

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

RICARDO DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de engenheiro eletricista
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ricardo de Castro

Avaliação de métodos de localização de faltas em linhas de transmissão

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 10/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Me(a). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco e Neuza, e aos meus irmãos e amigos, Fernanda e Gabriel.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Gráficos

Lista de Siglas e Abreviaturas

Listas de Símbolos

Resumo

Abstract

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL	13
1.1.1. Sistema de Geração	15
1.1.2. Sistema de Transmissão	16
1.1.3. Sistema de Distribuição	17
1.2. PROBLEMA	18
1.3. JUSTIFICATIVA	20
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1. Objetivo Geral	21
1.4.2. Objetivos Específicos	22
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
2.1. FALTAS EM SEPs	23
2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE LDF	24
2.2.1. Ondas viajantes	25
2.2.2. Componentes de frequência fundamental	25
3. METODOLOGIA	33
3.1. SIMULAÇÃO DA FALTA	33
3.1.1. Modelagem da linha de transmissão	33
3.1.2. Conversão e exportação dos dados	35

3.2.	LOCALIZAÇÃO DA FALTA VIA MATLAB®	35
3.2.1.	Obtenção da componente fundamental dos sinais	36
3.2.2.	Implementação dos algoritmos propostos	36
3.3.	ESTRUTURA DA ANÁLISE	37
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1.	CONSIDERANDO FALTAS A 10 km DO PRIMEIRO TERMINAL	39
4.1.1.	Influência da distância da falta	39
4.1.2.	Influência do tipo de falta.....	41
4.1.3.	Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha.....	43
4.1.4.	Influência da resistência de falta	46
4.2.	CONSIDERANDO FALTAS A 150 km DO PRIMEIRO TERMINAL	48
4.2.1.	Influência do tipo de falta.....	48
4.2.2.	Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha.....	50
4.2.3.	Influência da resistência de falta	52
4.3.	RESUMO DOS RESULTADOS.....	54
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5.1.	PRECISÃO	56
5.2.	ROBUSTEZ	56
5.3.	CONCLUSÕES E RESSALVAS	57
5.4.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58

Lista de Figuras

Figura 1- Ilustração do sistema elétrico de potência (SEP).....	15
Figura 2- Matriz energética brasileira no ano de 2012.....	16
Figura 3- Trecho de uma linha de transmissão.....	17
Figura 4- Linha de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN).....	19
Figura 5- Distribuição de faltas em um sistema de 500 kV, para um período de dez anos, com a ocorrência de 99 faltas.....	19
Figura 6- Situações de falta sobre o sistema.....	24
Figura 7- Classificação das metodologias de LDF.....	25
Figura 8- Circuito π equivalente para LT longas.....	26
Figura 9- Linha com dois terminais.....	28
Figura 10 - Silhueta de torre da linha de 440 kV.....	34
Figura 11- Transposição de uma linha de transmissão.....	34
Figura 12- Representação de um comprimento Δx de uma linha de transmissão por parâmetros distribuídos.....	35

Lista de Tabelas

Tabela 1- Relação entre o consumo de energia elétrica e o PIB no Brasil de 2012 a 2022..	13
Tabela 2- Custo médio por kWh de uma interrupção para diferentes grupos de consumidores no Estado de São Paulo no ano de 2000.	21
Tabela 3- Parâmetros distribuídos da linha de transmissão de 440 kV.	35
Tabela 4- Influência da distância da falta.	40
Tabela 5- Análise estatística da influência da distância da falta.	41
Tabela 6- Influência do tipo de falta (10 km).	42
Tabela 7- Análise estatística da influência do tipo de falta (10 km).	42
Tabela 8- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).	44
Tabela 9- Análise estatística da influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).	45
Tabela 10- Influência da resistência de falta (10 km).	46
Tabela 11- Análise estatística da influência da resistência de falta (10 km).	47
Tabela 12- Influência do tipo de falta (150 km).	49
Tabela 13- Análise estatística da influência do tipo de falta (150 km).	50
Tabela 14- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).	51
Tabela 15- Análise estatística da influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).	52
Tabela 16- Influência da resistência de falta (150 km).	53
Tabela 17- Análise estatística da influência da resistência de falta (150 km).	54
Tabela 18- Análise comparativa quanto à precisão dos algoritmos.	54
Tabela 19- Análise comparativa quanto à robustez dos algoritmos.	55

Lista de Gráficos

Gráfico 1- Taxas médias de crescimento anual no Brasil, por período (%).....	14
Gráfico 2- Influência da distância da falta.....	40
Gráfico 3- Influência do tipo da falta (10 km).	42
Gráfico 4- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).	44
Gráfico 5- Influência da resistência de falta (10 km).....	47
Gráfico 6- Influência do tipo da falta (150 km).....	49
Gráfico 7- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).	51
Gráfico 8- Influência da resistência de falta (150 km).	53

Lista de Siglas e Abreviaturas

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PIB	Produto Interno Bruto
SEP	Sistema Elétrico de Potência
LDF	Localizadores De Falta
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
LT	Linha de Transmissão
OV	Ondas Viajantes
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
F-T	Fase-Terra e
F-F	Fase-Fase
F-F-T	Fase-Fase-Terra
F-F-F	Fase-Fase-Fase

Lista de Símbolos

V_F	Tensão pós-falta no ponto de falta
Z_0	Impedância característica da linha
Z_1, Y_1	Impedância e admitância shunt característica de sequência positiva da linha
γ	Constante de propagação da linha
L	Comprimento total da linha
D	Distância do local da falta até o terminal S
V_S, V_R	Fasores fundamentais de tensão pós-falta nos terminais S e R
I_S, I_R	Fasores fundamentais de corrente pós-falta nos terminais S e R
Z_{abc}	Impedância trifásica série da linha por km
V_{Fabc}	Vetor de tensão na falta
V_{abc1}, I_{abc1}	Vetor de tensão e corrente no terminal 1
V_{abc2}, I_{abc2}	Vetor de tensão e corrente no terminal 2
M^+	Matriz transposta conjugada da matriz M
E	Erro de estimativa do algoritmo em porcentagem do comprimento total da linha
$d_{estimada}$	Distância estimada pelo algoritmo LDF entre o local da falta e o primeiro terminal da linha
d_{real}	Distância real entre o local da falta e o primeiro terminal da linha

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre os algoritmos localizadores de falta baseados em componentes de frequência fundamental propostos por Jamali (1990) e Girgis (1992), com o objetivo de identificar qual dentre eles apresenta maior precisão e robustez. As simulações tomaram por base uma linha de transmissão de 200 km de comprimento, 440 kV, modelada via software ATP (*Alternative Transients Program*). A análise avaliou o desempenho de ambos algoritmos enquanto se alterava os valores de distância da falta, tipo da falta, percentual de erro nos parâmetros distribuídos da linha de transmissão e resistência de falta. Os testes foram realizados em duas etapas, sendo a primeira com simulações de faltas a 10 km do primeiro terminal, e a segunda com faltas a 150 km, buscando assim comprovar a consistência dos resultados obtidos. Foi verificado que o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresenta maior precisão e robustez quando submetido a todas as configurações de faltas, exceto para situações onde exista grande imprecisão nos valores dos parâmetros distribuídos da linha de transmissão. Nesse caso, o algoritmo proposto por Girgis (1992) apresenta melhor desempenho, tanto em precisão quanto em robustez.

Palavras chaves: Localização de faltas; componentes fundamentais; linhas de transmissão.

Abstract

This work presents a comparative study between the fault location algorithms based on fundamental frequency components proposed by Jamali (1990) and Girgis (1992), in order to identify which one is the most accurate and robust. The simulations were made based on a line transmission of 200 km in length, 440 kV, modeled with the software ATP (Alternative Transients Program). The analysis evaluated the performance of each algorithm while the values of fault distance, fault type, error percentage in the distributed parameters of the transmission line and the fault resistance were being varied. Seeking to prove the results consistency, the tests were made in two stages, the first one with faults at 10 km from the first terminal, and the second with faults at 150 km. It was verified, from the results, that the algorithm proposed by Jamali (1990) presents a greater accuracy and robustness to all fault configurations, except for those where the distributed parameters of the line are too inaccurate. In this case the algorithm proposed by Girgis (1992) presents better performance for both accuracy and robustness.

Key-words: Fault location; transmission lines; fundamental components.

1. INTRODUÇÃO

1.1. SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL

Com processos de produção cada vez mais automatizados e o setor de telecomunicações cada vez mais desenvolvido, a demanda de energia elétrica tem aumentado rapidamente. Segundo dados do anuário estatístico de energia elétrica, elaborado em 2013 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo per capita de energia no Brasil no ano de 2012 foi de 2.545 quilowatt.hora/habitante (kWh/hab), apresentando crescimento de 2,6% em relação ao ano anterior, e 12,3% em relação ao ano de 2009. As projeções de 2012 à 2020, feitas pelo EPE, estimam um crescimento no consumo de energia elétrica de 4,7% ao ano (Projeção de demanda de energia elétrica, EPE, 2012).

O crescimento no consumo de energia elétrica, por sua vez, está relacionado ao crescimento econômico do país, como pode ser constatado analisando-se a Tabela 1 e o Gráfico 1.

Tabela 1- Relação entre o consumo de energia elétrica e o PIB no Brasil de 2012 a 2022.

Ano	Consumo (TWh)	PIB (10⁹ R\$ 2010)		
2012	496	3.870		
2017	627	4.822		
2022	787	6.155		
Período	Consumo ($\Delta\%$ a.a.)	PIB ($\Delta\%$ a.a.)	Elasticidade PIB	
2012-2017	4,8	4,5	1,06	
2017-2022	4,7	5,0	0,93	
2012-2022	4,7	4,7	0,99	

Fonte: EPE: Projeção de demanda de energia elétrica 2012.

A Elasticidade PIB é o índice que mede o quão sensível a variável Consumo é em relação à variação da variável PIB e é calculado pela razão entre as variações percentuais do Consumo e do PIB. Analisando-se este índice nos dados da Tabela 1 e do Gráfico 1, nota-se que de 1970 a 2017 o valor da Elasticidade tem se mantido acima do unitário, chegando a alcançar o valor de 3,75 no período de 1980-1990. Isso

significa que um aumento percentual no valor do PIB provoca um aumento percentual ainda maior no consumo de energia elétrica (Elasticidade PIB maior que 1).

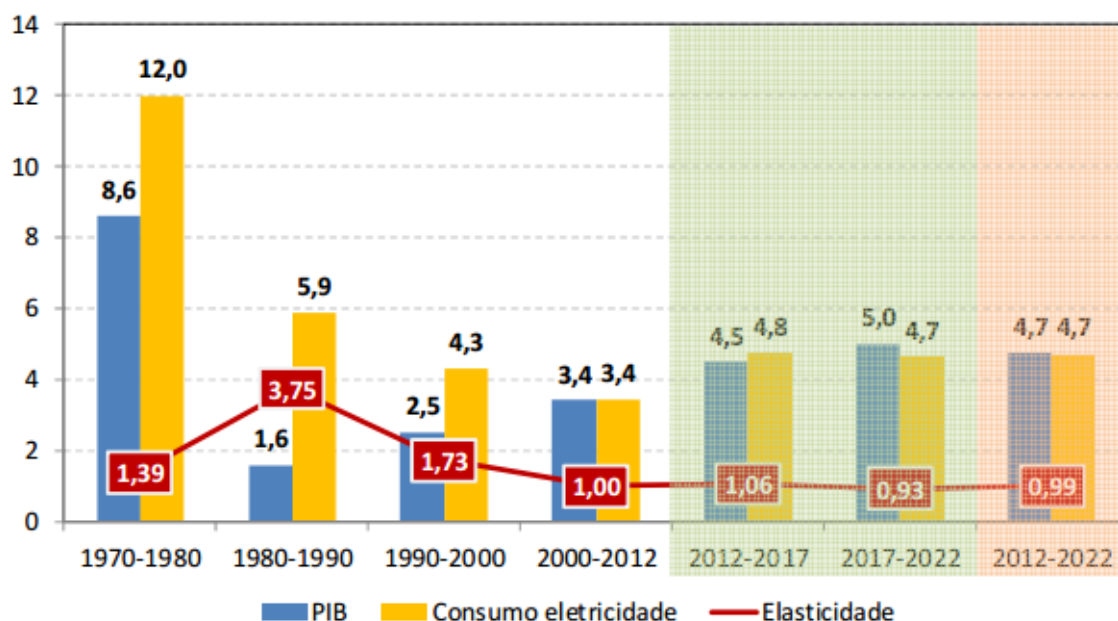


Gráfico 1- Taxas médias de crescimento anual no Brasil, por período (%).
 Fonte: EPE: Projeção de demanda de energia elétrica 2012.

Observa-se também que, para as projeções de 2017-2022, a expectativa é de um valor de Elasticidade PIB menor que 1. Refletindo um mercado mais maduro, que gere seu crescimento e utiliza a energia de forma mais consciente. No entanto, a proximidade do valor de Elasticidade da unidade ainda mostra uma dependência entre essas duas variáveis, levando a concluir que para garantir o crescimento econômico do país, é preciso investir em melhorias do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Por SEP, entende-se o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à Geração, Transmissão e Distribuição da energia elétrica, como mostrado na Figura 1. Convém mencionar que, embora o SEP presente na Figura 1 apresente uma matriz geradora hidrelétrica, o esquemático se mantém válido para os demais tipos de geração.

