

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO BASEADO EM
ONDAS VIAJANTES PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO USANDO REGISTROS
OSCILOGRÁFICOS DE UM TERMINAL**

GUSTAVO ABREU DA CUNHA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO BASEADO EM
ONDAS VIAJANTES PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO USANDO REGISTROS
OSCILOGRÁFICOS DE UM TERMINAL**

GUSTAVO ABREU DA CUNHA

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvinho Lopes, DSc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. João Paulo Gomes Ribeiro, MSc. (ENE-UnB)
(Examinador externo)

Brasília/DF, Junho de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

CUNHA, GUSTAVO ABREU DA CUNHA

Estudo e Implementação de Método Baseado em Ondas Viajantes para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Usando Registros Oscilográficos de Um Terminal. [Distrito Federal] 2019.

xiii, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2019).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Localização de Falhas

2. Ondas Viajantes

3. SETWFL

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CUNHA, G. A. (2019). Estudo e Implementação de Método Baseado em Ondas Viajantes para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Usando Registros Oscilográficos de Um Terminal, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xp.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Abreu da Cunha

TÍTULO: Estudo e Implementação de Método Baseado em Ondas Viajantes para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Usando Registros Oscilográficos de Um Terminal.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gustavo Abreu da Cunha

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me guiar nos momentos mais complicados e me acompanhar durante todos os outros períodos de minha vida me dando a oportunidade de finalizar, entre outros projetos, este trabalho.

À minha mãe, Tania, que sempre prezou por minha educação escolar e familiar, que sempre acreditou em mim principalmente nos vários momentos em que não pude estar presente.

Aos meus irmãos Marcos Henrique, Gabriel e Maria Helena que sempre me incentivaram e contribuíram com alegria e ideias.

À minha namorada de longa data, Natalia Meireles, que entendeu o meu tempo dedicado a este trabalho, me aconselhou, trouxe ideias, foi paciente e foi essencial para a conclusão deste texto.

Ao professor Kleber Silva que, desde o início de minha entrada no curso, me acompanhou como professor em várias disciplinas durante os longos 5 anos de caminhada, tirando dúvidas e principalmente trazendo seus conhecimentos.

Ao professor Felipe Vigolvinho Lopes que sempre esteve disponível a me ajudar em todas as dúvidas que tive, me aconselhando e me incentivando a continuar para alcançar resultados promissores.

Aos meus amigos que me acompanharam nesta trajetória de fora da universidade, aos amigos feitos dentro da Universidade de Brasília e também aos do Laboratório de Proteção do Sistemas Elétricos de Potência que com todo o conteúdo sempre me ajudaram bastante.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Alguns métodos de localização de falta já foram estudados e são implementados em subestações atuais. Entre eles têm-se os métodos DEZFL (*Double Ended Impedance Fault Location*), SEZFL (*Single Ended Impedance Fault Location*), o DETWFL (*Double Ended Traveling Wave Fault Location*) e o SETWFL (*Single Ended Traveling Wave Fault Location*). Os dois primeiros são baseados em medições de impedância enquanto que os últimos se baseiam na teoria de ondas viajantes que são transitórios de alta frequência lançadas na linha a partir da ocorrência de uma falta.

Detectar a primeira onda viajante que chega ao terminal não exige tantos esforços. Portanto, consegue-se calcular a localização da falta com bastante precisão com dispositivos em cada terminal da linha, como é utilizado no DETWFL, se os dispositivos estiverem sincronizados, tornando o sistema mais caro. Com intuito de estudar novas funções que resultem a localização da falta de forma precisa e com menor custo, novos desenvolvimentos utilizando apenas um terminal foram criados.

O algoritmo reportado pela empresa SEL, *Schweitzer Engineering Laboratories* em 2017, de localização de faltas em linha de transmissão avaliando registros oscilográficos obtidos em apenas um terminal, é analisado neste trabalho. Este método, denominado SETWFL-SEL (*Single Ended Traveling Wave Fault Location by SEL*) se baseia na teoria de ondas viajantes e calcula, para determinadas hipóteses, pesos referentes à elas de tal forma a chegar à conclusão de qual delas é a localização calculada pela função.

Neste trabalho são apresentados resultados referentes à localização de falta utilizando o método SETWFL-SEL para sistemas distintos com e sem linhas de transmissão adjacente. Do exposto destacam-se vantagens e limitações do método.

Palavras-chave: SETWFL, ATP, Localização de Faltas, Ondas Viajantes, *Traveling Waves*, Digrama de *Bewley*, Transitórios.

ABSTRACT

Some fault locating methods have already been studied and are implemented at current substations. These include the DEZFL (*Double Ended Impedance Fault Location*), SEZFL (*Single Ended Impedance Fault Location*), DETWFL (*Double Ended Traveling Wave Fault Location*) and SETWFL (*Single Ended Traveling Wave Fault Location*). The first two are based on impedance measurements while the last two are based on Traveling Waves theory that are high frequency transients thrown on the line from the fault occurrence.

Detecting the first traveling wave at the terminal does not require so much effort. Therefore, it is possible to calculate the location of the fault quite accurately with devices at each end of the line, as used in DETWFL, if the devices are synchronized, making the system more expensive. In order to study new functions that result the fault location precisely and at a lower cost, new developments using only one terminal were created.

The algorithm reported by the SEL company, Schweitzer Engineering Laboratories, in 2017, of locating transmission line faults by evaluating oscillographic records obtained in only one terminal, is analyzed in this work. This method, called SETWFL-SEL (*Single Ended Traveling Wave Fault Location by SEL*) is based on the theory of traveling waves and calculates, for certain hypotheses, weights referring to them in such a way as to conclude which hypothesis is the function result.

In this work are presented results regarding fault location using the SETWFL-SEL method for distinct systems with and without adjacent transmission line. From the above, the advantages and limitations of the method are highlighted.

Keywords: SETWFL, ATP, Fault Location, Traveling Waves, *Bewley* Diagram, Electromagnetic Transients.

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| Sumário | i |
| Lista de Figuras | iv |
| Lista de Tabelas | vi |
| Lista de Símbolos | viii |
| Glossário | x |
| Capítulo 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização do Tema | 1 |
| 1.2 Organização do Texto | 6 |
| Capítulo 2 – Fundamentação Teórica das Ondas Viajantes | 8 |
| 2.1 Curto-Circuitos em Linhas de Transmissão | 8 |
| 2.2 Ondas Viajantes | 9 |
| 2.2.1 Definição de Ondas Viajantes | 9 |
| 2.2.2 Terminações | 12 |
| 2.2.3 Atenuação e Dispersão | 14 |
| 2.3 Aquisição de Dados para Análise | 14 |
| 2.3.1 Frequência de Amostragem | 15 |
| 2.3.2 Filtro <i>Anti-Aliasing</i> - Analógico | 15 |
| 2.3.3 Transformada de Clarke | 16 |
| 2.3.4 Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> | 17 |
| 2.3.5 Diagrama de <i>Bewley</i> | 19 |
| Capítulo 3 – Algoritmo da Função SETWFL-SEL | 20 |
| 3.1 <i>Software</i> de Transitórios Eletromagnéticos | 20 |
| 3.2 Análise do Sinal de Entrada | 21 |
| 3.3 Aplicação do Algoritmo | 21 |

| | | |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1 | Inicialização | 21 |
| 3.3.2 | O Algoritmo <i>Single Ended Traveling Wave Faul Location</i> | 21 |
| 3.3.2.1 | O Método RTT (<i>Repeating Travel Time</i>) | 25 |
| 3.3.2.2 | O Método ETW - (<i>Expected Traveling Wave</i>) | 27 |
| 3.3.2.3 | Determinando a Localização de Falta pelo SETWFL-SEL | 31 |
| Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados | | 32 |
| 4.1 | Sistema Analisado 1 | 33 |
| 4.2 | Simulação de um Curto Circuito Monofásico, na Fase A, em 30% da Linha de Transmissão do Sistema Analisado 1 | 34 |
| 4.2.1 | Amplitudes e Tempos dos Picos das OV's Dentro da Janela de Observação | 34 |
| 4.2.2 | RTT para um Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1 | 36 |
| 4.2.3 | ETW para um Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1 | 38 |
| 4.2.4 | O Fator WGHT - <i>Weighting Factor</i> para Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1 | 44 |
| 4.2.5 | Resultado do SETWFL para Curto Monofásico em 30% da LT do Sistema Analisado 1 | 45 |
| 4.3 | Simulação de um Curto Circuito Monofásico, na Fase A, em 80% da Linha de Transmissão do Sistema Analisado 1 | 47 |
| 4.3.1 | Amplitudes e Tempos dos Picos das OV's Dentro da Janela de Observação | 47 |
| 4.3.2 | RTT do Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1 | 48 |
| 4.3.3 | ETW com Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1 | 49 |
| 4.3.4 | O Fator WGHT - <i>Weighting Factor</i> para Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1 | 51 |
| 4.3.5 | Resultado do SETWFL para Curto Circuito Monofásico em 80% da LT do Sistema Analisado 1 | 52 |
| 4.4 | Sistema Analisado 2 | 53 |
| 4.5 | Simulação de um Curto Circuito Monofásico, na Fase A, em 40% da Linha de Transmissão do Sistema Analisado 2 | 54 |
| 4.5.1 | RTT de um Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2 | 55 |
| 4.5.2 | ETW de um Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2 | 56 |
| 4.5.3 | O Fator WGHT - <i>Weighting Factor</i> para o Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2 | 59 |
| 4.5.4 | Resultados do SETWFL-SEL para Curto Monofásico em 40% da LT do Sistema Analisado 2 | 59 |
| 4.6 | Análises Pontuais que Revelaram problemas no método SETWFL-SEL | 60 |
| 4.6.1 | Curto Circuito no Meio da Linha de Transmissão | 60 |
| 4.6.2 | Curto Circuito em 99% da Linha de Transmissão | 63 |
| Capítulo 5 – Conclusão e Propostas Futuras | | 65 |

Referências Bibliográficas

67

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Análise das OV's produzidas por um curto circuito monofásico. | 3 |
| 1.2 | Diagrama de Bewley para DETWFL. | 4 |
| 1.3 | Diagrama de Bewley para SETWFL com Linha Adjacente | 6 |
| 2.1 | Circuito equivalente de Segmento de linha de Transmissão | 9 |
| 2.2 | Diagrama de OV's em terminação | 12 |
| 2.3 | Onda de corrente filtrada pelo <i>Differentiator Smoother</i> que demonstra a atenuação dos picos | 15 |
| 2.4 | Filtro DS | 18 |
| 2.5 | Modo α (I_α) da Corrente da fase faltosa em um curto circuito monofásico AT sem filtro DS e com filtro DS | 18 |
| 2.6 | Diagrama de <i>Bewley</i> para curto perto do terminal remoto e, à direita, do terminal local | 19 |
| 3.1 | Diagrama de Bewley para SETWFL com Linha Adjacente | 22 |
| 3.2 | Diagrama de <i>Bewley</i> para entendimento do SETWFL com circuito adjacente | 27 |
| 3.3 | <i>Pattern</i> Considerados: a) Pattern 1 b) Pattern 2 | 29 |
| 3.4 | <i>Pattern</i> Considerados: a) Pattern 3 b) Pattern 4 | 30 |
| 4.1 | Implementação do sistema 1 no ATPDraw | 33 |
| 4.2 | Resultado das OV's em um curto circuito em 30% do sistema analisado | 35 |
| 4.3 | Resultado das 7 hipóteses do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado 1 | 44 |
| 4.4 | Resultado das OV's em um curto circuito em 80% do sistema analisado 1 | 47 |

| | | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5 | Resultado das 5 hipóteses para o curto em 80% da LT do sistema analisado 1 . . . | 51 |
| 4.6 | Sistema analisado 2 | 53 |
| 4.7 | Resultado das OV's em um curto circuito em 40% da LT sem linha adjacente . . | 55 |
| 4.8 | Resultado das 5 hipóteses para o curto circuito em 40% da LT do sistema ana- lisado 2 | 57 |
| 4.9 | Análise da observação das correntes pelo relé | 61 |
| 4.10 | Análise de curto circuito exatamente no meio da LT | 62 |
| 4.11 | Curto circuito em 99% da LT tendo como resposta 18 Hipóteses | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Dados da LT de 230 kV modelada no ATP | 33 |
| 4.2 | Dados dos equivalentes de Thévenin do SEE de 230 kV - 60Hz | 34 |
| 4.3 | VPKs, TPKs e amostras do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado . | 35 |
| 4.4 | Valores de R e de F com seus Respectiveos Pesos NM e $N1_M$ | 38 |
| 4.5 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 1 e do vetor ET(1) | 40 |
| 4.6 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 2 e do vetor ET(2) | 40 |
| 4.7 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 3 e do vetor ET(3) | 40 |
| 4.8 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 4 e do vetor ET(4) | 40 |
| 4.9 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 5 e do vetor ET(5) | 41 |
| 4.10 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 6 e do vetor ET(6) | 42 |
| 4.11 | Valores dos <i>patterns</i> da hipótese 7 e do vetor ET(7) | 43 |
| 4.12 | Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 30% do sistema analisado 1 | 44 |
| 4.13 | Valores da <i>flag</i> $WGHT(hip)$ | 45 |
| 4.14 | Valores da <i>flag</i> $WGHT(hip)$ | 46 |
| 4.15 | Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 30% do sistema analisado 1 | 46 |
| 4.16 | VPK's, TPK's e amostras do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado 1 | 48 |
| 4.17 | Valores de R e de F com seus respectivos pesos NM e $N1_M$ | 49 |
| 4.18 | Vetores ET do ETW em 80% da LT do sistema analisado 1 | 50 |
| 4.19 | Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 80% do sistema analisado 1 | 51 |

| | | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.20 | Valores da $flag\ WGHT(hip)$ | 52 |
| 4.21 | Resultado dos pesos | 52 |
| 4.22 | Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 80% do circuito 1 . . . | 53 |
| 4.23 | Dados da LT de 230 kV modelada no ATP | 54 |
| 4.24 | Dados dos equivalentes de Thévenin do SEP de 230 kV - 60Hz | 54 |
| 4.25 | Valores de R e de F com seus respectivos pesos NM e $N1_M$ para o curto em 40% da LT do sistema analisado 2. | 56 |
| 4.26 | Vetores ET do ETW em 40% da LT do sistema analisado 2 | 58 |
| 4.27 | Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 40% do sistema analisado 2 | 59 |
| 4.28 | Valores da $flag\ WGHT(hip)$ | 59 |
| 4.29 | Resultado dos pesos | 59 |
| 4.30 | Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 40% do sistema analisado 2 | 60 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|---------------------------------------------|
| CC | Curto Circuito |
| <i>Filtro DS</i> | Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> . |
| i_I | Onda de Corrente Incidente |
| i_R | Onda de Corrente Refletida |
| i_T | Onda de Corrente Transmitida |
| \hat{I}_a | Fasor da corrente na fase A. |
| \hat{I}_b | Fasor da corrente na fase B. |
| \hat{I}_c | Fasor da corrente na fase C. |
| <i>LKC</i> | Lei de <i>Kirchhof</i> das Correntes. |
| <i>LKT</i> | Lei de <i>Kirchhof</i> das Tensões. |
| M | Localização da Falta |
| NM | Peso intermediário relativo a SETWFL-SEL |
| $N1_M$ | Peso intermediário relativo a SETWFL-SEL |
| NS | Peso intermediário relativo a SETWFL-SEL |
| N | Peso final relativo a SETWFL-SEL |
| <i>OV</i> | Onda Viajante |
| pu | Por Unidade. |
| <i>TWLPT</i> | <i>Traveling Wave Line Propagation Time</i> |
| v_I | Onda de Tensão Incidente |

| | |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| v_R | Onda de Tensão Refletida |
| v_T | Onda de Tensão Transmitida |
| \widehat{V}_a | Fasor da tensão na fase A. |
| \widehat{V}_b | Fasor da tensão na fase B. |
| $WGHT$ | Flag relativa a SETWFL-SEL - Weighting Factor |
| Z_{LT} | Impedância da linha de transmissão. |
| Z_T | Impedância da Terminação |
| Γ_v | Coefficiente de Reflexão da Tensão |
| Γ_i | Coefficiente de Reflexão da Corrente |

GLOSSÁRIO

| | |
|------|-------------------------------------------|
| ATP | <i>Alternative Transients Program</i> |
| A/D | Analógico/Digital |
| BPA | <i>Bonneville Power Administration</i> |
| EMTP | <i>Electromagnetic Transients Program</i> |
| LT | Linha de Transmissão |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SEE | Sistema de Energia Elétrica |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SIR | <i>System Impedance Ratio</i> |
| TC | Transformador de corrente |
| TPC | Transformador de potencial capacitivo |
| UnB | Universidade de Brasília |

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica se tornou uma conquista da humanidade desde a sua implementação inicial. Com os estudos cada vez mais aprofundados, conseguiu-se criar sistemas de distribuição, geração e transmissão desta energia de forma a todas a garantir eletricidade para todas as unidades consumidoras. Sua importância é muito grande pois a cada segundo sem energia, uma economia de um país pode ter grandes perdas. Por este motivos, agencias reguladoras, no Brasil a ANEEL, são criadas de forma a garantir que a energia seja corretamente gerada, transmitida e distribuída.

No sistema de transmissão, entre cada subestação existe uma conexão para a transmissão da energia elétrica chamada linha de transmissão, aqui definida como LT. Na maioria dos casos, pelo fato de a usina de geração estar localizada em um ponto distinto do local de consumo, existe a necessidade de utilizar as LTs para transportar a energia até a carga consumidora (RANGEL *et al.*, 2009). Pelo fato de esses canais de envio de energia elétrica serem muito extensos, uma vez que as unidades consumidoras estão muito distantes do local da geração, a probabilidade de ocorrência de curtos-circuitos nestas LTs se torna muito maior de forma a trazer problemas para este sistema.

No Sistema de Energia Elétrica (SEE), a maior parte dos curtos-circuitos analisados estão relacionados com LTs e, segundo Tleis (2008), mais de 80% do total de faltas ocorrem nelas. Em Metello (2012) é apresentado que 50% das faltas normalmente acontecem em linhas aéreas e o restante se divide em geradores, disjuntores, transformadores cabos subterrâneos e equipamentos diversos. A localização de faltas para o SEE é importante uma vez que se entende que a segurança dos equipamentos elétricos e de seus usuários poderá estar em risco caso o sistema se mantenha energizado após um curto circuito.

Pelo fato de ter uma maior demanda da sociedade pela eletricidade comparada aos últimos anos, houve uma expansão do sistema de forma a gerar investimentos em pesquisa no SEE, segundo Schutze *et al.* (2015). Logo, caso haja uma falta no sistema elétrico, esta deve ser extinta pela proteção e, não menos importante, localizada para que a manutenção seja feita. Após o reconhecimento da falta e eliminação do problema, a linha deve ser religada e a operação normalizada. Desta maneira, para as faltas que ocorrem em linhas de transmissão, a localização delas deve ser feita para agilizar o processo de restauração do sistema após desligamentos não-programados devido a curtos-circuitos permanentes. Portanto, estudos de localização devem ser feitos de forma a obter resultados consistentes que passam a ser usados como estimativa inicial pelas equipes de manutenção.

