

LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO

THIAGO MATOZINHOS DE SOUZA

Orientador:
Clever Sebastião Pereira Filho

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica, como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG
2007**

À Deus pelos dons concedidos,
pela luz na caminhada,
pela certeza na vitória.

Agradecimentos

Ao professor Clever pela orientação, amizade e dedicação ao longo dos últimos anos.

Aos meus pais, irmão e noiva por todo amor, carinho e dedicação ao longo de todos os momentos de minha vida.

Aos colegas do Protlab pela amizade, incentivo e ajuda no dia a dia.

Aos familiares, amigos e àqueles que de uma forma ou de outra contribuíram no decorrer desta etapa.

Muito obrigado.

Resumo

A localização de faltas em linhas de circuito duplo está, atualmente, em um estágio de desenvolvimento inferior se comparado aos progressos obtidos pelos métodos para linhas de circuito simples. A localização de faltas para estas linhas pode ser consideravelmente influenciada pelo acoplamento mútuo entre os circuitos. A maioria dos métodos de localização de faltas existentes não foi desenvolvido levando-se em conta a existência do segundo circuito. Desta forma, usualmente tem-se uma modelagem incompleta, o que leva o algoritmo a errar na estimativa do local de falta, quando aplicado a uma linha de circuito duplo. Em outros casos, utiliza-se uma modelagem muito simples das linhas, fato que também leva a um localizador com precisão indesejável, especialmente quando são utilizados em linhas relativamente longas, comuns no Brasil.

Neste trabalho será apresentado um estudo de uma técnica de localização automática de faltas em linhas de transmissão de circuito duplo, com a utilização de dados de tensão e corrente de dois terminais de ambos os circuitos. A metodologia utilizada propõe o uso de matrizes que transformam linhas de circuito duplo em dois circuitos perfeitamente desacoplados, denominados respectivamente circuito aditivo e circuito diferencial. Em seguida, aplica-se o método de Johns & Jamalli para linhas de circuito simples utilizando como parâmetros de entrada os dados pertencentes ao circuito diferencial, sendo original esta abordagem no domínio da frequência. Além do local da falta, será apresentado o Fator de Desconfiança, um outro parâmetro para se inferir a qualidade do resultado obtido.

Para verificar o desempenho do sistema computacional desenvolvido no Matlab foram utilizados arquivos obtidos do software de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP. As simulações foram feitas com variação dos ajustes de distância do ponto de falta, tipo de falta, ângulo de incidência, resistência de falta e capacidade das fontes equivalentes terminais. Adicionalmente foi verificado o desempenho do sistema frente a um caso real do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os resultados obtidos mostraram que a metodologia aplicada melhora significativamente as estimativas do local de falta quando comparado com os resultados obtidos pelo método original de Johns & Jamalli para linhas de circuito simples ignorando-se o circuito são.

Abstract

Fault location on parallel lines still has an inferior level of development if compared to the obtained progress on single circuit lines. The fault location for double circuit or parallel lines can be considerably influenced by the mutual coupling between circuits. The majority of methods for fault location were not developed considering the existence of the second circuit. In such way, there is an incomplete modeling, which leads the algorithm to a wrong fault's incidence point estimative when used on a double circuit line. In other cases, a very simple lines' model is used, that also leads to a locator with undesirable precision, especially when dealing with relatively long lines, typically found in Brazil.

This dissertation will present a study of an automatic fault location technique on double circuit transmission lines, with the use of voltage and current data from two terminals of both circuits. The developed methodology uses matrix decomposition that transforms double circuit lines into two decoupled circuits, called additive circuit and differential circuit. The next step consists on using single circuit Johns & Jamalli's method on differential circuit's data. It is an original approach in the frequency domain. Beyond fault's incidence point, the Unreliable Factor will also be presented; witch is another parameter that lets infer the quality of the results.

The developed routines had been implemented through Matlab software. The fundamental characteristics of the fault location algorithm was determined by testing the data generated by ATP, a transient simulator program. A wide range of line parameters was evaluated such as fault position, type, and resistance; source impedance ratio and others. A real data case was also used.

The results showed that the developed methodology is able to produce a better fault location estimative when compared to the original Johns & Jamalli's single circuit method with the non-faulted circuit ignored.

Sumário

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O NOVO MODELO REGULATÓRIO	1
1.2. A REMUNERAÇÃO DO NEGÓCIO TRANSMISSÃO	2
1.3. OS DESAFIOS ENFRENTADOS PELO EMPREENDEDOR	3
1.4. AS LINHAS DE CIRCUITO DUPLO	5
1.5. TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	6
1.6. AS LINHAS DE CIRCUITO DUPLO E OS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALTAS FASORIAIS	7
1.7. OBJETIVOS	7
1.8. DESCRIÇÃO DO TRABALHO	8
2. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. POSSÍVEIS FONTES DE ERRO	9
2.3. FAMÍLIAS DE TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	11
2.4. ABORDAGENS PARA LINHAS DE CIRCUITO DUPLO	13
2.5. O ALGORITMO DE JOHNS & JAMALLI	21
3. A METODOLOGIA DESENVOLVIDA	25
3.1. FILOSOFIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	25
3.2. A IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	26
3.2.1. ENTRADAS DE DADOS	26
3.2.2. ROTINAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO	30
3.2.3. ESTIMAÇÃO FASORIAL	33
3.2.4. DETERMINAÇÃO DO INSTANTE DA FALTA E A IDENTIFICAÇÃO DO SEU TIPO	38
3.2.5. O MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	46
3.2.6. LOCALIZAÇÃO DA FALTA	51
3.3. O CASO REAL	52

4. RESULTADOS	55
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2. RESULTADOS DE CASOS SIMULADOS	57
4.3. RESULTADO DO CASO REAL	84
4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	92
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	96
5.1. CONCLUSÃO	96
5.2. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Receita Anual Permitida.....	5
Tabela 2.1 - Coeficientes de Divisão usados para a determinação dos sinais no laço de falta.....	17
Tabela 2.2 - Coeficientes de Peso usados para a estimação da queda de tensão na resistência de falta.....	17
Tabela 3.1 - Conjunto de parâmetros variados nas simulações.....	28
Tabela 3.2 - Características construtivas por circuito.....	53
Tabela 3.3 - Características elétricas.....	54
Tabela 3.4 - Características elétricas: Mútua entre circuitos.....	54
Tabela 4.1 - Parâmetros da Simulação e Resultados.....	57
Tabela 4.2 - Parâmetros da Simulação e Resultados.....	64
Tabela 4.3 - Resultados obtidos pelo localizador proposto e os resultados obtidos desprezando-se a presença do circuito são.....	72
Tabela 4.4 - Resultados obtidos pelo localizador proposto.....	84
Tabela 4.5 - Resultados obtidos desprezando-se a presença do circuito são.....	84
Tabela 4.6 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 0 \Omega$	92
Tabela 4.7 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 10 \Omega$	92
Tabela 4.8 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 50 \Omega$	92
Tabela 4.9 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 100 \Omega$	93
Tabela 4.10 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 0 \Omega$	93
Tabela 4.11 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 10 \Omega$	93
Tabela 4.12 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 50 \Omega$	93
Tabela 4.13 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 100 \Omega$	93
Tabela 4.14 - Comparativo do desempenho do algoritmo: Resultados Globais.....	94

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Famílias de técnicas de localização de faltas.....	11
Figura 2.2 - Circuito Equivalente de Seqüência Positiva.....	15
Figura 2.3 - Circuito Equivalente de Seqüência Negativa.....	16
Figura 2.4 - Circuito Equivalente de Seqüência Zero.....	16
Figura 2.5 - Modelo de Linha Paralela proposto [20].....	20
Figura 2.6 - Linha monofásica em falta.....	21
Figura 2.7 - Evolução da Solução do Método de Johns & Jamalli.....	22
Figura 2.8 - Configuração da Linha de Transmissão.....	23
Figura 3.1 - Fluxograma do processamento dos dados.....	25
Figura 3.2 - Topologia simulada no ATP.....	26
Figura 3.3 - Geometria da Linha utilizada nas simulações.....	28
Figura 3.4 - Processo de subamostragem.....	31
Figura 3.5 - Dado Original: Corrente da fase A do circuito sob falta AT.....	32
Figura 3.6 - Dado Filtrado: Tensão da fase A do circuito sob falta AT.....	33
Figura 3.7 - Curva original versus Curva estimada pelo Método dos Erros Mínimos Quadrados.....	38
Figura 3.8 - Janelas de dados usadas nas estimação fasorial.....	40
Figura 3.9 - Evolução temporal do monitor de transitórios de tensão para uma falta AT.....	42
Figura 3.10 - Evolução temporal do monitor de transitórios de corrente para uma falta AT.....	43
Figura 3.11 - Exemplo didático de dados não sincronizados.....	45
Figura 3.12 - Fluxograma do algoritmo desenvolvido.....	50
Figura 3.13 - Distribuição acumulada da solução do método proposto.....	51
Figura 3.14 - Evolução temporal da solução da Figura 3.13.....	52
Figura 3.15 - Estruturas típicas da LT sob estudo.....	53
Figura 3.16 - Croqui da LT.....	54
Figura 4.1 - Obtenção do Local da Falta e do Fator de Desconfiança.....	56
Figura 4.2 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 1.....	58
Figura 4.3 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 1.....	58
Figura 4.4 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 1.....	59
Figura 4.5 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 1.....	59
Figura 4.6 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 2.....	60
Figura 4.7 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 2.....	60
Figura 4.8 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 2.....	61
Figura 4.9 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 2.....	61
Figura 4.10 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta....	62
Figura 4.11 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta. 63	
Figura 4.12 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.....	64
Figura 4.13 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 1.....	65
Figura 4.14 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 1.....	65
Figura 4.15 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 1.....	66
Figura 4.16 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 1.....	66
Figura 4.17 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 2.....	67

Figura 4.18 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 2.	67
Figura 4.19 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 2.	68
Figura 4.20 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 2.	68
Figura 4.21 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta....	69
Figura 4.22 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta. 70	
Figura 4.23 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.	71
Figura 4.24 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE1 do Circuito 1.	85
Figura 4.25 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE1 do Circuito 1.	85
Figura 4.26 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE2 do Circuito 1.	86
Figura 4.27 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE2 do Circuito 1.	86
Figura 4.28 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE1 do Circuito 2.	87
Figura 4.29 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE1 do Circuito 2.	87
Figura 4.30 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE2 do Circuito 2.	88
Figura 4.31 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE2 do Circuito 2.	88
Figura 4.32 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta....	89
Figura 4.33 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta. 90	
Figura 4.34 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.	91
Figura 4.35 - Distribuição acumulada da solução para o caso real.....	91

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. *O novo modelo regulatório*

Desde meados da década de 90, o setor elétrico brasileiro vem sofrendo uma profunda reestruturação. Como principais mudanças podem-se citar a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a segmentação do setor em Geração, Transmissão e Distribuição.

Neste contexto, um novo conceito de concessão de serviço público de transmissão surge. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) passa a ser o contratante das concessionárias de transmissão através dos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST). Cabe ao ONS firmar os Contratos de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) com os demais agentes, consumidores ou concessionários de geração, que estejam diretamente ligados à Rede Básica, formada pelas linhas de transmissão de tensão superior a 230 kV. O ONS também é o responsável por informar aos usuários o valor do pagamento que os mesmos devam fazer às transmissoras. Cabe ainda ao ONS a operação otimizada do sistema. Desta forma, as concessionárias de transmissão não possuem o controle da quantidade de energia transportada por suas linhas. Sendo assim, a remuneração que elas auferem torna-se um valor fixo pela disponibilidade do ativo e não pela forma de seu uso.

Ao permitir que vários concessionários de transmissão atuem em uma mesma área, o novo modelo levou a uma acirrada competição pelas concessões, pois a

construção de uma nova linha implica na realização de um leilão onde vence quem oferece a menor receita fixa para construção e operação da nova linha durante um horizonte de 30 anos de duração da concessão.

No modelo de prestação de serviço desverticalizado, faz-se necessária a definição de padrões de qualidade para cada segmento, objetivando a otimização global da prestação dos serviços, de forma que se possa caracterizar a responsabilidade específica de cada agente dentro da cadeia e perante aos demais agentes. Coube à ANEEL o desafio de criar uma regulamentação para reger o negócio Transmissão. A solução adotada foi a criação de padrões que mensurassem o desempenho coletivo do sistema tais como índices que medem a frequência e a duração das interrupções do serviço. Da mesma forma, estes índices foram individualizados por concessão. Objetiva-se assim um maior esforço dos concessionários para a melhoria dos serviços, pois imputa uma perda de receita a cada interrupção superior a um minuto dos serviços prestados, em especial para interrupções não programadas.

1.2. A remuneração do negócio Transmissão

Conforme a cláusula 26 do CPST [1], a remuneração final mensal da concessionária dar-se-á da seguinte forma:

$$Receita\ mensa\ =\ Pagamento\ Base\ +\ Parcela\ Variável \quad (1.1)$$

O Pagamento Base (PB) é o valor do lance vencedor do leilão. A Parcela Variável (PV) é calculada da seguinte forma:

$$PV = \frac{PB}{24 \times 60 \times D} \cdot Kp \cdot \left(- \sum_{i=1}^{NP} DDP_i \right) + \frac{PB}{24 \times 60 \times D} \cdot \left(- \sum_{i=1}^{NO} Ko_i \cdot DOD_i \right) \quad (1.2)$$

Onde:

DDP: Duração em minutos de cada desligamento programado;

DOD: Duração em minutos de cada um dos outros desligamentos;

Kp: Fator para desligamentos programados = $Ko/15$;

Ko_i: Fator para outros desligamentos. Até 300 minutos Ko_i=150, após este tempo este fator é reduzido a Ko_i/15;

NP: Número de desligamentos programados;

NO: Número de outros desligamentos;

D: Número de dias do mês.

Fica evidente que a indisponibilidade de uma linha pode acarretar em sérios prejuízos econômicos à concessionária. Dentro deste novo contexto, quando da ocorrência de uma falta, é de extremo interesse dispor de uma ferramenta que permita identificar de forma rápida e precisa o local do sistema elétrico da concessionária que está com defeito, de forma a reduzir ao máximo o tempo de restabelecimento.

Encontra-se sob consulta pública (043/2005) a Regulamentação da qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica. A ANEEL busca, com esta nova regulamentação, metodologias de cálculo da parcela variável mais aderentes à realidade do setor.

1.3. Os desafios enfrentados pelo empreendedor

As linhas de transmissão são as partes do sistema elétrico que apresentam maior dificuldade para manutenção e monitoramento devido à sua extensão e ao ambiente em que se encontram. Estas linhas são formadas por um número elevado de estruturas, muitas das quais localizadas em regiões de difícil acesso e sujeitas a todo tipo de intempéries, tais como: descargas atmosféricas, vendavais, queimadas, vandalismo, acidentes ocasionados por terceiros, entre outros. Estes fatores são diretamente responsáveis pela maioria das interrupções não programadas do serviço das linhas de transmissão.

Uma característica peculiar do sistema elétrico brasileiro é o grande número de linhas de transmissão de extensão elevada. Em muitos casos, nossas linhas passam por terrenos muito acidentados, de altos índices cerâmicos e elevadas resistividades de solo. Tais fatos aumentam ainda mais a possibilidade de falhas.

A tarefa de localização “visual” dos defeitos é muito complicada. As características tropicais do clima brasileiro provocam um maior número de ocorrências em horários e locais adversos às tarefas de localização visual e reparo. Estas ocorrências usualmente ocorrem em finais de tarde ou durante a noite, com

precárias condições de iluminação, juntamente com trovoadas e tempestades em locais de difícil acesso, como picos de morros, dificultando ou mesmo impedindo a sua rápida e efetiva localização pelas equipes de manutenção das empresas concessionárias.

Segundo dados do Departamento de Engenharia de Construção e Manutenção da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) [2], analisando-se o tempo médio de restabelecimento de linhas (TMR), observou-se que para cada 10 horas de TMR, cerca de 60% desse tempo era gasto na localização de faltas, 30% no reparo e 10% no restabelecimento. Estes dados demonstram a necessidade de se desenvolver meios que agilizem a localização dessas falhas.

Neste cenário fica óbvia a importância da localização de faltas. A minimização da necessidade de inspeção visual, seja por terra ou pelo ar através de helicópteros, acarreta inúmeras vantagens. Em razão da extensão das linhas, da topologia dos terrenos e das condições de visibilidade, na maioria das vezes, durante ou logo após tempestades, os serviços de inspeção visual se tornam onerosos e lentos para as concessionárias. Faz-se necessário manter equipes de eletricitistas e engenheiros de plantão, além dos inúmeros equipamentos imobilizados associados a estas equipes, tais como veículos, binóculos infravermelhos de alta precisão, equipamentos de segurança, dentre outros. Isto aumenta o tempo e o custo do reparo da linha. É importante dispor de um sistema que execute automaticamente a localização, fornecendo uma estimativa do local da falta com rapidez e precisão, pois desta forma o acesso a este local será mais rápido, diminuindo os custos associados ao reparo e à perda de receita.

Mesmo em faltas temporárias, onde não há interrupção no funcionamento da linha, a localização pode atuar preventivamente, identificando possíveis pontos fracos provocados pelas faltas e evitando futuras faltas permanentes. A rápida localização do ponto de defeito na linha de transmissão e conseqüente reparo implicam, em última análise, na melhoria da qualidade da energia fornecida ao consumidor, com conseqüente aumento da sua satisfação. No que se refere à empresa, implicará em uma maximização da receita e na efetiva redução dos custos

operacionais, ou seja, custos com pessoal e equipamento imobilizado. Para o sistema elétrico brasileiro tem como consequência a diminuição de risco de colapso e maior confiabilidade.

1.4. As linhas de circuito duplo

Pode-se dividir as linhas de transmissão em dois grandes grupos: o primeiro constituído por linhas subterrâneas de cabos isolados usualmente multiplexados e o segundo constituído por linhas de transmissão aéreas de cabos nus. Dentro deste segundo grupo encontram-se ainda subdivisões, como linhas de corrente contínua e as de corrente alternada. No que se refere à parte estrutural, existem as linhas de circuito simples, em que cada torre possui apenas um conjunto de fases, e as linhas de circuito duplo, com dois conjuntos de fase.

O quão representativo é o uso de linhas de circuito duplo frente às demais configurações possíveis? Para responder a esta pergunta é adequado basear-se nos dados contidos no anexo II da nota técnica número 024/2004 da ANEEL que trata da atualização da composição da Rede Básica do sistema elétrico interligado e suas conexões, bem como a relação das respectivas parcelas de Receita Anual Permitida e Encargos Anuais vinculados [3]. Para o ano de 2004, a Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) possuía ativos conforme a tabela abaixo:

Tabela 1.1 - Receita Anual Permitida

	Tensão	Ativos		Comprimento		Receita Anual Permitida	
	kV	#	%	km	%	R\$	%
Circuito Duplo	230	7	9,1	124,628	2,0	17.213.286,08	5,8
Circuito Duplo	345	12	15,6	192,161	3,2	11.216.142,00	3,8
Circuito Duplo	440	5	6,5	1553,865	25,5	102.143.891,94	34,3
Circuito Duplo	230 a 440	24	31,2	1870,654	30,7	130.573.320,02	43,9
Todas as Linhas	230 a 500	77	100	6099,267	100	297.515.496,09	100

Pela observação da Tabela 1.1 fica evidente que as linhas de circuito duplo são responsáveis por grande parte da receita da CTEEP. Embora este seja um exemplo pontual e sua generalização não seja realista, os volumes financeiros envolvidos são de grande relevância, mesmo que para outras empresas a participação na receita das linhas de circuito duplo seja bem menor. Deve-se ressaltar também que estes dados são referentes apenas à rede básica. A participação percentual da configuração de circuito duplo nas redes de distribuição é bem maior que a da rede básica, especialmente em 138 kV.

1.5. Técnicas de Localização de Falhas

No contexto deste trabalho, chama-se falta qualquer evento anormal ao funcionamento da linha de transmissão. No objeto de estudo desta dissertação, esta palavra também será sinônimo de curto circuito. Os métodos de localização automática de faltas em linhas de transmissão podem ser divididos em dois grupos:

- Métodos de Localização por Ondas Viajantes;
- Métodos Fasoriais.

O primeiro grupo se baseia no fato de, na ocorrência de uma falta, ondas de surto se propagarem pela linha de transmissão. Pelos tempos de chegada do surto nas extremidades da linha pode-se inferir o local de ocorrência da falta. Maiores detalhes desta família de métodos podem ser encontrados na referência [4].

Com o advento da tecnologia digital, muitas facilidades foram incorporadas ao serviço de proteção elétrica, dentre elas a oscilografia, executada pelos próprios relés ou por registradores digitais de perturbação (RDP), tornando disponíveis dados de tensão e corrente para a equipe de engenharia. Os métodos fasoriais fazem uso dos dados das oscilografias de tensão e corrente de um ou mais terminais da linha de transmissão. Estes dados, em conjunto com alguma forma de modelagem da linha de transmissão, permitem a localização da falta. Maiores detalhes desta família de métodos podem ser encontrados em [5] e [6].

1.6. As linhas de circuito duplo e os métodos de localização automática de faltas fasoriais

A localização automática de faltas em linhas de circuito duplo está, atualmente, em um estágio de desenvolvimento inferior se comparado aos progressos obtidos pelos métodos para linhas de circuito simples.

A localização de faltas para estas linhas pode ser consideravelmente influenciada pelo acoplamento mútuo entre os circuitos. Dependendo do sentido da corrente no circuito “são”, o localizador pode subestimar ou sobreestimar o local da falta [7]. A maioria dos métodos de localização de faltas existentes não foi desenvolvido levando-se em conta a existência do segundo circuito. Desta forma, usualmente, tem-se uma modelagem incompleta o que leva o algoritmo a errar na estimativa do local de falta quando aplicado a uma linha de circuito duplo. Em outros casos, utiliza-se uma modelagem muito simples das linhas, fato que também leva a estimativas com precisão indesejável, especialmente quando são utilizados em linhas relativamente longas.

O grande desafio deste trabalho torna-se encontrar uma forma de adaptar a um método disponível na literatura a influência das impedâncias mútuas existentes entre os circuitos da linha de transmissão.

1.7. Objetivos

Neste trabalho é apresentado um estudo de uma técnica de localização de faltas em linhas de transmissão de circuito duplo, com a utilização de dados de tensão e corrente dos dois terminais de ambos os circuitos, sendo que a metodologia desenvolvida é original do ponto de vista de ser aplicada no domínio da frequência.

As rotinas desenvolvidas foram implementadas através do software Matlab [8]. Buscou-se simular um sistema computacional autônomo de localização de faltas, não se limitando apenas ao método de localização. As rotinas desenvolvidas podem ser divididas em dois grupos funcionais: rotinas de pré-processamento dos dados,

necessárias para se obter um melhor desempenho do algoritmo, e as rotinas de localização, referentes à estimação do local de ocorrência da falta.

Para verificar o desempenho do sistema computacional desenvolvido, foram utilizados arquivos obtidos do software de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP. As simulações foram feitas com variação dos ajustes de distância do ponto de falta, tipo de falta, ângulo de incidência, resistência de falta e capacidade das fontes (SIR), que é definido como o valor absoluto da razão entre as impedâncias das fontes equivalentes local e remota, além de um caso real.

Este trabalho não tratou das linhas paralelas não transpostas porque a transposição perfeita das linhas pode ser assumida, sem perda considerável de precisão nas estimativas [9].

Com a finalidade de se estabelecer uma comparação, implementou-se uma abordagem alternativa para a solução do problema. Nela, a linha de transmissão de circuito duplo foi tratada como uma linha de circuito simples ao se ignorar a existência do circuito que não se encontra sob falta, ou, em outras palavras, ao se ignorar a existência do circuito “são”.

1.8. Descrição do trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro partes, além do capítulo introdutório.

No capítulo dois será feita uma breve revisão dos métodos de localização de faltas, indicando as principais famílias de técnicas, possíveis fontes de erro e as abordagens comumente adotadas para linhas de circuito duplo.

O terceiro capítulo descreve a metodologia desenvolvida. Todo o fluxo de dados, desde os parâmetros de entrada até a interpretação dos resultados de saída, foi abordado neste capítulo. Nele, também se encontram descritos como foram criados os casos simulados e os parâmetros do caso real utilizado.

Os resultados do algoritmo serão apresentados no capítulo quatro, onde também será feita uma breve análise das localizações obtidas.

No capítulo cinco serão apresentadas as conclusões. Neste capítulo também serão indicadas as propostas de continuidade deste trabalho.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO

2.1. Introdução

As faltas em linhas de transmissão de energia elétrica são detectadas e isoladas pelos seus sistemas de proteção. A partir do momento em que uma falta é extinta, o tempo de restabelecimento da operação da linha pode ser reduzido caso a localização da falta seja efetuada de modo rápido e confiável.

A referência [7] apresenta uma ampla revisão sobre os métodos de localização de faltas, indicando as abordagens tradicionais a este problema, podendo-se citar os métodos de localização fasoriais que utilizam dados de um terminal, os que utilizam dados de dois terminais e os métodos de ondas viajantes.

2.2. Possíveis fontes de erro

Infelizmente nenhum método de localização é imune a uma série de situações corriqueiras que podem impactar negativamente na estimativa do local da falta. Cada método pode ser mais ou menos influenciado pelos seguintes fatores:

- Efeito Reatância que é a combinação da corrente de carga com a corrente de falta, o que faz com que uma falta devida a um elemento de natureza resistiva possa ser vista como uma impedância e não uma resistência de falta;
- Identificação incorreta do tipo de falta;
- Influência do acoplamento mútuo de seqüência zero em linhas de circuito duplo;
- Incertezas a respeito dos parâmetros da linha de transmissão, em especial os parâmetros de seqüência zero, cujos valores são afetados pela resistência do solo, além dos mesmos variarem ao longo da linha e serem fortemente influenciados pelas condições climáticas como o período do dia, estação do ano, presença de chuvas e etc;
- Erros devido ao modelo de linha adotado pelo método, como o que ocorre ao se modelar a linha como perfeitamente transposta ou mesmo com parâmetros concentrados;
- Presença de reatores ou capacitores em derivação;
- Fluxo de energia pré-falta desbalanceado entre as fases ou circuitos;
- Impedâncias equivalentes de Thévenin das fontes de cada terminal muito diferentes;
- Erros de medição, como problemas de linearidade de transformadores de corrente e ou de potencial, baixa resolução temporal e / ou erros de amostragem do sistema de digitalização;
- Erros no processo de estimação fasorial a partir dos dados oscilografados.

Na referência [6] são indicados outros tipos de erros que estão diretamente associados às dificuldades impostas pelas situações reais e que raramente são simuladas em testes de laboratório. Entre eles pode-se citar:

- Variabilidade da geometria dos condutores e mudanças na configuração dos mesmos;
- Existência de geração distribuída conectada no trecho da linha sob estudo;
- Falhas de curta duração, devido à rápida atuação do sistema de proteção;
- Alterações no sinal oscilografado devido à resposta em frequência dos transformadores de potencial capacitivo;
- Assimetrias das estruturas da linha de transmissão.

Para se melhorar a estimativa do local de falta, faz-se necessário a eliminação ou redução de possíveis erros causados por premissas incorretas e dados imprecisos fornecidos como entrada ao algoritmo de localização de faltas.

2.3. Famílias de técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão

A figura abaixo ilustra as possíveis abordagens para a localização de faltas:

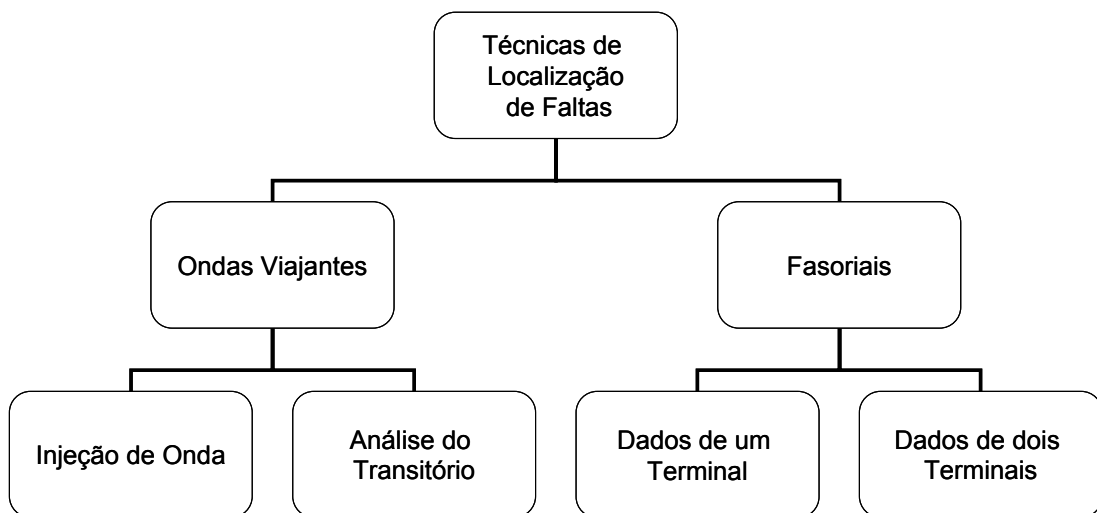


Figura 2.1 - Famílias de técnicas de localização de faltas.

Conforme mostrado na figura anterior, as técnicas de localização de faltas são classificadas de acordo com sua essência. O uso da propagação das ondas viajantes em proteção de linhas de transmissão foi proposto no final da década de 70 na detecção de faltas [10]. A ideia básica desta família de métodos está na determinação do tempo necessário para a onda injetada viajar entre o ponto de injeção e o ponto em falta. Alternativamente, desenvolveram-se técnicas para a captura e análise das ondas de transitórios de tensão e corrente geradas durante a falta. Embora estas técnicas forneçam rápidas respostas ao problema de localização de faltas, elas são muito dependentes dos parâmetros do sistema e da configuração da rede, pois estes podem influenciar na propagação do surto. Existem, também, dificuldades associadas a aquisição de dados com altas taxas de amostragem, necessárias para um menor erro

de localização. Um aspecto comum nestas técnicas é a necessidade de equipamentos específicos para a detecção (e injeção) de transitórios na linha de transmissão.

A segunda família de métodos possui a vantagem de depender apenas da informação que pode ser obtida via algum sistema de oscilografia já instalado. Outra vantagem é a sua relativa facilidade de implementação, simulação e avaliação frente à outra família. Muitos artigos já foram publicados abrangendo vários algoritmos de localização de faltas de um ou mais terminais, entretanto existe uma diferença considerável entre a complexidade e a precisão na localização de faltas destes métodos. Tais diferenças ficam ainda maiores quando são feitas comparações entre os casos simulados e os casos reais, obtidos diretamente do sistema de potência.

Alguns fatores são comumente apresentados como responsáveis por estes erros como a adoção de simplificações, suposições associadas com a impedância de Thévenin, com a impedância de falta e a corrente de falta. Paralelamente, as variações dinâmicas do sistema elétrico podem influenciar na precisão na localização de faltas [11]. Tal fato é de difícil simulação, o que acaba implicando na diferença da precisão dos métodos quando são submetidos a dados reais. Vale ressaltar que o primeiro estágio de desenvolvimento de um sistema de localização de faltas consiste no desenvolvimento do ferramental matemático do algoritmo e sua validação via simulações, sendo, portanto, necessários inúmeros cuidados na criação do banco de dados de casos simulados.

Os algoritmos que utilizam dados de um terminal calculam a localização da falta a partir da impedância vista da linha por uma de suas extremidades. Para ser possível a localização de todos os tipos de falta, faz-se necessário o conhecimento de todas as tensões fase-terra e correntes de fase naquele terminal. A partir destes dados, da topologia do sistema e de algumas suposições, constrói-se um modelo matemático que irá localizar a falta. Basicamente, são estas suposições e a modelagem do sistema que diferem os vários métodos desta categoria. Pode-se encontrar uma completa análise destes métodos em [12], [13].

Os cálculos para localização de faltas nos algoritmos de dois terminais são fundamentalmente similares aos cálculos dos algoritmos de um terminal. Entretanto, nos algoritmos que utilizam dados de dois terminais existem formas para se determinar e minimizar ou até mesmo eliminar o efeito da resistência de falta e

outros fatores similares como não transposições, fontes fortes e fracas, corrente de carga entre outros. A influência de tais fatores tende a diminuir a precisão da estimativa do local de falta. Nesta família de métodos não se faz necessária a determinação do tipo de falta como na família de um terminal. Além destes fatos, utilizam-se normalmente dados de seqüência positiva, não sendo necessário o uso de dados de seqüência zero que são pouco confiáveis. Entretanto tem-se a desvantagem de se requerer uma grande massa de dados de ambos os terminais, o que implica em disponibilizá-los e centralizá-los em um único local para a execução da rotina de localização. Outro detalhe importante para aplicações práticas é o fato de que os dados de ambos os terminais devem, normalmente, estar sincronizados antes da localização. Isto pode ser obtido por estampa de tempo ou analiticamente, conforme implementado neste trabalho.

A localização automática de faltas em linhas de circuito duplo pode ser influenciada consideravelmente pelo acoplamento mútuo entre circuitos, especialmente para faltas que envolvam a terra. Caso a corrente de falta e a corrente da linha estejam na mesma direção, existe a tendência do localizador sobreestimar o ponto de falta. Por outro lado, se a corrente de falta e a corrente da linha estiverem em direção oposta, há a tendência de haver uma subestimação. Em geral, linhas que possuem um acoplamento de seqüência zero significativo, não são adequadas aos métodos de um terminal [7].

2.4. Abordagens para Linhas de Circuito Duplo

Algumas soluções foram propostas para o problema particular das linhas de circuito duplo, visto que os algoritmos para linhas de circuito simples não apresentam resultados satisfatórios, principalmente por eles não modelarem o acoplamento de seqüência zero existente entre os circuitos.