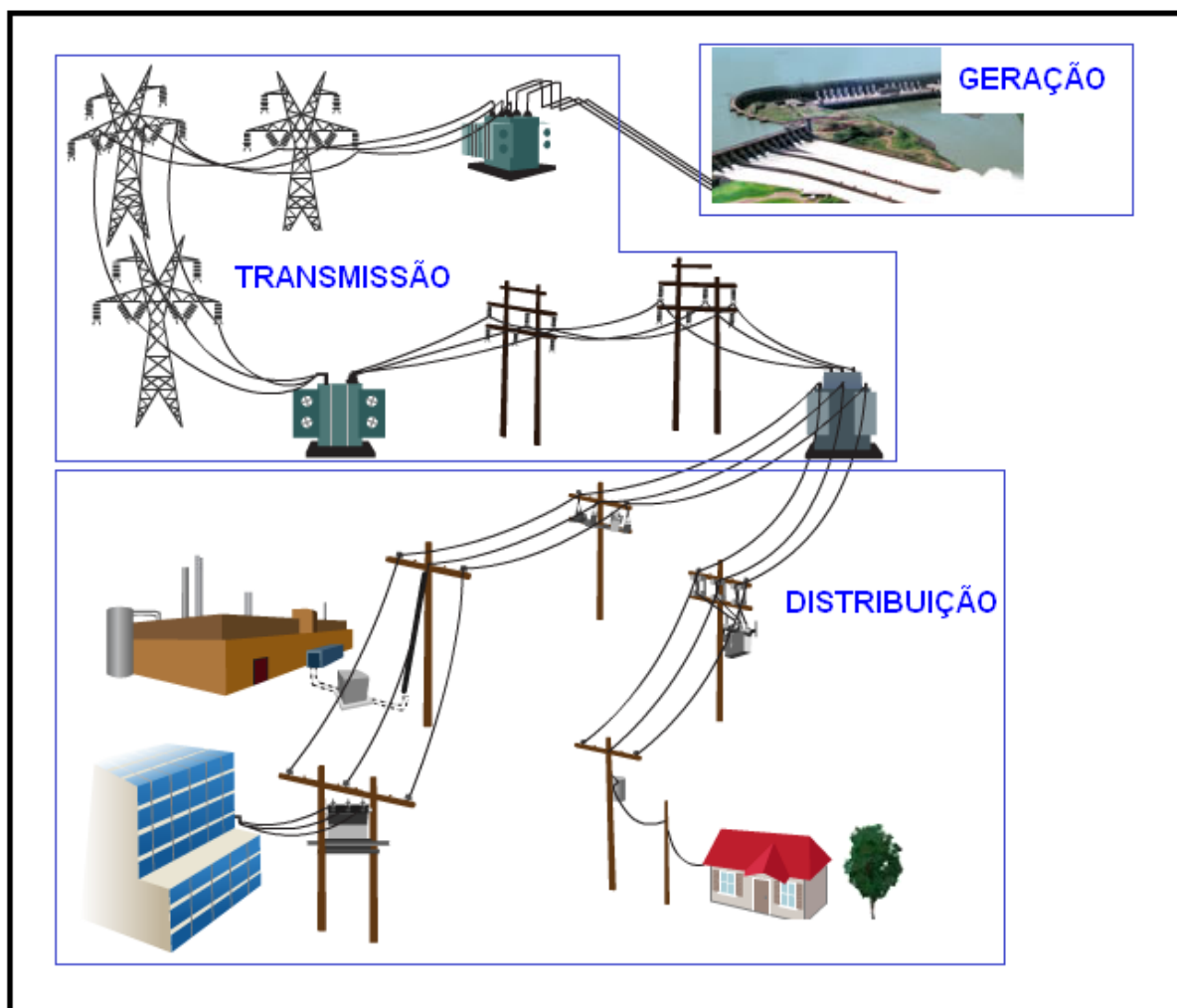


Figura 1- Ilustração do sistema elétrico de potência (SEP).
 Fonte: Imagem retirada da internet.

1.1.1. Sistema de Geração

Embora existam hoje diversas formas de geração, a grande maioria delas se baseia na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Esta conversão se faz movendo-se o rotor de um gerador por meio da ação do vapor, vento, queda d'água, etc. A variação de fluxo magnético nos enrolamentos do estator devido ao movimento do rotor induz nestes enrolamentos uma tensão, de acordo com a lei de Faraday-Neumann-Lenz. Esta tensão é então coletada e segue para o processo de transmissão.

O Brasil possui uma matriz energética composta principalmente pela geração hidrelétrica. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2013, elaborado pelo EPE,

no ano de 2012 a geração hidrelétrica foi responsável por 76,9% da geração elétrica total no país, como mostrado na Figura 2.

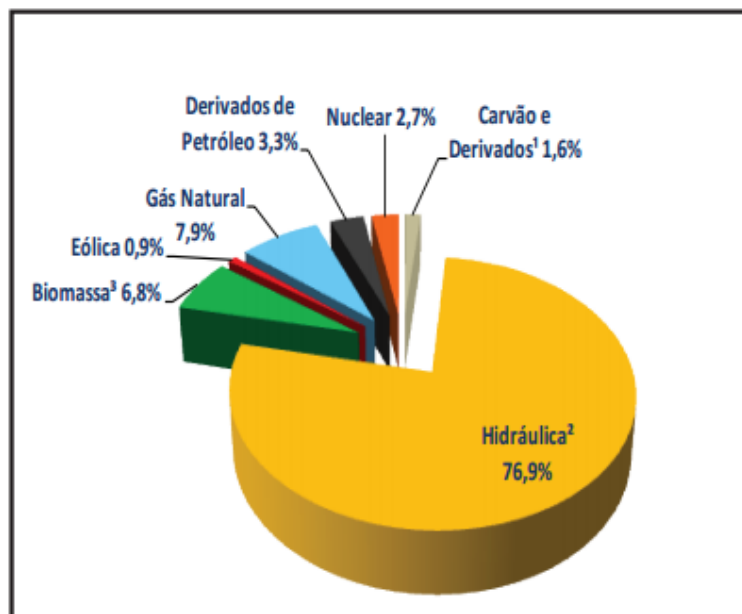


Figura 2- Matriz energética brasileira no ano de 2012.
 Fonte: Balanço Energético Nacional, EPE (2013).

A preferência pela geração hidrelétrica se dá devido à abundância de bacias hidrográficas que o Brasil dispõe. De acordo com o site “*Brasil – Economia e Governo*”, o Brasil ocupa o terceiro lugar entre os países que dispõem dos maiores potenciais hidrelétricos, com 10% da disponibilidade mundial, atrás da China, com 13% do total, e da Rússia, com 12%.

1.1.2. Sistema de Transmissão

Após a geração, a tensão passa por subestações elevadoras que elevam a tensão a faixas de 138, 230, 345, 440, 500 ou 750 kV. Tal elevação visa reduzir as perdas ôhmicas nos cabos ao longo das linhas de transmissão. O sistema de transmissão no Brasil opera, em sua grande maioria, em tensão alternada a frequência de 60 Hz, entretanto existem algumas linhas de transmissão que operam a ± 600 kV em corrente contínua no SEP brasileiro.

Depois de elevada, a tensão é transmitida por cabos compostos de alumínio e aço, suspensos por torres que podem medir de 30 a 100 metros de altura,

dependendo da sua localização e da tensão transmitida. A Figura 3 apresenta a foto de um trecho de uma linha de transmissão.

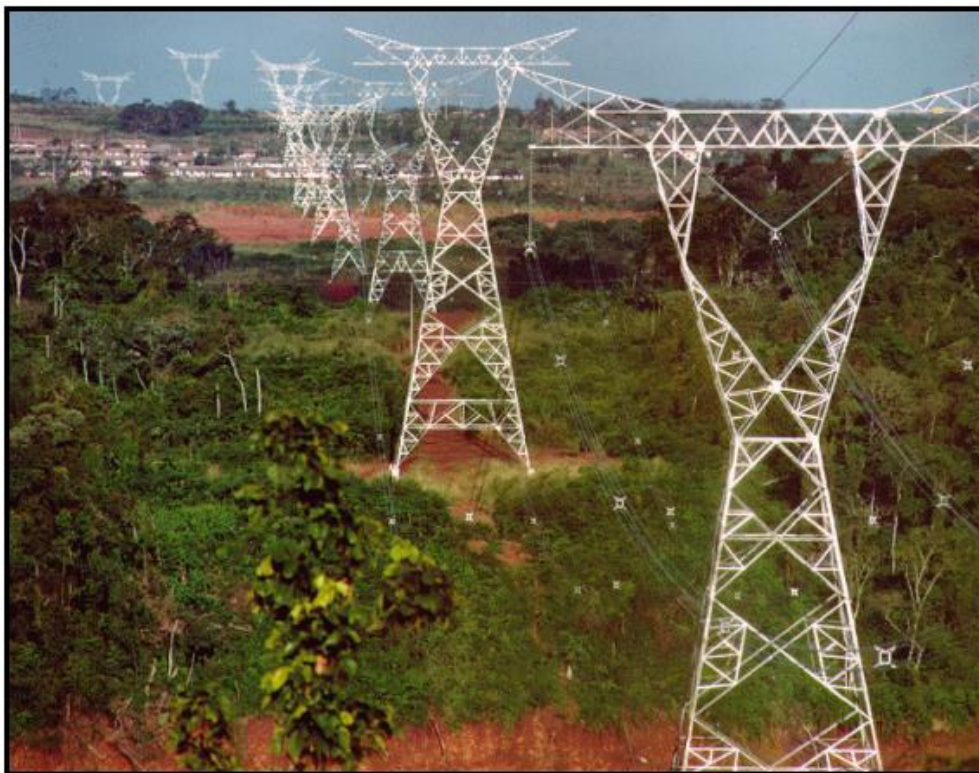


Figura 3- Trecho de uma linha de transmissão.
Fonte: Themag Engenharia.

1.1.3. Sistema de Distribuição

Quando as linhas de transmissão finalmente chegam aos centros consumidores, a tensão passa por uma subestação de abaixamento que, como o próprio nome sugere, abaixa o nível da tensão para os padrões de distribuição, comumente 13,8 kV. Clientes industriais são normalmente atendidos neste nível de tensão, porém, para atender aos clientes residenciais, a tensão é novamente abaixada por meio de transformadores e distribuição 13,8 kV/220V.

Para garantir um alto padrão de confiabilidade do SEP é preciso manter os sistemas de geração, transmissão e distribuição trabalhando em harmonia. Tarefa que se mostra de complexa execução uma vez que cada um dos sistemas anteriormente citado possui suas particularidades de funcionamento e requerem diferentes equipamentos e métodos de proteção.

Neste sentido, o sistema de Transmissão requer especial atenção, por concentrar o maior número de interferências externas, como será mostrado mais à frente neste trabalho. Tendo isto em vista, diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas com o propósito de aumentar a proteção das linhas de transmissão. Entre estas tecnologias estão presentes os algoritmos de localização de faltas (LDF). Estes algoritmos visam localizar a falta o mais rápido possível, diminuindo o tempo de reparo da linha defeituosa.

O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo dos principais algoritmos LDF utilizados atualmente, afim de definir qual deles apresenta resultados mais promissores.

1.2. PROBLEMA

A combinação de uma matriz energética majoritariamente hidrelétrica e uma extensão territorial de proporções continentais dá ao Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro características singulares. Uma dessas características é o tamanho de suas linhas de transmissão, que precisam ser longas devido ao fato das usinas hidrelétricas serem instaladas em locais normalmente distantes dos centros consumidores. Além disso, as linhas de transmissão brasileiras estão expostas a uma grande quantidade de árvores e de descargas atmosféricas, características da geografia do país.

De acordo com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2013 o SIN possuía uma extensão de 116.767,7 km (somando-se as linhas de transmissão em todos os níveis de tensão e as que operam em corrente contínua). A Figura 4 apresenta o mapa das linhas de transmissão no Brasil.

Devido à vasta extensão do sistema de transmissão e às condições climáticas adversas às quais está constantemente exposto, ele concentra a maioria das faltas que ocorrem no SEP (SILVA, 2008). Fato que pode ser constatado pela Figura 5.

Em um contexto onde a maior incidência de faltas ocorre justamente no segmento do SEP com maior extensão e, frequentemente, de difícil acesso, identificar o local exato da falta manualmente tendo toda a linha de transmissão como universo de teste seria uma tarefa árdua e que despenderia um período enorme de tempo, sem mencionar os custos que isso acarretaria.

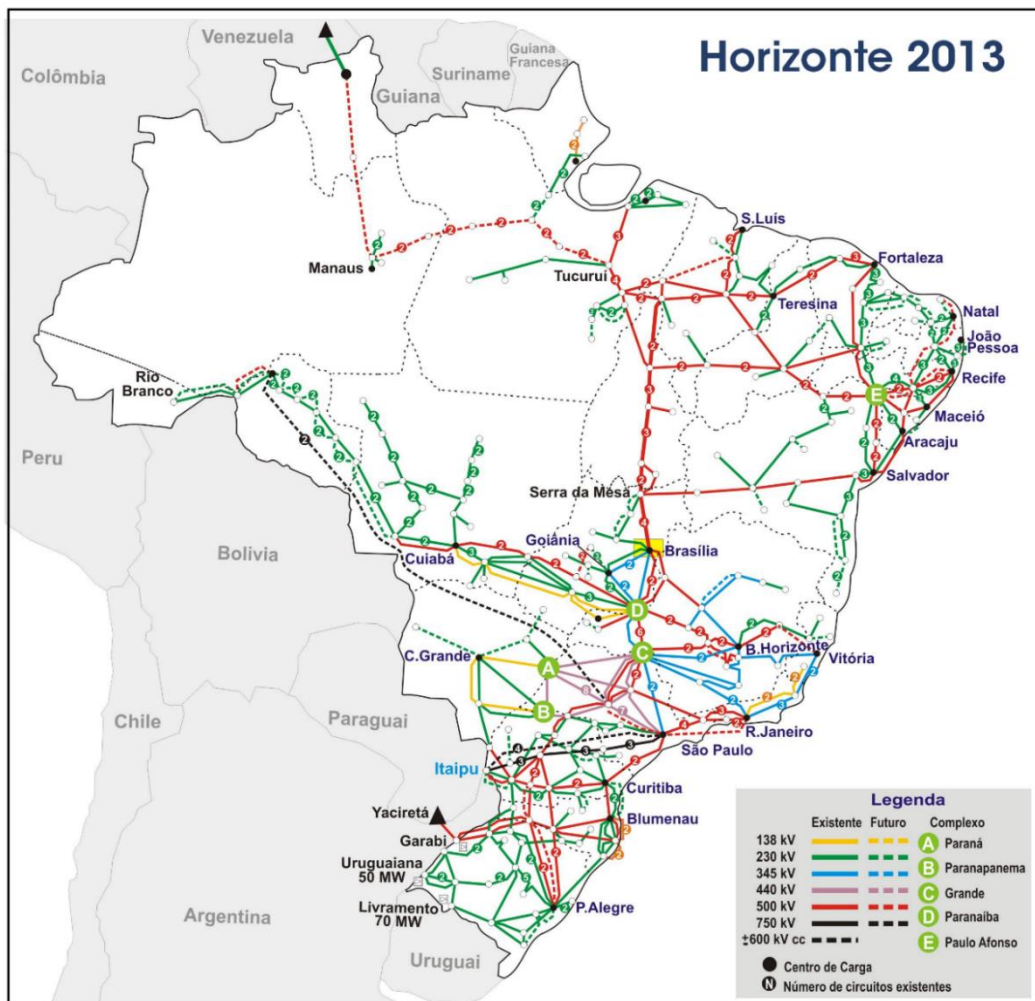


Figura 4- Linha de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN).
Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013).

