



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Lincoln Lessa

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Profª. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

(Orientadora)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2012

Lessa, L., 1987.

Avaliação de um Método de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão / Lincoln Lessa – 2012.

X, 86p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

1. Modelos de Linhas de Transmissão. 2. Métodos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. I. Assis, T., M., L. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Avaliação de um Método de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão.

A Deus,
a minha avó, Maria Aparecida,
a minha mãe, Rosely,
a minha noiva, Daiane,
e a todos os meus amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me ajudar a superar todos os obstáculos que tenho encontrado durante toda a minha vida, e por todas as oportunidades que tem me proporcionado. Agradeço também pela minha vida, e pela vida de todos os meus familiares e amigos.

A minha avó, Maria Aparecida, e a minha mãe, Rosely, que sempre se esforçaram para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, sempre acreditaram em mim, e por todo carinho e dedicação que tiveram comigo todos esses anos.

A minha noiva, Daiane, que tem sido muito importante pra mim, e que tem me ajudado em minha trajetória todos os dias.

Aos meus familiares, por me incentivarem e me apoiarem em meus objetivos.

A todos os professores que já passaram pela minha vida, por toda compreensão e paciência. Em especial ao meu grande amigo José Cardoso, que é um dos responsáveis por tudo de bom que tem acontecido em minha vida.

A Professora Tatiana Mariano Lessa, por me orientar, ser sempre solícita em esclarecer minhas dúvidas e por sua contribuição à minha formação.

A todos os meus amigos, em especial ao Jardel Camelo e ao Felipe Santana, que me ajudaram durante toda a graduação.

Finalmente, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação como Engenheiro Eletricista e como pessoa.

Muito Obrigado a Todos Vocês!

RESUMO

As linhas de transmissão aéreas são um importante elemento dos sistemas de transmissão de energia elétrica, chegando a ter alguns milhares de quilômetros de extensão. Apesar de sua importância, as linhas de transmissão são extremamente susceptíveis a ação da natureza e a intervenção humana, fato que pode torná-las indisponíveis.

Neste contexto, podemos citar a Parcela Variável (PV), a qual consiste no desconto incidente sobre a remuneração dos ativos de transmissão que excedem os tempos máximos de desligamento permitidos, fazendo com que os métodos de localização de faltas se tornam extremamente relevantes, uma vez que impactam diretamente na remuneração recebidas pelas concessionárias.

O presente trabalho avaliou a eficiência do método LocMod em relação a diferentes tipos de faltas.

O método de localização de faltas LocMod é um método baseado na medição de fasores em regime permanente que utiliza dados de dois terminais da linha de transmissão, e sua principal vantagem com relação aos outros métodos existentes que utilizam dados de mais de um terminal é o fato de não haver necessidade que os dados medidos em ambos os terminais estejam sincronizados.

A análise da eficiência do método LocMod foi realizada para duas modelagens abordadas por este método (Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa), através de simulações de faltas no software Simulight, em três sistemas de transmissão de energia elétrica.

Através da análise dos resultados obtidos, concluímos que o método LocMod apresentou resultados satisfatórios para ambos os modelos simulados, embora tenha apresentado problemas pontuais.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas	10
1 Introdução.....	1
1.1 Causas de Faltas em Linhas de Transmissão	2
1.2 Objetivo	4
1.3 Metodologia do Trabalho.....	5
1.4 Divisão do Texto	5
2 Conceitos Básicos de Linhas de Transmissão.....	7
2.1 Modelagem de Linha de Transmissão.....	7
2.1.1 Modelo Linha Curta.....	7
2.2.2 Modelo Linha Média	8
2.2.3 Modelo Linha Longa	10
3 Métodos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão	15
3.1 LocMod – Modelo Linha Curta	18
3.2 LocMod – Modelo Linha Longa	21
4 Simulação Método LocMod	24
4.1 Simulação LocMod – Modelo Linha Curta.....	24
4.1.1 Curto-Circuito Trifásico com Impedância de Falta Nula em um Sistema Radial	25
4.1.2 Curto-Circuito Trifásico com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado	30
4.1.3 Curto-Circuito Fase - Terra com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado .	36
4.1.4 Efeito da Impedância de Falta no Método LocMod – Modelo Linha Curta	38
4.2 Simulação LocMod – Modelo Linha Longa.....	44
4.2.1 Curto Trifásico com Impedância de Falta Nula em Sistema Malhado	45
4.2.2 Curto-Circuito Fase - Terra com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado .	52
4.2.3 Efeito da Impedância de Falta no Método LocMod – Modelo Linha Longa	56
4.3 Análise dos Resultados Obtidos	60
5 Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros.....	63
5.1 Propostas de Trabalhos Futuros.....	63
Referências Bibliográficas	65
Anexo I.....	77
Anexo II.....	74

Anexo III.....	69
Anexo IV	67

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Circuito Equivalente Linha Curta	8
Figura 2.2 – Circuito Equivalente Linha Média.....	9
Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de uma Linha de Transmissão	10
Figura 2.4 – Circuito π equivalente	14
Figura 3.1 - Circuito Equivalente por Fase da Linha de Transmissão	18
Figura 4.1 –Gráfico Erro de Localização Sistema Radial.....	29
Figura 4.2 – Trecho do Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro	30
Figura 4.3 – Diagrama Unifilar Sistema Dois Geradores	31
Figura 4.4 – Gráfico Erro de Localização Sistema Dois Geradores.....	33
Figura 4.5 – Diagrama unifilar sistema 9 Barras.....	34
Figura 4.6 – Gráfico Erro de Localização Sistema 9 Barras Trifásico	35
Figura 4.7 – Gráfico Erro de Localização Sistema 9 Barras Fase - Terra.....	38
Figura 4.8 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Sistema Dois Geradores	41
Figura 4.9 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Sistema 9 Barras	43
Figura 4.10 – Gráfico Erro de Localização Modelo Linha Longa Sistema Dois Geradores.....	46
Figura 4.11 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores.....	48
Figura 4.12 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores.....	48
Figura 4.13 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores.....	49
Figura 4.14 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores	49
Figura 4.15 – Gráfico Erro de Localização Modelo Linha Longa Sistema 9 Barras	50
Figura 4.16 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras	51
Figura 4.17 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras.....	51
Figura 4.18 – Gráfico Erro de Localização Linha Longa Sistema Dois Geradores.....	53
Figura 4.19 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9 Barras	55
Figura 4.20 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9 Barras	55
Figura 4.21 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras	56
Figura 4.22 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras	56
Figura 4.23 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Linha Longa Sistema Dois Geradores	58
Figura 4.24 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores	59
Figura 4.25 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores.....	59
Figura 4.26 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores	60
Figura 4.27 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores.....	60
Figura AI.1 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 15% da Linha Sistema Dois Geradores	77
Figura AI.2 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 20% da Linha Sistema Dois Geradores	77
Figura AI.3 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.4 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.5 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 70% da Linha Sistema Dois Geradores	78

Figura AI.6 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 75% da Linha Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.7 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 90% da Linha Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.8 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,01pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.9 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,02pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.10 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.11 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,08pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.12 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.13 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,16pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.14 – Gráfico $G(x)$ Falta Trifásica Impedância de Falta 0,2pu Sistema Dois Geradores	78
Figura AI.15 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 15% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.16 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 20% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.17 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 40% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.18 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.19 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 70% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.20 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 75% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.21 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 90% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.22 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 15% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.23 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.24 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 40% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.25 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 50% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.26 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 70% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.27 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 75% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AI.28 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras	78
Figura AIII.1 – Circuito Equivalente Sob Falta	69
Figura AIV.1 – Torre de Transmissão	68

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Valores de Impedância de Falta por Tipo de Falta	4
Tabela 4.1 – Descrição das Simulações Modelo Linha Curta	25
Tabela 4.2 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 1	26
Tabela 4.3 – Resultados Obtidos Simulação 1	27
Tabela 4.4 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 2	27
Tabela 4.5 – Resultados Obtidos Simulação 2	28
Tabela 4.6 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 3	28
Tabela 4.7 – Resultados Obtidos Simulação 3	29
Tabela 4.8 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 4	31
Tabela 4.9 – Dados Medidos na Simulação 4	32
Tabela 4.10 – Local de Falta Simulação 4	32
Tabela 4.11 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 5	34
Tabela 4.12 – Dados Medidos na Simulação 5	34
Tabela 4.13 – Localização da Falta Simulação 5	35
Tabela 4.14 – Dados Medidos Simulação 6	37
Tabela 4.15 – Localização da Falta Simulação 6	37
Tabela 4.16 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 20% do Comprimento da Linha	39
Tabela 4.17 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 20% do Comprimento da Linha	39
Tabela 4.18 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 50% do Comprimento da Linha	40
Tabela 4.19 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 50% do Comprimento da Linha	40
Tabela 4.20 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 70% do Comprimento da Linha	40
Tabela 4.21 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 70% do Comprimento da Linha	41
Tabela 4.22 – Dados Obtidos Simulação 8 – Curto a 50% do Comprimento da Linha	42
Tabela 4.23 – Local de Falta Simulação 8 – Curto a 50% do Comprimento da Linha	43
Tabela 4.24 – Descrição das Simulações Modelo Linha Longa	44
Tabela 4.25 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 9	45
Tabela 4.26 – Resultados Obtidos Simulação 9	46
Tabela 4.27 – Dados da linha Utilizada na Simulação 10	50
Tabela 4.28 – Dados Medidos na Simulação 10	50
Tabela 4.29 – Dados Medidos na Simulação 11	52
Tabela 4.30 – Candidatos a Ponto de Falta Simulação 11	54
Tabela 4.31 – Dados Medidos na Simulação 12	57
Tabela 4.32 – Candidatos a Ponto de Falta Simulação 12	58
Tabela 4.33 – Análise dos Erros LocMod – Modelo Linha Curta	61
Tabela 4.34 – Análise dos Erros LocMod – Modelo Linha Longa	62

1 Introdução

As linhas de transmissão aéreas são um importante elemento dos Sistemas de transmissão de energia elétrica, chegando a ter alguns milhares de quilômetros de extensão. Como exemplo de linhas de grande extensão, podemos citar a Interligação Norte – Sudeste, que liga a usina de Tucuruí ao estado de São Paulo, possuindo aproximadamente 2.000km, e a Interligação Norte – Sul II, que atravessa os estados do Maranhão, Tocantins, Goiás e Distrito Federal, possuindo cerca de 1.278km, segundo dados da ANEEL [1].

Apesar de sua importância, as linhas de transmissão aéreas são extremamente susceptíveis a ação da natureza, como ventos, insolações e tempestades, e a intervenção humana, como queimadas e ações de vandalismo. Tais ações podem levar a ocorrência de diversos tipos de faltas, acarretando, assim, a indisponibilidade da linha.

Na ocorrência de uma falta, é de responsabilidade dos mecanismos de proteção do sistema de transmissão identificar e eliminar o curto-circuito, e, após isso, realizar a tentativa de religamento automático do trecho interrompido. Geralmente o religamento automático é bem sucedido e a linha volta a operar normalmente [2]. Porém, em alguns casos, o religamento automático não é bem sucedido, fazendo com que seja necessário que uma equipe de manutenção vá até o local da falta para a realização de inspeção e do religamento manual da linha.

Como as linhas de transmissão podem possuir grande extensão e algumas se encontram em locais de difícil acesso, é de suma importância para as concessionárias, dispor de um método de localização de faltas que forneça o ponto de falta de forma rápida e com o maior grau de precisão possível, já que a informação correta do ponto de falta pode reduzir drasticamente o tempo gasto com o deslocamento das equipes de manutenção, e, assim, reduzir o tempo de indisponibilidade da linha, aumentando a qualidade do sistema de transmissão de energia elétrica.

No Brasil, a regulação da qualidade dos serviços de transmissão de energia elétrica é feita através da Parcela Variável (PV), criada pela resolução normativa N°270, ano de 2007, emitida pela ANEEL. A Parcela Variável consiste no desconto incidente sobre a remuneração dos ativos de transmissão que excedem os tempos máximos de desligamento permitidos,

associando, assim, a qualidade do serviço de transmissão fornecido pelas concessionárias à sua remuneração. Dessa forma, o processo de localização de faltas influencia diretamente na remuneração recebidas pelas concessionárias, sendo de extrema importância para as mesmas.

1.1 Causas de Faltas em Linhas de Transmissão

Algumas causas de faltas em linhas de transmissão são queimadas nas proximidades das linhas, aproximação de árvores aos condutores das linhas, perda de isolamento das linhas, falhas mecânicas e descargas atmosféricas.

Quando um incêndio acontece nas proximidades da linha, o calor decorrente da queimada aquece o ar, diminuindo a rigidez dielétrica do ar situado entre os condutores e entre os condutores e o solo, o que pode ocasionar faltas fase – fase e fase – terra.

Faltas decorrentes de queimadas, geralmente, têm valor de impedância de falta mais elevado do que o valor característico das impedâncias de falta decorrentes das demais causas [2], e normalmente necessitam de religamento manual e de inspeção da linha pela equipe de manutenção.

As práticas adotadas pelas concessionárias para reduzir os efeitos das queimadas têm sido limpeza periódica das faixas de servidão, e a realização de campanhas de conscientização advertindo os efeitos das queimadas.

A proximidade de árvores de grande porte aos condutores das linhas de transmissão também podem ocasionar faltas. Essas faltas podem ser permanentes, quando decorrente da queda de árvores sobre os condutores da linha, ou transitórias, quando decorrentes da aproximação de árvores pela ação do vento. Faltas permanentes ocasionadas pela vegetação exigem que a equipe de manutenção vá até o ponto de ocorrência de falta para a realização de inspeção e restabelecimento da linha.

A perda de isolamento da linha pode ser devido a poluição (resíduos decorrentes de poluição ficam impregnados na superfície dos isoladores, formando um caminho de baixa impedância até a estrutura metálica da linha), a vandalismo (é prática comum a quebra dos isoladores das linhas de transmissão por parte da população), e pela ação de animais, por exemplo, a deposição de excrementos de aves nos isoladores da linha.

As ações tomadas pelas concessionárias para reduzir o efeito da poluição nos isoladores das linhas de transmissão, têm sido instalação de isoladores poliméricos ao invés de isoladores cerâmicos ou de vidro, lavagem periódica dos isoladores, e instalação de dispositivos especiais que impedem o deslocamento de aves sobre as cadeias de isoladores.

As principais causas de faltas ocasionadas por falhas mecânicas são decorrentes a: rompimento de condutores, que pode ser ocasionado por fadiga, sobrecarga ou descargas elétricas; rompimento de cadeias de isoladores, devido à deterioração das cadeias de isoladores, eletrocorrosão dos pinos, encaixe inadequado, envelhecimento precoce ou sobrecarga mecânica; e queda da estrutura da linha, devido à erosão do solo, oxidação de peças, ventos, vandalismo ou enchentes. Este tipo de falta geralmente é grave, e necessita de intervenção da equipe de manutenção para restabelecimento da linha.

Faltas ocasionadas pelo rompimento dos condutores podem dar origem a faltas conhecidas como faltas de alta impedância. Faltas de alta impedância são caracterizadas pela ocorrência de rompimento de condutor, em uma ou mais fases, sem contato com qualquer tipo de material, ou com o contato exclusivo de qualquer condutor com um material de alta impedância [3]. Faltas dessa natureza são difíceis de serem detectadas, já que estão sujeitas a impedâncias de falta de alta magnitude, e, por isso, produzem corrente de falta de valor próximo ao valor da corrente de carga da linha, não sensibilizando, assim, os equipamentos de proteção.

Faltas ocasionadas por descargas atmosféricas são a principal causa de desligamentos não programados em linhas de transmissão [2]. Esse tipo de falta ocorre devido ao estabelecimento de sobretensões nas cadeias de isoladores da linha, ou entre condutores desta, que levam ao rompimento de seu isolamento. Estas faltas podem ocorrer por incidência direta de descargas atmosféricas na linha de transmissão, ou por incidência indireta, quando descargas atmosféricas caem nas proximidades das linhas de transmissão.

A Tabela 1.1, tabela extraída da referência [2], apresenta o valor típico de impedância de falta de cada uma das principais causas de defeitos em linhas de transmissão. Nesta tabela, para faltas ocasionadas por queda de estrutura, o valor de resistência de falta informado é o valor de resistência de pé de torre.

Tabela 1.1 – Valores de Impedância de Falta por Tipo de Falta

Causas	Resistência de Falta (Ω)
Descargas Atmosféricas	0 a 10
Queimada	10 a 70
Queda de Estrutura	20 a 30
Árvore	100 a 150

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como intuito avaliar a eficiência do método de localização de faltas LocMod [4], em relação a diferentes tipos de faltas, em diferentes tipos de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os métodos de localização de faltas existentes atualmente, basicamente, podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos baseados na medição de fasores em regime permanente e métodos baseados em ondas viajantes. Esses dois grupos podem, ainda, ser subdivididos em outros dois grupos: métodos que utilizam dados de um terminal da linha e métodos que utilizam dados de mais de um terminal da linha. Em geral, os métodos que utilizam dados de mais de um terminal, necessitam que as grandezas medidas nos diferentes terminais estejam sincronizadas, fato que torna o processo de localização de faltas mais complexo, pois exige que seja utilizada tecnologia de medição fasorial sincronizada.

O método de localização de faltas LocMod é um método baseado na medição de fasores em regime permanente que utiliza dados de dois terminais da linha de transmissão. Este método foi desenvolvido por Eduardo Gonzaga da Silveira juntamente com a equipe do PROTLab/LRC/UFMG, e sua principal vantagem com relação aos outros métodos existentes que utilizam dados de mais de um terminal, é o fato de não haver necessidade que os dados medidos em ambos os terminais estejam sincronizados. Esta particularidade do método LocMod nos fez escolhê-lo para avaliação de sua eficiência, já que isto ajudaria na validação de um método de localização de faltas preciso e simples.

1.3 Metodologia do Trabalho

Neste trabalho foi realizada a análise da eficiência do método LocMod – Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa, através da realização de simulações de faltas em três sistemas de transmissão de energia elétrica: um sistema radial, um sistema contendo dois geradores, chamado de Dois Geradores, e um sistema em anel, chamado de 9 Barras. As simulações foram realizadas na versão acadêmica do software Simulight, desenvolvido pela COPPE/UFRJ.

Em ambos os sistemas, foram simuladas faltas trifásicas sem impedância de falta, faltas fase – terra com impedância de falta nula, e faltas trifásicas com diferentes valores de impedância de falta. Para a realização das simulações na análise do método LocMod – Modelo Linha Curta, as linhas nas quais foram simuladas as faltas foram representadas através do modelo de linha curta, modelo descrito no Capítulo 2. Para a realização das simulações na análise do método LocMod – Modelo Linha Longa, as linhas nas quais foram simuladas as faltas foram representadas através do seu respectivo modelo π -equivalente, modelo de linha longa, também descrito no Capítulo 2.

1.4 Divisão do Texto

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, os quais são: Introdução, Conceitos Básicos de Linhas de Transmissão, Métodos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão, Simulação Método LocMod, e Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros.

O Capítulo 1 contextualiza o cenário ao qual está inserido o trabalho, destacando as principais motivações para a realização do mesmo.

No Capítulo 2, foi feita uma revisão do embasamento teórico necessário para a compreensão do desenvolvimento dos métodos de localização de faltas em linhas de transmissão.

No Capítulo 3, são expostos métodos de localização de faltas encontrados na literatura que utilizam dados de um e de dois terminais da linha, e descrito o método LocMod Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa.

O Capítulo 4 analisa a eficiência do método LocMod através de simulações realizadas com diferentes tipos de faltas, em diferentes sistemas de transmissão de energia elétrica, para ambas as modelagens de linhas de transmissão adotadas pelo método: Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa.

Por fim, no Capítulo 5 foram feitas conclusões a respeito dos métodos de localização de faltas, e sugeridas propostas de trabalhos futuros.

2 Conceitos Básicos de Linhas de Transmissão

Para a total compreensão dos métodos de localização de faltas é necessário o conhecimento dos principais aspectos referentes à modelagem das linhas de transmissão.

Desta forma, este capítulo aborda os principais tópicos sobre modelagem de linhas de transmissão, apresentando os modelos comumente encontrados na literatura utilizados para a realização de cálculos.

Além disso, no Anexo I foi feita uma breve descrição dos principais componentes das linhas de transmissão.

2.1 Modelagem de Linha de Transmissão

Neste item serão apresentadas as equações relativas aos modelos adotados para a solução de problemas envolvendo linhas de transmissão. Serão estudados os modelos de linha curta e média, que fazem a modelagem da linha através de parâmetros concentrados, assim como o modelo de linha longa, que considera em seu modelo a correção através das funções hiperbólicas [5].

2.1.1 Modelo Linha Curta

O modelo de linha curta leva em consideração apenas a impedância série da linha, considerando-a como parâmetro concentrado.

A Figura 2.1 apresenta o circuito equivalente de uma linha de transmissão modelada como linha curta.

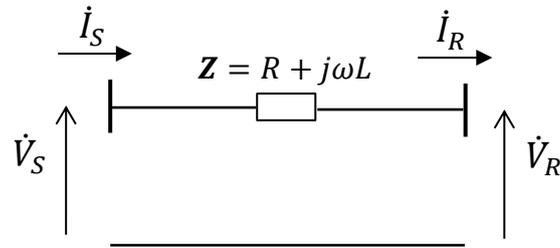


Figura 2.1 – Circuito Equivalente Linha Curta

Na Figura 2.1, Z representa a impedância série total da linha de transmissão considerada como parâmetro concentrado, \dot{V}_S e \dot{V}_R são as tensões fase e neutro nos terminais S e R, respectivamente, e \dot{I}_S e \dot{I}_R são as correntes de linha nos terminais S e R, respectivamente.

z : impedância série por unidade de comprimento da linha;

l : comprimento da linha de transmissão.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{z}l \quad (2.1)$$

Resolvendo o circuito da Figura 2.1, obtemos:

$$\begin{cases} \dot{V}_S = \dot{V}_R + \dot{I}_R \mathbf{Z} \\ \dot{I}_S = \dot{I}_R \end{cases} \quad (2.2)$$

Desenvolvendo (2.2), podemos obter o quadripolo de linha curta, conforme (2.3).

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{Z} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

2.2.2 Modelo Linha Média

O modelo de linha média também considera que a linha de transmissão é composta por parâmetros concentrados, e é utilizado para linhas de até 320km em aplicações que não exigem grande precisão [5]. A diferença do modelo de linha média para o modelo de linha curta é a representação do efeito capacitivo da linha em seu modelo. Para isto, inclui-se metade da admitância shunt total da linha em cada um de seus terminais.

A Figura 2.2 apresenta o circuito equivalente de uma linha de transmissão modelada como linha média, conhecido como modelo π -nominal.

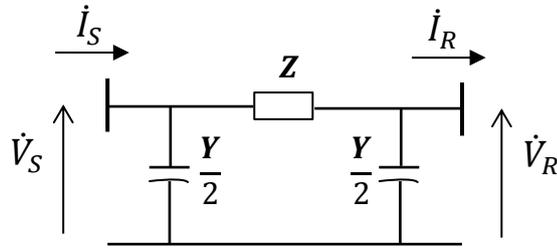


Figura 2.2 – Circuito Equivalente Linha Média

Na Figura 2.2, Z representa a impedância série total da linha de transmissão considerada como parâmetro concentrado, Y representa a admitância shunt total da linha de transmissão considerada como parâmetro concentrado, \dot{V}_S e \dot{V}_R são as tensões fase e neutro nos terminais S e R, respectivamente, e \dot{I}_S e \dot{I}_R são as correntes de linha nos terminais S e R, respectivamente.

z : impedância série por unidade de comprimento da linha;

y : admitância shunt por unidade de comprimento da linha;

l : comprimento da linha de transmissão.

$$Z = zl \quad (2.4)$$

E:

$$Y = yl \quad (2.5)$$

Resolvendo o circuito da Figura 2.2, obtemos:

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R + \left(\dot{V}_R \frac{Y}{2} + \dot{I}_R \right) Z \quad (2.6)$$

Então:

$$\dot{V}_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) \dot{V}_R + Z \dot{I}_R \quad (2.7)$$

E:

$$\dot{I}_S = \frac{Y}{2} \dot{V}_S + \frac{Y}{2} \dot{V}_R + \dot{I}_R \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) em (2.8):

$$\dot{I}_S = \left(\frac{ZY^2}{4} + \frac{Y}{2} \right) \dot{V}_R + \frac{ZY}{2} \dot{I}_R + \frac{Y}{2} \dot{V}_R + \dot{I}_R \quad (2.9)$$

Então:

$$\dot{i}_S = \left(\frac{ZY^2}{4} + Y\right) \dot{V}_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) \dot{i}_R \quad (2.10)$$

Colocando em termos de quadripolo, obtemos:

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{i}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y\left(\frac{ZY}{4} + 1\right) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{i}_R \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

2.2.3 Modelo Linha Longa

O modelo de linha longa considera o fato de os parâmetros da linha não serem concentrados, mas uniformemente distribuídos ao longo do comprimento da linha. Deste modo, este tipo de modelagem fornece respostas com maior grau de precisão [5].

A Figura 2.3 apresenta o diagrama esquemático de uma linha de transmissão modelada como parâmetro distribuído.

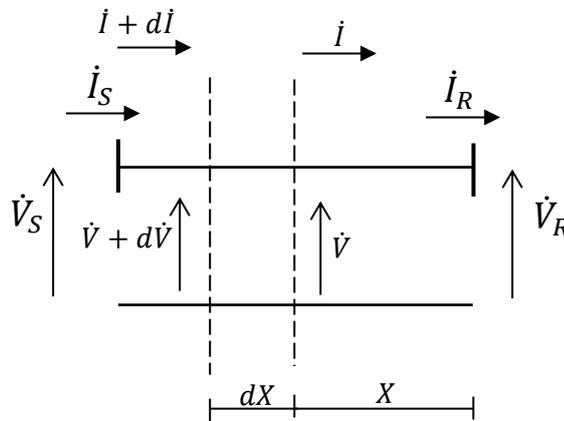


Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de uma Linha de Transmissão

Na Figura 2.3, \dot{V}_S e \dot{V}_R são as tensões fase e neutro nos terminais S e R, respectivamente, e \dot{I}_S e \dot{I}_R são as correntes de linha nos terminais S e R, respectivamente.