A abordagem adotada nos artigos [14] e [15] consiste em resolver via Newton-Raphson uma equação no domínio Z utilizando dados de apenas um terminal. Para tal, é feita uma série de particularizações baseadas no tipo de falta e nas ligações dos diagramas de seqüência. A equação a ser resolvida apresenta o seguinte aspecto:

$$B_1D+B_2D^2+B_3=0 \quad (2.1)$$

onde D é a distância provável da ocorrência da falta e as constantes B_1 , B_2 e B_3 são variáveis calculadas de acordo com o tipo de falta, parâmetros da linha e oscilografias.

Para validação do modelo computacional foram utilizadas nestes artigos simulações no EMTP, cujo modelo de linha escolhido possui parâmetros constantes na frequência e distribuídos no espaço. Os erros de localização obtidos nas simulações, segundo os autores, ficaram abaixo de 1% do comprimento da linha, entretanto não foram relatados maiores detalhes sobre seus comportamentos.

Uma outra abordagem é proposta em [16]. Nesta referência são utilizados dados de tensão e corrente coletados apenas em um terminal de um circuito. A distância do local de falta é obtida através da resolução de um sistema de quarto grau obtido pela Lei de Kirchoff para as tensões, aplicada à equação de distância. A corrente de seqüência zero do segundo circuito é estimada através do fator de distribuição de corrente de seqüência zero e pela corrente, também de seqüência zero, do circuito sob estudo. A equação abaixo é resolvida pelo método iterativo de Newton-Raphson:

$$p^4+k_1p^3+k_2p^2+k_3p+k_4=0 \quad (2.2)$$

onde p representa a distância ao ponto de falta e k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são constantes obtidas a partir da dedução do método.

Os autores apresentaram uma ampla análise a respeito do comportamento do algoritmo frente à variação do valor da resistência de falta e à variação da impedância das fontes equivalentes de ambos os terminais da linha de transmissão. Os erros obtidos foram inferiores a 2,5%, mesmo quando houve uma variação de $\pm 50\%$ no valor das impedâncias de fonte aliados a uma variação de zero a 100 Ω na resistência de falta.

O algoritmo que será apresentado nos próximos parágrafos foi primeiramente apresentado na referência [17] e também com abordagens diferenciadas em trabalhos

posteriores [18] e [19]. Tal algoritmo apresenta como inovação um modelo generalizado do laço de falta que evita o uso de grandezas relacionadas à seqüência zero na determinação das quedas de tensão ao longo do caminho do circuito que engloba a falta. Outro importante fato a ser mencionado é o de que este algoritmo também não utiliza informações a respeito das impedâncias equivalentes de fonte do sistema. Além disto, com o intuito de melhorar a precisão do método, especialmente em linhas longas, adicionou-se uma compensação para as capacitâncias shunt da linha de transmissão. Matematicamente a correção da corrente da fase A é feita da seguinte forma:

$$I'_A = I_A - I_{Cs} - I_{Cm} \quad (2.3)$$

$$I_{Cs} = C_s \frac{dV_A}{dt} \quad (2.4)$$

$$I_{Cm} = C_m \frac{d(V_A - V_B)}{dt} + C_m \frac{d(V_A - V_C)}{dt} \quad (2.5)$$

onde I'_A é a corrente corrigida para a fase A, I_A é a corrente oscilografada da fase A, I_{Cs} é a corrente devido à existência da capacitância ao solo e I_{Cm} a corrente devido ao acoplamento capacitivo entre os circuitos da linha de transmissão.

Este algoritmo utiliza dados de tensão e corrente de um terminal de ambos os circuitos da linha de transmissão. O fluxo de corrente através dos circuitos é utilizado para a localização e, desta forma, o algoritmo só é capaz de efetuar a localização da falta caso ambos os circuitos estejam em operação. A dedução do algoritmo será feita com base nos diagramas de seqüência apresentados nas figuras a seguir.

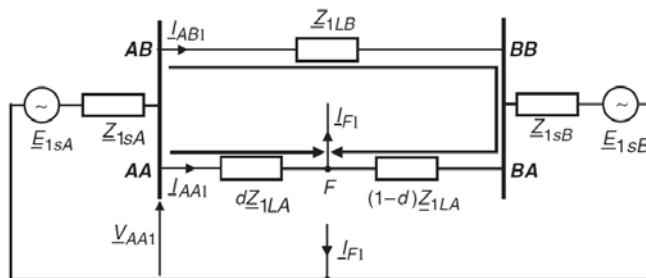


Figura 2.2 - Circuito Equivalente de Seqüência Positiva.

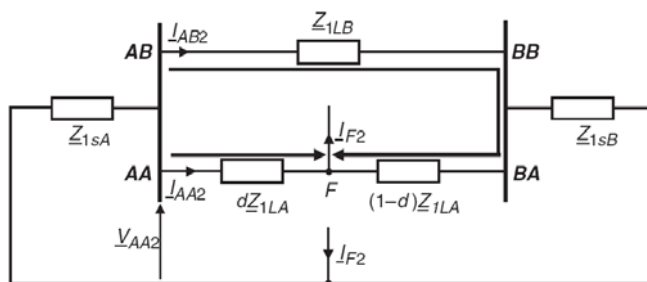


Figura 2.3 - Circuito Equivalente de Seqüência Negativa.

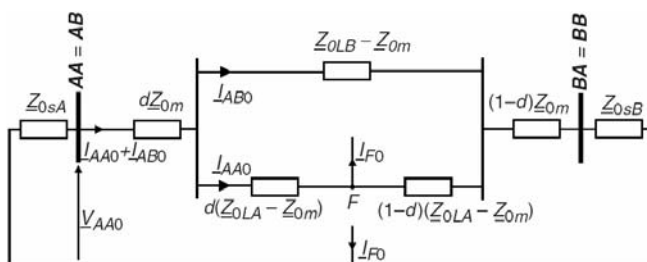


Figura 2.4 - Circuito Equivalente de Seqüência Zero.

Para a obtenção da equação para localização da falta é necessário que se faça a determinação do tipo de falta. A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 trazem, respectivamente, os coeficientes de divisão e os coeficientes de peso a serem adotados na equação generalizada do laço de falta indicada abaixo:

$$V_{AA_P} - dZ_{1LA} I_{AA_P} - R_F \sum_{i=0}^2 a_{Fi} I_{Fi} = 0 \quad (2.6)$$

Onde:

- d Distância ao local de falta;
- Z_{1LA} Impedância de seqüência positiva da linha sob falta;
- V_{AA_P} Tensão do laço de falta calculada de acordo com a Tabela 2.1 e Equação 2.7;
- I_{AA_P} Corrente do laço de falta calculada de acordo com a Tabela 2.2 e Equação 2.8;
- R_F Resistência de falta;
- I_{Fi} Corrente de seqüência com $i=0$ para seqüência zero, $i=1$ para seqüência positiva e $i=2$ para seqüência negativa;
- a_{Fi} Coeficiente de peso calculado de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Coeficientes de Divisão usados para a determinação dos sinais no laço de falta.

<i>Tipo de Falta</i>	a_1	a_2	a_0
AT	1	1	1
BT	a^2	a	1
CT	a	a^2	1
AB, ABT, ABC, ABCT	$1-a^2$	$1-a$	0
BC, BCT	a^2-a	$a-a^2$	0
CA, CAT	$a-1$	a^2-1	0

Tabela 2.2 - Coeficientes de Peso usados para a estimação da queda de tensão na resistência de falta.

<i>Tipo de Falta</i>	a_{F1}	a_{F2}	a_{F0}
AT	3	0	0
BT	$3a^2$	0	0
CT	$3a$	0	0
AB	$1-a^2$	0	0
BC	a^2-a	0	0
CA	$a-1$	0	0
ABT	$1-a^2$	$1-a$	0
BCT	a^2-a	$a-a^2$	0
CAT	$a-1$	a^2-1	0
ABC, ABCT	$1-a^2$	0	0

As tensões e correntes do laço de falta podem ser expressas em termos das medidas disponíveis no terminal local através do uso dos coeficientes de Divisão a_0 , a_1 e a_2 disponíveis na Tabela 2.1 [19]:

$$V_{AA_P} = a_1 V_{AA1} + a_2 V_{AA2} + a_0 V_{AA0} \quad (2.7)$$

$$I_{AA_P} = a_1 I_{AA1} + a_2 I_{AA2} + a_0 \frac{Z_{0LA}}{Z_{1LA}} I_{AA0} + a_0 \frac{Z_{0m}}{Z_{1LA}} I_{AB0} \quad (2.8)$$

Onde:

Z_{0LA} Representa a impedância de seqüência zero do circuito sob falta;

Z_{0m} Representa a impedância de seqüência zero do acoplamento mútuo entre os circuitos LA e LB.

O algoritmo proposto foi validado por simulações de uma linha de 400 kV com 300 km de comprimento simulada pelo modelo de Clarke que adota parâmetros constantes. Segundo os autores, obteve-se um erro máximo de 2% quando os efeitos das capacitâncias eram ignorados e de 0,3% se fosse adotada a correção.

Na referência [20] foi mostrado que as linhas de transmissão de circuito duplo podem ser decompostas em duas redes chamadas de diferencial e aditiva. Os autores deste artigo propuseram um algoritmo que considera que a diferença entre as distribuições de tensão, calculada a partir dos dois terminais é mínima no ponto de falta. Por isso, utilizou-se a componente diferencial que é formada apenas pelos parâmetros da linha de transmissão e tensões igual a zero. Foi adotada uma abordagem no domínio do tempo visto que estes métodos requerem uma janela de dados menor que os algoritmos fasoriais tendo, portanto, um tempo de resposta menor.

Neste trabalho utilizou-se o seguinte par de matrizes de transformação modal:

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\tilde{T}^{-1} = \frac{1}{2} \tilde{T}^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Para uma linha de circuito duplo perfeitamente transposta tem-se que:

$$\mathbf{Z}_{LT_F} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ Z_M & Z_P & Z_M & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ Z_M & Z_M & Z_P & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ - & - & - & + & - & - & - \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Aplicando a transformação modal proposta em (2.9) e (2.10) :

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{LT_M} = \tilde{T}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{Z}}_{LT_F} \cdot \tilde{T} \quad (2.12)$$

Onde:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{LT_M} = \begin{bmatrix} Z_P - Z_{M12} & Z_M - Z_{M12} & Z_M - Z_{M12} & | & 0 & 0 & 0 \\ Z_M - Z_{M12} & Z_P - Z_{M12} & Z_M - Z_{M12} & | & 0 & 0 & 0 \\ Z_M - Z_{M12} & Z_M - Z_{M12} & Z_P - Z_{M12} & | & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & + & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & | & Z_P + Z_{M12} & Z_M + Z_{M12} & Z_M + Z_{M12} \\ 0 & 0 & 0 & | & Z_M + Z_{M12} & Z_P + Z_{M12} & Z_M + Z_{M12} \\ 0 & 0 & 0 & | & Z_M + Z_{M12} & Z_M + Z_{M12} & Z_P + Z_{M12} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

A submatriz superior esquerda é chamada de submatriz de componente diferencial e a inferior direita de componente aditiva.

Ao se utilizar a componente diferencial para a localização de faltas, obtêm-se algumas vantagens, pois ela é capaz de diferenciar o estado de falta ou operação normal e não depende de parâmetros externos à linha de transmissão [20]. Portanto, a componente diferencial é uma componente muito útil para a identificação e localização de faltas.

O método proposto em [20] consiste na resolução das seguintes equações com base na figura abaixo:

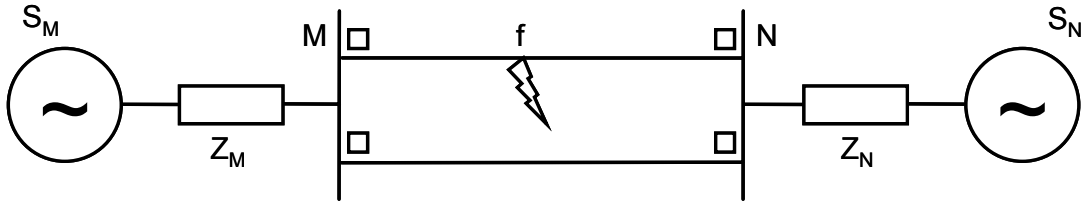


Figura 2.5 - Modelo de Linha Paralela proposto [20]

$$\min g_j(x) \quad (2.14)$$

$$\Delta t.g_j(x) = \int_{t_1}^{t_2} |u_{Mj}(x,t) - u_{Nj}(x,t)| dt \quad (2.15)$$

Onde:

$$u_{Mj}(x,t) = \frac{-1}{2} \left(\frac{Z_{cj} + R_j \cdot \frac{x}{4}}{Z_{cj}} \right)^2 \cdot \left(Z_{cj} + R_j \cdot \frac{x}{4} \right) i_{Mj} \left(t + \frac{x}{v_j} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{cj} - R_j \cdot \frac{x}{4}}{Z_{cj}} \right)^2 \cdot \left(Z_{cj} - R_j \cdot \frac{x}{4} \right) i_{Mj} \left(t - \frac{x}{v_j} \right) - \frac{R_j x}{4} \left(\frac{Z_{cj} + R_j \cdot \frac{x}{4}}{Z_{cj}} \right) \left(\frac{Z_{cj} - R_j \cdot \frac{x}{4}}{Z_{cj}} \right) i_{Mj}(t) \quad (2.16)$$

$$u_{Nj}(x,t) = \frac{-1}{2} \left(\frac{Z_{cj} + R_j \cdot \frac{l-x}{4}}{Z_{cj}} \right)^2 \cdot \left(Z_{cj} + R_j \cdot \frac{l-x}{4} \right) i_{Nj} \left(t + \frac{l-x}{v_j} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{cj} - R_j \cdot \frac{l-x}{4}}{Z_{cj}} \right)^2 \cdot \left(Z_{cj} - R_j \cdot \frac{l-x}{4} \right) i_{Nj} \left(t - \frac{l-x}{v_j} \right) - \frac{R_j (l-x)}{4} \left(\frac{Z_{cj} + R_j \cdot \frac{l-x}{4}}{Z_{cj}} \right) \left(\frac{Z_{cj} - R_j \cdot \frac{l-x}{4}}{Z_{cj}} \right) i_{Nj}(t) \quad (2.17)$$

Nestas equações, a variável x indica o local da falta. O algoritmo proposto foi validado com dados simulados, sendo uma linha de 250 km modelada com parâmetros variáveis na frequência. Os erros obtidos foram inferiores a 0,6%. Um caso real, em uma linha de 64,3 km, foi localizado com erro de 0,8%.

2.5. O algoritmo de Johns & Jamalli

Segundo a referência [9] uma linha de transmissão monofásica de circuito simples sob falta, pode ser representada conforme a Figura 2.6:

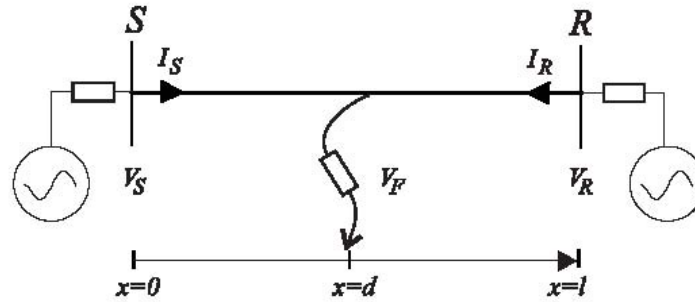


Figura 2.6 - Linha monofásica em falta.

onde S e R correspondem respectivamente aos terminais emissor e receptor. Através desta representação é possível escrever a tensão no ponto de falta através da Equação 2.18 e da Equação 2.19, mostradas a seguir:

$$V_F = V_S \cdot \cosh(\gamma \cdot d) - Z_0 \cdot I_S \cdot \sinh(\gamma \cdot d) \quad (2.18)$$

$$V_F = V_R \cdot \cosh(\gamma \cdot (l-d)) - Z_0 \cdot I_R \cdot \sinh(\gamma \cdot (l-d)) \quad (2.19)$$

onde γ e Z_0 correspondem, respectivamente, à constante de propagação e à impedância característica da linha de transmissão, de seqüência positiva dados por:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (2.20)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.21)$$

Através da manipulação algébrica da Equação 2.18 e da Equação 2.19 é possível explicitarmos a distância d do terminal emissor até o ponto de falta como sendo:

$$d = \frac{\tanh^{-1}\left(-\frac{B}{A}\right)}{\gamma} \quad (2.22)$$

Onde:

$$A = Z_0 \cdot I_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l) - V_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l) + Z_0 \cdot I_S \quad (2.23)$$

$$B = V_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l) - Z_0 \cdot I_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l) - V_S \quad (2.24)$$

Para o método apresentado, não se faz necessário o conhecimento do tipo de falta, bem como do valor da impedância de falta. Entretanto, devem ser conhecidos precisamente os parâmetros da linha e, na obtenção dos fasores, o menor índice de erros possível. Caso isto aconteça, a solução da equação terá uma parte real cujo valor indica a distância da falta, e uma parte imaginária desprezível. Contudo, nos casos práticos d apresenta uma parte imaginária pequena que pode ser desprezada. A evolução temporal da solução da Equação 2.22 pode ser vista na Figura 2.7 que apresenta a parte real e a parte imaginária da solução.

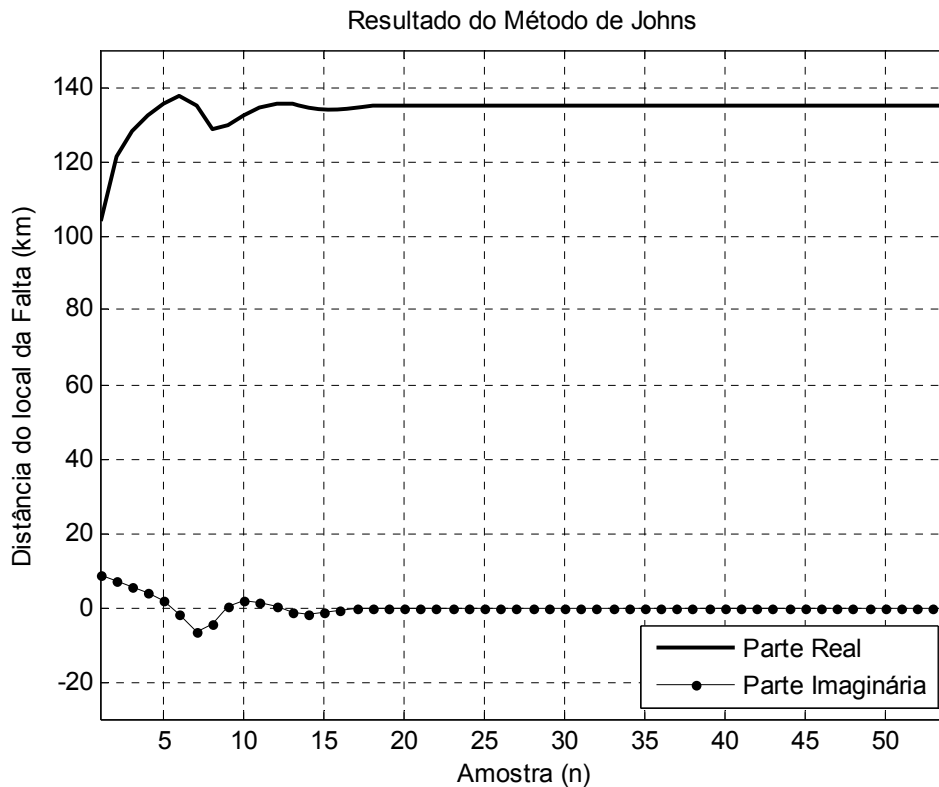


Figura 2.7 - Evolução da Solução do Método de Johns & Jamalli.

A solução da equação pode ser feita utilizando os fasores “reais” ou os fasores superpostos (ou puros de falta), que são os fasores nos quais o efeito do regime permanente pré-falta é subtraído. Neste último caso foram obtidos os melhores resultados conforme indicado por Johns & Jamalli [9].

Este método também pode ser estendido para linhas polifásicas a partir do algoritmo básico através do uso de alguma técnica de decomposição modal. Usualmente se utiliza a decomposição em componentes simétricas. Ao se aplicar esta técnica em uma linha trifásica passa-se a ter 3 circuitos desacoplados entre si. Neste momento aplica-se o algoritmo apresentado apenas para um dos circuitos obtidos. O autor sugere a seguinte matriz para a decomposição do sistema de equações:

$$[S]=[Q]=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Para linhas de circuito duplo, Johns & Jamalli indica uma abordagem alternativa a partir da suposição de perfeita transposição da linha, que segundo o autor, pode ser assumida sem incorrer em grandes perdas na precisão da localização. Para estas linhas a matriz modal de tensão e corrente é a seguinte:

$$[S_d]=[Q_d]=\begin{bmatrix} [Q] & -[Q] \\ [Q] & -[Q] \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

A Figura 2.8 ilustra uma linha de circuito duplo com a devida convenção de nomes utilizada para dedução das fórmulas:

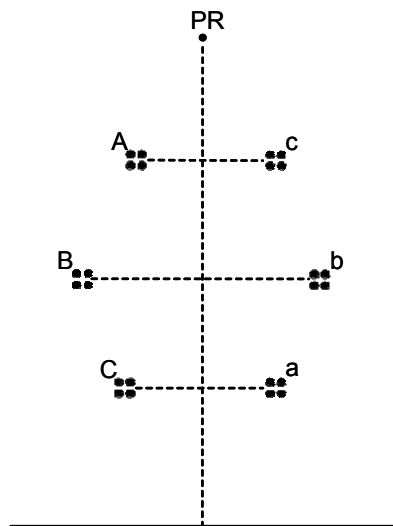


Figura 2.8 - Configuração da Linha de Transmissão.

Evidentemente, no caso de linhas de circuito duplo, existem seis modos de propagação, cada um associado a uma impedância de surto. Conseqüentemente existem seis possíveis abordagens ao problema. É importante ressaltar que não se faz necessário o uso de todos estes dados para a localização de faltas, resultando em uma economia computacional. Para o caso de circuito duplo o autor indica que uma simplificação maior pode ser obtida ao se ignorar a existência de um dos circuitos e tratar o outro como se fosse uma linha de circuito simples. Assim sendo, o algoritmo da Equação 2.22 utilizará apenas os modos 2 e 3, com as tensões e correntes se relacionando de acordo com as seguintes equações:

$$V_{S,R2} = V_{S,Ra} - V_{S,Rc} \quad (2.27)$$

$$I_{S,R2} = I_{S,Ra} - I_{S,Rc} \quad (2.28)$$

$$V_{S,R3} = V_{S,Ra} - 2V_{S,Rb} + V_{S,Rc} \quad (2.29)$$

$$I_{S,R3} = I_{S,Ra} - 2I_{S,Rb} + I_{S,Rc} \quad (2.30)$$

onde $V_{S,R}$ significa V_S ou V_R . Este conjunto de equações indica a solução para o circuito abc da linha. De forma semelhante, as faltas no segundo circuito podem ser localizadas através do uso dos modos aéreos conforme abaixo:

$$V_{S,R2} = V_{S,RA} - V_{S,RC} \quad (2.31)$$

$$I_{S,R2} = I_{S,RA} - I_{S,RC} \quad (2.32)$$

$$V_{S,R3} = V_{S,RA} - 2V_{S,RB} + V_{S,RC} \quad (2.33)$$

$$I_{S,R3} = I_{S,RA} - 2I_{S,RB} + I_{S,RC} \quad (2.34)$$

Esta abordagem possui a vantagem de requerer apenas as tensões e correntes do circuito sob falta, sendo uma simplificação para a solução do problema para linhas de circuito duplo, o que pode levar a uma degradação dos resultados obtidos especialmente em situações de falta entre circuitos.

CAPÍTULO 3

A METODOLOGIA DESENVOLVIDA

3.1. Filosofia de Localização de Falhas

Na figura abaixo é apresentada a estrutura global de um sistema localizador de falhas, desde a entrada de dados até o processo de localização propriamente dito.

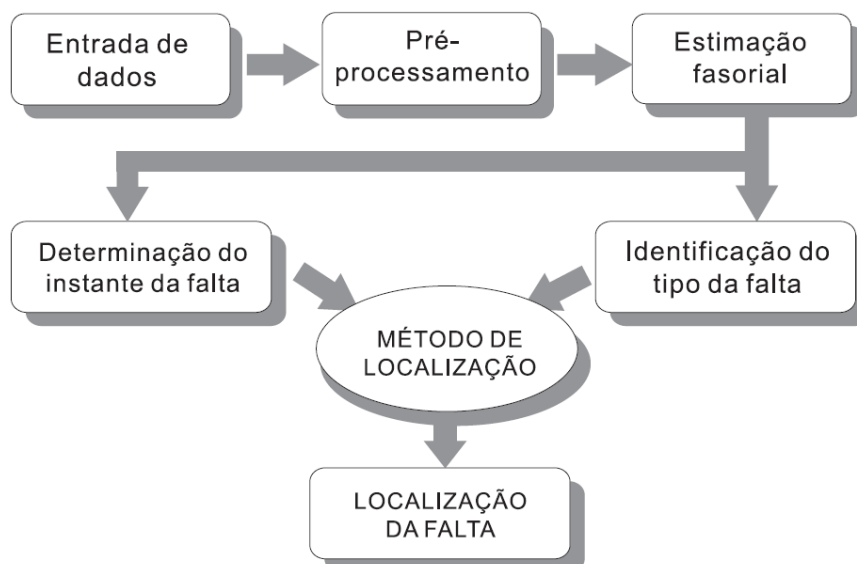


Figura 3.1 - Fluxograma do processamento dos dados.

No decorrer deste capítulo, serão detalhadas as etapas mostradas nesta figura.

3.2. A implementação computacional

Adotou-se como plataforma de desenvolvimento principal o software Matlab. Para algumas tarefas específicas, como a de conversão dos dados de saída do software de simulação de transitórios ATP para o Matlab, foram utilizadas rotinas programadas em linguagem C.

3.2.1. Entradas de dados

3.2.1.1. As simulações via ATP

Os dados de entrada foram obtidos através de simulações via ATP distribuição Mingw32 GCC-2.95. A Figura 3.2 ilustra um sistema típico simulado para uma falta AT:

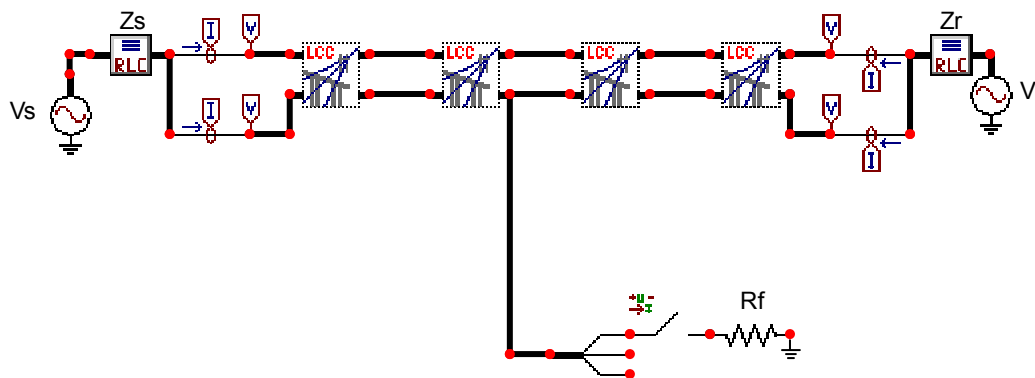


Figura 3.2 - Topologia simulada no ATP

Simulou-se um sistema de 138 kV modelado por fonte de tensão atrás de impedância. Tal impedância equivalente possui os seguintes valores:

$$R = 0,7685 \Omega \quad (3.1)$$

$$L = 167,3 \text{ mH} \quad (3.2)$$

Como base de estudo, utilizou-se a estrutura suspensa semi-rígida de circuito duplo vertical DL3(A) amplamente utilizada pela Cemig para tensões de 138 kV até

500 kV. Tais estruturas possuem vãos máximos de 250 a 700 m, dependendo da tensão de operação da linha.

A linha foi modelada como sendo perfeitamente transposta, com redução matricial automática dos dois condutores por fase a um e com efeito pelicular. Utilizou-se o valor de $1000 \Omega \cdot m$ para a resistividade do solo e adotou-se o modelo de J. Marti com ajuste padrão.

A escolha de qual modelo de linha será utilizado para simulação deve ser feita com cautela. A escolha incorreta levará à criação de oscilografias também incorretas que, por sua vez, podem mascarar deficiências do método de localização que se busca validar. A escolha do modelo de J. Marti foi feita por apresentar resultados precisos para linhas balanceadas [10], ou seja, para qualquer linha de transmissão perfeitamente transposta este modelo irá apresentar resultados corretos e precisos. Caso se utilize este modelo para uma linha não transposta ele não irá apresentar resultados aceitáveis para geometrias com forte simetria vertical, como é o caso de linhas de circuito duplo, embora para linhas de circuito simples cujos condutores se encontrem equidistantes com relação ao solo o seu uso seja possível. A Figura 3.3 mostra a geometria da linha simulada.

A linha simulada possui um comprimento total de 150 km. Utilizou-se um $\Delta t = 50 \mu s$ e o tempo total de simulação foi de 96 ms para todos os casos.

A falta foi simulada por uma chave controlada por tempo. Esta chave, ao fechar, conecta um ponto da linha de transmissão a uma resistência de falta (RF). Dependendo do tipo de falta a ser simulado, esta resistência estará conectada à terra ou a outra fase.

Para validação do modelo de localização de falta proposto, foram simulados os casos indicados na Tabela 3.1, onde o termo “Instante” indica o valor instantâneo de tensão no ponto de incidência da falta. O termo “ R_f ” indica o valor da resistência de falta utilizado na simulação. O *source impedance ratio* (SIR) indica a relação das impedâncias de fonte do sistema simulado, definido matematicamente da seguinte forma:

$$SIR = \left| \frac{Z_S}{Z_R} \right| \quad (3.3)$$

O termo δ indica a diferença angular entre as fontes do sistema simulado. Ao se modificar este parâmetro altera-se o fluxo de potência na linha.

Tabela 3.1 - Conjunto de parâmetros variados nas simulações.

Tipo de Falta	Instante	$R_f (\Omega)$	SIR	δ
AT	Zero	0; 10; 50; 100	1; 0,1; 10	0; -30°
	Máximo	0; 10; 50; 100	1; 0,1; 10	0; -30°
BC	Zero	0; 10; 50; 100	1; 0,1; 10	0; -30°
	Máximo	0; 10; 50; 100	1; 0,1; 10	0; -30°

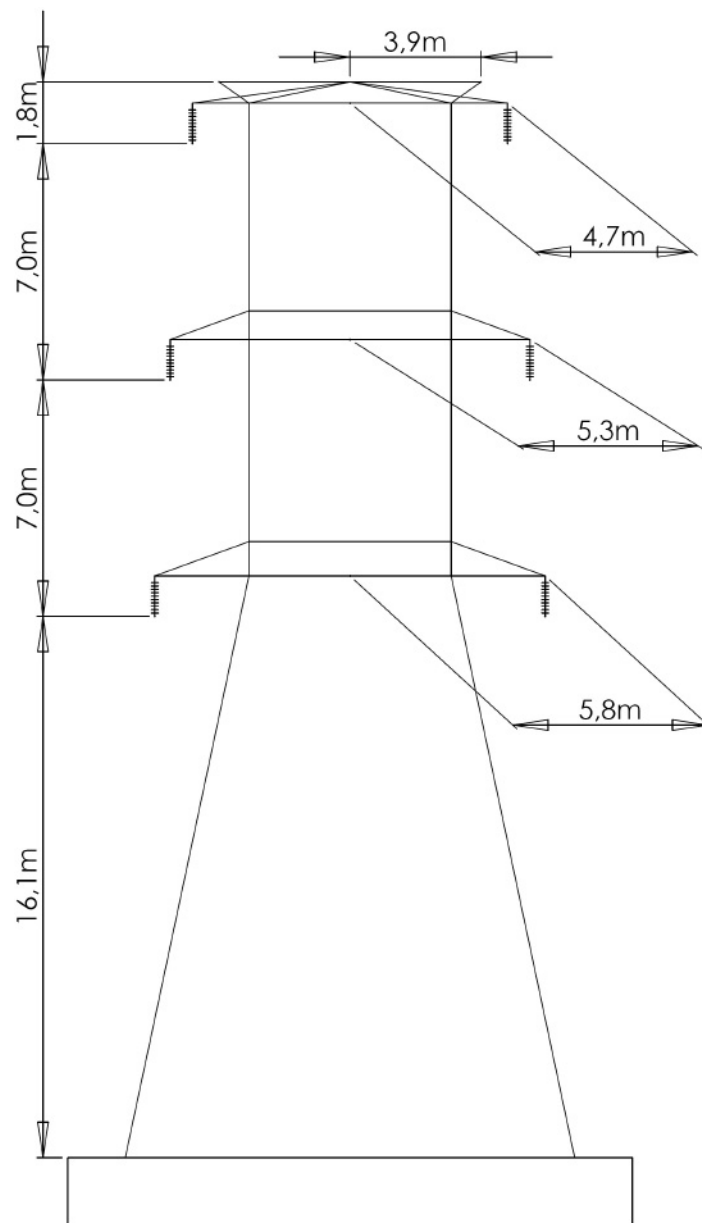


Figura 3.3 - Geometria da Linha utilizada nas simulações.

Os dados de entrada podem ser obtidos basicamente de duas outras fontes. A primeira seria a partir de relés digitais ou de registradores digitais de perturbação. Estes equipamentos disponibilizam as informações segundo a norma CONTRADE [21]. A segunda opção seria o uso do programa de simulação computacional PSCAD no qual se é possível simular linhas não transpostas, por possuir modelos em componentes de fase.

