação do fator K. Assim, como o algoritmo utiliza somente os valores medidos e os parâmetros conhecidos da LT, a estimação do ponto de falta se aproxima bem do valor real, conforme apresentado nas figuras 5.59(b) e (c).

A tabela a seguir sintetiza as localizações dos casos apresentados nos dois itens anteriores.

*Tabela 5.28 – Eficiência do algoritmo frente às adaptações propostas e frente a terminal remoto aberto*

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	362,2	90,6	0,6
Localização Wiszniewski original	405,8	101,5	11,5
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_APENAS_CAPACITIVO</b>			
Localização Novo Wiszniewski	384,1	96,0	6,0
Localização Wiszniewski original	405,8	101,5	11,5
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_APENAS FATOR K</b>			
Localização Novo Wiszniewski	378,3	94,6	4,6
Localização Wiszniewski original	405,8	101,5	11,5
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_REMOTO ABERTO</b>			
Localização Novo Wiszniewski	360,6	90,2	0,2
Localização Wiszniewski original	383,1	95,8	5,8
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	97,8	2,2	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_APENAS_CAPACITIVO</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	58,1	41,9	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_APENAS FATOR K</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	76,1	23,9	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_REMOTO ABERTO</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	99,4	0,6	

### 5.5 – Sensibilidade do algoritmo frente à variação angular do fator K

Nas tabelas 5.29 e 5.30 é mostrada a sensibilidade da estimaco do ponto de falta pelo método proposto frente à variaco do ângulo do fator K (ângulo  $\lambda$ ) em casos de faltas de alta e baixa resistência. Foram consideradas as variaes angulares apenas para o método proposto, ou seja, apenas a estimaco pelo algoritmo proposto (Novo Wiszniewski) vai apresentar variaes angulares e conseqentemente variaes na estimaco do ponto de falta.

*Tabela 5.29 – Sensibilidade do algoritmo frente a variaes do ângulo do fator K com alta resistência*

CASO	km	%	Erro %
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9			
Localizao Novo Wiszniewski	361,2	90,3	0,3
Localizao Wiszniewski original	392,1	98,0	8,0
Localizao Takagi	Inf	Inf	Inf
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +2 GRAUS			
Localizao Novo Wiszniewski	351,5	87,9	2,1
Localizao Wiszniewski original	391,9	98,0	8,0
Localizao Takagi	Inf	Inf	Inf
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K -2 GRAUS			
Localizao Novo Wiszniewski	371,0	92,8	2,8
Localizao Wiszniewski original	391,9	98,0	8,0
Localizao Takagi	Inf	Inf	Inf
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10			
Localizao Novo Wiszniewski	360,9	90,2	0,2
Localizao Wiszniewski original	384,7	96,2	6,2
Localizao Takagi	Inf	Inf	Inf
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10_FATOR K +2 GRAUS			
Localizao Novo Wiszniewski	335,8	84,0	6,0
Localizao Wiszniewski original	384,7	96,2	6,2
Localizao Takagi	Inf	Inf	Inf
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10_FATOR K -2 GRAUS			
Localizao Novo Wiszniewski	425,1	106,3	16,3
Localizao Wiszniewski original	384,7	96,2	6,2
Localizao Takagi	Inf	Inf	inf

CASO	Ohm	Erro
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9		
Resistncia calculada Novo Wiszniewski	39,9	0,1
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +2 GRAUS		
Resistncia calculada Novo Wiszniewski	46,9	6,9
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K -2 GRAUS		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	32,8	7,2
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	40,0	0,0
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10_FATOR K +2 GRAUS		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	58,4	18,4
TERM_A_AT_90%_40-OHM_ANG(ZA-ZB)=0_MOD(ZA/ZB)=10_FATOR K -2 GRAUS		
Resistência calculada Novo Wiszniewski	12,2	27,8

*Tabela 5.30 – Sensibilidade do algoritmo frente a variações do ângulo do fator K com elevada e baixa resistência*