O estudo de ondas viajantes dentro do SEE vem crescendo desde seus estudos iniciais. Conforme mencionado em Lopes (2014), os trabalhos neste tema começaram na década de 1930, que resultou em mais pesquisas fazendo com que, em alguns destes estudos, novas aplicações de proteção e localização fossem observadas. Porém, na época, a alta taxa de amostragem necessitada fez com que estes estudos fossem aprimorados apenas alguns anos depois, com a tecnologia digital (LOPES, 2014). Com o avanço tecnológico, o crescimento dos estudos em ondas viajantes cresceu bastante e veio ao encontro da localização de faltas.

O conceito de ondas viajantes, aqui chamada de OV, é de fundamental importância para o entendimento de seus métodos de localização de falta já estudados na literatura. A OV é uma onda transitória produzida após um curto circuito que, uma vez lançada na linha se propaga em forma de *steps*. Ou seja, ao analisar sinais de um sistema em que ocorreu uma falta, percebe-se, em geral, que o transitório ocorre no formato dos *steps* e com o tempo vai se desfazendo em decorrência da atenuação e dispersão das OVs. Assim, em caso da ocorrência de uma falta em qualquer local da LT com tensão diferente de zero, são lançadas OVs para ambos os lados dela (SCHWEITZER *et al.*, 2014). A Figura 1.1 mostra os *steps* bem definidos de um sinal de corrente elétrica que se referem aos transitórios formados a partir de um curto circuito monofásico.

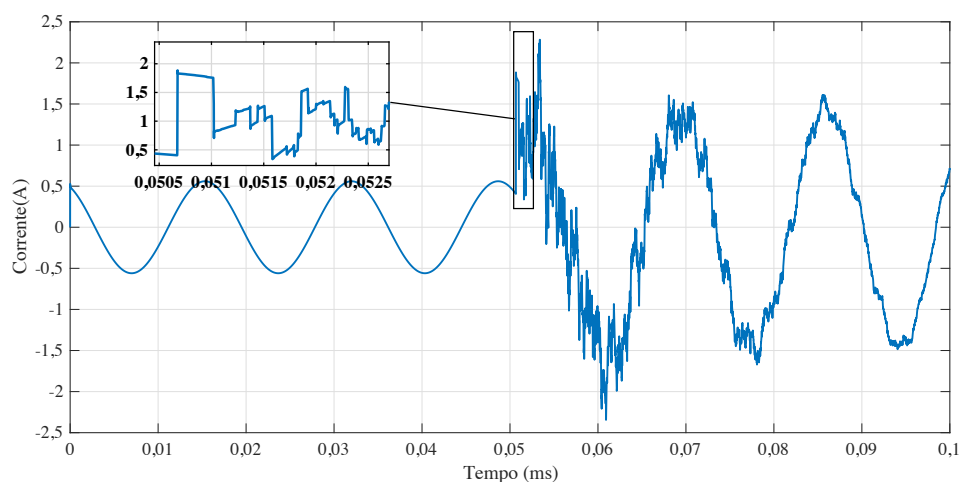


Figura 1.1. Análise das OV's produzidas por um curto circuito monofásico.

Entre alguns métodos de localização de faltas listados na literatura, ressaltam-se os métodos de impedância e de ondas viajantes. Os métodos aqui denominados *Single Ended Impedance Fault Location* (SEZFL), que analisam apenas um terminal da linha e *Double Ended Impedance Fault Location* (DEZFL), que analisam os dois terminais são baseados em medições de impedância. O DEZFL possui uma boa precisão e um resultado confiável. Porém, necessita que os dois terminais se comuniquem com um mesmo tempo de referência para que a falta seja localizada (GUZMÁN *et al.*, 2017). Já o SEZFL também tem abordagens em apenas um terminal e soluções adequadas para a localização de forma mais simples e barata.

Muitos são os algoritmos de localização de faltas que utilizam a teoria de OV's (*Traveling Waves*). Deve-se então utilizar dispositivos digitais com uma elevada taxa de amostragem para se conseguir analisar estes transitórios. Isso faz com que o desempenho da análise dos transitórios esteja diretamente relacionada com a taxa de amostragem utilizada (METELLO, 2012).

Um dos métodos é o mostrado em Silva (2003) que utiliza a aplicação da transformada de *Wavelet* para fazer a análise dos transitórios de alta frequência. Neste trabalho foi implementado uma ferramenta matemática de transformação linear, denominada por "TW" que é bastante parecida com a transformada de Fourier porém que permite a localização no tempo de componentes de frequência de um dado sinal distintos.

Alguns métodos já aplicados por determinadas empresas são denominados DETWFL - *Dou-*

ble Ended Traveling Wave Fault Location . Estes métodos analisam a chegada de OV's nos dois terminais da linha. A depender do método utilizado, estes dois terminais devem estar sincronizados, assim como a maioria dos que analisam dois terminais para a teoria de impedância.

Entre os métodos de dois terminais, um deles se baseia no mostrado a seguir. Tendo as primeiras OV's que chegam em cada terminal (local e remoto), consegue-se dizer onde foi a falta. Para isso, é necessário apenas saber a velocidade de propagação da OV e o comprimento da linha de transmissão. Esta formulação pode ser vista em (1.1). A Figura 1.2 mostra o diagrama de *Bewley* de uma OV lançada a partir de uma falta a uma distância M do terminal local em uma linha de transmissão de tamanho LL . Importante ressaltar que, para este caso analisado, o valor de M pode estar em km ou em pu do LL .

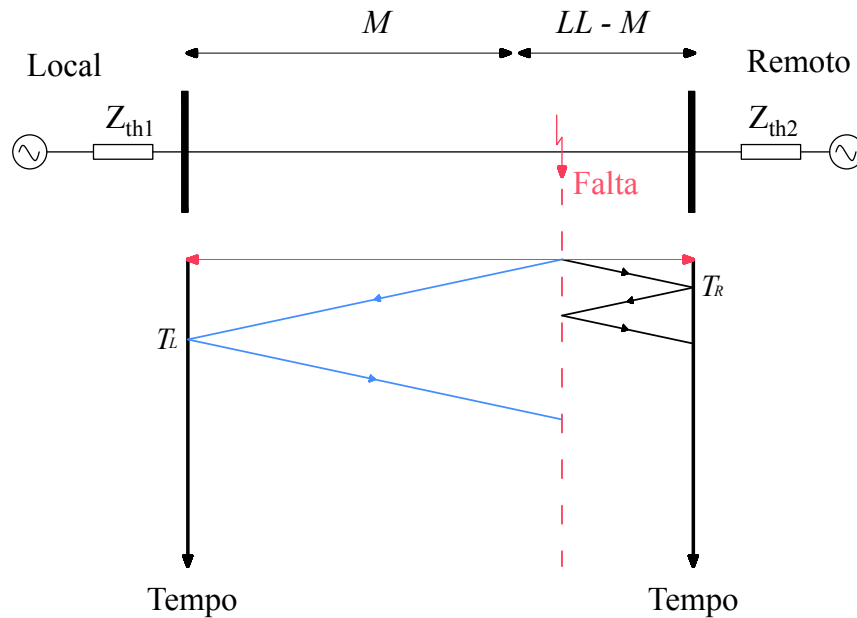


Figura 1.2. Diagrama de Bewley para DETWFL.

Perceba que as OV's se propagam para ambos os lados da linha de transmissão. De forma evidenciada pela Figura 1.2, a falta está a uma distância $LL - M$ km do terminal remoto.

Definindo-se $TWLPT = \frac{LL}{PV}$, que representa o tempo de propagação da onda viajante (*Traveling Wave Line Propagation Time*), em que PV é a velocidade de propagação da OV, e $t_{Local} = \frac{M}{PV}$ e $t_{Remoto} = \frac{(LL - M)}{PV}$, então, a localização M da falta fica dada por (1.1)

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left(1 + \frac{T_L - T_R}{TWLPT} \right) \quad (1.1)$$

Este método não possui uma grande dificuldade de ser implementado, porém, utiliza os

dois terminais da linha resultando em um maior investimento. Uma maneira de mitigar este requisito financeiro é analisar as ondas em apenas um terminal. Para isso, se faz necessário além da OV que incidiu, descobrir qual é a onda refletida a partir da falta (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Os métodos SETWFL - *Single Ended Traveling Wave Fault Location* da empresa SEL, aqui denominado SETWFL-SEL, fazem exatamente a análise de apenas um terminal da LT. Uma OV pode sofrer reflexões e refrações que podem ocorrer tanto nos terminais quanto no local da falta. Para este método, deve-se identificar duas ondas viajantes — a **primeira**: a que chega no terminal local, que é de fácil aquisição, e a **segunda**: a mesma que chega no terminal local, porém que foi refletida nele, refletiu na falta e chegou no novamente local. Perceba que a Figura 1.2 mostra uma LT simples e os aspectos do comportamento das OVs. Para descrever as interferências das linhas adjacentes, a Figura 1.3 apresenta diagrama de *Bewley* de um circuito com linhas adjacentes. No terminal local, parte da OV refratou, passando para a linha adjacente, e parte refletiu. Ao final da linha adjacente, uma parte dela refletiu gerando o tempo de recepção da OV pelo relé t_2 . A primeira onda se refere ao tempo t_1 e a segunda onda que este algoritmo necessita para calcular a localização se refere ao t_6 , uma vez que é a onda refletida a partir da falta. Para se calcular a localização da falta pelo método do SETWFL-SEL, usa-se (1.2).

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left(\frac{t_6 - t_1}{TWLPT} \right) \quad (1.2)$$

Deve-se perceber que o desafio é descobrir o valor de t_6 e aplicar em (1.2). Porém, entre as OVs que chegam no terminal local, detectar o exato tempo da onda refletida não é uma tarefa considerada simples. Por este motivo, diversas são as formas de se conseguir estimar qual é este valor.

Pela reflexão, pode-se dizer que parte de uma OV incidente no terminal local acaba voltando para a falta. Conseguindo-se detectar essa onda refletida o problema estará resolvido. Por uma simples aritmética consegue-se calcular onde foi a localização da falta com um erro consideravelmente pequeno. Esta foi a ideia proposta pela SEL, *Schweitzer Engineering Laboratories*, trazendo uma maneira de se conseguir identificar qual é a OV que veio a partir da reflexão no ponto de falta (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

O método desenvolvido pela SEL se baseia em pesos de probabilidades. Porém, para que a

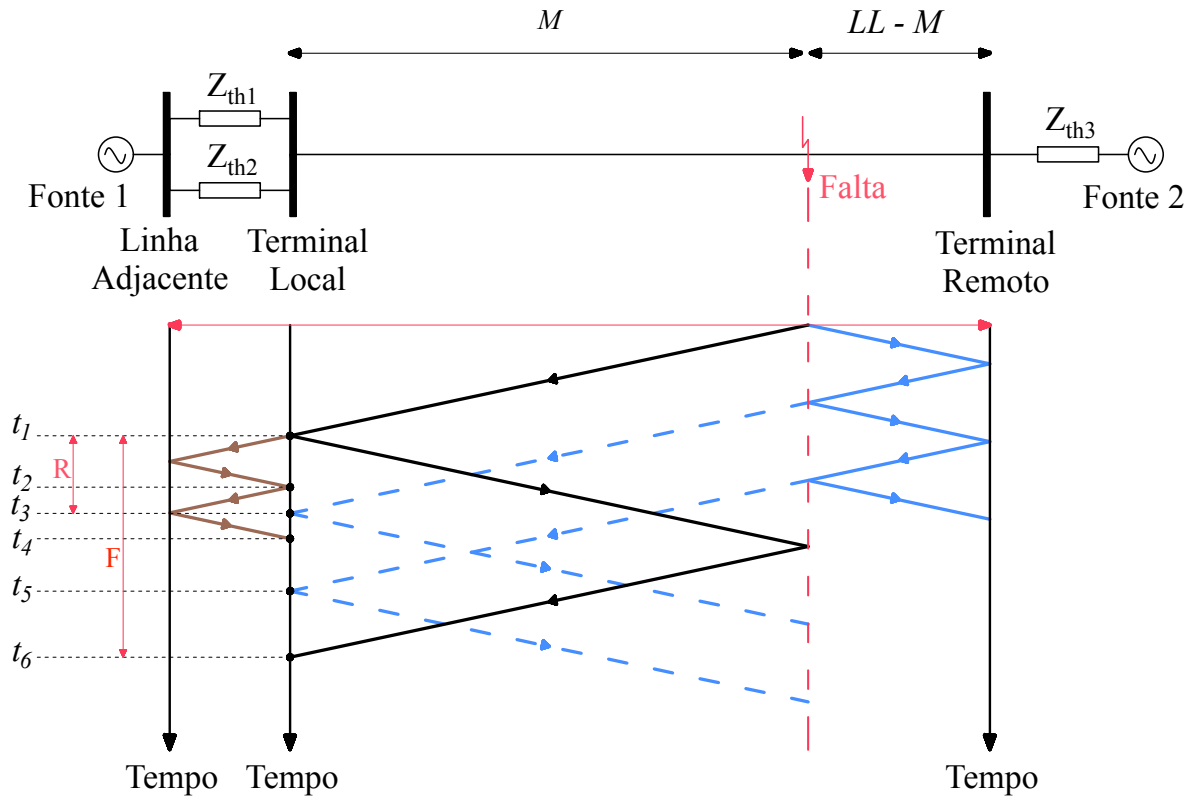


Figura 1.3. Diagrama de Bewley para SETWFL com Linha Adjacente

análise seja bem sucedida, deve-se coletar os dados de medições e filtrá-los. Com o intuito de trazer maiores entendimentos sobre este método, este trabalho foi feito.

Desde a época em que se começou a estudar o tema de OV's, vários métodos surgiram de forma a otimizar os resultados. A empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* publicou no ano de 2017 uma solução promissora que conseguiu realizar localização de faltas teóricas e práticas utilizando a teoria de OV's em apenas um terminal (GUZMÁN *et al.*, 2017). Também foram publicados artigos de como a nova teoria funciona no âmbito de localizar a falta e resultados esperados e obtidos (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Desta maneira, este trabalho tem o objetivo de esclarecer as ideias propostas pela empresa assim como mostrar os resultados obtidos em simulações utilizando o software ATP, demonstrando vantagens e limitações.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado com a seguinte maneira:

- No capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica das OV's com objetivo de entendê-las para utilizar seus resultados neste trabalho;
- No capítulo 3, explica-se como funciona a ideia proposta pela empresa SEL, quais são os pesos inseridos e como se deve aplicá-los, juntamente do passo a passo sobre como proceder para a aquisição de dados;
- No capítulo 4, mostra-se os resultados e o passo a passo destes para três tipos de curto circuitos diferentes, analisando possíveis aprimoramentos;
- Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DAS ONDAS VIAJANTES

2.1 CURTO-CIRCUITOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O estudo de curto circuito é baseado no entendimento do rol de curtos-circuitos que podem acontecer. De maneira genérica, o termo falta é utilizado para definir um acidental afastamento das condições normais de operação quando do estabelecimento de conexão de baixa impedância em algum ponto da LT. Portanto, é importante entender quais os tipos de faltas que se deve analisar a fim de obter respostas sobre a localização da falta e a proteção do sistema (FERNANDES, 2016).

Os curtos-circuitos, nos sistemas trifásicos, podem ser diferentes um dos outros com base nas fases envolvidas e se houve ou não relação com a terra. Dessa forma, os curtos circuitos podem ser (GLOVER *et al.*, 2011):

- Monofásico (Implica em um curto-circuito - Fase-Terra);
- Bifásico (Curto-circuito envolvendo duas fases - Fase-Fase);
- Bifásico -Terra (Curto envolvendo duas fases e a terra - Fase-Fase-Terra);
- Trifásico (Curto envolvendo as três fases - Fase-Fase-Fase).

O entendimento dos curtos-circuitos pode ser analisado pela teoria de componentes simétricas com a representação fasorial do sistema. Fasor, por definição, é a análise vetorial da corrente ou da tensão para regime permanente. Em um circuito trifásico em regime permanente, tem-se três fases defasadas de 120° e com módulo constante, uma vez que são três tensões de mesmo módulo quando o sistema opera de forma equilibrada.

Entendido o conceito de curto-circuito e de como ele é analisado, deve-se entender o fenômeno da OV que será tratada na próxima seção.

2.2 ONDAS VIAJANTES

2.2.1 Definição de Ondas Viajantes

Ao ocorrer um curto circuito em uma linha de transmissão, a depender do ângulo de incidência da falta, lançam-se transitórios denominados ondas viajantes. Desta maneira, é importante conseguir identificar, compreender e analisar os efeitos produzidos por estas ondas. Para isso, será discutido a teoria básica referente ao tema.

A Figura 2.1 é o equivalente de um segmento de linha de transmissão de tamanho Δx que possui dois condutores com resistência, indutância, capacitância e condutância por unidade de comprimento. Para se montar as equações pertinentes, deve-se aplicar a lei de Kirchhoff das tensões, LKT, e Lei de Kirchhoff das correntes, LKC. Isso implica que a soma das tensões em uma malha fechada é sempre igual a zero e que a soma das correntes que entram em um nó equivale às que saem. A ideia é achar quanto valem as tensões e correntes em x , ($i(x, t)$ e $v(x, t)$) e em $x + \Delta x$, ($i(x + \Delta x, t)$ e $v(x + \Delta x, t)$).

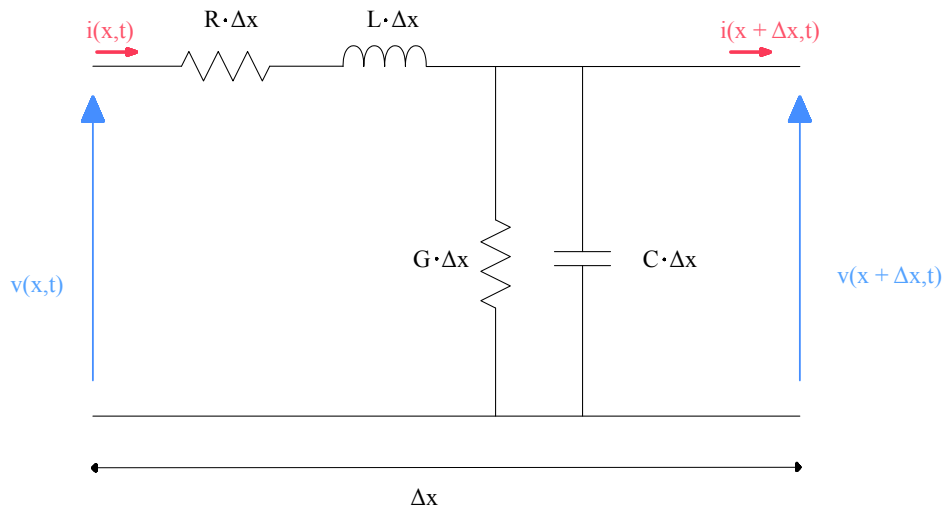


Figura 2.1. Circuito equivalente de Segmento de linha de Transmissão

Logo, utilizando LKC e LKT, tem-se:

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para se descobrir o quanto varia a corrente e a tensão para cada fração de Δx , divide-se os dois lados por Δx . Assumindo que a mudança na localização Δx se aproxima de zero, ou seja, o passo tem limite tendendo a zero, obtém-se derivadas da tensão e da corrente em relação à posição x como mostrado em (2.3) e (2.4). Além disso, entende-se que o sinal negativo mostra que a amplitude da onda decresce enquanto que x aumenta identificando uma atenuação.