Considerando o elemento infinitesimal de linha de transmissão de comprimento dX , localizado a uma distância X do terminal R, com impedância série distribuída z (Ω /unidade de comprimento) e admitância shunt distribuída y (S/unidade de comprimento), podemos obter

uma equação para a tensão e outra para a corrente em qualquer ponto da linha de transmissão, como segue demonstrado abaixo.

Na linha da Figura 2.3, a tensão a uma distância $X+dX$ do terminal R é $\dot{V}+d\dot{V}$, e a uma distância X é \dot{V} , devido à queda de tensão decorrente da impedância série da linha. Se considerarmos que essa queda de tensão é uniforme ao longo do comprimento da linha, o valor médio da tensão neste elemento infinitesimal de linha pode ser obtido através da média aritmética das duas tensões. De forma análoga, a corrente a uma distância $X+dX$ do terminal R é $\dot{I}+d\dot{I}$, e a uma distância X é \dot{I} , devido à corrente que flui ao longo da admitância shunt da linha. Considerando que essa redução no valor da corrente ocorre uniformemente ao longo do comprimento da linha, o valor médio da corrente ao longo do elemento infinitesimal de linha também pode ser obtido através da média aritmética das duas correntes. Assim:

$$\dot{V}_{m\acute{e}dia} = \frac{\dot{V}+\dot{V}+d\dot{V}}{2} \quad (2.12)$$

E:

$$\dot{I}_{m\acute{e}dia} = \frac{\dot{I}+\dot{I}+d\dot{I}}{2} \quad (2.13)$$

Então:

$$d\dot{V} = \dot{I}_{m\acute{e}dia} \mathbf{z} dX = \frac{\dot{I}+\dot{I}+d\dot{I}}{2} \mathbf{z} dX \quad (2.14)$$

Desprezando o elemento infinitesimal, obtemos:

$$\frac{d\dot{V}}{dX} = \dot{I} \mathbf{z} \quad (2.15)$$

De forma análoga:

$$d\dot{I} = \dot{V}_{m\acute{e}dio} \mathbf{y} dX = \frac{\dot{V}+\dot{V}+d\dot{V}}{2} \mathbf{y} dX \quad (2.16)$$

Desprezando o elemento infinitesimal, obtemos:

$$\frac{d\dot{I}}{dX} = \dot{V} \mathbf{y} \quad (2.17)$$

Derivando (2.13) e (2.15) em relação a X , obtemos:

$$\frac{d^2\dot{V}}{dX^2} = \mathbf{z} \frac{d\dot{I}}{dX} \quad (2.18)$$

$$\frac{d^2\dot{I}}{dX^2} = \mathbf{y} \frac{d\dot{V}}{dX} \quad (2.19)$$

Substituindo (2.17) em (2.18) e, (2.15) em (2.19), obtemos:

$$\frac{d^2\dot{V}}{dX^2} = \mathbf{zy} \dot{V} \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2\dot{I}}{dX^2} = \mathbf{zy} \dot{I} \quad (2.21)$$

Como a segunda derivada da função \dot{V} resulta na própria função \dot{V} vezes uma constante, a solução de (2.20) é da forma exponencial, conforme (2.22).

$$\dot{V}(X) = A_1 e^{\sqrt{\mathbf{zy}}X} + A_2 e^{-\sqrt{\mathbf{zy}}X} \quad (2.22)$$

Derivando (2.22) e substituindo em (2.15), obtemos:

$$\dot{I}(X) = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} A_1 e^{\sqrt{\mathbf{zy}}X} - \frac{1}{\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}} A_2 e^{-\sqrt{\mathbf{zy}}X} \quad (2.23)$$

As equações (2.22) e (2.23) são formadas por duas ondas, uma onda incidente (o primeiro termo de ambas as equações) e uma onda refletida (o segundo termo de ambas as equações).

O termo $\sqrt{\mathbf{z}/\mathbf{y}}$ é conhecido com impedância característica da linha (\mathbf{Z}_C), e o termo $\sqrt{\mathbf{zy}}$ é conhecido como constante de propagação ($\boldsymbol{\gamma}$). A constante de propagação é um número complexo ($\boldsymbol{\gamma} = \alpha + j\beta$), no qual a parte real (α) é chamada de constante de atenuação, pois essa constante acarreta uma atenuação na amplitude da onda ao longo do comprimento da linha, e a parte imaginária (β) é chamada de constante de fase, já que esta constante provoca um aumento de fase ao longo da linha de transmissão.

O valor das constantes A_1 e A_2 é obtido substituindo-se o valor da tensão e da corrente em X igual a zero. Então:

$$\begin{cases} \dot{V}(0) = \dot{V}_R = A_1 + A_2 \\ \dot{I}(0) = \dot{I}_R = \frac{1}{\mathbf{Z}_C} A_1 - \frac{1}{\mathbf{Z}_C} A_2 \end{cases} \quad (2.24)$$

Resolvendo o sistema (2.24), obtemos:

$$A_1 = \frac{\dot{V}_R + Z_c \dot{I}_R}{2} \quad (2.25)$$

$$A_2 = \frac{\dot{V}_R - Z_c \dot{I}_R}{2} \quad (2.26)$$

Substituindo os valores encontrados para as constantes A_1 e A_2 em (2.22) e (2.23), obtemos:

$$\dot{V}(X) = \frac{\dot{V}_R + Z_c \dot{I}_R}{2} e^{\gamma X} + \frac{\dot{V}_R - Z_c \dot{I}_R}{2} e^{-\gamma X} \quad (2.27)$$

$$\dot{I}(X) = \frac{(\dot{V}_R/Z_c) + \dot{I}_R}{2} e^{\gamma X} - \frac{(\dot{V}_R/Z_c) - \dot{I}_R}{2} e^{-\gamma X} \quad (2.28)$$

Considerando que:

$$\sinh(\gamma X) = \frac{e^{\gamma X} - e^{-\gamma X}}{2} \quad (2.29)$$

$$\cosh(\gamma X) = \frac{e^{\gamma X} + e^{-\gamma X}}{2} \quad (2.30)$$

Rearranjando os termos de (2.27) e (2.28) e substituindo em (2.29) e (2.30), obtemos:

$$\dot{V}(X) = \dot{V}_R \cosh(\gamma X) + \dot{I}_R Z_c \sinh(\gamma X) \quad (2.31)$$

$$\dot{I}(X) = \frac{\dot{V}_R}{Z_c} \sinh(\gamma X) + \dot{I}_R \cosh(\gamma X) \quad (2.32)$$

Para obter o quadripolo do modelo de linha longa, basta obter o valor de (2.31) e (2.32) no terminal S da figura 2.3, ponto no qual X é igual ao valor do comprimento da linha. Deste modo obtemos:

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R \cosh(\gamma l) + \dot{I}_R Z_c \sinh(\gamma l) \quad (2.33)$$

$$\dot{I}_S = \frac{\dot{V}_R}{Z_c} \sinh(\gamma l) + \dot{I}_R \cosh(\gamma l) \quad (2.34)$$

Colocando (2.34) da forma matricial obtemos (2.35). Em (2.35), \dot{V}_S e \dot{V}_R representam as tensões fase neutro no início e no final da linha, respectivamente, e, \dot{I}_S e \dot{I}_R representam as correntes de linha no início e no final da linha, respectivamente.

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

O próximo passo no desenvolvimento do modelo de linha longa é a obtenção do circuito π -equivalente da linha. Para isto, basta analisarmos a Figura 2.2, que representa o modelo π -nominal, porém substituindo os parâmetros \mathbf{Z} e \mathbf{Y} por \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' , impedância série equivalente e admitância shunt equivalente, respectivamente (ver Figura 2.4).

$$\dot{V}_S = \left(\frac{\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'}{2} + 1 \right) \dot{V}_R + \mathbf{Z}'\dot{I}_R \quad (2.36)$$

Comparando (2.33) com (2.36) obtemos:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}_C \sinh(\gamma l) \quad (2.37)$$

$$\cosh(\gamma l) = \frac{\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'}{2} + 1 \quad (2.38)$$

$$\mathbf{Y}' = \frac{2(\cosh(\gamma l) - 1)}{\mathbf{Z}_C \sinh(\gamma l)} \quad (2.39)$$

Considerando a identidade:

$$\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{(\cosh(\gamma l) - 1)}{\sinh(\gamma l)} \quad (2.40)$$

Substituindo (2.40) em (2.39), obtemos:

$$\mathbf{Y}' = \frac{2}{\mathbf{Z}_C} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (2.41)$$

A Figura 2.4 representa o modelo π -equivalente da linha de transmissão modelada como linha longa.

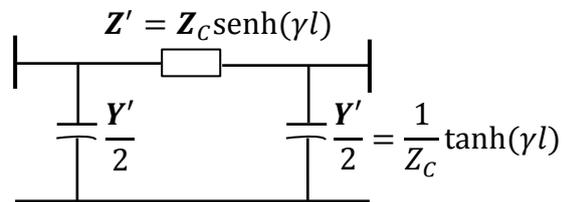


Figura 2.4 – Circuito π equivalente

Na Figura 2.4, \mathbf{Z}' representa a impedância série equivalente total da linha de transmissão, e \mathbf{Y}' representa a admitância shunt equivalente total da linha de transmissão.

3 Métodos de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão

Os métodos de localização de faltas existentes atualmente, basicamente, podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos baseados na medição de fasores em regime permanente e métodos baseados em ondas viajantes. Esses dois grupos podem, ainda, ser subdivididos em outros dois grupos: métodos que utilizam dados de um terminal da linha e métodos que utilizam dados de mais de um terminal da linha.

Além da descrição do método LocMod, neste capítulo serão apresentados métodos de localização de faltas em linha de transmissão que utilizam dados de um e de dois terminais da linha, os quais, semelhantemente ao método LocMod, são baseados na medição fasorial em regime permanente.

Dentre os métodos de localização de faltas que utilizam dados de apenas um terminal da linha de transmissão, o método apresentado na referência [6] é considerado um dos principais métodos desta classe, e o método apresentado na referência [7], segundo seu autor, apresentou bons resultados após longos períodos de testes [4].

O método apresentado na referência [6] basea-se no cálculo do fasor de tensão no ponto de falta, através das contribuições de correntes de falta advindas de cada um dos terminais da linha. Para obter um algoritmo que necessita apenas de dados medidos em um dos barramento da linha, o barramento local, a contribuição de corrente de falta do barramento remoto é expressa através da contribuição de corrente de falta do barramento local.

O algoritmo de localização de faltas deste método está exposto em (3.1), em que: A , B , C e D são obtidos através dos parâmetros da linha, e dependem do modelo de linha de transmissão adotado, e \dot{V}_i e \dot{I}_i são a tensão fase neutro e a corrente de linha do barramento local, respectivamente.

$$\text{Im} \left\{ \frac{A\dot{V}_i - B\dot{I}_i}{(C\dot{V}_i - D\dot{I}_i)} \right\} = 0 \quad (3.1)$$

O método apresentado na referência [7] modela a linha como uma linha longa, e basea-se no cálculo dos fasores de tensão e corrente no ponto de falta através de (2.31) e (2.32). Para obter um algoritmo que necessita apenas de dados medidos no barramento local, expressa a

contribuição de corrente de falta do barramento remoto através da contribuição de corrente de falta do barramento local.

A solução de (3.2) fornecerá o ponto de ocorrência de falta, e \dot{V}_i e \dot{I}_i são a tensão fase neutro e a corrente de linha do barramento local, respectivamente, \mathbf{Z}_C é a impedância característica da linha e γ é a constante de propagação da linha.

$$x = \frac{\text{Im}(\dot{V}_i \dot{I}_i)}{\mathbf{Z}_C \gamma (\dot{I}_i \dot{I}_i^*)} \quad (3.2)$$

Dentre os métodos de localização de faltas que utilizam dados de dois terminais da linha, podemos citar os métodos apresentados pelas referências [8] e [9], os quais, diferentemente do método LocMod, necessitam que os dados medidos em ambos os barramentos estejam sincronizados.

O método apresentado na referência [8] foi um dos métodos testados na referência [4], apresentando bom desempenho, e sendo chamado nesta de método de Johns. O método de Johns basea-se na igualdade do fasor da tensão de falta, calculado a partir da medição dos fasores de tensão e corrente nos terminais local e remoto da linha.

Em (3.5) é apresentado o algoritmo de localização de faltas do método de Johns, em que as grandezas A e B estão definidas em (3.3) e (3.4), \dot{V}_i e \dot{V}_j são as tensões fase e neutro no barramento local e remoto, respectivamente, \dot{I}_i e \dot{I}_j são as correntes de linha no barramento local e remoto, respectivamente, \mathbf{Z}_C é a impedância característica da linha e γ é a constante de propagação da linha.

$$A = \mathbf{Z}_C \cosh(\gamma l) \dot{I}_j - \sinh(\gamma l) \dot{V}_j + \mathbf{Z}_C \dot{I}_i \quad (3.3)$$

$$B = \cosh(\gamma l) \dot{V}_j - \mathbf{Z}_C \sinh(\gamma l) \dot{I}_j - \dot{V}_i \quad (3.4)$$

$$X = \left(\tanh^{-1} \left(\frac{-B}{A} \right) \right) / \gamma \quad (3.5)$$

O método de localização de faltas apresentado na referência [9] foi testado por seus autores para uma linha de 300km, e o erro máximo obtido foi de 0,4% do comprimento da linha [4]. Seu algoritmo de localização de faltas está exposto em (3.7), em que os parâmetros A e B estão definidos em (3.6), \dot{V}_i e \dot{V}_j são as tensões fase e neutro no barramento local e

remoto, respectivamente, \dot{I}_i e \dot{I}_j são as correntes de linha no barramento local e remoto, respectivamente, Z_C é a impedância característica da linha, γ é a constante de propagação da linha e α é a parte real da constante de propagação da linha.

$$A + jB = \frac{(e^{\gamma l} \dot{V}_j - I_j Z_C) - \dot{V}_i - I_i Z_C}{\dot{V}_i - I_i Z_C - e^{\gamma l} (\dot{V}_j + I_j Z_C)} \quad (3.6)$$

$$X = \frac{1}{2\alpha} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) \quad (3.7)$$

O detalhamento matemático para a obtenção dos algoritmos de localização de faltas dos métodos apresentados nas referências [6], [7], [8] e [9] encontra-se no Anexo II.

O LocMod [4] é um método de localização de faltas que utiliza dados de dois terminais. Este método baseia-se na igualdade do módulo da tensão de falta calculada a partir de cada um dos dois barramentos da linha de transmissão, o local e o remoto.

O LocMod foi desenvolvido por Eduardo Gonzaga da Silveira, juntamente com a equipe do PROTLab/LRC/UFMG, e sua principal vantagem com relação aos outros métodos existentes que utilizam dados de mais de um terminal, é o fato de não haver a necessidade que os dados medidos em ambos os terminais estejam sincronizados, já que para a realização da sincronização dos dados é necessário equipamentos sofisticados (PMUs – Unidade de Medição Fasorial Sincronizada), uma maior capacidade de processamento dos hardwares utilizados e maior necessidade de pré-processamento dos dados antes de serem utilizados os algoritmos de localização de faltas.

Este método modela a linha de transmissão de duas formas diferentes, como uma linha curta e como uma linha longa, obtendo, assim, dois algoritmos diferentes para a obtenção do local de falta. Cada um destes dois algoritmos representa um modelo do método LocMod, Modelo Linha Curta e o Modelo Linha Longa. Nos próximos tópicos serão apresentados ambos os modelos do método LocMod, assim como todo equacionamento para a dedução de seus respectivos algoritmos de localização de faltas.

3.1 LocMod – Modelo Linha Curta

O LocMod – Modelo Linha Curta é um modelo do método LocMod, cujo algoritmo de localização de faltas está baseado na modelagem da linha como uma linha curta, modelo de linha apresentado no Capítulo 2.

A Figura 3.1 apresenta o circuito equivalente por fase de uma linha de transmissão modelada como uma linha curta, e resolvendo este circuito podemos deduzir a equação que fornece o ponto de ocorrência de falta.

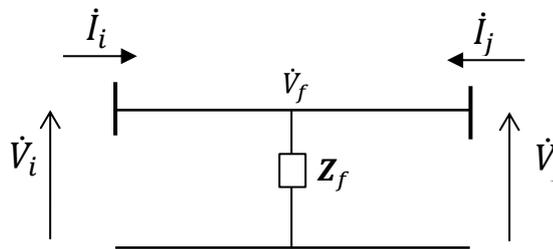


Figura 3.1 - Circuito Equivalente por Fase da Linha de Transmissão

Na Figura (3.1), \dot{V}_f é a tensão no ponto da falta, \dot{V}_i é a tensão na barra i, \dot{V}_j é a tensão na barra j, \dot{I}_i é a corrente na linha de transmissão que flui da barra i para o ponto da falta, \dot{I}_j é a corrente na linha de transmissão que flui da barra j para o ponto da falta.

Calculando a tensão no ponto da falta por ambos os barramentos da Figura 3.1, obtemos (3.8), em que:

\mathbf{z} : é a impedância série da linha de transmissão por unidade de comprimento;

X : é a distância a partir da barra i até o ponto da falta;

l : é o comprimento da linha.

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_f &= \dot{V}_i - \dot{I}_i \mathbf{z} X \\ \dot{V}_f &= \dot{V}_j - \dot{I}_j \mathbf{z} (l - X) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Definindo:

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_i \mathbf{z} \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_j z \quad (3.10)$$

Obtemos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_f = \dot{V}_i - \dot{V}_1 X \\ \dot{V}_f = \dot{V}_j - \dot{V}_2 (l - X) \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

Desenvolvendo o primeiro termo do sistema (3.11), obtemos:

$$\dot{V}_f = V_i \cos(\theta_i) + jV_i \sin(\theta_i) - V_1 X \cos(\theta_1) - jV_1 X \sin(\theta_1) \quad (3.12)$$

$$\dot{V}_f = (V_i \cos(\theta_i) - V_1 X \cos(\theta_1)) + j(V_i \sin(\theta_i) - V_1 X \sin(\theta_1)) \quad (3.13)$$

Então o módulo da tensão no ponto da falta ao quadrado calculado a partir da barra i é:

$$V_f^2 = (V_i \cos(\theta_i) - V_1 X \cos(\theta_1))^2 + (V_i \sin(\theta_i) - V_1 X \sin(\theta_1))^2 \quad (3.14)$$

Desenvolvendo o segundo termo do sistema (3.11), obtemos:

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= V_j \cos(\theta_j) + jV_j \sin(\theta_j) - V_2 (l - X) \cos(\theta_2) - \\ &jV_2 (l - X) \sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= (V_j \cos(\theta_j) - V_2 (l - X) \cos(\theta_2)) + \\ &j(V_j \sin(\theta_j) - V_2 (l - X) \sin(\theta_2)) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Então, o módulo da tensão no ponto da falta ao quadrado, calculado a partir da barra j é:

$$\begin{aligned} V_f^2 &= (V_j \cos(\theta_j) - V_2 (l - X) \cos(\theta_2))^2 + \\ &(V_j \sin(\theta_j) - V_2 (l - X) \sin(\theta_2))^2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Desenvolvendo (3.14), obtemos:

$$\begin{aligned} V_f^2 &= V_i^2 \cos^2(\theta_i) - 2V_i \cos(\theta_i) V_1 X \cos(\theta_1) + V_1^2 X^2 \cos^2(\theta_1) + V_i^2 \sin^2(\theta_i) - \\ &2V_i \sin(\theta_i) V_1 X \sin(\theta_1) + V_1^2 X^2 \sin^2(\theta_1) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} V_f^2 &= V_i^2 (\cos^2(\theta_i) + \sin^2(\theta_i)) - 2V_i V_1 X (\cos(\theta_i) \cos(\theta_1) + \sin(\theta_i) \sin(\theta_1)) + \\ &V_1^2 X^2 (\cos^2(\theta_1) + \sin^2(\theta_1)) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Então:

$$V_f^2 = V_i^2 - 2V_iV_1X \cos(\theta_i - \theta_1) + V_1^2X^2 \quad (3.20)$$

Desenvolvendo (3.17), obtemos:

$$V_f^2 = V_j^2 \cos^2(\theta_j) - 2V_j \cos(\theta_j) V_2(l - X) \cos(\theta_2) + V_2^2(l - X)^2 \cos^2(\theta_2) + V_j^2 \sin^2(\theta_j) - 2V_j \sin(\theta_j) V_2(l - X) \sin(\theta_2) + V_2^2(l - X)^2 \sin^2(\theta_2) \quad (3.21)$$

Desenvolvendo (3.21), obtemos:

$$V_f^2 = V_j^2(\cos^2(\theta_j) + \sin^2(\theta_j)) - 2V_jV_2(l - X)(\cos(\theta_j) \cos(\theta_2) + \sin(\theta_j) \sin(\theta_2)) + V_2^2(l - X)^2(\cos^2(\theta_2) + \sin^2(\theta_2)) \quad (3.22)$$

Então:

$$V_f^2 = V_j^2 - 2V_jV_2(l - X) \cos(\theta_j - \theta_2) + V_2^2(l - X)^2 \quad (3.23)$$

Igualando (3.20) a (3.23), obtemos:

$$V_i^2 - 2V_iV_1X \cos(\theta_i - \theta_1) + V_1^2X^2 = V_j^2 - 2V_jV_2(l - X) \cos(\theta_j - \theta_2) + V_2^2(l - X)^2 \quad (3.24)$$

Então:

$$X^2(V_1^2 - V_2^2) + X(-2V_iV_1 \cos(\theta_i - \theta_1) - 2V_jV_2 \cos(\theta_j - \theta_2) + 2V_2^2 \cdot l) + (V_i^2 - V_j^2 + 2V_jV_2l \cos(\theta_j - \theta_2) - V_2^2l^2) = 0 \quad (3.25)$$

Desenvolvendo (3.25), obtemos:

$$(Xz)^2(I_i^2 - I_j^2) + (Xz)(-2V_iI_i \cos(\theta_i - \theta_1) - 2V_jI_j \cos(\theta_j - \theta_2) + 2I_j^2zl) + (V_i^2 - V_j^2 + 2V_jI_jzl \cos(\theta_j - \theta_2) - I_j^2(zl)^2) = 0 \quad (3.26)$$

Definindo $zX = Z$ e $zl = Zt$, obtemos (3.27), em que:

V_i : é o módulo da tensão fase neutro na barra i ;

V_j : é o módulo da tensão fase neutro na barra j ;

I_i : é o módulo da corrente de linha na barra i ;

I_j : é o módulo da corrente de linha na barra j ;

Z_t : é a impedância total da linha;

Z : é a impedância até o ponto de falta;

θ_i : é o ângulo definido pela fase da tensão V_i ;

θ_j : é o ângulo definido pela fase da tensão V_j ;

θ_1 : é o ângulo definido pela fase da corrente I_i mais o ângulo da impedância da linha;

θ_2 : é o ângulo definido pela fase da corrente I_j mais o ângulo da impedância da linha.

$$Z^2(I_i^2 - I_j^2) + Z(-2V_i I_i \cos(\theta_i - \theta_1) - 2V_j I_j \cos(\theta_j - \theta_2) + 2I_j^2 Z t) + (V_i^2 - V_j^2 + 2V_j I_j Z t \cos(\theta_j - \theta_2) - I_j^2 Z t^2) = 0 \quad (3.27)$$

A equação (3.27) é uma equação do segundo grau, na qual uma das raízes terá valor menor que o valor da impedância total da linha, sendo esta o valor da impedância da linha até ponto de falta. Através de (3.27), podemos perceber que para a utilização deste método não há a necessidade de sincronização das grandezas medidas em diferentes barramentos, já que todos os ângulos medidos são utilizados em cossenos da diferença de ângulos referentes a um mesmo barramento.

No caso de uma falta trifásica, cada uma das três fases apresentará circuito equivalente igual ao circuito da Figura 3.1. Então, para localizar o ponto da falta, basta resolver (3.27) utilizando os dados medidos em qualquer uma das três fases durante a ocorrência da falta. No caso de uma falta fase-terra, fase-fase ou fase-fase terra, para obter o ponto da falta, será necessário resolver (3.27) com as grandezas medidas em uma fase sob falta.

3.2 LocMod – Modelo Linha Longa

Considerando (2.31), e que o terminal i da Figura 3.1 está localizado na origem do sistema da Figura 2.3, ou seja, \dot{V}_i e \dot{I}_i da Figura 3.1 são iguais a \dot{V}_R e $-\dot{I}_R$ da Figura 2.3, chegamos a seguinte equação:

$$\dot{V}(X) = \dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i \mathbf{Z}_C \sinh(\gamma X) \quad (3.28)$$

Considerando agora, que o terminal j da Figura 3.1 está localizado na origem do sistema da Figura 2.3, ou seja, \dot{V}_j e \dot{I}_j da Figura 3.1 são iguais a \dot{V}_R e $-\dot{I}_R$ da Figura 2.3, chegamos a (3.29).

$$\dot{V}(X_1) = \dot{V}_j \cosh(\gamma X_1) - \dot{I}_j \mathbf{Z}_C \sinh(\gamma X_1) \quad (3.29)$$

Em que:

X_1 é a distância do barramento j para ponto de falta.

Como o barramento de referência para a obtenção do ponto de falta será o barramento i (ponto em que x é igual a zero), a variável X_1 pode ser escrita como:

$$X_1 = l - X \quad (3.30)$$

Substituindo (3.30) em (3.29) obtemos (3.31).

$$\dot{V}(X) = \dot{V}_j \cosh(\gamma(l - X)) - \dot{I}_j \mathbf{Z}_C \sinh(\gamma(l - X)) \quad (3.31)$$

É importante notar que o sinal negativo no segundo termo das equações (3.28) e (3.31) é devido à injeção positiva de corrente em ambos os terminais da Figura 3.1.