3.2.1.2. Cálculo dos parâmetros da linha de transmissão em 60 Hz

Antes da execução do algoritmo de localização, faz-se necessário fornecer os parâmetros da linha de transmissão em análise, juntamente com os dados de corrente e tensão registrados em ambos os terminais. A precisão e a exatidão destes parâmetros de entrada são de vital importância para o algoritmo de localização. Utilizou-se o programa ATP para esta tarefa.

O procedimento foi executado parcialmente via interface gráfica ATPDraw e complementado no Comando de Prompt do DOS. Inicialmente, foi inserido em um novo projeto um bloco LCC. Escolheu-se o modelo de parâmetros constantes com relação à frequência para se representar a linha de transmissão em 60 Hz. Considerou-se a perfeita transposição, efeito pelicular e redução matricial dos dois condutores por fase a um. A resistência do solo foi ajustada para $1000 \Omega \cdot m$. Foram preenchidos os dados da geometria da linha e posteriormente foram salvos os arquivos .alc e .atp.

Com o editor do DOS alterou-se o arquivo .atp nas colunas / linhas referentes aos parâmetros ICAP e ICPR. O cartão de dados modificado foi então utilizado como parâmetro de entrada do ATP que teve de ser executado manualmente. Maiores detalhes deste procedimento podem ser encontrados em [22].

Dentro do arquivo .lis gerado, encontravam-se as matrizes de impedâncias e admitâncias série e paralelo da linha calculados pela metodologia de Carson [10].

3.2.2. Rotinas de pré-processamento

Analisando-se a implementação de um sistema computacional que visa simular um sistema real, algumas rotinas de pré-processamento adicionais devem ser realizadas. Como exemplo tem-se as rotinas de filtragem passa-baixa e a rotina de interpolação dos dados. Esta última é necessária devido à possibilidade dos dados dos terminais não possuírem uma mesma taxa de amostragem. Isto pode acontecer caso os equipamentos que deram origem às oscilografias não sejam iguais ou não estejam configurados da mesma forma.

As rotinas de pré-processamento são de fundamental importância, pois quando da gravação pelos registradores, os dados não estão representados de uma forma adequada para o processamento subsequente e também não estão com todas as informações necessárias diretamente disponíveis para sua utilização imediata pelos localizadores. Desta forma estas rotinas buscam corrigir estas deficiências.

Ao iniciar a execução do programa desenvolvido, é feito o carregamento dos arquivos com dados relativos às tensões e correntes dos dois terminais da linha sob estudo. No caso de faltas simuladas no ATP, utilizou-se o conversor PL42MAT [23] obtido junto ao grupo de desenvolvimento do ATP que é capaz de converter os arquivos .PL4 em .MAT, preservando a convenção de nomes dados aos nós. Alternativamente, foi desenvolvido um software em C capaz de processar os arquivos de saída .LIS gerando um arquivo ASCII que também pode ser carregado.

O aplicativo em C foi concebido tanto para a análise de dados provenientes de programas para simulação de transitórios eletromagnéticos, como o EMTP e o ATP, quanto para oscilografias provenientes de registradores digitais de perturbações e relés digitais, fornecidas segundo o padrão contido na norma COMTRADE [21]. Em ambos os casos estes arquivos são convertidos do formato original para um formato ASCII padrão, disposto em colunas, convencionado para conter informações sobre o tempo de aquisição das amostras e os dados de tensão e corrente para o processamento no algoritmo desenvolvido. Independentemente da origem dos dados é possível, no Matlab, realizar o tratamento necessário para a reordenação dos dados para o uso no sistema desenvolvido.

3.2.2.1. Subamostragem

Os dados simulados pelo ATP possuem um intervalo de amostragem - Δt - definido pelo usuário, o valor de 50 μs foi escolhido para tal. Novamente, relembrando-se da premissa de se desenvolver um sistema computacional que seja capaz de operar com quaisquer origens de dados, escolheu-se subamostrar / interpolar os dados de origem para uma frequência fixa de forma que se pudesse sempre trabalhar com um dado de mesma frequência de amostragem, independentemente dos dados de entrada.

Utilizou-se uma interpolação unidimensional do tipo “*Spline*” (cúbica) [8]. Os dados interpolados possuem 16 pontos por ciclo de 60 Hz, ou seja, os dados passam a ter uma taxa de amostragem de 960 Hz, independentemente da taxa que os mesmos possuíam originalmente. Escolheu-se esta taxa pelo fato de que a maioria dos relés de proteção atuais opera com pelo menos esta taxa.

A Figura 3.4 mostra o resultado deste procedimento:

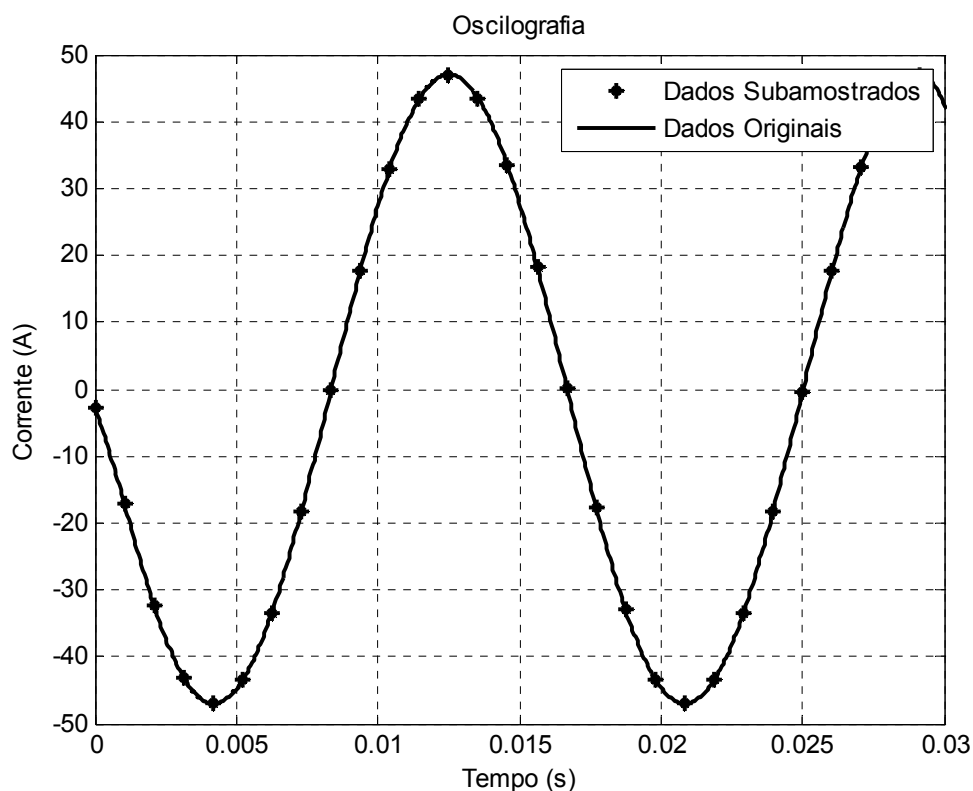


Figura 3.4 - Processo de subamostragem.

3.2.2.2. Filtragem Passa Baixas

Os valores pós-falta de correntes e tensões dos dados simulados podem apresentar transitórios de altas frequências. Tais frequências não estão presentes em oscilografias reais devido à curva de resposta dos transformadores de medição. Adicionalmente, em um sistema real, deve-se preocupar com os erros devidos ao *aliasing*.

Utilizou-se um filtro de Butterworth de 2ª ordem, com frequência de corte de 100 Hz. Tais escolhas foram baseadas na simplicidade de implementação deste filtro e no fato de se estar interessado apenas na frequência fundamental.

Na Figura 3.5 é apresentada a oscilografia original e na Figura 3.6 é apresentada a oscilografia filtrada.

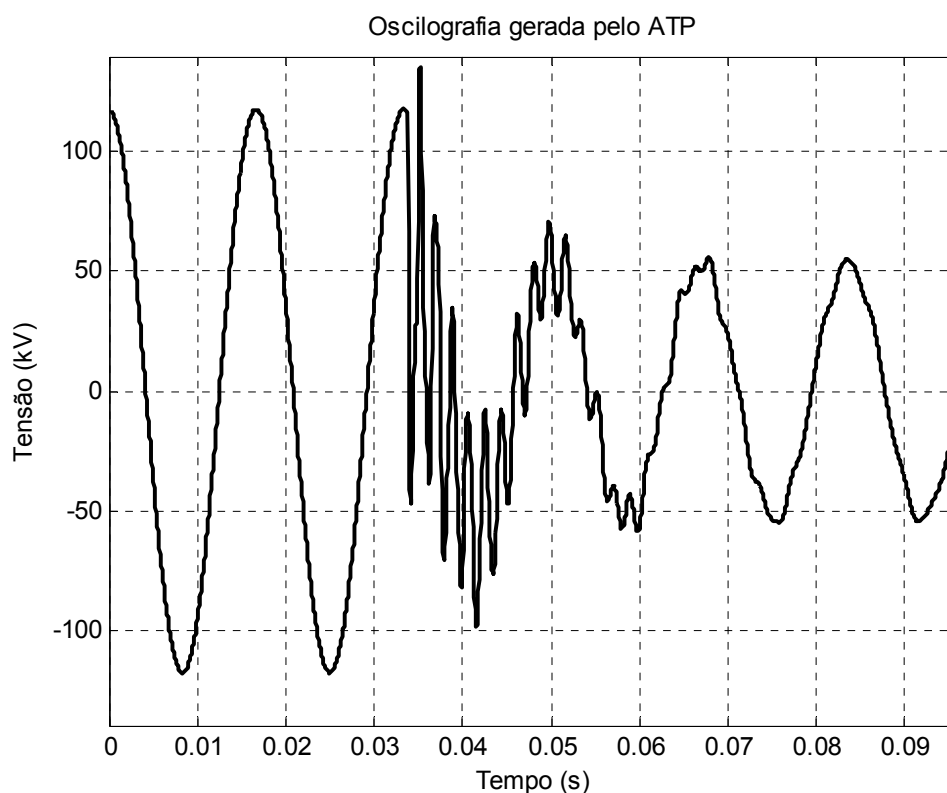


Figura 3.5 - Dado Original: Corrente da fase A do circuito sob falta AT.

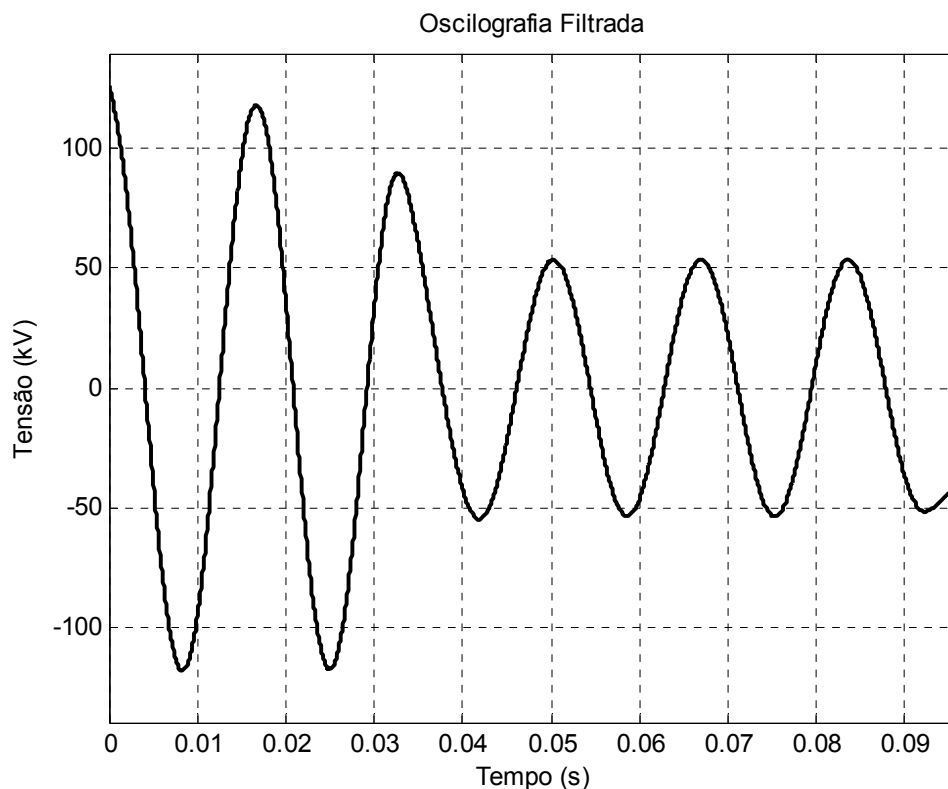


Figura 3.6 - Dado Filtrado: Tensão da fase A do circuito sob falta AT.

3.2.3. *Estimação fasorial*

Trabalhos e publicações anteriores mostraram a necessidade de se realizar uma eficiente estimação dos fasores fundamentais de 60 Hz a partir das oscilografias de tensão e corrente de entrada para o adequado funcionamento dos algoritmos de localização de falta [24], [25]. Devido aos bons resultados já obtidos [24], optou-se por utilizar uma variação do algoritmo de erros mínimos quadrados de Sachdev & Baribeau [26] para tal tarefa.

Um estimador fasorial para aplicação em localização de faltas deve levar em consideração o fato de que as ondas de corrente e tensão pós-falta podem apresentar uma componente contínua, além de algum conteúdo harmônico mesmo após a filtragem passa-baixa. Tais considerações são necessárias, pois a sua negligência pode influenciar negativamente os resultados, o que implicaria em um menor grau de confiabilidade na localização da falta.

3.2.3.1. Abordagem Matemática

Sachdev & Baribeau consideraram os sinais de entrada de tensão e corrente como sendo formados por uma exponencial decrescente e um conjunto de ondas senoidais da forma:

$$y(t) = a_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + \sum_{n=1}^N a_n \text{sen}(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (3.4)$$

Para aplicação em localização de faltas no sistema elétrico de potência pode-se arbitrar a n os valores 1 e 3 que se referem ao 1º e 3º harmônicos. Portanto temos:

$$y(t) = a_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + a_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) + \nu'(t) \quad (3.5)$$

onde $\nu'(t)$ é o erro cometido ao se aproximar as amostras pela função composta da exponencial e duas senóides. ω_0 é a frequência angular fundamental. Em seguida, Sachdev & Baribeau consideram aproximações polinomiais para a exponencial decrescente através da série de Taylor, conforme apresentado abaixo:

$$e^{\frac{-t}{\tau}} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots \quad (3.6)$$

Truncando-se a série de Taylor no terceiro termo, e substituindo o resultado obtido em Equação 3.5, tem-se:

$$y(t) = a_0 - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + \left(\frac{a_0}{2\tau^2}\right)t^2 + a_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + a_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) + \nu(t) \quad (3.7)$$

onde $\nu(t)$ é o erro $\nu'(t)$ acrescido do erro que se cometeu ao considerar apenas as três primeiras parcelas da expansão de Taylor.

Utilizando-se identidades trigonométricas, pôde-se reescrever a Equação 3.7 de outra maneira, obtendo-se a seguinte expressão:

$$y(t) = a_0 + a_1 \cos \phi_1 \text{sen}(\omega_0 t) + a_1 \text{sen} \phi_1 \cos(\omega_0 t) + a_3 \cos \phi_3 \text{sen}(3\omega_0 t) + a_3 \text{sen} \phi_3 \cos(3\omega_0 t) - \left(\frac{a_0}{\tau}\right)t + \left(\frac{a_0}{2\tau^2}\right)t^2 + \nu(t) \quad (3.8)$$

Ou ainda

$$y(t) = \theta_1 + \theta_2 \text{sen}(\omega_0 t) + \theta_3 \cos(\omega_0 t) + \theta_4 \text{sen}(3\omega_0 t) + \theta_5 \cos(3\omega_0 t) + \theta_6 t + \theta_7 t^2 + \nu(t) \quad (3.9)$$

Onde:

$$\theta_1 = a_0 \quad (3.10)$$

$$\theta_2 = a_1 \cos \phi_1 \quad (3.11)$$

$$\theta_3 = a_1 \text{sen} \phi_1 \quad (3.12)$$

$$\theta_4 = a_3 \cos \phi_3 \quad (3.13)$$

$$\theta_5 = a_3 \text{sen} \phi_3 \quad (3.14)$$

$$\theta_6 = \frac{-a_0}{\tau} \quad (3.15)$$

$$\theta_7 = \frac{a_0}{2\tau^2} \quad (3.16)$$

A função $y(t)$ expressa na Equação 3.9 pode ser escrita na forma matricial como:

$$y(t) = \bar{x}^T(t) \cdot \bar{\theta} + v(t) \quad (3.17)$$

Sendo \bar{x}^T o vetor de regressores e $\bar{\theta}$ o vetor de coeficientes, dados por:

$$\bar{x}^T(t) = [1 \quad \text{sen}(\omega_0 t) \quad \cos(\omega_0 t) \quad \text{sen}(3\omega_0 t) \quad \cos(3\omega_0 t) \quad t \quad t^2] \quad (3.18)$$

$$\bar{\theta}^T = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6 \quad \theta_7] \quad (3.19)$$

A precisão e a estabilidade da solução podem ser aumentadas se o número de amostras m considerado para solução for maior que o número mínimo requerido para a solução do sistema, neste caso $m > 7$.

Discretizando-se Equação 3.17, ou seja, tomando-se m amostras $y(t_k) = y_k$ em instantes discretos $t_k = k \cdot \Delta t$, o vetor \bar{x}^T torna-se $\bar{x}^T(t_k)$. Colocando-se na forma matricial, as m equações podem ser reescritas para o instante k da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ y_{k-3} \\ y_{k-4} \\ y_{k-5} \\ y_{k-6} \\ \vdots \\ y_{k-(m-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen} \omega_0 t_k & \cos \omega_0 t_k & \text{sen} 3\omega_0 t_k & \cos 3\omega_0 t_k & t_k & t_k^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-1} & \cos \omega_0 t_{k-1} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-1} & \cos 3\omega_0 t_{k-1} & t_{k-1} & t_{k-1}^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-2} & \cos \omega_0 t_{k-2} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-2} & \cos 3\omega_0 t_{k-2} & t_{k-2} & t_{k-2}^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-3} & \cos \omega_0 t_{k-3} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-3} & \cos 3\omega_0 t_{k-3} & t_{k-3} & t_{k-3}^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-4} & \cos \omega_0 t_{k-4} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-4} & \cos 3\omega_0 t_{k-4} & t_{k-4} & t_{k-4}^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-5} & \cos \omega_0 t_{k-5} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-5} & \cos 3\omega_0 t_{k-5} & t_{k-5} & t_{k-5}^2 \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-6} & \cos \omega_0 t_{k-6} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-6} & \cos 3\omega_0 t_{k-6} & t_{k-6} & t_{k-6}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen} \omega_0 t_{k-(m-1)} & \cos \omega_0 t_{k-(m-1)} & \text{sen} 3\omega_0 t_{k-(m-1)} & \cos 3\omega_0 t_{k-(m-1)} & t_{k-(m-1)} & t_{k-(m-1)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Ou seja,

$$\underbrace{\bar{y}}_{(mx1)} = \underbrace{\tilde{X}}_{(mx7)} \cdot \underbrace{\bar{\theta}}_{(7x1)} \quad (3.21)$$

onde \bar{y} é o vetor das amostras conhecidas, \tilde{X} a matriz dos regressores e $\bar{\theta}$ o vetor dos coeficientes desejados. A solução para este sistema sobredeterminado pode ser obtida pelo método da pseudo-inversa [27], determinando-se assim o vetor dos coeficientes $\bar{\theta}$ da seguinte forma:

$$\tilde{X}^T \cdot \tilde{X} \cdot \bar{\theta} = \tilde{X}^T \cdot \bar{y} \quad (3.22)$$

$$\bar{\theta} = (\tilde{X}^T \cdot \tilde{X})^{-1} \cdot \tilde{X}^T \cdot \bar{y} \quad (3.23)$$

Caso o algoritmo fosse implementado da forma proposta anteriormente, obter-se-ia uma baixa eficiência computacional, pois a cada instante de tempo a pseudo-inversa teria de ser calculada. Entretanto pode-se provar pelas equações a seguir que apenas um cálculo da pseudo-inversa é necessário para a estimação fasorial, seguido de uma correção na base de tempo dos fasores calculados com a matriz fixa, conforme [27].

Para o instante $k+1$, a Equação 3.20 transforma-se em:

$$\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_k \\ y_{k-1} \\ y_{k-2} \\ y_{k-3} \\ y_{k-4} \\ y_{k-5} \\ \vdots \\ y_{k-(m-2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k+1} & \text{cos}\omega_0 t_{k+1} & \text{sen}3\omega_0 t_{k+1} & \text{cos}3\omega_0 t_{k+1} & t_{k+1} & t_{k+1}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_k & \text{cos}\omega_0 t_k & \text{sen}3\omega_0 t_k & \text{cos}3\omega_0 t_k & t_k & t_k^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-1} & \text{cos}\omega_0 t_{k-1} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-1} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-1} & t_{k-1} & t_{k-1}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-2} & \text{cos}\omega_0 t_{k-2} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-2} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-2} & t_{k-2} & t_{k-2}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-3} & \text{cos}\omega_0 t_{k-3} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-3} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-3} & t_{k-3} & t_{k-3}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-4} & \text{cos}\omega_0 t_{k-4} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-4} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-4} & t_{k-4} & t_{k-4}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-5} & \text{cos}\omega_0 t_{k-5} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-5} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-5} & t_{k-5} & t_{k-5}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k-(m-2)} & \text{cos}\omega_0 t_{k-(m-2)} & \text{sen}3\omega_0 t_{k-(m-2)} & \text{cos}3\omega_0 t_{k-(m-2)} & t_{k-(m-2)} & t_{k-(m-2)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Fazendo-se uma mudança de variável do tipo $k+1 \rightarrow k'$ e efetuando a substituição na Equação 3.24 tem-se:

$$\begin{bmatrix} y_{k'} \\ y_{k'-1} \\ y_{k'-2} \\ y_{k'-3} \\ y_{k'-4} \\ y_{k'-5} \\ y_{k'-6} \\ \vdots \\ y_{k'-(m-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'} & \text{cos}\omega_0 t_{k'} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'} & t_{k'} & t_{k'}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-1} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-1} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-1} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-1} & t_{k'-1} & t_{k'-1}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-2} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-2} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-2} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-2} & t_{k'-2} & t_{k'-2}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-3} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-3} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-3} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-3} & t_{k'-3} & t_{k'-3}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-4} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-4} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-4} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-4} & t_{k'-4} & t_{k'-4}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-5} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-5} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-5} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-5} & t_{k'-5} & t_{k'-5}^2 \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-6} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-6} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-6} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-6} & t_{k'-6} & t_{k'-6}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}\omega_0 t_{k'-(m-1)} & \text{cos}\omega_0 t_{k'-(m-1)} & \text{sen}3\omega_0 t_{k'-(m-1)} & \text{cos}3\omega_0 t_{k'-(m-1)} & t_{k'-(m-1)} & t_{k'-(m-1)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Observando-se a matriz de regressores para a Equação 3.20 e para a Equação 3.25 percebe-se que elas são idênticas. Portanto apenas uma única pseudo-inversa é necessária para a estimação de todos os fasores. Uma interpretação possível para este “fenômeno” matemático é o de que a matriz dos regressores carrega consigo uma “base” de tempo. Ao se estimar fasores com uma matriz fixa, tem-se fasores com bases de tempo diferentes, ou seja, fasores girantes ou não estacionários, o que implicará numa referência de fase diferente para cada um deles. Para corrigir este problema, basta adicionar a cada fasor estimado o termo $\omega_0.n.\Delta t$, onde n se refere ao número de intervalos de tempo Δt transcorridos do primeiro fasor até o fasor atual.

O fasor associado à fundamental pode ser calculado de duas formas através dos coeficientes θ_2 e θ_3 :

$$Y = \theta_3 - j\theta_2 = |Y|e^{j\alpha} \quad (3.26)$$

Ou

$$Y = \theta_2 + j\theta_3 = |Y|e^{j\beta} \quad (3.27)$$

A Figura 3.7 mostra uma curva real de corrente obtida por um RDP durante um curto-circuito e superposta a ela a curva reconstituída através dos fasores da componente fundamental, calculados através do método descrito com uma janela de um ciclo ($m=16$), mostrando o comportamento adequado do método de estimação fasorial aplicado.

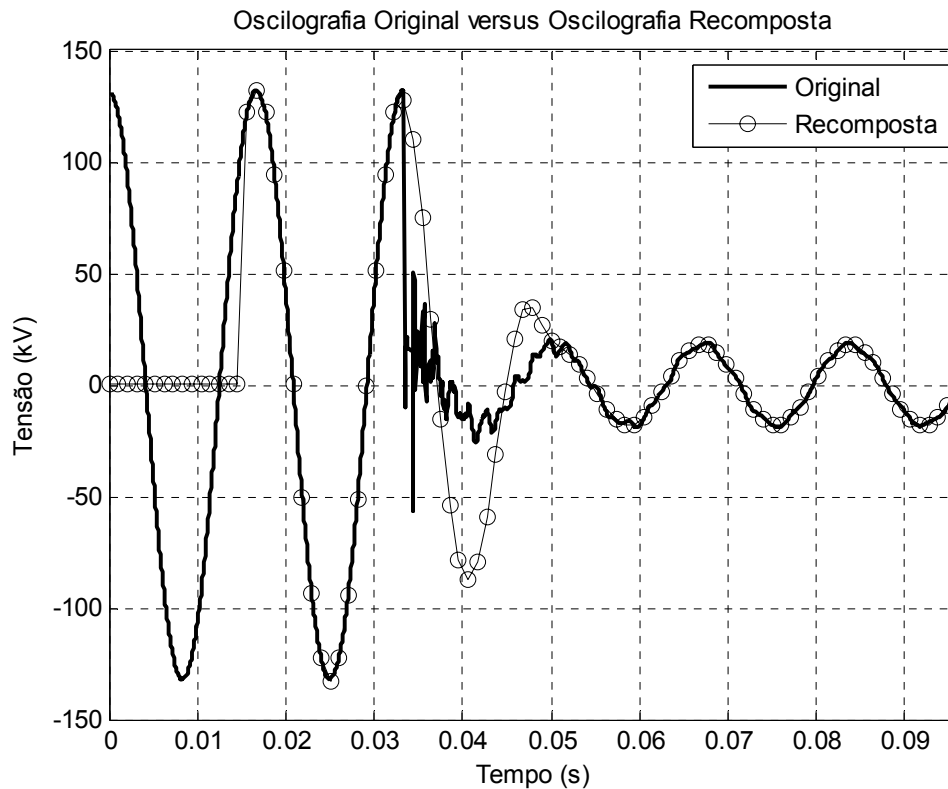


Figura 3.7 - Curva original versus Curva estimada pelo Método dos Erros Mínimos Quadrados.

3.2.4. Determinação do instante da falta e a Identificação do seu tipo

Antes da utilização dos fasores estimados no método de localização é necessária a correta identificação do instante de ocorrência da falta. A necessidade deste procedimento é justificada pela eventual falta de sincronismo entre os RDP's instalados em cada uma das extremidades da linha de transmissão.

Deste modo, os dados dos terminais são sincronizados a partir do instante de início da falta em cada um dos arquivos, o que assegura uma máxima defasagem correspondente ao tempo de propagação da linha de transmissão, não acarretando em erros significativos ao método de Johns & Jamali implementado.

O instante de ocorrência da falta e também o tipo da falta são determinados pelo monitor de transitórios desenvolvido em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Proteção Digital - LRC / UFMG [12].

3.2.4.1. O monitor de transitórios

Alguns algoritmos de localização requerem a determinação do instante de ocorrência do defeito para que sejam identificadas as amostras dos períodos pré e pós-falta. Para esta tarefa, faz-se necessário que se determine a amostra na qual o transitório teve seu início, de modo a se obter dois conjuntos de dados. Para a rotina de localização utilizada neste trabalho, não há necessidade da determinação do instante de falta, desde que a amostragem dos dados esteja temporalmente sincronizada em ambos os terminais ou que não se deseje utilizar fasores puros de falta. Como se adotou a premissa de generalidade na origem dos dados, tem-se que determinar o instante de início da falta para a sincronização dos mesmos.

Para estimação fasorial, o método dos mínimos quadrados utiliza um conjunto de amostras contidas em uma janela de dados para estimar os fasores de frequência fundamental. Adotou-se $m=16$, ou seja, uma janela de 1 ciclo. Desta forma, para o instante k a janela de dados será formada por todas as amostras compreendidas de $k-m+1$ até aquele instante. Quando a janela contém simultaneamente amostras do período pré e pós-falta, as estimativas de tensão ou corrente da frequência fundamental se distanciam do valor do sinal original devido à presença de outras frequências no espectro do sinal em razão do transitório da falta. A Figura 3.8 mostra as três situações possíveis de janelas de dados:

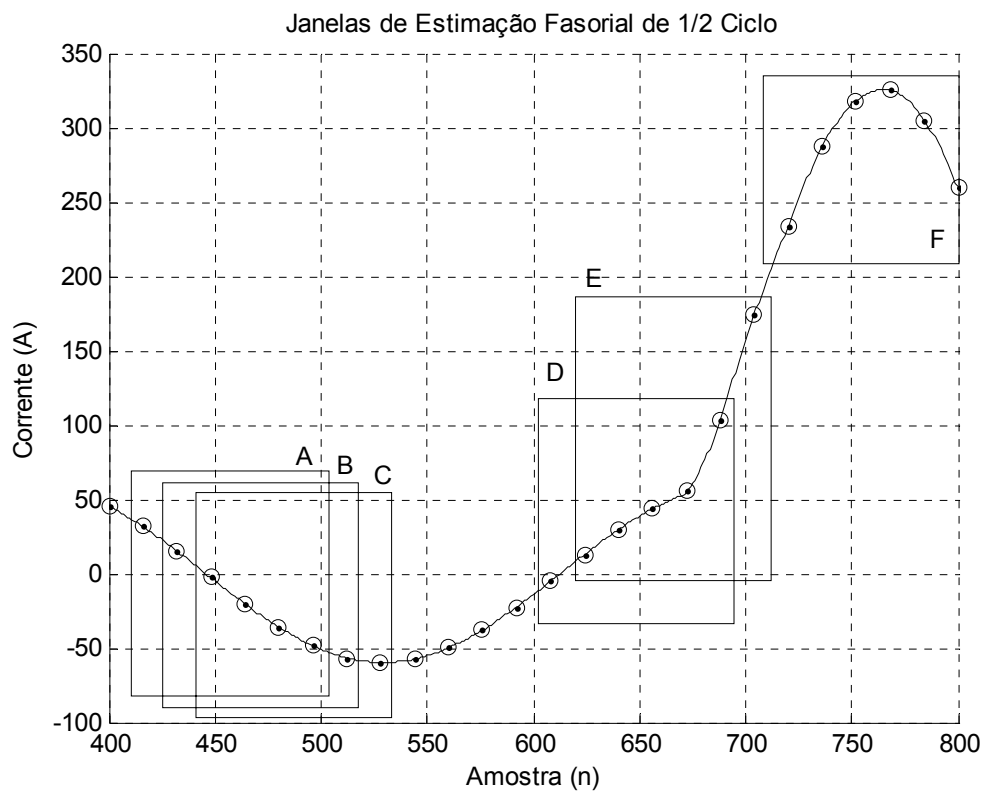


Figura 3.8 - Janelas de dados usadas nas estimação fasorial.

Onde:

- Janelas A, B e C: contêm somente amostras pré-falta;
- Janelas D e E: contêm amostras pré e pós-falta;
- Janela F: contém somente amostras pós-falta.

Na Figura 3.7 pode-se ver o resultado do estimador fasorial durante o transitório da falta. Atenção especial deve ser dada às amostras compreendidas entre 0,03 s e 0,05 s, pois neste intervalo de tempo, em que as janelas de dados estão contaminadas, a estimação fasorial diverge do resultado real. O monitor de transitórios se baseia nesta limitação do estimador fasorial, pois se pode assegurar que todas as vezes que a estimativa fasorial divergir da oscilografia haverá um transitório de falta.

A construção do monitor de transitórios é constituída das seguintes etapas:

- 1) Reconstrução no domínio do tempo dos fasores estimados;
- 2) Cálculo do resíduo, ou seja, da diferença entre a onda original e valor reconstruído;
- 3) Detecção do início da falta como sendo o instante onde a diferença calculada no item anterior passa a ser significativa.

Matematicamente temos:

$$\hat{y}_k = |Y_k \angle \phi_k| \text{sen}(\omega_0 t_k + \phi_k) \quad (3.28)$$

$$\text{resíduo}_k = y_k - \hat{y}_k \quad (3.29)$$

Tendo $\text{resíduo}_k > \text{Nível de Detecção}$ indica-se que a falta se iniciou no instante k . A Figura 3.9 e a Figura 3.10 ilustram a evolução gráfica dos resíduos ao longo do tempo.

Empiricamente, determinou-se um valor típico para a variável “nível de detecção”. Ao se ultrapassar este limiar é feita a indicação do início da falta. Tal critério é muito eficaz para casos simulados, porém uma revisão deste limiar de ajuste pode ser necessário para casos reais. Em casos reais, usualmente tem-se ruídos em níveis significativos nas oscilografias. Para estes casos, deve-se utilizar um critério mais elaborado para o nível de detecção como, por exemplo, um limiar adaptativo ou até mesmo critérios que utilizem a integral ou a derivada numérica dos resíduos, buscando-se uma melhor automação na detecção do início da falta.