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -R \cdot i(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G \cdot v(x, t) - C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Tirando do domínio do tempo e passando para o domínio de Laplace, utiliza-se o operador *Heaviside* que é definido como sendo $s = \frac{\partial}{\partial t}$. Logo, fazendo-se esta substituição, tem-se que:

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -(R + s \cdot L) \cdot i(x, s) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -(G + s \cdot C) \cdot v(x, s) \quad (2.6)$$

Lembrado-se que $Z = R + s \cdot L$ e que $Y = G + s \cdot C$, consegue-se substituir dentro do equacionamento para que diminua-se a quantidade de variáveis.

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -Z \cdot i(x, s) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -Y \cdot v(x, s) \quad (2.8)$$

Sendo a ideia ter duas equações distintas, sendo uma para a corrente e outra para a tensão, basta fazer uma derivada em x dos dois lados de cada equação, conforme (2.9) e (2.10).

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{\partial i(x, s)}{\partial x} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{\partial v(x, s)}{\partial x} \quad (2.10)$$

Para ficar com apenas uma variável desconhecida por equação, basta usar (2.7) e (2.8) e inserir onde aparecem estas derivadas. Com isso, obtém-se que:

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot Y \cdot v(x, s) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot Z \cdot i(x, s) \quad (2.12)$$

Sabe-se que a constante de propagação da linha de transmissão é a raiz da multiplicação da impedância (Z) com a admitância (Y), $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$. Desta maneira:

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot v(x, s) = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot i(x, s) = 0 \quad (2.14)$$

As equações (2.13) e (2.14) se encontram no domínio de Laplace. Para resolvê-las, necessita-se das condições de contorno. Deve-se analisar então, mesmo que inicialmente, a solução genérica destas equações diferenciais parciais de segunda ordem.

$$v(x, t) = v_I \cdot e^{-\gamma x} + v_R \cdot e^{\gamma x} \quad (2.15)$$

$$i(x, t) = i_I \cdot e^{-\gamma x} + i_R \cdot e^{\gamma x} \quad (2.16)$$

Analisando-se a corrente e a tensão na linha de transmissão, faz-se a razão entre estes para se calcular a impedância característica da linha (Z_C), que depende dos seus parâmetros. Assim, conhecendo-se Z_C , pode-se analisar o que acontece com uma onda viajante quando ela se submete a uma descontinuidade, ou seja, quando ela passa de uma linha de transmissão para outra ou para outro equipamento. Em (2.17) e (2.18) são mostradas as definições da impedância característica em que v_I é a tensão incidente, i_I a corrente incidente, v_R a tensão refletida e i_R a corrente refletida.

$$Z_C = \frac{v_I}{i_I} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.17)$$

$$Z_C = -\frac{v_R}{i_R} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.18)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_C} \cdot (v_I \cdot e^{-\gamma x} - v_R \cdot e^{\gamma x}) \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) refere-se à quanto vale a corrente no tempo e no espaço considerando apenas a tensão incidente, refletida e a impedância característica. Caso haja uma descontinuidade, o valor de Z_C varia de um trecho para o outro, resultando em reflexões e refrações. Para tanto, tem-se que analisar o que acontece com a onda viajante neste momento (SCHWEITZER *et al.*, 2014) (GUZMÁN *et al.*, 2017).

2.2.2 Terminações

Ao se propagar, uma OV pode chegar a uma terminação. Assim, a onda pode sofrer uma reflexão, fazendo com que parte da energia dela volte para o circuito de onde veio. Outra parte da energia pode continuar, o que indica que foi transmitida para a linha ou equipamento adjacente.

Quando uma falta incide sobre a linha de transmissão, ela produz OVs para as duas direções, ou seja, uma OV para o terminal local e outra para o remoto. Então, de acordo com as equações já explicitadas em (2.15) e (2.16), a onda incidente de tensão v_I e a de corrente i_I chegam a um terminal e parte delas são transmitidas para a linha adjacente — v_T e i_T — outra parte é refletida - v_R e i_R . Esta ideia que parte da onda passa, implica que parte de sua energia é refletida e outra parte continua adiante. Isso é melhor mostrado na Figura 2.2 (SCHWEITZER *et al.*, 2014). A OV, quando atinge uma terminação de impedância definida - aqui denominada Z_T - apresenta uma sobreposição de ondas. Pela primeira lei de Ohm, a relação que vale para as OVs incidentes e refletidas com a impedância da terminação é definida por (2.20):

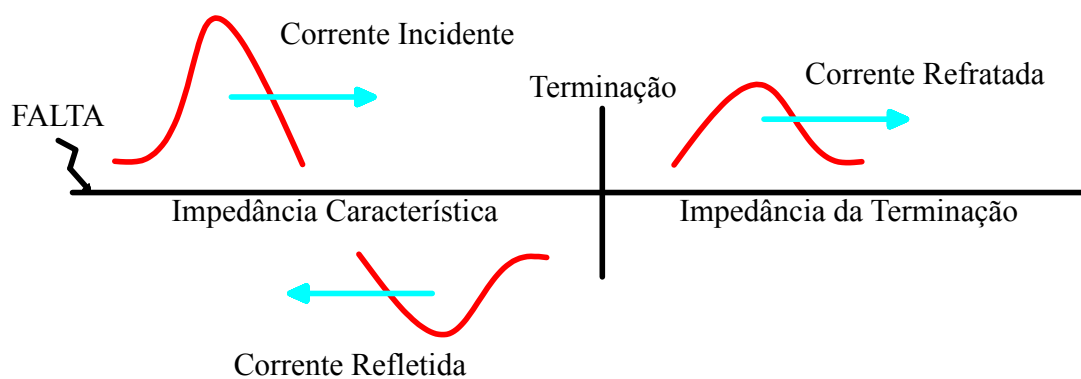


Figura 2.2. Diagrama de OVs em terminação

$$Z_T = \frac{v_T}{i_T} = \frac{v_I + v_R}{i_I + i_R} \quad (2.20)$$

Para o estudo de localização de faltas analisado neste trabalho, a onda viajante a ser analisada é a de corrente conforme proposto pela SEL. A depender de como a polaridade do TC está conectada, a polaridade da OV que chega ao terminal analisado pode ser alterada. Isso será melhor discutido mais à frente. A ideia é conseguir uma relação entre a OV incidente e

a OV refletida. Para chegar a este resultado, basta relacionar (2.17) e (2.18) com (2.20). Isso sugere que se consegue obter v_R em função de Z_T , Z_C e v_I . Fez-se o mesmo para a corrente, uma vez que para a análise de localização de faltas, utiliza-se esta. Fazendo-se a substituição, chega-se em:

$$v_R = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} \cdot v_I = \Gamma_v \cdot v_I \quad (2.21)$$

$$i_R = \frac{Z_C - Z_T}{Z_C + Z_T} \cdot v_I = \Gamma_i \cdot i_I \quad (2.22)$$

Em que Γ_v e Γ_i são, respectivamente, coeficiente de reflexão da tensão e coeficiente de reflexão da corrente, e então definidos como:

$$\Gamma_i = \frac{Z_C - Z_T}{Z_T + Z_C} \quad (2.23)$$

$$\Gamma_v = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} \quad (2.24)$$

Assim, das Equações (2.21) e (2.22), descreve-se como a energia da OV se comporta quando esta incide em uma terminação. Importante ressaltar uma análise de como a OV se propaga. Por exemplo, se a impedância característica da linha Z_C for igual à impedância de terminação da linha Z_T , nenhuma onda é refletida. Logo, toda a energia da onda é transmitida. Basta analisar as Equações (2.21) e (2.22). Se for considerado $Z_T = 0$, a onda refletida possui a mesma energia que a onda incidente, ou seja, toda a onda incidente foi refletida quando analisado uma onda de tensão, por exemplo (SCHWEITZER *et al.*, 2014) (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Segundo Guzmán *et al.* (2017), em uma localização de falta, a impedância de terminação é normalmente bem menor que a impedância característica da LT ($Z_T \ll Z_C$). Além disso, analisando-se a corrente elétrica, o coeficiente de reflexão dela é positivo ($\Gamma_i > 0$). Com estas informações, a polaridade da onda incidente e da onda refletida são as mesmas. Este é o fundamento para analisar as hipóteses que a SEL utilizou em sua publicação para criar a função SETWFL-SEL. Separando-se a corrente i_T e colocando-se em função de i_I e Z_C e Z_T tem-se:

$$i_T = \frac{2 \cdot Z_C}{Z_T + Z_C} \cdot i_I = T_i \cdot i_I \quad (2.25)$$

Em que T_i é o coeficiente de transmissão da corrente elétrica. Esta formulação é para o entendimento de que as hipóteses constatadas pelo método SETWFL-SEL são referentes à OV que possuem a mesma polaridade da primeira onda incidente. Para este método, não se necessita calcular o valor da impedância da terminação Z_T .

2.2.3 Atenuação e Dispersão

Uma OV, ao ser criada, propaga-se até um dos terminais da linha de transmissão. A Equação (2.16), que se refere à OV de corrente, implica na divisão de quanto da onda vai para um terminal e quanto vai para outra. Ou seja, $i_I \cdot e^{-\gamma x}$ iria para um lado da LT e $i_R \cdot e^{\gamma x}$ para o outro. Aqui, refere-se o terminal analisado como Local e o distante como terminal Remoto. Enquanto a OV se propaga, ela perde magnitude com o tempo. Isso é visível com a Figura 2.3 que está mostrando as OVs depois de passar o filtro *Differentiator Smoother*, que transforma os *Steps* em ondas triangulares. A formação destas ondas em forma triangular será explicada mais adiante. Perceba que a amplitude da onda triangular está diminuindo (picos laranjas da Figura 2.3. Este fato é por conta da atenuação, ou seja, perda de energia que a onda está tendo à medida em que se propaga. Além disso, perceba que os degraus bem definidos no início da falta foram desaparecendo por conta da dispersão da OV.

2.3 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE

A OV deve ser detectada de forma coerente para que o método de localização de faltas funcione adequadamente. Para tanto, é necessário extrair OVs individuais para que seja analisado o tempo em que cada OV incidiu sobre o terminal analisado (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Além disso, as aquisições de dados aqui realizadas não são totalmente idênticas às realizadas em campo com sinais analógicos reais. Cabe aqui apenas explicitar o que deve ser feito com o sinal simulado no ATP, representando o passo a passo típico em dispositivos reais.

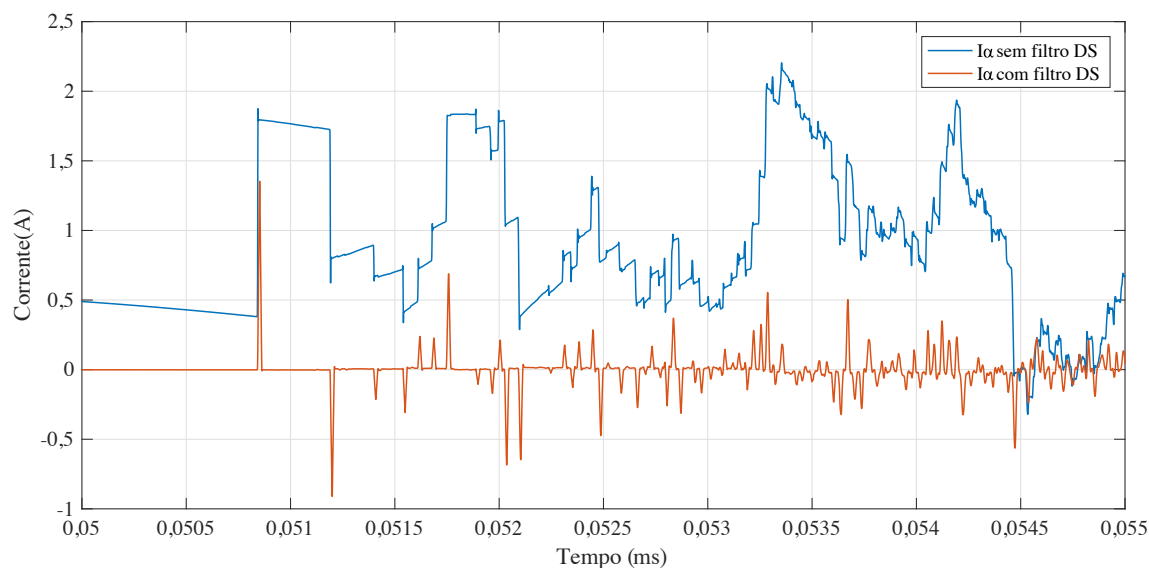


Figura 2.3. Onda de corrente filtrada pelo *Differentiator Smoother* que demonstra a atenuação dos picos

2.3.1 Frequência de Amostragem

Tanto no circuito simulado no *software* ATP, que será mostrado mais adiante, quanto na implementação do código que analisa a localização de falta e seus resultados, o passo de análise dos dados são discretizados uma vez que são resultados simulados. Ou seja, por menor que seja a variação de um tempo entre a primeira amostra e a segunda amostra na simulação, este distanciamento temporal (passo), não cria um sinal analógico. O passo sugerido pela SEL foi de um distanciamento de tempo de $1\mu s$. Isso gera uma frequência de amostragem do sinal de entrada de 1 MHz.

2.3.2 Filtro *Anti-Aliasing* - Analógico

Pelo teorema de *Nyquist*, para que não ocorra o efeito de *aliasing* do sinal, deve-se fazer a amostragem dele com uma frequência de, no mínimo, duas vezes a frequência máxima do sinal analisado. Quando um sinal é discretizado no tempo para sua análise computacional, pode ser, a depender de sua frequência de amostragem, a frequência observada seja distinta da frequência real do sinal. Isso porque a frequência real do sinal é diferente da que se está analisando. (FERNANDES, 2011)

Para se resolver este problema, basta passar um filtro passa baixas no sinal. Isso faz com que as frequências altas que produzem o efeito de *aliasing* seja cortadas na amostragem. Para

isso, fez-se necessário passar o filtro passa-baixas denominado *Butterworth*, neste trabalho, de terceira ordem com uma frequência de corte de $F_C = 400$ kHz. Um pequeno atraso pode ser gerado pela aplicação do filtro, porém as altas frequências espectrais são cortadas. Neste trabalho, a amostragem foi feita de acordo com a frequência de amostragem estipulada por *Nyquist*, de forma a conter os efeitos *aliasing*. Logo, $f_s = 10^6$ Hz.

2.3.3 Transformada de Clarke

Já é sabido que são feitas transformações lineares obtidas a partir das correntes e tensões do sistema para sua análise e compreensão. Essas transformações possuem o papel de facilitar a compreensão dos fenômenos e ajudar nos cálculos necessários. Uma delas é a teoria de componentes simétricas utilizada para cálculo de curtos-circuitos já comentada na seção 2.1 deste capítulo. Perceba que a teoria de componentes simétricas se dá classicamente por fasores e, por definição, fasor é apenas para regime permanente de falta.

Uma vez considerado que o sistema foi modelado de forma a ter linhas de transmissão transpostas e simétricas, a utilização da transformação de Clarke ou de Wedepohl pode ser feita. Para este trabalho, optou-se pela transformação de Clarke (VALINS, 2005).

Na transformação de Clarke, para cada fase ter-se-á três correntes referenciadas a ela. I_0 - Modo terra, I_α e I_β - Modo aéreo. A relação de transformação das correntes das fases I_A, I_B e I_C para I_0, I_α e I_β se dá pela Equação (2.26).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

Em que o que multiplica a matriz das correntes I_A, I_B e I_C é denominada matriz inversa da transformada de Clarke (SCHWEITZER *et al.*, 2014). De maneira a adequar a transformada de Clarke para todas as faltas que foram comentadas na seção 2.1, deve-se utilizar esta matriz para todas as fases como mostrado nas Equações (2.27), (2.28) e (2.29).

$$\begin{bmatrix} I_\alpha^A \\ I_\beta^A \\ I_0^A \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}^B \\ I_{\beta}^B \\ I_0^B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}^C \\ I_{\beta}^C \\ I_0^C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

É observado que a componente I_{α} é a mais apropriada para analisar faltas monofásicas, ou seja, *Single Line to Ground* (SLG) e a componente I_{β} é mais utilizada para faltas bifásicas *Line to Line Fault* como comentado em Guzmán *et al.* (2017). Existe uma diferença entre as três modalidades α , β e *zero* que é evidenciada quando se analisa a impedância característica da linha, a atenuação da OV e sua dispersão. Estas análises são diferentes em cada uma destas modalidades. Para o trabalho aqui analisado, serão tratadas apenas as a corrente I_{α} pelo fato de apenas terem sido simuladas curto circuitos monofásicos.

2.3.4 Filtro *Differentiator-Smoother*

Como se é desejado saber o instante em que cada OV chega ao terminal, é interessante fazer a análise dos dados de forma mais explícita do que em relação aos *Steps* da OV que chegam. Para a localização de falta aqui tratada, é preciso receber informações do tempo em que a primeira OV chega ao terminal local e do tempo da onda que refletiu neste terminal, incidiu no ponto da falta e voltou novamente para o terminal local. Analisando a Figura 1.3, seriam os tempos t_1 e t_6 .

O filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS) converte uma mudança acentuada na corrente em um sinal triangular (GUZMÁN *et al.*, 2017). Quanto mais acentuada for a mudança, mais parecido com uma onda triangular o resultado permanece. Isso implica em um melhor cálculo de limiares e também interpolação dos dados para se conseguir estimar os tempos em que as OVs incidem nos terminais (SCHWEITZER *et al.*, 2014). O entendimento do resultado do filtro DS pode ser melhor visualizado na Figura 2.4 onde se tem um *step* como sinal de entrada do filtro e, em sua saída, uma onda triangular. Importante ressaltar que o instante de chegada da OV é atribuído ao instante de ocorrência do valor de pico da saída do filtro DS (LOPES *et al.*, 2018b).