Obtendo o módulo de (3.28) e (3.31), subtraindo (3.31) de (3.28), e calculando o módulo da equação resultante chegamos à (3.32), em que:

\dot{V}_i é a tensão fase neutro no barramento i (barramento de referência do comprimento da linha, X igual a 0);

\dot{V}_j é a tensão fase neutro no barramento j (barramento situado no ponto em que X é igual a l);

\dot{I}_i é a corrente de linha no barramento i;

\dot{I}_j é a corrente de linha no barramento j;

\mathbf{Z}_C é a impedância característica da linha;

γ é a constante de propagação da linha.

$$G(X) = \left| \dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i Z_C \sinh(\gamma X) \right| - \left| \dot{V}_j \cosh(\gamma(l - X)) - \dot{I}_j Z_C \sinh(\gamma(l - X)) \right| \quad (3.32)$$

Como a tensão do ponto de falta deve ser a mesma quando calculada a partir do barramento i ou do barramento j, o ponto de mínimo de (3.32) é o ponto de ocorrência da falta.

4 Simulação Método LocMod

Neste capítulo foi avaliada a eficácia do método LocMod para duas modelagens adotadas por este método, Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa, através de simulações de faltas no software Simulight. Para a execução das simulações, foram representados no software Simulight três sistemas de transmissão de energia elétrica, todos equilibrados e com modelagem trifásica.

Os cálculos realizados para a obtenção do local de falta, foram executados no software Matlab, cujos códigos utilizados em cada simulação estão expostos no Anexo III.

4.1 Simulação LocMod – Modelo Linha Curta

Com o intuito de avaliar a eficácia do método LocMod – Modelo Linha Curta foram representados diferentes sistemas de transmissão de energia elétrica no software Simulight [10], e escolhida uma linha de transmissão de cada um desses sistemas, para serem realizadas simulações de um tipo de falta, em diferentes pontos dessa linha. Para as simulações do LocMod – Modelo Linha Curta, as linhas onde foram simuladas as faltas foram representadas como linhas curtas.

A Tabela 4.1 apresenta cada tipo de defeito simulado na validação do Modelo Linha Curta.

Tabela 4.1 – Descrição das Simulações Modelo Linha Curta

Simulação	Descrição do Defeito Simulado
Simulação 1	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula em um sistema radial.
Simulação 2	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula em um sistema radial.
Simulação 3	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula em um sistema radial.
Simulação 4	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.3.
Simulação 5	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.5.
Simulação 6	Curto-circuito fase – terra com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.5.
Simulação 7	Curto-circuito trifásico no sistema da Figura 4.3 com impedância de falta puramente resistiva.
Simulação 8	Curto-circuito trifásico no sistema da Figura 4.5 com impedância de falta puramente resistiva.

4.1.1 Curto-Circuito Trifásico com Impedância de Falta Nula em um Sistema Radial

Na ocorrência de um defeito com impedância de falta nula em um sistema com dois barramentos, semelhante ao da Figura 3.1, com uma carga no barramento j , a corrente que flui do barramento j para o ponto da falta e a tensão no barramento j serão nulas. Então, (3.27) ficará da forma como está desenvolvida abaixo.

$$Z^2(I_i^2) + Z(-2V_i I_i \cos(\theta_i - \theta_1)) + (V_i^2) = 0 \quad (4.1)$$

O ângulo θ_1 é definido pela fase da corrente no barramento i mais o ângulo da impedância da linha de transmissão que conecta as barras i e j . Para este tipo de curto-circuito em questão, o ângulo θ_1 estará sempre em fase com o ângulo θ_i , já que a defasagem entre a corrente e a tensão é dada pela a impedância da linha de transmissão, e o ângulo da

impedância da linha de transmissão está incorporado ao ângulo θ_1 . Fazendo essas considerações e desenvolvendo (4.1), obtemos:

$$Z^2(I_i^2) + Z(-2V_i I_i) + (V_i^2) = 0 \quad (4.2)$$

Resolvendo (4.2), obtemos:

$$Z = \frac{V_i}{I_i} \quad (4.3)$$

De acordo com (4.3), a impedância até o ponto da falta, e, conseqüentemente o ponto da falta, podem ser obtidos apenas pela divisão da tensão no barramento i pela corrente que flui do barramento i para o ponto da falta, no instante em que esta ocorre.

Simulação 1

A simulação 1 consiste na simulação de um curto trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão que possui os parâmetros apresentados na Tabela 4.2.

A Tabela 4.2 apresenta os dados da linha de transmissão utilizada para a simulação 1, e a Tabela 4.3 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos nesta simulação. Na Tabela 4.3, V_i e I_i são os módulos da tensão e corrente no barramento i da Figura 3.1, respectivamente, e Z é o módulo da impedância da linha até o ponto de falta obtida através da simulação 1.

Tabela 4.2 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 1

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Impedância Base (Ω)	Impedância Total (Ω)	Carga (MW)
10	34	115,6	23,12j	2

Tabela 4.3 – Resultados Obtidos Simulação 1

Local da Falta (%)	Tensão Nominal (kV)	V_i (pu)	I_i (pu)	Z (pu)	Local da Falta Obtido (%)	Erro (%)
20	34	0,9564	23,9057	0,0400	20,00	0,0000
40	34	0,9446	11,8057	0,0800	40,00	0,0000
50	34	0,9803	9,8020	0,0999	49,99	0,0100
60	34	0,9368	7,8059	0,1200	60,00	0,0000
70	34	0,9301	6,6311	0,1403	70,15	0,1500

Simulação 2

A simulação 2 consiste na simulação de um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão que possui os parâmetros apresentados na Tabela 4.4.

A Tabela 4.4 apresenta os dados da linha de transmissão utilizada para a simulação 2, e a Tabela 4.5 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos para esta simulação. Na Tabela 4.5, V_i e I_i são os módulos da tensão e corrente no barramento i da Figura 3.1, respectivamente, e Z é o módulo da impedância da linha até o ponto de falta obtida através da simulação 2.

Tabela 4.4 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 2

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Impedância Base (Ω)	Impedância Total (Ω)	Carga (MW)
100	230	529	211,6j	10

Tabela 4.5 – Resultados Obtidos Simulação 2

Local da Falta (%)	Tensão Nominal (kV)	V_i (pu)	I_i (pu)	Z (pu)	Local da Falta Obtido (%)	Erro (%)
20	230	0,9877	12,3417	0,0800	20,0074	0,0074
40	230	0,9938	6,2107	0,1600	40,0029	0,0029
50	230	0,9950	4,9754	0,2000	49,9977	0,0023
60	230	0,9959	4,1492	0,2400	60,0022	0,0022
70	230	0,9965	3,5586	0,2800	70,0028	0,0028

Simulação 3

A simulação 3 consiste na simulação de um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão que possui os parâmetros apresentados na Tabela 4.6.

A Tabela 4.6 apresenta os dados da linha de transmissão utilizada para a simulação 3, e a Tabela 4.7 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos nesta simulação. Na Tabela 4.7, V_i e I_i são os módulos da tensão e corrente no barramento i da Figura 3.1, respectivamente, e Z é o módulo da impedância da linha até o ponto de falta obtida através da simulação 3.

Tabela 4.6 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 3

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Impedância Base (Ω)	Impedância Total (Ω)	Carga (MW)
100	230	529	26,45+211,6j	10

Tabela 4.7 – Resultados Obtidos Simulação 3

Local da Falta (%)	Tensão Nominal (kV)	V_i (pu)	I_i (pu)	Z (pu)	Local da Falta Obtido (%)	Erro (%)
20	230	0,9879	12,2512	0,0806	20,0026	0,0025
40	230	0,9818	6,0894	0,1612	39,9971	0,0029
50	230	0,9770	4,8471	0,2016	50,0017	0,0018
60	230	0,9730	4,0213	0,2420	60,0244	0,0243
70	230	0,9696	3,4366	0,2821	69,9905	0,0095

A Figura 4.1 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta informado pelo método de localização de faltas para as três simulações. Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o ponto onde a falta foi simulada em percentual do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada ponto simulado.

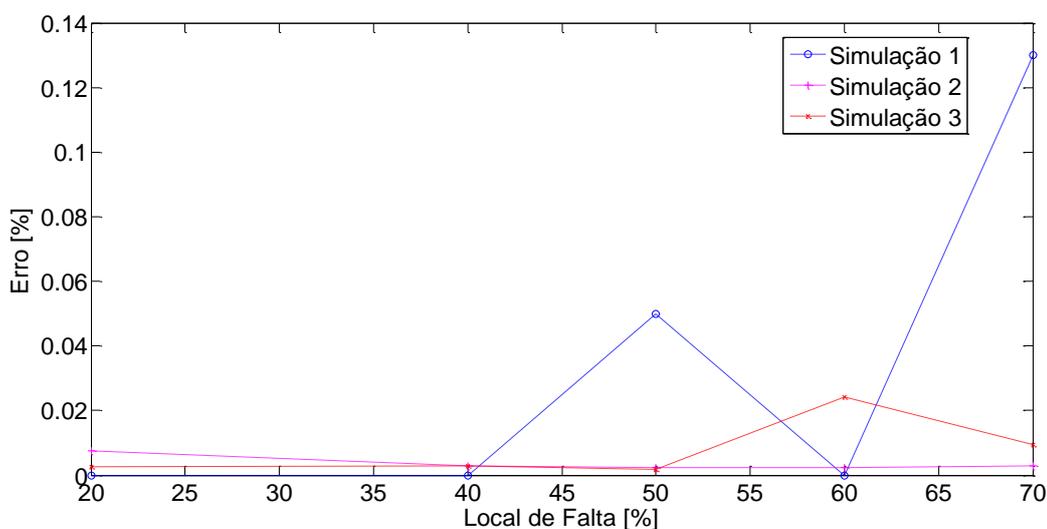


Figura 4.1 –Gráfico Erro de Localização Sistema Radial

Apesar de este caso ser um caso muito simples e sem muita aplicação prática, através deste método foi possível localizar o ponto de falta com um erro consideravelmente pequeno, sendo o maior valor de erro obtido igual 0,13%, em um defeito a 70% da linha na simulação 2.

4.1.2 Curto-Circuito Trifásico com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado

Analisaremos agora, a ocorrência de uma falta trifásica em vários pontos distintos de uma linha de transmissão em um sistema malhado. Em um primeiro momento, analisaremos um sistema mais simples, com duas fontes (Figura 4.3), e, posteriormente, analisaremos um sistema em anel.

Para a obtenção do local de falta num sistema malhado, utilizaremos a equação (3.27). Para a utilização da equação (3.27), precisamos medir o módulo das tensões V_i e V_j , o módulo das correntes I_i e I_j , e a diferença de fase entre a tensão e a corrente no barramento i e a tensão e corrente no barramento j .

A Figura 4.3 representa o diagrama unifilar do sistema de transmissão utilizado na simulação 4. O sistema da Figura 4.3 é composto por dois geradores, uma linha de transmissão, e uma carga de 5MW. A linha do sistema da figura 4.3 apresenta valor de impedância série e admitância shunt igual ao valor apresentado pela linha Garabi 1/Santo Ângelo C-1 RS, os quais foram extraídos do arquivo da base de dados mensal do ONS (Operador Nacional do Sistema), de dezembro de 2011, carga pesada; e, seu comprimento, foi obtido através da medição do comprimento da linha Garabi 1/Santo Ângelo C-1 RS no mapa do sistema elétrico brasileiro [11]. A Figura 4.2 é uma foto ilustrativa de um trecho do mapa do sistema elétrico brasileiro, no qual podemos visualizar a linha Garabi 1/Santo Ângelo C-1 RS.

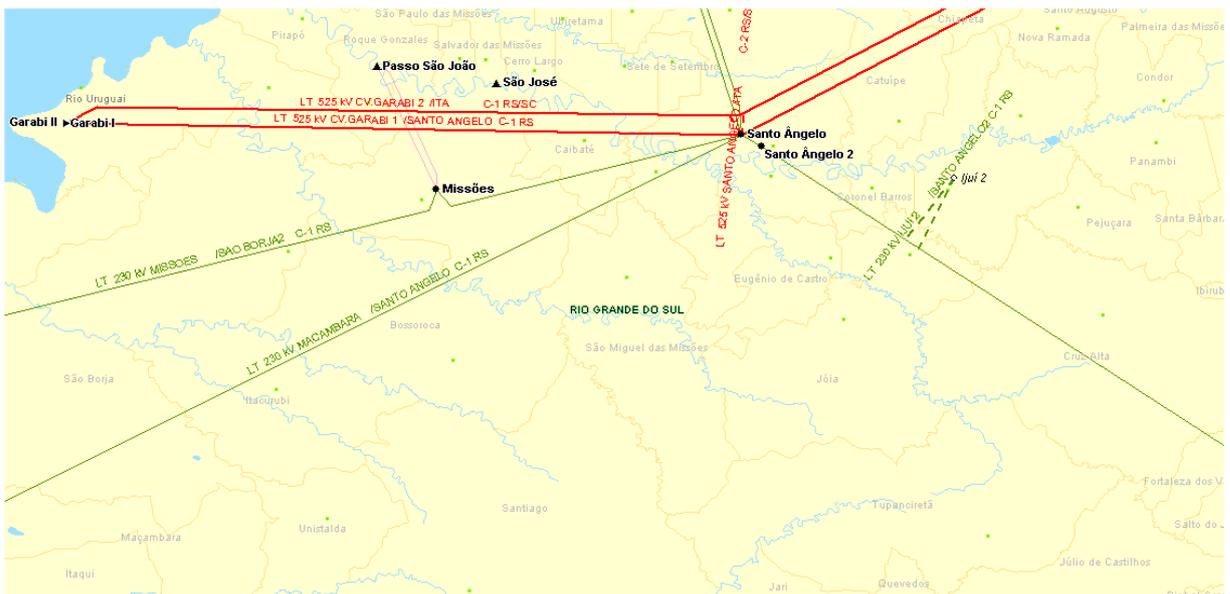


Figura 4.2 – Trecho do Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro

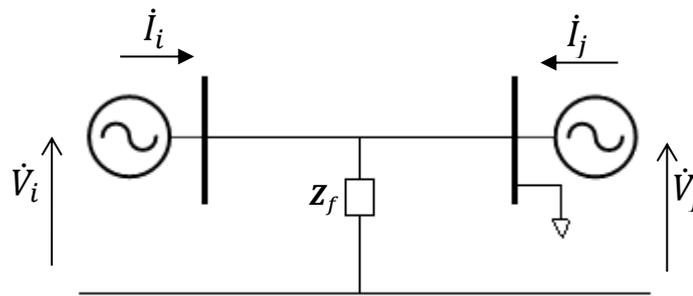


Figura 4.3 – Diagrama Unifilar Sistema Dois Geradores

Para as simulações deste item, a impedância de falta será considerada nula, mas nos itens seguintes será analisado o seu efeito no processo de localização de faltas.

Simulação 4

A simulação 4 consiste na simulação de um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão do sistema da Figura 4.3.

A Tabela 4.8 apresenta os dados da linha de transmissão utilizada para a simulação 4, e as Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos para esta simulação.

Tabela 4.8 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 4

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Comprimento (km)	Impedância Total (pu)	Carga (MW)
100	525	150	0,0012 + 0,0158j	5

Tabela 4.9 – Dados Medidos na Simulação 4

Local da Falta (%)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
20	0,7613	239,2387	0,9273	72,9046	1,0000	1,0000
40	0,8643	136,0054	0,9053	94,9758	1,0000	1,0000
50	0,8884	111,8550	0,8884	111,8546	1,0000	1,0000
60	0,9053	94,9758	0,8643	136,0054	1,0000	1,0000
70	0,9177	82,5074	0,8270	173,4304	1,0000	1,0000
90	0,9349	65,2394	0,6152	385,4358	1,0000	1,0000

Tabela 4.10 – Local de Falta Simulação 4

Local da Falta (%)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
20	43,6742	8,7348	8,8378	20,2358	0,2358
40	43,6742	17,4697	17,7795	40,7094	0,7094
50	43,6742	21,8371	21,8370	49,9999	0,0001
60	43,6742	26,20452	26,2041	59,2910	0,7090
70	43,6742	30,5719	30,4162	69,6433	0,3567
90	43,6742	39,3068	39,2296	89,8234	0,1766

A Figura 4.4 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta informado pelo método de localização de faltas LocMod – Modelo Linha Curta, para simulações de faltas trifásicas na linha de transmissão do sistema da Figura 4.3. Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o ponto onde a falta foi simulada em percentual do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada ponto simulado.

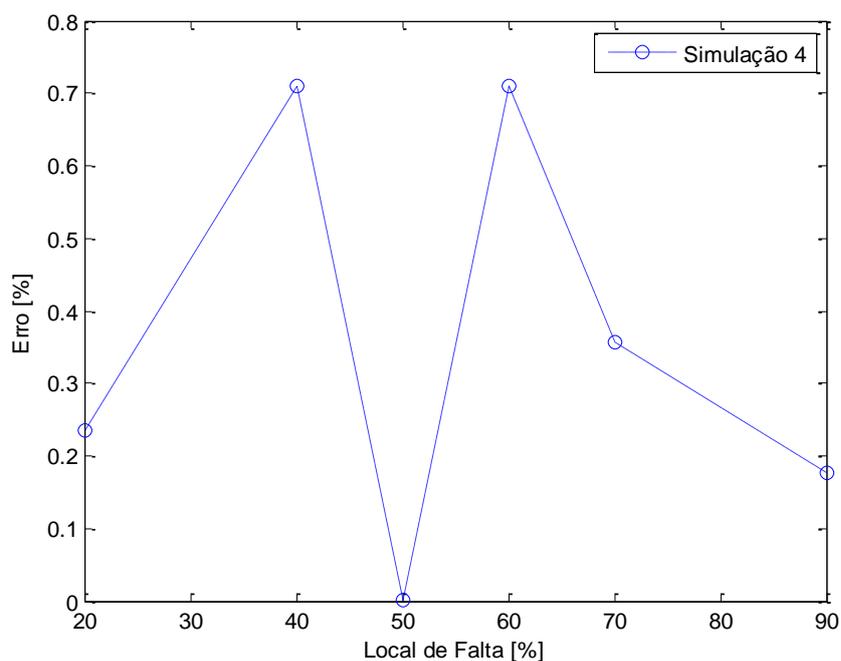


Figura 4.4 – Gráfico Erro de Localização Sistema Dois Geradores

Analisando os resultados da simulação 4, podemos perceber que o maior erro obtido foi de 0,7094%, para um defeito trifásico a 40% do comprimento da linha. Considerando que a linha na qual ocorreram as simulações possui comprimento aproximado de 150km, o ponto de ocorrência desta falta apontado pelo método LocMod – Modelo Linha Curta foi a 61,06km do barramento i , com erro de 1,06km. Apesar de o erro encontrado ser uma distância considerável, este método nos forneceu uma boa estimativa inicial do ponto de falta.

Simulação 5

Nesta parte, simularemos um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5. O sistema de transmissão apresentado na Figura 4.5, chamado neste trabalho de 9 Barras, foi extraído da referência [12], porém os valores dos parâmetros da linha simulada foram duplicados, e podem ser observados na Tabela 4.11.

O comprimento da linha simulada foi obtido baseando-se no comprimento da linha Curitiba/S. Mateus Sul C-1 PR, devido ao fato destas pertencerem a mesma classe de tensão, e apresentarem valores de impedância série e admitância shunt parecidos. O comprimento da

linha Curitiba/S. Mateus Sul C-1 PR foi obtido através da medição do comprimento desta no mapa do sistema elétrico brasileiro [11].

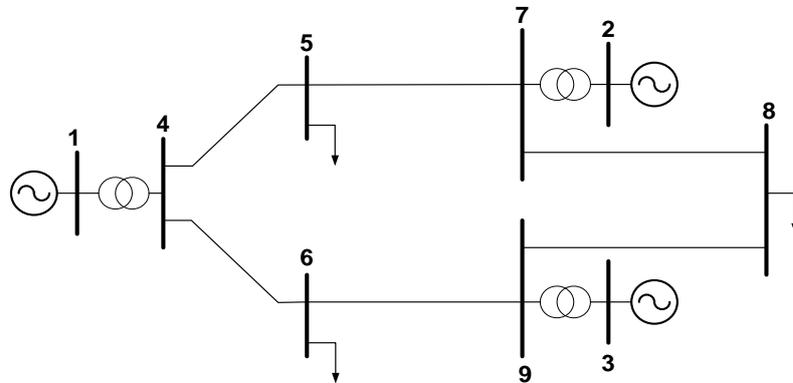


Figura 4.5 – Diagrama unifilar sistema 9 Barras

Tabela 4.11 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 5

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Comprimento (km)	Impedância Base (Ω)	Impedância Total Sequência Positiva (pu)	Impedância Total Sequência Zero (pu)
100	230	130	529	0,064+0,322j	0,192+0,966j

As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos na simulação 5.

Tabela 4.12 – Dados Medidos na Simulação 5

Local da Falta (%)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
20	0,2396	3,6482	0,4817	1,8335	1,0000	1,000
40	0,32011	2,4383	0,41709	2,11803	1,0000	1,0000
50	0,5774	3,5194	0,4528	2,7582	1,0000	1,0000
60	0,41709	2,11803	0,32011	2,4383	1,0000	1,0000
70	0,44478	1,93436	0,29785	3,02847	1,0000	1,0000
90	0,6851	2,3190	0,1539	4,6865	1,0000	1,0000

Tabela 4.13 – Localização da Falta Simulação 5

Local da Falta (%)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
20	173,6700	34,7340	34,7999	20,038	0,0380
40	173,6700	69,4680	69,4636	40,000	0,0030
50	173,6700	86,8350	86,6837	49,9129	0,0871
60	173,6700	104,2020	104,2064	60,000	0,0030
70	173,6700	121,5690	121,5443	69,990	0,0100
90	173,6700	156,3030	156,2899	89,9924	0,0076

A Figura 4.6 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta, obtido para simulações de faltas trifásicas na linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema 9 Barras (sistema da Figura 4.5). Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o ponto onde a falta foi simulada em percentual do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada ponto simulado.

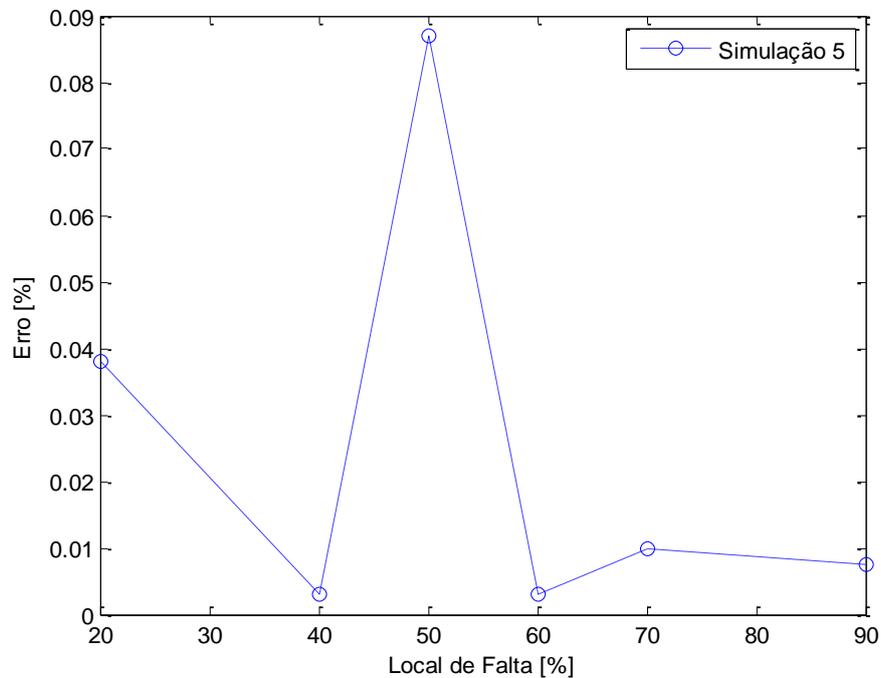


Figura 4.6 – Gráfico Erro de Localização Sistema 9 Barras

Analisando os resultados da simulação 5, podemos perceber que o maior erro obtido foi de 0,511%, para um curto trifásico a 50% do comprimento da linha. Considerando que o comprimento estimado da linha simulada é 130km, o ponto de falta apontado pelo método LocMod – Modelo Linha Curta, para este curto, foi a 65,66km do barramento 7 da Figura 4.5, com um erro de 0,511% (0,66km). Como as equipes de manutenção da linha não têm a como saber se a falta foi a montante ou a jusante do ponto informado, a distância máxima a ser percorrida para obtenção do ponto de falta é 1,32km.

4.1.3 Curto-Circuito Fase - Terra com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado

Analisaremos agora, a ocorrência de uma falta fase – terra com impedância de falta nula, em vários pontos distintos de uma linha de transmissão em um sistema malhado. Para a obtenção do local de falta neste tipo de defeito, deve ser utilizada a equação (3.27), com os seus respectivos dados de entrada medidos na fase sob falta. Para a utilização da equação (3.27), é necessário medir o módulo das tensões V_i e V_j , o módulo das correntes I_i e I_j , e a diferença de fase entre a tensão e a corrente no barramento i e a tensão e corrente no barramento j .

Simulação 6

A simulação 6 consiste na análise de um curto fase – terra com impedância de falta nula. Para esta análise, serão simuladas faltas em diferentes pontos da linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5. Os dados referentes a esta linha se encontram na Tabela 4.11, e as Tabelas 4.14 e 4.15 apresentam as grandezas medidas e os resultados obtidos para esta simulação, respectivamente.

Tabela 4.14 – Dados Medidos Simulação 6

Local da Falta (%)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
30	0,6305	3,8554	0,6030	1,6575	0,9975	0,9875
40	0,6926	3,2136	0,5759	1,8090	0,9965	0,9889
50	0,7373	2,7709	0,5408	2,0017	0,9954	0,9906
60	0,5759	1,8090	0,6926	3,2136	0,9889	0,9965
80	0,8101	2,0028	0,3408	3,0501	0,9414	0,9943
90	0,8198	1,8470	0,2090	3,7136	0,9902	0,9971

Tabela 4.15 – Localização da Falta Simulação 6

Local da Falta (%)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
30	173,6700	52,1010	53,9365	31,0569	1,0569
40	173,6700	69,4680	74,3706	42,8230	2,8230
50	173,6700	86,8350	94,7015	54,5295	4,5295
60	173,6700	104,2020	99,2994	57,1770	2,8230
80	173,6700	138,9360	155,7695	89,6928	9,6928
90	173,6700	156,3030	176,2694	101,4968	11,4968

A Figura 4.7 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta, obtido para simulações de faltas fase - terra na linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema 9 Barras (sistema da Figura 4.5). Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o ponto onde a falta foi simulada em percentual do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada ponto simulado.