CASO	km	%	Erro %
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9</b>			
Localização Novo Wiszniewski	354,9	88,7	1,3
Localização Wiszniewski original	371,3	92,8	2,8
Localização Takagi	358,0	89,5	0,5
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +10 GRAUS</b>			
Localização Novo Wiszniewski	355,8	89,0	1,1
Localização Wiszniewski original	371,3	92,8	2,8
Localização Takagi	358,0	89,5	0,5
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +2 GRAUS</b>			
Localização Novo Wiszniewski	345,2	86,3	3,7
Localização Wiszniewski original	405,8	101,5	11,5
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K -2 GRAUS</b>			
Localização Novo Wiszniewski	378,6	94,6	4,6
Localização Wiszniewski original	405,8	101,5	11,5
Localização Takagi	Inf	Inf	Inf
CASO	Ohm	Erro	
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,8	0,2	
<b>TERM_A_AT_90%_1-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +10 GRAUS</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	0,8	0,2	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K +2 GRAUS</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	128,0	28,0	
<b>TERM_A_AT_90%_100-OHM_ANG(ZA-ZB)=9_FATOR K -2 GRAUS</b>			
Resistência calculada Novo Wiszniewski	67,2	32,8	

Analisando as tabelas 5.28 a 5.30, fica evidente o aumento do erro imposto ao algoritmo com o aumento da resistência de falta e da variação angular do fator K.

A sensibilidade – aumento do erro – torna-se mais acentuada para o caso em que o terminal local possui impedância equivalente muito maior que o terminal remoto.

Já para faltas de baixa resistência, o algoritmo praticamente não é afetado pela variação angular.



Para entender a sensibilidade do ângulo do fator K no algoritmo original, é feita a Comparação dos resultados da estimação da localização a noventa por cento da LT nas tabelas 5.4 e 5.5. Percebe-se que o erro imposto ao algoritmo original é maior para o caso dessa última, na qual a diferença angular entre impedâncias terminais é nove graus, e o ângulo líquido esperado para o ponto de falta é aproximadamente dois graus – conforme mostrado na Figura 4.36(b). Já no caso da Tabela 5.4, não existe diferença angular entre os terminais, e o ângulo líquido esperado para o ponto de falta é aproximadamente zero grau, conforme mostrado na Figura 4.37(b). Nesse caso, o erro é menor, pois o algoritmo original considera o ângulo líquido no ponto de falta igual a zero grau.

Por outro lado, a despeito da grande diferença angular entre terminais – nove graus –, a diferença entre ângulos líquidos foi de apenas dois graus, conforme pode ser comprovado na Figura 4.36(b).

## **5.6 – Análise dos resultados dos casos simulados**

Avaliando as tabelas 5.4 a 5.27, é possível perceber o bom desempenho do algoritmo adaptado. Na grande maioria dos resultados apresentados o erro é inferior a dois por cento do comprimento da LT. O erro percentual máximo verificado foi inferior a cinco por cento, indicado no penúltimo caso da Tabela 5.15, sendo que somente em outros dois casos, ambos indicados na Tabela 4.12, o erro percentual ficou acima de dois por cento.

Nesses três casos, ambos provenientes de curto-circuito no final da LT e com a localização estimada pelo terminal fraco (impedância equivalente do terminal local maior dez vezes que a impedância equivalente do terminal remoto), o erro elevado foi imposto por demora na estabilização dos fasores de tensão, conforme mostrado na Figura 5.60.