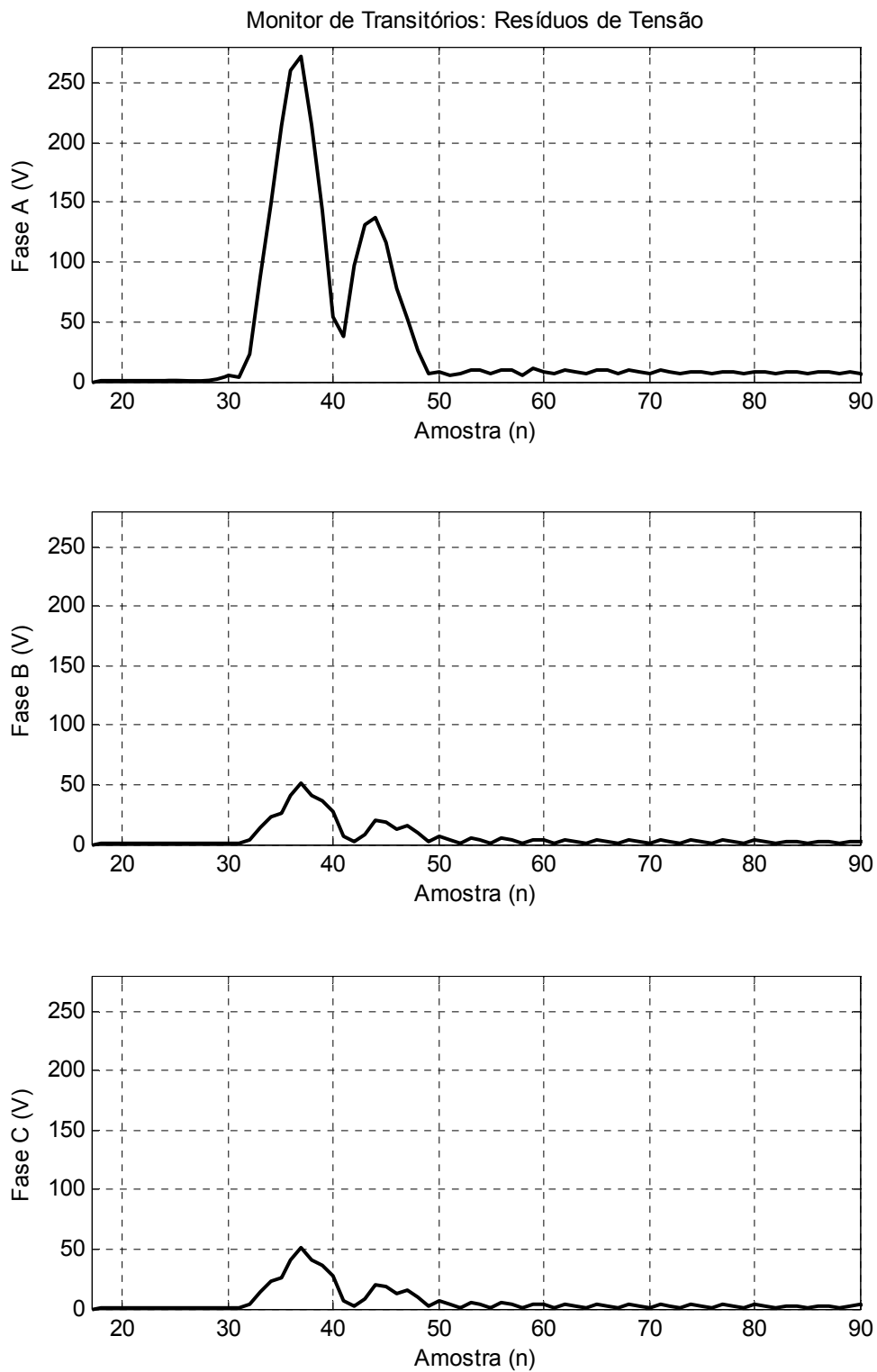


Figura 3.9 - Evolução temporal do monitor de transitórios de tensão para uma falta AT.

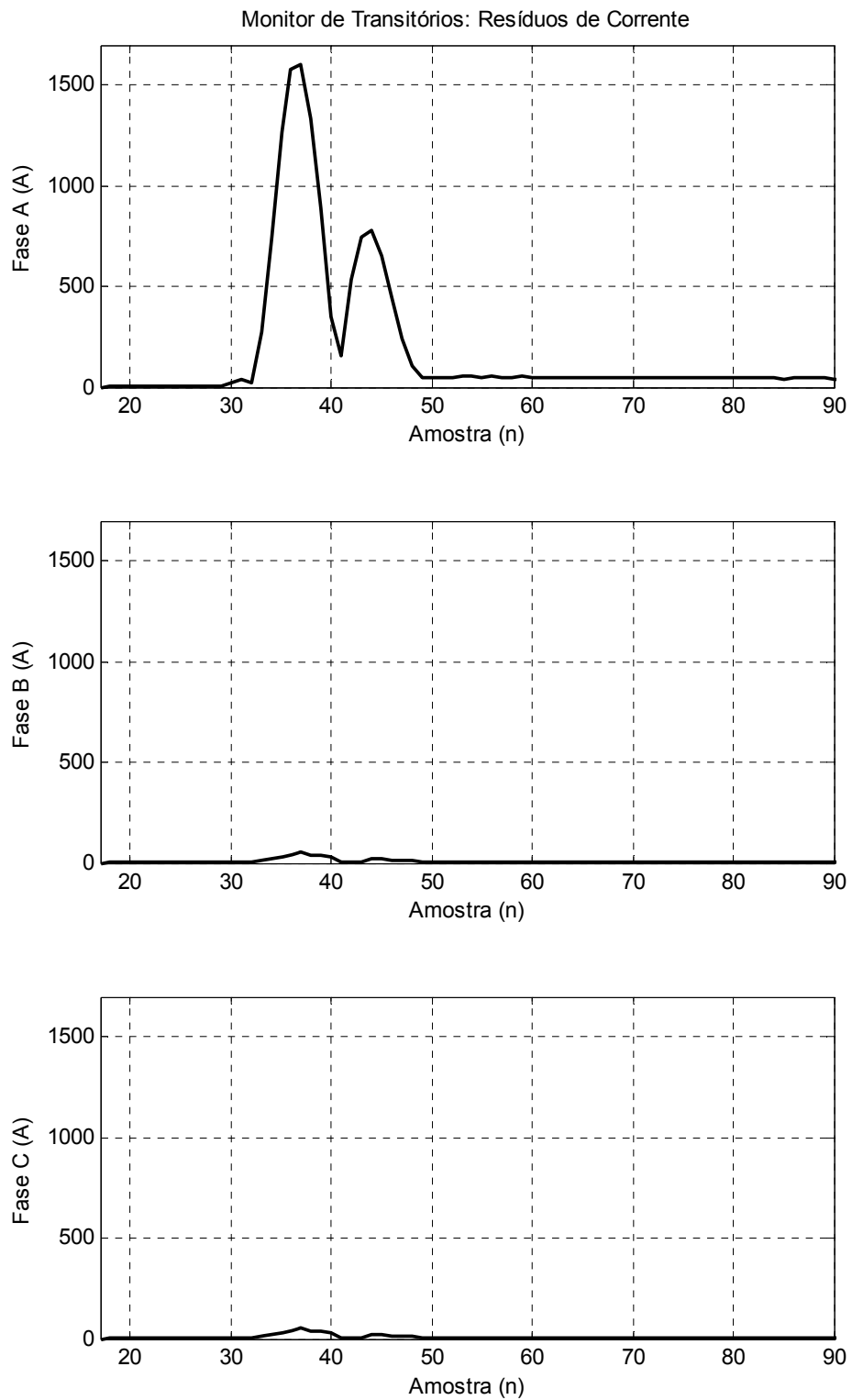


Figura 3.10 - Evolução temporal do monitor de transitórios de corrente para uma falta AT.

Embora implementado desta forma, o monitor de transitórios pode utilizar diversas lógicas. Uma alternativa seria a utilização dos regressores $\theta_1; \theta_4; \theta_5; \theta_6$ e θ_7 do método de mínimos quadrados cujo comportamento esperado é o de apresentar valores próximos de zero em regime permanente e valores não nulos durante uma falta. Outra alternativa muito útil para linhas de circuito duplo com terminais emissor e receptor dos circuitos iguais é o de computar a diferença entre as grandezas correlatas em cada um dos circuitos. Como exemplo, calcula-se a diferença entre a corrente da fase A do circuito 1 com a corrente da fase A do circuito 2. O cálculo deste desequilíbrio também pode ser utilizado satisfatoriamente para o cômputo do monitor de transitórios [28].

3.2.4.2. Sincronização Grossa, Fina e Adequação dos dados

O método proposto por Johns & Jamalli exige que os dados de ambos os terminais estejam na mesma base de tempo, ou seja, sincronizados. Da mesma forma, para cada registro existente em um terminal, deve existir um registro correlato no outro terminal. A Figura 3.11 exemplifica uma das possíveis situações. Embora nessa figura as oscilografias dos Terminais S e R tenham o mesmo número de pontos amostrados, o evento de disparo da gravação não ocorreu simultaneamente. Conseqüentemente, tem-se quantidades diferentes de dados pré e pós-falta nas oscilografias. Ao visualizar os registros, fica claro que a amostra 28 do terminal S corresponde, aproximadamente, à amostra 32 do terminal R. Sendo assim, o software desenvolvido busca determinar estes pontos e, a partir deles, determinar a intercessão entre as oscilografias.

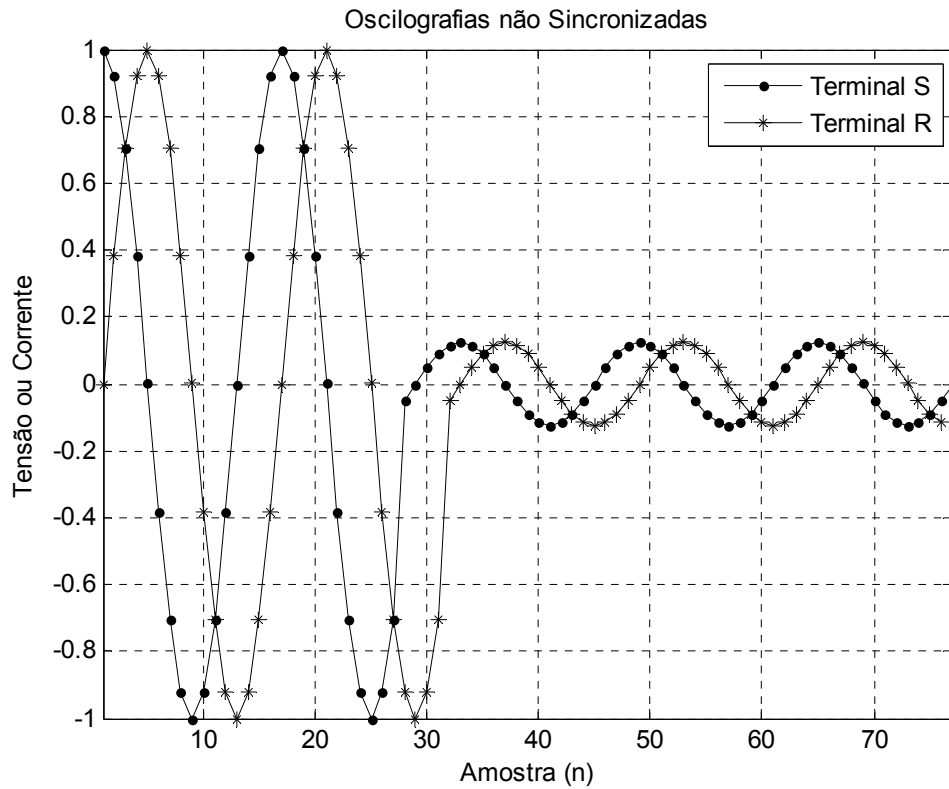


Figura 3.11 - Exemplo didático de dados não sincronizados.

Em outras palavras, executa-se uma primeira sincronização dos dados através dos instantes detectados pelo monitor de transitórios como início da falta. Arbitra-se nos terminais, para o ponto indicado pelo monitor de transitórios, o mesmo instante de tempo, ou seja, não há modificação dos fasores e sim do vetor de tempo associado aos mesmos. A este procedimento chamou-se de sincronização grossa dos dados.

Em uma segunda etapa, buscou-se refinar o processo de sincronização. Para tal, foram utilizados os parâmetros ABCD da linha de transmissão. Inicialmente, escolhe-se um fasor no terminal emissor S da linha. Calcula-se qual deveria ser o fasor correspondente no terminal receptor R. A diferença angular entre o fasor calculado e o estimado (efetivamente existente) corresponde à correção que deve ser feita para sincronizar os dados. Segue a formulação matemática:

$$\begin{bmatrix} V_{R_{calculado}}(x) \\ I_{R_{calculado}}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S_{estimado}}(x) \\ I_{S_{estimado}}(x) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Onde:

$$A = \cosh(\gamma x) \quad (3.31)$$

$$B = -Z_C \sinh(\gamma x) \quad (3.32)$$

$$C = -Y_C \sinh(\gamma x) \quad (3.33)$$

$$D = \cosh(\gamma x) \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Angulo}_V \\ \hat{Angulo}_I \end{bmatrix} = \hat{angulo} \left(\begin{bmatrix} V_{R_{calculado}}(x) \\ I_{R_{calculado}}(x) \end{bmatrix} \right) - \hat{angulo} \left(\begin{bmatrix} V_{R_{estimado}}(x) \\ I_{R_{estimado}}(x) \end{bmatrix} \right) \quad (3.35)$$

$$\hat{Angulo} = \frac{\hat{Angulo}_V + \hat{Angulo}_I}{2} \quad (3.36)$$

$$Fasor_{corrigido}(t) = Fasor_{original}(t) \cdot e^{\sqrt{-1} \cdot \hat{Angulo}} \quad (3.37)$$

Vale ressaltar que o método implementado é exato para o caso de ocorrência de uma falta no meio da linha, pois neste caso a frente de onda do transitório irá chegar ao mesmo tempo nos terminais. Caso a falta ocorra em outros locais, faz-se necessário efetuar uma primeira sincronização fina seguida da localização da falta. Com o local de falta obtido, procede-se uma nova sincronização fina considerando o tempo de propagação diferenciado para cada terminal, seguido de uma nova localização da falta. Na prática, este procedimento se faz necessário apenas para linhas de grande comprimento, o que não é usual para linhas de circuito duplo. Outro fato relevante é de que o ângulo obtido usualmente é de uma fração de radianos que reforça o fato de que a simplificação adotada tem baixa influência nos resultados.

Feita a sincronização dos dados, o algoritmo automaticamente seleciona os pontos de intercessão entre os terminais, sendo os demais desprezados. A partir desse momento, o conjunto de dados se encontra devidamente preparado para a aplicação do método de localização de faltas.

3.2.5. O método de localização de faltas

O método de Johns & Jamalli pode ser estendido para linhas polifásicas a partir do algoritmo básico através do uso de alguma técnica de decomposição modal.

Entretanto, para linhas de circuito duplo, não é possível o perfeito desacoplamento entre os modos de propagação com a utilização da matriz de Fortescue e, conseqüentemente, a aplicação direta do algoritmo desenvolvido por Johns & Jamalli, conforme será demonstrado a seguir.

Tem-se a seguinte matriz de impedâncias, em sua forma mais genérica, para uma linha de transmissão de circuito duplo:

$$\tilde{Z}_{LT_F} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & | & Z_{Aa} & Z_{Ab} & Z_{Ac} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & | & Z_{Ba} & Z_{Bb} & Z_{Bc} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & | & Z_{Ca} & Z_{Cb} & Z_{Cc} \\ - & - & - & + & - & - & - \\ Z_{aA} & Z_{aB} & Z_{aC} & | & Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{bA} & Z_{bB} & Z_{bC} & | & Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cA} & Z_{cB} & Z_{cC} & | & Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{array} \right] \quad (3.38)$$

Para uma linha de circuito duplo perfeitamente transposta esta matriz possui a seguinte forma:

$$\tilde{Z}_{LT_{FT}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_P & Z_M & Z_M & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ Z_M & Z_P & Z_M & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ Z_M & Z_M & Z_P & | & Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} \\ - & - & - & + & - & - & - \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_{M12} & Z_{M12} & Z_{M12} & | & Z_M & Z_M & Z_P \end{array} \right] \quad (3.39)$$

onde Z_P denota a impedância própria, Z_M a impedância mútua entre fases do mesmo circuito e Z_{M12} a impedância mútua entre as fases de circuitos diferentes da linha de transmissão.

A matriz de Fortescue para a transformação em componentes simétricas tem a seguinte configuração para uma linha trifásica:

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\tilde{Q}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

com $a = e^{\sqrt{-1} \cdot \frac{2\pi}{3}}$.

Ao se considerar a linha como de circuito duplo temos:

$$\tilde{Q}_{\text{Circuito Duplo}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \tilde{Q} & & & 0 & & \\ - & + & - & & & \\ 0 & & & \tilde{Q} & & \end{array} \right] \quad (3.42)$$

$$\tilde{Q}_{\text{Circuito Duplo}}^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \tilde{Q}^{-1} & & & 0 & & \\ - & + & - & & & \\ 0 & & & \tilde{Q}^{-1} & & \end{array} \right] \quad (3.43)$$

Aplicando a transformação em componentes simétricas à Equação 3.39 tem-se:

$$\tilde{Z}_{LT_M} = \tilde{Q}_{\text{Circuito Duplo}}^{-1} \cdot \tilde{Z}_{LT_{F_T}} \cdot \tilde{Q}_{\text{Circuito Duplo}} \quad (3.44)$$

$$\tilde{Z}_{LT_M} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_P + 2Z_M & 0 & 0 & 3Z_{M12} & 0 & 0 \\ 0 & Z_P - Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_P - Z_M & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & + & - & - \\ 3Z_{M12} & 0 & 0 & Z_P + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_P - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_P - Z_M \end{array} \right] \quad (3.45)$$

A Equação 3.45 mostra que existirá uma mútua de seqüência zero entre os circuitos quando se utiliza a transformação de Fortescue.

3.2.5.1. Abordagem para linhas de circuito duplo

A aplicação direta do algoritmo de Johns & Jamalli não é razoável para linhas de circuito duplo devido ao acoplamento mútuo de seqüência zero entre os circuitos. Para contornar este problema, pode-se utilizar uma variação do método proposta no mesmo artigo [9] ou, alternativamente, pode-se utilizar a metodologia desenvolvida neste trabalho, sendo este procedimento uma das contribuições originais.

A abordagem desenvolvida consiste em uma adaptação da metodologia proposta em [20]. Ao se aplicar a decomposição modal indicada no artigo ao problema em questão obtém-se a seguinte matriz de impedâncias:

$$\tilde{Z}_{LT_M} = \left[\begin{array}{c|c} \tilde{Z}_{diferencial} & 0 \\ \hline 0 & \tilde{Z}_{aditivo} \end{array} \right] \quad (3.46)$$

Deve-se aplicar a mesma transformação para os vetores de corrente e tensão desta linha. Como ilustração aplicar-se-á a transformação no vetor de tensões. Para uma linha de transmissão de circuito duplo, tem-se o seguinte vetor de tensões:

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ \hline V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

No caso sob estudo, em regime permanente, tem-se $V_A = V_a$; $V_B = V_b$ e $V_C = V_c$, logo:

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ \hline V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Calculando-se $\bar{V}_M = \tilde{T}^{-1} \cdot \bar{V}_F$ com auxílio da Equação 2.10 tem-se:

$$\bar{V}_M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{diferencial} \\ \hline \bar{V}_{aditivo} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Vale ressaltar que, durante a ocorrência de uma falta, as correntes entre os circuitos ficam desbalanceadas e, desta forma, $\bar{V}_{diferencial}$ não será zero neste instante.

Fica evidente então que, para linhas de circuito duplo, pode-se utilizar os pares de transformação modal da Equação 2.9 e da Equação 2.10 para o desacoplamento dos circuitos.

A partir deste momento, utilizam-se todos os dados da linha decomposta equivalente, referentes à componente diferencial para localização de faltas. Esses dados são fornecidos ao algoritmo de Johns & Jamalli para circuito simples desprezando-se a componente aditiva, pois ambas foram perfeitamente desacopladas. A Figura 3.12 ilustra o fluxo de dados ao longo do sistema desenvolvido para as n amostras:

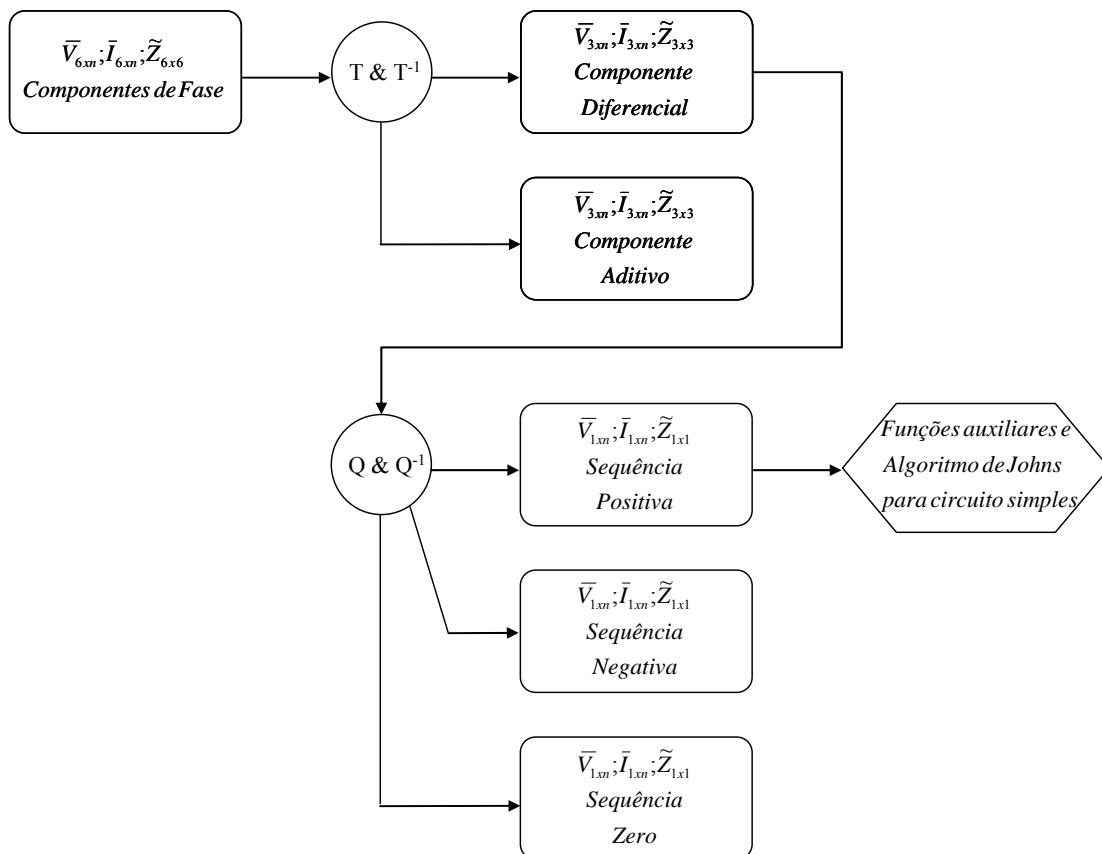


Figura 3.12 - Fluxograma do algoritmo desenvolvido.

3.2.6. Localização da Falta

3.2.6.1. Determinação numérica do local de ocorrência da falta

A Figura 3.13 mostra um gráfico da distribuição acumulada da estimativa do local de falta obtido através da solução do método proposto para uma linha de 150 km. Esta função é sintetizada através de consultas no universo de resultados obtidos para o ponto de falta, dentro de um intervalo de análise compreendido do instante detectado do início da falta até o instante de abertura da linha pelos disjuntores de proteção. Assim, para uma dada abscissa, a ordenada expressa o percentil de resultados menores ou iguais à abscissa.

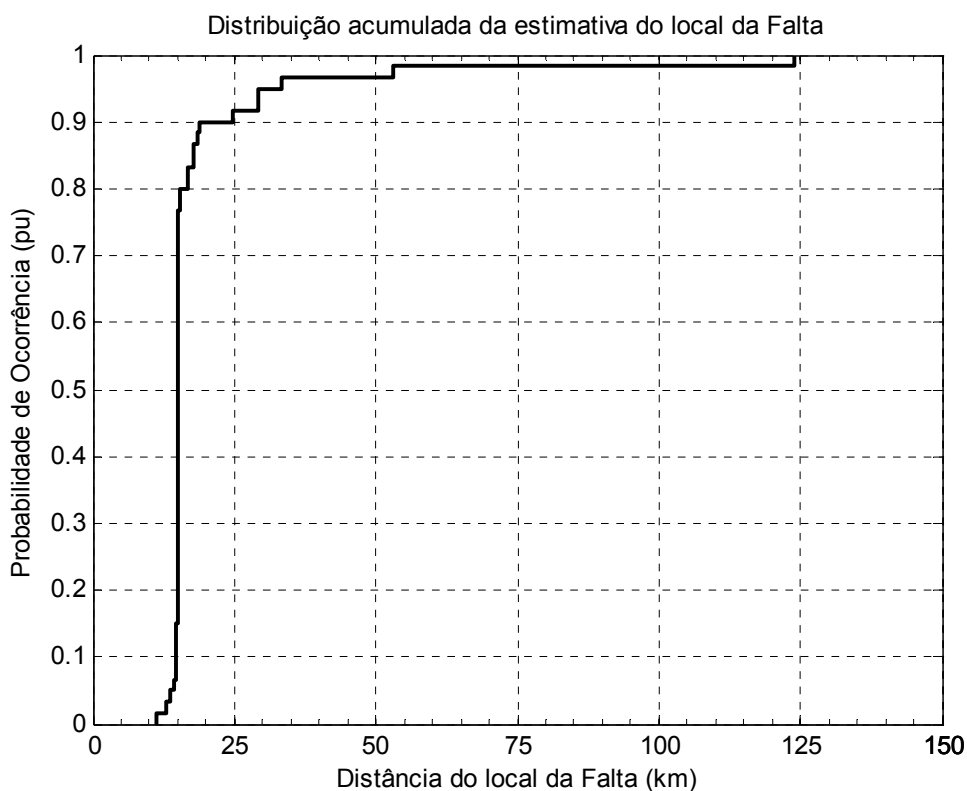


Figura 3.13 - Distribuição acumulada da solução do método proposto.

A Figura 3.14 mostra a evolução temporal da mesma solução.

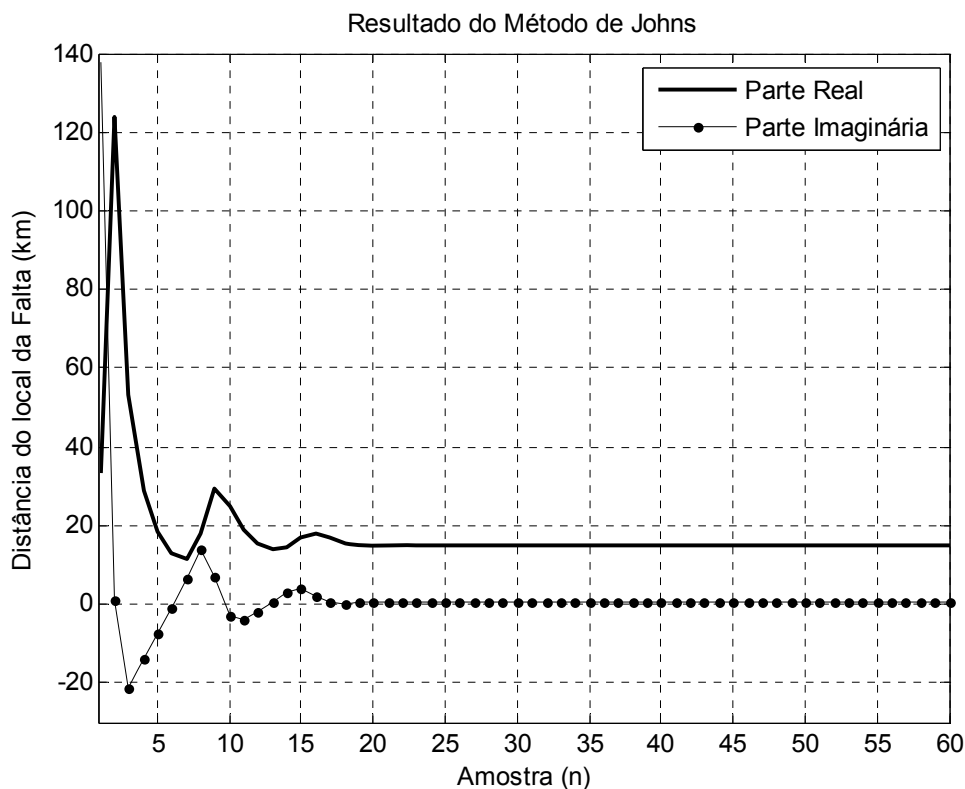


Figura 3.14 - Evolução temporal da solução da Figura 3.13

Estas figuras mostram que o método indica como solução a distância de 15 km para o local de ocorrência da falta. Considerando-se que a mediana retorna o valor central de uma distribuição e que, desta forma, sofre baixa influência dos transitórios numéricos associados ao método de localização, adotou-se essa medida como forma de automatizar a indicação numérica do local de ocorrência da falta. O procedimento implementado consiste em se calcular a mediana do conjunto de pontos compreendidos entre um ciclo após o instante de início da falta até o final dos dados ou da abertura do disjuntor. Outra abordagem possível consiste no cálculo da moda, ou seja, determinar o local com maior frequência de indicações dentre os demais.

3.3. O Caso Real

Obteve-se junto à Companhia Energética de Minas Gerais oscilografias de uma falta para aplicação da metodologia proposta. A Tabela 3.2 apresenta os aspectos construtivos mecânicos disponíveis desta linha de transmissão.

Tabela 3.2 - Características construtivas por circuito.

Comprimento (km):	81,6
Tipo de Condutor:	LINNET
Bitola do Condutor:	CAA 170,5
Tipo de cabo pára-raios:	Aço
Bitola do cabo pára-raios:	HS 5/16
Quantidade de cabos pára-raios:	1
Quantidade de condutores por fase:	1
Quantidade de estruturas metálicas:	196
Tensão Operação (kV):	138
Potência Nominal (MVA):	63

Ao longo desta linha foram utilizadas algumas variações nas estruturas das torres conforme pode ser observado na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Estruturas típicas da LT sob estudo.

Apesar da LT1 e da LT2 compartilharem algumas estruturas, elas são classificadas de forma mais adequada como linhas próximas e não como uma linha de circuito duplo tradicional. A Figura 3.16 apresenta um croqui desta linha. O trecho sob estudo se encontra entre a SE1 e a SE2.

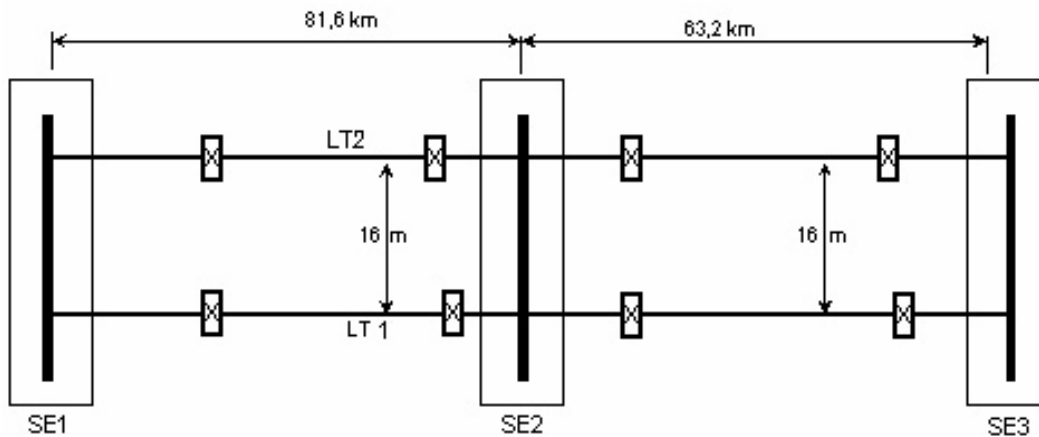


Figura 3.16 - Croqui da LT

A Tabela 3.3 e a Tabela 3.4 resumem as características elétricas da LT, representada pelo modelo Pi, no domínio modal fornecidos pela Cemig.

Tabela 3.3 - Características elétricas.

Impedância (Ω)	LT1	LT2
R_1	15,491	15,491
X_1	40,630	40,630
$B_1/2$	134,660	134,797
R_0	41,835	41,591
X_0	139,705	139,827
$B_0/2$	84,302	83,972

Tabela 3.4 - Características elétricas: Mútua entre circuitos.

R_{0m} (Ω)	26,088
X_{0m} (Ω)	80,294

Os arquivos em formato contrade binário foram importados no software Digsig, desenvolvido pela Siemens. Fez-se manualmente uma sincronização grossa dos dados, sendo a intercessão temporal dos mesmos salva em formato contrade ASCII. Com o auxílio do programa GTPPlot, disponível na área de download do Canadian / American EMTP User Group, converteu-se as oscilografias do formato contrade ASCII para o formato PRN, sendo este último carregado no Matlab.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelo sistema localizador desenvolvido. Os casos simulados no ATP foram utilizados para validação do método proposto.

A validação do sistema desenvolvido para localização de faltas é uma etapa de vital importância. Idealmente, dever-se-ia testar o sistema com oscilografias de eventos que realmente ocorreram no sistema elétrico de potência. Infelizmente tais dados não se encontram amplamente disponíveis e sua dificuldade de obtenção acarreta a validação dos sistemas unicamente com casos simulados. Por isso, deve-se ter um extremo cuidado na configuração dos parâmetros da simulação. Ao se simular uma falta, que está associada a um fenômeno de propagação de onda, deve-se escolher modelos que reproduzam fielmente este fato.

A Impedância Característica (Z_0) e a Constante de Propagação da linha de transmissão (γ) são dois parâmetros que são funções da frequência, mesmo quando R, L, C e G são uniformemente distribuídos, exceto para linhas sem distorção ou para linhas sem perdas, inexistentes no mundo real. Desta forma, apenas modelos com parâmetros variáveis na frequência são capazes de modelar de forma mais precisa os vários fenômenos de propagação presentes em uma linha de transmissão.