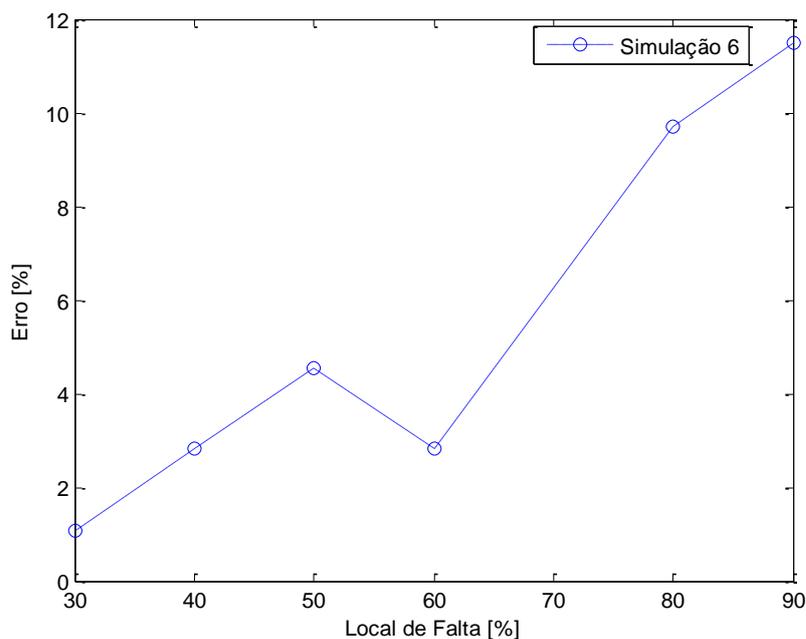


Figura 4.7 – Gráfico Erro de Localização Sistema 9 Barras Fase - Terra

Analisando os resultados obtidos para o curto-circuito fase-terra, podemos perceber que o método LocMod – Modelo linha Curta teve pior desempenho para este tipo de defeito do que em curtos trifásicos, de modo que o menor erro obtido nas simulações de falta fase - terra foi de 1,0569%, erro maior que o maior erro obtido para um curto trifásico na mesma linha (0,511% em uma falta a 30% da linha).

Além disso, analisando o gráfico da Figura 4.7, podemos perceber que quanto mais afastado do barramento 7 foi a ocorrência da falta, maior foi o erro de localização obtido, exceto apenas para o curto a 60% do comprimento da linha.

Nesta simulação, o maior erro obtido foi de 11,4968%, em uma falta a 90% do comprimento da linha, para a qual o local de falta informado pelo método LocMod – Linha Curta foi fora do limite físico da linha.

4.1.4 Efeito da Impedância de Falta no Método LocMod – Modelo Linha Curta

Como na ocorrência de uma falta não se dispõe do valor de impedância da falta, já que geralmente o motivo da falta é desconhecido, a capacidade de um método de localização de falta em obter o ponto de falta para faltas de diferentes valores de impedância é um

importante quesito a ser analisado. Com o intuito de analisar a eficiência do método LocMod – Modelo linha curta neste quesito, serão realizadas simulações de defeitos trifásicos com diferentes valores de impedâncias de falta para os sistemas das Figuras 4.3 e 4.5.

Simulação 7

A simulação 7 consiste na análise de um curto-circuito trifásico a 20, 50 e 70% do comprimento da linha de transmissão do sistema da Figura 4.3, com impedância de falta puramente resistiva de valor 0, 0,05, 0,1, 0,3 e 0,5 pu. Os dados referentes a esta linha se encontram na Tabela 4.8. As Tabelas 4.16, 4.18 e 4.20 apresentam as grandezas medidas, e as Tabelas 4.17, 4.19 e 4.21 apresentam os resultados obtidos para esta simulação.

Tabela 4.16 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 20% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 20%						
Impedância de Falta (pu)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
0	0,7613	239,2387	0,9273	72,9046	1,0000	1,0000
0,05	0,9990	13,6564	0,9997	6,2245	0,1380	0,1122
0,1	0,9997	7,3112	0,1000	2,6633	0,1065	0,0883
0,3	1,0000	2,4274	1,0000	0,9033	0,0906	0,0677
0,5	1,0000	1,2727	1,0000	0,7324	0,1017	0,0515

Tabela 4.17 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 20% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 20%					
Impedância de Falta (pu)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
0	43,6742	8,7348	8,8378	20,2358	0,2358
0,05	43,6742	8,7348	8,7482	20,0305	0,0305
0,1	43,6742	8,7348	8,7458	20,0252	0,0252
0,3	43,6742	8,7348	8,8471	20,2571	0,2571
0,5	43,6742	8,7348	9,3148	21,328	1,3280

Tabela 4.18 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 50% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 50%						
Impedância de Falta (pu)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
0	0,8884	111,8550	0,8884	111,8546	1,0000	1,0000
0,05	0,9992	9,8818	0,9991	9,9216	0,1544	0,1534
0,1	0,9998	4,9602	0,9998	5,0001	0,1152	0,1145
0,3	1,0000	1,6445	1,0000	1,6848	0,0889	0,0879
0,5	1,0000	0,9753	1,0000	1,0193	0,0837	0,0795

Tabela 4.19 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 50% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 50%					
Impedância de Falta (pu)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
0	43,6742	21,8371	21,8370	49,9999	0,0001
0,05	43,6742	21,8371	21,7345	49,7651	0,2349
0,1	43,6742	21,8371	21,8214	49,9641	0,0359
0,3	43,6742	21,8371	21,9568	50,2740	0,2740
0,5	43,6742	21,8371	21,6972	49,680	0,3200

Tabela 4.20 – Dados Obtidos Simulação 7 – Curto a 70% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 70%						
Impedância de Falta (pu)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
0	0,9177	82,5074	0,8270	173,4304	1,0000	1,0000
0,05	0,9995	7,4272	0,9990	12,4168	0,1333	0,1489
0,1	0,9999	3,7273	0,9997	6,2412	0,0981	0,1167
0,3	1,0000	1,1265	1,0000	2,2069	0,0802	0,0903
0,5	1,0000	0,6558	1,0000	1,3446	0,0807	0,0894

Tabela 4.21 – Local de Falta Simulação 7 – Curto a 70% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 70%					
Impedância de Falta (pu)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
0	43,6742	30,5719	30,4162	69,6433	0,3567
0,05	43,6742	30,5719	30,5631	69,9797	0,0203
0,1	43,6742	30,5719	30,5381	69,9226	0,0774
0,3	43,6742	30,5719	30,6021	70,0691	0,0691
0,5	43,6742	30,5719	30,4078	69,6241	0,3759

A Figura 4.8 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta, obtido para simulações de faltas trifásicas com diferentes valores de impedância de falta, em diferentes pontos da linha de transmissão do sistema da Figura 4.3. Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o valor da impedância de falta em pu, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada valor de impedância de falta simulado.

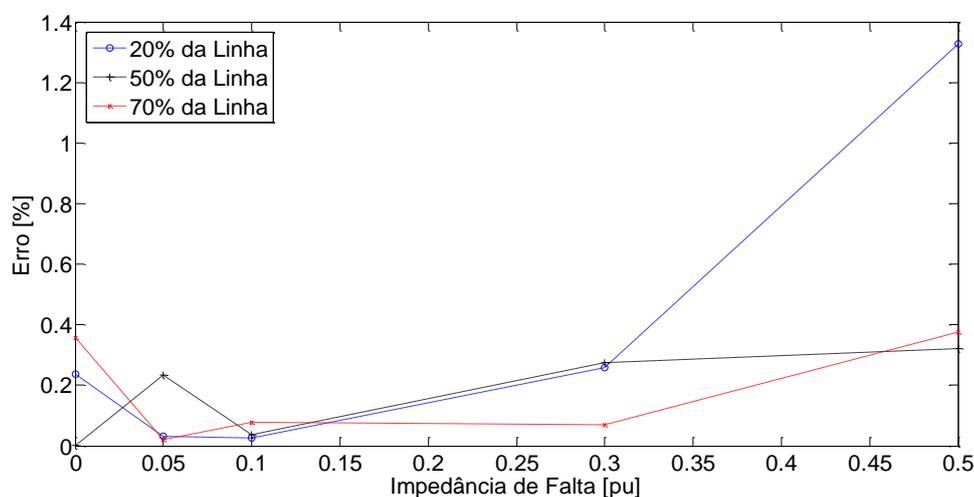


Figura 4.8 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Sistema Dois Geradores

Pela análise dos erros obtidos para a simulação 7, podemos perceber que a variação da impedância de falta não influenciou de forma significativa nos pontos de falta fornecidos pelo método LocMod – Modelo Linha Curta, já que o maior erro obtido foi de 1,328% para valor de impedância de falta de 0,5pu, valor que extrapola os valores de impedância de falta encontrados em casos reais [2]. Além disso, os erros obtidos para diferente ponto de

ocorrência de falta, para mesmo valor de impedância de falta, apresentaram valores próximos, exceto para valores de impedância de falta acima de 0,3pu, em um curto a 20% do comprimento da linha.

Simulação 8

A simulação 8 consiste na análise de um curto-circuito trifásico a 50% do comprimento da linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5, com impedância de falta puramente resistiva de valor 0; 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21 e 0,24 pu. Os dados referentes a esta linha se encontram na Tabela 4.11. As Tabelas 4.22 e 4.23 apresentam as grandezas medidas e os resultados obtidos para esta simulação.

Tabela 4.22 – Dados Obtidos Simulação 8 – Curto a 50% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 50%						
Impedância de Falta (pu)	V_i (pu)	I_i (pu)	V_j (pu)	I_j (pu)	$\cos(\theta_i - \theta_1)$	$\cos(\theta_j - \theta_2)$
0	0,5774	3,5194	0,4528	2,7582	1,0000	1,0000
0,03	0,5723	3,4865	0,4500	2,7416	1,0000	1,0000
0,06	0,5724	3,4866	0,4503	2,7422	1,0000	1,0000
0,09	0,5778	3,5193	0,4529	2,7589	1,0000	1,0000
0,12	0,5721	3,4850	0,4500	2,7422	1,0000	1,0000
0,15	0,5778	3,5196	0,4529	2,7586	1,0000	1,0000
0,18	0,5724	3,4865	0,4502	2,7413	1,0000	1,0000
0,21	0,5778	3,5193	0,4529	2,7583	1,0000	1,0000
0,24	0,5720	3,4855	0,4502	2,7423	1,0000	1,0000

Tabela 4.23 – Local de Falta Simulação 8 – Curto a 50% do Comprimento da Linha

Local de Falta: 50%					
Impedância de Falta (pu)	Z Total (Ω)	Z Esperado (Ω)	Z Simulado (Ω)	Local de Falta Obtido (%)	Erro (%)
0	173,6700	86,8350	86,6837	49,9129	0,0871
0,03	173,6700	86,8350	86,7871	49,9724	0,0276
0,06	173,6700	86,8350	87,0002	50,0963	0,0963
0,09	173,6700	86,8350	86,9378	50,0592	0,0592
0,12	173,6700	86,8350	86,6576	49,8979	0,1021
0,15	173,6700	86,8350	86,9267	50,0528	0,0528
0,18	173,6700	86,8350	87,0129	50,1024	0,1024
0,21	173,6700	86,8350	86,6045	49,8673	0,1327
0,24	173,6700	86,8350	86,7941	49,9764	0,0236

A Figura 4.9 apresenta o gráfico com a evolução do erro do ponto de falta obtido na simulação 8. Neste gráfico, o eixo das abscissas representa o valor da impedância de falta em pu, e o eixo das ordenadas representa o erro de localização da falta para cada valor de impedância de falta simulado.

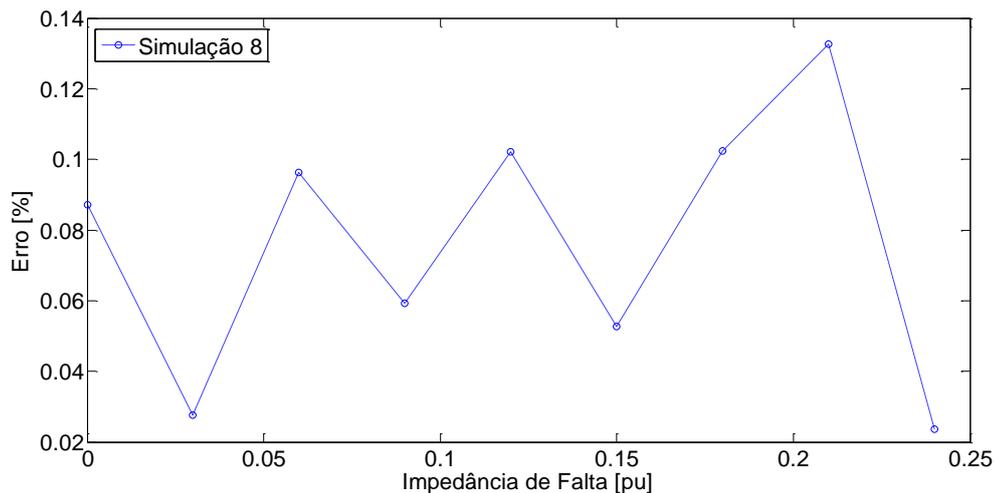


Figura 4.9 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Sistema 9 Barras

Pela análise dos erros obtidos para a simulação 8, percebemos que a variação da impedância de falta não influenciou de forma significativa nos pontos de falta fornecidos pelo método LocMod – Modelo Linha Curta.

4.2 Simulação LocMod – Modelo Linha Longa

Com o intuito de avaliar a eficácia do método LocMod – Modelo Linha Longa, nesta parte do trabalho foram simuladas diferentes tipos de faltas na linha do sistema da Figura 4.3, e na linha situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da figura 4.5. Para isto, estas linhas foram representadas através dos seus respectivos modelos pi equivalente no software Simulight.

Para cada falta simulada foram obtidos os valores de V_i e θ_i , módulo e fase da tensão no barramento i , I_i e ϕ_i , módulo e fase da corrente no barramento i , V_j e θ_j , módulo e fase da tensão no barramento j , e I_j e ϕ_j , módulo e fase da corrente no barramento j . Após a medição dos parâmetros de entrada da função $G(X)$ (equação (3.32)), foi calculado seu valor para intervalos de 0,1% do comprimento das linhas simuladas. O local da falta obtido em cada simulação foi o ponto no qual a função $G(x)$ apresentou o menor valor.

A Tabela 4.24 apresenta cada tipo de defeito simulado na validação do Modelo Linha Longa.

Tabela 4.24 – Descrição das Simulações Modelo Linha Longa

Simulação	Descrição do Defeito Simulado
Simulação 9	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.3.
Simulação 10	Curto-circuito trifásico com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.5.
Simulação 11	Curto-circuito fase - terra com impedância de falta nula no sistema da Figura 4.5.
Simulação 12	Curto-circuito trifásico com impedância de falta puramente resistiva no sistema da Figura 4.3.

4.2.1 Curto Trifásico com Impedância de Falta Nula em Sistema Malhado

Nesta parte do trabalho foram simuladas faltas trifásicas com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha do sistema da Figura 4.3, e da linha situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5, sistema com dois geradores e sistema 9 barras, respectivamente. Para a simulação do sistema 9 Barras, foi representado no Simulight o modelo π -equivalente da linha na qual as faltas foram simuladas, obtido através dos dados apresentados na Tabela 4.27. E, para a simulação do sistema dois geradores foi obtida a impedância por unidade de comprimento para a linha deste sistema, e obtida uma nova impedância, considerando que esta linha possui um novo comprimento de 500km.

Simulação 9

A simulação 9 consiste na simulação de um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão do sistema da Figura 4.3.

A Tabela 4.25 apresenta os dados da linha de transmissão utilizada para a simulação 9, modelada como linha longa, e a Tabela 4.26 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os erros obtidos para cada local de falta na simulação 9.

Tabela 4.25 – Dados da Linha Utilizada na Simulação 9

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Comprimento (km)	Impedância Total (pu)	Admitância total (Mvar)	Carga (MW)
100	525	500	0,004 + 0,0527j	601,80	5

Tabela 4.26 – Resultados Obtidos Simulação 9

Local da Falta (%)	V_i (pu)	θ_i (Grau)	I_i (pu)	ϕ_i (Grau)	V_j (pu)	θ_j (Grau)	I_j (pu)	ϕ_j (Grau)	Erro (%)
15	0,8805	-0,9409	116,6358	-86,8618	0,9766	-0,1446	20,3545	-85,5201	1,2000
20	0,9071	-0,7569	89,9131	-86,6161	0,9750	-0,1508	21,9081	-85,5919	1,8000
40	0,9507	-0,3979	46,2545	-86,1947	0,9666	-0,2248	30,3588	-85,8822	9,2000
50	0,9601	-0,5964	36,8383	-86,3283	0,9601	-0,5460	36,8383	-86,2944	0,0000
70	0,9714	-0,2407	25,5914	-85,7886	0,9356	-0,4229	61,3600	-86,3177	3,9000
75	0,9733	-0,4131	23,6405	-85,9109	0,9239	-1,0590	73,0208	-86,9349	2,7000
90	0,9780	-0,3487	18,9478	-85,6597	0,8317	-2,2554	165,4827	-88,1500	0,7000

A Figura 4.10 apresenta o gráfico com os erros obtidos na simulação 9. Neste gráfico o eixo das abscissas representa o local em que a falta foi simulada, em porcentagem do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro percentual obtido para cada ponto de falta.

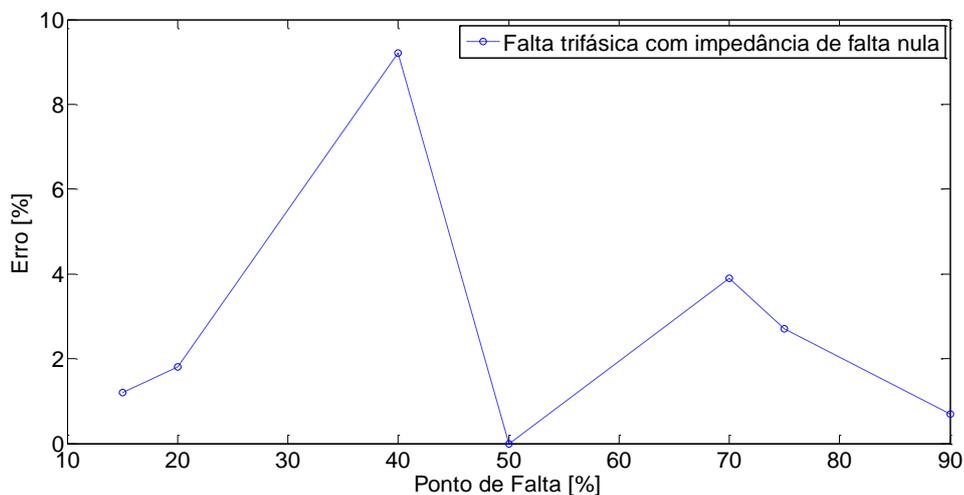


Figura 4.10 – Gráfico Erro de Localização Modelo Linha Longa Sistema Dois Geradores

O maior erro obtido na simulação 9 foi 9,2%, para uma falta a 40% do comprimento da linha. Considerando que esta linha possui 500km, o maior erro encontrado foi 46km. O erro médio obtido para esta simulação foi 2,7857%, equivalente a 13,9285km.

As Figuras 4.11 e 4.13 apresentam os gráficos com os valores calculados para a função $G(x)$ (equação (3.32)) para simulação de falta a 40% e a 50% da linha, o maior e o menor valor de erro obtido para a simulação 9, respectivamente.

Como a função $G(x)$ é calculada a partir da diferença do módulo dos valores da tensão do ponto de falta obtido através das tensões de cada um dos barramentos da linha de transmissão (módulo das equações (3.28) e (3.31)), caso haja erro em cada uma destas duas equações, o ponto de falta apontado por cada um dos membros da subtração da equação (3.32) não será o mesmo. Devido a isto, o ponto de mínimo da equação (3.32) não necessariamente será o ponto de falta, podendo o erro obtido ser de valor elevado, fato que ocorreu para a simulação de falta a 40% do comprimento da linha. A Figura 4.12 ilustra esta situação, uma vez que esta apresenta o módulo dos valores obtidos para as equações (3.28) e (3.31) na simulação de falta a 40% do comprimento da linha.

O gráfico da Figura 4.11 é um gráfico típico obtido na simulação 9, e os dois valores de mínimo apresentados neste gráfico, são devidos aos diferentes pontos de mínimo de cada um dos membros da subtração da equação (3.32), fato que gera dois pontos de interseção entre os gráficos dos módulos da equação (3.28) e (3.31), como pode ser visto no gráfico da Figura 4.12.

Como na ocorrência de uma falta real, o operador não tem como saber qual dos pontos de mínimo da função $G(x)$ (equação (3.32)), fornecidos por este método, está mais próximo do verdadeiro ponto de falta, nos locais de falta que foram obtidos dois pontos de mínimo, foi considerado como ponto de falta o ponto de mínimo da função $G(x)$ que produziu maior erro.

Os gráficos com os valores da função $G(x)$ para os demais pontos de falta simulados estão no Anexo IV.

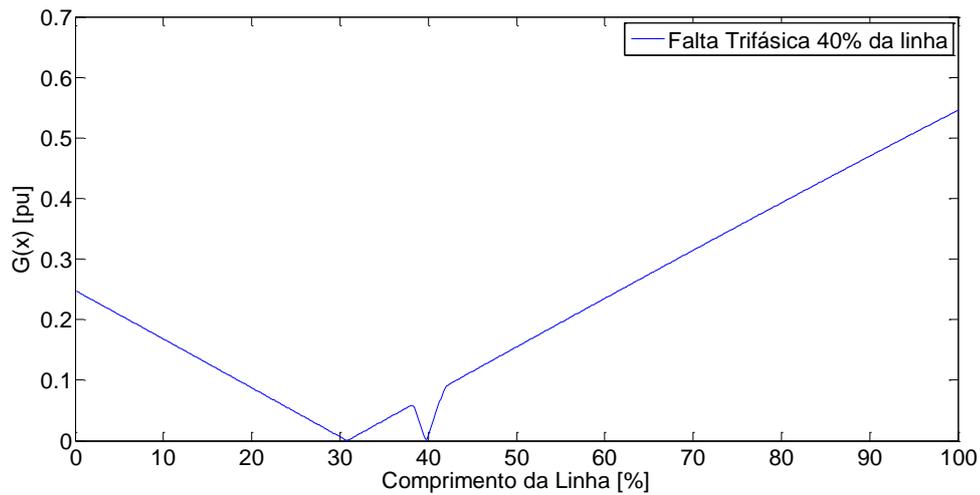


Figura 4.11 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores

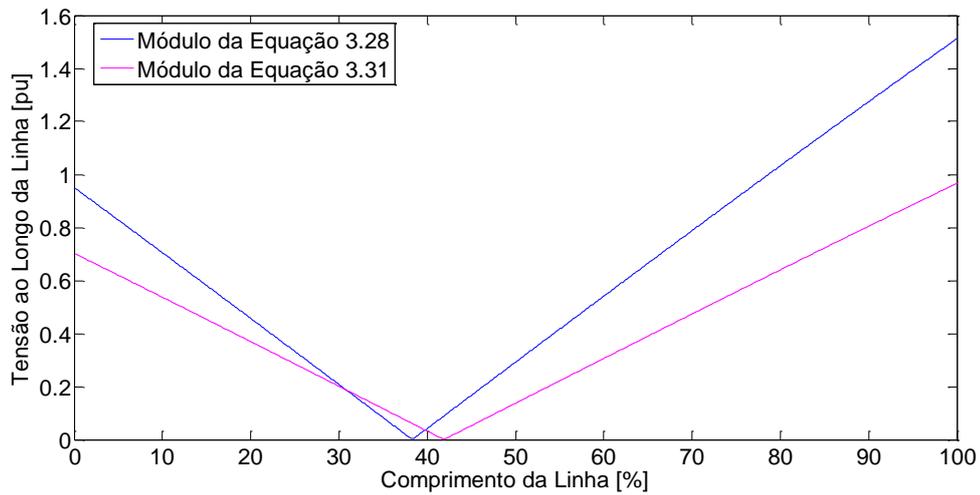


Figura 4.12 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores

Para a simulação de falta a 50% da linha, as diferenças entre os mínimos das equações (3.28) e (3.31) e o ponto de falta foram simétricas, de modo que os erros se anularam no cálculo da equação (3.32) para esta falta, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.14. Além disso, como a falta foi a 50% da linha e os valores dos parâmetros medidos em ambos os terminais da linha foram praticamente idênticos, os valores da função $G(x)$, para esta falta, foram próximos de zero e praticamente constante ao longo da linha, resultando na forma do gráfico da Figura 4.13.