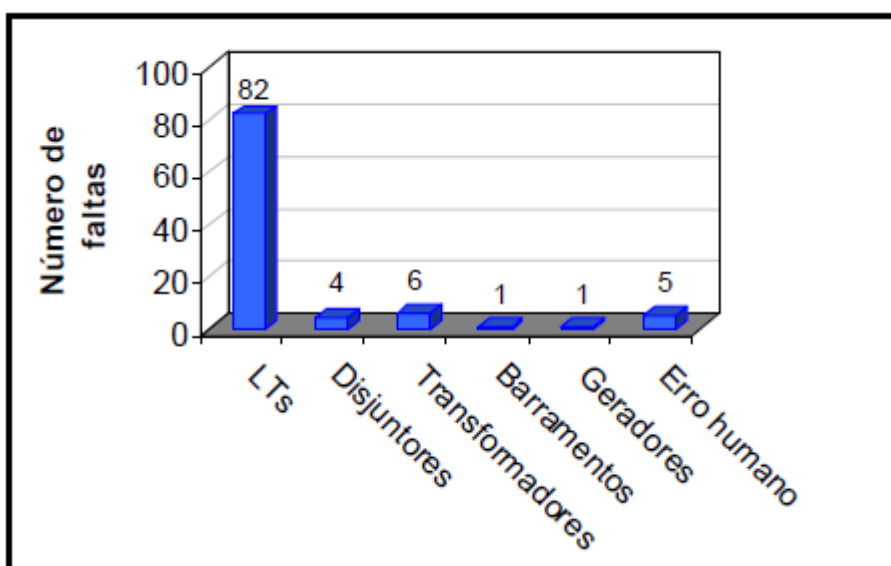


Figura 5- Distribuição de faltas em um sistema de 500 kV, para um período de dez anos, com a ocorrência de 99 faltas.
Fonte: (SILVA, 2008).

Dado o ambiente regulado do setor elétrico brasileiro, os índices de qualidade exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) cada vez mais rígidos, o tempo de atuação das equipes de manutenção e reparo deve ser minimizado ao máximo. Caso contrário, a concessionária de transmissão de energia poderá ter redução de receita devido a indisponibilidade da LT, estar sujeita ao pagamento de multas, além de precisar lidar com a insatisfação dos seus consumidores.

Por todas as razões acima citadas, é de se esperar que as concessionárias de transmissão procurem constantemente por técnicas e equipamentos que venham a tornar o SEP mais eficiente e seguro. Entre essas técnicas, como já mencionados anteriormente, encontram-se os algoritmos LDF.

1.3. JUSTIFICATIVA

Atualmente a dependência da energia elétrica pode ser encontrada em todos os lugares. Utensílios como computadores, celulares, eletrodomésticos, etc., se tornaram vitais não mais só para o conforto, mas também para o trabalho das pessoas. Essa dependência se torna ainda mais evidente no setor industrial, onde a produção depende do funcionamento de motores elétricos, fornos de indução, máquinas de solda, e inúmeros outros equipamentos movidos a eletricidade.

Neste cenário, um corte no fornecimento de energia por problemas no sistema de transmissão ou distribuição pode causar grandes prejuízos, principalmente aos clientes comerciais e industriais que ficarão com seus estabelecimentos inoperantes. A Tabela 2 apresenta o custo médio por kWh de uma interrupção para diferentes grupos de consumidores no Estado de São Paulo no ano de 2000, conforme Magalhães (2001).

Visando então garantir aos centros consumidores um fornecimento de energia de qualidade e com o mínimo possível de interrupções, a ANEEL criou indicadores de qualidade da energia, e passou a cobrar multas das concessionárias que não respeitem os padrões exigidos pela Agência (ANEEL).

Desta forma, caso uma falta ocorra nos seguimentos de transmissão ou distribuição da rede, é de grande interesse da própria concessionária, que ela seja localizada e reparada o mais rapidamente possível, afim de proteger o SEP e os equipamentos conectados a ele e de reestabelecer a operação normal do sistema.

Tabela 2- Custo médio por kWh de uma interrupção para diferentes grupos de consumidores no Estado de São Paulo no ano de 2000.

Categoria	Custo Médio de Interrupção (US\$/kWh interrompido)
Residencial	0,9
Comercial	1,7
Industrial	5,3

Fonte: (MAGALHÃES, 2001).

Nesse sentido, algoritmos LDF podem ser uma ferramenta poderosa na minimização dos prejuízos, tanto dos consumidores, quanto da própria concessionária. Pois reduzem o tempo gasto pelas equipes de manutenção no reparo da linha. Além disso, em caso de faltas transitórias, como as decorrentes de descargas atmosféricas, toques de galhos de árvores, etc., os algoritmos LDF permitem a elaboração de um banco de dados contendo as informações sobre os locais mais sujeitos à sofrer faltas. Esse banco de dados pode ser usado tanto para controle interno, quanto para revelar fragilidades do SEP, permitindo que medidas preventivas possam ser planejadas e executadas, evitando que situações problemáticas se repitam.

No entanto, existem diversas metodologias propostas para localização de faltas em linhas de transmissão na literatura e implementadas na prática, portanto é importante conhecer as características de alguns destes algoritmos e os fatores que podem comprometer sua precisão.

1.4. OBJETIVOS

Este tópico tem o propósito de apresentar o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos que serão alcançados ao longo do estudo.

1.4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é elaborar uma análise comparativa dos algoritmos localizadores de falta, baseados em componentes de frequência

fundamental que utilizam dados de dois terminais, propostos por Jamali (1990) e por Girgis (1992). Avaliando qual apresenta maior precisão na localização da falta e também qual dentre eles apresenta maior robustez quanto a mudanças nas características das faltas.

1.4.2. Objetivos Específicos

Para garantir que o objetivo geral do trabalho fosse alcançado, elaborou-se uma relação de objetivos específicos que deveriam ser alcançados ao longo do estudo. Estes objetivos são:

- Modelar o sistema de transmissão teste via software de simulação de transitórios – ATP (*Alternative Transients Program*).
- Simular faltas no sistema de transmissão alterando as seguintes variáveis: distância da falta, tipo da falta, percentual de erro nos parâmetros da linha de transmissão e resistência de falta;
- Implementar os algoritmos de localização de faltas predefinidos via plataforma Matlab®;
- Testar os algoritmos com os dados simulados obtidos do ATP;
- Realizar análise dos resultados e influência dos parâmetros envolvidos na falta;
- Realizar análise comparativa dos resultados obtidos pelos diferentes algoritmos;

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção serão tratados os conceitos fundamentais envolvidos no estudo de localização de faltas em linhas de transmissão. Primeiramente será apresentado o conceito de falta e seus diferentes tipos. Em seguida será abordada a classificação das metodologias de LDF, fazendo uma breve descrição dos conceitos e cálculos utilizados, dando ênfase aos métodos baseados em componentes de frequência fundamental, metodologia esta, foco deste trabalho.

2.1. FALTAS EM SEPs

Uma falta na linha de transmissão é caracterizada pela elevação abrupta de corrente em uma ou mais fases do sistema. Esta elevação pode ser causada pela redução da impedância entre dois pontos do SEP devido ao toque de galhos em cabos da linha, animais tocando duas fases simultaneamente, rompimento de um dos cabos, etc. (HERMANNNS, 2010). Ou ainda pela ocorrência de uma descarga atmosférica na linha de transmissão (LT).

As faltas em LTs podem ser classificadas em quatro categorias: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e fase-fase-fase. Sendo a falta fase-terra a mais comum, representando cerca de 80% das faltas ocorridas em LTs (SILVA, 2008).

A figura 6 apresenta a configuração de cada tipo de falta.

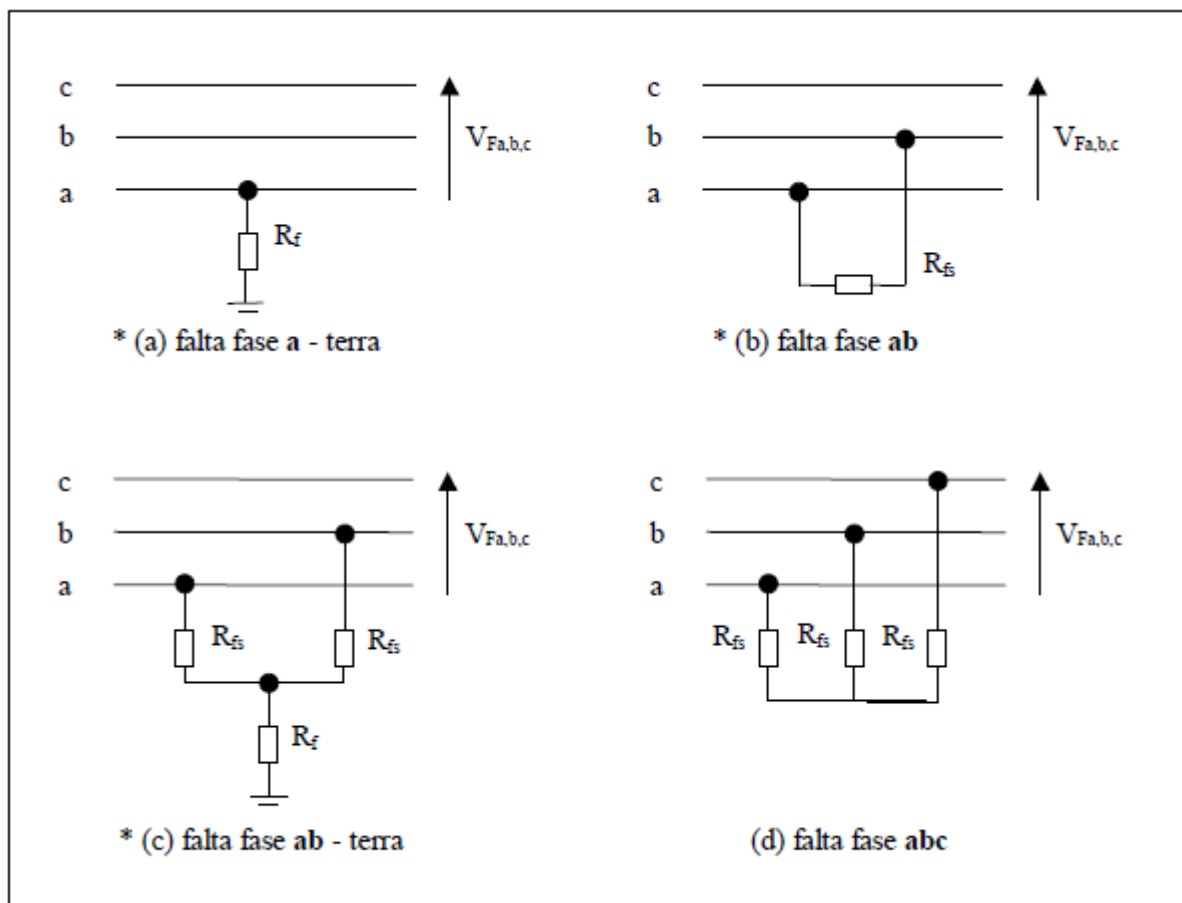


Figura 6- Situações de falta sobre o sistema.
Fonte: (SILVA, 2008).

2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE LDF

O avanço tecnológico e o aumento de pesquisas na área fizeram surgir diversas topologias de algoritmos de LDF. Segundo Lima (2013), essas topologias podem ser divididas primeiramente entre as que utilizam das componentes de alta frequência e as que utilizam das componentes de frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente analisados. Cada uma dessas metodologias é ainda subdividida em outras duas metodologias. A baseada em componentes de alta frequência subdivide-se entre as que utilizam o método de injeção de ondas e as que utilizam o método de análise transitória. A metodologia baseada em componentes de frequência fundamental, por sua vez, é subdividida entre os algoritmos que utilizam dados de um terminal e os que utilizam dados de dois terminais. Esta classificação é apresentada na figura 7.



Figura 7- Classificação das metodologias de LDF.

Fonte: Autoria própria.

2.2.1. Ondas viajantes

Segundo Kawady e Stenzel (2002), a metodologia de Ondas Viajantes (OV) se baseia na determinação do tempo que uma onda leva para viajar do ponto de falta até o terminal onde os dados estão sendo coletados. Essa categoria se subdivide ainda de acordo com a origem dessa onda observada. Em uma metodologia esta onda é injetada no sistema e coleta-se as ondas refletidas pelo ponto de falta. Na outra metodologia usa-se um método de filtragem, como os baseados em Transformada Wavelet, por exemplo, para medir o tempo que as ondas geradas pela própria falta demoraram para chegar ao terminal. As equações para o cálculo da localização da falta dependem da forma como as ondas são analisadas (KAWADY e STENZEL, 2002).

O principal problema dessa metodologia está no custo computacional requerido para a análise dos sinais de alta frequência. Além da estreita dependência que a velocidade de propagação da onda possui em relação aos parâmetros da linha. Entretanto, avanços tecnológicos têm tornado essa metodologia cada vez mais barata e viável (PARENTONI, 2006).

2.2.2. Componentes de frequência fundamental

A metodologia de LDF baseada em componentes de frequência fundamental é hoje a mais utilizada, principalmente pelo baixo custo computacional requerido (TAKAGI, 1981). Vantagem esta que se destaca ainda mais em algoritmos que utilizam apenas dados de um terminal (FERREIRA, 2012).