Além disto, a dependência com a frequência da resistência e da indutância é mais pronunciada no modo de seqüência zero [10]. Portanto, ao se simular uma falta, deve-se escolher um modelo que seja aderente à realidade. A escolha incorreta pode levar a obtenção de baixos erros de localização para os casos simulados que nunca se verificarão numa aplicação prática.

Ao se determinar a distância do ponto de falta pelo método de Johns & Jamalli, obtém-se uma solução composta por uma distância real e uma parcela imaginária, sendo que esta última tende a zero caso todos os parâmetros utilizados para localização estejam precisamente definidos. Desta forma, ao se observar o comportamento da componente imaginária da solução, pode-se ter uma métrica da qualidade da solução obtida. Está sendo proposto como critério neste trabalho a observação do valor absoluto desta componente, chamando-a de “Fator de Desconfiança”. Esta abordagem é bastante útil, pois se pode fazer uma crítica da exatidão do resultado obtido a partir da observação deste fator. Com o intuito de se manter uma coerência com o método original de Johns & Jamalli, o Fator de Desconfiança ideal vale zero. Da mesma forma, quanto maior esse Fator de Desconfiança, pior a solução obtida. Esquemáticamente o processo pode ser visualizado na figura abaixo:

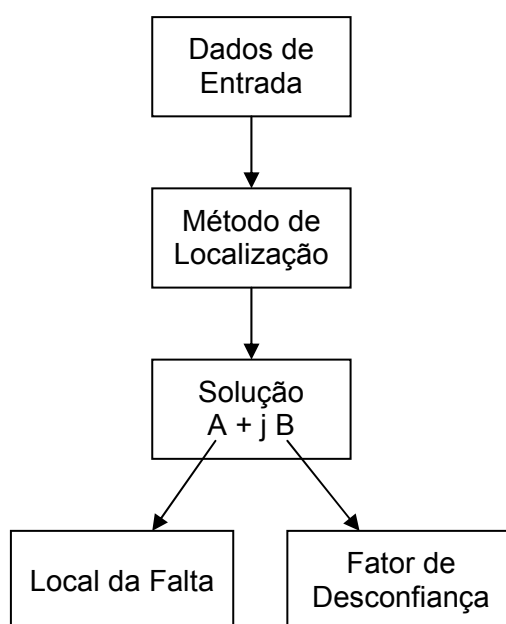


Figura 4.1 - Obtenção do Local da Falta e do Fator de Desconfiança.

Para o cálculo dos erros de localização foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$Erro_{Distância} = |D_R - D_L| \quad (4.1)$$

ou

$$Erro_{\%} = \frac{|D_R - D_L|}{l} \quad (4.2)$$

Onde:

D_R indica a distância real de ocorrência da falta;

D_L indica a distância estimada do local da falta;

l indica o comprimento da linha de transmissão.

4.2. Resultados de casos simulados

Os gráficos a seguir retratarão as principais etapas do processo de localização implementado, a saber:

- Tensões e Correntes filtradas de ambos os circuitos e ambos os terminais da linha de transmissão;
- Evolução do Monitor de Transitórios para as tensões e correntes do terminal S;
- Evolução da solução do Método de Johns & Jamalli.

O primeiro conjunto de gráficos se refere ao seguinte caso simulado, mostrado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Parâmetros da Simulação e Resultados.

Tipo de Falta	AT
δ	0°
"Instante"	Tensão zero no ponto de falta
SIR	1
Resistência de Falta	10 Ω
Distância Simulada	75 km
Distância localizada	75,000000 km
Fator de Desconfiança	0,000000

A Figura 4.2 até a Figura 4.12 se referem a este caso simulado.

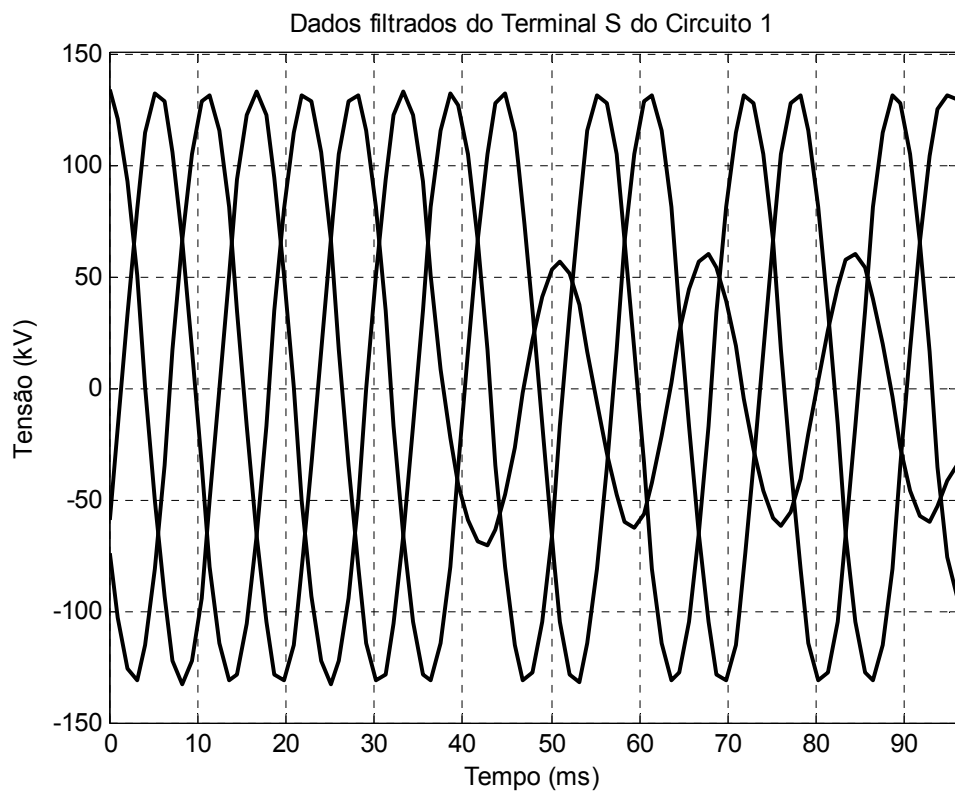


Figura 4.2 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 1.

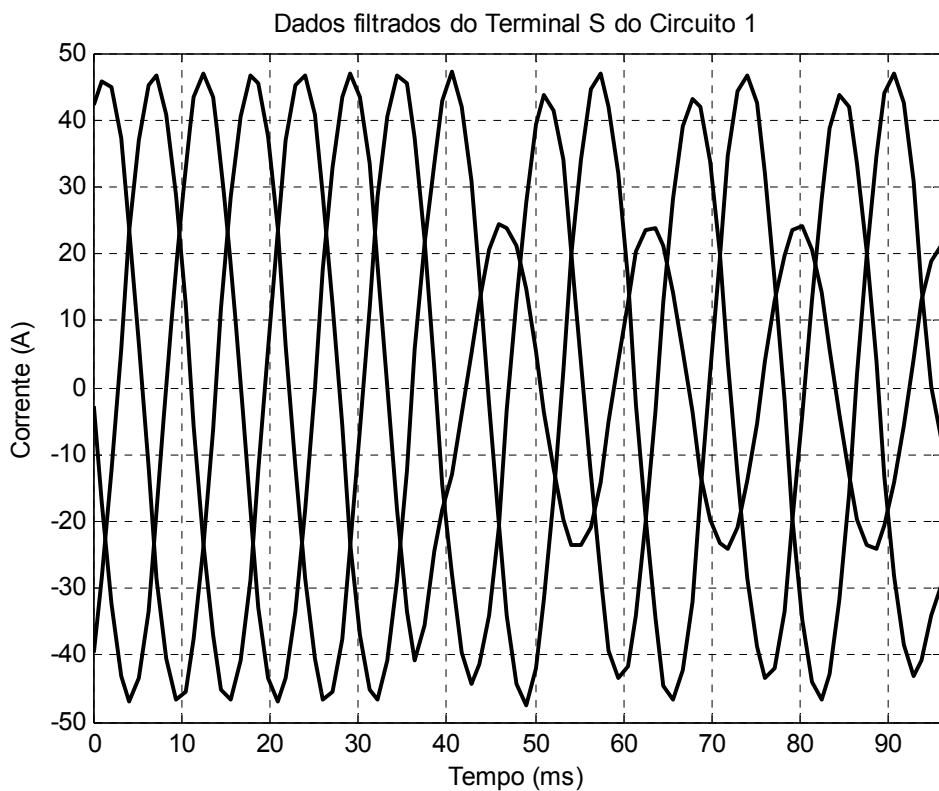


Figura 4.3 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 1.

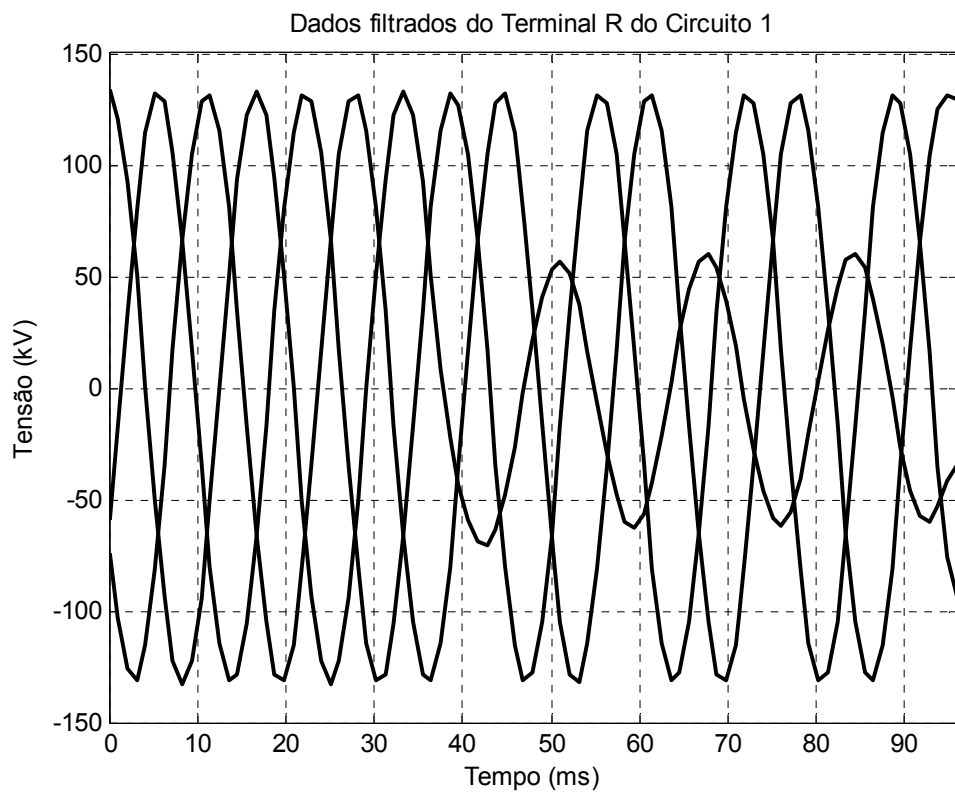


Figura 4.4 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 1.

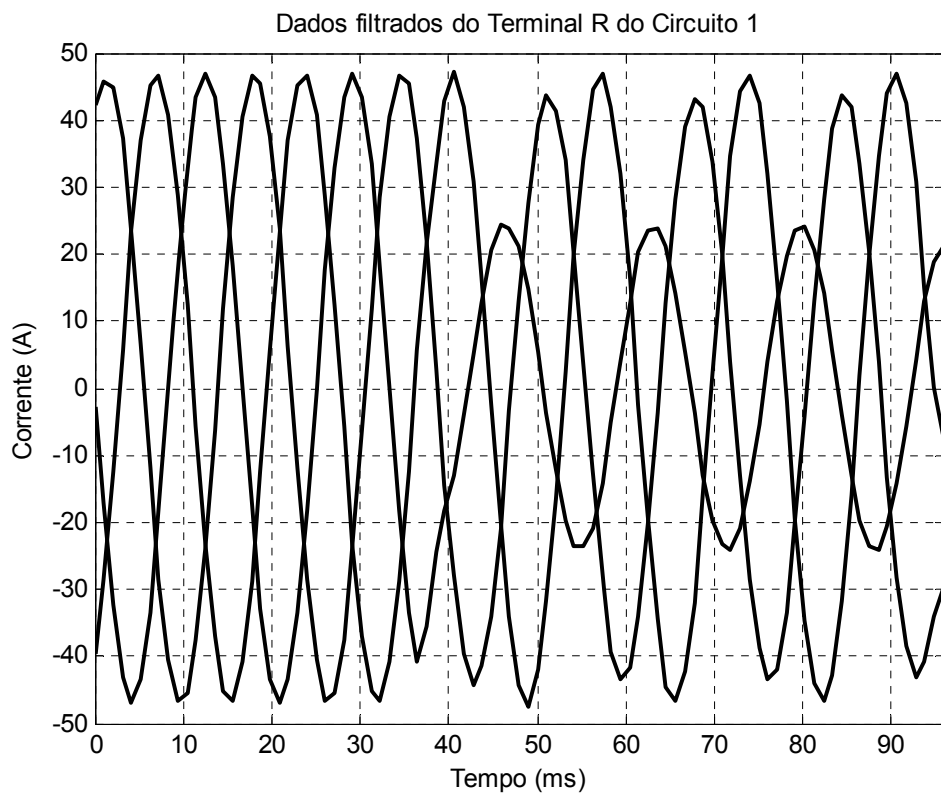


Figura 4.5 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 1.

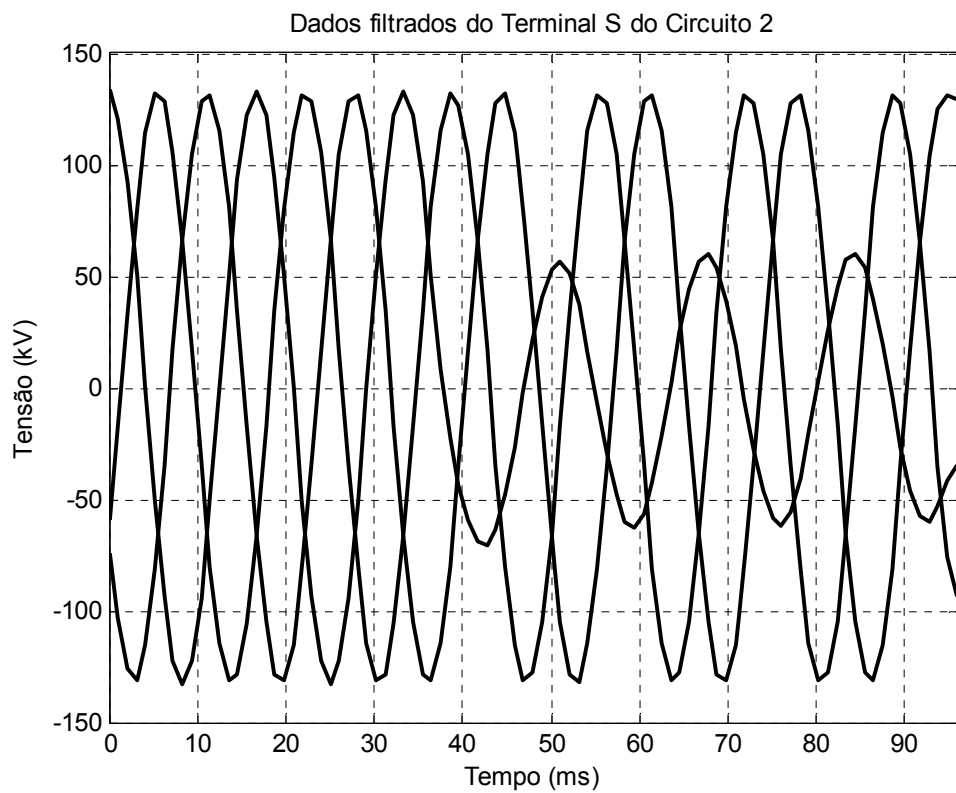


Figura 4.6 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 2.

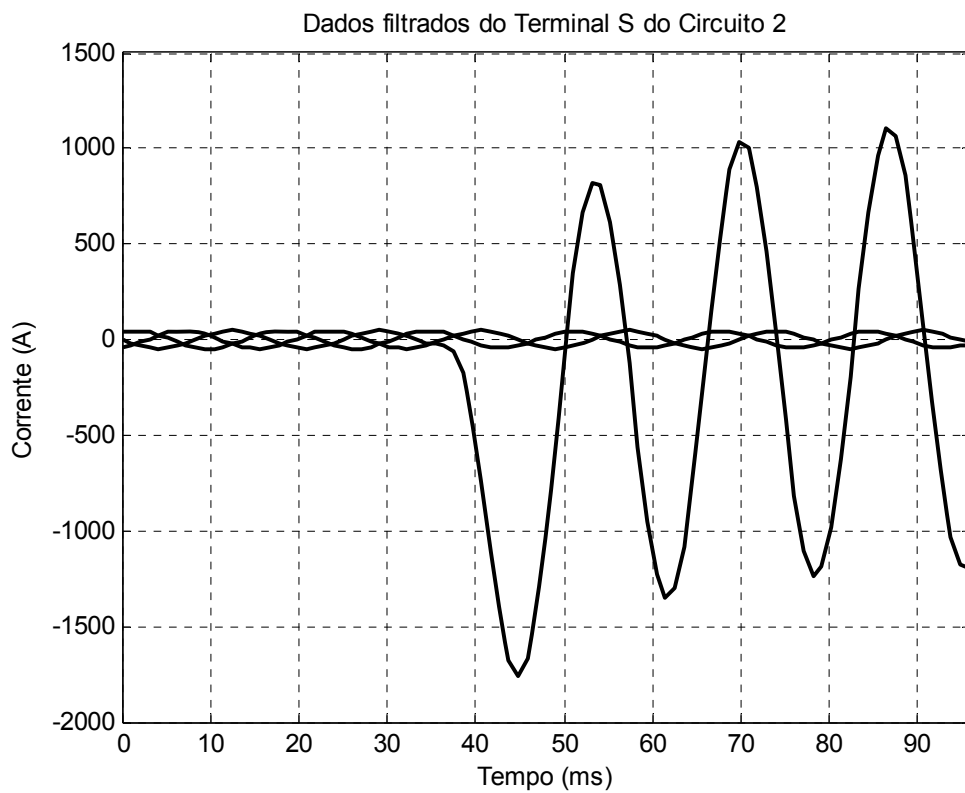


Figura 4.7 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 2.

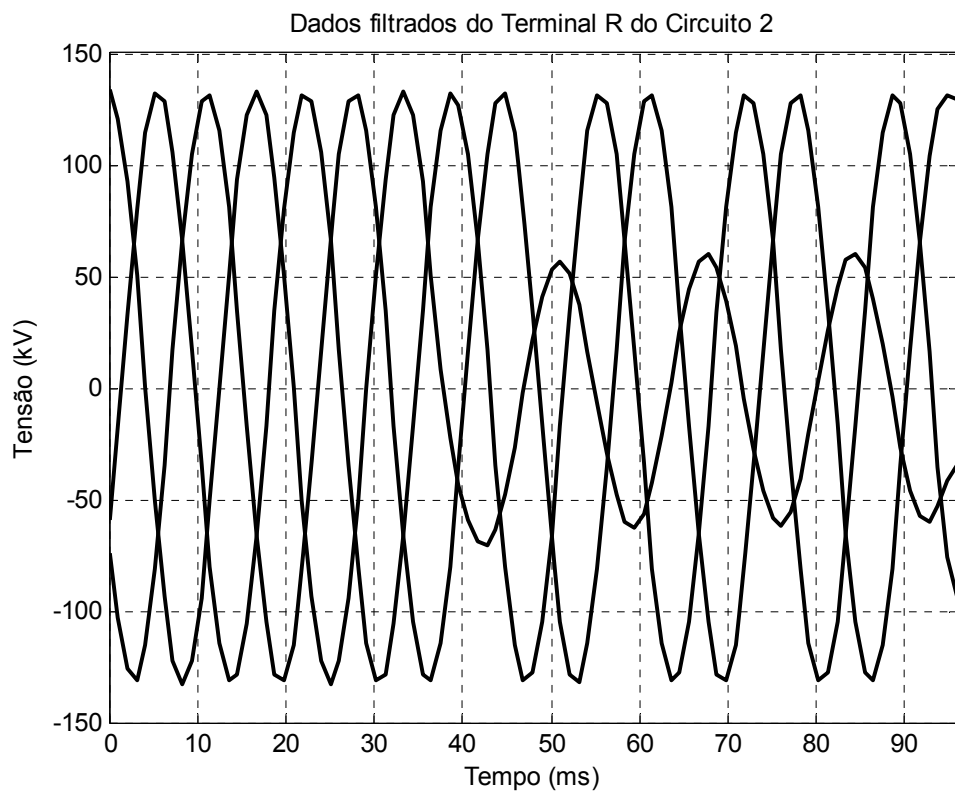


Figura 4.8 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 2.

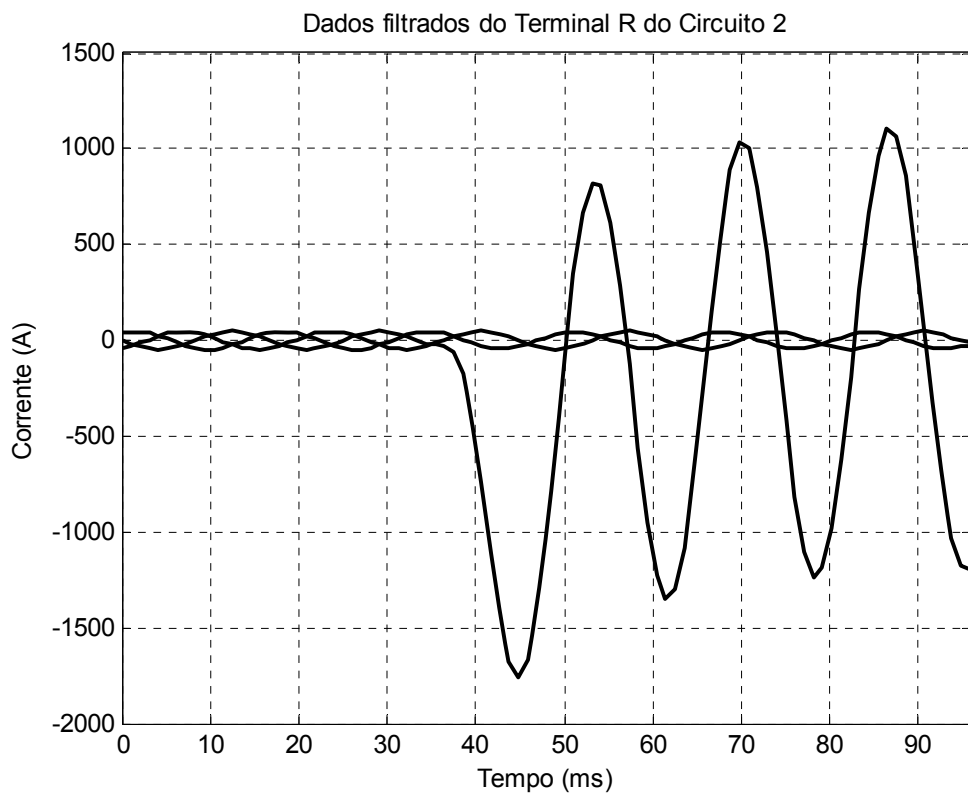


Figura 4.9 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 2.

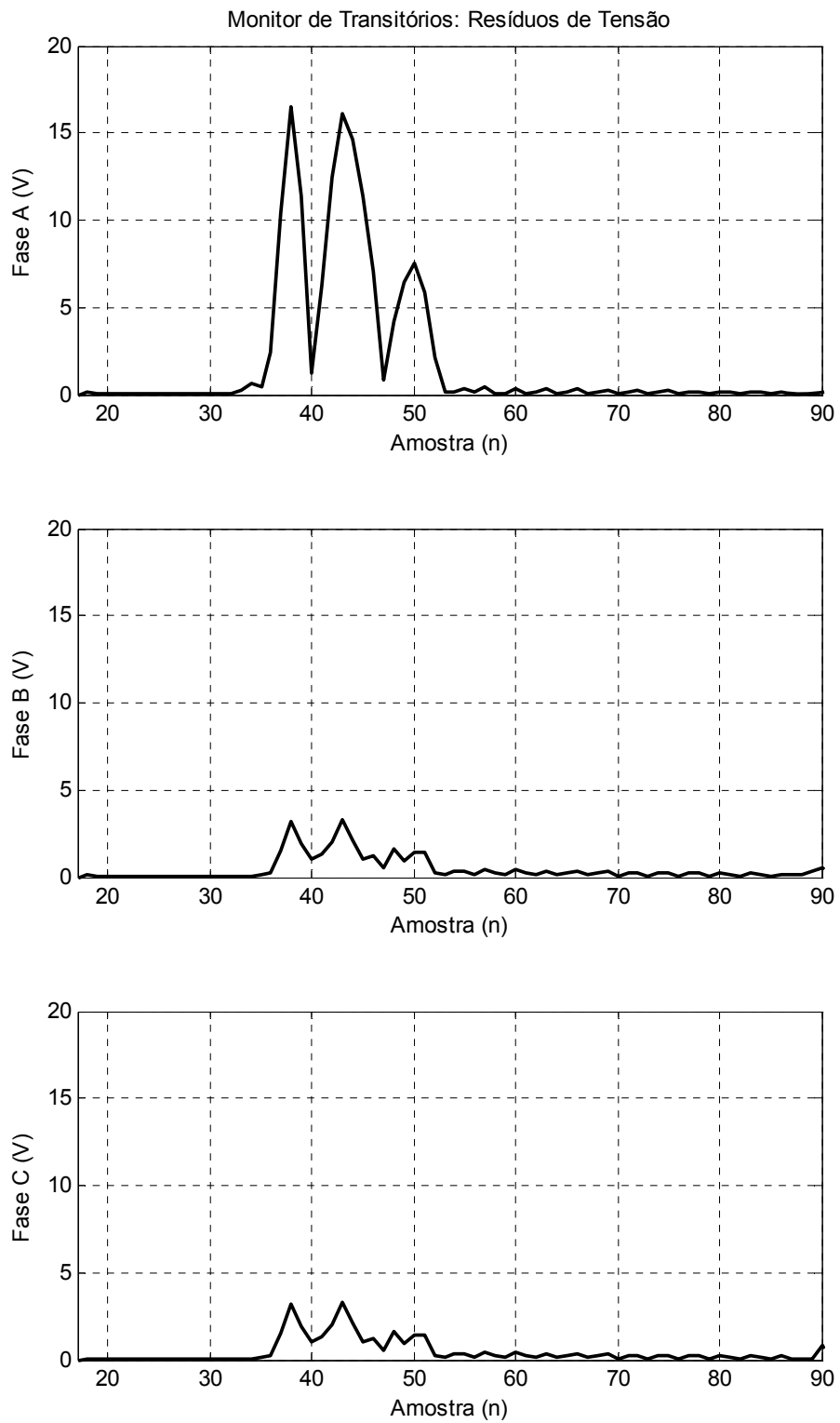


Figura 4.10 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

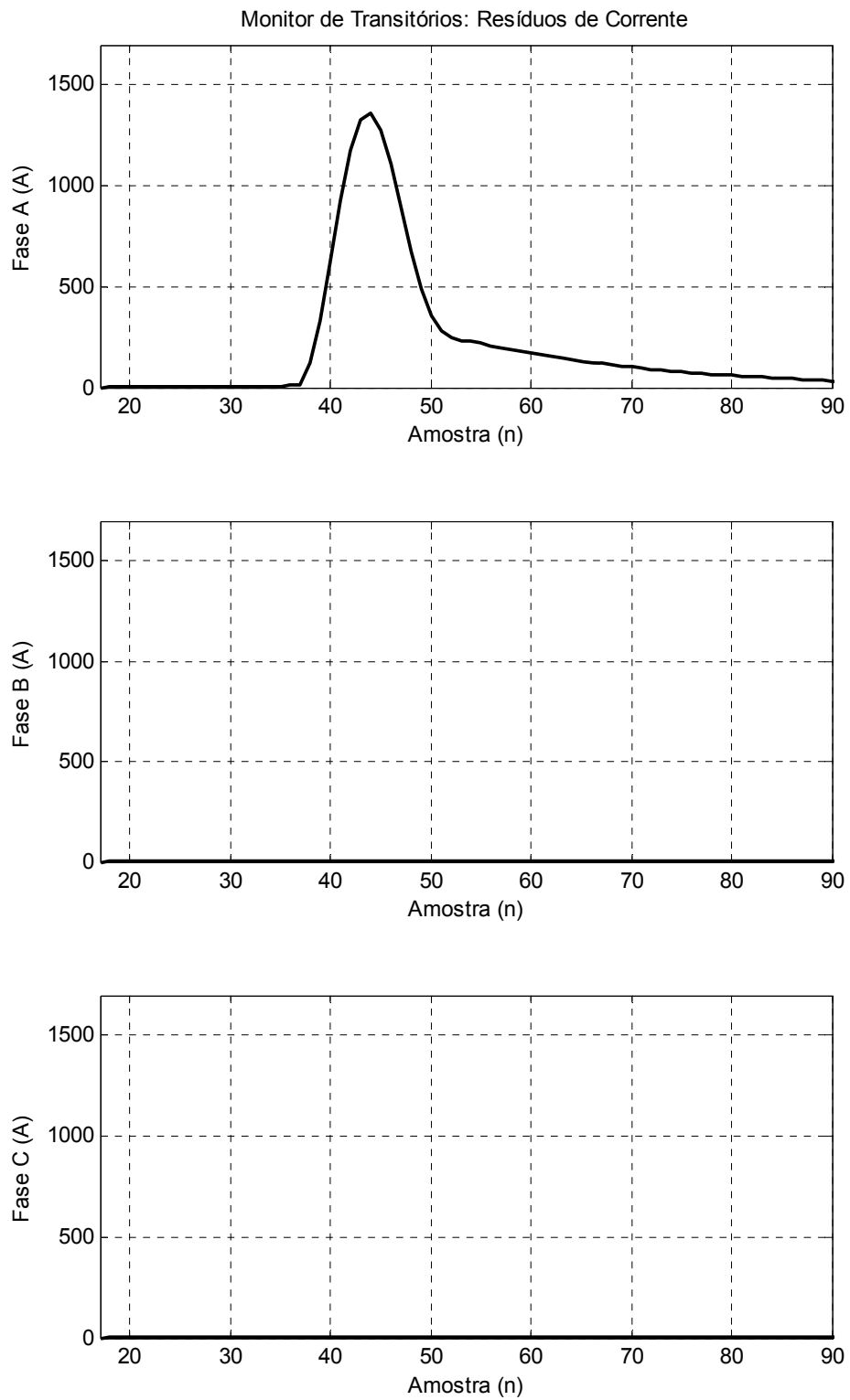


Figura 4.11 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

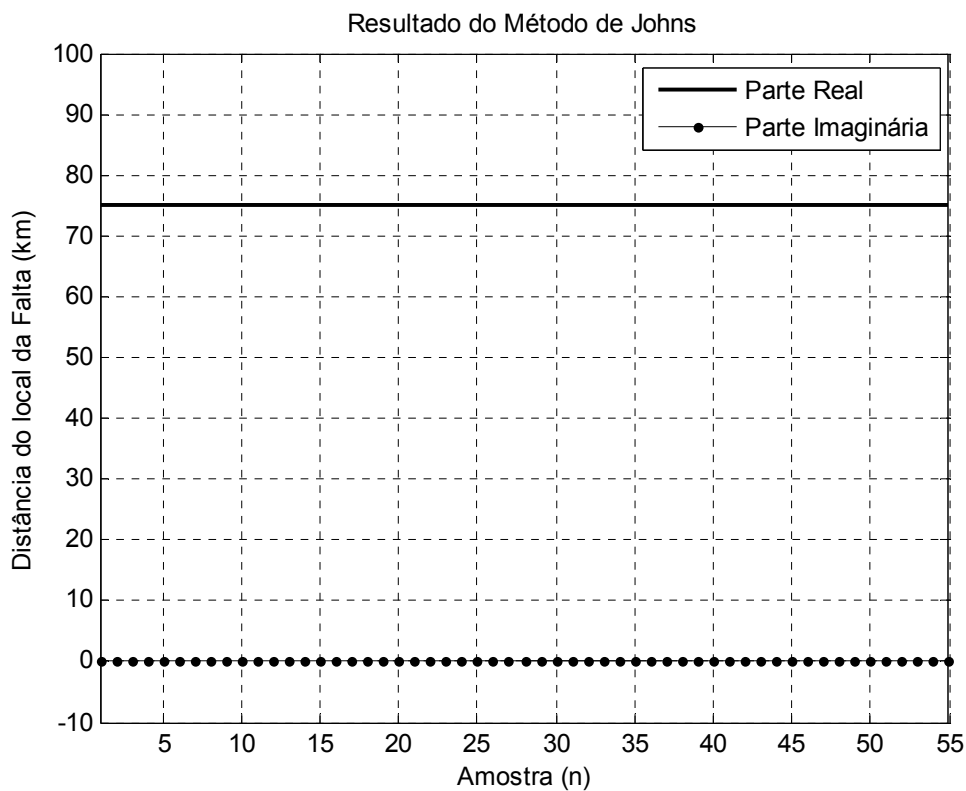


Figura 4.12 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.

O segundo conjunto de gráficos se refere ao seguinte caso simulado, mostrado na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Parâmetros da Simulação e Resultados.

Tipo de Falta	BC
δ	30°
"Instante"	Máximo da tensão no ponto de falta
SIR	10
Resistência de Falta	0 Ω
Distância Simulada	15 km
Distância localizada	14,870013 km
Fator de Desconfiança	0,365926

A Figura 4.13 até a Figura 4.23 se referem a este caso simulado.