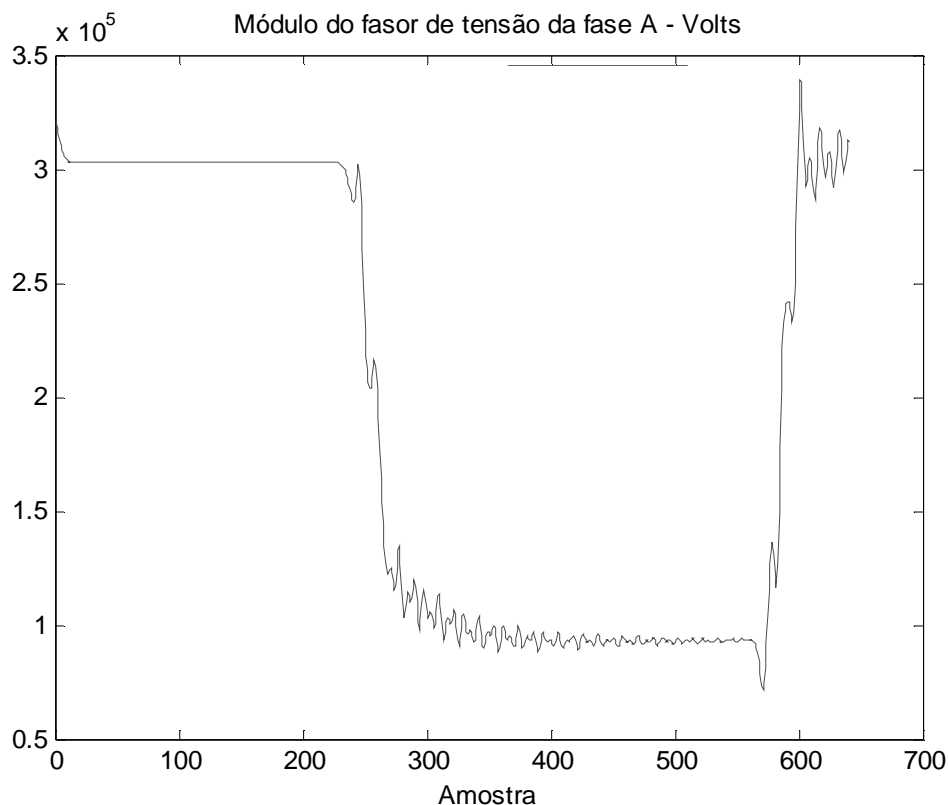


Figura 5.60 – Demora na estabilização do fasor de tensão referente ao penúltimo caso da Tabela 5.15

### 5.7 – Resultados de casos reais

Para efeito de avaliação do desempenho do algoritmo aplicado em casos reais, são apresentadas na Tabela 5.31 sete localizações feitas pelo algoritmo adaptado – todas com identificação do ponto real, localizado pelas equipes de manutenção durante inspeção detalhada na LT.

Todas as faltas ocorreram entre uma fase e a terra, em uma LT de 343 km, em 500 kV, com características similares à LT simulada no ATP.

Para obtenção do fator K, foram simulados curtos-circuitos no ASPEN OneLiner © – aplicativo para cálculo de curto-circuito –, utilizando-se o caso de curto-circuito referente ao ano 2007 da Cemig.

Tabela 5.31 – Localização de falta em casos reais

Caso	Terminal	Tipo de falta	Novo Wiszniewski		Wiszniewski original		Resistência Novo Wiszniewski	Ponto real	
			km	% da LT	km	% da LT	Ohm	km	% da LT
1	A	Fase BR com Terra	298,1	87,0	306,0	89,2	24,7	291,7	85,0
2	A	Fase BR com Terra	336,4	98,1	330,7	96,4	12,9	327,0	95,3
3	A	Fase AZ com Terra	294,9	86,0	300,2	87,4	17,7	289,0	84,3
4	A	Fase AZ com Terra	286,4	83,5	293,7	85,6	1,8	289,0	84,3
4	B	Fase AZ com Terra	53,9	15,7	53,9	15,7	1,8	53,7	15,7
5	A	Fase AZ com Terra	8,4	2,5	7,3	2,1	1,7	7,7	2,2
5	B	Fase AZ com Terra	332,9	97,1	341,6	99,6	1,9	335,0	97,7

Nas localizações da Tabela 5.31, já está considerada a compensação da corrente do reator pela aplicação das equações (3.95) e (3.96), pois a LT possui reator *shunt* em ambos os terminais.