Com este entendimento, percebe-se que o filtro DS é de fundamental importância para o

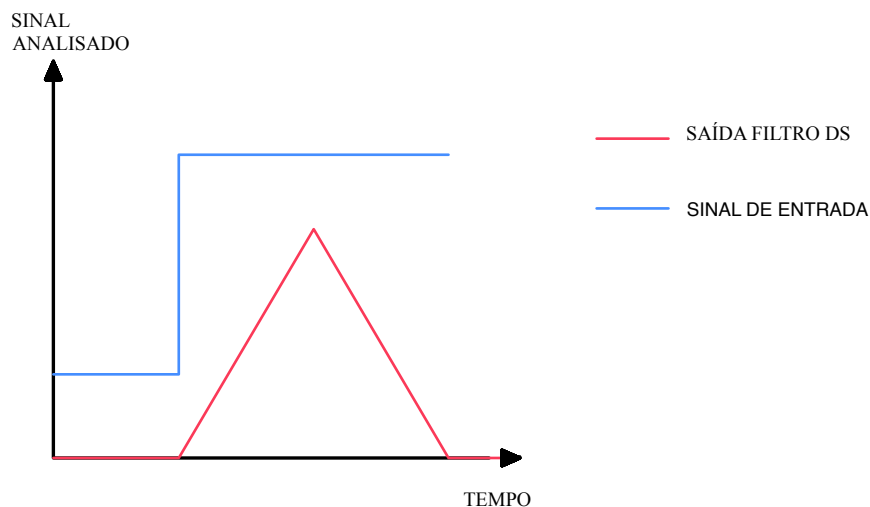


Figura 2.4. Filtro DS

estudo das OV's neste trabalho uma vez que deve-se determinar o exato tempo de recebimento de cada uma. Para melhor entendimento, analise a Figura 2.5. Perceba que nela, em azul, tem-se a corrente medida pelo TC do terminal local. Ao processar o sinal via filtro DS, o que se tem está em vermelho - ondas triangulares que facilmente definem o tempo em que a OV chegou ao terminal. Perceba que o pico destas ondas está marcado um 'x' em azul. O algoritmo utilizado analisa o tempo do pico que foram localizados juntamente com sua polaridade. Com os valores de 'x', o tempo e a amplitude das OV's são armazenados para tratar os dados.

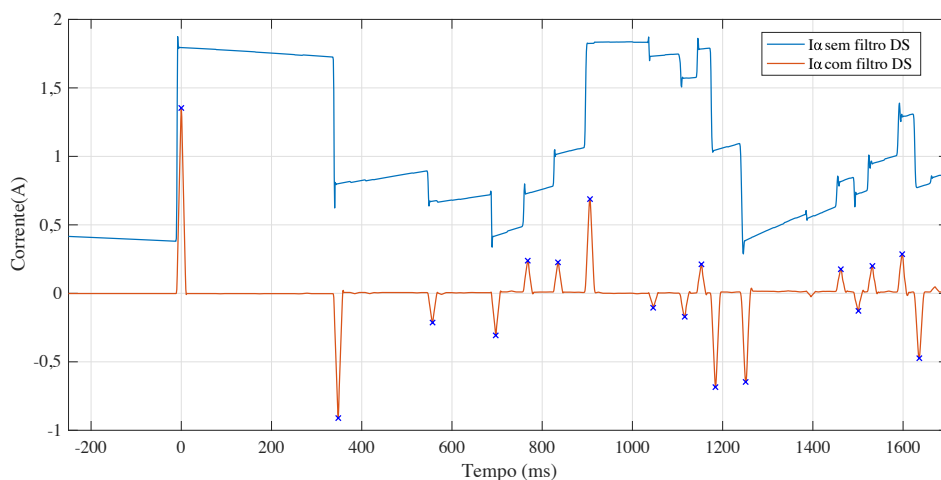


Figura 2.5. Modo α (I_α) da Corrente da fase faltosa em um curto circuito monofásico AT sem filtro DS e com filtro DS

2.3.5 Diagrama de *Bewley*

O Diagrama de *Bewley*, também denominado diagrama de *Lattice*, é muito eficiente para analisar transitórios em uma linha de transmissão. As Figuras mostradas em 2.5 mostram dois exemplos de diagramas para o entendimento. Perceba que na primeira, o curto circuito aconteceu depois da metade da linha referenciada ao terminal local. Já a segunda mostra um curto circuito antes da metade da linha. Importante ressaltar que este modelo desenhado não possui circuito adjacente. Isso implica que não receberão OV's referentes aos circuitos adjacente. Cada seta representa a frente de onda que está chegando a cada terminal.

Este diagrama traz uma grande facilitação no cálculo da forma de todas as ondas que estão presentes na LT. Isso implica em um maior entendimento sobre aquela onda, de onde ela veio e análises importantes que se devem ter para seu completo entendimento. Este diagrama também facilita quando se conhece as funções de atenuação e distorção das OV's (SOUZA, 2007).

Este modelo irá ser muito útil para o entendimento do SETWFL-SEL uma vez que, em seu algoritmo, algumas hipóteses são escolhidas de tal maneira que, para cada uma, seu diagrama de *Bewley* é montado a partir de algumas condições.

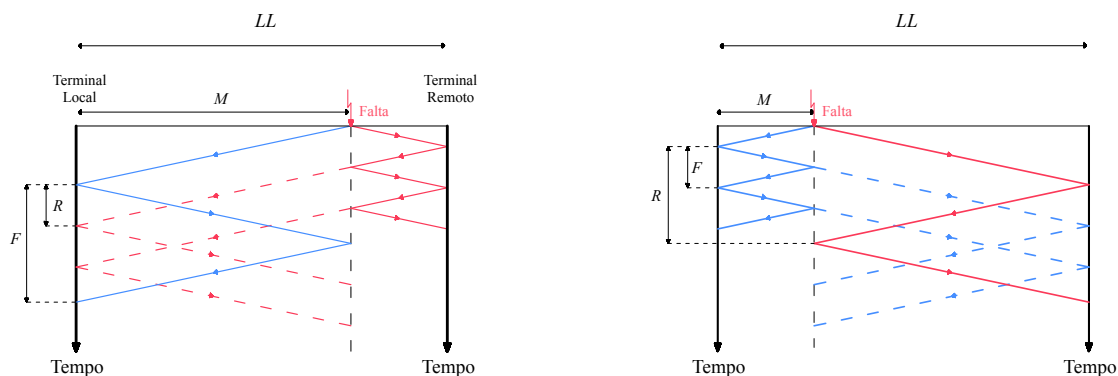


Figura 2.6. Diagrama de *Bewley* para curto perto do terminal remoto e, à direita, do terminal local

ALGORITMO DA FUNÇÃO SETWFL-SEL

O método aqui discutido tem a ideia de avaliar o algoritmo proposto pela empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* para localização de faltas via OV usando registros oscilográficos de um terminal. Para tanto, realiza-se a seguir a descrição das simulações e implementações realizadas

3.1 SOFTWARE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

O programa usado para a simulação dos sistemas elétricos de potência utilizados foi o ATP (*Alternative Transientes Program*) o qual surgiu por volta dos anos 70 entre programas já existentes da época.

No programa ATP, é permitido que se montem os circuitos e sejam analisados transitórios em linhas de transmissão, trafos, entre outras variedades de análises possíveis, assim como os induzidos por faltas. Neste trabalho, leva-se em conta nas simulações as forças das fontes, a impedância da falta para a terra ou entre fases, da linha, seus parâmetros, além dos valores de tensão, frequência e corrente (FILHO; PEREIRA, 1996).

Para a análise dos dados, deve-se avaliar os dados do ATP tratando-os em um simulador que realize as operações necessárias. Para adquirir o dados simulados, utiliza-se o arquivo denominado *Models*. A *Models* é a linguagem de programação que é utilizada dentro do programa ATP para adquirir os dados no domínio do tempo. O que foi utilizado para este trabalho foram apenas os dados gerados do terminal local sobre tensões e correntes. Os dados guardados devem ser filtrados de tal maneira a obter os resultados de interesse sendo esta análise explicada na próxima seção.

3.2 ANÁLISE DO SINAL DE ENTRADA

O primeiro passo para a análise dos sinais obtidos via ATP, que representa um sinal analógico é discretizá-lo no tempo emulando um Conversor Analógico Digital. Neste trabalho, uma vez que o passo de integração do ATP já estava pequeno, $1\mu s$, utilizou-se o mesmo passo para cada amostra ao analisar os dados representando o passo de amostragem.

Entendendo-se que o sinal discretizado foi obtido, parte-se para a filtragem anti-*aliasing*. Segundo a teoria de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser, pelo menos, o dobro da máxima frequência do sinal. Logo, existe uma preocupação de grande importância ao receber sinais digitalizados, limitando sua banda de frequência para uma dada frequência de amostragem.

Com isso em mente, pode-se fazer a amostragem dos sinais e depois passar por filtros correspondentes para a análise dos transitórios de interesse.

3.3 APLICAÇÃO DO ALGORITMO

3.3.1 Inicialização

O algoritmo se inicia com a aplicação da transformada de Clarke. Em seguida, passou-se o filtro *Differentiator-Smoother* em acordo com o que foi reportado por Lopes *et al.* (2018b). Como já explicado, este filtro tem a capacidade de pegar os *Steps* das OV's e transformá-los em ondas triangulares. Neste trabalho, as atenções se voltam majoritariamente ao método de localização avaliado, de modo que não serão abordados detalhes do processo de filtragem. Em seguida, deve-se analisar os instantes de chegada das ondas bem como suas amplitudes.

3.3.2 O Algoritmo *Single Ended Traveling Wave Fault Location*

O método SETWFL-SEL se baseia na análise da corrente elétrica para a localização da falta. A Figura 3.1 mostra o diagrama de *Bewley* que demonstra os aspectos mais importantes deste método. No circuito que representa este diagrama, para um curto circuito no nó "Falta", t_1 é o tempo da primeira OV a chegar no terminal local. Perceba que, para este diagrama apresentado, um outro circuito adjacente, definido por terminal da linha adjacente, está refletindo OV's para

o terminal local. A primeira OV que chega ao terminal é de fácil detecção, ou seja, para analisar o tempo t_1 , basta pegar a primeira onda triangular da saída do filtro DS que chegou. Porém, percebe-se que, ao se inserir um circuito adjacente, não fica tão evidente qual que é a OV refletida a partir da falta para fazer a localização correta.

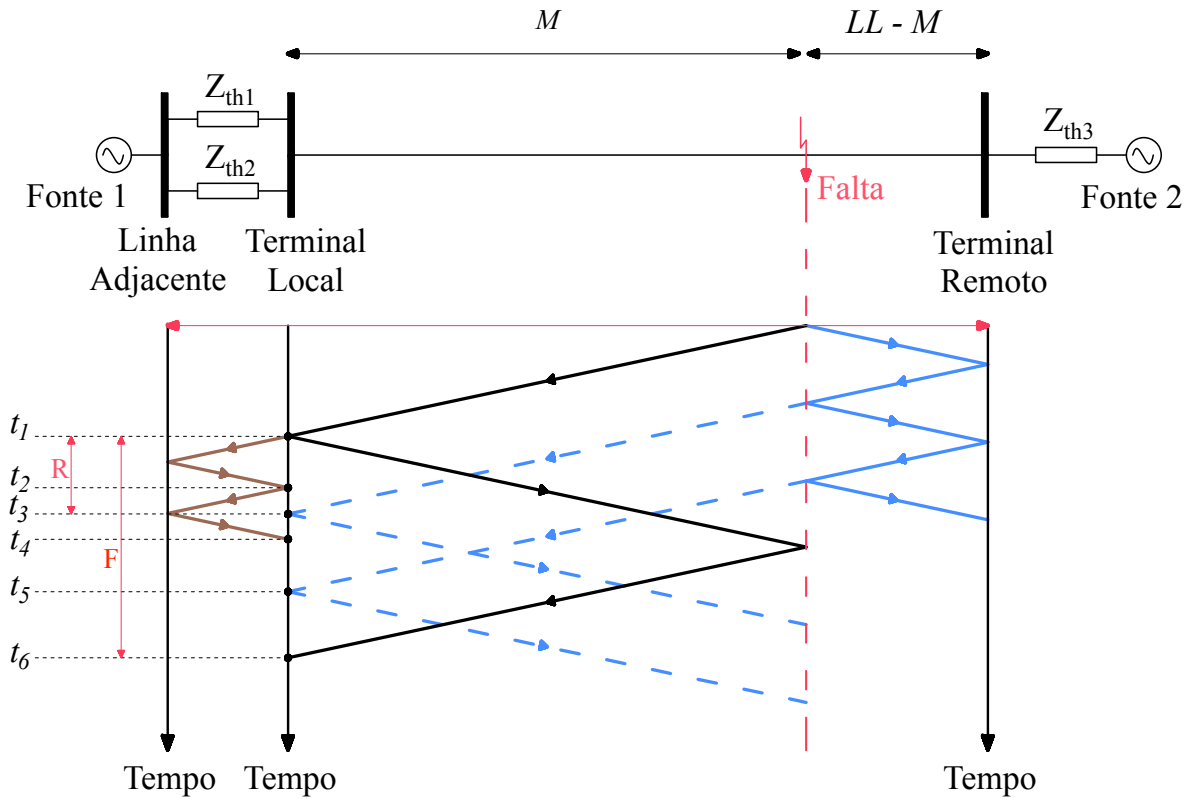


Figura 3.1. Diagrama de Bewley para SETWFL com Linha Adjacente

Ainda analisando a Figura 3.1, para que a falta seja localizada de maneira a conseguir uma exatidão satisfatória, deve-se descobrir qual é o tempo da OV t_6 . Sabendo-se este tempo, é possível usar (1.2) e achar a localização da falta a partir do terminal local. Porém, percebe-se que existem várias OVs que interceptam o TC de medição deste terminal, muito por conta do circuito adjacente presente e também pelas sucessivas reflexões. Portanto, o método aqui descrito deve descobrir, por ações de pesos ponderados, qual é, entre as hipóteses estipuladas, a correta estimativa que implica no tempo t_6 .

Este primeiro diagrama de *Bewley* apresentado demonstra que para uma distância M , em porcentagem do tamanho da linha de transmissão, com referência ao terminal local, espera-se que uma OV retorne, a partir do terminal remoto, em um tempo definido como $(2 - M) \cdot TWLPT$, em que $TWLPT$ significa o tempo de propagação da OV a partir do tempo que

ocorreu a falta. Este resultado é correspondente à distância em que a OV irá sair da falta, ir para o terminal remoto, voltar para a falta e ir para o terminal local. Isto é demonstrado no tempo t_3 definido como "onda companheira". Este fator é imprescindível para que a localização da falta dê certo. O tempo t_1 representa uma distância percorrida pela OV de $M \cdot TWLPT$, que representa a distância em porcentagem da do tamanho da LT. A diferença de tempo entre t_1 e t_3 é dada pela expressão $R = 2 \cdot (1 - M) \cdot TWLPT$. Já a diferença de tempo entre t_1 e t_6 é definida como sendo $F = 2 \cdot M \cdot TWLPT$. Importante ressaltar que a polaridade da onda em t_6 e em t_3 devem ser as mesmas ou então esta não será a correta localização da falta. Quando não se sabe onde a falta ocorreu, devem-se criar hipóteses aqui denominadas *hip*. Logo, outros valores de F e R serão calculados a depender do número de hipóteses. O algoritmo aqui analisado conta até 15 hipóteses distintas entre os picos que estão dentro de uma janela de observação definida que será melhor discutida mais a frente (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Perceba na figura que o tempo $t_6 - t_1$ pode possuir suscetivas repetições com reflexões da onda batendo na falta e voltando para o terminal local. Ou seja, a distância temporal entre t_1 e t_6 ($F = 2 \cdot M \cdot TWLPT$) vai se repetindo para tempos futuros não mostrados na figura. Estas repetições também influenciam nos pesos contados para definir qual é a hipótese correta.

Para cada hipótese, dentre as 15 possíveis, o algoritmo monta uma diagrama de *Bewley*. Portanto, para cada hipótese tem-se uma localização de curto circuito que é dada por (1.2). A partir deste diagrama montado, faz-se a análise de qual hipótese tem a maior probabilidade de ser o resultado correto levando-se em conta os valores de $F(hip)$ e de $R(hip)$, ou seja, o valor de F e de R para cada hipótese (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Para fazer a localização de falta, o algoritmo SETWFL-SEL utiliza as amplitudes das OVs, aqui denominadas VPKs, e os tempos em que estas OVs chegaram ao terminal, definidas como TPKs. Para escolher quantos picos de ondas triangulares vão ser analisados no algoritmo, foi proposto analisar uma primeira janela de observação (*Observation Window*) 1 que seja maior do que duas vezes o $TWLPT$, em que $TWLPT$ significa o tempo de propagação da OV na linha monitorada. Para os circuitos analisados neste trabalho, seguiu-se a referência Guzmán *et al.* (2017) que utilizou o valor de $Obs_{window1} = 2,4 \cdot TWLPT$. Logo, apenas os picos até $2,4 \cdot TWLPT$ após a primeira OV serão analisados. Este valor de 2,4 tem relação com os picos que vão ser analisadas dentro de determinados padrões que serão melhor explicados mais

adiante.

A ideia desta parte é comparar todas as OV's analisadas com a primeira que chegou no terminal vendo suas polaridades. Além da janela de observação descrita, criou-se uma segunda janela de observação ($Obs_{window2}$) para caracterizar as possíveis hipóteses dentro da $Obs_{window1}$. Dentre os picos analisados da $Obs_{window1}$, alguns deles podem ser hipóteses para a função SETWFL-SEL. Então, dentro de $Obs_{window1}$, criou-se o $Obs_{window2}$, que é o limite temporal para coletar estas hipóteses. O significado de ser uma hipótese implica que aquela onda pode ser uma possível reflexão da OV que saiu da falta, incidiu no terminal local, refletiu para a falta e refletiu novamente para o terminal local (No diagrama de *Bewley* da Figura 1.3 seria o tempo t_6). Esta nova janela de observação compreende o tamanho de $Obs_{window2} = 2 \cdot TWLPT + 10\mu s$. Logo, se a polaridade da onda analisada for igual a da primeira OV que chegou no local, e se esta onda estiver dentro da segunda janela de observação, então ela é caracterizada como uma hipótese para o algoritmo. O valor da $Obs_{window2}$ de pelo menos 2 vezes o $TWLPT$ faz sentido uma vez que seria o tempo necessário para a OV se propagar na ida e na volta da linha de transmissão - supondo uma falta bem perto do terminal remoto, por exemplo. Porém, por uma questão de conter erros por conta da janela de dados do filtro DS aplicada ao relé usual da *Schweitzer*, uma margem de $10 \mu s$ foi escolhida, sendo:

$$ObsWindow_1 = 2,4 \cdot TWLPT \quad (3.1)$$

$$ObsWindow_2 = 2 \cdot TWLPT + 10\mu s \quad (3.2)$$

Antes de detalhar sobre como os pesos são distribuídos para cada hipótese até que o algoritmo estime a localização da falta, deve-se entender que o algoritmo SETWFL-SEL trabalha em conjunto com outros métodos de localização. Ou seja, caso o relé microprocessado possua outra função acoplada a ele, seu resultado dará informações iniciais para o SETWFL-SEL de tal forma que o resultado poderá ser ainda melhor. A ordem para a escolha correta dos resultados de outros métodos, segundo Guzmán *et al.* (2017) é:

- Resposta do DETWFL *Double Ended TW Fault Location*; ou
- Resposta do DEZFL *Double Ended Impedance Fault Location*; ou
- Resposta do SEZFL *Single Ended Impedance Fault Location* e não ser uma falta Fase-Terra (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Perceba que resultados anteriores podem ser utilizados de forma a obter um resultado ainda melhor. Caso todos os métodos sejam analisados dentro do relé e, além disso, dois ou três deles apresentem resultados muito próximos, o algoritmo SETWFL-SEL seta uma *flag* TWFLCL para 1. Esta *flag* implica uma confiança no resultado anterior, o que ajuda na análise de qual OV (pico na saída do filtro DS) deve ser a hipótese correta. Para os resultados alcançados neste trabalho, partiu-se do princípio de que não havia resultados anteriores de outros métodos. Quando isto ocorre, utilizam-se os métodos RTT (*Repeating Travel Time*) e ETW (*Expected Traveling Wave*) para chegar ao resultado final. Caso se tenha resultados anteriores, basta aplicar o método RTT (GUZMÁN *et al.*, 2017).