Dentre os algoritmos que utilizam desta metodologia, os algoritmos propostos por Jamali (1990) e por Girgis (1992) estão entre os mais citados na literatura, por requererem baixo custo computacional e apresentarem resultados promissores.

A seguir serão apresentados os principais conceitos e equacionamentos dos algoritmos apresentados por estes dois autores.

2.2.2.1. Jamali (1990)

O método proposto por Jamali em 1990 consiste na análise dos fasores fundamentais dos sinais de tensão e corrente em regime permanente do período pós-falta, coletados em ambos os terminais. O diferencial deste algoritmo é o fato de seu equacionamento considerar o modelo de linha de transmissão longa (modelo π), como o mostrado na figura 8. Dessa forma o método busca aumentar sua precisão, considerando fatores como, por exemplo, a admitância shunt da linha, elemento ignorado pela maioria dos algoritmos de localização de faltas.

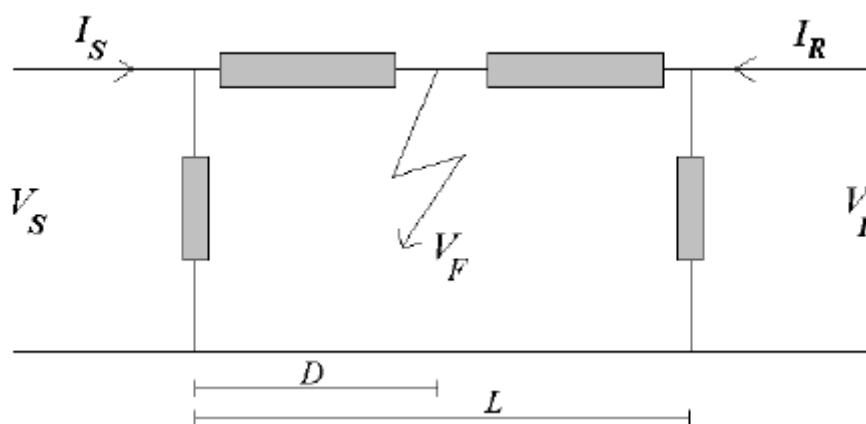


Figura 8- Circuito π equivalente para LT longas.
Fonte: (JAMALI, 1990)

O modelo de LT ilustrado na figura 8 consiste em um circuito monofásico. Dessa forma, para que se possa expandir o algoritmo para circuitos polifásicos, os autores sugerem o uso da transformação modal proposta por WEDEPOHL (1963). Tal transformação converte o circuito trifásico, foco deste trabalho, em três circuitos monofásicos (modos 0, 1 e 2 similares a componentes simétricas onde temos seqüências zero, positiva e negativa), desacoplados magneticamente.

Pela análise do circuito monofásico ilustrado na figura 8, pode-se escrever as equações (1) e (2).

$$V_F = \cosh(\gamma \cdot D) \cdot V_S - Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot D) \cdot I_S \quad (1)$$

$$V_F = \cosh[\gamma \cdot (L - D)] \cdot V_R - Z_0 \cdot \sinh[\gamma \cdot (L - D)] \cdot I_R \quad (2)$$

Sendo: $Z_0 = \sqrt{\left(\frac{Z_1}{Y_1}\right)}$ e $\gamma = \sqrt{(Z_1 \cdot Y_1)}$

Onde:

V_F: é a tensão no ponto de falta (pós-falta) [V];

Z₀: é a impedância característica da linha [Ω/km];

Z₁: é a impedância característica de sequência positiva da linha [Ω/km];

Y₁: é a admitância shunt de sequência positiva da linha [Mho/km];

γ : é a constante de propagação da linha;

L: é o comprimento total da linha [km];

D: é distância do local da falta até o terminal S [km];

V_S e **V_R**: São os fasores fundamentais de tensão (pós-falta) nos terminais S e R, respectivamente [V];

I_S e **I_R**: São os fasores fundamentais de corrente (pós-falta) nos terminais S e R, respectivamente [A].

É importante salientar que, embora no artigo os autores tenham optado por equacionar o problema utilizando o circuito do modo 1, qualquer um dos três modos poderia ter sido utilizado (JAMALI, 1990).

A distância entre o local da falta e o terminal S pode então ser estimada manipulando-se matematicamente as equações (1) e (2) de forma a se obter a equação (3).

$$D = \frac{\tanh^{-1}(-B/A)}{\gamma} \quad (3)$$

Sendo $A = Z_0 \cdot \cosh(\gamma \cdot L) \cdot I_R - \sinh(\gamma \cdot L) \cdot V_R + Z_0 \cdot I_S$

e $B = \cosh(\gamma \cdot L) V_R - Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \cdot I_R - V_S$

O algoritmo proposto por Jamali (1990) possui as vantagens de não depender diretamente da resistência da falta, das impedâncias dos geradores e do tipo de falta, o que, segundo os autores, garante maior robustez ao algoritmo.

2.2.2.2. Girgis (1992)

O trabalho realizado por Girgis em 1992 apresenta um algoritmo de LDF baseado na análise dos fasores de tensão e corrente medidos em dois terminais do sistema. São apresentados dois tipos de abordagens, uma considerando os dados dos dois terminais sendo adquiridos de forma síncrona, e outro considerando uma defasagem entre os fasores de tensão e corrente do terminal remoto e local.

A figura 9 apresenta o circuito analisado, contendo dois terminais.

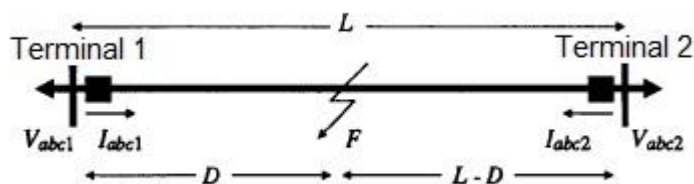


Figura 9- Linha com dois terminais.
Fonte: (GIRGIS, 1992)

Para o primeiro caso, considerando os dados dos dois terminais sendo obtidos de forma síncrona, os vetores trifásicos das tensões nos terminais são descritos pelas equações (4) e (5).

$$V_{abc1} = V_{Fabc} + D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad (4)$$

$$V_{abc2} = V_{Fabc} + (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \quad (5)$$

Pelas equações (4) e (5) pode-se escrever (6).

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc} \cdot [I_{abc1} + I_{abc2}] \quad (6)$$

Onde:

- L:** é o comprimento total da linha de transmissão;
- D:** é a distância entre o local da falta e o terminal 1;
- Z_{abc}:** é a impedância trifásica série da linha por km;
- V_{Fabc}:** é o vetor de tensão na falta;
- V_{abc1}:** é o vetor de tensão no terminal 1;
- V_{abc2}:** é o vetor de tensão no terminal 2;
- I_{abc1}:** é o vetor de correntes pós-falta no terminal 1;
- I_{abc2}:** é o vetor de correntes pós-falta no terminal 2.

A equação (6) pode ainda ser escrita como mostrado em (7).

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \text{ ou } Y = M \cdot D \quad (7)$$

Onde:

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \cdot \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot I_{i2} \quad (8)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot (I_{i1} + I_{i2}) \quad (9)$$

j=a,b,c.

A equação (7) representa três equações complexas ou seis equações reais e apresenta uma única incógnita, a localização da falta D . Esta pode ser então calculada pela equação (10).

$$D = (M^+ \cdot M)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y \quad (10)$$

Onde:

M^+ : é a matriz transposta conjugada da matriz M .

Convém ressaltar que a equação (10) não depende da resistência de falta R_F ou do tipo de falta, o que dá maior robustez ao método.

Para o segundo caso, leva-se em consideração a presença de uma defasagem entre os fasores coletados no terminal local e remoto. Dessa forma, embora a equação (4) continue válida, uma segunda variável, $e^{j\delta}$, precisa ser introduzida na equação (5), afim de representar essa defasagem. Como mostrado na equação (11).

$$V_{abc2} \cdot e^{j\delta} = V_{Fabc} + (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \cdot e^{j\delta} \quad (11)$$

Das equações (4) e (11) pode-se deduzir (12).

$$V_{abc1} - V_{abc2} \cdot e^{j\delta} = D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} - L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \cdot e^{j\delta} + D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \cdot e^{j\delta} \quad (12)$$

A equação (12) pode ainda ser escrita como mostrado na equação (13).

$$\frac{V_{j1}}{V_{j2}} = M_{1j} \cdot D + M_{2j} \cdot e^{j\delta} + M_{3j} \cdot D \cdot e^{j\delta} \quad (13)$$

Onde:

$$M_{1j} = \frac{1}{V_{j2}} \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot I_{i1} \quad (14)$$

$$M_{2j} = 1 - \frac{L}{V_{j2}} \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot I_{i2} \quad (15)$$

$$M_{3j} = \frac{1}{V_{j2}} \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot I_{i2} \quad (16)$$

$j=a,b,c$.

Definindo as incógnitas D e $e^{j\delta}$ como x_1 e x_2 , respectivamente, pode-se escrever a equação (17).

$$Y_j = M_{1j} \cdot x_1 + M_{2j} \cdot x_2 + M_{3j} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (17)$$

Onde:

$$Y_j = \frac{V_{j1}}{V_{j2}} \quad (18)$$

A equação (17) representa três grandezas complexas conhecidas e duas incógnitas, sendo uma delas uma grandeza real (x_1), e a outra uma grandeza complexa (x_2). Definindo condições iniciais x_{10} e x_{20} , os valores de x_1 e x_2 podem ser calculados pelo método dos mínimos quadrados. Como mostrado na equação (19).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_{k-1} + [H^+ \cdot H]^{-1} \cdot H^+ \cdot \Delta y \quad (19)$$

Onde:

H: é a matriz Jacobiana $\left(\frac{dY_j}{dx_i}\right)$.

$$\Delta y = Y_k - Y_{k-1}$$

Os elementos da matriz Jacobiana H são dados pelas equações (20) e (21).

$$\frac{\partial Y_j}{\partial x_1} \Big|_k = M_{1j} + M_{3j} \cdot x_{2k-1} \quad (20)$$

$$\frac{\partial Y_j}{\partial x_2} \Big|_k = M_{2j} + M_{3j} \cdot x_{1k-1} \quad (21)$$

Segundo Girgis (1992) os valores iniciais das incógnitas podem ser escolhidas arbitrariamente, mas é sugerido o uso de $x_{10}=0,5.L$ e $x_{20}=0^\circ$. O processo iterativo termina quando a variação do valor de D de uma iteração a outra mantém-se dentro de um limite mínimo pré-estipulado. Para este mínimo é sugerido no trabalho o valor de 0,05%.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada neste trabalho, explicando desde a forma como as faltas foram simuladas, até a forma como os resultados de cada algoritmo foram analisados.

3.1. SIMULAÇÃO DA FALTA

Para modelagem da linha de transmissão e simulação das faltas utilizou-se o software ATP (*Alternative Transients Program*), por esta ser uma plataforma eficiente e gratuita para a simulação de transitórios em circuitos eletromagnéticos (TAVARES, 2003).

Os parâmetros da linha de transmissão modelada, bem como as etapas necessárias para a extração dos dados de simulação serão apresentados a seguir.

3.1.1. Modelagem da linha de transmissão

Para a modelagem, tomou-se como base uma linha de transmissão de 200 km de comprimento, 440 kV, e torres de transmissão de um circuito simples horizontal tipo VVV, como ilustrado na figura 10.

Os parâmetros presentes na figura 10 foram utilizados como dados de entrada na rotina *Line Constant* do software ATP. Esta rotina tem por finalidade gerar os valores dos parâmetros distribuídos da linha, além da matriz de impedância própria (Z) da linha. Matriz esta que será utilizada por ambos algoritmos de localização de falta (SILVA, 2008).

Convém salientar que, na modelagem, se optou por uma **disposição transposta** dos cabos, como apresentado na figura 11. Desta forma, é possível considerar que os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, cabo guarda, ferragens e solo sob a linha de transmissão serão compensados, simplificando os cálculos sem causar prejuízos relevantes na precisão dos algoritmos (JAMALI, 1990).

Além disso, buscando uma maior exatidão com relação aos parâmetros da linha, foram utilizados na simulação dados de parâmetros distribuídos como mostrado na figura 12. Isto porque, na realidade, os parâmetros não são dispostos de maneira

pontual na linha, e sim por unidade de comprimento. Os valores dos parâmetros distribuídos utilizados na simulação são apresentados na tabela 3.