A aplicação do algoritmo adaptado – *Novo Wiszniewski* – e a compensação da corrente do reator nas localizações de casos reais da Tabela 5.31 mostram-se bastante eficazes, reduzindo o erro na maioria dos casos, se comparados com o algoritmo original.

---

# Capítulo 6

## Conclusões

### 6.1 – Conclusões

A despeito da iteratividade, as adaptações propostas proporcionam ao algoritmo exatidão e robustez, constituindo-se numa ferramenta simples econômica e confiável para localização de faltas em linhas de transmissão. Outra vantagem do algoritmo proposto é que ele calcula o valor da resistência de falta  $R_F$  e não apenas a relação entre a resistência de falta e o fator de distribuição entre os terminais -  $R_F/K$ .

A utilização de valores medianos para o sinal filtrado mostrou-se confiável, uma vez que se aproxima muito do valor real.

Obviamente erros na medição, assim como nos parâmetros da linha, implicarão em erros na localização. Não é objetivo deste trabalho investigar a sensibilidade do algoritmo a tais erros.

Espera-se que variações entre a topologia real do sistema e a topologia do programa de cálculo de curto-circuito não comprometam muito a exatidão da estimativa do ponto de falta, já que a variação angular na corrente de cada terminal é pouco afetada (componentes do sistema – linhas, transformadores e geradores – possuem impedâncias com ângulos muito próximos; a retirada de um não afeta significativamente o equivalente em ângulo). Por outro lado, a resistência de falta calculada pode ser afetada, caso tais alterações promovam mudanças significativas na relação entre módulos das correntes dos terminais.

Os casos mais críticos para o algoritmo são curtos-circuitos muito próximos do terminal remoto com elevada resistência de falta, sendo o terminal local uma fonte muito mais fraca que o terminal remoto

Para faltas com elevada resistência (acima de 40 ohms) e distantes do terminal local, pequenas variações no ângulo entre as correntes no ponto de falta podem provocar grandes erros na localização da falta. Nesse caso, em contrapartida, pode ocorrer atraso na eliminação da falta pelo terminal local em relação ao terminal remoto, possibilitando a aplicação do fator K unitário e real (sem influência do terminal remoto, já que ele se encontra aberto). Nessa situação, a localização pelo algoritmo proposto, mesmo sendo para uma falta de elevada resistência, torna-se robusta e mais exata.

No caso de faltas de baixa resistência –  $R_F$  menor que três ohms –, o resultado da estimação pelo algoritmo proposto praticamente não é afetada pela desconsideração da parte imaginária do fator K na Equação (2.24). Em outras palavras, não é necessário simular curto-circuito para obtenção do fator K, pois apenas a inclusão do efeito capacitivo proposto neste trabalho já é suficiente para aproximar a estimativa do valor exato.

---

Para linhas nas quais o acoplamento entre os dois terminais é basicamente a linha, o cálculo da impedância equivalente “vista” pelas barras dos terminais não mudam com a variação do ponto de falta, ou seja, com o cálculo de apenas um curto-circuito na LT é possível determinar as impedâncias equivalentes das barras para aplicação na rotina de cálculo do fator  $K$ .

Na perspectiva de implementação do algoritmo, deve-se vislumbrar a aplicação de outros filtros para extração da componente fundamental, para comparação com o filtro de mínimos quadrados aqui utilizado.

Outro ponto importante é a definição do intervalo de falta na onda de corrente e tensão falta para aplicação dos cálculos, devendo ser utilizados os últimos ciclos em trechos de maior estabilidade possível, evitando assim grandes oscilações causadas pela componente exponencial da corrente e efeitos causados pela variação da resistência de falta no tempo.

Erros na medição introduzidos por incompatibilidade eletromagnética [1] (blindagem ineficientes de cabos de alimentação, multiterramentos nos circuitos de transformadores de potencial, entre outros) certamente terão impacto na localização da falta.