3.3.2.1 O Método RTT (*Repeating Travel Time*)

O método RTT utiliza a diferença de tempo entre o tempo do pico analisado e o da primeira OV incidente no terminal local - em que o da primeira OV (primeiro pico) foi setado em zero. Esta diferença já foi definida e denominada de F na Figura 3.1. Lembre-se de que vão ser analisadas algumas hipóteses. Então, será comum analisar o valor de F para cada hipótese, i.e., $F(hip)$. Logo, para a análise da primeira e segunda hipótese, $F(1)$ e $F(2)$ seriam contemplados e assim suscetivamente. Também é explorado aqui o valor de R para cada hipótese. Este valor foi definido como $R = 2 \cdot (1 - M) \cdot TWLPT$ que também é descrito de maneira mais simplista por $R(hip) = 2 \cdot TWLPT - F(hip)$. Examinando-se a Figura 1.3, percebe-se que o valor de R nada mais é do que o tempo da OV sair da falta, incidir no terminal remoto, refratar na falta e incidir no terminal local. Esta é a onda denominada companheira, isso porque ela normalmente, a depender da resistência de falta e do tipo de curto circuito, é visível. Logo, se for constatado esta OV companheira, o peso para a hipótese analisada tenderá a ser maior.

O método RTT simplesmente cria um vetor definido como DT que é contemplado com os valores de diferença de todos os picos analisados. Ou seja, supondo de uma maneira simples uma análise de OVs com uma $ObsWindow_1$ que contempla apenas 4 picos, t_1 , t_2 , t_3 , e t_4 , o vetor DT seria:

$$DT = sort[(t_4 - t_1), (t_4 - t_2), (t_4 - t_3), (t_3 - t_1), (t_3 - t_2), (t_2 - t_1)], \quad (3.3)$$

em que *sort* é uma função que deixa o vetor com seus valores organizados de forma crescente.

Lembre-se que para cada hipótese, o algoritmo calcula um F e um R . Definem-se agora dois contadores denominados $NM(hip)$ e $N1_M(hip)$. Estes contadores foram definidos por Guzmán *et al.* (2017) de forma que eles começam zerados para todas as hipóteses. Analisando-se a hipótese 1, tem-se que fazer uma análise com os valores do vetor DT e com $F(1)$. Se $F(1)$ coincidir com o vetor DT , por exemplo, 5 vezes, então $NM(1) = 5$. É importante salientar que esta igualdade possui uma tolerância definida como $TWTOL1$. O mesmo se faz para o $NM_1(1)$, porém, analisando-se o $R(1)$. Se, por exemplo, $R(1)$ coincidir com o vetor DT 2 vezes, então $NM_1(1) = 2$. Isso se repete para todas as hipóteses até que todas sejam analisadas. O valor de $TWTOL1$, em geral, vale $10\mu s$ segundo Guzmán *et al.* (2017). Quando se simulou um circuito com linha adjacente ou sem linha adjacente, este valor de $10\mu s$ obteve resultados satisfatórios.

Diante do exposto, conclui-se que o método RTT apenas quantifica quantas vezes os valores de F e R de cada hipótese coincidem com os valores de DT . As distâncias temporais de F e de R podem ser visualizadas na Figura 3.2. Logo, analisando-se o vetor DT , tem-se a distância temporal entre todos os picos das OV's filtradas. Perceba que as OV's tendem a ficar refletindo indefinidamente até que sua atenuação seja grande o suficiente para que não se possa mais observá-la. Portanto, dentro da janela de observação dos picos analisados, $ObsWindow_1$, estes tempos podem se repetir. Uma vez que sua hipótese é a correta, o valor de NM e $N1_M$ tendem a ficar maiores. Logo, estes são os pesos desta primeira parte para identificar qual hipótese é a mais indicada para se calcular a localização da falta.

O RTT possui uma grande vantagem que é a de obter informações sobre os tempos dos picos dos sinais filtrados. Por exemplo, caso um circuito submetido a uma falta possua um circuito adjacente, este também receberá OV's e irá refleti-las. Isso é observado na Figura 3.2. Em azul tem-se as ondas que advêm de um circuito adjacente para uma falta na linha de transmissão analisada. Portanto, ao fazer a análise de NM e $N1_M$, ou seja, de quantas vezes os valores de $F(hip)$ e $R(hip)$ foram iguais aos de DT , para cada hipótese e com a $TWTOL1$, estas OV's referentes ao circuito externo são analisada. Conseqüentemente, na hipótese correta, estes tempos de picos advindos dos circuitos externos ao curto não estarão coerentes (GUZMÁN *et al.*, 2017).

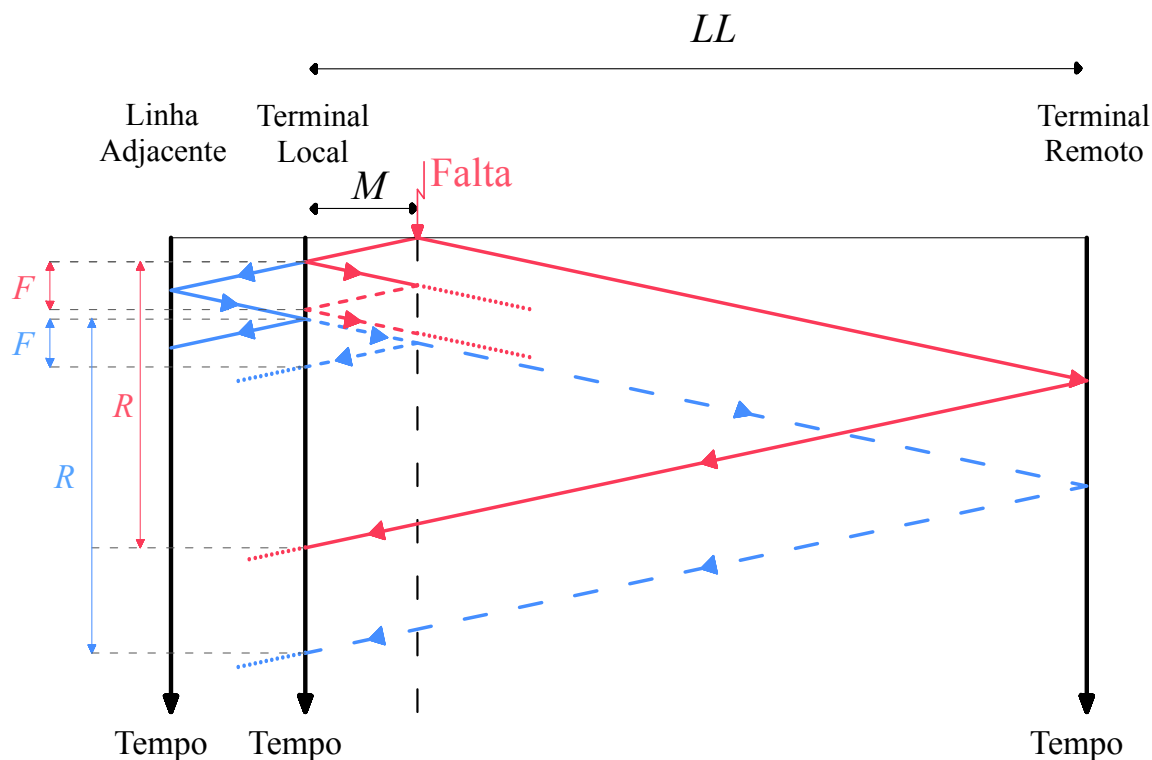


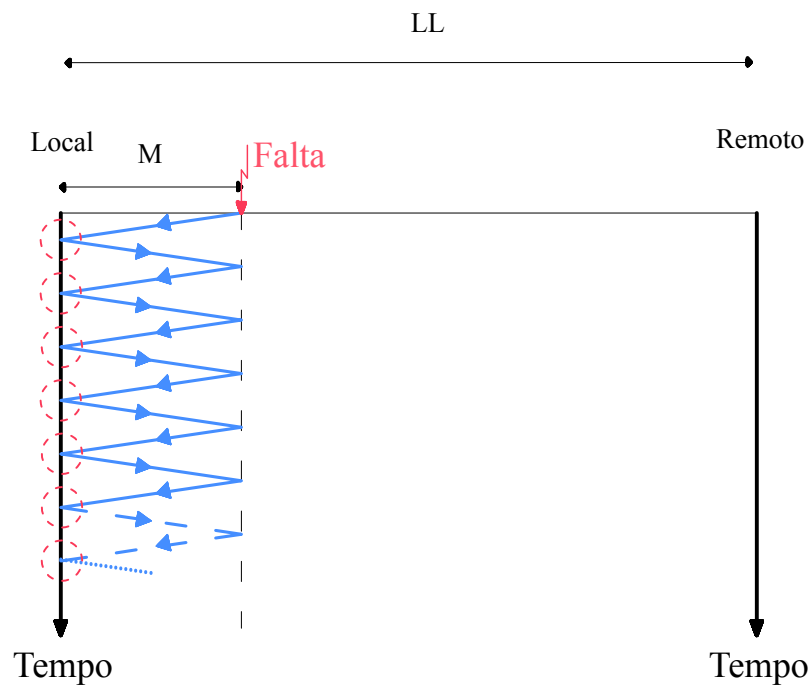
Figura 3.2. Diagrama de *Bewley* para entendimento do SETWFL com circuito adjacente

3.3.2.2 O Método ETW - (*Expected Traveling Wave*)

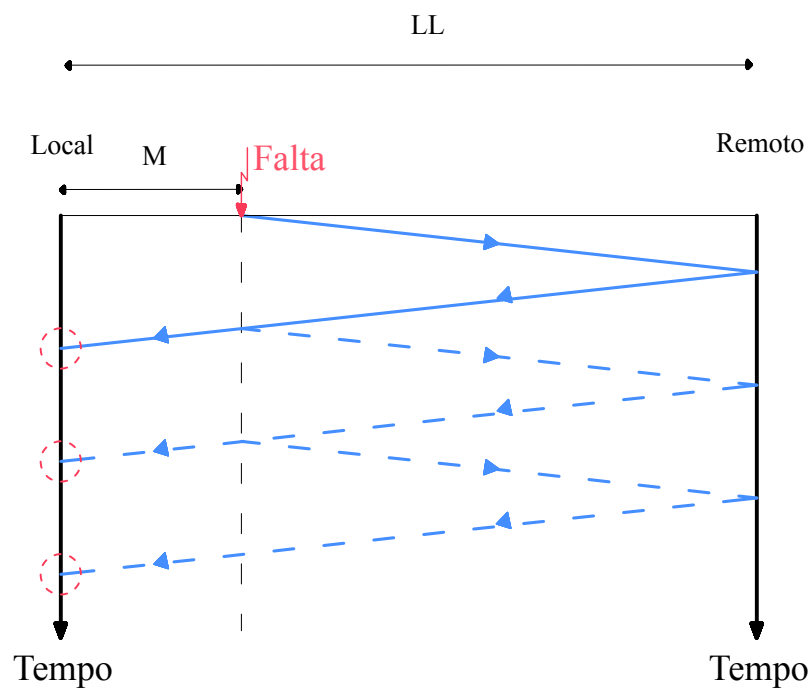
Como o próprio nome diz, para cada hipótese, estimam-se os tempos em que deveriam ser esperadas OV's no terminal local. Ou seja, para cada hipótese, monta-se um diagrama de *Bewley* que define em qual tempo que cada OV deveria ser medida pelo TC. Além disso, nesta parte do algoritmo, analisa-se o que é chamado de *Weighting Factor* que é aqui representado por $WGHT(hip)$. O $WGHT(hip)$ é uma *flag* que começa em zero e vai para 1 se e somente se a OV proveniente do terminal remoto for constatada. Ou seja, a OV que saiu da falta, incidiu no terminal remoto, passou pela falta e chegou ao terminal local. Se esta OV for detectada, ou seja, se o valor de $R(hip)$ for obtido - $WGHT$ vai para 1. Caso contrário, permanece zerado. Este valor é de suma importância para este método, isso porque, caso $WGHT(hip)$ seja zero, o peso referente a esta hipótese dependerá apenas de NM e $N1_M$, caso contrário, outro peso será inserido na formulação final para identificação da hipótese correta. Nesse contexto, deve-se saber que cada hipótese terá o seu próprio $WGHT$.

O outro peso associado às hipóteses é referente aos diagramas de *Bewley* que são montados. Para a maior compreensão do que ocorre, dividiu-se os diagramas em padrões de fácil entendimento, os chamados *patterns*. Estes *patterns* são apenas os diagramas de *Bewley* a serem seguidos para cada hipótese. Desta maneira, consegue-se montar um outro vetor com os tempos de detecção que cada OV deveria resultar, que é denominado *ET*. Para cada hipótese, o algoritmo monta um vetor $ET(hip)$ distinto. Este $ET(hip)$ possui valores calculados de cada pico das OVs para todos os *patterns* mostrados nas Figuras 3.3.2.2 e 3.4. Logo, o vetor *ET* terá todos os valores marcados tracejados vermelhos. Vale a pena enfatizar que estes valores são os calculados para cada hipótese e não os medidos. Ou seja, uma vez consideradas as hipóteses, o algoritmo calcula estes valores dos *patterns* e monta o vetor *ET* para cada hipótese. O próximo passo será analisar os TPKs (medidos) com os valores calculados de $ET(hip)$. Por fim, o código conta quantas vezes os valores de TPK (valores medidos) coincidem com os valores de *ET* que se foi calculado para cada hipótese. Aqui, usa-se uma nova tolerância denominada *TWTOL2*, que em geral vale $5\mu s$. Para fazer estas contagens, utiliza-se o contador $NS(hip)$, que é o último peso e inicialmente é nulo para todas as hipóteses. A medida em que os valores de TPK vão coincidindo com os valores de *ET*, levando-se em conta *TWTOL2*, o valor de $NS(hip)$ vai aumentando um a um (GUZMÁN *et al.*, 2017).

Cada *pattern* representa uma situação distinta. O primeiro mostrado, representado pela Figura 3.3.2.2 a, mostra a sucessão de reflexões provenientes a partir do terminal local e da falta. Se estas repetições estiverem dentro da primeira janela de observação, ela serão contabilizadas para o peso final da hipótese analisada. Já o segundo diagrama de *Bewley* dentro desta figura mostra os tempos de chegada das OVs que incidiram o terminal remoto, parte refratou e incidiu o local. A outra parte refletiu, incidiu o remoto novamente, refrata na falta e incide no local. Estes tempos são contabilizados. Agora analisando a Figura 3.4, o primeiro *pattern* é referente aos tempos de chegada das OVs que incidem no terminal local, refletem para a falta, refratam para o remoto, refletem para a falta e refratam para o local enquanto que o último *pattern* tem o mesmo procedimento até chegar na falta. Quando incide na falta, reflete novamente para o terminal remoto, reflete para a falta e assim refrata incidindo o local. Com estes padrões, o artigo publicado pela Guzmán *et al.* (2017) contabiliza pesos para das hipóteses.

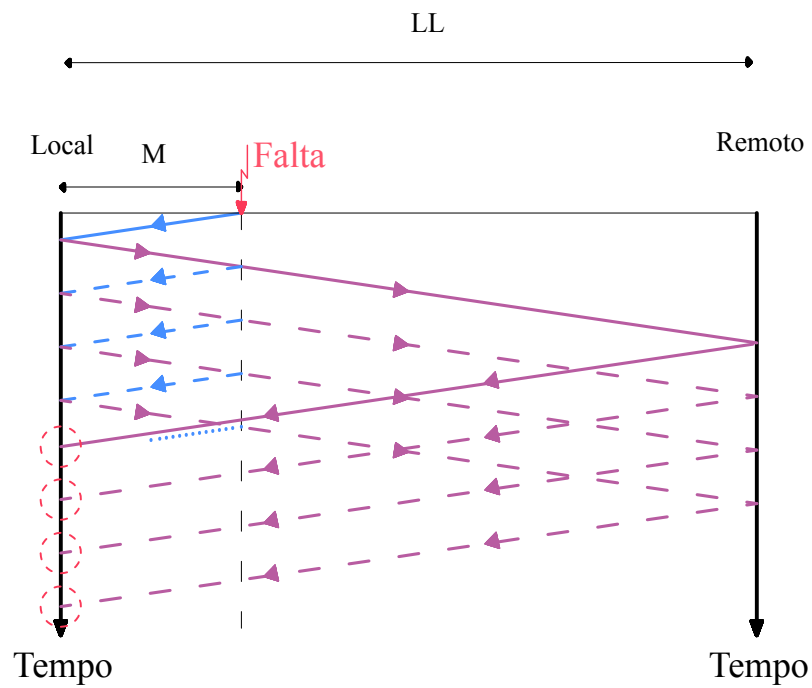


(a)

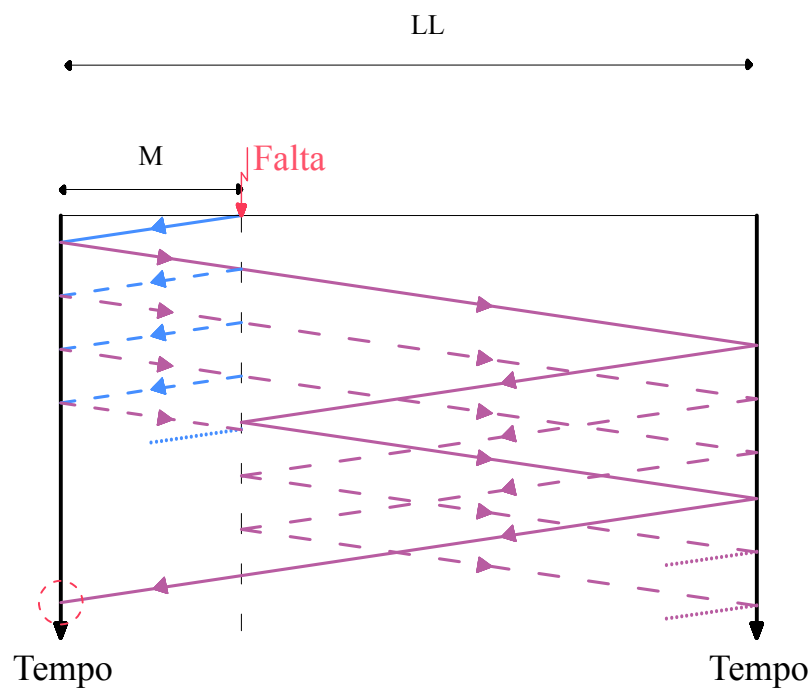


(b)

Figura 3.3. *Pattern* Considerados: a) Pattern 1 b) Pattern 2



(a)



(b)

Figura 3.4. *Pattern* Considerados: a) Pattern 3 b) Pattern 4

3.3.2.3 Determinando a Localização de Falta pelo SETWFL-SEL

Finalmente, após calcular todos os pesos associados ($NM(hip)$, $N1_M(hip)$, $NS(hip)$ e também $WGHT(hip)$), é necessário realizar uma formulação para obter o resultado final. O que foi proposto por Guzmán *et al.* (2017) foi dividir a linha em três seções diferentes e fazer uma análise de acordo com o trecho em que a falta provavelmente ocorreu. Isso é possível se resultados de outros métodos estiverem disponíveis. Consideram-se os seguintes cenários:

- De 0 à valores menores que 0.3 pu, a falta está presente na seção 1;
- De 0.3 à 0.7 pu, a falta está presente na seção 2; ou
- Entre 0.7 e 1 pu, a falta está presente na seção 3.