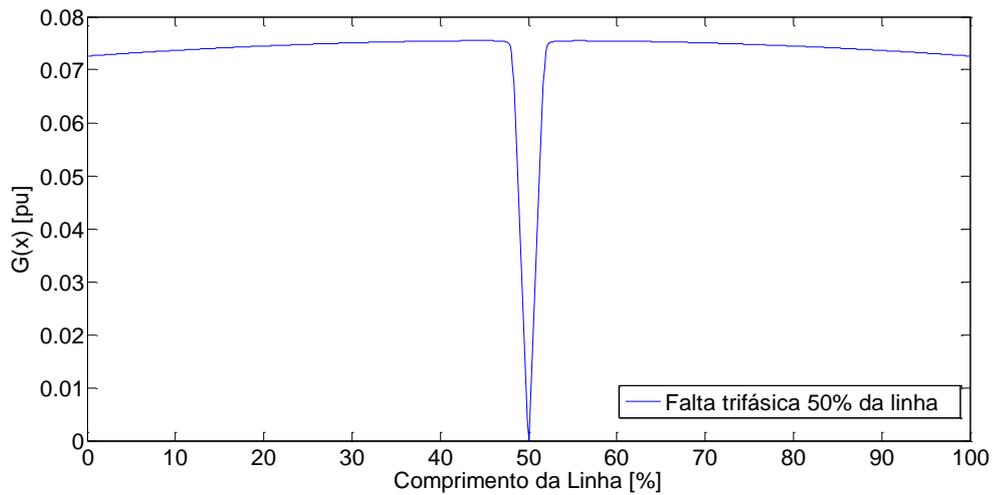


Figura 4.13 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores

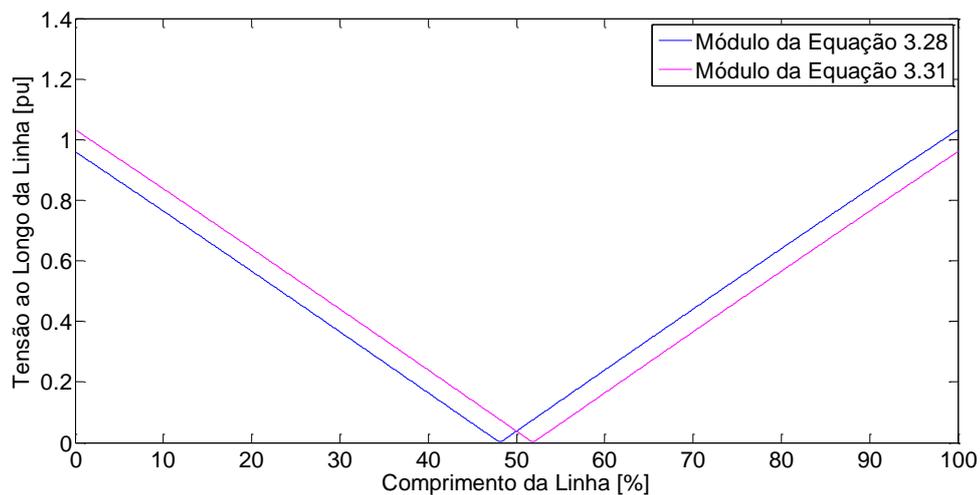


Figura 4.14 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores

Simulação 10

Semelhantemente à simulação 5, a simulação 10 consiste na simulação de um curto-circuito trifásico com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5.

A Tabela 4.27 apresenta os dados utilizados para a modelagem da linha simulada como uma linha longa, e a Tabela 4.28 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos na simulação 10.

Tabela 4.27 – Dados da linha Utilizada na Simulação 10

Potência Base (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Comprimento Estimado (km)	Impedância Total Sequência Positiva (pu)	Impedância Total Sequência Zero (pu)	Admitância total Sequência Positiva (Mvar)	Admitância total Sequência Zero (Mvar)
100	138	130	0,064+0,322j	0,192+0,966j	61,2	31,38

Tabela 4.28 – Dados Medidos na Simulação 10

Local da Falta (%)	V_i (pu)	θ_i (Grau)	I_i (pu)	ϕ_i (Grau)	V_j (pu)	θ_j (Grau)	I_j (pu)	ϕ_j (Grau)	Erro (%)
15	0,2822	10,1471	5,9164	-68,9687	0,5487	-7,9896	1,8871	-86,2964	1,1000
20	0,3388	10,7447	5,3053	-68,3556	0,5365	-7,7403	1,9796	-86,1504	1,6000
40	0,5094	11,2073	3,9469	-67,7573	0,4864	-6,8936	2,4626	-85,6628	5,1000
50	0,5577	11,7901	3,4262	-67,0776	0,4448	-6,3957	2,7307	-85,2629	10,7000
70	0,6394	12,0826	2,7397	-66,4674	0,3366	-6,4054	3,5004	-84,4272	9,6000
75	0,6472	12,4921	2,5692	-66,0131	0,2970	-5,0136	3,7146	-84,0935	5,5000
90	0,6851	12,7076	2,2084	-65,4920	0,1495	-3,9201	4,7019	-83,0590	1,2000

A Figura 4.15 apresenta o gráfico com os erros obtidos na simulação 10. Neste gráfico o eixo das abscissas representa o local em que a falta foi simulada, em porcentagem do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro percentual obtido para cada ponto de falta simulado.

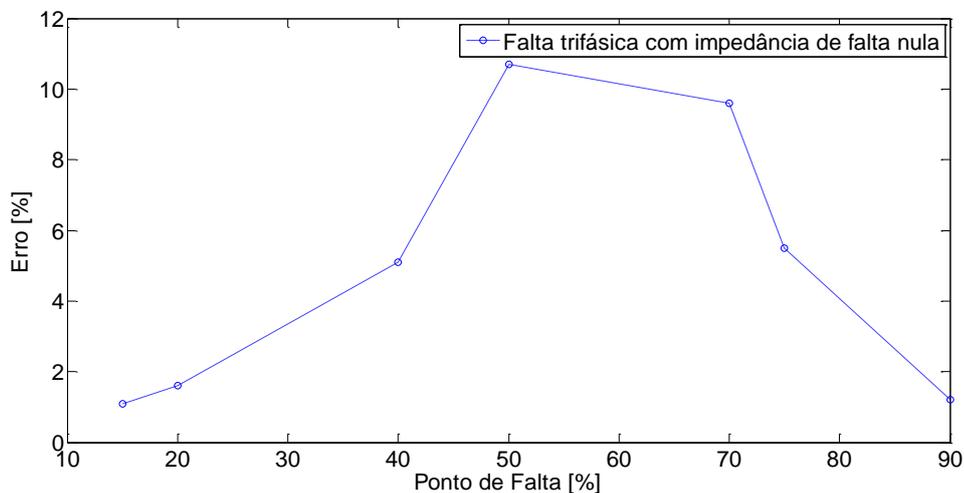


Figura 4.15 – Gráfico Erro de Localização Modelo Linha Longa Sistema 9 Barras

A Figura 4.16 apresenta o gráfico com os valores calculados para a função $G(x)$ na simulação de falta a 50% da linha, o maior valor de erro obtido para a simulação 10, e a Figura 4.17 apresenta o gráfico com os valores calculados para as equações (3.28) e (3.31), na simulação de falta a 50% da linha. As causas dos erros obtidos para esta simulação são as mesmas descritas para a simulação 9, e os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 são gráficos típicos obtidos na simulação 10.

Os gráficos com os valores da função $G(x)$ para os demais pontos de falta simulados para faltas trifásicas no sistema 9 Barras estão expostos no Anexo IV.

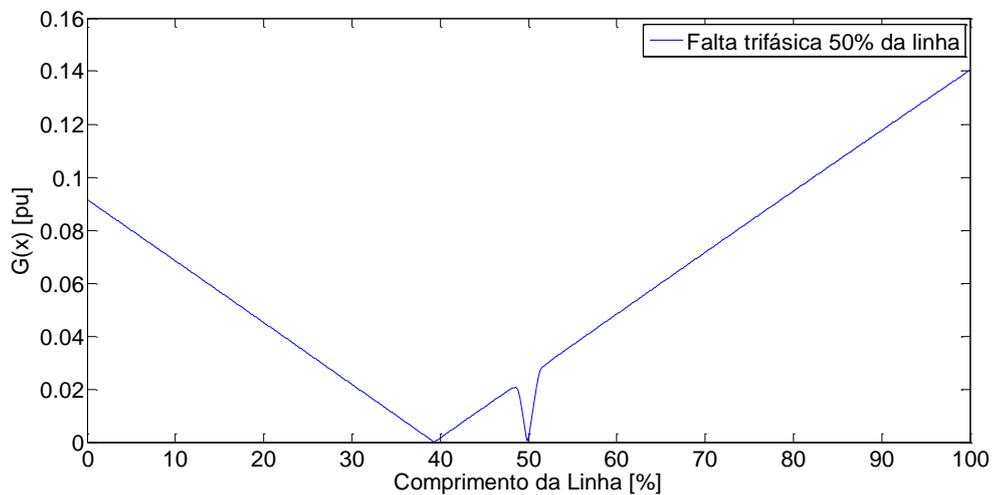


Figura 4.16 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras

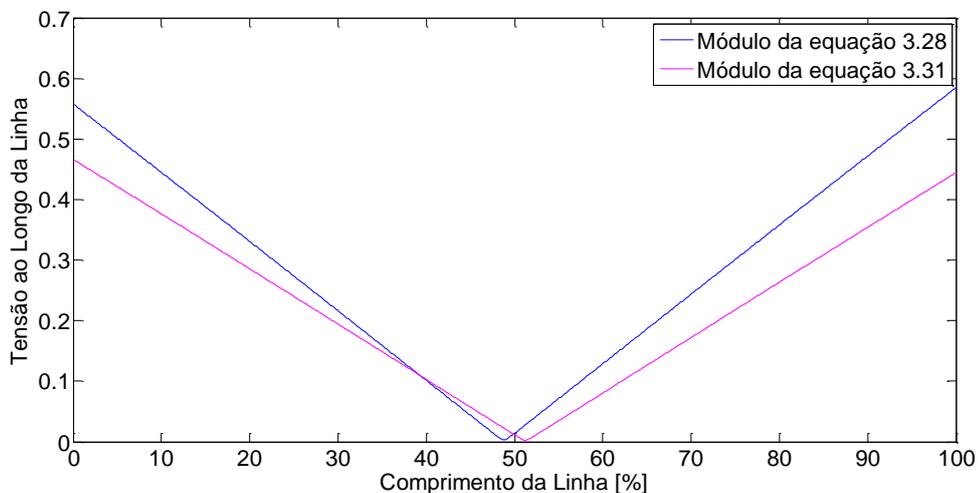


Figura 4.17 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras

4.2.2 Curto-Circuito Fase - Terra com Impedância de Falta Nula em um Sistema Malhado

Nesta parte do projeto foi analisado a eficiência do método LocMod – Modelo Linha Longa com relação a localização de faltas fase – terra com impedância de falta nula. Para a obtenção do local de falta quando há a ocorrência de curto fase - terra, deve ser utilizada a equação (3.32), com os seus respectivos dados de entrada medidos na fase sob falta. Para a utilização da equação (3.32), precisamos medir os fasores de tensão e corrente da fase sob falta em cada um dos barramentos da linha ($\dot{V}_i, \dot{V}_j, \dot{I}_i$ e \dot{I}_j).

Simulação 11

A simulação 11 consiste na análise de um curto fase - terra com impedância de falta nula, em diferentes pontos da linha de transmissão situada entre os barramentos 5 e 7 do sistema da Figura 4.5.

A Tabela 4.27 apresenta os dados utilizados para a modelagem da linha simulada como uma linha longa, e a Tabela 4.29 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos na simulação 11.

Tabela 4.29 – Dados Medidos na Simulação 11

Local da Falta (%)	V_i (pu)	θ_i (Grau)	I_i (pu)	ϕ_i (Grau)	V_j (pu)	θ_j (Grau)	I_j (pu)	ϕ_j (Grau)	Erro (%)
15	0,4499	11,7734	5,5087	-64,4368	0,6310	-3,1877	1,4086	-90,6121	29,8000
20	0,5209	11,7255	4,7774	-63,9863	0,6243	-3,0395	1,4546	-90,5585	39,9000
40	0,6909	11,4713	3,1518	-62,2760	0,5786	-2,2101	1,7405	-89,0995	2,7000
50	0,0758	11,5207	2,6762	-61,1927	0,5396	-1,6344	1,9417	-87,9323	4,6000
70	0,7970	11,6150	2,0609	-59,0676	0,4241	-0,0202	2,5449	-84,7855	8,4000
75	0,8051	11,7354	1,9425	-58,4201	0,3817	-0,5567	2,7512	-83,8066	9,3000
90	0,8270	11,9909	1,6716	-56,6774	0,2025	2,9301	3,6601	-80,1309	63,9000

A Figura 4.18 apresenta o gráfico com os erros obtidos na simulação 11. Neste gráfico o eixo das abscissas representa o local em que a falta foi simulada, em porcentagem do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro percentual obtido para cada ponto de falta simulado.

Através da análise da Figura 4.18 podemos perceber que o método apresentou erros extremamente elevados para faltas próximas as extremidades da linha, fato que pode ser constatado para as faltas simuladas a 15%, 20% e 90% da linha. Nesses pontos, novamente o método LocMod – Modelo Linha Longa apresentou dois pontos de mínimo para a função $G(x)$, sendo estes dois candidatos ao ponto de falta. Para as simulações de falta a 15%, 20% e 90% da linha, foi considerado como ponto de falta o ponto de mínimo da função $G(x)$ que produziu maior erro, embora o segundo ponto fornecido pelo método tenha apresentado erro muito menor, como pode ser visto na Tabela 4.30, tabela que apresenta os candidatos a ponto de falta obtidos para a simulação 11.

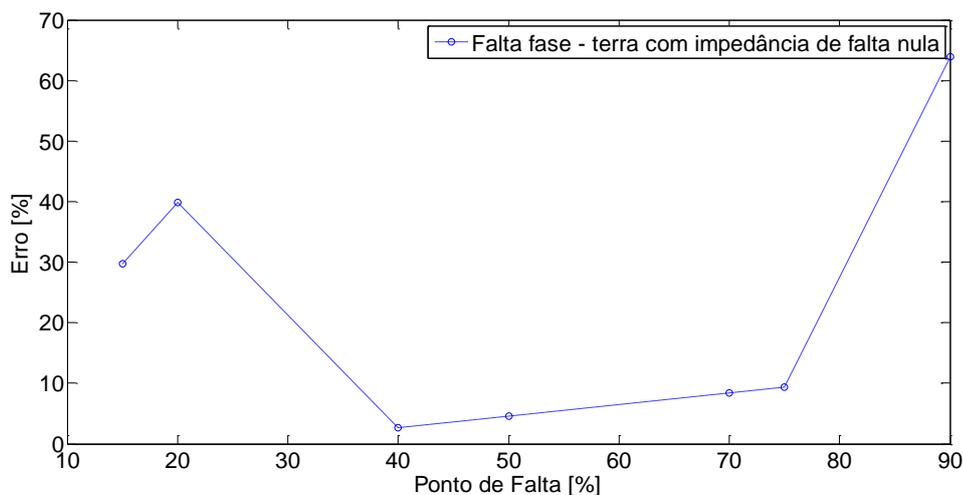


Figura 4.18 – Gráfico Erro de Localização Linha Longa Sistema Dois Geradores

Tabela 4.30 – Candidatos a Ponto de Falta Simulação 11

Local da Falta (%)	1º Candidato a Ponto de Falta (%)	2º Candidato a Ponto de Falta (%)
15	13,3	44,8
20	19,1	59,9
40	42,7	-
50	54,6	-
70	78,8	-
75	84,3	-
90	26,10	Fora do Limite da Linha

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os gráficos com os valores calculados para a função $G(x)$ e para as equações (3.28) e (3.31) na simulação de falta a 20% da linha, respectivamente. Os gráficos das Figuras 4.19 e 4.20 são semelhantes aos gráficos obtidos para a simulação de falta a 15% da linha, e os dois pontos de mínimo da função $G(x)$ são devidos aos dois pontos de interseção dos módulos das tensões ao longo da linha, calculadas a partir de cada um dos seus barramentos.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam os gráficos com os valores calculados para a função $G(x)$ e para as equações (3.28) e (3.31) na simulação de falta a 90% da linha, respectivamente. Para a simulação de falta a 90% da linha, o primeiro ponto candidato a ponto de falta apresentou erro muito elevado, e o segundo ponto candidato a ponto de falta ocorreria em um ponto fora dos limites físicos da linha.

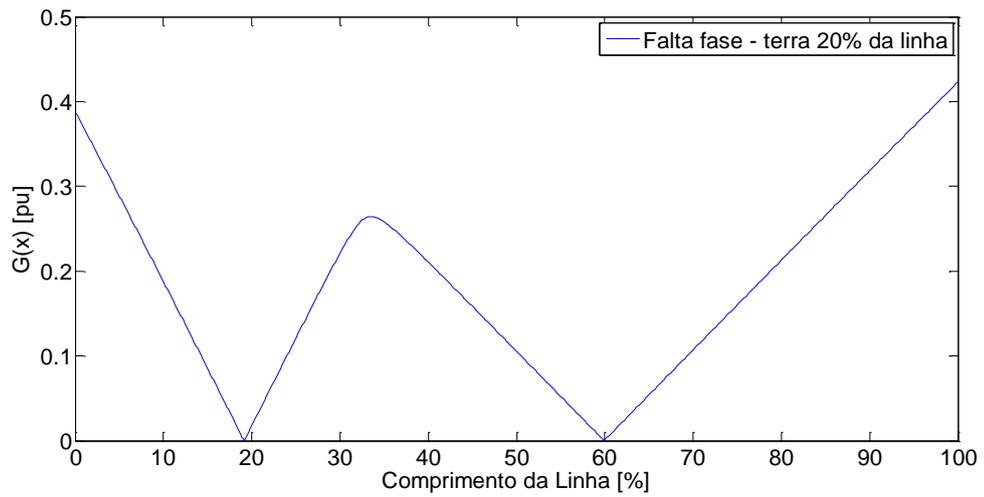


Figura 4.19 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9

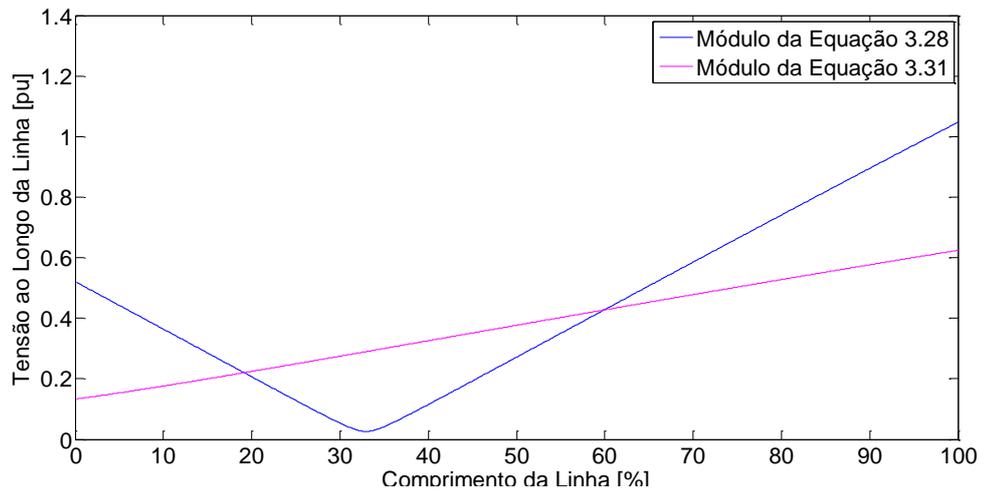


Figura 4.20 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9 Barras

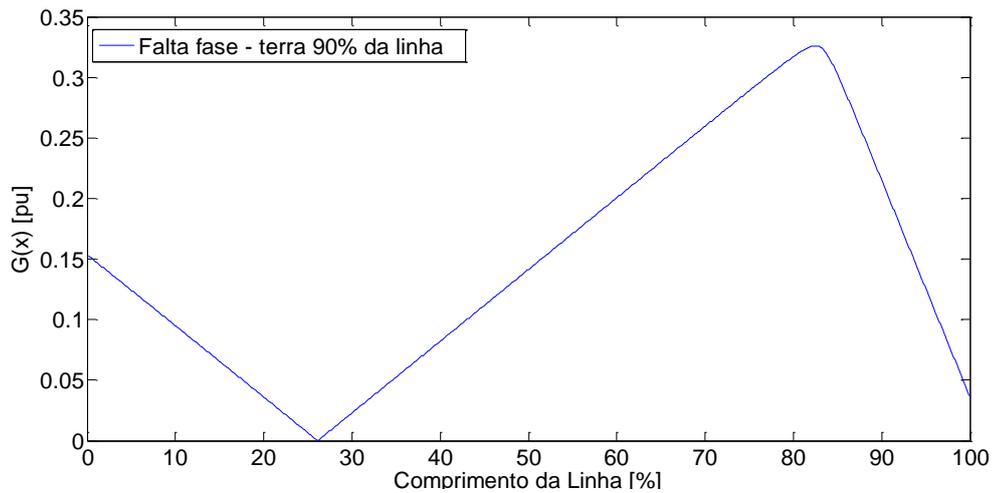


Figura 4.21 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras

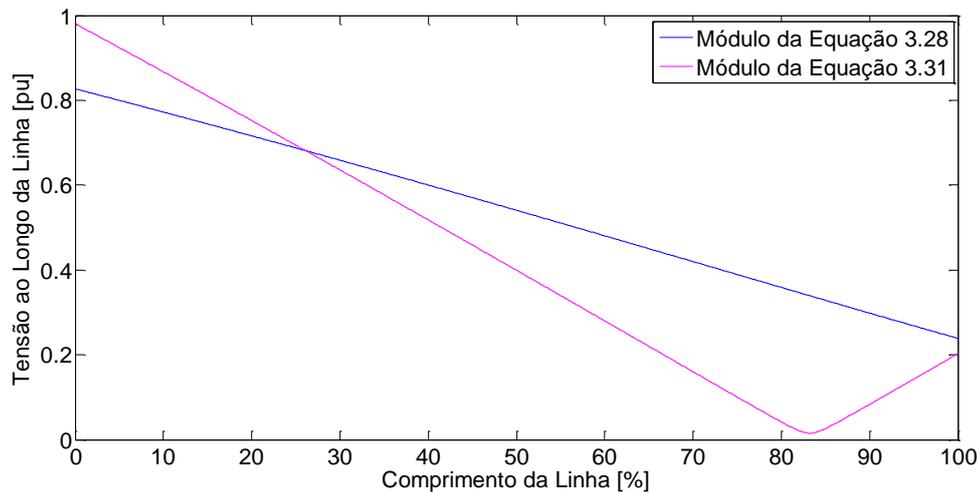


Figura 4.22 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras

Os gráficos com os valores da função G(x) para os demais pontos de falta simulados para faltas fase - terra no sistema 9 Barras estão expostos no Anexo IV.

4.2.3 Efeito da Impedância de Falta no Método LocMod – Modelo Linha Longa

Com o intuito de analisar a eficácia do método LocMod – Modelo Linha Longa com relação a localização de faltas com impedância não nula, foram realizadas simulações de faltas trifásicas com diferentes valores de impedância no sistema da Figura 4.3.

Simulação 12

A simulação 12 consiste na análise de curto-circuito trifásico com impedância de falta igual a 0, 0,01, 0,02, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16 e 0,20 pu, a 40% da linha de transmissão do sistema da Figura 4.3 (sistema Dois Geradores).

Os dados utilizados para a modelagem da linha simulada como linha longa estão na Tabela 4.25, e a tabela 4.31 apresenta o valor dos parâmetros medidos e os resultados obtidos para esta simulação.

Tabela 4.31 – Dados Medidos na Simulação 12

Local de Falta: 40%									
Impedância de Falta (pu)	V_i (pu)	θ_i (Grau)	I_i (pu)	ϕ_i (Grau)	V_j (pu)	θ_j (Grau)	I_j (pu)	ϕ_j (Grau)	Erro (%)
0	0,9507	-0,7294	46,2545	-86,5223	0,9666	-0,4515	30,3588	-86,1064	9,2000
0,01	0,9713	-5,3624	35,3065	-51,0270	0,9802	-3,6542	23,6717	-48,0006	7,1000
0,02	0,9864	-2,7381	24,4923	-27,3340	0,9906	-1,7644	16,4235	-23,6798	2,7000
0,04	0,0758	11,5207	2,6762	-61,1927	0,5396	-1,6344	1,9417	$j87,9323$	49,4000
0,08	0,9987	-1,7142	7,8412	12,5804	0,9991	-1,1403	5,8652	21,7583	0,8000
0,12	0,9994	-0,6368	5,8169	25,8530	0,9996	-0,3906	4,5429	36,8435	0,6000
0,16	0,9997	-0,8818	4,8085	35,2222	0,9998	-0,5664	4,0276	45,7839	0,6000
0,20	0,9998	-0,7176	4,2886	42,6822	0,9998	-0,4432	3,7359	52,8041	0,7000

A Figura 4.23 apresenta o gráfico com os erros obtidos na simulação 12. Neste gráfico o eixo das abscissas representa o local em que a falta foi simulada, em porcentagem do comprimento da linha, e o eixo das ordenadas representa o erro percentual obtido para cada ponto de falta simulado.

Através da análise da Figura 4.23, podemos perceber que o método apresentou erros elevados para valores de impedância de falta menores que 0,04pu, devido ao fato de, em faltas com esses valores de impedância, terem sido obtidos dois pontos de mínimo para a função $G(x)$. A Tabela 4.32 apresenta os candidatos a ponto de falta fornecidos pelo método LocMod – Modelo Linha Longa para a simulação 12.

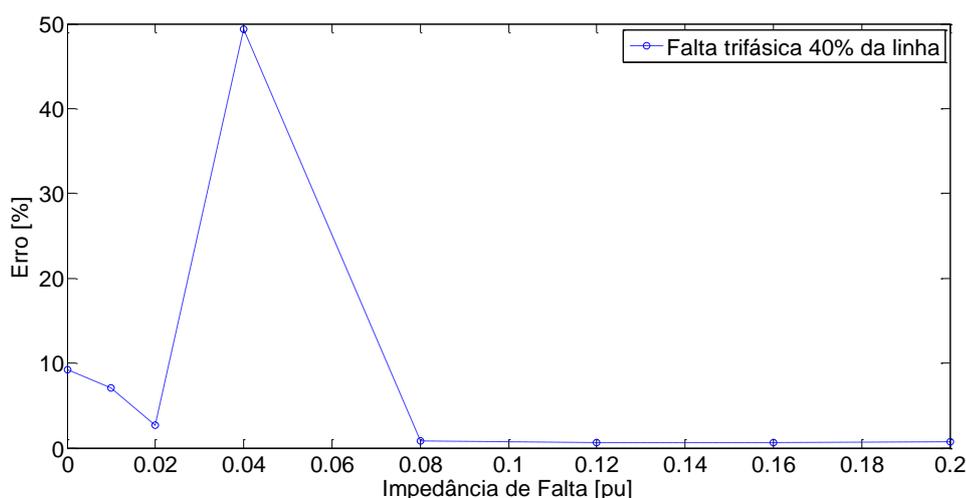


Figura 4.23 – Gráfico Erro de Localização Impedância de Falta Linha Longa Sistema Dois Geradores

Tabela 4.32 – Candidatos a Ponto de Falta Simulação

Impedância de Falta (pu)	1º Candidato a Ponto de Falta (%)	2º Candidato a Ponto de Falta (%)
0	30,8	39,8
0,01	47,1	38,2
0,02	59,8	39,9
0,04	89,4	39,3
0,08	39,2	-
0,12	39,4	-
0,16	39,4	-
0,20	39,3	-

As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam os gráficos com os valores calculados para a função $G(x)$ e para as equações (3.28) e (3.31) para a simulação de falta com impedância igual 0,04pu, valor de impedância para a qual foi obtido o maior erro. E, as figuras 4.26 e 4.27 apresentam os gráficos com os valores calculados para a função $G(x)$ e para as equações (3.28) e (3.31) para a simulação de falta com impedância igual 0,12pu, valor de impedância para a qual foi obtido o menor erro.