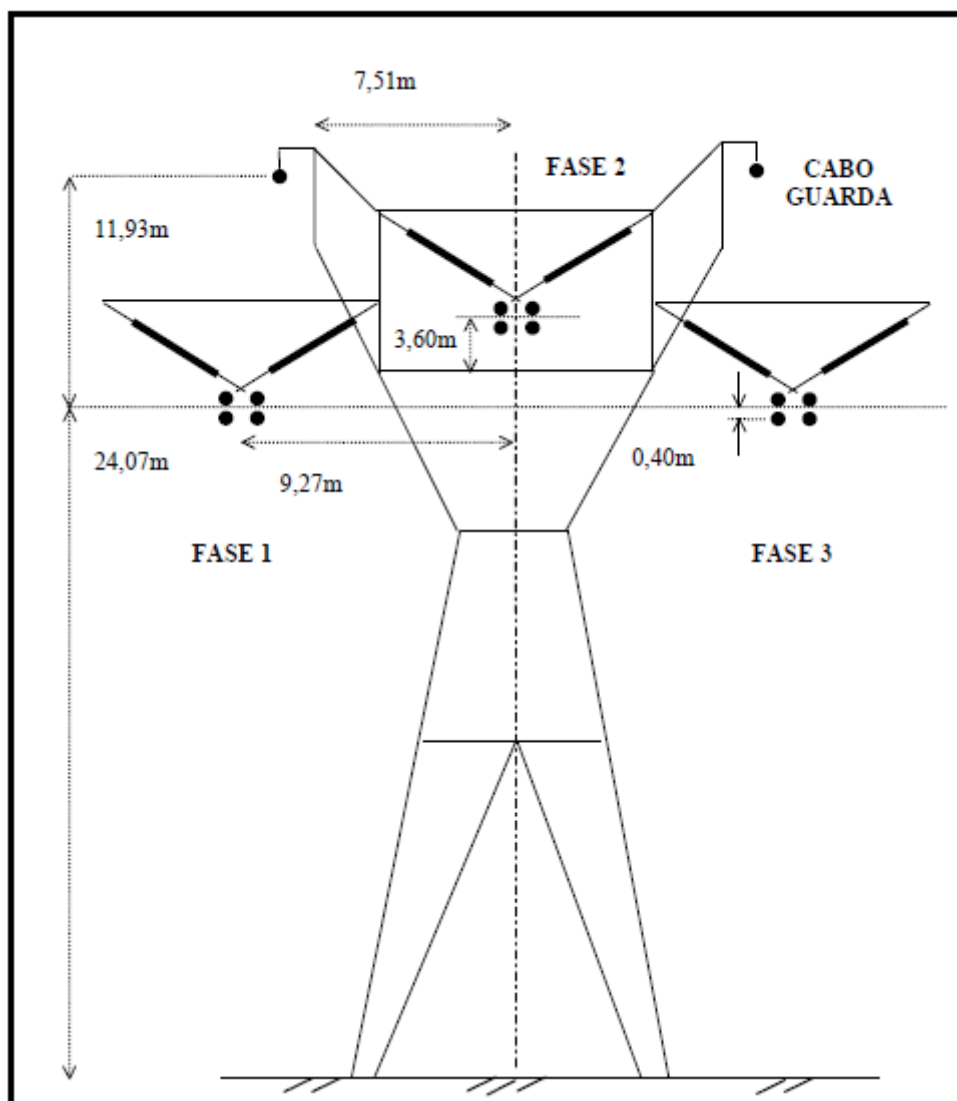


Figura 10 - Silhueta de torre da linha de 440 kV.
Fonte: (SILVA, 2008).

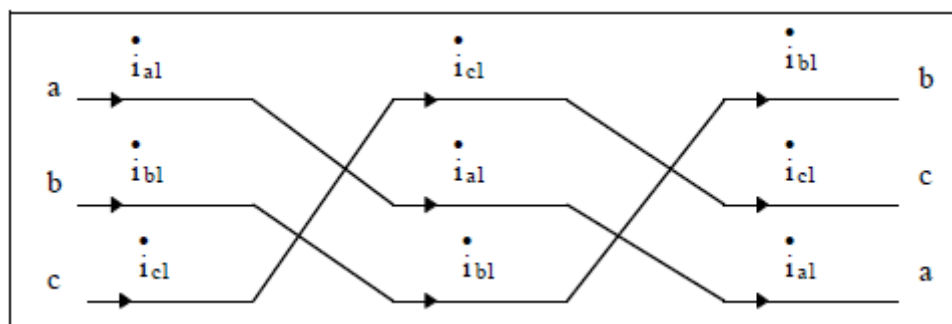


Figura 11- Transposição de uma linha de transmissão.
Fonte: (SILVA, 2008).

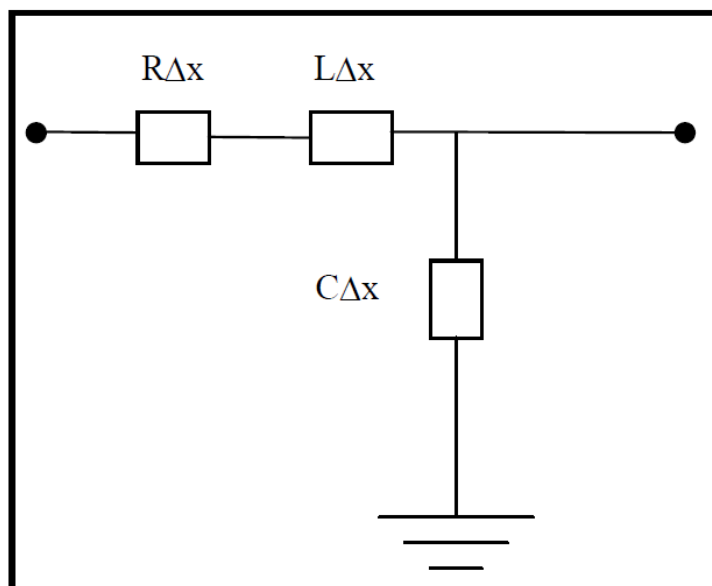


Figura 12- Representação de um comprimento Δx de uma linha de transmissão por parâmetros distribuídos.
Fonte: (SILVA, 2008).

Tabela 3- Parâmetros distribuídos da linha de transmissão de 440 kV.

	Sequência positiva		Sequência Zero
R_+ (Ω/km)	2.28129E-02	R_0 (Ω/km)	3.13646E-01
L_+ (Ω/km)	3.20237E-01	L_0 (Ω/km)	1.29995E+00
C_+ ($\mu\text{Mho}/\text{km}$)	5.15303E+00	C_0 ($\mu\text{Mho}/\text{km}$)	3.12177E+00

Fonte: Rotina *Constline* do ATP.

3.1.2. Conversão e exportação dos dados

Após a modelagem da linha no software ATP, utilizou-se o software auxiliar Top32 MFC application para se gerar um gráfico contendo as tensões e correntes pré e pós-falta. Podendo assim, ainda por meio do Top32, converter esses dados de tensões e correntes em formato .txt e, desta forma, possibilitar a importação e uso dos mesmos pelo software Matlab® (TAVARES, 2003).

3.2. LOCALIZAÇÃO DA FALTA VIA MATLAB®

Para a implementação dos algoritmos LDF foi utilizada a ferramenta de simulação e implementação Matlab®, por esta ser uma ferramenta bastante difundida no meio acadêmico e apresentar uma linguagem de programação relativamente simples.

A seguir são apresentados os principais passos utilizados nesta etapa.

3.2.1. Obtenção da componente fundamental dos sinais

Como dito anteriormente, os algoritmos LDF estudados neste trabalho se baseiam nas componentes fundamentais dos sinais de tensões e correntes pós-falta. Desta forma, tendo os arquivos .txt com os dados das simulações sido importados para o Matlab®, estes precisam ter suas componentes fundamentais extraídas.

Para a extração das componentes fundamentais dos sinais foi utilizada a FFT (*Fast Fourier Transform*), por esta ser uma ferramenta eficiente e de reduzido custo computacional (Gonçalves, 2004). A frequência de amostragem utilizada foi de 960 Hz, com 16 amostras (1 ciclo do sinal) por janela.

3.2.2. Implementação dos algoritmos propostos

Em posse das componentes fundamentais dos sinais de tensões e correntes simuladas, foram implementados os algoritmos LDF propostos por Jamali (1990) e por Girgis (1992). Estes algoritmos, por sua vez, fazem uma estimativa para a posição da falta, que é comparada com a posição real. O erro na estimativa é calculado utilizando a equação 22.

$$E(\%) = \left[\frac{|(d_{estimada} - d_{real})|}{L} \right] \cdot 100 \quad (22)$$

Onde:

E: é o erro de estimativa do algoritmo (%);

d_{estimada}: é a distância estimada pelo algoritmo LDF entre o local da falta e o primeiro terminal da linha (km);

d_{real}: é a distância real entre o local da falta e o primeiro terminal da linha (km);

L: é o tamanho total da linha de transmissão modelada (km).

3.3. ESTRUTURA DA ANÁLISE

Como abordado em seção anterior, o objetivo principal deste trabalho é verificar qual dentre os algoritmos LDF apresenta maior precisão e robustez: o proposto por Jamali (1990) ou o proposto por Girgis (1992). Para isso, foram analisados os erros na estimativa de cada algoritmo quando alterados os valores de distância da falta, tipo da falta, percentual de erro nos parâmetros distribuídos da linha de transmissão e resistência de falta. Tais elementos das faltas foram alterados da seguinte forma:

- **Distância da falta:** Foram simuladas faltas a 10, 25, 50, 100, 125 e 150 km do primeiro terminal da linha modelada;
- **Tipo da falta:** Foram simuladas faltas dos tipos fase-terra (F-T), fase-fase (F-F), fase-fase-terra (F-F-T) e fase-fase-fase (F-F-F);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** Foram simuladas faltas alterando-se os parâmetros distribuídos da linha modelada no ATP em -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15 e +20 % do valor real gerado pela rotina *Constline*.
- **Resistência de falta:** Foram simuladas faltas utilizando valores de resistência de 0,1; 5; 15; 25; 50; 75 e 100 Ω .

Os algoritmos foram testados alterando-se apenas um elemento da falta por vez, enquanto os outros eram mantidos constantes. Desta forma buscou-se verificar os efeitos individuais de cada um destes elementos sobre a precisão do algoritmo, sem que os resultados fossem comprometidos por demais distúrbios.

A fase de testes foi dividida em duas partes:

- Primeira parte: A distância da falta tomada como base (quando avaliada a influência do tipo de falta, da precisão nos parâmetros da linha e da resistência da falta) foi de 10 km;
- Segunda parte: A distância da falta tomada como base foi de 150 km.

Estas duas etapas de testes buscaram verificar se o algoritmo que se mostrou superior quando submetido a faltas no começo da linha se mostraria superior também

para demais localidades de falta. Além disso, essa segunda etapa buscou verificar se eventuais padrões identificados nas curvas de erro de localização se mostrariam válidos para toda a extensão da linha de transmissão ou se seria um fenômeno pontual.

Em cada etapa de análise foram apresentados os resultados obtidos por cada algoritmo, o gráfico do erro de localização em função do elemento da falta analisado e uma análise estatística contendo erro máximo, mínimo e médio apresentado por cada algoritmo, bem como seu respectivo desvio padrão de erro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos pelos algoritmos de localização de falta baseados em componentes fundamentais propostos por Jamali (1990) e Girgis (1992).

Os resultados aqui apresentados e discutidos foram obtidos utilizando a metodologia descrita na seção anterior.

4.1. CONSIDERANDO FALTAS A 10 km DO PRIMEIRO TERMINAL

Nesta etapa, avaliou-se a eficiência e robustez dos algoritmos estudados considerando faltas a 10 km do primeiro terminal, exceto, é claro, quando avaliada a sensibilidade desses algoritmos quanto ao fator “distância da falta”. Neste caso, a distância da falta foi variada como descrito na seção 3.3.

4.1.1. Influência da distância da falta

A relevância da distância da falta sobre a precisão dos algoritmos foi avaliada comparando resultados relativos a faltas situadas a 10, 25, 50, 100, 125 e 150 km do primeiro terminal da linha. Sendo o comprimento total da linha de transmissão modelada 200 km.

Os valores das demais características da falta foram mantidas constantes, de forma que as faltas simuladas apresentavam a seguinte configuração:

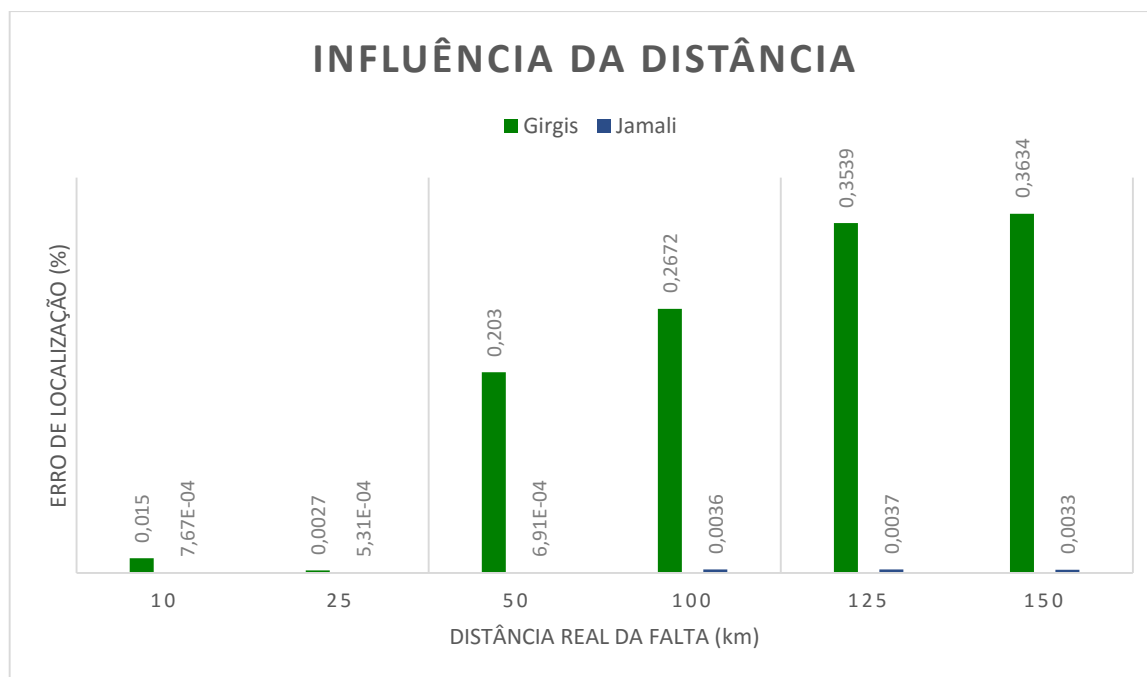
- **Distância da falta**: Variadas entre 10, 25, 50, 100, 125 e 150 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta**: Monofásica (fase-terra);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha**: 0 % de erro (mesmos valores dos parâmetros da linha gerados pela rotina *Constline*);
- **Resistência de falta**: 0,1 Ω .

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4 e o impacto da distância da falta (D) sobre a precisão de cada algoritmo pode ser observado no gráfico 2. Uma análise estatística dos resultados obtidos é apresentada na tabela 5.

Tabela 4- Influência da distância da falta.

D (km)	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
10	9,9700	0,0150	9,9985	7,6742e-004
25	25,0053	0,0027	25,0011	5,3101e-004
50	49,5940	0,2030	50,0014	6,9096e-004
100	99,4657	0,2672	100,0073	0,0036
125	124,2922	0,3539	125,0074	0,0037
150	149,2732	0,3634	150,0066	0,0033

Fonte: Autoria própria.