Perceba que esta divisão é importante para definir a formulação que será utilizada. Se a falta ocorrer na seção 1, implica que deve-se levar em conta apenas os pesos $NM(hip)$, Isso porque já se sabe que os valores de $R(hip)$ estão associados ao terminal remoto, fazendo com que seu peso seja associado para quando a falta for mais perto deste terminal. A hipótese que possui o maior valor de NM será a que o algoritmo assumirá como correta. Se a falta ocorrer na seção 3, implica que deve-se utilizar apenas valores de $N1_M(hip)$ pelo mesmo motivo. Logo, a hipótese que tiver o maior valor de $N1_M$ será a que o algoritmo assumirá como correta (GUZMÁN *et al.*, 2017).

A implementação aqui trabalhada foi feita supondo não haver resultados anteriores. Logo, assume-se que o ponto inicial da falta foi exatamente no meio da linha (0.5 pu). Quando isso ocorre, implica que a falta está na seção 2. Logo, deve-se utilizar tanto $NM(hip)$ quanto $N1_M(hip)$ na formulação para descobrir qual é a hipótese correta. A formulação do peso final, caso estejamos na seção 2, é dada por

$$N(hip) = NM(hip) + N1_M(hip) + WGHT(hip) \cdot NS(hip) \quad (3.4)$$

Conclui-se que a hipótese que tiver o maior valor N , será a hipótese escolhida pelo algoritmo como sendo a correta (GUZMÁN *et al.*, 2017).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante este trabalho, diversos testes foram realizados sendo três escolhidos para ilustrar a aplicação do método estudado. Um deles referente a uma linha de transmissão sem circuito adjacente e dois referentes a uma linha de transmissão com circuito adjacente. Será apresentado o passo a passo de todas as três simulações, caracterizando todos os pesos para futura comparação de resultados. Ademais, será descrita toda a implementação realizada, assim como as sugestões de implementações para resolver os problemas verificados.

O fluxo que se deve seguir para o entendimento do estudo é o mostrado a seguir:

1. Definir a primeira janela de observação $Obs_{window1}$ para saber até qual pico da saída do filtro DS será analisado;
2. Entre estes picos da primeira janela de observação, definir a segunda janela $Obs_{window2}$ para saber até qual tempo podem haver hipóteses;
3. Encontrar as hipóteses correspondentes de acordo com a polaridade da primeira OV que incidiu;
4. Início do RTT - Calcular os valores de $R(hip)$ e $F(hip)$;
5. Montar o vetor DT pela subtração pico a pico dos valores da saída do filtro DS;
6. Com um tolerância TWTOL1 (e.g. $10 \mu s$), calcular $NM(hip)$ e $N1_M(hip)$;
7. Início do ETW - Montar o vetor $ET(hip)$;
8. Com a tolerância TWTOL2 (e.g. $5 \mu s$), calcular $NS(hip)$;
9. Calcular $WGHT(hip)$ analisando se existe a onda companheira;
10. Calcular peso final de cada hipótese por (3.4) e achar a resposta da função SETWFL-SEL.

4.1 SISTEMA ANALISADO 1

O primeiro sistema que foi analisado possui uma linha de transmissão com circuito adjacente. Ele é composto de uma linha de 230 kV/60 Hz com 200 km de extensão e linhas adjacentes de 50 km. As fontes laterais são os Equivalentes Thévenin dos circuitos externos que representam sistemas circunvizinhos. A Figura 4.1 ilustra o referido circuito, enquanto que a Tabela 4.1 mostra os valores dos parâmetros. Uma vez que o processo de localização não é iniciado para faltas externas, não foram simuladas faltas nas linhas adjacentes. Os parâmetros das LT foram modelados de forma a permanecerem constantes com a variação da frequência.

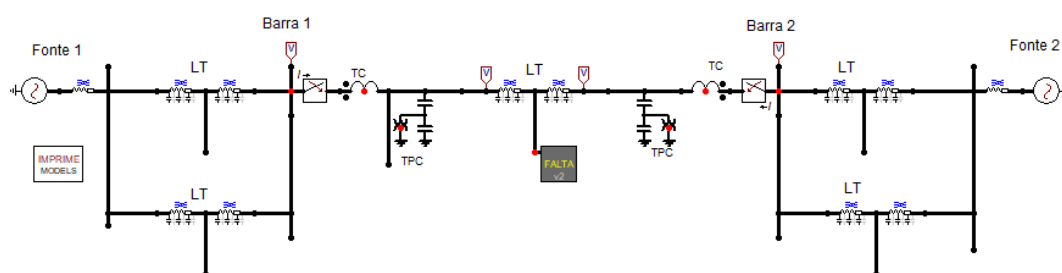


Figura 4.1. Implementação do sistema 1 no ATPDraw

Tabela 4.1. Dados da LT de 230 kV modelada no ATP

| Tensão nominal: 230 kV | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
| Comprimento da LT Principal: 200 km | | | | | | |
| Comprimento da LT Adjacentes: 50 km | | | | | | |
| Frequência nominal: 60 Hz | | | | | | |
| Barra | $R_0(\Omega/km)$ | $X_0(\Omega/km)$ | $Y_0(\mu S/km)$ | $R_1(\Omega/km)$ | $X_1(\Omega/km)$ | $Y_1(\mu S/km)$ |
| 1 | 0,5220 | 1,4320 | 2,2930 | 0,0980 | 0,5300 | 3,2520 |
| 2 | 0,5220 | 1,4320 | 2,2930 | 0,0980 | 0,5300 | 3,2520 |
| Linhas Adj | 0,5220 | 1,4320 | 2,2930 | 0,0980 | 0,5300 | 3,2520 |

Além destes valores, é importante ter as informações dos aspectos das terminações da linha monitorada. Também serão necessários os valores das fontes, juntamente das impedâncias referentes aos equivalentes Thévenin para modelagem do sistema. Os disjuntores estão presentes, mas não foram utilizados nesta simulação pois possuem como propósito o seccionamento do circuito quando da atuação da proteção. A Tabela 4.2 a seguir mostra a relação das fontes.

Tabela 4.2. Dados dos equivalentes de Thévenin do SEE de 230 kV - 60Hz

| Fonte | Tensão (V_{rmsL-L} em kV) | Fase ($^{\circ}$) | SIR |
|---------|------------------------------|---------------------|-----|
| Fonte 1 | 230 | 0 | 1,0 |
| Fonte 2 | 225,4 | -15 | 1,0 |

O componente analisado na Figura 4.1 denominado como FALTA é capaz de simular vários tipos de faltas, sendo o local em que a falta foi aplicada alterada diretamente no ATP.

Sendo a definição do SIR como mostrado em 4.1

$$SIR = \frac{Z_{Eq_fonte}}{Z_{total_da_LT}} \quad (4.1)$$

Importante ressaltar de qual forma foram modelados os TCs para que se consiga uma reprodução mais confiável para a comparação dos métodos. O modelo de todos os TCs utilizados foram modelados conforme foi reportado em Lopes *et al.* (2018a) da classe C800 com uma relação de transformação de 2000 – 5A.

4.2 SIMULAÇÃO DE UM CURTO CIRCUITO MONOFÁSICO, NA FASE A, EM 30% DA LINHA DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ANALISADO 1

4.2.1 Amplitudes e Tempos dos Picos das OVs Dentro da Janela de Observação

A Tabela 4.3 demonstra a quantidade de picos analisados, os valores da amplitude destes picos e os tempos em que chegaram no terminal local. Além disso, mostra-se na Figura 4.2 como ficam as ondas adquiridas pelo terminal local de acordo com a análise no secundário do TC. A implementação do algoritmo requer a detecção dos picos da saída do filtro DS. Para isso, estipulou-se um limiar do tamanho mínimo a ser percebido pela função aqui implementada. A depender deste valor mínimo, a quantidade de picos analisados é diferente, podendo gerar resultados distintos que dependem do limiar escolhido. Perceba, na Figura 4.2, que nem todos os picos com amplitudes perceptíveis foram analisados já que não possuem a marcação azul no valor do pico, isso em decorrência do limiar empregado que foi de 0,065 A. Este limiar foi escolhido de forma a garantir a maior quantidade de resultados dentro do esperado para a

aplicação da função e localização de falta.

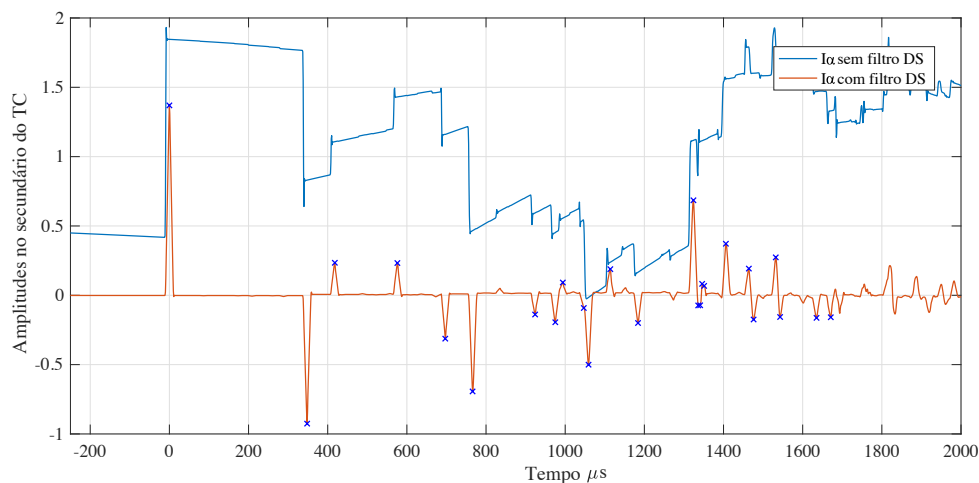


Figura 4.2. Resultado das OV's em um curto circuito em 30% do sistema analisado

Tabela 4.3. VPKs, TPKs e amostras do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado

| Amostra | VPK | TPK (μs) | - Amostra | VPK | TPK (μs) |
|---------|---------|-----------------|-----------|---------|-----------------|
| 0 | 1,3696 | 0 | 13 | 0,6852 | 1324 |
| 1 | -0,9257 | 348 | 14 | -0,0732 | 1336 |
| 2 | 0,2345 | 418 | 15 | -0,0721 | 1341 |
| 3 | 0,2326 | 576 | 16 | 0,0824 | 1346 |
| 4 | -0,3128 | 697 | 17 | 0,0677 | 1351 |
| 5 | -0,6934 | 766 | 18 | 0,3717 | 1406 |
| 6 | -0,1385 | 924 | 19 | 0,1926 | 1464 |
| 7 | -0,1943 | 975 | 20 | -0,1746 | 1476 |
| 8 | 0,0922 | 994 | 21 | 0,2735 | 1532 |
| 9 | -0,0916 | 1047 | 22 | -0,1565 | 1543 |
| 10 | -0,5006 | 1059 | 23 | -0,1627 | 1635 |
| 11 | 0,1884 | 1114 | 24 | -0,1584 | 1671 |
| 12 | -0,1998 | 1184 | | | |

Para este circuito, o valor de $TWLPT$ vale $6,9649 \cdot 10^{-4}$. Para se alcançar este resultado, considerou-se o seguinte cálculo:

$$TWLPT = \frac{L}{V_1} = 6,9649 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (4.2)$$

Em que V_1 é a velocidade de propagação das OV's de modo aéreo sendo calculado por:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (4.3)$$

onde L_1 e C_1 são a indutância e a capacitância de sequência positiva por unidade de comprimento, respectivamente.

Importante ressaltar que está se levando em consideração apenas os valores da sequência positiva, ou seja, ondas modais aéreas. Com este valor de $TWLPT$, consegue-se montar a primeira janela de observação.

$$ObsWindow_1 = 2,4 \cdot TWLPT = 2,4 \cdot 6,9649 \cdot 10^{-4} = 1671,5652 \mu s \quad (4.4)$$

Por este motivo, como $ObsWindow_1 = 1671,5652 \mu s$, apenas os picos até referido o tempo desta janela de observação foram avaliados. Desta maneira, 25 picos foram analisados com índices de 0 até 24. Para escolher as hipóteses, o algoritmo usa o sinal da amplitude da primeira OV que chegou ao TC. No caso em questão, o sinal é positivo e vale +1,3696. Além disso, a hipótese tem que estar dentro da segunda janela de observação dada neste cálculo por:

$$ObsWindow_2 = 2 \cdot TWLPT + 10 \mu s = 2 \cdot 6,9649 \cdot 10^{-4} + 10 \mu s = 1402,9710 \mu s \quad (4.5)$$

Foram destacadas, na Tabela 4.3, em negrito, as hipóteses que entram para o algoritmo as quais estão dentro da janela de observação 2 e possuem a mesma polaridade da primeira onda incidente medida.

4.2.2 RTT para um Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1

Os valores de F de cada hipótese são os valores dos TPKs das hipóteses uma vez que o primeiro pico da saída do filtro DS foi forçado a ficar no tempo *zero*. Os valores de R são calculados por:

$$R = 2 \cdot (1 - M) \cdot TWLPT \quad (4.6)$$

O vetor DT, que é definido como a subtração de todos os TPKs possíveis teve os seguintes valores, que são mostrados em (4.7). Perceba que alguns dados estão coloridos pois, com o valor de $TWTOL1 = 10 \mu s$ em torno dos valores de DT, analisou-se quantas vezes, para cada

hipótese, os valores de DT foram equivalentes aos de F e R das hipóteses. No vetor DT estão em vermelho os valores F e em azul os de R apenas da primeira hipótese. Os valores das demais hipóteses não foram destacados apenas para ilustrar de forma mais simples.

DT = [5, 5, 5, 10, 10, 11, 12, 12, 12, 15, 17, 19, 22, 27, 36, 51, 53, 55, 55, 56, 58, 60, 65, 65, 67, 67, 68, 69, 70, 70, 70, 70, 70, 72, 79, 82, 84, 92, 103, 113, 118, 120, 121, 123, 123, 125, 125, 126, 128, 128, 130, 135, 135, 137, 137, 139, 139, 140, 140, 140, 152, 152, 157, 158, 158, 159, 162, 167, 171, 181, 186, 190, 190, 190, 191, 192, 195, 196, 197, 202, 207, 207, 208, 209, 209, 210, 219, 222, 222, 227, 227, 228, 228, 229, 232, 237, 260, 265, 265, 277, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 284, 287, 289, 289, 292, 292, 292, 293, 294, 294, 297, 299, 299, 304, 311, 320, 325, 330, 330, 335, 342, 347, 347, 347, 348, 348, 348, 348, 348, 349, 349, 350, 350, 352, 357, 359, 359, 361, 362, 362, 366, 371, 376, 399, 400, 405, 412, 412, 417, 417, 417, 417, 418, 418, 418, 418, 418, 422, 427, 429, 429, 431, 451, 470, 471, 473, 482, 482, 483, 484, 485, 487, 487, 489, 496, 501, 506, 521, 538, 538, 540, 549, 552, 557, 557, 557, 558, 568, 570, 575, 576, 576, 576, 576, 580, 585, 588, 608, 608, 612, 619, 624, 627, 627, 629, 639, 640, 641, 641, 644, 646, 649, 654, 660, 677, 696, 696, 697, 698, 699, 709, 710, 711, 711, 747, 748, 760, 765, 766, 766, 766, 766, 767, 770, 775, 777, 779, 830, 835, 836, 846, 869, 888, 900, 905, 906, 918, 923, 924, 928, 933, 938, 956, 967, 974, 975, 976, 988, 988, 993, 994, 998, 1003, 1046, 1047, 1058, 1058, 1059, 1059, 1095, 1114, 1114, 1116, 1125, 1128, 1184, 1184, 1195, 1217, 1253, 1287, 1323, 1324, 1336, 1341, 1346, 1351, 1406, 1464, 1476, 1532, 1543, 1635].

(4.7)

É importante ressaltar que os valores ficaram inteiros porque o passo que foi utilizado no programa ATP foi de $1 \mu s$, o qual também foi utilizado na implementação do método. Como a ordem de grandeza das OV's está relacionada também ao tempo em μs , percebe-se o motivo de os valores terem ficado inteiros. Os valores de F são os tempos de chegada de cada hipótese uma vez que a primeira OV foi centrada no instante $0 \mu s$ como mostrado na Figura 4.2.

Para a primeira hipótese, $F(1)$, com a tolerância $TWTOL1 = 10 \mu s$, foi equivalente a 13 valores do vetor DT. Por este motivo, $NM(1) = 13$, que foi mostrado em vermelho. O mesmo

é analisado para o valor de R da primeira hipótese, sendo $R(1) = 974,9710$ equivalente a 4 valores do vetor DT com a mesma tolerância implementada de $10 \mu s$. Estes foram mostrados em azul.

Repetiu-se o mesmo procedimento para todas as 7 hipóteses e chegou-se ao resultado mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Valores de R e de F com seus Respectivos Pesos NM e $N1_M$

| Hipótese | $F(hip)\mu s$ | $R(hip)\mu s$ | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ |
|----------|---------------|---------------|-----------|--------------|
| 1 | 418 | 974,9710 | 13 | 4 |
| 2 | 576 | 816,9710 | 9 | 0 |
| 3 | 994 | 398,9710 | 6 | 3 |
| 4 | 1114 | 278,9710 | 3 | 9 |
| 5 | 1324 | 68,9710 | 2 | 13 |
| 6 | 1346 | 46,9710 | 4 | 5 |
| 7 | 1351 | 41,9710 | 2 | 2 |

4.2.3 ETW para um Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1

Nesta parte da implementação, foi necessário montar os diagramas de *Bewley* para a análise das hipóteses. Para isso, utilizaram-se dos padrões estipulados nas Figuras 3.3.2.2 e 3.4. Montou-se, para cada hipótese, seus quatro padrões aqui denominados de *pattern 1* até *pattern 4*. Fazendo-se esta análise para as sete hipóteses, tem-se o resultado mostrado na tabelas de 4.5 até 4.11.

Aqui foram mostrados todos os resultados para cada *pattern* a fim de comparação. Nas simulações que serão mostradas a seguir, serão omitidos os valores de cada *pattern* e serão analisados apenas os valores dos vetores ET resultantes.