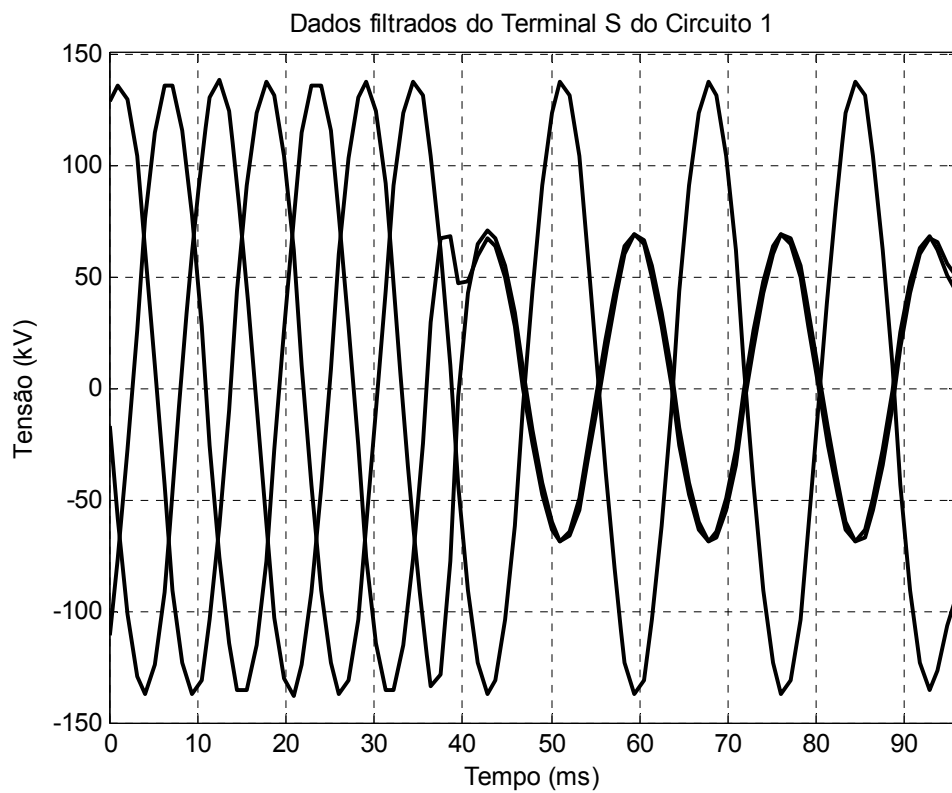


Figura 4.13 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 1.

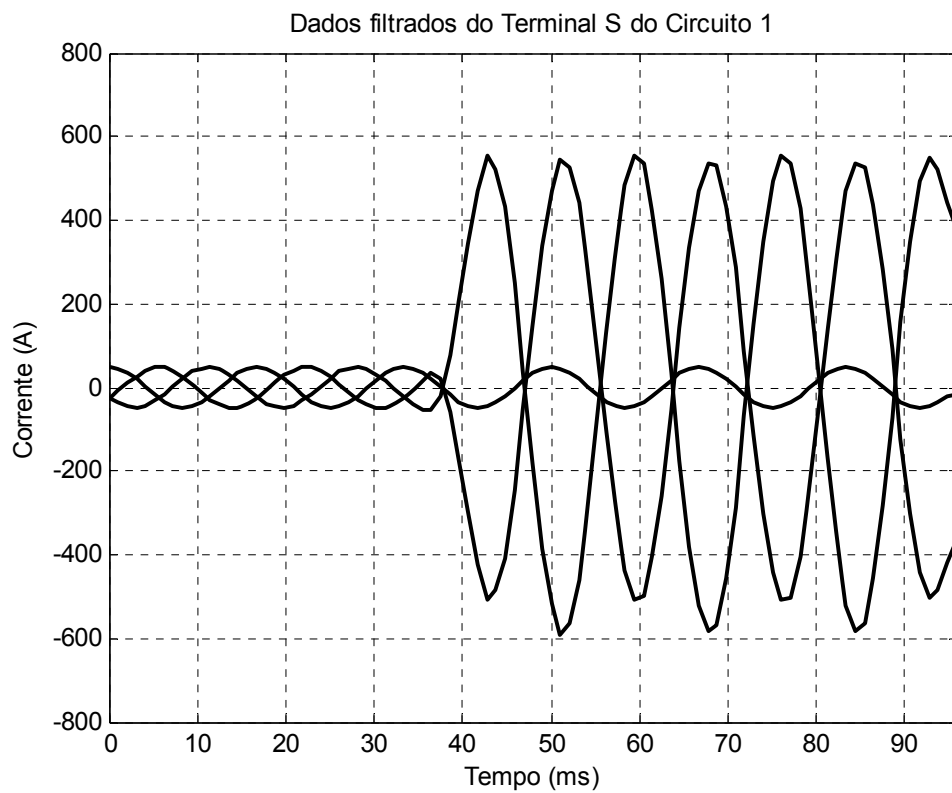


Figura 4.14 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 1.

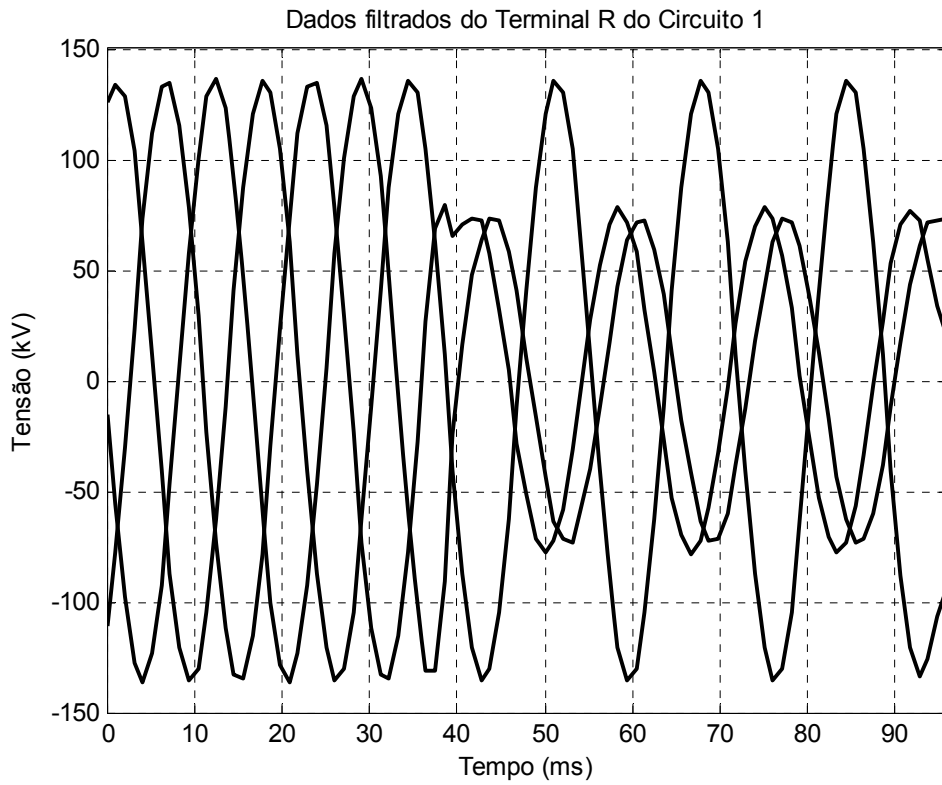


Figura 4.15 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 1.

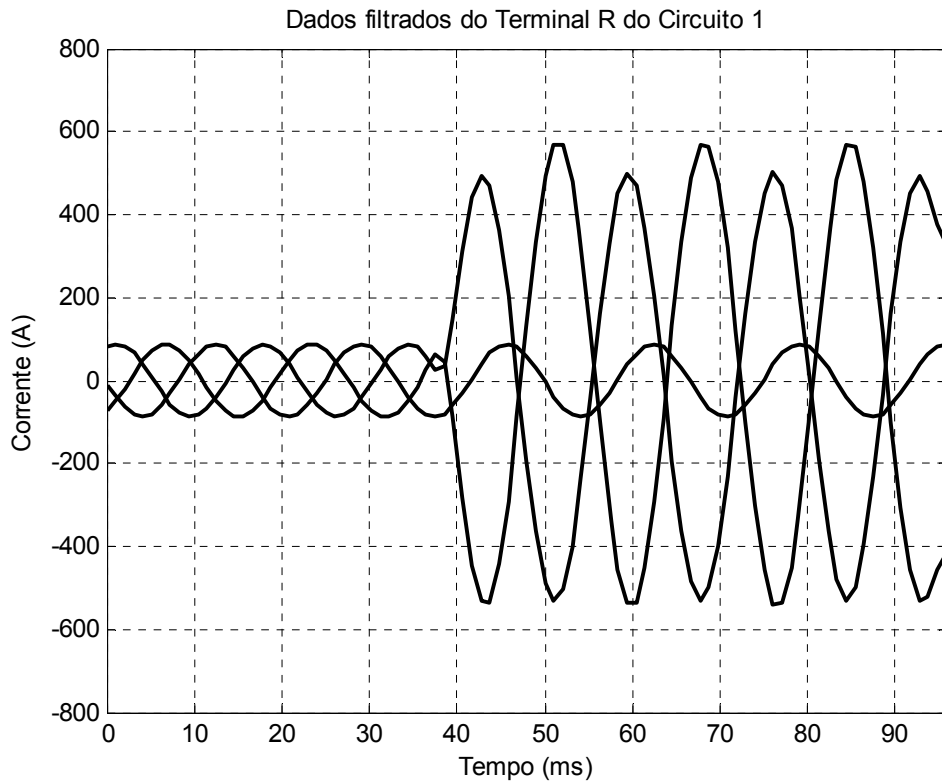


Figura 4.16 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 1.

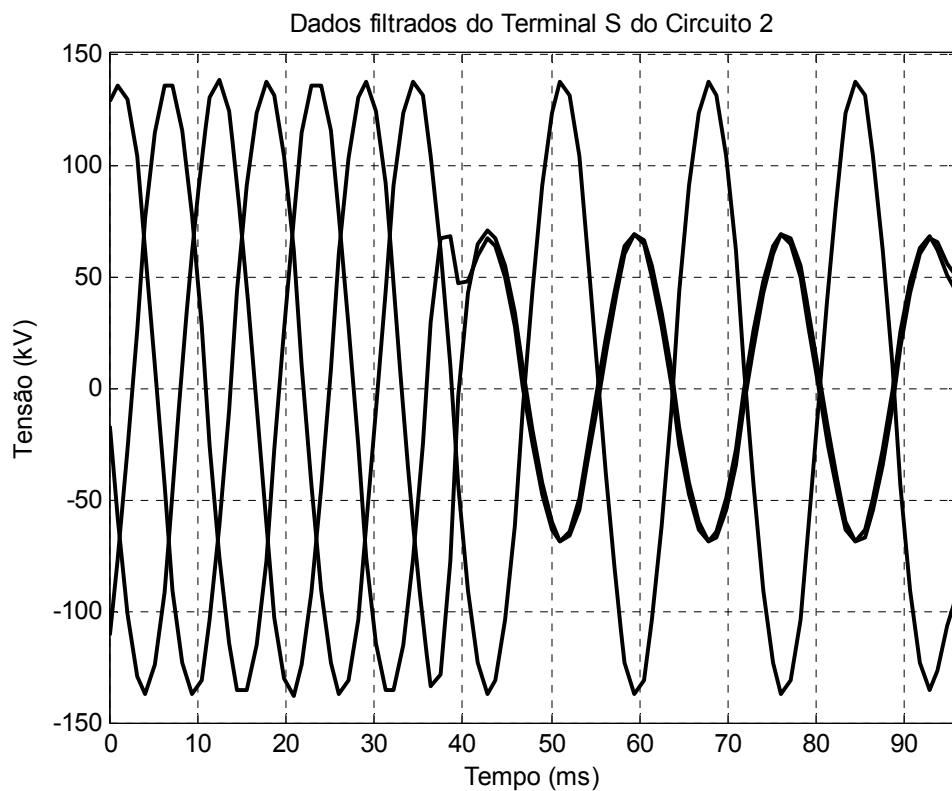


Figura 4.17 - Dados de Tensão filtrados do Terminal S do Circuito 2.

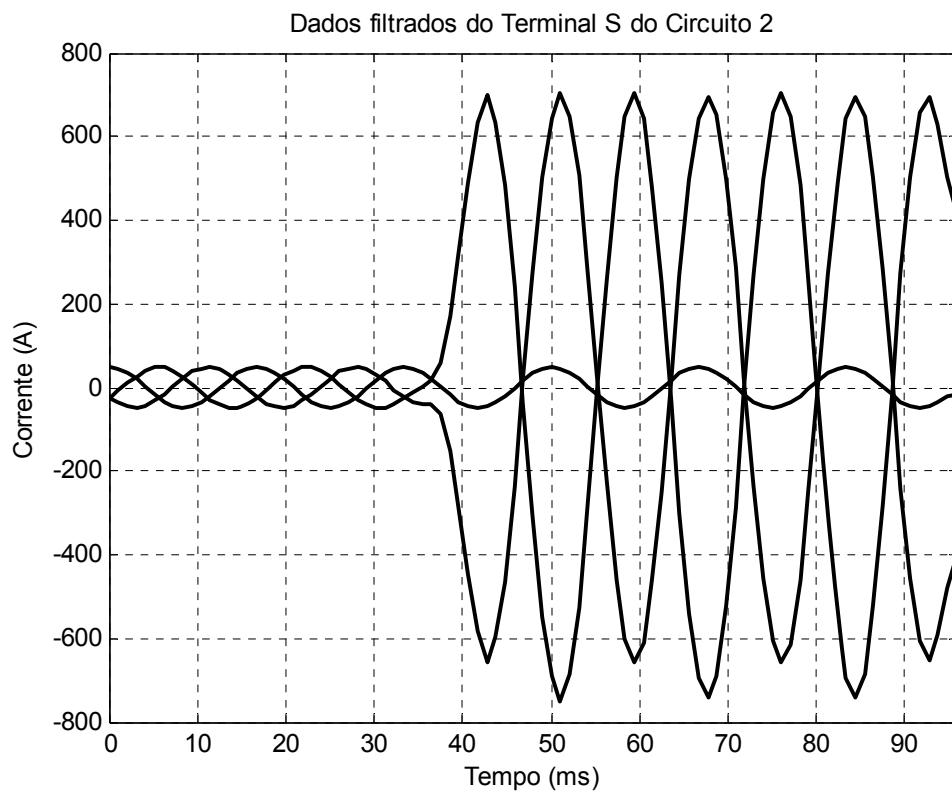


Figura 4.18 - Dados de Corrente filtrados do Terminal S do Circuito 2.

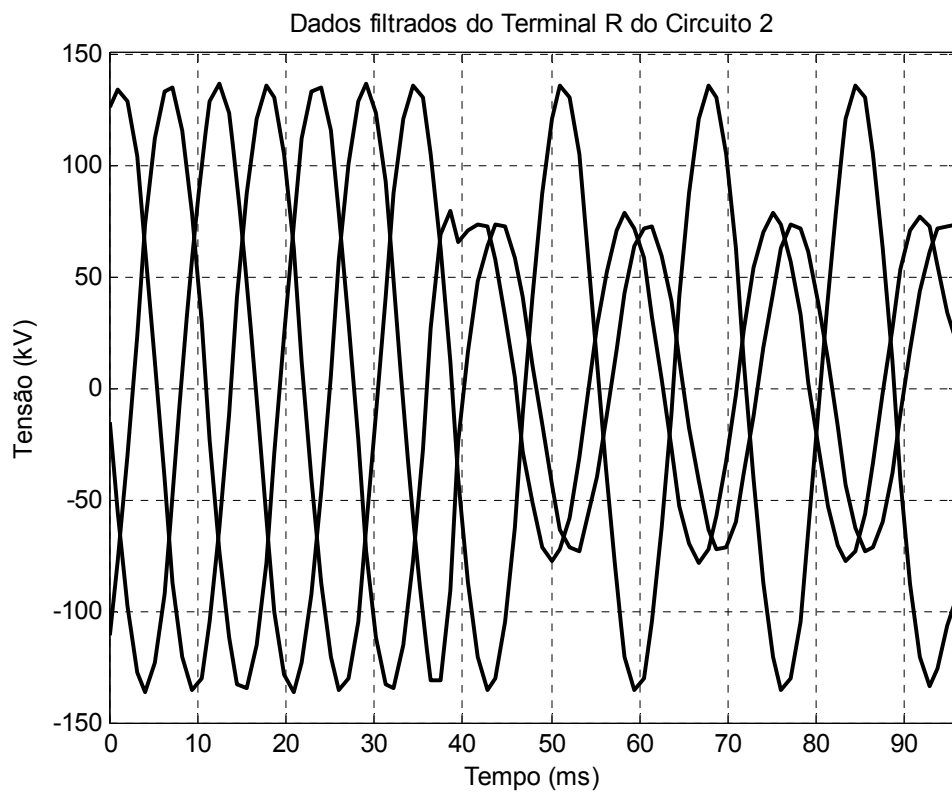


Figura 4.19 - Dados de Tensão filtrados do Terminal R do Circuito 2.

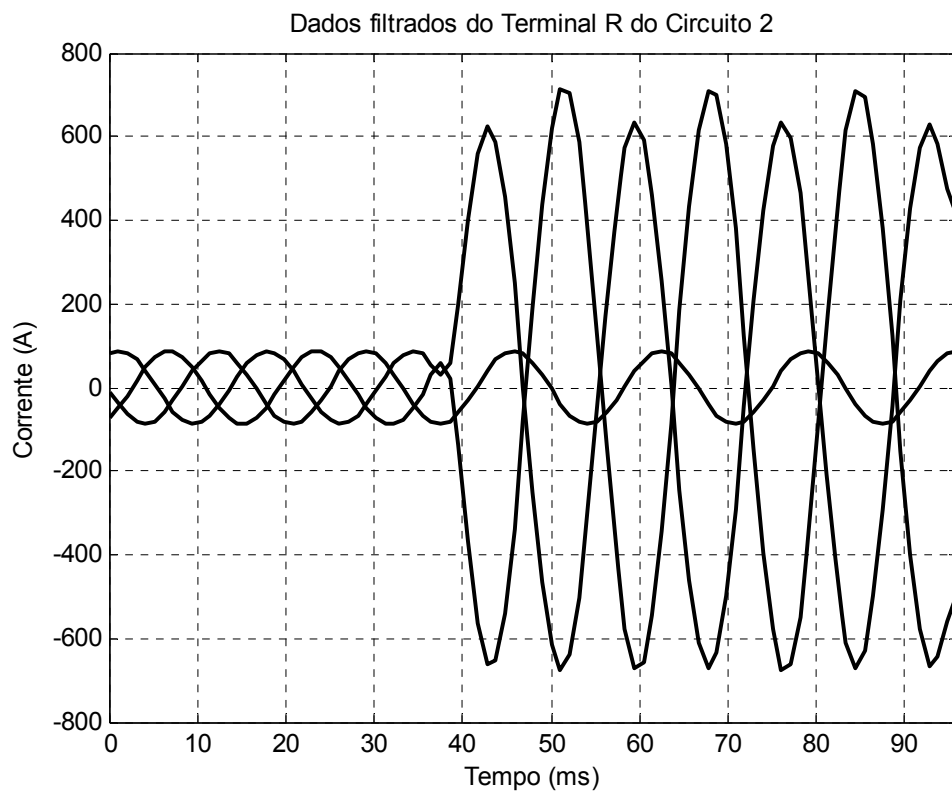


Figura 4.20 - Dados de Corrente filtrados do Terminal R do Circuito 2.

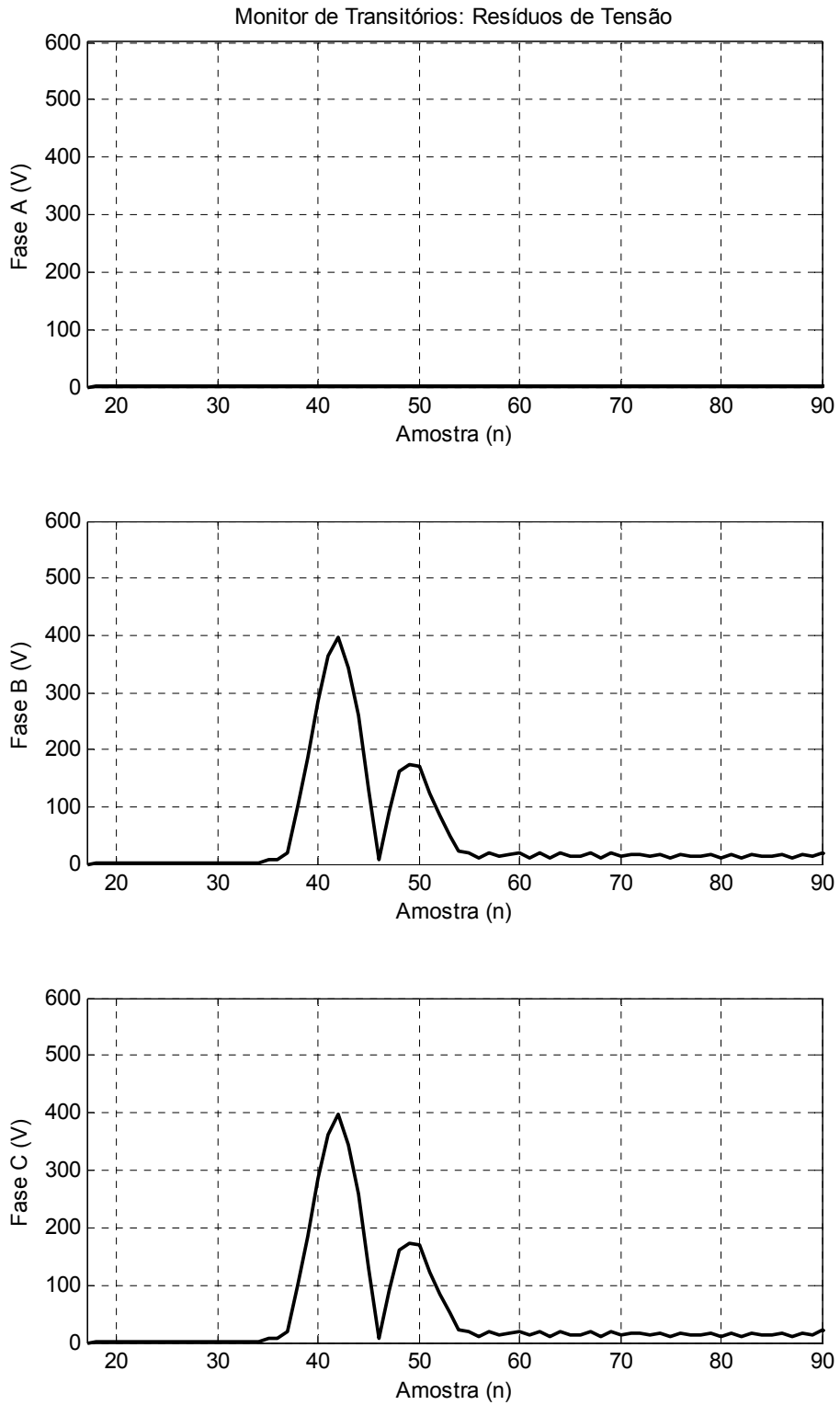


Figura 4.21 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

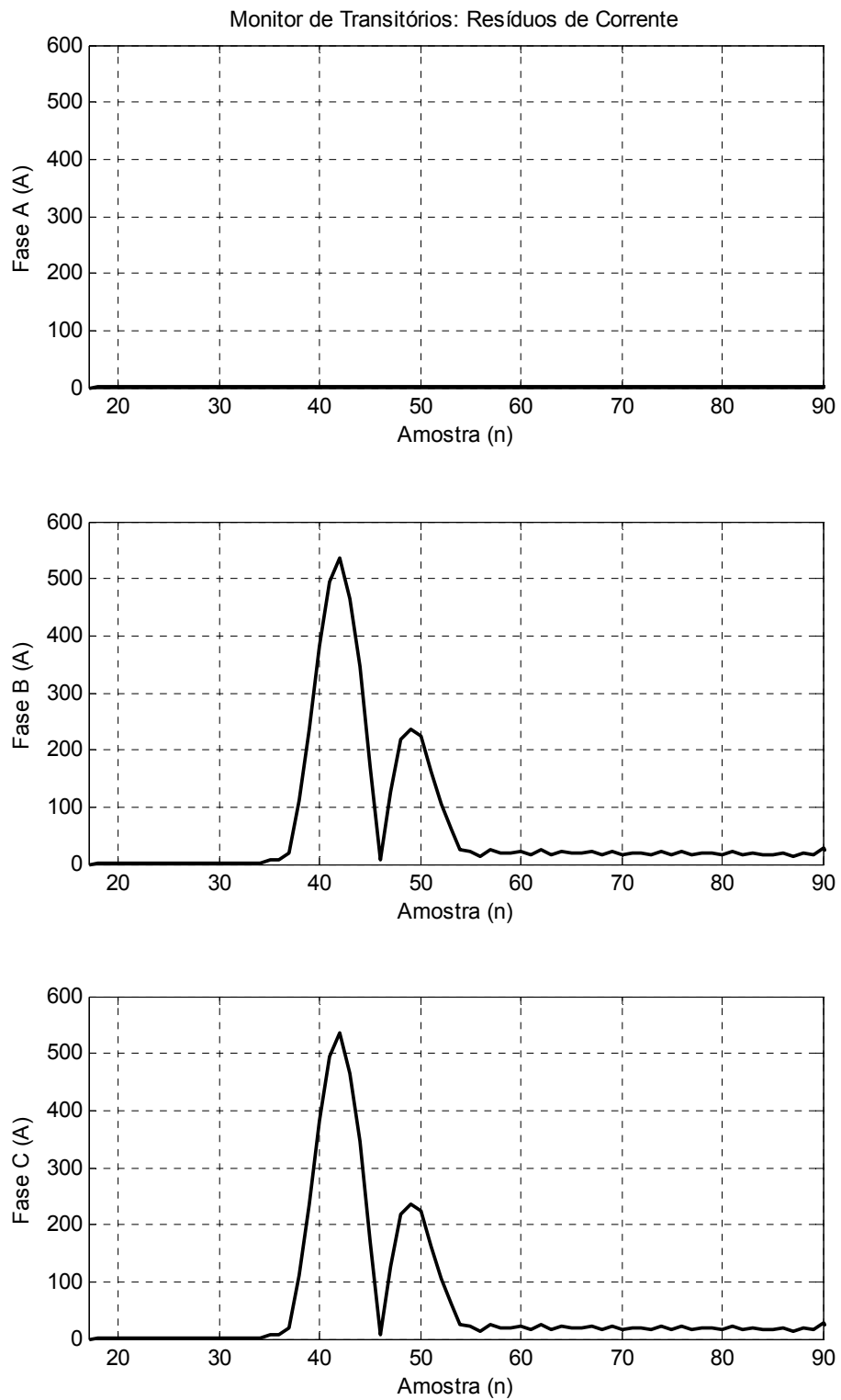


Figura 4.22 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

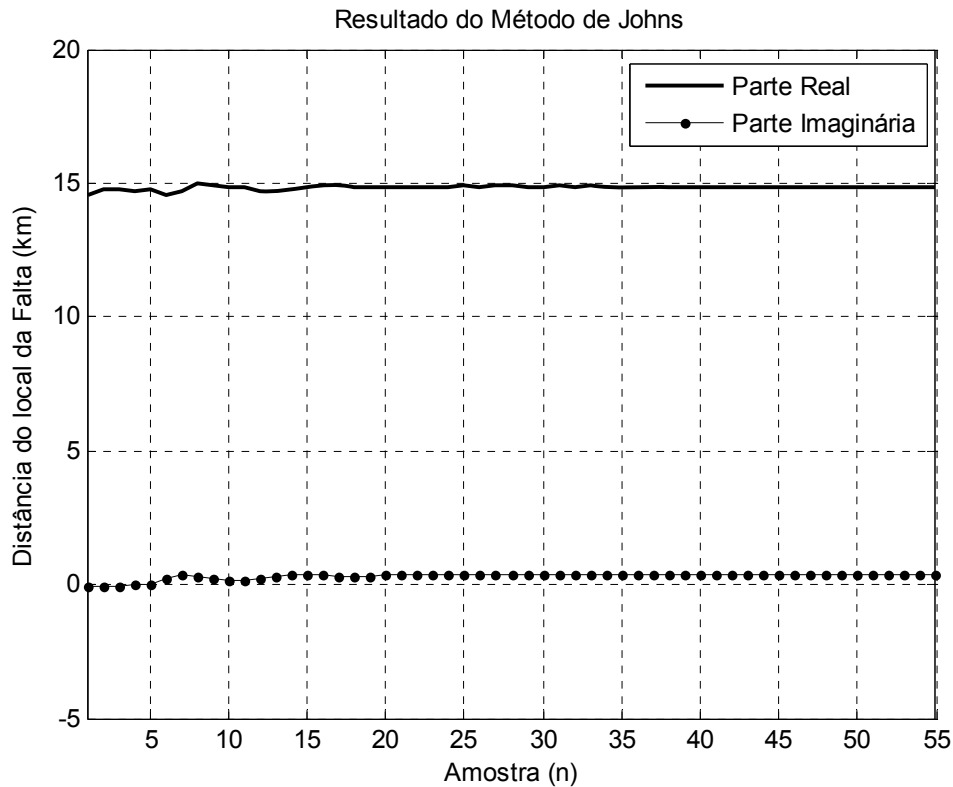


Figura 4.23 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.

A Tabela 4.3 traz os resultados obtidos para todos os casos simulados. Os resultados caso se utilize o algoritmo de linha simples, ignorando-se a existência do segundo circuito, também serão apresentados.

Esta tabela mostra que a abordagem matemática desenvolvida neste trabalho é capaz de corretamente retratar os fenômenos físicos que ocorrem na linha de transmissão de circuito duplo e obter resultados com baixos erros de localização. Também estão detalhados nesta tabela os resultados da aplicação do método de Johns & Jamalli ignorando a presença do circuito são. Ao se adotar esta metodologia alternativa, os resultados apresentaram grandes erros de localização.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos pelo localizador proposto e os resultados obtidos desprezando-se a presença do circuito são.