**Gráfico 2- Influência da distância da falta.**

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado pelos dados apresentados na tabela 4 e 5, e ainda pelo gráfico 2, ambos algoritmos apresentaram resultados satisfatórios. Uma vez que o maior erro encontrado foi de 0,3634% da linha total, ou seja, aproximadamente 727 metros, apresentado pelo algoritmo proposto por Girgis (1992) quando submetido a uma falta a 150 km do primeiro terminal. O algoritmo proposto por Jamali (1990), por sua vez, apresentou erro máximo de 3,7000E-03% do comprimento da linha (aproximadamente 7 metros).

Além disso, pode-se observar que o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresentou uma robustez quanto ao fator “distância da falta” muito maior que algoritmo proposto por Girgis (1992). Isto fica claro quando se observa a diferença de

comportamento da curva do erro apresentado pelo algoritmo Jamali e o algoritmo Girgis. Enquanto o primeiro se mantém praticamente constante, o segundo apresenta uma alta taxa de crescimento em função do aumento da distância.

Tabela 5- Análise estatística da influência da distância da falta.

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	2,7000E-03	5,3101E-04
Erro máximo (%)	0,3634	3,7000E-03
Erro médio (%)	0,2008	2,0982E-03
Desvio padrão (%)	0,1600	1,5794E-03

Fonte: Autoria própria.

Tal comportamento se traduz em um valor de desvio padrão apresentado pelo algoritmo Girgis muito maior que o apresentado pelo algoritmo Jamali, como pode ser observado na tabela 5. Enquanto o desvio padrão do erro apresentado pelo algoritmo Jamali foi de 1,5794E-03% do comprimento da linha (aproximadamente 3 metros), o apresentado pelo algoritmo Girgis foi de 0,16% (aproximadamente 320 metros), cerca de 100 vezes maior.

4.1.2. Influência do tipo de falta

Afim de se determinar a relação entre o tipo de falta e a precisão dos algoritmos, foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 10 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Variada entre os tipos fase-terra (F-T), fase-fase (F-F), fase-fase-terra (F-F-T) e fase-fase-fase (F-F-F);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** 0 % de erro (mesmos valores dos parâmetros da linha gerados pela rotina *Constline*);
- **Resistência de falta:** 0,1 Ω .

A seguir, nas tabelas 6 e 7, são apresentados os resultados de ambos algoritmos, enquanto o gráfico 3 ilustra o comportamento da curva de erro dos mesmos para diferentes tipos de falta.

Tabela 6- Influência do tipo de falta (10 km).

Tipo da falta	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
F-T	9,9700	0,0150	9,9985	7,6742e-004
F-F	8,9585	0,5207	9,9996	1,9152e-004
F-F-T	10,3571	0,1785	9,9990	4,9100e-004
F-F-F	9,7417	0,1291	9,9990	4,9106e-004

Fonte: Autoria própria.

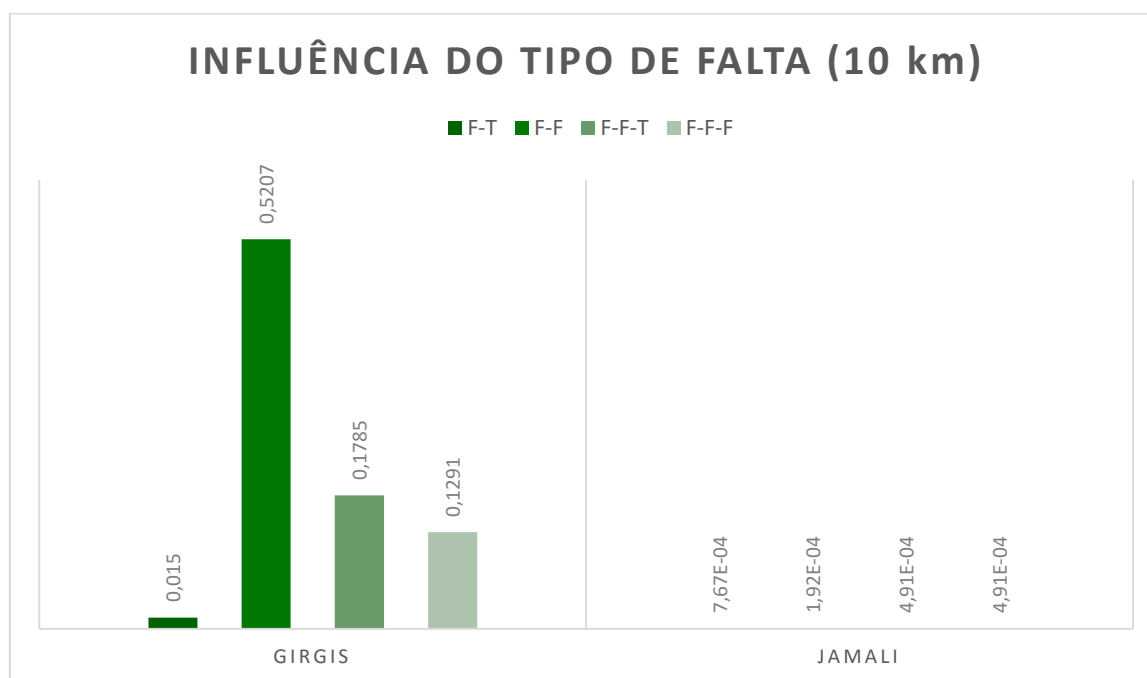


Gráfico 3- Influência do tipo da falta (10 km).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7- Análise estatística da influência do tipo de falta (10 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,0150	1,9152E-04
Erro máximo (%)	0,5207	7,6742E-04
Erro médio (%)	0,2108	4,8525E-04
Desvio padrão (%)	0,2176	2,3520E-04

Fonte: Autoria própria.

Como se pode verificar pelos dados das tabelas 6 e 7, e ainda pela análise do gráfico 3, o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresentou um excelente desempenho, com erro médio de $4,8525E-04\%$ (aproximadamente 0,97 metro) e erro máximo de $7,6742E-04\%$ (aproximadamente 1,5 metro), quando submetido a uma falta monofásica (tipo F-T). Entretanto, o algoritmo proposto por Girgis (1992) gerou resultados bem inferiores, apresentando erro médio de 0,2108% do comprimento da linha (aproximadamente 421 metros) e erro máximo de 0,5207% (aproximadamente 1 km) quando submetido a uma falta bifásica (tipo F-F).

No que se refere à sensibilidade dos algoritmos analisados às variações do tipo da falta, pôde-se constatar uma extrema robustez nos resultados do algoritmo de Jamali (1990), que apresentou um desvio padrão do erro de apenas $2,3520E-04\%$ do comprimento da linha (aproximadamente 0,5 metro).

Tal robustez não foi verificada no algoritmo de Girgis (1992), tendo este apresentado um desvio padrão do erro de 0,2176% do comprimento da linha (aproximadamente 435 metros).

A diferença nos resultados pode ser claramente verificada no gráfico 3. Enquanto o valor do erro na localização da falta no algoritmo proposto por Girgis varia significativamente, o erro apresentado pelo algoritmo de Jamali se mantém pequeno e praticamente constante.

4.1.3. Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha

Essa etapa tem por objetivo determinar a relação entre o erro nos parâmetros da linha e a precisão dos algoritmos. Para isso foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 10 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Monofásica (F-T);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** Variada em -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20 e +25 % dos valores originais gerados pela rotina *Constline*.
- **Resistência de falta:** 0,1 Ω .

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 8 e 9, e o gráfico do erro de localização em função da porcentagem de erro nos parâmetros é apresentado no gráfico 4.

Tabela 8- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).

Erro nos parâmetros (%)	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
+20	9,9084	0,0458	9,2724	0,3638
+15	9,8488	0,0756	9,4114	0,2943
+10	9,8815	0,0592	9,5724	0,2138
+5	9,9217	0,0392	9,7665	0,1167
0	9,9700	0,0150	9,9985	7,6742e-004
-5	10,0277	0,0138	10,2738	0,1369
-10	10,0961	0,0480	10,5997	0,2999
-15	10,1771	0,0886	10,9834	0,4917
-20	10,2722	0,1361	11,4347	0,7173

Fonte: Autoria própria.

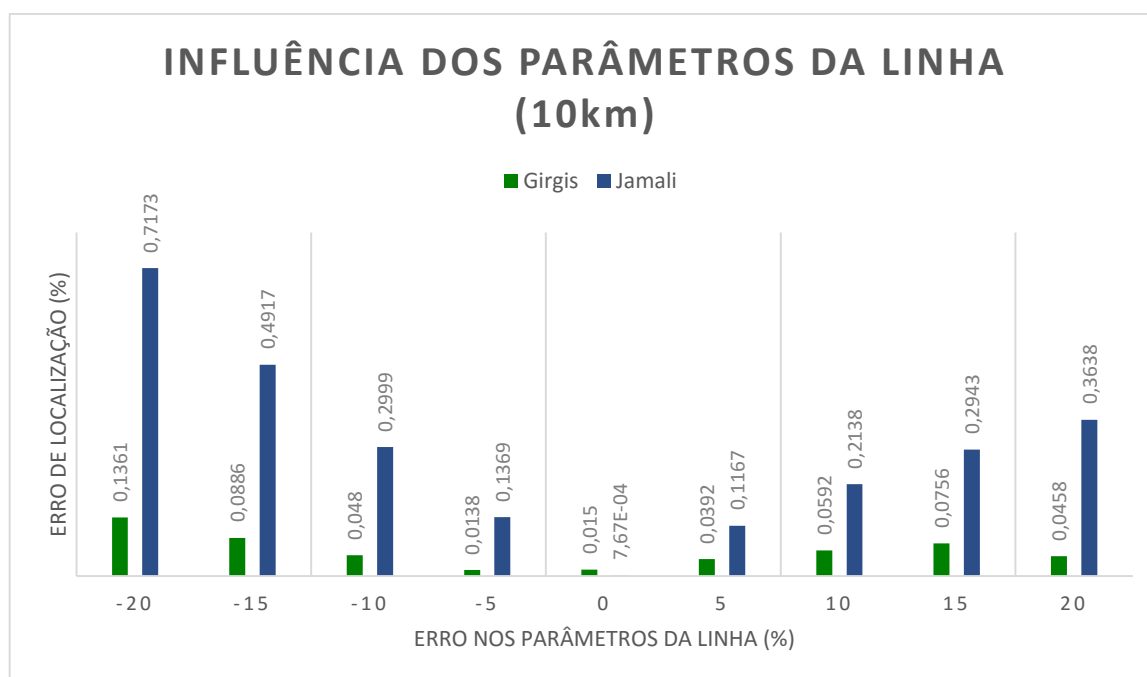


Gráfico 4- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que o algoritmo que apresentou os melhores resultados foi o proposto por Girgis (1992). Tal algoritmo foi capaz de localizar a falta com um erro médio de 0,0579% do comprimento da linha (aproximadamente 115 metros), contra 0,2928% (aproximadamente 585 metros) utilizando o algoritmo proposto por Jamali (1990).

Quanto ao erro máximo identificado nos testes, o algoritmo Girgis também se mostrou mais eficaz, cometendo um erro máximo de 0,1361% (aproximadamente 272 metros), quando submetido a uma simulação com os parâmetros da linha alterados em -20% dos valores originais. O algoritmo Jamali, por sua vez, apresentou erro máximo de 0,7173% (aproximadamente 1,4 km), também quando submetido a um erro de -20% nos valores dos parâmetros originais.

Tabela 9- Análise estatística da influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (10 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,0138	7,6742E-04
Erro máximo (%)	0,1361	0,7173
Erro médio (%)	0,0579	0,2928
Desvio padrão (%)	0,0383	0,2155

Fonte: Autoria própria.

Em relação à sensibilidade dos algoritmos quanto às alterações na precisão nos parâmetros distribuídos da linha, pode-se verificar, pela análise da tabela 9, que o algoritmo proposto por Girgis (1992) se mostrou mais estável. Este apresentou um desvio padrão do erro de 0,0383% (aproximadamente 76 metros), enquanto o desvio padrão do erro nos resultados do algoritmo Jamali foram de 0,2155% (aproximadamente 431 metros).

Pela análise do gráfico 4, pode-se observar também a forte relação entre a precisão nos parâmetros da linha e o desempenho do algoritmo proposto por Jamali (1990). Nota-se que este último apresenta um claro padrão em sua curva de erro, onde sua eficiência cai à medida que os valores dos parâmetros da linha se tornam menos precisos.

O mesmo padrão não repete nos resultados do algoritmo de Girgis. Embora este tenha tido variações de desempenho em função da imprecisão nos parâmetros da linha, houveram situações em que este desempenho foi até mesmo superior quando submetido a uma maior imprecisão nos parâmetros distribuídos. Um exemplo dessa situação pode ser observado no resultado obtido utilizando +15% de erro nos parâmetros, onde se obteve um erro de localização de 0,0756%, maior que 0,0458%, obtido utilizando uma imprecisão de +20%.

4.1.4. Influência da resistência de falta

O último item a ser analisado nesta seção se refere à influência da resistência da falta sobre a precisão dos algoritmos. Para isso foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 10 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Monofásica (F-T);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** 0 % de erro (mesmos valores dos parâmetros da linha gerados pela rotina *Constline*);
- **Resistência de falta:** Variada em 0,1; 5; 15; 25; 50; 75 e 100 Ω .

Pela análise dos resultados obtidos e expostos nas tabelas 10 e 11, assim como no gráfico 5, observou-se um desempenho do algoritmo proposto por Jamali (1990) superior ao do algoritmo proposto por Girgis (1992). Uma vez que o primeiro apresentou um erro médio de 3,7457E-03% do comprimento da linha (aproximadamente 7 metros), enquanto o segundo apresentou um erro médio de 0,3761% (aproximadamente 752 metros).

Tabela 10- Influência da resistência de falta (10 km).

Resistência de falta (Ω)	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
0,1	9,9700	0,0150	9,9985	7,6742e-004
5	10,0561	0,0280	9,9999	5,2430e-005
15	10,2378	0,1189	10,0036	0,0018
25	10,4271	0,2136	10,0060	0,0030
50	10,9344	0,4672	10,0102	0,0051
75	11,4893	0,7447	10,0138	0,0069
100	12,0901	1,0451	10,0172	0.0086

Fonte: Autoria própria.