Através da análise das Figuras 4.25 e 4.27, podemos perceber que o aumento da impedância de falta fez a concavidade dos gráficos dos módulos das equações 3.28 e 3.31

mudar, fato que fez o método LocMod – Modelo Linha Longa fornecer apenas um candidato a ponto de falta.

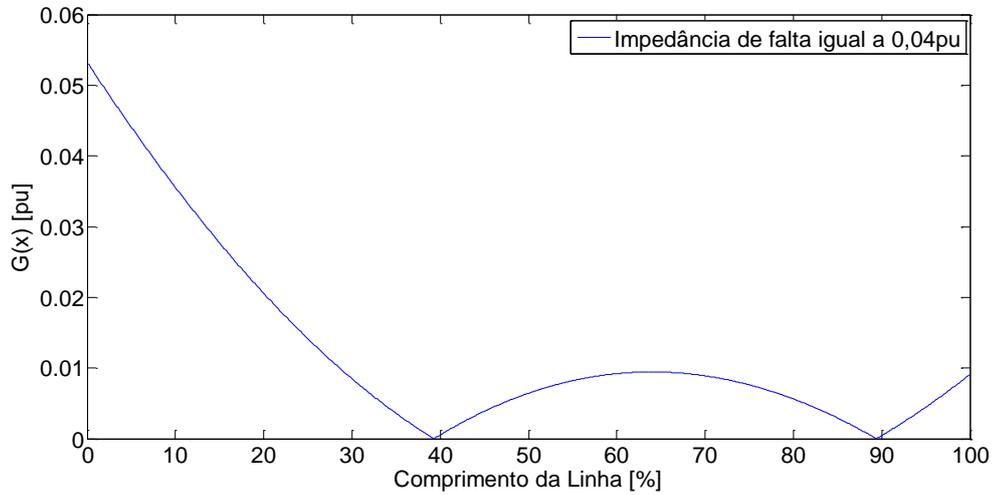


Figura 4.24 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores

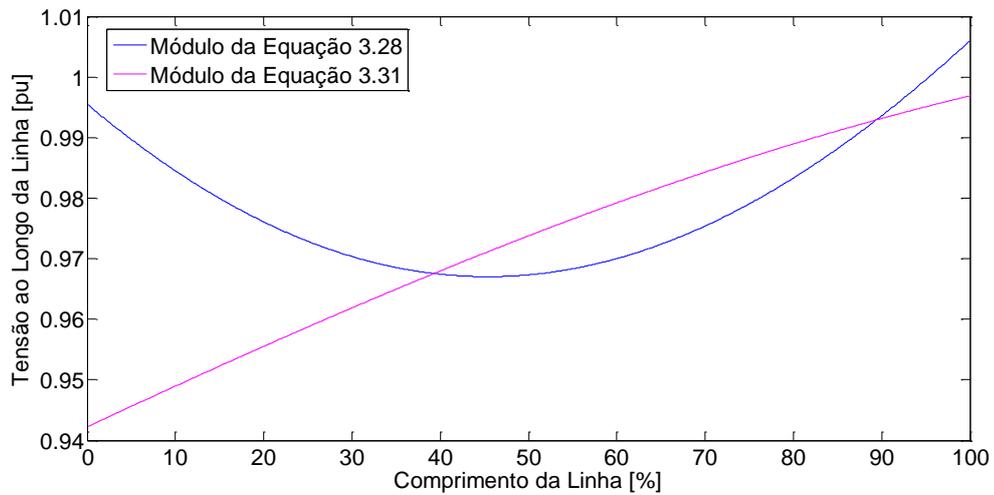


Figura 4.25 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores

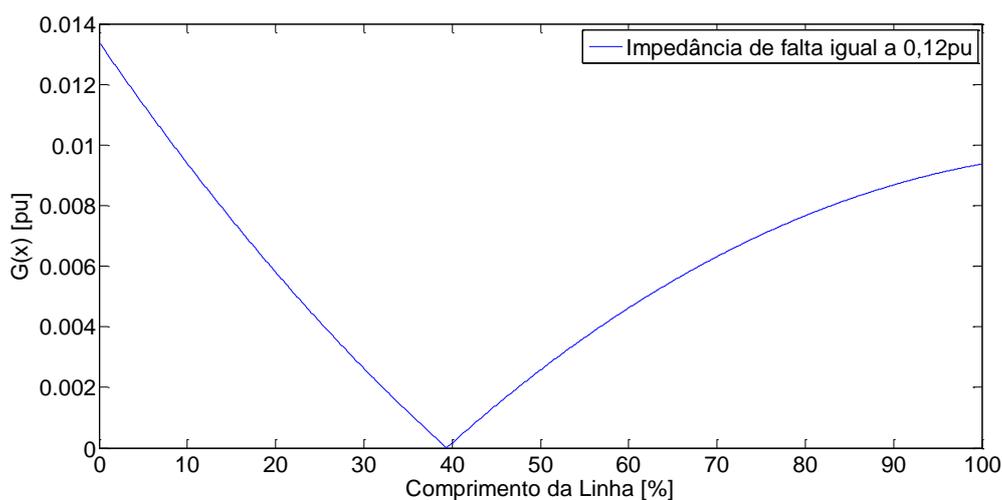


Figura 4.26 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores

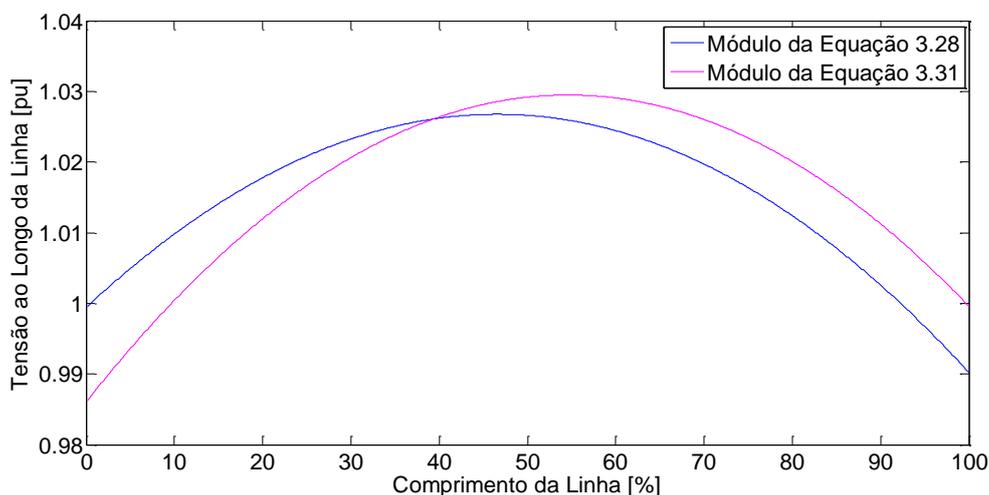


Figura 4.27 – Gráfico Módulo Equações 3.28 e 3.31 Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores

Os gráficos com os valores da função $G(x)$ para os demais pontos de falta simulados para faltas trifásica com impedância de falta no sistema Dois Geradores estão expostos no Anexo IV.

4.3 Análise dos Resultados Obtidos

Analisando os resultados obtidos, podemos perceber que o método LocMod apresentou resultados satisfatórios para ambos os modelos simulados (Modelo Linha Curta e Modelo

Linha Longa), embora tenha apresentado problemas pontuais em ambos modelos. A Tabela 4.33 apresenta os valores do erro médio, da mediana e da variância obtidos através do método LocMod – Modelo Linha Curta para cada tipo de falta simulada.

Tabela 4.33 – Análise dos Erros LocMod – Modelo Linha Curta

Tipo de Falta	Erro Médio (%)	Mediana (%)	Variância (%)
Falta Trifásica em Sistema Radial	0,0146	0,0028	0,0013
Falta Trifásica com Impedância de Falta Nula no Sistema Dois Geradores	0,3646	0,2963	0,0704
Falta Trifásica com Impedância de Falta Nula no Sistema 9 Barras	0,0248	0,0088	0,0009
Falta Fase - Terra com Impedância de Falta Nula Sistema 9 Barras	5,4037	3,6762	14,7502
Falta Trifásica com Impedância de Falta no Sistema Dois Geradores	0,2427	0,2349	0,2215
Falta Trifásica com Impedância de Falta no Sistema 9 Barras	0,0760	0,0871	0,0007

A análise da Tabela 4.33 nos mostra que o método LocMod – Modelo Linha Curta apresentou erro significativo apenas para faltas fase – terra, embora, mesmo para esse tipo de falta, o método tenha fornecido uma boa estimativa do local de falta. É importante citar que o método LocMod – Modelo Linha Curta foi testado apenas para linhas modeladas como linhas curtas, de modo que não há a possibilidade de estimar quais serão os erros obtidos, caso este método seja aplicado na localização de faltas em linhas longas.

Como a obtenção do local de falta no método LocMod – Modelo Linha Curta se dá através da resolução de uma equação de 2º grau, caso haja algum tipo de imprecisão na medição dos dados de entrada do algoritmo deste método, as raízes da equação de 2º grau poderão ser complexas, o que é inaceitável, já que o ponto de falta a ser fornecido por este método deve ser um valor real. Quando as raízes fornecidas pelo método LocMod – Modelo Linha Curta forem complexas, uma alternativa para a obtenção do local de falta, sem que a precisão do método seja comprometida, é considerar como impedância da linha até o ponto da falta a parte real das raízes obtidas.

A Tabela 4.34 apresenta os valores do erro médio, da mediana e da variância obtidos através do método LocMod – Modelo Linha Longa para cada tipo de falta simulada.

Tabela 4.34 – Análise dos Erros LocMod – Modelo Linha Longa

Tipo de Falta	Erro Médio (%)	Mediana (%)	Variância (%)
Falta Trifásica com Impedância de Falta Nula no Sistema Dois Geradores	2,7857	1,8000	8,2841
Falta Trifásica com Impedância de Falta Nula no Sistema 9 Barras	4,9714	5,1000	13,5878
Falta Fase - Terra com Impedância de Falta Nula Sistema 9 Barras	22,6571	9,3000	450,7624
Falta Trifásica com Impedância de Falta no Sistema Dois Geradores	8,8875	1,7500	244,0811

A análise da Tabela 4.34 nos mostra que o método LocMod – Modelo Linha Longa apresentou maior erro para faltas fase – terra, embora os erros obtidos para os outros tipos de faltas tenham sido significativos. É importante citar que para a maioria das faltas simuladas, o método LocMod – Modelo Linha Longa apresentou dois pontos candidatos a ponto de falta, e pelo menos um dos pontos de falta fornecidos por este método, em todas as faltas simuladas, estava próximos do verdadeiro local de falta. Os erros apresentados na Tabela 4.34 foram obtidos considerando como ponto de falta, o candidato a ponto de falta fornecido pelo método LocMod – Modelo Linha Longa que apresentou o maior erro.

Na ocorrência de uma falta, a linha fica dividida em dois segmentos: segmento 1, segmento compreendido entre o barramento i e o ponto de falta, e segmento 2, segmento compreendido entre o barramento j e o ponto de falta, como ilustrado na Figura 3.1. Nesta situação, a equação (3.28) é válida apenas para o segmento 1, e a equação (3.31) é válida apenas para o segmento 2, não havendo a possibilidade de prever o comportamento de ambas para os segmentos nos quais elas não são válidas. Como no método LocMod – Modelo Linha Longa é realizado o cálculo de ambas as equações em toda a extensão da linha, os gráficos com os módulos das equações (3.28) e (3.31), em algumas faltas, se interceptam duas vezes, existindo assim dois candidatos a ponto de falta.

Na prática, uma possível solução para os casos em que o método LocMod – Modelo Linha Longa fornecer dois pontos candidatos a ponto de falta, seria o envio de duas equipes de manutenção, uma para cada ponto candidato a ponto de falta fornecido por este método.

5 Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou algumas causas de ocorrência de faltas em linhas de transmissão aéreas, destacando a relação destas com a necessidade de intervenção na linha pelas equipes de manutenção, e, conseqüentemente, relacionando-as ao processo de localização de faltas.

Também foi feita a descrição das modelagens de linhas de transmissão em regime permanente encontradas na literatura, as quais são utilizadas nos métodos de localização de faltas na obtenção de seus algoritmos.

Ainda, foi realizada a avaliação da eficácia do método LocMod – Modelo Linha Curta e Modelo Linha Longa, com relação a diferentes tipos de faltas em três sistemas de transmissão de energia elétrica: Radial, Dois Geradores e 9 Barras, todos equilibrados e com modelagem trifásica.

Como conclusões deste trabalho, pode-se dizer que a precisão dos métodos de localização de faltas depende, fortemente, do modelo de linha de transmissão adotado, e, em alguns casos, os métodos podem se mostrar falhos, devendo-se buscar maneiras para contornar esta situação.

Além disso, a possibilidade que os dados de entrada dos algoritmos de localização, medidos em diferentes barramentos da linha, não estejam sincronizados, pode se constituir em vantagem para os métodos de localização de faltas, devendo ser desenvolvidos mais métodos que apresentem essa característica.

5.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, são propostos os seguintes tópicos:

- Realizar a simulação do método LocMod em mais sistemas de transmissão de energia elétrica, e em outros tipos de faltas;

- Analisar a eficiência do método LocMod – Modelo Linha Curta com relação a faltas em linhas de transmissão modeladas como linhas longas, já que este método é muito simples e apresentou grande precisão na localização de faltas em linhas curtas;
- Buscar uma maneira de identificar o verdadeiro ponto de falta, nos casos em que o método LocMod – Modelo Linha Longa fornecer dois candidatos a ponto de falta;
- Avaliar a eficácia do método LocMod na localização de faltas em linhas compensadas;
- Analisar a influência da presença de equipamentos que utilizam eletrônica de potência, no processo de localização de faltas.

Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Curiosidades.pdf>. Acesso em 11/11/2012.
- [2] Cunha, L., V., Desempenho de Linhas de transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [3] Oliveira, D., A., Faltas de Alta Impedância: Detecção e Localização de Rompimento de Condutores em Circuito Primário de Redes Aéreas de Distribuição Baseado em Desequilíbrio de Tensão, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [4] Silveira, E., G., Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [5] Grainger, J., J., Stevenson, W., D., Power System Analysis, MCGraw–Hill Book Co., 1994.
- [6] Takagi, T., Yamakoshi, Y., Baba, J., Uemura, K., Sakagushi, A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I Fourier Transform Method. IEEE Trans., PAS-100, 1981.
- [7] Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T., Developments of a New Type of Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. IEEE Trans., PAS-101, 1981.
- [8] Johns, A., T., Jamali, S., Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Line. IEEE Proceeding, vol. 137, 1990.
- [9] Zheng, C., Luo, C., Su, J., Wu, J., A Fault Location Algorithm for Transmission Line Baser on Distributed Parameter. IEEE Conference Publication, 479, 2002.
- [10] www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight. Acessado em 12/11/2012.
- [11] <http://aplicsindat.ons.org.br/sindat/>. Acesso em: 12/11/2012.

[12] Anderson, P., M., Fouad, A., A., Power System Control and Stability, the Iowa State University Press, 1977.

[13] http://m.facebook.com/note.php?note_id=298506550215730. Acesso em 12/10/2012.

Anexo I

Neste anexo, foi realizada uma breve descrição dos principais componentes das linhas de transmissão.

Os componentes das linhas de transmissão podem variar em comprimento, quantidade de condutores, estrutura de sustentação e outros parâmetros, de acordo com sua finalidade e condição de operação.

Os componentes básicos de uma linha de transmissão são condutores, isoladores, estrutura de suporte e cabos para-raios.

Os materiais mais utilizados para condutores em linhas de transmissão são cobre e alumínio, e suas características mais relevantes são alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação. Em geral, os condutores de cobre apresentam maior condutividade elétrica que os condutores de alumínio, porém, como o alumínio possui peso específico muito menor que o cobre, os condutores de alumínio são mais leves que os condutores de cobre, o que permite a construção de linhas de transmissão com estrutura de menor porte, mais baratas, e faz com que os condutores de alumínio sejam preferíveis aos condutores de cobre.

Os materiais mais utilizados para isoladores são porcelana vitrificada, vidro temperado e polímeros em borracha de Etileno Propileno Dieno Monomérico ou Silicone. Em geral os isoladores poliméricos são mais leves que os isoladores de porcelana e de vidro, porém, devido a sua recente utilização, ainda não existem informações suficientes para garantir o estado do isolamento destes isoladores após vários anos de utilização dos mesmos. Os tipos mais comuns de isoladores são isoladores de pino, isoladores de disco, isoladores de suspensão e isoladores tipo pilar.

As dimensões e formas das estruturas das linhas de transmissão dependem da disposição dos condutores (triangular, horizontal e vertical), distância entre os condutores, dimensão e forma do isolamento, número de circuitos, materiais estruturais (aço revestido com zinco, concreto armado, madeira e fibra de vidro), relevo do local da instalação e ventos suportados pela estrutura.

As principais classificações das torres de transmissão são: torre do tipo ancoragem ou torre do tipo suspensão, torre de circuito simples ou torre de circuito duplo, e torre autoportante ou torre estaiada.

Torres do tipo ancoragem exercem a função de ancoragem dos condutores, enquanto que as torres de suspensão apenas exercem função de sustentação dos mesmos.

Torres de circuito simples são torres que suportam apenas um conjunto de fases, enquanto que torres de circuito duplo são torres que suportam dois grupos de fases.

As torres autoportantes são torres sustentadas pela própria estrutura, enquanto as torres estaiadas são torres sustentadas por cabos tensionados no chão.

A Figura AI.1 foi extraída da referência [13], e apresenta a foto de uma linha de transmissão cuja torre pode ser classificada como: torre de suspensão, circuito simples e autoportante.



Figura AI.1 – Torre de Transmissão

Anexo II

Este anexo apresenta o detalhamento matemático dos métodos de localização de faltas citados no Capítulo 3.

Detalhamento da Obtenção do Algoritmo de Localização de Faltas do Método da Referência [6]

A figura AII.1 apresenta o circuito equivalente por fase de uma linha de transmissão sob falta, no qual \dot{V}_i , \dot{V}_j e \dot{V}_f são as tensões no barramento i, no barramento j e no ponto de falta, respectivamente, \dot{I}_i , \dot{I}_j e \dot{I}_f são as correntes no barramento i, no barramento j e no ponto de falta, respectivamente, e \dot{I}_{if} e \dot{I}_{jf} são as contribuições de corrente do barramento i e do barramento j para o ponto de falta, respectivamente.

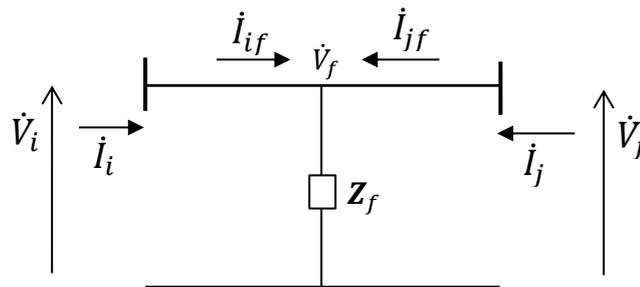


Figura AII.1 – Circuito Equivalente Sob Falta

No circuito da figura AII.1, a tensão no ponto de falta pode ser calculada como:

$$\dot{V}_f = R_f \dot{I}_f \quad (\text{AII.1})$$

Em que:

$$\dot{I}_f = \dot{I}_{if} + \dot{I}_{jf} \quad (\text{AII.2})$$

Substituindo (AII.2) em (AII.1), obtemos:

$$\dot{V}_f = R_f (\dot{I}_{if} + \dot{I}_{jf}) \quad (\text{AII.3})$$

Definindo $k_t(x)$ como:

$$k_t(x) = \frac{\dot{I}_{jf}}{\dot{I}_{if}} \quad (\text{AII.4})$$

E, substituindo (AII.4) em (AII.3), obtemos:

$$\dot{V}_f = R_f \dot{I}_{if} (1 + k_t) \quad (\text{AII.5})$$

Considerando a extensão de linha do barramento i até o ponto de ocorrência de falta, podemos expressar as tensões \dot{V}_f e \dot{V}_i , e as correntes \dot{I}_{if} e \dot{I}_i através do quadripolo de linhas de transmissão, como mostrado em (AII.6).

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{V}_f \\ \dot{I}_{if} \end{pmatrix} \quad (\text{AII.6})$$

A partir de (AII.6) é possível calcular os valores de \dot{V}_f e \dot{I}_{if} como função apenas de \dot{V}_i e \dot{I}_i , como mostrado em (AII.7) e (AII.8).

$$\dot{V}_f = A\dot{V}_i - B\dot{I}_i \quad (\text{AII.7})$$

$$\dot{I}_{if} = C\dot{V}_i - D\dot{I}_i \quad (\text{AII.8})$$

As grandezas A , B , C e D são obtidas através dos parâmetros da linha, e dependem do ponto de ocorrência de falta e do modelo adotado para a linha de transmissão, como mostrado no capítulo 2.

Substituindo (AII.7) e (AII.8) em (AII.5), obtemos:

$$A\dot{V}_i - B\dot{I}_i = R_f (C\dot{V}_i - D\dot{I}_i) (1 + k_t(x)) \quad (\text{AII.9})$$

Rearranjando os termos de (AII.9) chegamos a (AII.10).

$$R_f (1 + k_t(x)) = \frac{A\dot{V}_i - B\dot{I}_i}{(C\dot{V}_i - D\dot{I}_i)} \quad (\text{AII.10})$$

Linhas de transmissão, geralmente, apresentam reatância muito maior que resistência ($\frac{x}{r} \gg 1$), e considerando que as impedâncias das fontes nos terminais da linha são puramente indutivas, podemos considerar que a relação $k_t(x)$ é uma variável real. E, como as impedâncias de falta são puramente resistivas, o lado esquerdo de (AII.10) pode ser considerado como um valor real, de modo que o termo imaginário do lado direito de (AII.10) pode ser considerado nulo, resultando em (AII.11).

$$\text{Im} \left\{ \frac{A\dot{V}_i - B\dot{I}_i}{(C\dot{V}_i - D\dot{I}_i)} \right\} = 0 \quad (\text{AII.11})$$

Detalhamento da Obtenção do Algoritmo de Localização de Falhas do Método da Referência [7]

Através da análise da figura AII.1 podemos concluir que:

$$V_f = R_f \dot{I}_f \quad (\text{AII.12})$$

Considerando (2.31) e (2.32), e que o terminal i figura AII.1 está localizado na origem do sistema da figura 2.3, ou seja, \dot{V}_i e \dot{I}_i da figura AII.1 são iguais a \dot{V}_R e $-\dot{I}_R$ da figura 2.3, a tensão e a corrente no ponto de falta pode ser calculada como:

$$\dot{V}_f(X) = \dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i Z_c \sinh(\gamma X) \quad (\text{AII.13})$$

$$\dot{I}_{if}(X) = \frac{\dot{V}_i}{Z_c} \sinh(\gamma X) - \dot{I}_i \cosh(\gamma X) \quad (\text{AII.14})$$

Através de (AII.2), a corrente de falta pode ser expressa como:

$$\dot{I}_f = \dot{I}_{if} \left(1 + \frac{\dot{I}_{jf}}{\dot{I}_{if}} \right) = \dot{I}_{if} \tau e^{j\theta} \quad (\text{AII.15})$$

Em que:

τ : é o módulo da relação $1 + \frac{\dot{I}_{jf}}{\dot{I}_{if}}$,

θ : é a fase da relação $1 + \frac{\dot{I}_{jf}}{\dot{I}_{if}}$.

Através de (AII.15), obtemos:

$$\dot{I}_{if} = \frac{\dot{I}_f}{\tau e^{j\theta}} \quad (\text{AII.16})$$

Substituindo (AII.16) em (AII.14), e multiplicando os membros da equação resultante por R_f , obtemos:

$$\frac{\dot{V}_f}{\tau e^{j\theta} R_f} = \frac{\dot{V}_i}{Z_c} \sinh(\gamma X) - \dot{I}_i \cosh(\gamma X) \quad (\text{AII.17})$$

Substituindo (AII.13) em (AII.17), obtemos:

$$\frac{\dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i Z_c \sinh(\gamma X)}{\tau e^{j\theta} R_f} = \frac{\dot{V}_i}{Z_c} \sinh(\gamma X) - \dot{I}_i \cosh(\gamma X) \quad (\text{AII.18})$$

Dividindo ambos os membros de (AII.18) por $\cosh(\gamma X)$ e rearranjando os termos da equação resultante, obtemos:

$$\dot{V}_i - \dot{I}_i Z_C \tanh(\gamma X) = \left(\frac{\dot{V}_i}{Z_C} \tanh(\gamma X) - \dot{I}_i \right) \tau e^{j\theta} R_f \quad (\text{AII.19})$$

Multiplicando ambos os membros de (AII.19) pelo conjugado do termo do lado direito da mesma, obtemos:

$$\text{Im} \left[\left(\dot{V}_i - \dot{I}_i Z_C \tanh(\gamma X) \right) \left(\frac{\dot{V}_i}{Z_C} \tanh(\gamma X) - \dot{I}_i \right)^* \tau e^{-j\theta} R_f \right] = 0 \quad (\text{AII.20})$$

Fazendo as seguintes aproximações em (AII.20), obtemos (AII.24):

$$\theta \cong 0 \quad (\text{AII.21})$$

$$\tanh(\gamma X) \cong \gamma X \quad (\text{AII.22})$$

$$\frac{\dot{V}_i}{Z_C} \tanh(\gamma X) \ll \dot{I}_i \quad (\text{AII.23})$$

$$x = \frac{\text{Im}(\dot{V}_i \dot{I}_i)}{Z_C \gamma (\dot{I}_i \dot{I}_i^*)} \quad (\text{AII.24})$$

A solução de (AII.24) fornecerá o ponto de ocorrência de falta.