Como grande parte desses erros afeta apenas a componente de seqüência zero, a utilização apenas de valores de seqüência positiva ou negativa tornaria o algoritmo imune a tais erros. Para faltas entre fases, já são utilizados somente esses valores de seqüência, porém, para faltas entre uma fase e a terra, o atual algoritmo necessitaria naturalmente de mudanças compatíveis com a utilização de valores de seqüência, em substituição aos valores de fase aqui utilizados. Outra vantagem em utilizar somente seqüência negativa ou positiva é a imunidade do algoritmo às variações de resistividade do solo com as condições climáticas, que afetam apenas os parâmetros de seqüência zero da LT.

A compensação da corrente do reator inserido na linha de transmissão mostrou-se efetiva para aumento da exatidão do cálculo do ponto de falta,

influenciando significativamente os resultados para faltas distantes do terminal local nas quais a contribuição reduzida de corrente do terminal local para a falta é significativamente afetada pela contribuição de corrente do reator. Já no caso de faltas próximas do terminal local nas quais a contribuição de corrente do terminal local é elevada, a contribuição de corrente do reator praticamente não afeta os resultados da localização.

## 6.2 – Sugestões de continuidade

Neste trabalho, não foi explorada a influência causada pelo efeito da impedância mútua entre linhas de transmissão na exatidão da estimação do ponto da falta. Para esse tipo de influência, existem algumas soluções que podem ser introduzidas na metodologia utilizada, como, por exemplo, a utilização da corrente medida na LT paralela para compensação do efeito causado na outra LT.

Outro estudo pertinente seria a avaliação da variação da resistividade do solo na determinação dos parâmetros de seqüência zero da LT e os impactos na localização da falta.

O desenvolvimento de um algoritmo que utilize apenas grandezas de seqüência positiva ou negativa o tornaria imune a alguns erros já comentados, constituindo-se em uma boa linha de pesquisa para melhoria da exatidão da estimativa do ponto de falta na aplicação do algoritmo em casos de curtos-circuitos reais.

Neste trabalho, para faltas monofásicas (curtos-circuitos envolvendo uma fase e a terra), foi utilizada, como corrente pura de falta  $I_{FA}$  na Equação (2.20), a própria corrente de terra  $-3I_0$ , presente durante a falta.

Outra pesquisa interessante seria, para esse tipo de falta em casos reais ocorridos em LTs, verificar a resposta do algoritmo para a aplicação dessa corrente e compará-la com a resposta da aplicação da corrente pura de falta  $-I_{FA}$  apresentada na Tabela 2.2 – para definição da melhor opção a ser utilizada.

---

---

## Referências Bibliográficas

- [1] ALVES, W. M.; ALVES, C. E.; OLIVEIRA, J. F.; SOUZA, W. M. “*Análise das Principais Causas de Erros em Circuitos de Transformadores de Potencial e Suas Conseqüências para a Localização de Faltas e para o Desempenho de Proteções*”, VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC, Rio de Janeiro, 2005.
  - [2] ALVES, W. M.; PEREIRA, C. S.; RIGOTTO, G. J. Jr.; MIRANDA, M. B.; SOUZA, W. M. “*Adaptação do Método de Wiszniewski para Agregar Maior Exatidão à Localização de Faltas com Dados de Um Terminal*”, IX Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC, Belo Horizonte, 2008.
  - [3] PEREIRA, I. H. Jr.; PEREIRA, C. “*Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão com Informações dos Dois Terminais*”, CPDEE-UFMG, Belo Horizonte, 2004. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica)
  - [4] RABINER, L. R.; GOLD, B. “*Theory and Application of Digital Signal Processing*”, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1975.
  - [5] SILVEIRA, E. G. “*Localização Digital de Faltas em Linhas de Transmissão com a Utilização de Dados de Um Terminal*”, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2001 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).
  - [6] TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUSHI, T. “*Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, 1982.
  - [7] WISZNIEWSKI, A. “*Accurate fault impedance locating algorithm*”, IEE Proceedings, pt. C, vol. 130, no. 6, pp. 311–314, Nov. 1983.
  - [8] ZANETTA, L. C. Jr. “*Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*”, EdUSP, São Paulo, 2003.
-