O algoritmo Jamali também apresentou um erro máximo inferior ao encontrado nos resultados do algoritmo de Girgis. Enquanto o primeiro apresentou erro máximo de 8,6000E-03% (aproximadamente 17 metros), quando submetido a uma falta com resistência de 100 Ω , o segundo cometeu um erro máximo de 1,0451%

(aproximadamente 2 km), também quando submetido a uma falta com resistência de 100 Ω .

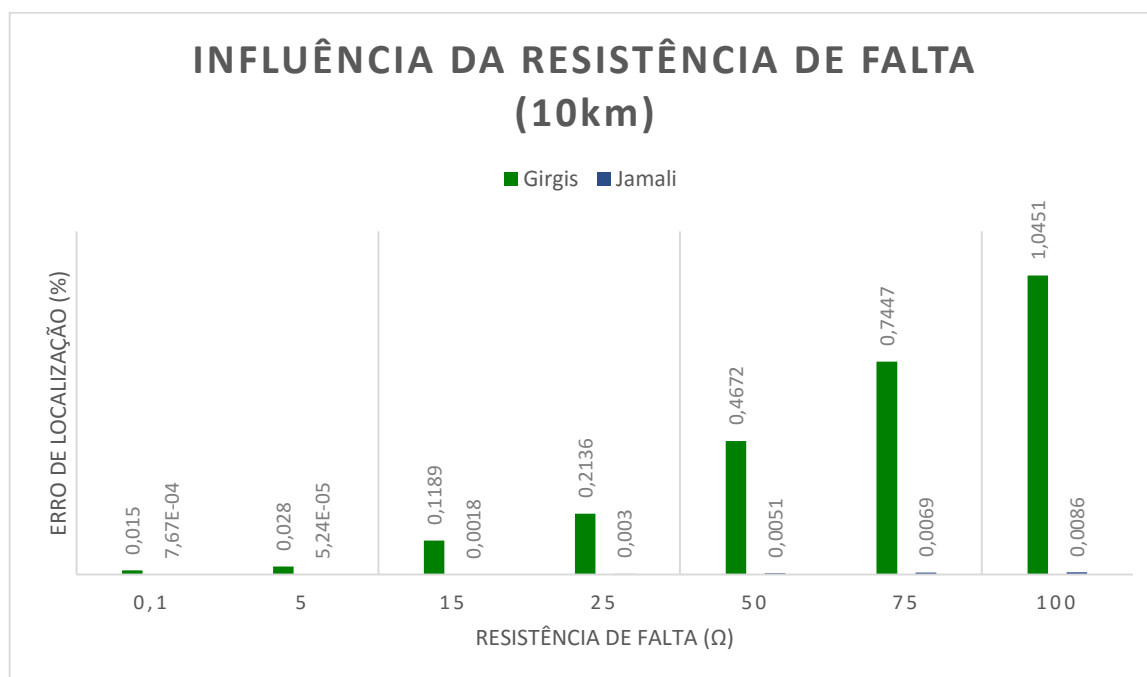


Gráfico 5- Influência da resistência de falta (10 km).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11- Análise estatística da influência da resistência de falta (10 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,0150	5,2430E-05
Erro máximo (%)	1,0451	8,6000E-03
Erro médio (%)	0,3761	3,7457E-03
Desvio padrão (%)	0,3949	3,2197E-03

Fonte: Autoria própria.

Com relação às alterações na precisão dos algoritmos, o proposto por Jamali (1990) se mostrou mais robusto, apresentando um desvio padrão do erro de 3,2197E-03% (aproximadamente 6 metros). Em contrapartida, o algoritmo proposto por Girgis (1992) apresentou maior fragilidade com relação à resistência da falta, apresentando um desvio padrão do erro de 0,3949% (aproximadamente 790 metros).

Pode-se observar, porém, pela análise do gráfico 5, uma similaridade entre os efeitos da resistência de falta sobre a precisão dos dois algoritmos. Isto porque ambos parecem apresentar uma precisão na localização da falta inversamente proporcional ao valor da resistência da falta.

4.2. CONSIDERANDO FALTAS A 150 km DO PRIMEIRO TERMINAL

Nesta etapa verificou-se novamente o erro de localização dos algoritmos LDF em função do tipo da falta, dos erros nos parâmetros distribuídos da linha e da resistência da falta, comparando-as com aquelas obtidas na subseção anterior. Assim, foi avaliado se tais erros seguem o mesmo padrão por toda a extensão da linha e, principalmente, se o algoritmo que apresentou melhores resultados nos testes anteriores continua mostrando desempenho superior para faltas situadas em outras localidades.

Para tal, os testes realizados anteriormente foram refeitos tomando como base faltas localizadas a 150 km do primeiro terminal.

4.2.1. Influência do tipo de falta

Afim de se confirmar a relação entre o tipo de falta e a precisão dos algoritmos, obtida anteriormente, foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 150 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Variada entre os tipos fase-terra (F-T), fase-fase (F-F), fase-fase-terra (F-F-T) e fase-fase-fase (F-F-F);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** 0 % de erro (mesmos valores dos parâmetros da linha gerados pela rotina *Constline*);
- **Resistência de falta:** 0,1 Ω .

Os resultados obtidos nessa fase de testes são expostos nas tabelas 12 e 13, e o comportamento da curva de erro de cada algoritmo pode ser observada pelo gráfico 6.

Tabela 12- Influência do tipo de falta (150 km).

Tipo da falta	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
F-T	149,2732	0,3634	150,0066	0,0033
F-F	150,2508	0,1254	150,0041	0,0021
F-F-T	149,6978	0,1511	150,0014	7,1312e-004
F-F-F	150,3982	0,1991	150,0014	7,1338e-004

Fonte: Autoria própria.

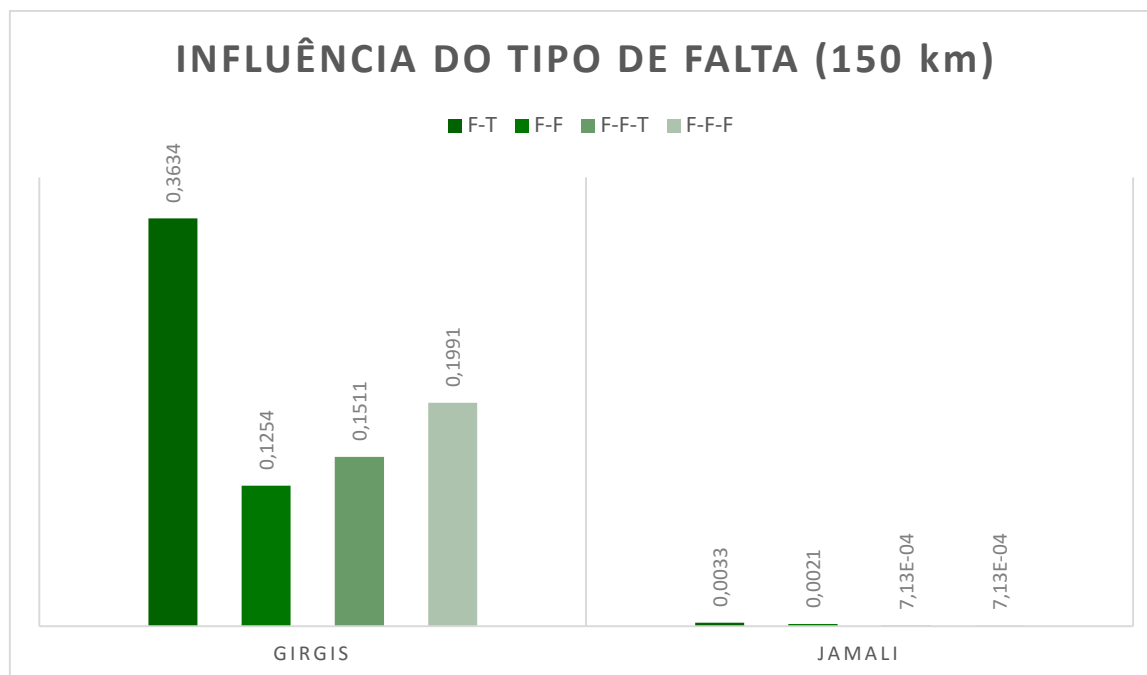


Gráfico 6- Influência do tipo de falta (150 km).

Fonte: Autoria própria.

Pela análise dos resultados, pode-se observar que a sensibilidade de cada algoritmo quanto ao tipo de falta varia em função do local onde esta falta ocorre.

Os resultados mostram que, para faltas ocorridas a 150 km do primeiro terminal, houve uma mudança no tipo de falta que mais afeta a precisão do algoritmo proposto por Girgis (1992). Este algoritmo, que apresentou maior sensibilidade a faltas bifásicas (F-F) na fase de testes anterior, agora mostra ter sua precisão mais afetada quando submetido a faltas monofásicas (F-T). Essa mudança já não foi identificada nos resultados do algoritmo Jamali, que se manteve apresentando mais fragilidade a faltas monofásicas (F-T) desde a primeira etapa de testes.

Entretanto, pode-se observar que, para faltas a 10 km, o erro médio apresentado pelo algoritmo Girgis foi maior que para faltas a 150 km (0,2108% no primeiro caso, contra 0,2097% no segundo), enquanto que o erro médio do algoritmo

Jamali aumentou de 4,8525E-04%, obtido na primeira etapa de testes, para 1,7066E-03% para testes com distância de falta de 150 km.

Tabela 13- Análise estatística da influência do tipo de falta (150 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,12540	7,1312 ^{E-04}
Erro máximo (%)	0,36340	3,3000 ^{E-03}
Erro médio (%)	0,20975	1,7066 ^{E-03}
Desvio padrão (%)	0,10689	1,2473 ^{E-03}

Fonte: Autoria própria.

Embora os resultados do algoritmo de Girgis tenham melhorado com faltas a 150 km, em comparação com os de faltas a 10 km, enquanto os obtidos pelo algoritmo de Jamali tenham piorado, este último se mostra ainda muito mais eficiente que o primeiro. Isto se mostra evidente, tanto pela observação do gráfico 6, quanto pelos dados da tabela 13, onde o algoritmo de Jamali apresentou um erro médio de 1,7066E-03%, contra 0,20975% apresentado pelo algoritmo de Girgis. O mesmo se pode dizer quanto à robustez, uma vez que o algoritmo de Girgis apresentou um desvio padrão do erro maior que o apresentado pelo algoritmo de Jamali, 0,10689% do primeiro contra apenas 1,2473E-03% do segundo.

4.2.2. Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha

Essa etapa tem por objetivo validar a relação entre o erro nos parâmetros da linha e a precisão dos algoritmos identificada anteriormente. Para isso foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 150 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Monofásica (F-T);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** Variada em -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20 e +25 % dos valores originais gerados pela rotina *Constline*.
- **Resistência de falta:** 0,1 Ω .

Nesta etapa pode-se constatar pelos resultados obtidos e apresentados nas tabelas 14 e 15, bem como pelo gráfico 7, a manutenção de um certo padrão nos resultados encontrados anteriormente, com faltas a 10 km do primeiro terminal.

Tabela 14- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).

Erro nos parâmetros (%)	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
+20	149,6813	0,1594	156,0703	3,0351
+15	149,5360	0,2320	154,7811	2,3905
+10	149,4561	0,2719	153,1949	1,5975
+5	149,3686	0,3157	151,6043	0,8022
0	149,2732	0,3634	150,0066	0,0033
-5	149,1695	0,4153	148,3970	0,8015
-10	149,0569	0,4716	146,7704	1,6148
-15	148,9346	0,5327	145,1237	2,4381
-20	148,8014	0,5993	143,4495	3,2753

Fonte: Autoria própria.

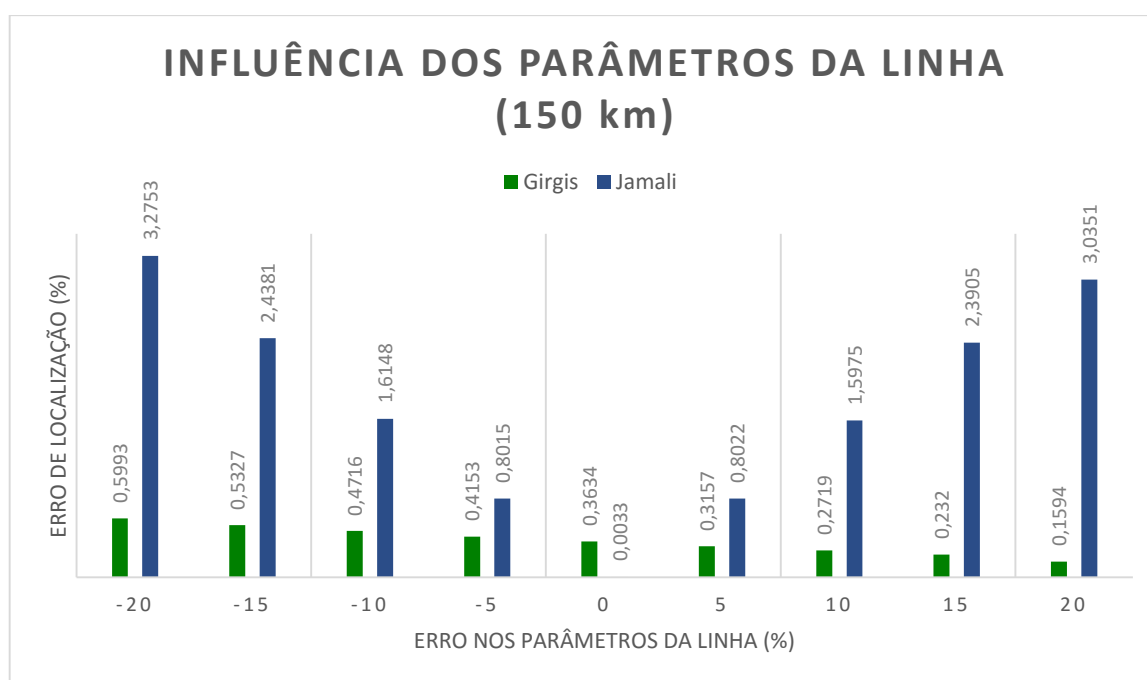


Gráfico 7- Influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, novamente, o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresentou um erro médio muito maior (1,7731% ou aproximadamente 3,5 km) em comparação com o erro médio obtido pelo algoritmo de Girgis (0,3735% ou aproximadamente 747 metros).