Detalhamento da Obtenção do Algoritmo de Localização de Faltas do Método da Referência [8]

Considerando (2.31), e que o terminal i da figura AII.1 está localizado na origem do sistema da figura 2.3, ou seja, \dot{V}_i e \dot{I}_i da figura AII.1 são iguais a \dot{V}_R e $-\dot{I}_R$ da figura 2.3, chegamos a seguinte equação:

$$\dot{V}_f = \dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i Z_C \sinh(\gamma X) \quad (\text{AIII.25})$$

Considerando agora, que o terminal j da figura AII.1 está localizado na origem do sistema da figura 2.3, ou seja, \dot{V}_j e \dot{I}_j da figura AII.1 são iguais a \dot{V}_R e $-\dot{I}_R$ da figura 2.3, e que a origem do sistema de coordenadas está no barramento i, chegamos a (AII.26).

$$\dot{V}_f = \dot{V}_j \cosh(\gamma(l - X)) - \dot{I}_j Z_C \sinh(\gamma(l - X)) \quad (\text{AII.26})$$

Em (AII.26), Z_C e γ são a impedância característica da linha e a constante de propagação da linha, respectivamente.

Igualando (AII.25) e (AII.26), e rearranjando os termos da equação resultante, o ponto de ocorrência de falta pode ser obtido através da equação (AII.27).

$$X = \left(\tanh^{-1} \left(\frac{-B}{A} \right) \right) / \gamma \quad (\text{AII.27})$$

Em que:

$$A = Z_C \cosh(\gamma l) \dot{I}_j - \sinh(\gamma l) \dot{V}_j + Z_C \dot{I}_i \quad (\text{AII.28})$$

$$B = \cosh(\gamma l) \dot{V}_j - Z_C \sinh(\gamma l) \dot{I}_j - \dot{V}_i \quad (\text{AII.29})$$

Detalhamento da Obtenção do Algoritmo de Localização de Falhas do Método da Referência [9]

Igualando (AII.25) e (AII.26), obtemos (AII.30).

$$\dot{V}_i \cosh(\gamma X) - \dot{I}_i Z_C \sinh(\gamma X) = \dot{V}_j \cosh(\gamma(l - X)) - \dot{I}_j Z_C \sinh(\gamma(l - X)) \quad (\text{AII.30})$$

Rearranjando os termos de (AII.30), o ponto de ocorrência de falta pode ser obtido através de (AII.31).

$$x = \frac{1}{2\alpha} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) \quad (\text{AII.31})$$

Em que:

$$A + jB = \frac{(e^{\gamma l} \dot{V}_j - \dot{I}_j Z_C) - \dot{V}_i - \dot{I}_i Z_C}{\dot{V}_i - \dot{I}_i Z_C - e^{\gamma l} (\dot{V}_j + \dot{I}_j Z_C)} \quad (\text{AII.32})$$

Anexo III

Este anexo apresenta os códigos utilizados em cada simulação realizada no Capítulo 4.

Código utilizado para o Cálculo do ponto de Falta LocMod – Modelo Linha Curta

```
r= %resistência total da linha;
x= %reatância total da linha;
Z= sqrt(r^2+x^2);
Vb= tensão de base da linha simulada;
Snom= 100*10^6;
Vipu= %valor de tensão medido no barramento i em pu;
Vjpu= %valor de tensão medido no barramento j em pu;
Iipu= %valor de corrente medido no barramento i em pu;
Ijpu= %valor de corrente medido no barramento j em pu;
Oi= %fase da tensão no barramento i em radiano;
Oj= fase da tensão no barramento j em radiano;
O1= fase da corrente no barramento i mais o ângulo da impedância da linha
em radiano;
O2= fase da corrente no barramento j mais o ângulo da impedância da linha
em radiano;

Vi= Vipu*Vb/sqrt(3);
Vj= Vjpu*Vb/sqrt(3);
Ii= Iipu*Snom/(sqrt(3)*Vb);
Ij= Ijpu*Snom/(sqrt(3)*Vb);
Zt= Z*(Vb^2/Snom);
A= Ii^2 - Ij^2;
B= -2*Vi*Ii*cos(Oi-O1) -2*Vj*Ij*cos(Oj-O2) +2*Ij^2*Zt;
C= Vi^2 - Vj^2 +2*Vj*Ij*Zt*cos(Oj-O2) -Ij^2*Zt^2;

Delta= B^2 -4*A*C;
Z1= (-B +sqrt(Delta))/(2*A)
Z2= (-B -sqrt(Delta))/(2*A)
```

Código utilizado para o Cálculo do ponto de Falta LocMod – Modelo Linha Longa

```
VB= % tensão de base da linha;
SBase= 100*10^6;
ZB= VB^2/SBase;
Mvar= % valor da admitância shunt total da linha em Mvar;
r= % resistência total da linha;
x= % reatância total da linha;
Z= (complex(r,x))*ZB;
absY= (VB^2/Mvar)^-1;
Y= complex(0,absY);
Zc=sqrt(Z/Y);
gl=sqrt(Z*Y);
Zequivalente= Zc*sinh(gl);
Yequivalente=(2/Zc)*tanh(gl/2);

Zpu_percent= Zequivalente/ZB*100
Bequivalente(Mvar)= VB^2*abs(Yequivalente)

Vipu= %valor de tensão medido no barramento i em pu;
Vjpu= %valor de tensão medido no barramento j em pu;
Iipu= %valor de corrente medido no barramento i em pu;
Ijpu= %valor de corrente medido no barramento j em pu;
Oi= %fase da tensão no barramento i em radiano;
Oj= fase da tensão no barramento j em radiano;
O1= fase da corrente no barramento i em radiano;
O2= fase da corrente no barramento j em radiano;

Vi= Vipu*(complex(0,Oi));
Vj= Vjpu*exp(complex(0,Oj));
Ii= Iipu*exp(complex(0,O1));
Ij= Ijpu*exp(complex(0,O2));

Zcpu=Zc/ZB;

x=0;
i=0;
passo=0.001;
```

```
limite=(1/passos);

while(i<limite)

    i=i+1;
    x=x+passos;
    A(i)= abs((Vi*cosh(gl*x))-(Ii*Zcpu*sinh(gl*x)));
    B(i)= abs((Vj*cosh(gl*(1-x)))-(Ij*Zcpu*sinh(gl*(1-x))));
    G(i)=abs(A(i)-B(i));
    Local(i)=x*100;

end

plot(Local,G);
find(G==min(G));

LocaldeFalta= Local(ans);
```

Anexo IV

Este anexo apresenta os gráficos com os valores da Função $G(x)$ obtidos em cada simulação do método LocMod – Linha Longa.

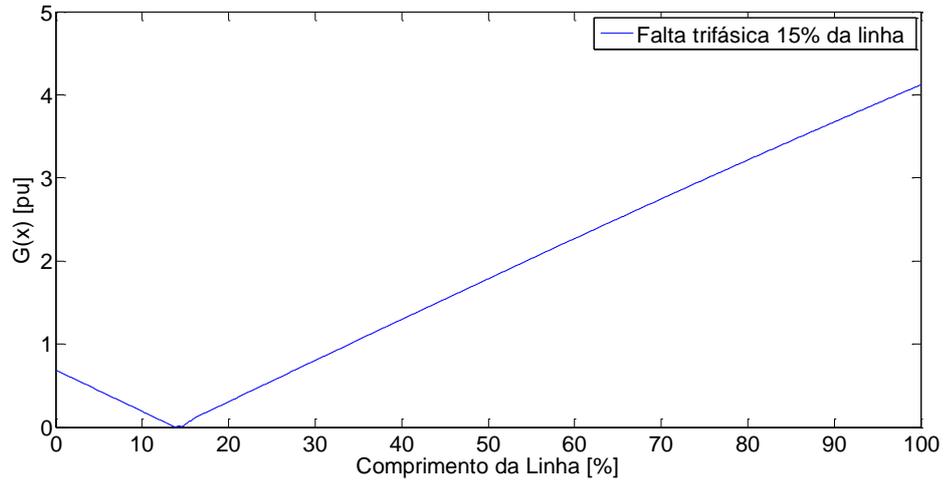


Figura AIV.1 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 15% da Linha Sistema Dois Geradores

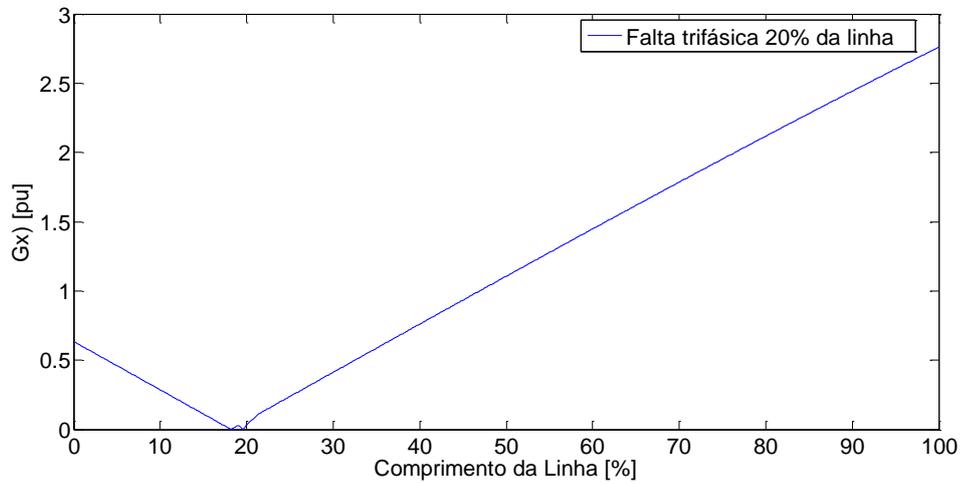


Figura AIV.2 – Gráfico Valores da Função $G(x)$ Falta 20% da Linha Sistema Dois Geradores

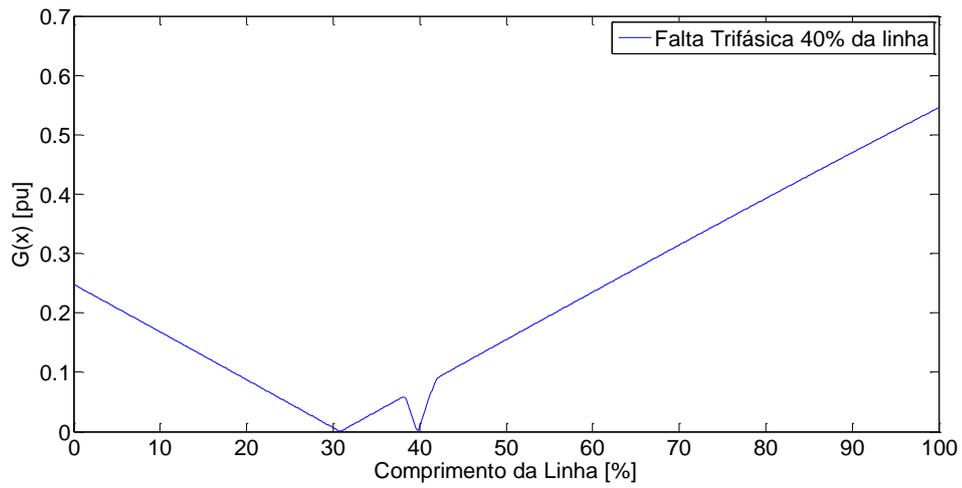


Figura AIV.3 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 40% da Linha Sistema Dois Geradores

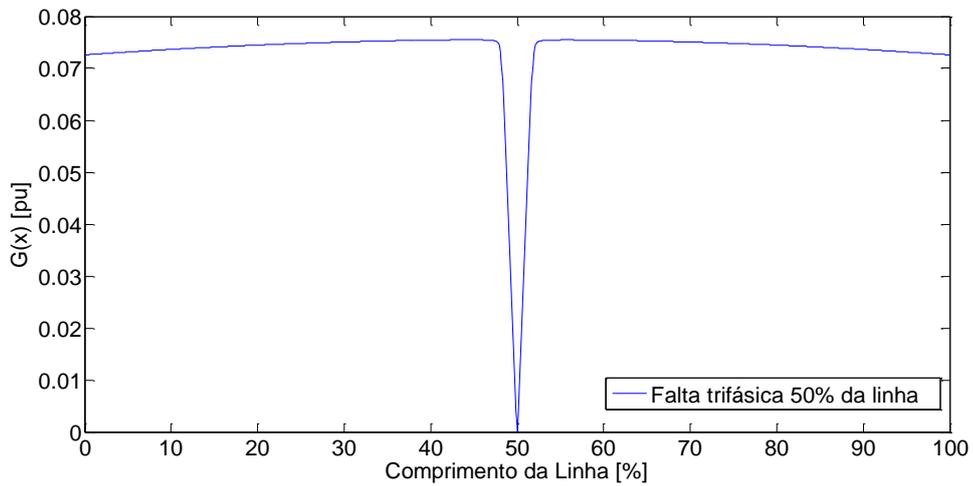


Figura AIV.4 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 50% da Linha Sistema Dois Geradores

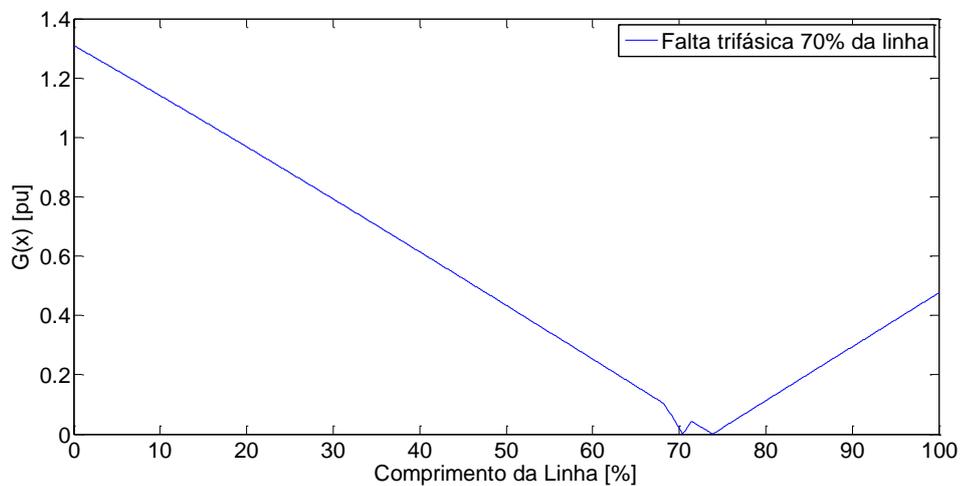


Figura AIV.5 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 70% da Linha Sistema Dois Geradores

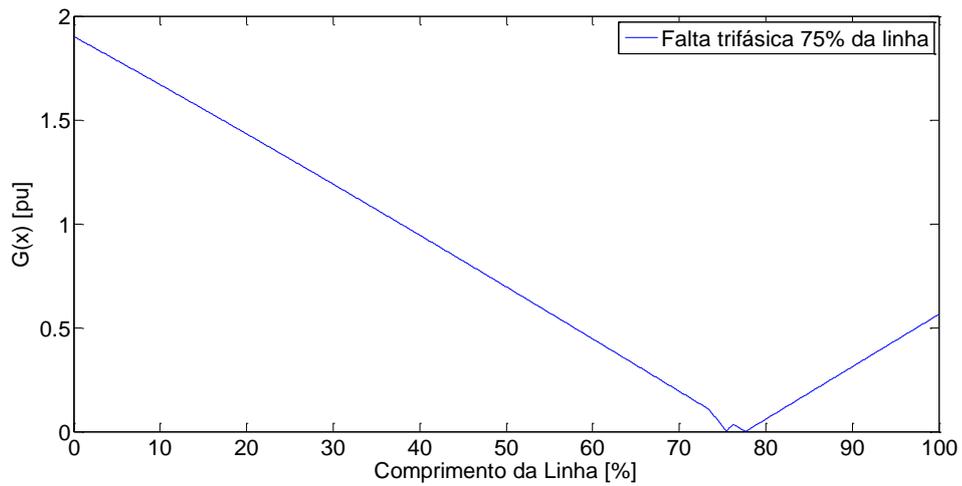


Figura AIV.6 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 75% da Linha Sistema Dois Geradores

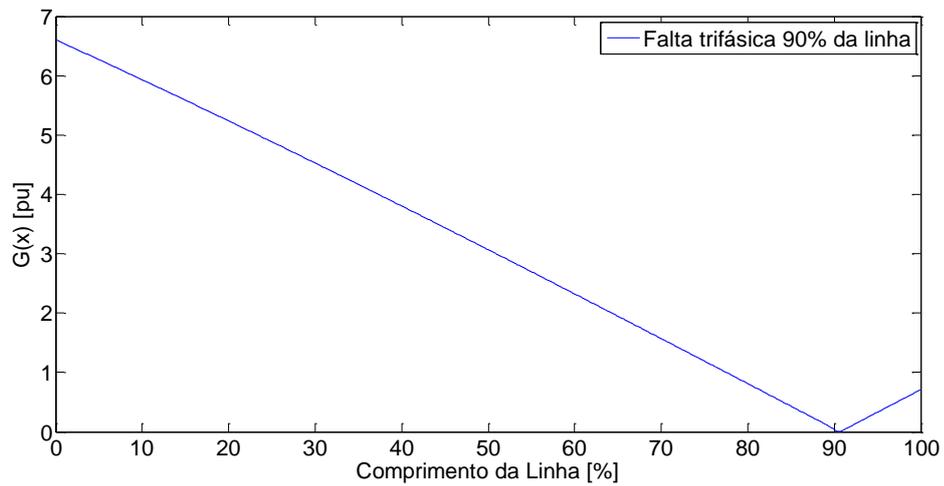


Figura AIV.7 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 90% da Linha Sistema Dois Geradores

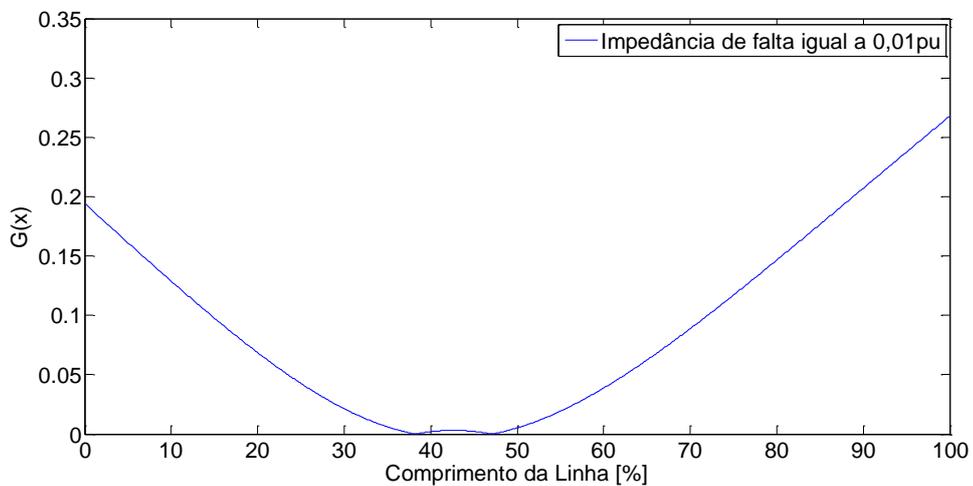


Figura AIV.8 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,01pu Sistema Dois Geradores

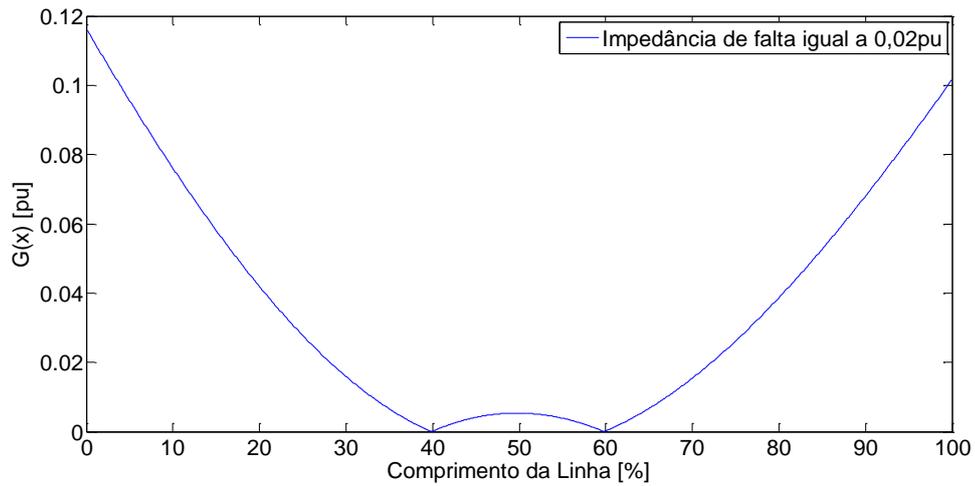


Figura AIV.9 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,02pu Sistema Dois Geradores

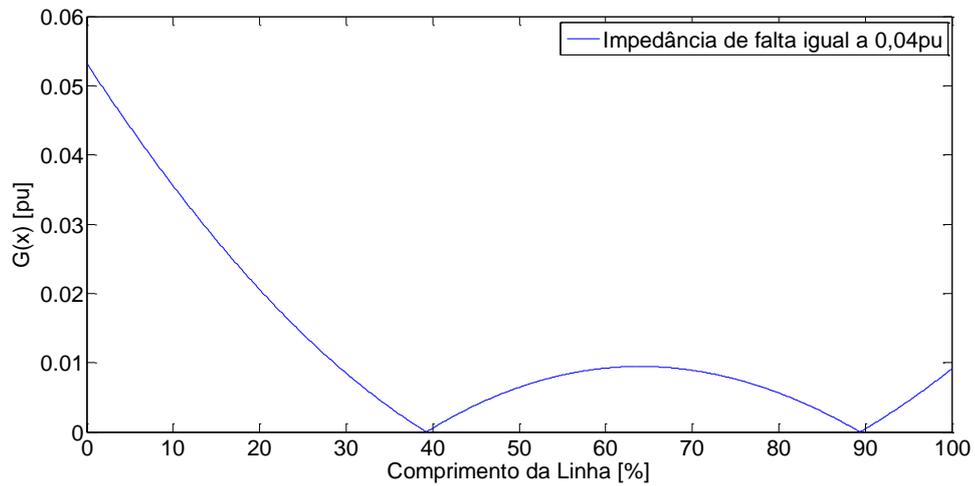


Figura AIV.10 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,04pu Sistema Dois Geradores

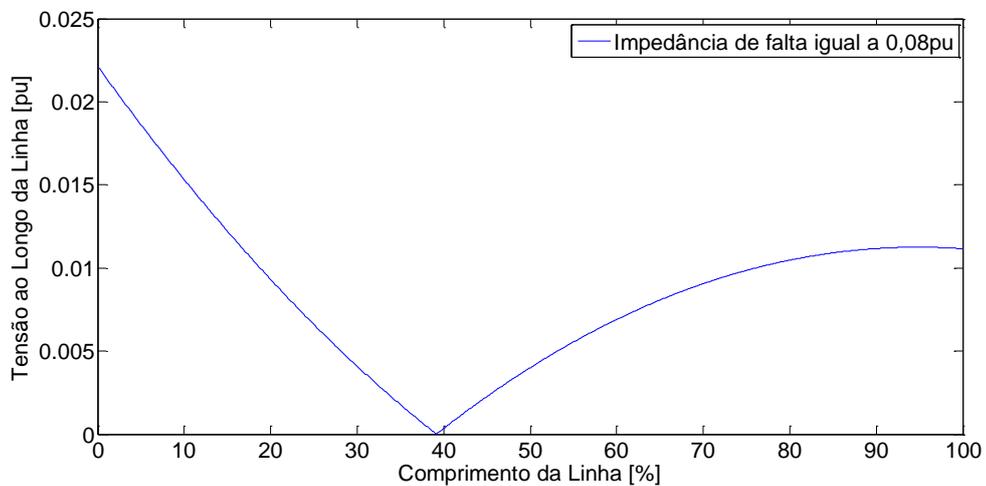


Figura AIV.11 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,08pu Sistema Dois Geradores

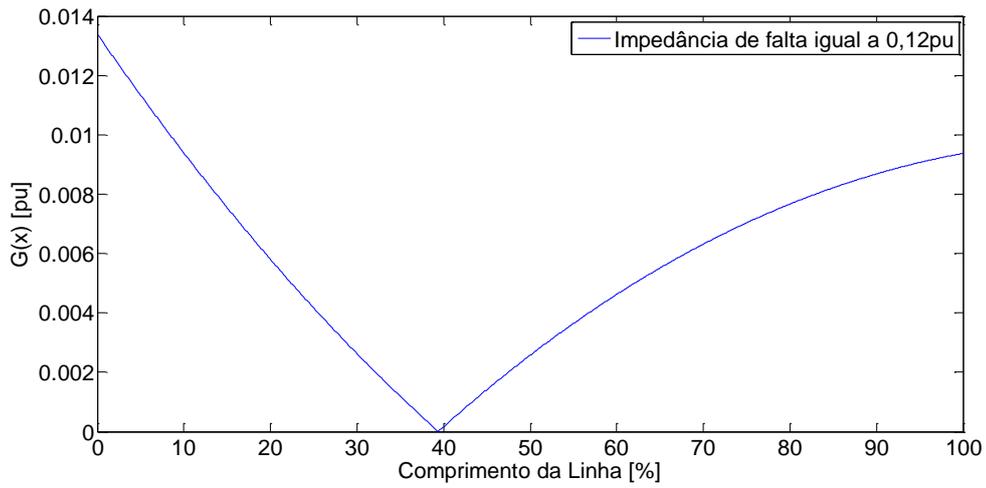


Figura AIV.12 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,12pu Sistema Dois Geradores