Agora, utilizando o valor de $TWTOL2 = 5 \mu s$ analisa-se, para cada hipótese, quantas vezes os valores de TPKs coincidem com os valores de $ET(hip)$. Ou seja, nesta parte se está comparando os valores dos tempos dos picos das OV's com os valores que cada hipótese gerou. Esta parte é para analisar qual destas hipóteses teria a maior probabilidade de ser a resposta correta para a reflexão da onda incidente até o terminal local novamente. Para isso, analisam-se as figuras em barras mostradas na Figura 4.3. Perceba que nela estão sendo mostradas todas as hipóteses no eixo Y. Os pontos vermelhos são os valores dos TPKs, que são os mesmos em

todas as hipóteses, pois isto depende apenas do sinal de entrada.

Tabela 4.5. Valores dos *patterns* da hipótese 1 e do vetor ET(1)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(1) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 418 | 974,9710 | 1392,9701 | - | 418 |
| | 836 | - | - | - | 836 |
| | 1254 | - | - | - | 974,9710 |
| | - | - | - | - | 1254 |
| | - | - | - | - | 1392,9701 |

Tabela 4.6. Valores dos *patterns* da hipótese 2 e do vetor ET(2)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(2) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2 | 576 | 816,9710 | 1392,9701 | - | 576 |
| | 1152 | 1633,9420 | - | - | 816,9710 |
| | - | - | - | - | 1152 |
| | - | - | - | - | 1392,9701 |
| | - | - | - | - | 1633,9420 |

Tabela 4.7. Valores dos *patterns* da hipótese 3 e do vetor ET(3)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(3) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3 | 994 | 398,9710 | 1392,9701 | - | 398,9710 |
| | - | 797,9420 | - | - | 797,9420 |
| | - | 1196,9130 | - | - | 994 |
| | - | 1595,8840 | - | - | 1196,9130 |
| | - | - | - | - | 1392,9701 |
| | - | - | - | - | 1595,8840 |

Tabela 4.8. Valores dos *patterns* da hipótese 4 e do vetor ET(4)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(4) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 4 | 1114 | 278,9710 | 1392,9701 | - | 278,9710 |
| | - | 557,9420 | - | - | 557,9420 |
| | - | 836,9130 | - | - | 836,9130 |
| | - | 1115,884 | - | - | 1114 |
| | - | 1394,8550 | - | - | 1115,8840 |
| | - | - | - | - | 1392,9710 |
| | - | - | - | - | 1394,8550 |

Tabela 4.9. Valores dos *patterns* da hipótese 5 e do vetor ET(5)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(5) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | 1324 | 68,9710 | 1392,9710 | 1461,9420 | 68,9710 |
| | - | 137,9420 | - | - | 137,9420 |
| | - | 206,9130 | - | - | 206,9130 |
| | - | 275,8840 | - | - | 275,8840 |
| | - | 344,8550 | - | - | 344,8550 |
| | - | 413,8260 | - | - | 413,8260 |
| | - | 482,7970 | - | - | 482,7970 |
| | - | 551,7680 | - | - | 551,7680 |
| | - | 620,7390 | - | - | 620,7390 |
| | - | 689,7100 | - | - | 689,7100 |
| | - | 758,6810 | - | - | 758,6810 |
| | - | 827,6520 | - | - | 827,6520 |
| | - | 896,6230 | - | - | 896,6230 |
| | - | 965,5940 | - | - | 965,5940 |
| | - | 1034,5650 | - | - | 1034,5650 |
| | - | 1103,5360 | - | - | 1103,5360 |
| | - | 1172,5070 | - | - | 1172,5070 |
| | - | 1241,4780 | - | - | 1241,4780 |
| | - | 1310,4490 | - | - | 1310,4490 |
| | - | 1379,4200 | - | - | 1324 |
| | - | 1448,3910 | - | - | 1379,4200 |
| | - | 1517,3620 | - | - | 1392,9710 |
| | - | 1586,3330 | - | - | 1448,3910 |
| | - | 1655,3040 | - | - | 1461,9420 |
| | - | 1655,3040 | - | - | 1517,3620 |
| | - | 1655,3040 | - | - | 1586,3330 |
| | - | 1655,3040 | - | - | 1655,3040 |

Em azul, tem-se as barras espaçadas duas a duas em $TWTOL2$ a partir do centro que são os valores de ET para cada uma das hipóteses. Estes valores foram pegos das Tabelas 4.5 até 4.11. Com este gráfico, percebe-se que os valores de TPK estão coincidindo com os valores de $ET(hip)$ em determinados pontos. Isso agrega mais um peso para as hipóteses que é o $NS(hip)$. Ou seja, para a hipótese 1, como o valor de $ET \pm TWTOL2$ coincidiu com TPK duas vezes, então $NS(1) = 2$. Da mesma maneira, as outras hipóteses possuem seus pesos determinados. Na Tabela 4.12, verificam-se todos os pesos obtidos. É importante ressaltar que, para esta simulação, o valor de $TWTOL2$ foi de $5\mu s$ e que a depender do circuito analisado, podem ser alterados os valores de tolerância. Importante enfatizar que os valores de TPK começam em zero e que na Figura 4.3 eles foram omitidos para a melhor visualização.

Tabela 4.10. Valores dos *patterns* da hipótese 6 e do vetor ET(6)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(6) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 6 | 1346 | 46.9710 | 1392,9701 | 1439.9420 | 46.97100 |
| | - | 93,9420 | - | - | 93,9420 |
| | - | 140,9130 | - | - | 140,9130 |
| | - | 187,8840 | - | - | 187,8840 |
| | - | 234,8550 | - | - | 234,8550 |
| | - | 281,8260 | - | - | 281,8260 |
| | - | 328,7970 | - | - | 328,7970 |
| | - | 375,7680 | - | - | 375,7680 |
| | - | 422,7390 | - | - | 422,7390 |
| | - | 469,7100 | - | - | 469,7100 |
| | - | 516,6810 | - | - | 516,6810 |
| | - | 563,6520 | - | - | 563,6520 |
| | - | 610,6230 | - | - | 610,6230 |
| | - | 657,5940 | - | - | 657,5940 |
| | - | 704,5650 | - | - | 704,5650 |
| | - | 751,5360 | - | - | 751,5360 |
| | - | 798,5070 | - | - | 798,5070 |
| | - | 845,4780 | - | - | 845,4780 |
| | - | 892,4490 | - | - | 892,4490 |
| | - | 939,4200 | - | - | 939,4200 |
| | - | 986,3910 | - | - | 986,3910 |
| | - | 1033,3620 | - | - | 1033,3620 |
| | - | 1080,3330 | - | - | 1080,3330 |
| | - | 1127,3040 | - | - | 1127,3040 |
| | - | 1174,2750 | - | - | 1174,2750 |
| | - | 1221,2460 | - | - | 1221,2460 |
| | - | 1268,2170 | - | - | 1268,2170 |
| | - | 1315,1880 | - | - | 1315,1880 |
| | - | 1362,1590 | - | - | 1346 |
| | - | 1409,1301 | - | - | 1362,1590 |
| | - | 1456,1011 | - | - | 1392,9710 |
| | - | 1503,0720 | - | - | 1409,1300 |
| | - | 1550,0430 | - | - | 1439,9420 |
| | - | 1597,0140 | - | - | 1456,1010 |
| | - | 1643,9850 | - | - | 1503,0720 |
| | - | - | - | - | 1550,0430 |
| | - | - | - | - | 1597,0140 |
| | - | - | - | - | 1643,9850 |

O cálculo dos valores do peso $NS(hip)$ foram feitos computacionalmente uma vez que pode-se haver confusão ao analisar barras muito perto. Percebe-se que na Figura 4.3, a hipótese 7 obteve 3 coincidências em pontos muito próximos além de outras espalhadas no tempo, gerando

um $NS(7) = 8$, conforme demonstrado na tabela 4.12.

Tabela 4.11. Valores dos *patterns* da hipótese 7 e do vetor ET(7)

| Hipótese | PATTERN-1 | PATTERN-2 | PATTERN-3 | PATTERN-4 | ET(7) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 7 | 1351 | 41,9710 | 1392,9701 | 1434,9420 | 41,9710 |
| | - | 83,9420 | - | - | 83,9420 |
| | - | 125,9130 | - | - | 125,9130 |
| | - | 167,8840 | - | - | 167,8840 |
| | - | 209,8550 | - | - | 209,8550 |
| | - | 251,8260 | - | - | 251,8260 |
| | - | 293,7970 | - | - | 293,7970 |
| | - | 335,7680 | - | - | 335,7680 |
| | - | 377,7390 | - | - | 377,7390 |
| | - | 419,7100 | - | - | 419,7100 |
| | - | 461,6810 | - | - | 461,6810 |
| | - | 503,6520 | - | - | 503,6520 |
| | - | 545,6230 | - | - | 545,6230 |
| | - | 587,5940 | - | - | 587,5940 |
| | - | 629,5650 | - | - | 629,5650 |
| | - | 671,5360 | - | - | 671,5360 |
| | - | 713,5070 | - | - | 713,5070 |
| | - | 755,4780 | - | - | 755,4780 |
| | - | 797,44905 | - | - | 797,4490 |
| | - | 839,4200 | - | - | 839,4200 |
| | - | 881,3910 | - | - | 881,3910 |
| | - | 923,3620 | - | - | 923,3620 |
| | - | 965,3330 | - | - | 965,3330 |
| | - | 1007,3040 | - | - | 1007,3040 |
| | - | 1049,2750 | - | - | 1049,2750 |
| | - | 1091,2460 | - | - | 1091,2460 |
| | - | 1133,2170 | - | - | 1133,2170 |
| | - | 1175,1880 | - | - | 1175,1880 |
| | - | 1217,1590 | - | - | 1217,1590 |
| | - | 1259,1300 | - | - | 1259,1300 |
| | - | 1301,1010 | - | - | 1301,1010 |
| | - | 1343,0720 | - | - | 1343,0720 |
| | - | 1385,0430 | - | - | 1351 |
| | - | 1427,0140 | - | - | 1385,0430 |
| | - | 1468,9850 | - | - | 1392,9710 |
| | - | 1510,9560 | - | - | 1427,0140 |
| | - | 1552,9270 | - | - | 1434,9420 |
| | - | 1594,8981 | - | - | 1468,9850 |
| | - | 1636,8691 | - | - | 1510,9560 |
| | - | | - | - | 1552,9270 |
| | - | | - | - | 1594,8981 |
| | - | | - | - | 1636,8691 |

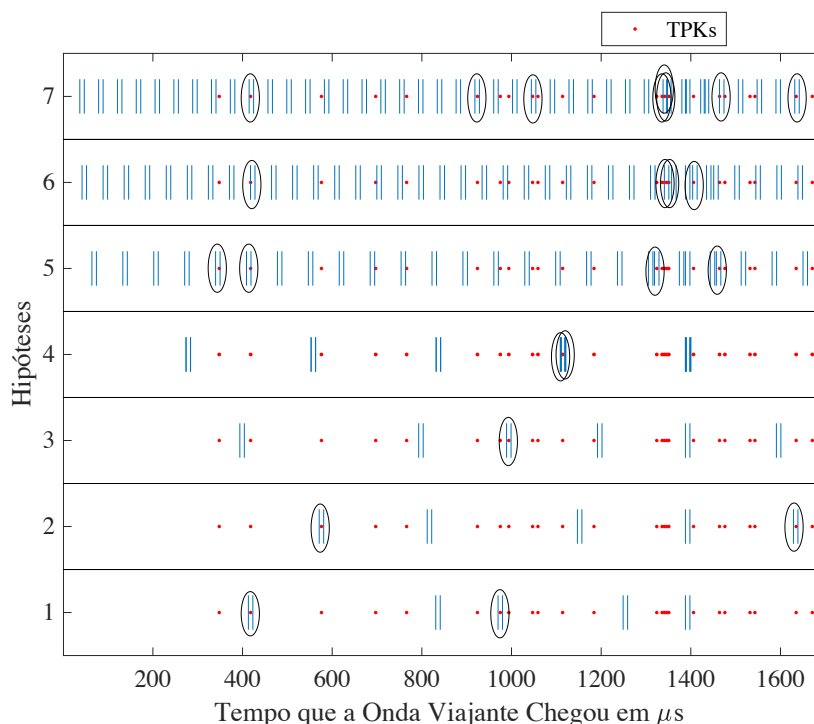


Figura 4.3. Resultado das 7 hipóteses do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado 1

Tabela 4.12. Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 30% do sistema analisado 1

| Hipótese | $NS(hip)$ |
|----------|-----------|
| Hip 1 | 2 |
| Hip 2 | 2 |
| Hip 3 | 1 |
| Hip 4 | 2 |
| Hip 5 | 4 |
| Hip 6 | 4 |
| Hip 7 | 8 |

4.2.4 O Fator WGHT - *Weighting Factor* para Curto em 30% da LT do Sistema Analisado 1

O último passo do algoritmo é definir se a *flag WGHT* vai pra 1 ou permanece em 0. Como inicialmente ela é nula, apenas vai para 1 se houver uma coincidência entre $R(hip)$ e $F(hip)$ (valor de F e R da hipótese analisada) com algum TPK, utilizando-se a tolerância $TWTOL1$. Lembre-se que $WGHT$ depende de cada hipótese, logo, deve-se analisar $WGHT(hip)$. Obviamente, $F(hip)$ vai sempre coincidir uma vez que ele foi criado a partir dos próprios TPKs.

Assim, basta analisar se o $R(hip)$, que é calculado, também coincidiu. Isso evidencia que a onda companheira também incidiu o terminal local, aumentando-se a probabilidade de ser a hipótese correta.

No exemplo em questão, tem-se que $F(1) = 418 \mu s$ e $R(1) = 974.9710 \mu s$. Com $TWTOL1$, que aqui vale $10 \mu s$, tem-se que $F(1)$ equivale ao $TPK(3)$ e que o $R(1)$ equivale ao $TPK(8)$. Então, $WGHT(1) = 1$.

A mesma análise foi feita para todas as hipóteses chegando-se à conclusão que a única *flag* $WGHT$ que foi para 1 foi a da primeira hipótese do algoritmo. Isso nem sempre ocorre tendo em vista que mais de uma hipótese pode ser sensível às referidas condições no terminal monitorado. O resultado de $WGHT(hip)$ está mostrado Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Valores da *flag* $WGHT(hip)$

| $WGHT(Hip)$ | Valor da <i>FLAG</i> |
|-------------|----------------------|
| $WGHT(1)$ | 1 |
| $WGHT(2)$ | 0 |
| $WGHT(3)$ | 0 |
| $WGHT(4)$ | 0 |
| $WGHT(5)$ | 0 |
| $WGHT(6)$ | 0 |
| $WGHT(7)$ | 0 |

4.2.5 Resultado do SETWFL para Curto Monofásico em 30% da LT do Sistema Analisado 1

Agora que todos os pesos foram definidos, aplica-se, para cada hipótese, a Equação (3.4). É importante ressaltar que Guzmán *et al.* (2017) deixa claro que se resultados de outros métodos trouxerem a informação de que o curto ocorreu entre 0 p.u. e 0,3 p.u. da linha, deve-se fazer o peso das hipóteses considerando apenas o $NM(hip)$. Caso o curto tenha ocorrido entre 0,7 p.u. e 1 p.u., deve-se fazer o peso das hipóteses considerando apenas o $N1_M(hip)$. Porém, como neste algoritmo implementado não se tinha resultados anteriores de localização de faltas, deve-se considerar os dois pesos juntamente com $NS(hip)$ e $WGHT(hip)$. O resultado final da localização da falta é mostrado na Tabela 4.14 em que $N(hip)$ é o peso final de cada uma das

hipóteses.

Tabela 4.14. Valores da *flag* $WGHT(hip)$

| Hipótese | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ | $NS(hip)$ | $WGHT(hip)$ | $N(hip)$ |
|----------|-----------|--------------|-----------|-------------|----------|
| 1 | 13 | 4 | 2 | 1 | 19 |
| 2 | 9 | 0 | 2 | 0 | 9 |
| 3 | 6 | 3 | 1 | 0 | 9 |
| 4 | 3 | 9 | 2 | 0 | 12 |
| 5 | 2 | 13 | 4 | 0 | 15 |
| 6 | 4 | 5 | 4 | 0 | 9 |
| 7 | 2 | 2 | 8 | 0 | 4 |

Percebe-se então que a hipótese que possui maior peso é a primeira com $N(1) = 19$. Então, esta deve ser a hipótese correta para o cálculo da localização do curto circuito. Para isso, como é sabido o valor do primeiro pico gerado no sinal filtrado ($TPK(0)$), calculou-se o curto circuito para todas elas gerando o resultado na Tabela 4.15. Para este cálculo, utilizou-se (1.2) em que t_6 foi substituído para os valores de cada hipótese.

Tabela 4.15. Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 30% do sistema analisado 1

| Hipótese | Localização da Falta (km) |
|----------|---------------------------|
| 1 | 60,0156 |
| 2 | 82,7009 |
| 3 | 142,7165 |
| 4 | 159,9458 |
| 5 | 190,0972 |
| 6 | 193,2559 |
| 7 | 193,9739 |

Portanto, a localização da falta definida pelo algoritmo é a de 60,0156 km a partir do terminal local. Como foi simulado uma falta em 30% da linha ($0,3 \cdot LL$) o curto real ocorreu em 60 km da linha uma vez que ela possui 200 km de extensão. Assim, houve um erro de 0,026% na localização da falta, precisão esta considerada coerente para métodos baseados em OVs.

4.3 SIMULAÇÃO DE UM CURTO CIRCUITO MONOFÁSICO, NA FASE A, EM 80% DA LINHA DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ANALISADO 1

4.3.1 Amplitudes e Tempos dos Picos das OV's Dentro da Janela de Observação

Na Figura 4.4, que também se refere ao sistema analisado 1, mostra-se o resultado da filtragem, após o Filtro DS, dos sinais obtidos em um curto circuito monofásico na fase A em 80% da linha de transmissão.