Tabela 15- Análise estatística da influência da precisão nos parâmetros distribuídos da linha (150 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,1594	3,3000E-03
Erro máximo (%)	0,5993	3,2753
Erro médio (%)	0,3735	1,7731
Desvio padrão (%)	0,1446	1,1038

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar também um aumento da sensibilidade do algoritmo Jamali quando comparados os resultados para faltas a 10 e a 150 km do primeiro terminal. Enquanto que, para faltas mais próximas, o algoritmo de Jamali apresentou um desvio padrão de erro de 0,2155% (aproximadamente 431 metros), para faltas mais distantes o mesmo algoritmo apresentou um desvio padrão de erro de 1,1038% (aproximadamente 2,2 km).

Em contrapartida, o algoritmo de Girgis se mostrou mais robusto à precisão nos parâmetros distribuídos da linha, mesmo para faltas mais distantes do primeiro terminal, apresentando desvio padrão do erro de 0,1446% do comprimento da linha de transmissão (aproximadamente 289 metros).

4.2.3. Influência da resistência de falta

O último item a ser reavaliado se refere à influência da resistência da falta sobre a precisão dos algoritmos. Para isso foram analisadas faltas com as seguintes configurações:

- **Distância da falta:** 150 km do primeiro terminal;
- **Tipo da falta:** Monofásica (F-T);
- **Percentual de erro nos parâmetros da linha:** 0 % de erro (mesmos valores dos parâmetros da linha gerados pela rotina *Constline*)
- **Resistência de falta:** Variada em 0,1; 5; 15; 25; 50; 75 e 100 Ω .

Como nas etapas anteriores, os resultados foram coletados e uma análise estatística foi feita a partir dos mesmos, afim de se verificar os erros máximos, mínimos e médios, bem como o valor do desvio padrão do erro, apresentados por

cada algoritmo estudado. Tais dados são expostos nas tabelas 16 e 17, e a curva do erro de localização em função da resistência da falta é apresentada no gráfico 8.

Tabela 16- Influência da resistência de falta (150 km).

Resistência de falta (Ω)	Girgis		Jamali	
	Distância Estimada (km)	Erro (%)	Distância Estimada (km)	Erro (%)
0,1	149,2732	0,3634	150,0066	0,0033
5	149,3040	0,3480	150,0067	0,0014
15	149,3630	0,3185	150,0064	0,0032
25	149,4169	0,2916	150,0058	0,0029
50	149,5292	0,2354	150,0046	0,0023
75	149,6099	0,1950	150,0039	0,0020
100	149,6592	0,1704	150,0034	0,0017

Fonte: Autoria própria.

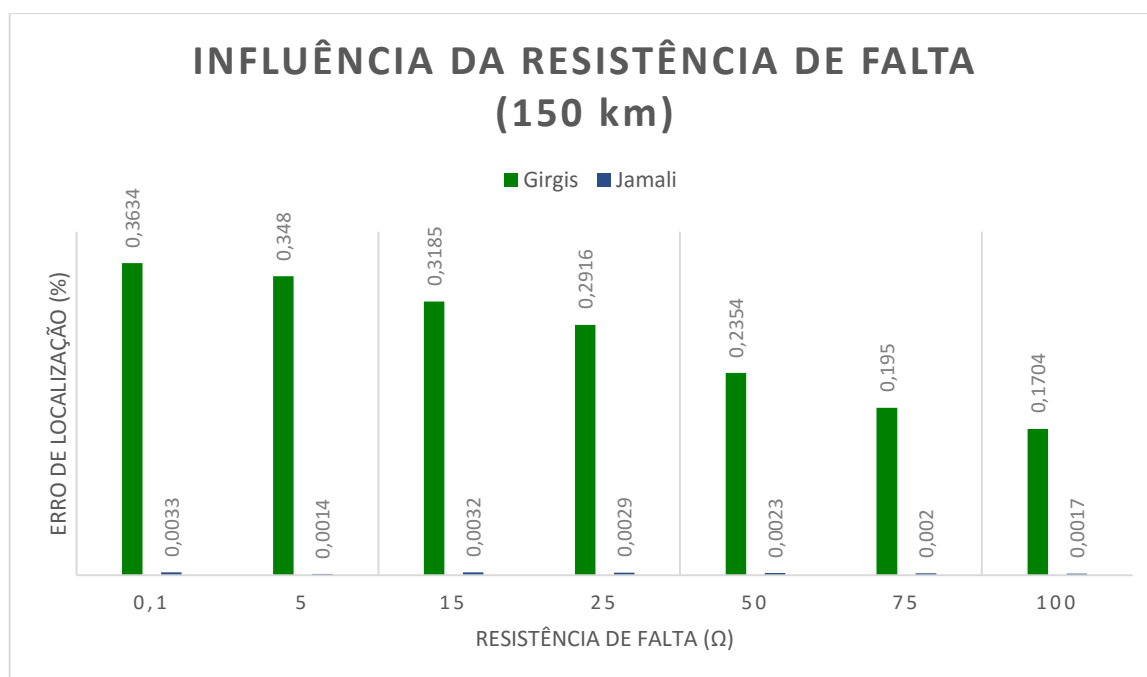


Gráfico 8- Influência da resistência de falta (150 km).

Fonte: Autoria própria.

Pela análise dos resultados pode-se verificar que houve uma inversão no padrão da curva de erro de localização com faltas localizadas a 150 km em comparação com a curva de erro para faltas a 10 km do primeiro terminal. O que se pode notar é que, ao contrário do que se verificou para faltas próximas ao terminal,

quando as faltas ocorrem a 150 km de distância o erro de localização dos algoritmos diminuiu com o aumento da resistência de falta.

Tabela 17- Análise estatística da influência da resistência de falta (150 km).

Variável analisada	Girgis	Jamali
Erro mínimo (%)	0,1704	1,4000E-03
Erro máximo (%)	0,3634	1,4000E-03
Erro médio (%)	0,2746	2,2667E-03
Desvio padrão (%)	0,0755	7,2296E-04

Fonte: Autoria própria.

Quanto à robustez dos algoritmos, o proposto por Jamali (1990) continua se mostrando mais robusto que aquele proposto por Girgis (1992). Apresentando um desvio padrão do erro de 7,2296E-04% do comprimento da linha (aproximadamente 1 metro), enquanto o algoritmo de Girgis apresentou um desvio padrão de 0,0755% (aproximadamente 151 metros).

4.3. RESUMO DOS RESULTADOS

Afim de sintetizar as informações apresentadas nessa seção e de simplificar a análise das mesmas, foi feito um resumo dos resultados indicando qual algoritmo se mostrou mais eficiente para cada item analisado. Tal resumo é exposto nas tabelas 18 e 19, sendo que a primeira se refere aos resultados obtidos quanto à Precisão dos algoritmos e a segunda quanto à Robustez.

Tabela 18- Análise comparativa quanto à precisão dos algoritmos.

Etapa de testes 1 – 10 km		
Elemento da falta variado	Girgis	Jamali
Distância da falta		✓
Tipo da falta		✓
Percentual de erro nos parâmetros da falta	✓	
Resistência da falta		✓
Etapa de testes 2 – 150 km		
Elemento da falta variado	Girgis	Jamali
Distância da falta		✓
Tipo da falta		✓
Percentual de erro nos parâmetros da falta	✓	
Resistência da falta		✓

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19- Análise comparativa quanto à robustez dos algoritmos.

Etapa de testes 1 – 10 km		
Elemento da falta variado	Girgis	Jamali
Distância da falta		✓
Tipo da falta		✓
Percentual de erro nos parâmetros da falta	✓	
Resistência da falta		✓
Etapa de testes 2 – 150 km		
Elemento da falta variado	Girgis	Jamali
Distância da falta		✓
Tipo da falta		✓
Percentual de erro nos parâmetros da falta	✓	
Resistência da falta		✓

Fonte: Autoria própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo comparativo entre os algoritmos localizadores de falta baseados em componentes de frequência fundamental propostos por Jamali (1990) e Girgis (1992), com o objetivo de identificar qual dentre eles apresentava maior precisão e robustez.

Os testes foram realizados em duas etapas, uma considerando faltas a 10 km do primeiro terminal, e outra considerando faltas a 150 km do primeiro terminal.

Pela análise dos resultados obtidos nestas duas etapas de testes e apresentados na seção anterior, pode-se fazer algumas considerações quanto ao algoritmo estudado que mais se destacou nos quesitos precisão e robustez. Tais considerações são apresentadas a seguir.

5.1. PRECISÃO

Para a avaliação do quesito precisão comparou-se os erros médios de cada algoritmo quando testados em diferentes configurações de faltas.

Pode-se verificar pela tabela 18 (apresentada no final da seção anterior) que, tanto na primeira etapa de testes quanto na segunda, o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresentou maior precisão em todas as situações testadas, exceto para situações em que os parâmetros distribuídos da linha são alterados. Nestes casos, o algoritmo proposto por Girgis (1992) se mostrou mais preciso.

Estes resultados podem ser explicados pelo fato da maior precisão do algoritmo proposto por Jamali (1990) ter origem justamente em sua maior fidelidade aos dados da linha de transmissão, uma vez que, ao contrário do algoritmo proposto por Girgis (1992), ele utiliza em seus cálculos fatores como a admitância shunt. Assim, é compreensível que imprecisões nesses parâmetros da linha afetem mais diretamente seu desempenho na localização da falta.

5.2. ROBUSTEZ

Para a avaliação do quesito robustez comparou-se os valores do desvio padrão do erro de cada algoritmo quando testados em diferentes configurações de faltas.

Pela análise da tabela 19 (apresentada no final da seção anterior) verificou-se que, em ambas etapas de testes, o algoritmo proposto por Jamali (1990) apresentou uma robustez superior ao proposto por Girgis (1992) em todas as situações testadas, exceto para situações em que os parâmetros distribuídos da linha foram alterados.

A explicação para essa maior sensibilidade do algoritmo de Jamali quanto à precisão nos parâmetros da linha também pode ser explicada pelo fato desse algoritmo utilizar em seus cálculos um modelo de linha de transmissão longa.

5.3. CONCLUSÕES E RESSALVAS

Tomando por base os resultados obtidos e apresentados na seção 4 e nas tabelas 18 e 19, é possível concluir que o algoritmo de localização de faltas proposto por Jamali (1990) é mais eficiente e, dentre os dois algoritmos estudados, é aquele que deveria ser escolhido para a maioria dos cenários das linhas de transmissões.

Entretanto, é importante enfatizar que, tal algoritmo, quando submetido a condições de alta imprecisão nos parâmetros distribuídos da linha de transmissão, apresentou elevado erro médio e chegou a apresentar erro de 3,2753% do comprimento total da linha (aproximadamente 6,5 km), quando submetido a uma falta a 150 km do primeiro terminal e -20% de erro nos parâmetros da linha.

O algoritmo proposto por Girgis (1992), por sua vez, embora não tenha apresentado o melhor resultado em todas as avaliações, não cometeu em nenhuma das configurações de falta testadas erro maior que 1,0451% (aproximadamente 2 km), erro este obtido sob uma falta a 10 km do primeiro terminal e 100 Ω .

5.4. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a importância de se utilizar um algoritmo de localização de faltas eficiente e adequado para o cenário onde está inserida a linha de transmissão, uma continuidade para este trabalho pode ser a elaboração de um outro estudo comparativo, analisando o desempenho dos algoritmos aqui estudados em relação ao desempenho de algoritmos baseados em componentes de alta frequência.

REFERÊNCIAS

FERREIRA, G. D.; GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; NETTO, A. S.. **Formulação Unificada Para Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição Baseada na Impedância Aparente**. 2012. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012, Goiânia. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.

GIRGIS, A. A.; HART D. G. ; PETERSON W. L. **A new fault location technique for two- and three-terminal lines**. 1992. Department of Electrical and Computer Engineering, Clemson University, Clemson, South Carolina, 1992.

GONÇALVES, L. A. **Um estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

HERMANNNS, L. **Corrente de curto-circuito no sistema de interligação da pequena central hidrelétrica Tambaú à linha de transmissão de 69 kV**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Juí, 2010.

KAWADY, T.; STENZEL, J. **Investigation os practical problems for digital fault location algorithms based on EMTP simulation**. 2002. In : IEEE/PES TRANSMISSION DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION : ASIA PACIFIC, 2002, Yokahama. Proceedings... Piscataway :IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE, 2002. V.1, p. 118-123.

LIMA D. A. C. **Localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica baseada na impedância aparente: Algoritmo utilizando dados de um terminal**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MAGALHÃES, C. H. N.; GOUVÊA, M. R.; SILVA, F. A. T.; TAHAN, C. M. V.; ARAUJO FILHO, L. G. C. **Avaliação do custo social de interrupção do fornecimento de**

energia elétrica do lado da demanda no estado de São Paulo. 2001. XVI - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GPC/019, Campinas-SP, 2001.

PARENTONI, M. F. C. **Localização de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão de três terminais – abordagem baseada em decomposição wavelet.** 2006. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajuba, Itajuba, 2006.

SILVA, M. **Implementação de um localizador de faltas híbrido para linhas de transmissão com três terminais baseado na Transformada Wavelet.** 2008. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. **A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part I – Fourier Transformation method.** 1981. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-100, n.3, p. 1316-1322.

WEDEPOHL, L.M. **Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in poly-phase systems.** 1963. *Proc. IEE*, 110, (12), pp. 22W2212

TAVARES, M. **Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program.** 2003. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BRASIL – ECONOMIA E POLITICA. **“Por que hidrelétricas (com reservatório) são a melhor opção para o Brasil?”.** Disponível em <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/07/10/por-que-hidreletricas-com-reservatorio-sao-a-melhor-opcao-para-o-brasil/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.