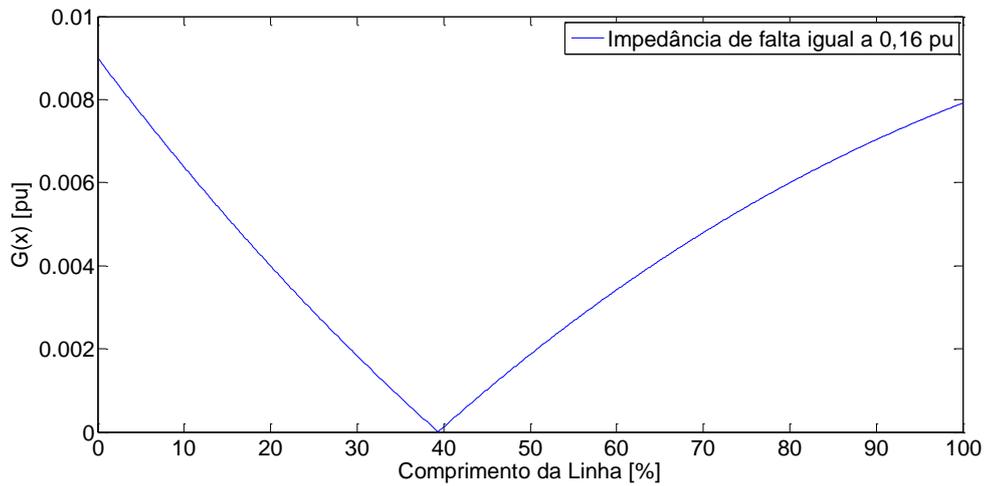


Figura AIV.13 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,16pu Sistema Dois Geradores

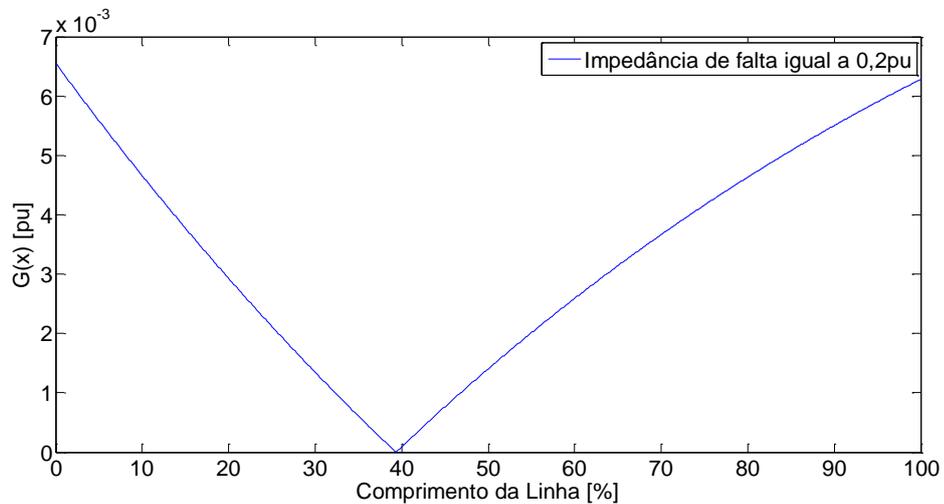


Figura AIV.14 – Gráfico G(x) Falta Trifásica Impedância de Falta 0,2pu Sistema Dois Geradores

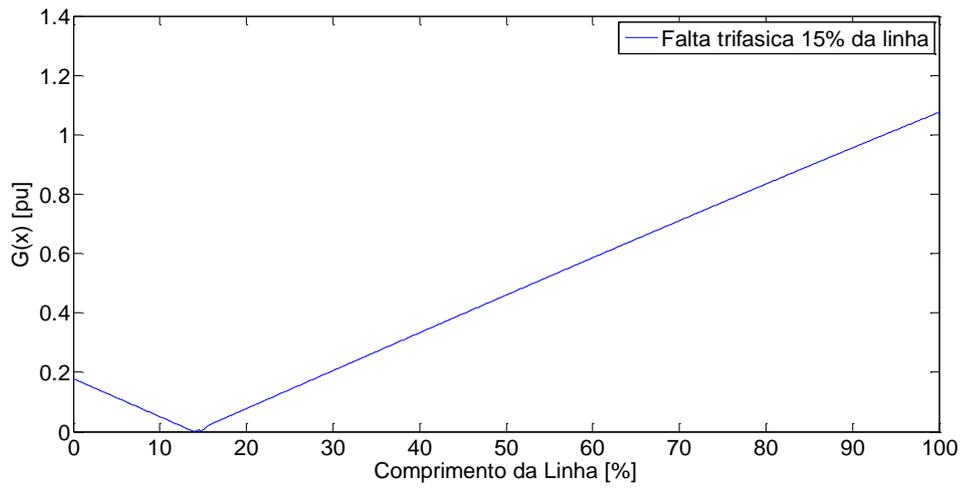


Figura AIV.15 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 15% da Linha Sistema 9

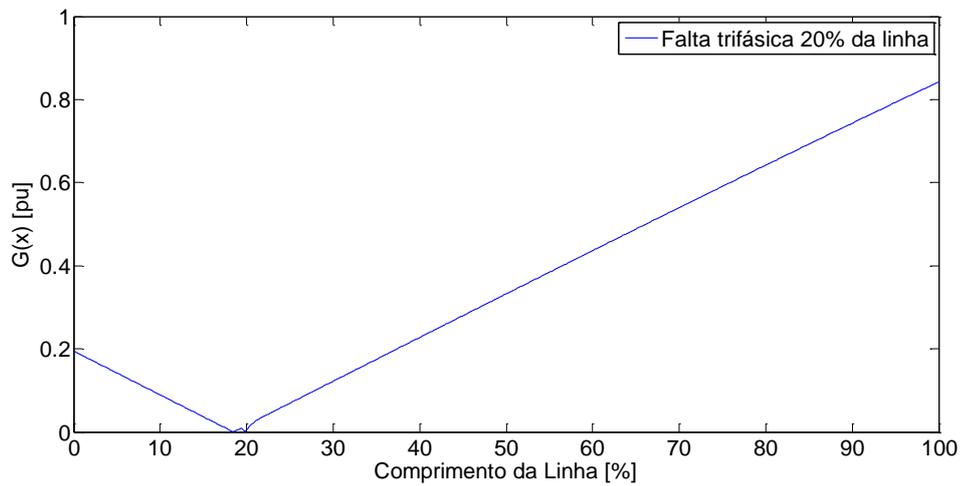


Figura AIV.16 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 20% da Linha Sistema 9 Barras

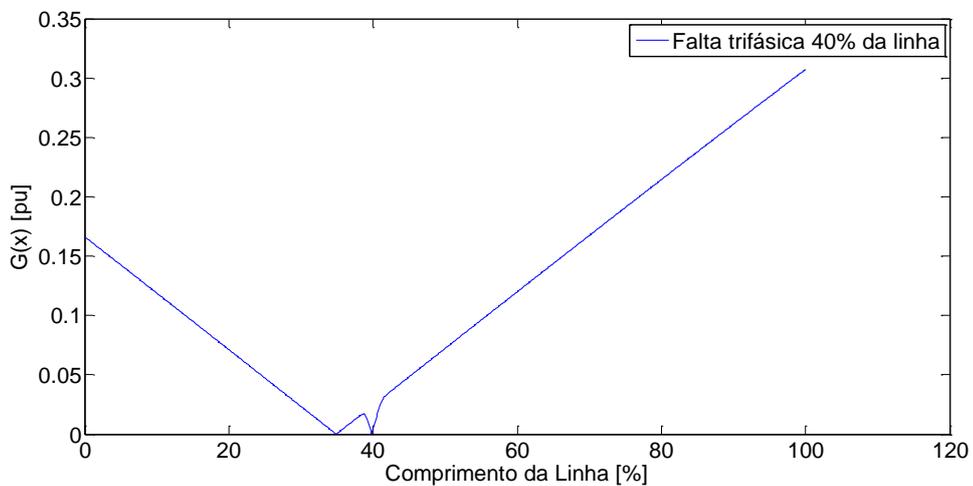


Figura AIV.17 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 40% da Linha Sistema 9 Barras

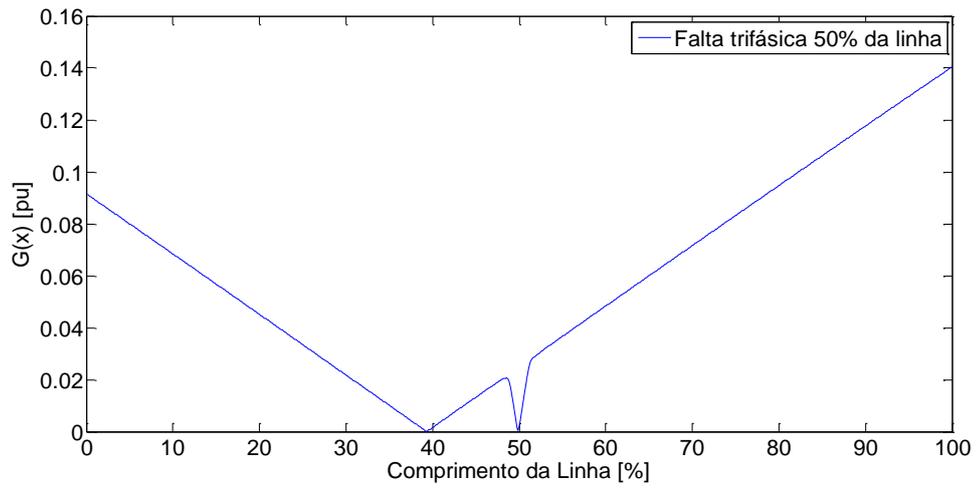


Figura AIV.18 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 50% da Linha Sistema 9 Barras

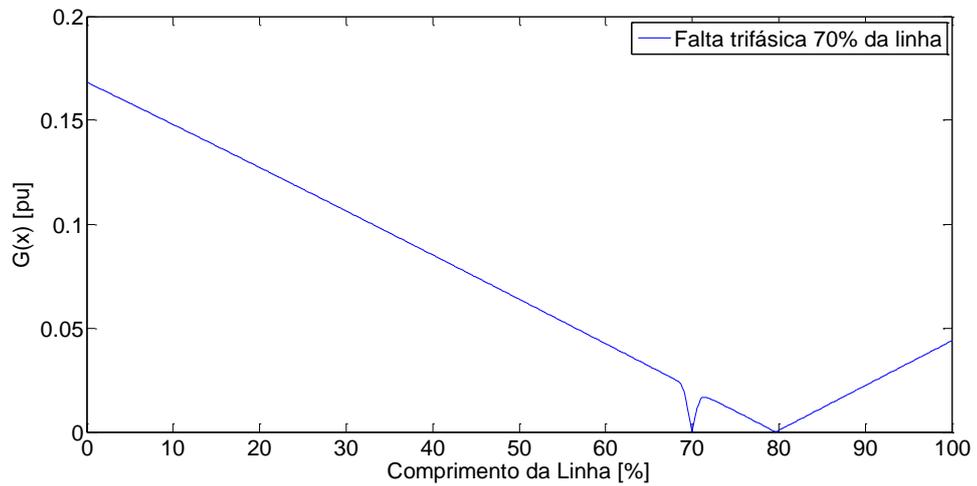


Figura AIV.19 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 70% da Linha Sistema 9 Barras

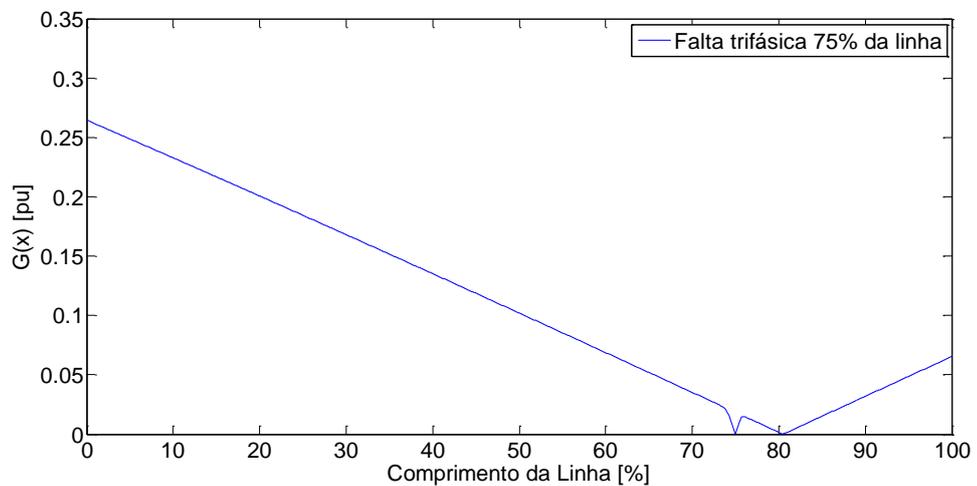


Figura AIV.20 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 75% da Linha Sistema 9 Barras

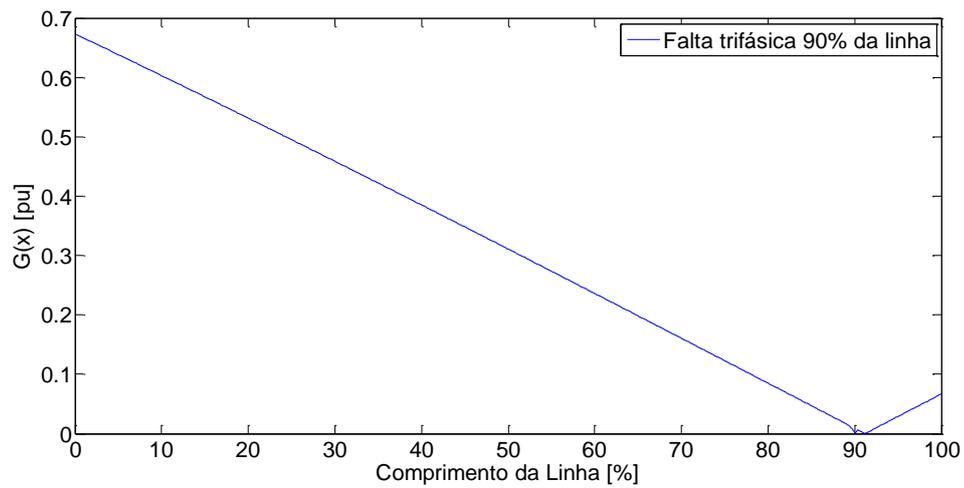


Figura AIV.21 – Gráfico Valores da Função G(x) Falta 90% da Linha Sistema 9

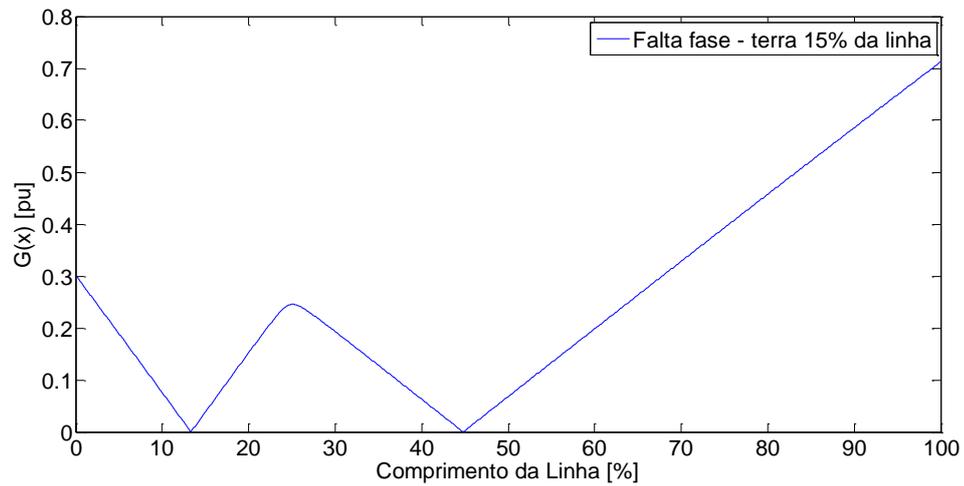


Figura AIV.22 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 15% da Linha Sistema 9 Barras

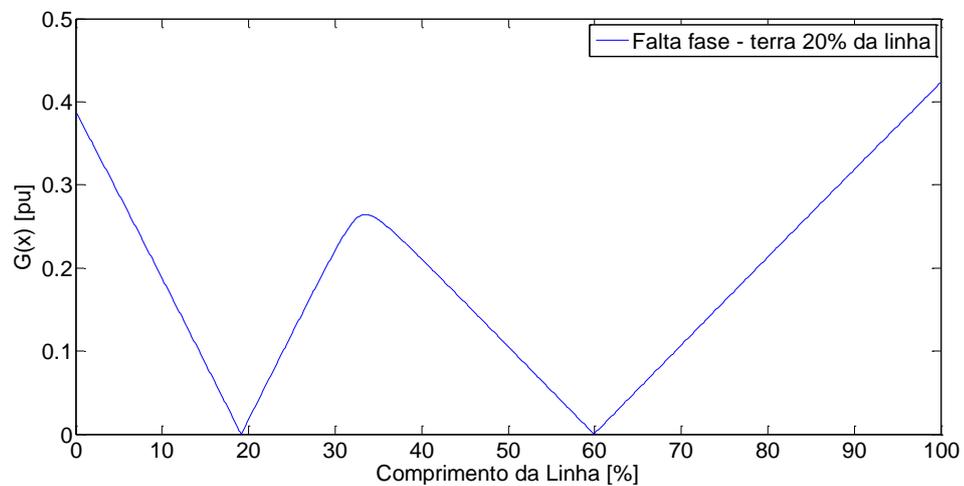


Figura AIV.23 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 20% da Linha Sistema 9 Barras

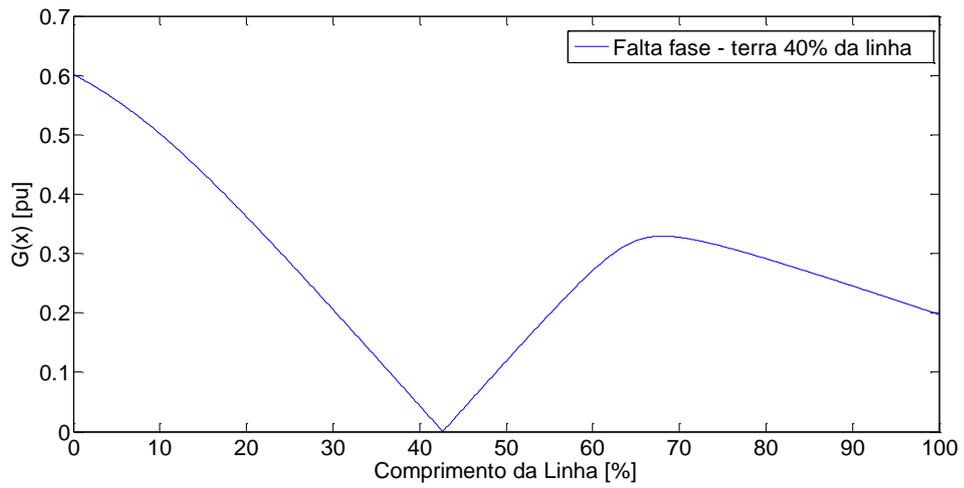


Figura AIV.24 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 40% da Linha Sistema 9

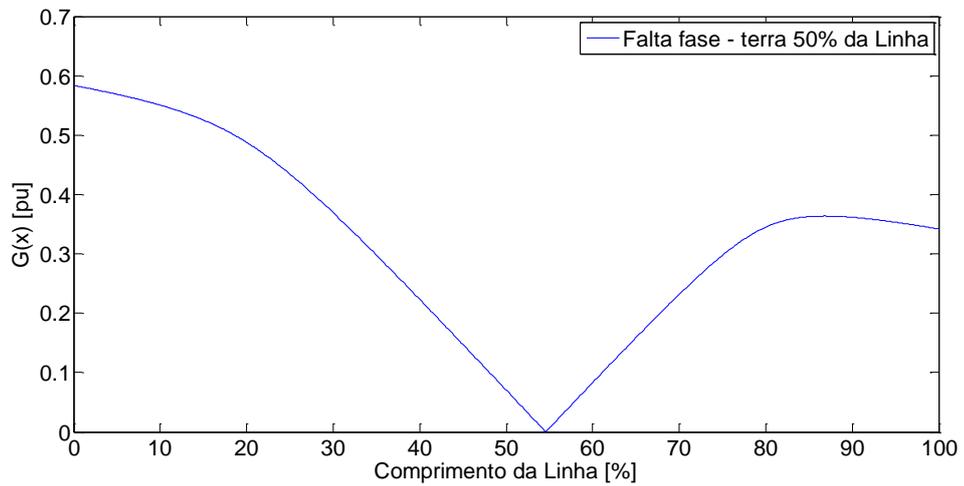


Figura AIV.25 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 50% da Linha Sistema 9 Barras

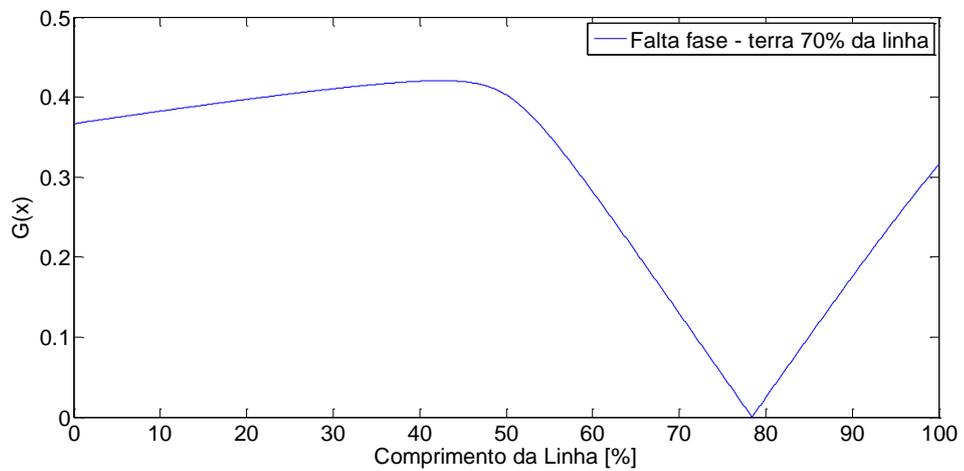


Figura AIV.26 – Gráfico G(x) Falta Fase – Terra 70% da Linha Sistema 9 Barras

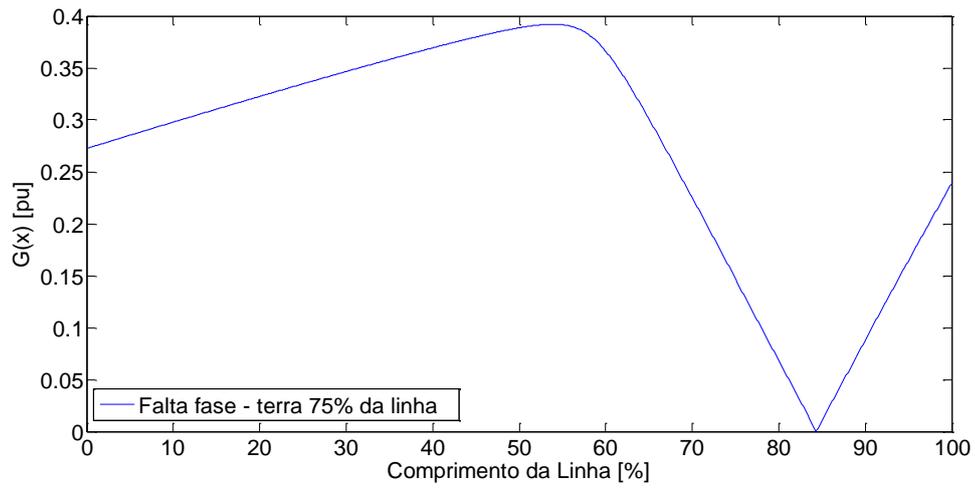


Figura AIV.27 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 75% da Linha Sistema 9 Barras

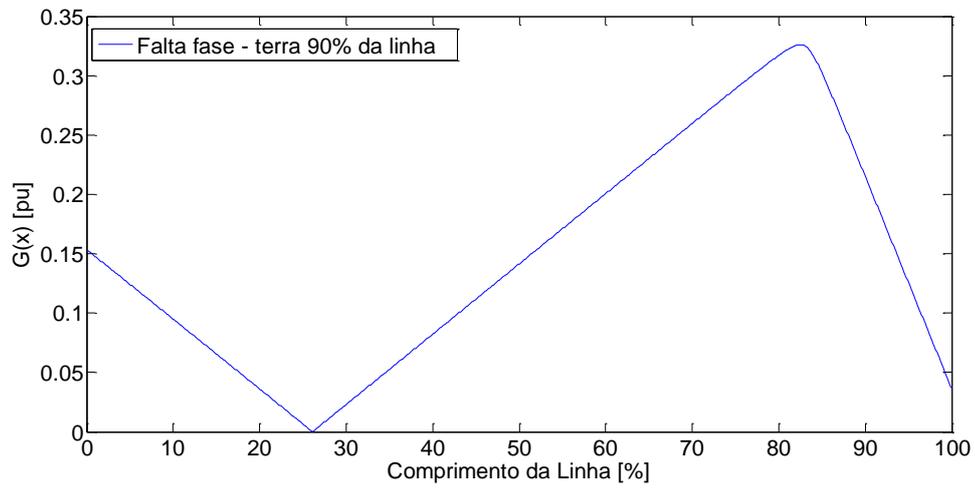


Figura AIV.28 – Gráfico $G(x)$ Falta Fase – Terra 90% da Linha Sistema 9 Barras