Falta ($R_F = 0 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	15	0	Máximo	1	13,949	0,455	0,700	14,873	0,368	0,085	924
				10	13,167	0,658	1,222	14,873	0,369	0,085	1707
				0,1	14,864	0,884	0,091	14,875	0,369	0,083	11
			Zero	1	13,928	0,454	0,715	14,872	0,368	0,085	944
				10	13,070	0,480	1,286	14,872	0,367	0,085	1802
				0,1	14,823	0,367	0,118	14,871	0,368	0,086	48
		30	Máximo	1	14,089	2,063	0,607	14,874	0,369	0,084	785
				10	13,148	1,169	1,234	14,872	0,367	0,085	1724
				0,1	14,679	1,105	0,214	14,872	0,371	0,085	193
			Zero	1	22,625	22,916	5,084	14,873	0,369	0,085	7753
				10	4,231	14,462	7,179	14,872	0,367	0,086	10640
				0,1	14,978	0,891	0,015	14,873	0,370	0,085	105
	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	74,049	0,015	0,634	75,000	0,000	0,000	951
				0,1	75,951	0,015	0,634	75,000	0,000	0,000	951
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,850	0,071	0,767	75,000	0,000	0,000	1150
				0,1	75,841	0,025	0,561	75,000	0,000	0,000	841
		30	Máximo	1	75,290	1,856	0,193	75,000	0,000	0,000	290
				10	74,048	0,700	0,634	75,000	0,000	0,000	952
				0,1	76,152	0,547	0,768	75,000	0,000	0,000	1152
			Zero	1	74,395	1,603	0,403	75,000	0,000	0,000	605
				10	73,739	0,529	0,841	75,000	0,000	0,000	1261
				0,1	75,964	0,679	0,643	75,000	0,000	0,000	964

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_F = 0 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	135	0	Máximo	1	136,051	0,455	0,700	135,127	0,368	0,085	924
				10	135,136	0,884	0,091	135,125	0,369	0,083	11
				0,1	136,833	0,658	1,222	135,127	0,369	0,085	1707
			Zero	1	136,324	0,441	0,883	135,128	0,368	0,085	1197
				10	143,522	0,727	5,681	135,129	0,368	0,086	8393
				0,1	128,157	0,504	4,562	135,128	0,367	0,085	6971
		30	Máximo	1	136,288	1,062	0,859	135,125	0,369	0,084	1162
				10	135,419	1,059	0,279	135,122	0,369	0,081	297
				0,1	137,133	0,220	1,422	135,128	0,368	0,085	2005
			Zero	1	125,142	24,714	6,572	135,127	0,369	0,085	9985
				10	140,045	9,555	3,363	135,126	0,370	0,084	4918
				0,1	129,119	10,908	3,921	135,128	0,368	0,086	6010
BC	15	0	Máximo	1	13,822	0,461	0,786	14,874	0,369	0,084	1053
				10	12,490	0,610	1,673	14,877	0,375	0,082	2387
				0,1	14,878	0,466	0,081	14,877	0,375	0,082	1
			Zero	1	13,830	0,464	0,780	14,873	0,369	0,085	1042
				10	12,572	0,578	1,619	14,873	0,370	0,085	2301
				0,1	14,888	0,390	0,075	14,872	0,369	0,085	16
		30	Máximo	1	13,930	1,427	0,713	14,876	0,369	0,083	946
				10	7,965	6,778	4,690	14,870	0,366	0,087	6905
				0,1	14,940	0,731	0,040	14,876	0,371	0,083	64
			Zero	1	13,939	1,409	0,707	14,872	0,368	0,085	933
				10	12,518	0,975	1,655	14,872	0,368	0,085	2354
				0,1	14,983	0,690	0,011	14,874	0,370	0,084	109

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_F = 0 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
BC	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,814	0,026	0,791	74,991	0,010	0,006	1177
				0,1	76,186	0,026	0,791	75,009	0,010	0,006	1177
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,827	0,091	0,782	75,000	0,000	0,000	1173
				0,1	76,173	0,091	0,782	75,000	0,000	0,000	1173
		30	Máximo	1	75,089	1,070	0,059	75,000	0,000	0,000	89
				10	73,547	0,307	0,969	74,997	0,028	0,002	1451
				0,1	76,312	0,329	0,875	75,022	0,024	0,014	1290
			Zero	1	75,089	1,070	0,060	75,000	0,000	0,000	89
				10	73,777	0,461	0,815	75,000	0,000	0,000	1223
				0,1	76,285	0,264	0,857	75,000	0,000	0,000	1285
	135	0	Máximo	1	136,178	0,461	0,786	135,126	0,369	0,084	1053
				10	135,122	0,466	0,081	135,123	0,375	0,082	1
				0,1	137,510	0,610	1,673	135,123	0,375	0,082	2387
			Zero	1	136,170	0,464	0,780	135,127	0,369	0,085	1042
				10	135,112	0,390	0,075	135,128	0,369	0,085	16
				0,1	137,428	0,578	1,619	135,127	0,370	0,085	2301
		30	Máximo	1	131,394	15,914	2,404	135,126	0,369	0,084	3732
				10	138,498	5,783	2,332	135,127	0,375	0,085	3371
				0,1	137,581	0,207	1,721	135,122	0,371	0,082	2459
			Zero	1	136,209	0,481	0,806	135,127	0,369	0,085	1082
				10	135,077	0,082	0,052	135,127	0,370	0,085	50
				0,1	137,537	0,212	1,691	135,126	0,369	0,084	2411

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 10 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	15	0	Máximo	1	13,931	0,447	0,712	14,872	0,369	0,085	941
				10	13,108	0,759	1,262	14,872	0,370	0,085	1765
				0,1	14,780	0,605	0,147	14,875	0,369	0,083	95
			Zero	1	13,930	0,392	0,713	14,877	0,370	0,082	947
				10	13,219	0,477	1,188	14,878	0,372	0,081	1659
				0,1	14,850	0,377	0,100	14,877	0,373	0,082	28
		30	Máximo	1	14,544	1,969	0,304	14,879	0,369	0,081	335
				10	13,187	1,034	1,209	14,872	0,367	0,085	1686
				0,1	14,991	1,606	0,006	14,877	0,370	0,082	114
			Zero	1	19,245	27,284	2,830	14,878	0,372	0,081	4366
				10	2,350	14,187	8,433	14,872	0,367	0,086	12521
				0,1	14,987	0,850	0,009	14,883	0,372	0,078	104
	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	74,030	0,040	0,647	75,000	0,000	0,000	970
				0,1	75,970	0,040	0,647	75,000	0,000	0,000	970
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,852	0,004	0,765	75,000	0,000	0,000	1148
				0,1	75,844	0,058	0,563	75,000	0,000	0,000	844
		30	Máximo	1	75,630	1,837	0,420	75,000	0,000	0,000	630
				10	74,102	0,634	0,599	75,000	0,000	0,000	898
				0,1	76,242	0,599	0,828	75,000	0,000	0,000	1242
			Zero	1	74,555	1,867	0,297	75,000	0,000	0,000	445
				10	73,817	0,528	0,789	75,000	0,000	0,000	1183
				0,1	76,013	0,756	0,675	75,000	0,000	0,000	1013

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 10 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	135	0	Máximo	1	136,069	0,447	0,712	135,128	0,369	0,085	941
				10	135,220	0,605	0,147	135,125	0,369	0,083	95
				0,1	136,892	0,759	1,262	135,128	0,370	0,085	1765
			Zero	1	136,329	0,433	0,886	135,123	0,370	0,082	1206
				10	143,410	2,140	5,607	135,123	0,373	0,082	8288
				0,1	127,988	1,208	4,674	135,122	0,372	0,081	7134
		30	Máximo	1	136,540	1,122	1,027	135,125	0,371	0,083	1415
				10	135,234	0,721	0,156	135,122	0,372	0,081	112
				0,1	137,231	0,342	1,487	135,128	0,367	0,085	2103
			Zero	1	128,497	29,557	4,336	135,122	0,368	0,081	6625
				10	141,815	9,100	4,543	135,111	0,374	0,074	6704
				0,1	129,837	11,917	3,442	135,129	0,367	0,086	5291
BC	15	0	Máximo	1	13,831	0,447	0,780	14,873	0,370	0,084	1043
				10	12,563	0,537	1,625	14,873	0,368	0,084	2310
				0,1	14,888	0,417	0,074	14,875	0,368	0,083	14
			Zero	1	13,841	0,452	0,772	14,878	0,371	0,081	1037
				10	12,609	0,582	1,594	14,879	0,370	0,081	2269
				0,1	14,904	0,398	0,064	14,879	0,369	0,081	25
		30	Máximo	1	14,064	1,381	0,624	14,873	0,369	0,085	809
				10	7,531	6,619	4,979	14,872	0,367	0,085	7341
				0,1	14,985	0,695	0,010	14,874	0,369	0,084	112
			Zero	1	14,082	1,398	0,612	14,881	0,371	0,079	799
				10	12,516	1,006	1,656	14,872	0,368	0,085	2356
				0,1	15,012	0,705	0,008	14,885	0,370	0,077	127

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 10 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
BC	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,825	0,054	0,783	74,995	0,000	0,003	1170
				0,1	76,175	0,054	0,783	75,005	0,000	0,003	1170
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,849	0,112	0,767	75,000	0,000	0,000	1151
				0,1	76,151	0,112	0,767	75,000	0,000	0,000	1151
		30	Máximo	1	75,203	1,063	0,135	75,000	0,000	0,000	203
				10	73,653	0,333	0,898	75,000	0,000	0,000	1347
				0,1	76,311	0,285	0,874	75,005	0,003	0,004	1306
			Zero	1	75,205	1,062	0,137	75,000	0,000	0,000	205
				10	73,782	0,484	0,812	75,000	0,000	0,000	1218
				0,1	76,285	0,249	0,857	75,000	0,000	0,000	1285
	135	0	Máximo	1	136,169	0,447	0,780	135,127	0,370	0,084	1043
				10	135,112	0,417	0,074	135,125	0,368	0,083	14
				0,1	137,437	0,537	1,625	135,127	0,368	0,084	2310
			Zero	1	136,159	0,452	0,772	135,122	0,371	0,081	1037
				10	135,096	0,398	0,064	135,121	0,369	0,081	25
				0,1	137,391	0,582	1,594	135,121	0,370	0,081	2269
		30	Máximo	1	133,062	17,017	1,292	135,128	0,368	0,085	2066
				10	138,938	5,575	2,625	135,126	0,368	0,084	3812
				0,1	137,567	0,169	1,711	135,128	0,367	0,085	2439
			Zero	1	136,300	0,480	0,866	135,118	0,372	0,079	1182
				10	135,087	0,101	0,058	135,118	0,371	0,079	30
				0,1	137,519	0,205	1,680	135,124	0,370	0,083	2395

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 50 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	15	0	Máximo	1	13,969	0,270	0,688	14,872	0,368	0,085	904
				10	13,094	0,330	1,271	14,874	0,369	0,084	1780
				0,1	14,960	0,482	0,027	14,874	0,370	0,084	86
			Zero	1	13,971	0,182	0,686	14,873	0,367	0,085	902
				10	13,248	0,051	1,168	14,872	0,368	0,085	1624
				0,1	14,972	0,487	0,018	14,874	0,367	0,084	98
		30	Máximo	1	15,845	1,675	0,563	14,873	0,367	0,085	972
				10	13,425	0,645	1,050	14,872	0,368	0,085	1447
				0,1	15,929	1,879	0,619	14,873	0,372	0,084	1056
			Zero	1	7,378	61,507	5,081	14,873	0,368	0,085	7495
				10	-5,983	12,389	13,988	14,872	0,369	0,086	20854
				0,1	15,428	0,757	0,286	14,874	0,368	0,084	555
	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,986	0,242	0,676	75,000	0,000	0,000	1014
				0,1	76,014	0,242	0,676	75,000	0,000	0,000	1014
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,819	0,170	0,787	75,000	0,000	0,000	1181
				0,1	75,832	0,291	0,554	75,000	0,000	0,000	832
		30	Máximo	1	76,993	1,764	1,328	75,000	0,000	0,000	1993
				10	74,306	0,446	0,463	75,000	0,000	0,000	694
				0,1	76,570	0,766	1,047	75,000	0,000	0,000	1570
			Zero	1	74,904	3,707	0,064	75,000	0,000	0,000	96
				10	74,046	0,427	0,636	75,000	0,000	0,000	954
				0,1	76,253	1,092	0,835	75,000	0,000	0,000	1253

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 50 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	135	0	Máximo	1	136,031	0,270	0,688	135,128	0,368	0,085	904
				10	135,040	0,482	0,027	135,126	0,370	0,084	86
				0,1	136,906	0,330	1,271	135,126	0,369	0,084	1780
			Zero	1	136,314	0,438	0,876	135,127	0,367	0,085	1187
				10	142,642	7,743	5,094	135,126	0,367	0,084	7516
				0,1	127,685	4,425	4,876	135,128	0,368	0,085	7443
		30	Máximo	1	137,901	1,288	1,934	135,127	0,367	0,085	2774
				10	134,972	0,495	0,019	135,126	0,369	0,084	154
				0,1	137,475	0,672	1,650	135,128	0,368	0,085	2347
			Zero	1	138,084	65,330	2,056	135,127	0,367	0,085	2957
				10	149,236	6,188	9,491	135,126	0,366	0,084	14111
				0,1	132,349	16,495	1,767	135,128	0,369	0,085	2779
BC	15	0	Máximo	1	13,842	0,386	0,772	14,873	0,368	0,084	1031
				10	12,560	0,396	1,627	14,874	0,368	0,084	2314
				0,1	14,912	0,417	0,059	14,874	0,368	0,084	38
			Zero	1	13,841	0,374	0,772	14,873	0,368	0,084	1032
				10	12,587	0,407	1,609	14,876	0,368	0,083	2289
				0,1	14,908	0,407	0,061	14,875	0,368	0,083	33
		30	Máximo	1	14,517	1,273	0,322	14,875	0,368	0,083	358
				10	5,516	5,806	6,323	14,873	0,368	0,085	9357
				0,1	15,109	0,690	0,072	14,875	0,368	0,084	234
			Zero	1	14,513	1,259	0,325	14,873	0,367	0,085	360
				10	12,637	0,831	1,576	14,873	0,369	0,085	2236
				0,1	15,103	0,680	0,069	14,875	0,369	0,083	228

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_f = 50 \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
BC	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,817	0,010	0,789	75,000	0,000	0,000	1183
				0,1	76,183	0,010	0,789	75,000	0,000	0,000	1183
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,829	0,009	0,781	75,000	0,000	0,000	1171
				0,1	76,171	0,009	0,781	75,000	0,000	0,000	1171
		30	Máximo	1	75,659	1,037	0,439	75,000	0,000	0,000	659
				10	73,724	0,313	0,851	75,000	0,000	0,000	1276
				0,1	76,400	0,337	0,934	75,000	0,000	0,000	1400
			Zero	1	75,659	1,037	0,439	75,000	0,000	0,000	659
				10	73,881	0,394	0,746	75,000	0,000	0,000	1119
				0,1	76,389	0,318	0,926	75,000	0,000	0,000	1389
	135	0	Máximo	1	136,158	0,386	0,772	135,127	0,368	0,084	1031
				10	135,088	0,417	0,059	135,126	0,368	0,084	38
				0,1	137,440	0,396	1,627	135,126	0,368	0,084	2314
			Zero	1	136,159	0,374	0,772	135,127	0,368	0,084	1032
				10	135,092	0,407	0,061	135,125	0,368	0,083	33
				0,1	137,413	0,407	1,609	135,124	0,368	0,083	2289
		30	Máximo	1	140,652	22,753	3,768	135,125	0,368	0,083	5527
				10	141,033	4,629	4,022	135,125	0,368	0,083	5908
				0,1	137,653	0,050	1,769	135,127	0,368	0,084	2527
			Zero	1	136,766	0,559	1,178	135,127	0,367	0,085	1639
				10	135,172	0,094	0,115	135,123	0,370	0,082	49
				0,1	137,618	0,092	1,745	135,128	0,368	0,085	2490

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_F=100\ \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	15	0	Máximo	1	13,950	0,051	0,700	14,872	0,368	0,085	923
				10	13,032	0,600	1,312	14,872	0,368	0,085	1839
				0,1	14,715	0,549	0,190	14,869	0,372	0,087	154
			Zero	1	14,000	0,063	0,667	14,873	0,368	0,085	873
				10	2,812	16,109	8,126	14,872	0,368	0,085	12061
				0,1	15,094	0,521	0,063	14,873	0,367	0,085	221
		30	Máximo	1	17,566	1,245	1,711	14,872	0,369	0,085	2694
				10	13,708	0,184	0,862	14,872	0,368	0,086	1164
				0,1	15,738	0,774	0,492	14,872	0,373	0,085	866
			Zero	1	81,187	129,753	44,125	14,873	0,368	0,085	66314
				10	-19,017	8,159	22,678	14,872	0,368	0,085	33890
				0,1	13,014	17,297	1,324	14,872	0,368	0,086	1858
	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,984	0,538	0,678	75,000	0,000	0,000	1016
				0,1	76,016	0,538	0,678	75,000	0,000	0,000	1016
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,741	0,344	0,839	75,000	0,000	0,000	1259
				0,1	75,776	0,576	0,517	75,000	0,000	0,000	776
		30	Máximo	1	78,694	1,687	2,463	75,000	0,000	0,000	3694
				10	74,599	0,200	0,267	75,000	0,000	0,000	401
				0,1	76,907	0,972	1,272	75,000	0,000	0,000	1907
			Zero	1	71,653	6,392	2,231	75,000	0,000	0,000	3347
				10	74,454	0,256	0,364	75,000	0,000	0,000	546
				0,1	76,515	1,585	1,010	75,000	0,000	0,000	1515

/ continua

Tabela 4.3 - (continuação)

Falta ($R_F=100\ \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
AT	135	0	Máximo	1	136,050	0,051	0,700	135,128	0,368	0,085	923
				10	135,285	0,549	0,190	135,131	0,372	0,087	154
				0,1	136,968	0,600	1,312	135,128	0,368	0,085	1839
			Zero	1	136,321	0,462	0,881	135,127	0,368	0,085	1194
				10	140,572	14,149	3,715	135,127	0,367	0,085	5445
				0,1	126,879	8,269	5,414	135,128	0,368	0,085	8248
		30	Máximo	1	139,570	1,544	3,047	135,128	0,369	0,085	4442
				10	135,730	0,050	0,486	135,128	0,372	0,085	602
				0,1	137,837	1,113	1,891	135,128	0,368	0,085	2709
			Zero	1	69,494	125,534	43,671	135,127	0,368	0,085	65633
				10	160,656	0,524	17,104	135,129	0,368	0,086	25528
				0,1	134,930	23,448	0,046	135,128	0,368	0,085	197
BC	15	0	Máximo	1	13,853	0,282	0,765	14,873	0,368	0,085	1020
				10	12,576	0,209	1,616	14,873	0,368	0,084	2297
				0,1	14,931	0,416	0,046	14,873	0,368	0,085	58
			Zero	1	13,853	0,283	0,765	14,873	0,367	0,085	1020
				10	12,572	0,207	1,618	14,873	0,368	0,084	2301
				0,1	14,931	0,413	0,046	14,873	0,367	0,085	58
		30	Máximo	1	15,089	1,116	0,059	14,872	0,368	0,085	217
				10	2,850	4,708	8,100	14,872	0,368	0,085	12022
				0,1	15,239	0,649	0,159	14,872	0,368	0,085	366
			Zero	1	15,089	1,116	0,060	14,873	0,367	0,085	217
				10	12,759	0,621	1,494	14,872	0,368	0,085	2114
				0,1	15,239	0,646	0,159	14,873	0,367	0,085	366

/ continua

Tabela 4.3 - (conclusão)

Falta ($R_F=100\ \Omega$)	Distância Real (km)	δ (°)	"Instante" da tensão no ponto de falta	SIR	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos			Diferença entre as Distâncias Localizadas (m)
					Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	Distância Localizada (km)	Fator de Desconfiança	Erro (%)	
BC	75	0	Máximo	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,810	0,109	0,794	75,000	0,000	0,000	1190
				0,1	76,190	0,109	0,794	75,000	0,000	0,000	1190
			Zero	1	75,000	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0
				10	73,810	0,107	0,794	75,000	0,000	0,000	1190
				0,1	76,190	0,107	0,794	75,000	0,000	0,000	1190
		30	Máximo	1	76,229	1,006	0,819	75,000	0,000	0,000	1229
				10	73,809	0,257	0,794	75,000	0,000	0,000	1191
				0,1	76,517	0,405	1,011	75,000	0,000	0,000	1517
			Zero	1	76,229	1,006	0,819	75,000	0,000	0,000	1229
				10	73,989	0,295	0,674	75,000	0,000	0,000	1011
				0,1	76,515	0,403	1,010	75,000	0,000	0,000	1515
	135	0	Máximo	1	136,147	0,282	0,765	135,127	0,368	0,085	1020
				10	139,954	4,631	3,303	135,127	0,368	0,085	4827
				0,1	137,424	0,209	1,616	135,127	0,368	0,084	2297
			Zero	1	136,147	0,283	0,765	135,127	0,367	0,085	1020
				10	135,069	0,413	0,046	135,127	0,367	0,085	58
				0,1	137,428	0,207	1,618	135,127	0,368	0,084	2301
		30	Máximo	1	152,245	34,231	11,497	135,128	0,368	0,085	17118
				10	143,769	3,334	5,846	135,128	0,368	0,085	8641
				0,1	137,745	0,109	1,830	135,128	0,368	0,085	2617
			Zero	1	137,323	0,640	1,548	135,127	0,367	0,085	2195
				10	135,253	0,072	0,168	135,126	0,367	0,084	126
				0,1	137,745	0,105	1,830	135,128	0,367	0,085	2617

4.3. Resultado do caso real

Os seguintes gráficos, obtidos a partir das oscilografias do caso real, serão apresentados:

- Tensões e Correntes filtradas de ambos os circuitos e ambos os terminais da linha de transmissão;
- Evolução do Monitor de Transitórios para as tensões e correntes do terminal SE1;
- Evolução da solução do Método de Johns & Jamalli desde o início da falta até a abertura do disjuntor.

As tabelas a seguir apresentam os resultados numéricos obtidos pelo localizador.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos pelo localizador proposto.

Tipo de Falta	BT
Distância localizada a partir da SE1	11,03497 km
Fator de Desconfiança	0,8017667

Tabela 4.5 - Resultados obtidos desprezando-se a presença do circuito são.

Circuito ignorado	1
Distância localizada a partir da SE1	14,71273 km
Fator de Desconfiança	28,7124

A Figura 4.24 até a Figura 4.35 se referem a este caso real.

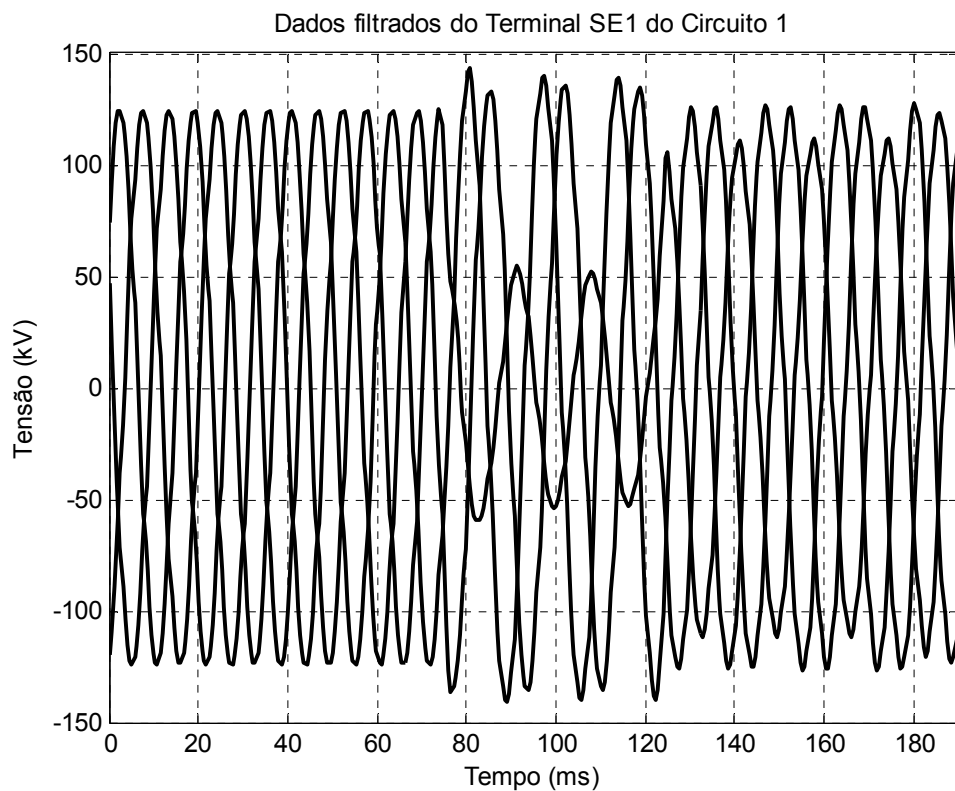


Figura 4.24 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE1 do Circuito 1.

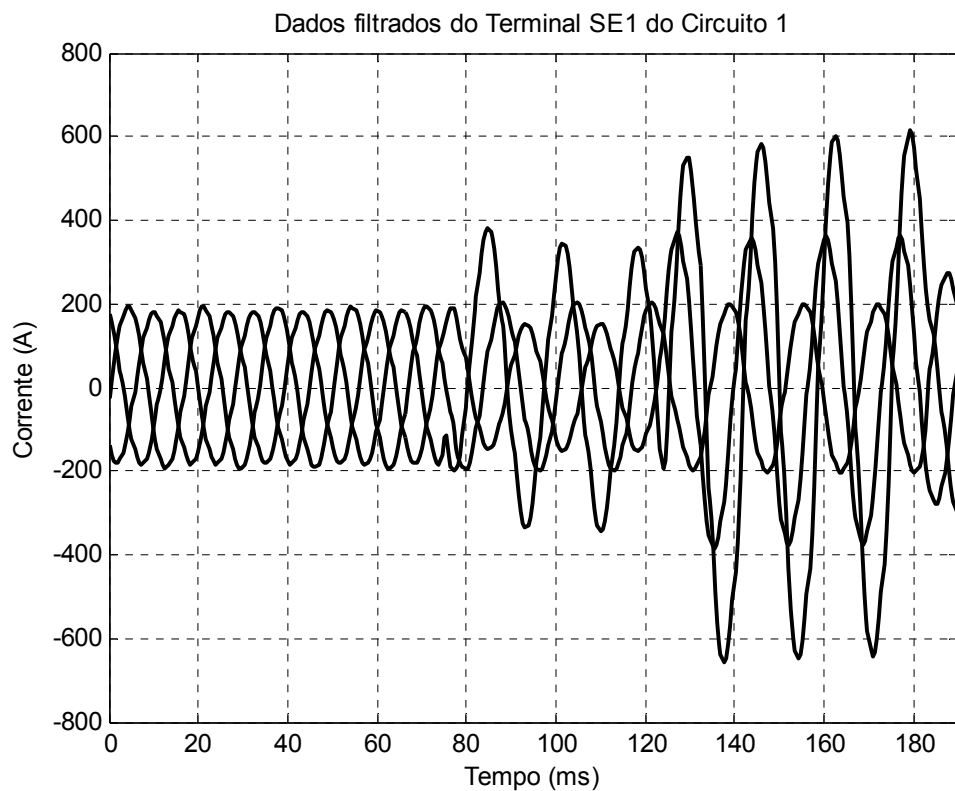


Figura 4.25 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE1 do Circuito 1.

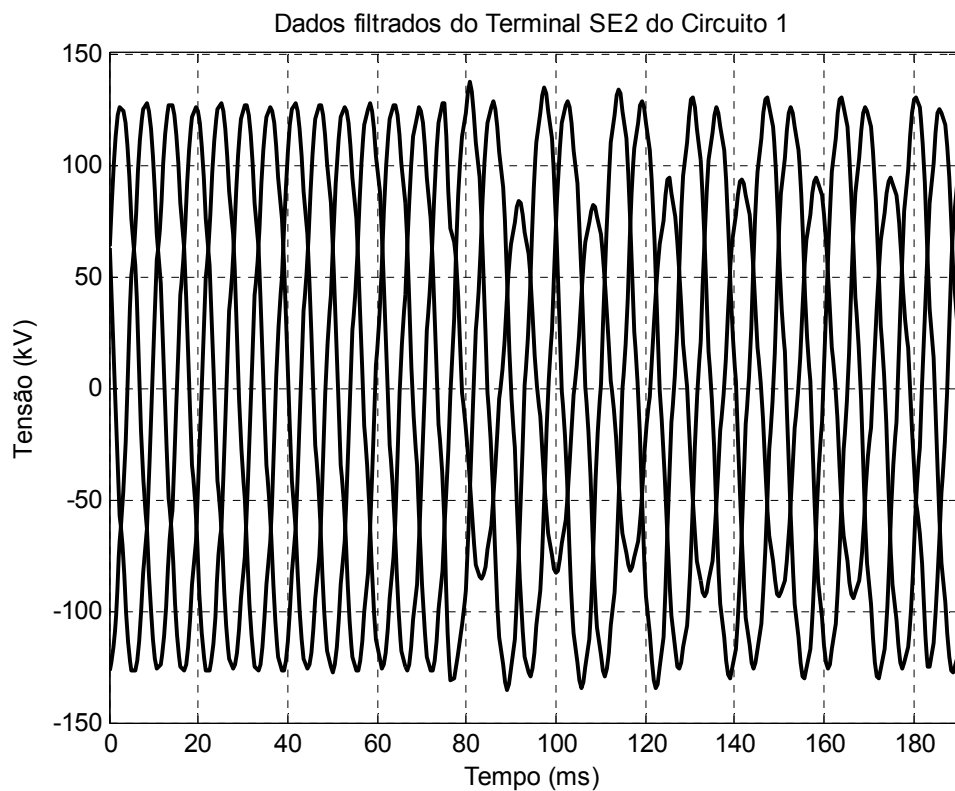


Figura 4.26 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE2 do Circuito 1.

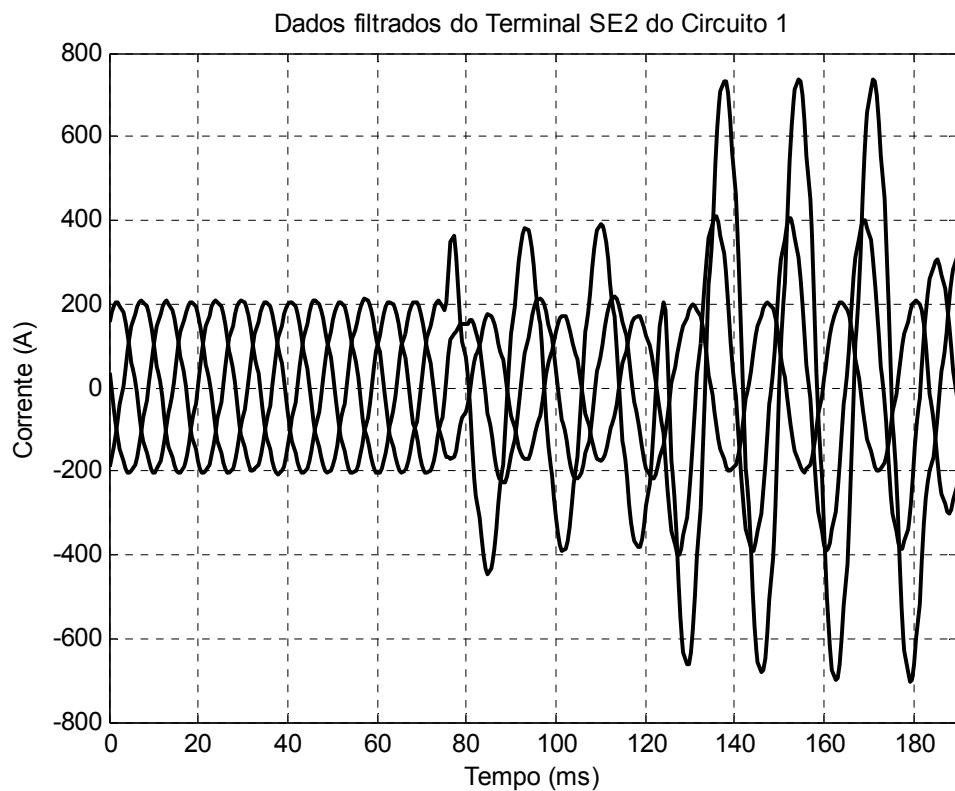


Figura 4.27 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE2 do Circuito 1.

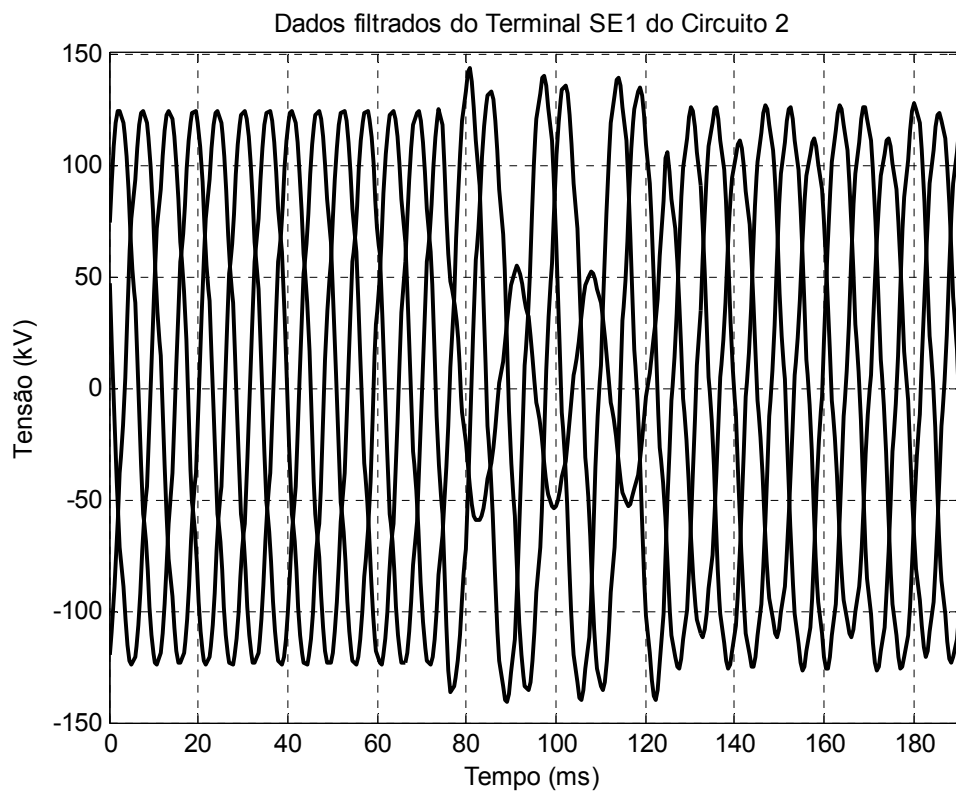


Figura 4.28 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE1 do Circuito 2.

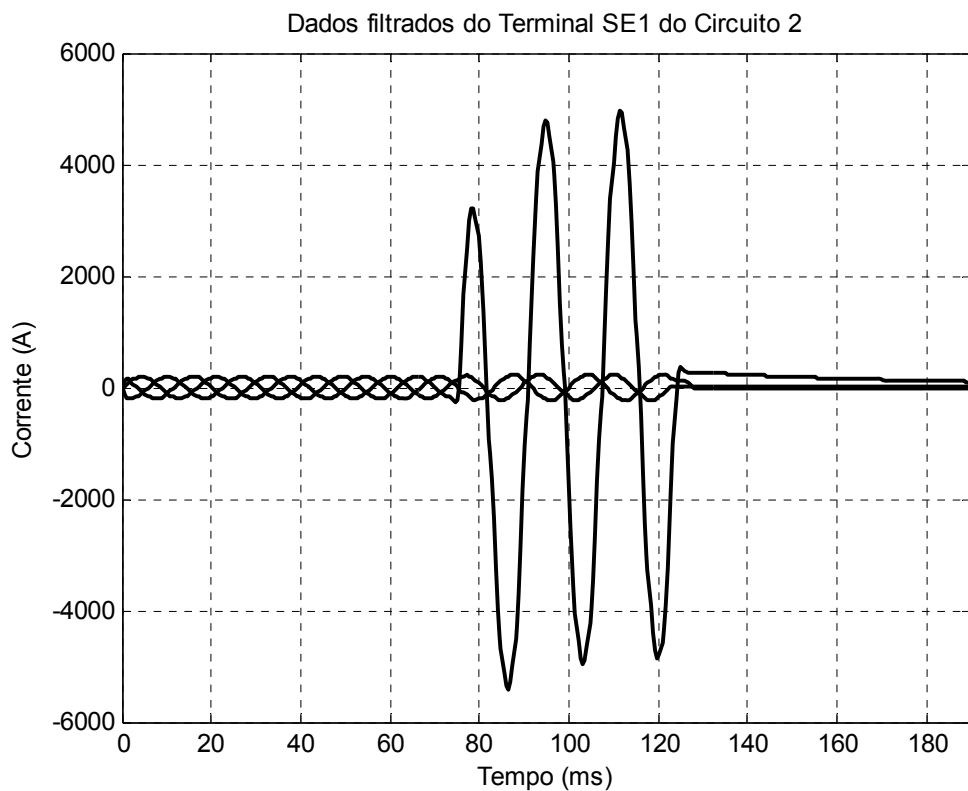


Figura 4.29 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE1 do Circuito 2.

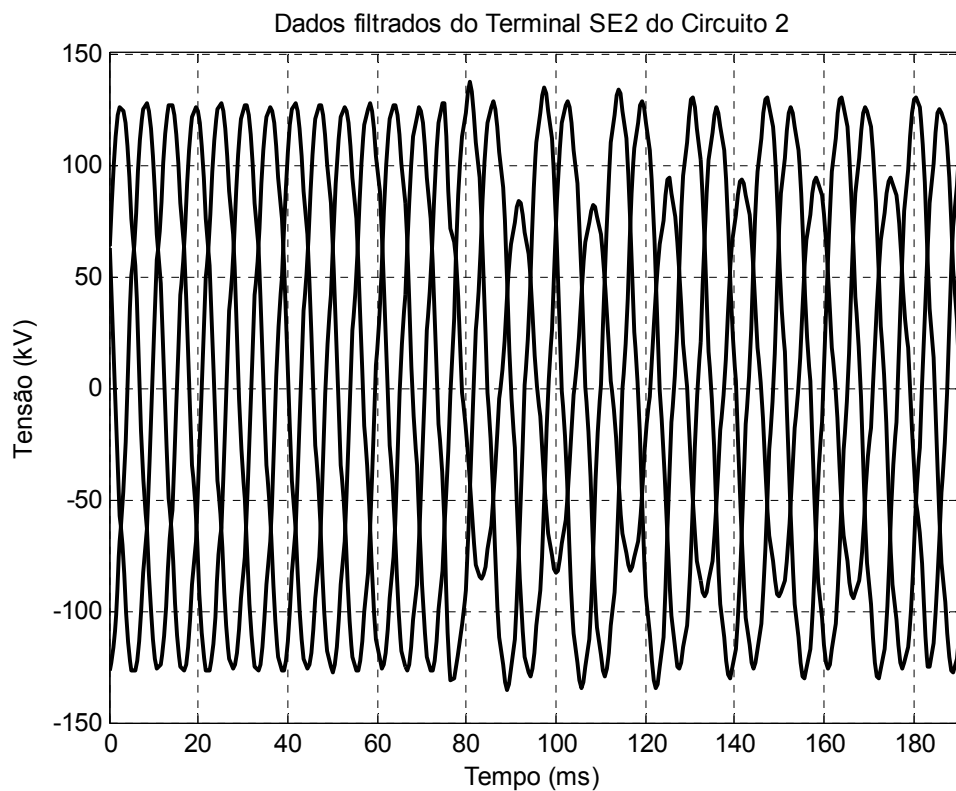


Figura 4.30 - Dados de Tensão filtrados do Terminal SE2 do Circuito 2.

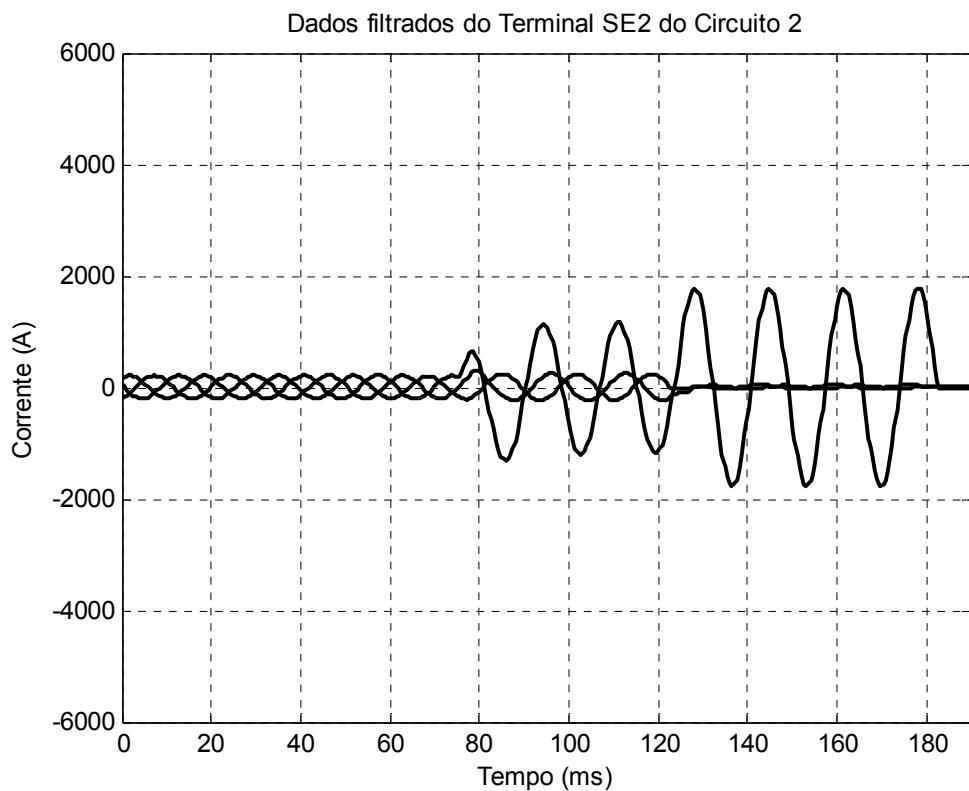


Figura 4.31 - Dados de Corrente filtrados do Terminal SE2 do Circuito 2.

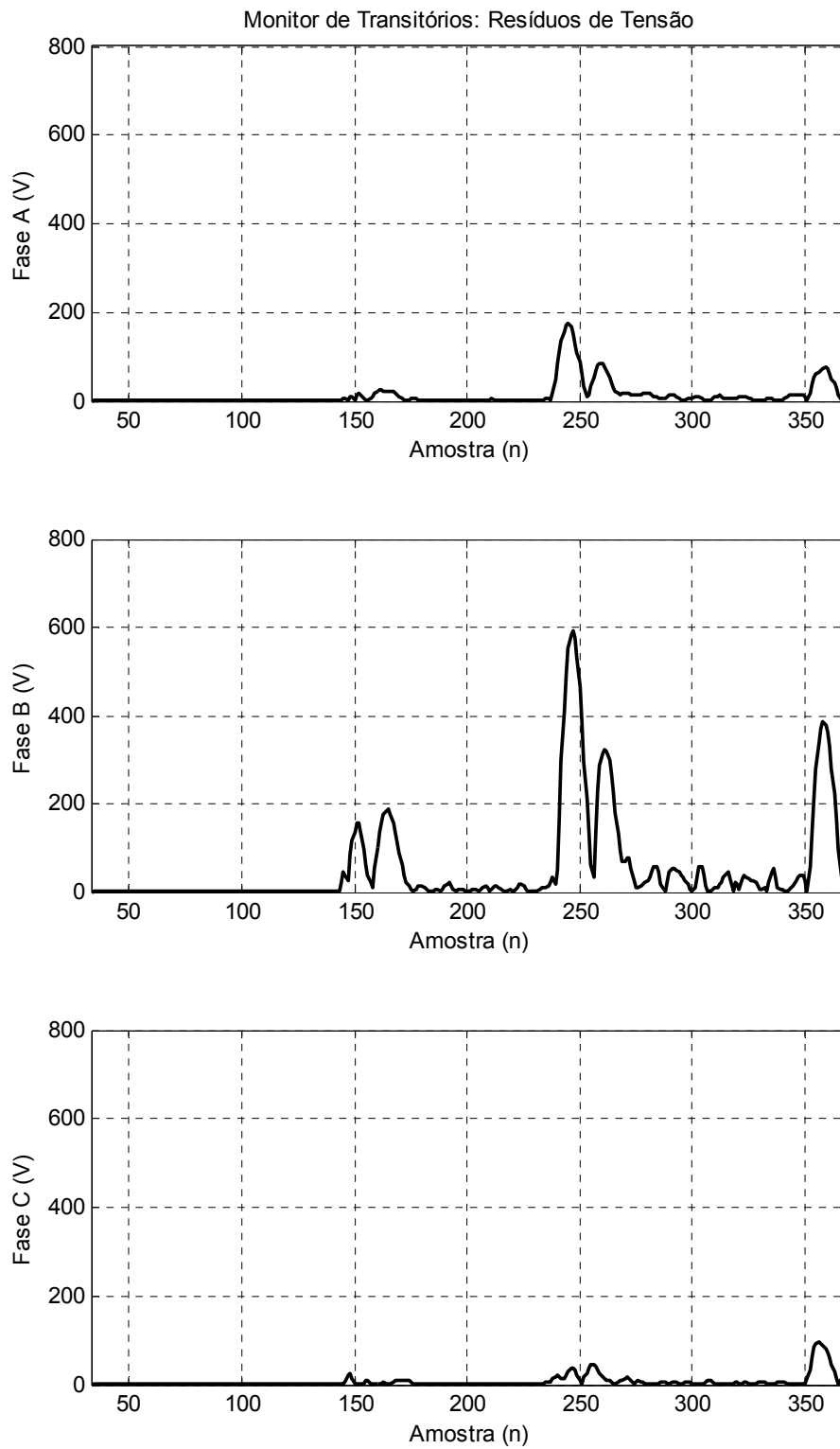


Figura 4.32 - Resíduos de Tensão: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

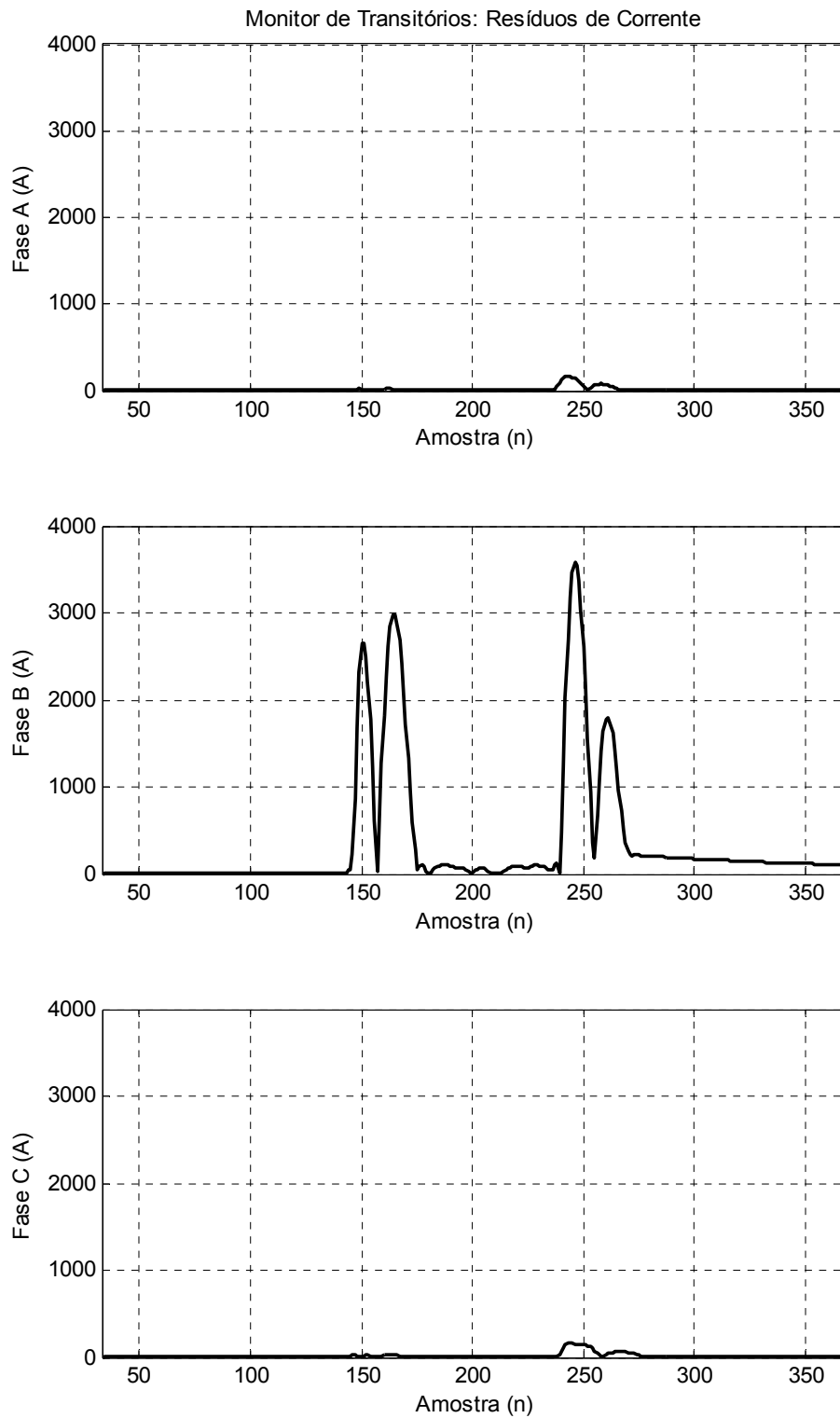


Figura 4.33 - Resíduos de Corrente: Monitor de Transitórios do Circuito sob falta.

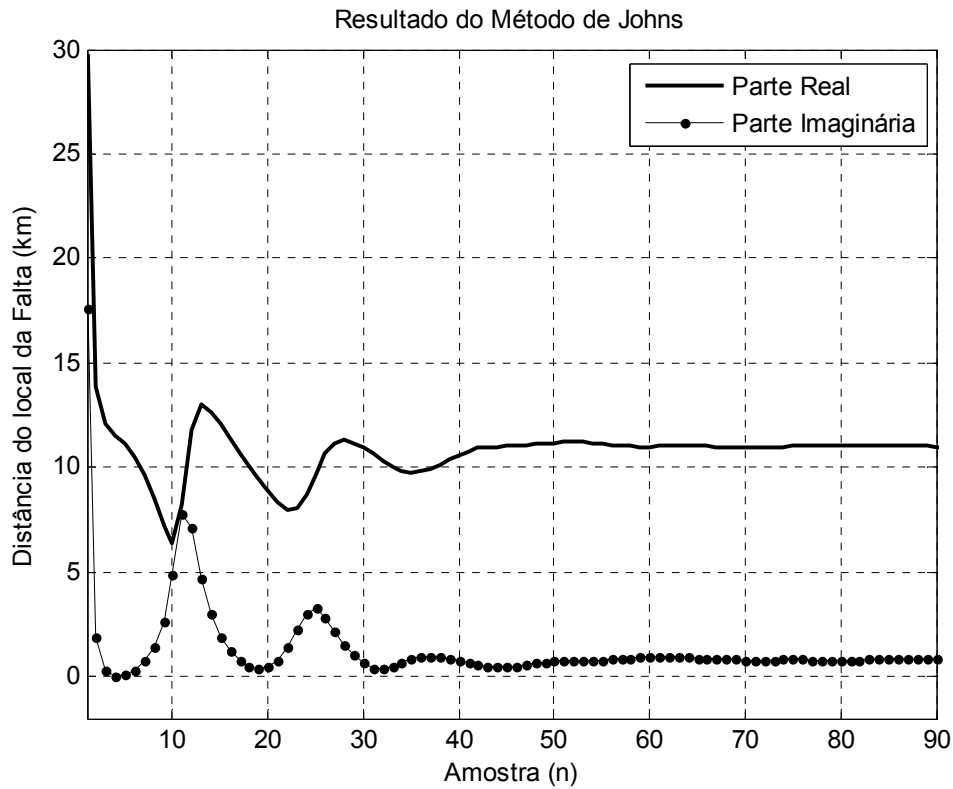


Figura 4.34 - Evolução da solução do método a partir dos dados da componente diferencial.

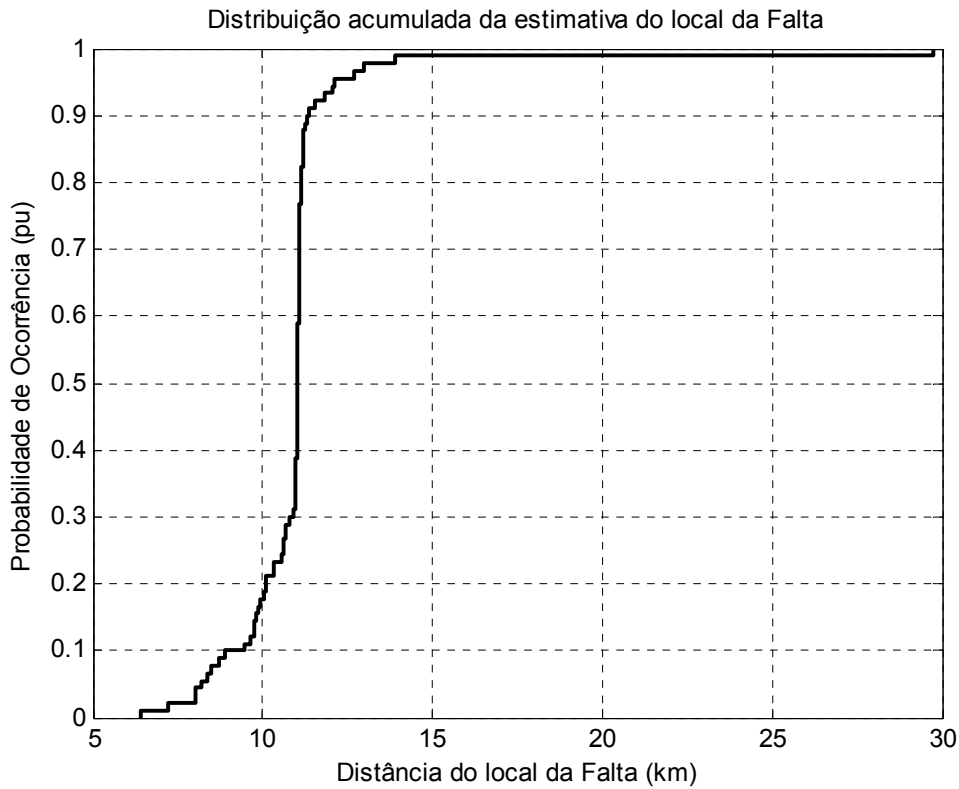


Figura 4.35 - Distribuição acumulada da solução para o caso real.

4.4. Análise dos resultados

As tabelas a seguir trazem uma análise dos resultados obtidos pelo sistema computacional desenvolvido. Buscou-se fazer um contraponto entre a abordagem que ignora a existência do circuito são e a abordagem que propõe a decomposição em circuitos aditivo e diferencial. Nestas tabelas foram colocados os valores mínimo e máximo dos erros e dos fatores de desconfiança nos dois casos, além do valor médio e da mediana dos dados.

A mediana parece ser mais representativa, pois a média apresenta forte influência de valores marginais de casos em que os algoritmos têm um desempenho muito fraco. Por isso, incluíram-se estas duas métricas para se melhor avaliar a qualidade dos resultados obtidos.

Tabela 4.6 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 0 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1061	0,708	0,669	127	0,084	0,368
Média	2254	1,503	2,865	85	0,056	0,246
Máximo	10769	7,179	24,714	129	0,086	0,371

Tabela 4.7 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 10 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1069	0,713	0,678	122	0,081	0,369
Média	2142	1,428	3,186	82	0,055	0,247
Máximo	12650	8,433	29,557	129	0,086	0,374

Tabela 4.8 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 50 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1106	0,737	0,491	126	0,084	0,367
Média	2594	1,729	5,388	85	0,056	0,245
Máximo	20983	13,988	65,330	128	0,086	0,372

Tabela 4.9 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas AT com $R_F = 100 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1307	0,871	0,588	127	0,085	0,368
Média	7126	4,751	10,130	85	0,057	0,246
Máximo	66187	44,125	129,753	131	0,087	0,373

Tabela 4.10 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 0 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1178	0,786	0,464	124	0,083	0,369
Média	1401	0,934	1,232	85	0,057	0,249
Máximo	7035	4,690	15,914	130	0,087	0,375

Tabela 4.11 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 10 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1169	0,780	0,450	121	0,081	0,368
Média	1365	0,910	1,245	83	0,055	0,246
Máximo	7469	4,979	17,017	128	0,085	0,372

Tabela 4.12 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 50 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1165	0,777	0,396	125	0,083	0,368
Média	1607	1,071	1,305	84	0,056	0,245
Máximo	9484	6,323	22,753	128	0,085	0,370

Tabela 4.13 - Comparativo do desempenho do algoritmo para faltas BC com $R_F = 100 \Omega$

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1190	0,794	0,289	127	0,085	0,367
Média	2251	1,501	1,639	85	0,057	0,245
Máximo	17245	11,497	34,231	128	0,085	0,368

Fica evidente a degradação da precisão do método que usa a abordagem que ignora a presença do circuito são, pois à medida que se aumenta a resistência de falta, implicando em uma corrente de curto cada vez mais próxima da corrente de carga da linha de transmissão, há uma maior dispersão dos resultados obtidos o que, em alguns casos, leva a erros inaceitáveis para localização de faltas. Os piores resultados foram obtidos nos casos de falta monofásicas para terra. Este comportamento já era esperado devido ao acoplamento no modo de seqüência zero dos dois circuitos da linha de transmissão. O algoritmo que usa a abordagem do circuito diferencial se mostrou insensível às varias situações simuladas.

A observação do fator de desconfiança é uma outra forma de se mensurar a degradação dos resultados da abordagem que ignora a presença do circuito são. Idealmente, tal fator possui valor nulo. Portanto, à medida que ele se distancia de zero, tem-se uma solução associada de menor qualidade e, desta forma, de menor confiabilidade. Observando-se desde a Tabela 4.6 até a Tabela 4.13, vê-se que esses fatores são crescentes quando se aumenta a resistência de falta e que eles são menores para os casos de mesma resistência para faltas do tipo BC, o que reafirma a necessidade de se considerar o acoplamento de seqüência zero entre os circuitos.

A Tabela 4.14 mostra o resumo dos resultados das simulações.

Tabela 4.14 - Comparativo do desempenho do algoritmo: Resultados Globais

	Ignorando a presença do Circuito São			Utilizando Ambos os Circuitos		
	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança	Erro (m)	Erro Relativo (%)	Fator de Desconfiança
Mínimo	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Mediana	1172	0,781	0,481	125	0,084	0,368
Média	2593	1,728	3,374	84	0,056	0,246
Máximo	66187	44,125	129,753	131	0,087	0,375

O caso real foi localizado com sucesso. Diferentemente dos casos simulados, onde a solução apresenta grande estabilidade e fatores de desconfiança praticamente nulos, no caso real a solução apresentou pequenas oscilações, variando entre 9,78 e 11,23 km e um fator de desconfiança próximo de um, conforme pode ser observado na Figura 4.34 e na Figura 4.35. Tal comportamento já era esperado.

Infelizmente nem todas as linhas com desligamentos são inspecionadas e, em alguns casos, esta informação se perde. No caso desta ocorrência, a Cemig não dispõe em seu banco de dados do registro da inspeção ou outros resultados para precisar o local real do defeito, entretanto uma estimativa do local pode ser obtida com o uso do SAPNET [29]. Este sistema consiste em conjunto de *hardware* e *software* integrados, que permitem a utilização de informações geradas pelos RDPs, sistemas de supervisão e controle e de outros sistemas de aquisição de dados instalados no sistema elétrico da Cemig. A Unidade de Análise Numérica, integrante do SAPNET, utilizando o algoritmo de um terminal proposto por Wiszniewski [30], indicou que o local da falta foi a 9,9 km da SE1, valor bem próximo ao estimado pelo algoritmo proposto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1. Conclusão

Neste trabalho foi estudada uma técnica de localização de faltas para linhas de circuito duplo. Buscou-se avaliar comparativamente o comportamento do algoritmo de Johns & Jamalli associado à decomposição em circuito diferencial e circuito aditivo com a abordagem que ignora a existência do circuito sã.

Objetivando-se simular um sistema computacional completo, foram implementadas rotinas que fossem capazes de reproduzir todas as etapas do tratamento de dados até a localização propriamente dita. Estas etapas intermediárias são de fundamental importância para a obtenção de baixos erros de localização, especialmente quando estão sendo utilizados dados de casos reais onde fatores externos como ruídos e a não sincronização exata dos terminais podem afetar severamente a precisão do método.

Algumas otimizações foram inseridas no sistema desenvolvido. Com o intuito de se otimizar o tempo de execução computacional, realizou-se o cálculo do monitor de transitórios apenas nos dados de corrente dos terminais, pois eles apresentam uma maior amplitude de variação durante a falta se comparada à variação que ocorre na tensão. A partir da indicação de início de falta dada pelo monitor de transitórios é feita a sincronização dos dados. A partir deste novo conjunto de dados obtém-se a

intercessão sendo, então, feita a localização. Estas otimizações são muito importantes caso se deseje implementar o sistema desenvolvido em algum tipo de *hardware* autônomo via processadores digitais de sinais (DSP's).

Como foi mostrado, a localização de faltas em linhas de circuito duplo requer uma abordagem mais refinada que a de simplesmente se ignorar a existência de um dos circuitos. Tal abordagem gera resultados inadequados em situações de alta resistência de falta, especialmente para faltas que envolvam a terra.

Ao se decompor a linha em circuito aditivo e circuito diferencial, conseguiu-se com êxito superar o problema do acoplamento entre os circuitos. Os resultados obtidos demonstram que a utilização dos dados referentes à componente diferencial é plenamente factível e que apresenta resultados promissores para localização de faltas em linhas de circuito duplo.

Ao se aplicar o método de Johns & Jamalli ao circuito diferencial, obtiveram-se resultados com baixos erros e com soluções estáveis, comparáveis aos resultados encontrados ao se aplicar este método em linhas de circuito simples. O resultado obtido já era esperado, pois ao se aplicar uma transformação linear em um sistema de comportamento linear, espera-se que essas propriedades observadas no sistema original sejam preservadas no sistema decomposto equivalente, o que indica a possibilidade de aplicação de outros métodos de solução e, não apenas, o desenvolvido por Johns & Jamalli.

Ao serem analisados casos reais, os erros obtidos serão maiores, pois no desenvolvimento do algoritmo foram adotadas algumas simplificações, tais como a transposição da linha, que de maior ou menor intensidade, afetarão o resultado final, implicando em maiores erros de localização. No caso real testado, obteve-se uma boa estimativa da localização. O efeito das simplificações pode ser observado pelo fator de desconfiança maior, que indica uma solução de pior qualidade se comparada às obtidas com casos simulados.

Ao se utilizar a componente diferencial associada ao algoritmo de Johns & Jamalli, obteve-se um sensível ganho de precisão na localização de faltas que é da ordem de dez vezes se compararmos a abordagem que ignora o circuito são. Outro fato relevante está associado aos casos críticos, em que esta abordagem apresenta

erros muito superiores a dez por cento enquanto que o algoritmo modificado apresenta erros sistematicamente baixos, o que ratifica a sua aplicabilidade.

5.2. Propostas de Continuidade

Como sugestão de continuidade, propõe-se estender a aplicação do método de decomposição em circuito aditivo e diferencial associado a outros algoritmos de localização de faltas, sejam eles de um, dois ou mais terminais, o que pode ser extremamente útil para situações de emergência em que, por alguma razão, ocorreu a indisponibilidade de uma ou mais oscilografias.

Faz-se necessário um melhor estudo da aplicação do sistema desenvolvido a linhas de transmissão não transpostas. Deve-se mensurar qual o impacto da simplificação adotada nos erros de localização. Para tal pode-se utilizar o software comercial PSCAD que possui modelos em componentes de fase capazes de simular corretamente linhas não transpostas com a geometria adotada no presente trabalho.

Deve-se tentar obter um maior número de casos reais para análise, pois muitos fatores como faltas dinâmicas, saturação de transformadores de corrente e de transformadores de potencial, além da não homogeneidade de estruturas e cabos da linha de transmissão, não são facilmente simuláveis e podem influenciar nos erros de localização.

Outro ponto que deve ser melhor estudado se refere ao tempo de resposta do algoritmo de estimação fasorial, ou seja, a necessidade de se aguardar um determinado número de ciclos até se obter uma solução estável. Este é um ponto chave, especialmente em situações de rápida operação de abertura dos disjuntores de proteção da linha.

Finalmente, necessita-se de um extenso estudo sobre o Fator de Desconfiança, pois o completo entendimento de seu comportamento pode agregar valor à solução obtida. Uma proposta interessante seria correlacionar o valor deste fator com um erro de localização esperado.

Referências bibliográficas

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Modelo de Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão: Arquivo: CPST Modelo 22Jul05**. Brasília, 2005. 24 p.

- [2] INSTRUÇÃO DE INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO LOCALIZADOR DE FALTAS TELEFAULT P 500. Belo Horizonte: Superintendência de Planejamento e Engenharia de Manutenção, Departamento de Engenharia de Construção e Manutenção da Distribuição, Companhia Energética de Minas Gerais, 2000.

- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica: 024/2004-SRT/ANEEL**. Brasília, 2004. 3 p.

- [4] ABREU, S. S. Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Aéreas pelo Método das Ondas Viajantes Utilizando Filtros Digitais e Transformada Wavelet. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- [5] PEREIRA, C. E. M.; ZANETTA, L. C. Análise comparativa de alguns métodos de localização digital de faltas em linhas de transmissão. **SBA Controle e Automação**, São Paulo, Set., Out., Nov. 2000. Vol 11, n. 3, p. 135-140.

- [6] SCHWEITZER III, E. O. **A review of impedance-based fault locating experience**. Pullman, 1990. 31 p. Disponível em: <<http://www.selinc.com/techprsr.htm>>.

- [7] IEEE. **IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines: C37.114**. Nova Iorque, 2004. 36 p. 15 anexos.

- [8] DOCUMENTATION FOR MATHWORKS PRODUCTS. Natick, Estados Unidos. 2006. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html>>.
- [9] JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. **IEE Proceedings**, Londres, 6 nov. 1990. p. 395-402.
- [10] ELECTRO-MAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM: THEORY BOOK. Portland, Estados Unidos: Canadian / American EMTP User Group, Jul 1995. Disponível após registro em: <<http://www.eeug.org/files/secret>>.
- [11] KAWADY, T.; STENZEL, J. Investigation of Practical Problems for Digital Fault Location Algorithms Based on EMTP Simulation. In: IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition : Asia-Pacific, 6-10 out. 2002, Yokohama, Japão, p. 118-123.
- [12] SILVEIRA, E. G. Localização digital de Faltas em Linhas de Transmissão com Utilização dos Dados de Um Terminal. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [13] VALADÃO, R. L. Desenvolvimento de Sistema Computacional Destinado à Localização de Faltas em Redes e Linhas de Distribuição de Energia Elétrica. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [14] ZHANG, Q.; ZHANG, Y.; SONG, W.; YU, Y. Transmission line fault location for phase-to-earth fault using one terminal data. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, Londres, 2 mar. 1999. Vol. 146, n. 2, p. 121-124.

- [15] QINGCHAO, Z., et al. Fault Location of Two-parallel Transmission Line for Non-earth Fault Using One-terminal Data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova Iorque, 3 jul. 1999. Vol. 14, n. 3, p. 863-867.
- [16] AHN, Y. J.; CHOI, M. S.; KANG, S. H.; LEE, S. J. An Accurate Fault Location Algorithm for Double-Circuit Transmission Systems. In: Power Engineering Society Summer Meeting, 16-20 jul. 2000, Seattle, Estados Unidos, p. 1344-1349.
- [17] SAHA, M. M.; WIKSTRÖM, K.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. New accurate fault location algorithm for parallel lines. In: Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE), 09-12 abr. 2001, Amsterdam, Holanda, p. 407-410.
- [18] KAWADY, T.; STENZEL, J. A Practical Fault Location Approach for Double Circuit Transmission Lines Using Single End Data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova Iorque, 18 out. 2003. Vol. 18, n. 4, p. 1166-1173.
- [19] IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E.; SAHA, M. M. Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, Londres, 2 mar. 2004. Vol. 151, n. 2, p. 268-273.
- [20] SONG, G., et al. Parallel Transmission Lines Fault Location Algorithm Based on Differential Component Net. . **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova Iorque, 4 out. 2005. Vol. 20, n. 4, p. 2396-2406.
- [21] IEEE. **IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems: C37.111**. Nova Iorque, 1999. 56 p.

- [22] ELECTRONIC EDITION OF THE ATP RULEBOOK IN PDF FORMAT. In: **Revista Iberoamericana del ATP**. Buenos Aires, Ano 4. Vol. 3. n 4. Dez 2001. rb-210-lec.pdf. p. 9.
- [23] README.TXT: PL42MAT REL. 4.1. Pisa, Itália: Canadian / American EMTP User Group, Jun 2005. Disponível após registro em: <<http://www.eeug.org/files/secret>>.
- [24] PEREIRA, C.; CRUZ, F. C. Análise do comportamento estático e dinâmico dos filtros digitais de mínimos quadrados aplicados a proteção de linhas de transmissão. In: XV SNPTEE – GPC/10, 17-22 out. 1999, Foz do Iguaçu.
- [25] PEREIRA, C.; CRUZ, F. C.; VISACRO, S. Teaching transmission line digital protection using a didactic compatible program. In: 37th Cigré Biannual Session – I workshop links university Cigré. Out. 1998, Paris, França. Vol. LUC, p. LUC 07/01 - LUC 07/06.
- [26] SACHDEV, M. S.; BARIBEAU, M. A. A New algorithm for digital impedance relays. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Nova Iorque, Nov.-Dez. 1979. Vol. PAS-98, n. 6, p. 2232-2240.
- [27] Pereira, C. **Curso de Proteção Digital de Linhas de Transmissão: Convênio ELETROBRAS/FCO/EE.UFMG**, Nov. 1998, Belo Horizonte, 143 p. Notas de Aula. Fotocopiado.
- [28] MILLER, R. H. **Operação de sistemas de potência**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1987. p. 120.
- [29] GOMES, N. S., et al. SAPNET – Sistema de Análise de Perturbações da Cemig. In: XV SNPTEE – GPC/02, 17-22 out. 1999, Foz do Iguaçu.
- [30] Wiszniewski, A. Accurate fault impedance locating algorithm. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, Londres, 1983. Vol. 130, n. 6, p. 311-314.