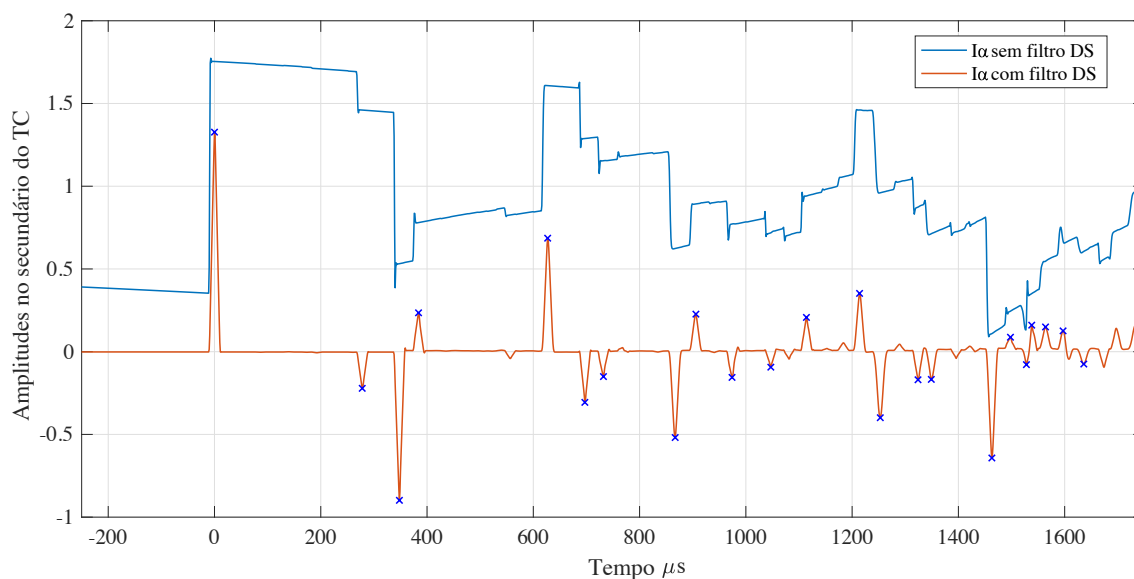


Figura 4.4. Resultado das OV's em um curto circuito em 80% do sistema analisado 1

Uma vez que o sistema utilizado não foi alterado, $TWLPT = 6,9649 \cdot 10^{-4}$ s. Assim, as janelas de observação 1 e 2 terão os mesmos tamanhos, com valores de:

$$ObsWindow1 = 2,4 \cdot TWLPT = 1671,5652 \mu s \quad (4.8)$$

$$ObsWindow2 = 2 \cdot TWLPT = 1402,9710 \mu s \quad (4.9)$$

Apenas 23 amostras de dados dentro da janela de observação 1 foram verificadas, ou seja, apenas 23 picos na saída do filtro DS foram analisados de 0 até 22, conforme indicado na Tabela 4.16

Perceba que apenas 5 hipóteses foram escolhidas uma vez que a janela de observação 2 vai até o valor de $1402,9710 \mu s$. Por este motivo que a 17ª amostra não entrou como hipótese. Além disso, deve-se lembrar que as hipóteses são escolhidas baseando-se no pico da primeira

Tabela 4.16. VPK's, TPK's e amostras do curto circuito em 30% da LT do sistema analisado 1

| Amostra | VPK | TPK (μs) | - | Amostra | VPK | TPK (μs) |
|---------|---------|--------------------|---|---------|---------|--------------------|
| 0 | 1,3268 | 0 | | 12 | 0,3521 | <u>1214</u> |
| 1 | -0,2215 | 278 | | 13 | -0,3991 | 1253 |
| 2 | -0,8984 | 348 | | 14 | -0,1698 | 1324 |
| 3 | 0,2349 | <u>384</u> | | 15 | -0,1675 | 1349 |
| 4 | 0,6859 | <u>627</u> | | 16 | -0,6425 | 1463 |
| 5 | -0,3063 | 697 | | 17 | 0,0873 | 1498 |
| 6 | -0,1504 | 732 | | 18 | -0,0783 | 1528 |
| 7 | -0,5188 | 867 | | 19 | 0,1602 | 1538 |
| 8 | 0,2269 | <u>906</u> | | 20 | 0,1495 | 1564 |
| 9 | -0,1553 | 973 | | 21 | 0,1257 | 1597 |
| 10 | -0,0935 | 1047 | | 22 | -0,0748 | 1636 |
| 11 | 0,2071 | <u>1114</u> | | | | |

OV que chega ao terminal local. Ou seja, apenas as que tiverem a mesma polaridade. Nos exemplos aqui apresentado, estas OVs sempre possuem polaridade positiva. Porém, o algoritmo foi montado de tal forma que, caso uma OV de polaridade negativa seja percebida inicialmente, as implementações serão feitas da mesma forma tomando esta polaridade como referência. A única modificação é a escolha das hipóteses.

4.3.2 RTT do Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1

O vetor DT para este caso ficou menor, já que a quantidade de dados analisados é menor. Seus valores podem ser analisados a seguir.

DT = [10, 25, 26, 30, 33, 35, 35, 36, 36, 39, 39, 39, 40, 59, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 70, 71, 72, 73, 75, 96, 98, 99, 100, 101, 105, 106, 107, 108, 110, 114, 134, 135, 135, 138, 139, 139, 140, 141, 149, 167, 170, 173, 174, 174, 179, 180, 189, 204, 206, 208, 209, 210, 210, 214, 215, 235, 240, 240, 240, 242, 243, 245, 247, 248, 249, 273, 275, 277, 277, 278, 279, 279, 279, 284, 285, 287, 302, 308, 311, 312, 313, 314, 315, 324, 344, 347, 347, 347, 348, 348, 349, 349, 349, 350, 350, 350, **375, 382, 383, 383, 384, 384, 384, 386**, 414, 416, 417, 418, 419, 420, 422, 424, 443, 450, 451, 454, 457, 481, 482, 482, 483, 483, 487, 489, 491, 517, 517, 519, 521, 522, 522, 524, 550, 554, 556, 557, 558, 564, 587, 589, 589, 590, 590, 592, 592, 596, 617, 622, 623, 626, 626, 627, 627, 628,

631, 632, 652, 658, 661, 662, 663, 671, 691, 696, 697, 697, 697, 699, 722, 730, 730, 730, 731, 732, 766, 766, 766, 769, 769, 796,801, 806, 830, 831, 832, 836, 836, 841, 865, 866, 867, 867, 869, 871, 900, 901, 904, 905, 906, 911, 936, 937, 939, 940, 965, 970, 974, 975, 976, 1001, 1009, 1046, 1047, 1071, 1079, 1114, 1114, 1115, 1144, 1150, 1154, 1180, 1180, 1185, 1190, 1213, 1214, 1216, 1220, 1249, 1250, 1252, 1253, 1260, 1286, 1288, 1319, 1324, 1349, 1358, 1463, 1498, 1528, 1538, 1564, 1597 , 1636]

(4.10)

Novamente deve-se comentar que os valores ficaram inteiros pelo fato de o ATP possuir o mesmo passo de análise da implementação realizada. Como os valores de F de cada hipótese são exatamente as hipóteses, tem-se a Equação (4.6) para os valores de R . Logo, como $F(1)$ foi equivalente 8 vezes aos valores de DT (em vermelho), $NM(1) = 8$. Da mesma forma, como $R(1)$ foi equivalente aos valores de DT 2 vezes, tem-se que $N1_M(1) = 2$. O mesmo foi feito para 5 hipóteses existentes. Logo, os pesos $NM(hip)$ e $N1_M(hip)$ foram calculados. restando calcular o valor de $NS(hip)$ e a *flag* $WGHT(hip)$.

Tabela 4.17. Valores de R e de F com seus respectivos pesos NM e $N1_M$

| Hipótese | $F(hip)\mu s$ | $R(hip)\mu s$ | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ |
|----------|---------------|---------------|-----------|--------------|
| 1 | 384 | 1008,9710 | 8 | 2 |
| 2 | 627 | 765,9710 | 10 | 5 |
| 3 | 906 | 486,9710 | 6 | 8 |
| 4 | 1114 | 278,9710 | 3 | 11 |
| 5 | 1214 | 178.9710 | 4 | 6 |

4.3.3 ETW com Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1

Nos padrões das Figuras 3.3.2.2 e 3.4, devem-se montar os diagramas para cada hipótese constatada. Como foram um total de 5 hipóteses, montam-se os vetores ET para cada uma delas

A tabela a seguir possui os valores diretos de ET(1), ET(2), ET(3), ET(4) e ET(5). Não foram mostrados os resultados de cada padrão, apenas o resultado final de cada vetor para simplificar a demonstração.

Tabela 4.18. Vetores ET do ETW em 80% da LT do sistema analisado 1

| ET(1) | ET(2) | ET(3) | ET(4) | ET(5) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 384 | 627 | 486,971 | 278,9710 | 178,9710 |
| 768 | 765,9710 | 906 | 557,9420 | 357,9420 |
| 1008,9710 | 1254 | 973,9420 | 836,9130 | 536,9130 |
| 1152 | 1392,9710 | 1392,9710 | 1114 | 715,8840 |
| 1392,9710 | 1531,9420 | 1460,913 | 1115,8840 | 894,8550 |
| 1536 | - | - | 1392,9710 | 1073,8260 |
| - | - | - | 1394,8550 | 1214 |
| - | - | - | - | 1252,7970 |
| - | - | - | - | 1392,9710 |
| - | - | - | - | 1431,7680 |
| - | - | - | - | 1571,9420 |
| - | - | - | - | 1610,7390 |

É importante comparar a quantidade de resultados obtidos a partir de cada tipo de simulação. No curto circuito monofásico em 30% da linha de transmissão, obteve-se uma quantidade de valores para os ET bem maior do que o exposto na Tabela 4.18. Isso foi porque a quantidade de hipóteses no primeiro caso foi maior do que a quantidade de hipóteses do segundo. Logo, a repetição da distância temporal entre picos em um curto circuito a 30% será repetida mais vezes do que em um curto a 80% do terminal local.

A ideia do ETW é fazer a comparação de quantas vezes os tempos TPKs coincidem com os valores dos vetores $ET(hip)$. Para melhor análise, basta ver a Figura 4.5 que mostra, para cada hipótese, a quantidade de vezes que acontecem estas superposições de valores utilizando o $TWTOL2$ (neste circuito, utilizou-se $5 \mu s$ novamente).

Assim como no primeiro resultado apresentado, os pontos vermelhos são os valores de TPKs que se repetem em todas as hipóteses. Já as barras azuis são os valores encontrados a partir dos *patterns* verificados nos diagramas de *Bewley* montado para cada hipótese. Além disso, estes valores dos ETs estão com uma tolerância de $\pm TWTOL2$.

O peso $NS(hip)$ nada mais é que a quantidade de vezes que os valores de TPKs coincidiram com os valores de $ET(hip)$ para cada hipótese. Analisando a Figura 4.5, percebe-se que para a 4ª hipótese, $NS(3) = 3$. Importante novamente ressaltar que isso não foi feito manualmente. Percebe-se que na 4ª hipótese, coincidências ocorrem em um mesmo ponto TPK, em vermelho, isso porque este mesmo valor está entre duas barras distintas por conta da tolerância admitida.

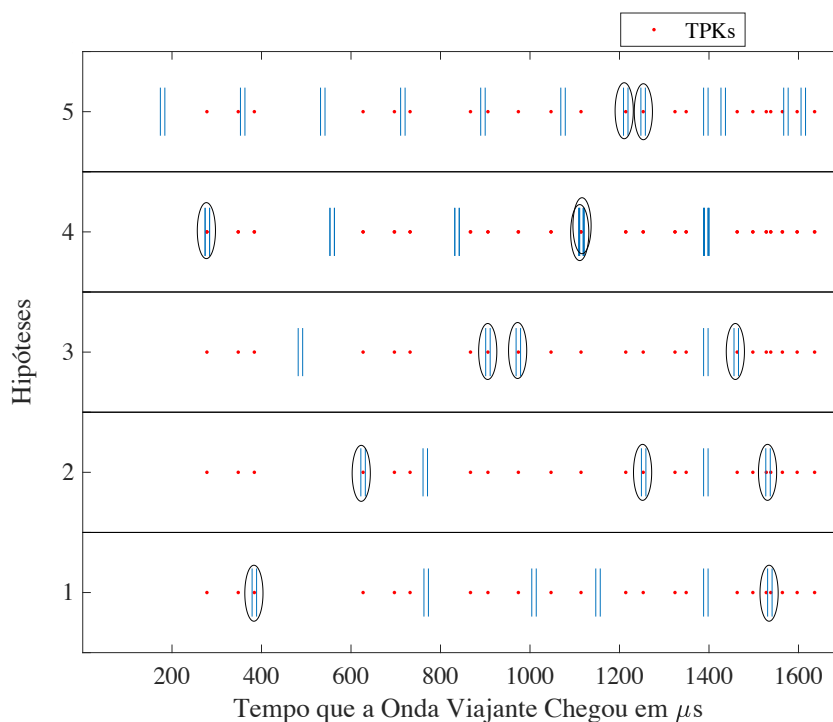


Figura 4.5. Resultado das 5 hipóteses para o curto em 80% da LT do sistema analisado 1

Logo, aplicando-se para todas as hipóteses, tem-se os valores de $NS(hip)$ que está mostrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 80% do sistema analisado 1

| Hipótese | $NS(hip)$ |
|----------|-----------|
| Hip 1 | 2 |
| Hip 2 | 3 |
| Hip 3 | 3 |
| Hip 4 | 3 |
| Hip 5 | 2 |

4.3.4 O Fator WGHT - *Weighting Factor* para Curto em 80% da LT do Sistema Analisado 1

Com a *flag* zerada inicialmente, calculam-se os valores de $WGHT(hip)$, analisando se a onda companheira foi percebida. A depender do tipo de curto circuito e, principalmente, da resistência de falta, pode ser que este pico não fique evidenciado sendo apenas tratado como ruído da OV pelo relé.

Para esta análise, basta ver se $F(hip)$ e $R(hip)$ coincidem, simultaneamente, com valores de TPK. Como também já comentado, $F(hip)$ sempre coincidirá, logo, basta analisar o $R(hip)$. Neste caso, apenas uma hipótese teve $WGHT \neq 0$ que foi o da 4ª hipótese como pode ser visto na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. Valores da *flag* $WGHT(hip)$

| $WGHT(Hip)$ | Valor da <i>flag</i> |
|-------------|----------------------|
| $WGHT(1)$ | 0 |
| $WGHT(2)$ | 0 |
| $WGHT(3)$ | 0 |
| $WGHT(4)$ | 1 |
| $WGHT(5)$ | 0 |

4.3.5 Resultado do SETWFL para Curto Circuito Monofásico em 80% da LT do Sistema Analisado 1

Com todos os pesos calculados, basta aplicar a Equação (1.2) uma vez que não se tem informações de outros métodos de localização de curto circuito. A Tabela 4.21 mostra o resultado de todos os pesos associados a este curto circuito monofásico na fase A.

Tabela 4.21. Resultado dos pesos

| Hipótese | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ | $NS(hip)$ | $WGHT(hip)$ | $N(hip)$ |
|----------|-----------|--------------|-----------|-------------|----------|
| 1 | 8 | 2 | 2 | 0 | 10 |
| 2 | 10 | 5 | 3 | 0 | 15 |
| 3 | 6 | 8 | 3 | 0 | 14 |
| 4 | 3 | 11 | 3 | 1 | 17 |
| 5 | 4 | 6 | 2 | 0 | 10 |

Analisando-se a Tabela 4.21, percebe-se que a hipótese que o algoritmo entrega como correta é a 4ª. Além disso, vale a pena entender que o grande motivo de ele ter escolhido esta hipótese é porque sua *flag* $WGHT$ foi pra 1. Se estivesse em zero, muito provavelmente outro resultado seria escolhido. Como os ensaios aqui tratados foram com resistência de falta nula, caso coloque-se um valor maior do que zero, todas as OVs são atenuadas de forma a poder complicar o resultado da função SETWFL-SEL. Analisando as respostas que cada hipótese resulta como sendo a localização do curto circuito, tem-se o exposto na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 80% do circuito 1

| Hipótese | Localização da Falta (km) |
|----------|---------------------------|
| 1 | 55,1340 |
| 2 | 90,0234 |
| 3 | 130,0817 |
| 4 | 159,9459 |
| 5 | 174,3037 |

Este resultado deu uma localização da falta no Quilômetro 159,9459 a partir do terminal local. Como a falta foi em 80% da LT, tem-se que o curto-circuito real foi aplicado no quilômetro 160. Percebe-se então um resultado muito próximo da real localização, demonstrando a possibilidade de localizar defeitos também na segunda metade da LT.

4.4 SISTEMA ANALISADO 2

O segundo sistema analisado possui uma linha de transmissão simples de tamanho 200 km. A linha possui apenas dois equivalentes de Thévenin em cada extremo e TCs para a medição dos dados de corrente. A Figura 4.6 mostra o referido circuito. Além disso, a Tabela 4.23 mostra os valores dos parâmetros desta linha de transmissão. Perceba pela tabela que os sistemas 1 e 2 possuem os mesmos parâmetros de linha, restando a diferença da não existência de linhas adjacentes.

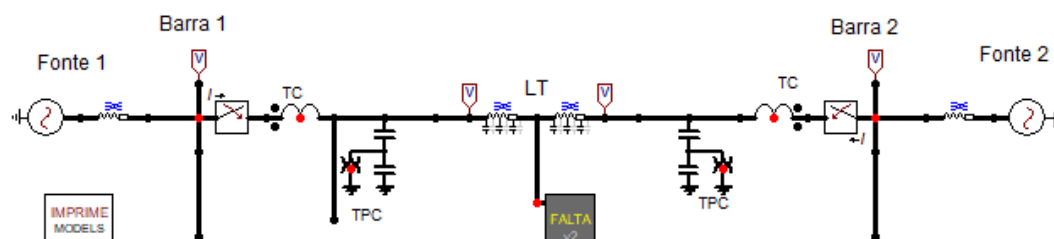
**Figura 4.6.** Sistema analisado 2

Tabela 4.23. Dados da LT de 230 kV modelada no ATP

| Tensão: 230 kV | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
| Comprimento da LT Principal: 200 km | | | | | | |
| Frequência nominal: 60 Hz | | | | | | |
| Barra | $R_0(\Omega/km)$ | $X_0(\Omega/km)$ | $Y_0(\mu S/km)$ | $R_1(\Omega/km)$ | $X_1(\Omega/km)$ | $Y_1(\mu S/km)$ |
| 1 | 0,5220 | 1,4320 | 2,2930 | 0,0980 | 0,5300 | 3,2520 |
| 2 | 0,5220 | 1,4320 | 2,2930 | 0,0980 | 0,5300 | 3,2520 |

A fonte aqui utilizada do equivalente Thevénin da direita, por uma questão de diferença de teste, foi ajustada para uma fase de -30° como mostrado na Tabela 4.24. Porém, foi simulado também com fases diferentes e não obteve-se problemas. A operação dos disjuntores não foi simulada. Os TCs utilizados foram os mesmos do sistema analisado 1.

Tabela 4.24. Dados dos equivalentes de Thévenin do SEP de 230 kV - 60Hz

| Fonte | Tensão (V_{rmsL-L} em kV) | Fase ($^\circ$) | SIR |
|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Fonte 1 | 230 | 0 | 1,0 |
| Fonte 2 | 225,4 | -30 | 1,0 |

4.5 SIMULAÇÃO DE UM CURTO CIRCUITO MONOFÁSICO, NA FASE A, EM 40% DA LINHA DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ANALISADO 2

A Figura 4.7 demonstra a onda de corrente da fase A que foi curto circuitada com a terra. Perceba que, para este sistema, as OV's não são tão evidentes como no do sistema analisado 1. Por este motivo, teve-se que fazer algumas modificações apenas nas tolerâncias para que os resultados alcançados fossem tão satisfatórios quanto os obtidos no sistema analisado 1.

Perceba que o pico da saída do filtro DS foi alinhado no instante zero para facilitar os cálculos. Constata-se também, pelo fato de os valores dos parâmetros da linha dos sistemas 1 e 2 serem iguais e que o $TWLPT$ somente depende deste parâmetros, $TWLPT$ para o sistema 2 é equivalente ao do sistema 1. É importante destacar que a implementação feita independe deste valor fixo podendo aceitar, como entrada, qualquer valor de parâmetros de circuitos. Então:

$$TWLPT_{Sistema1} = TWLPT_{Sistema2} = 6,9649 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (4.11)$$

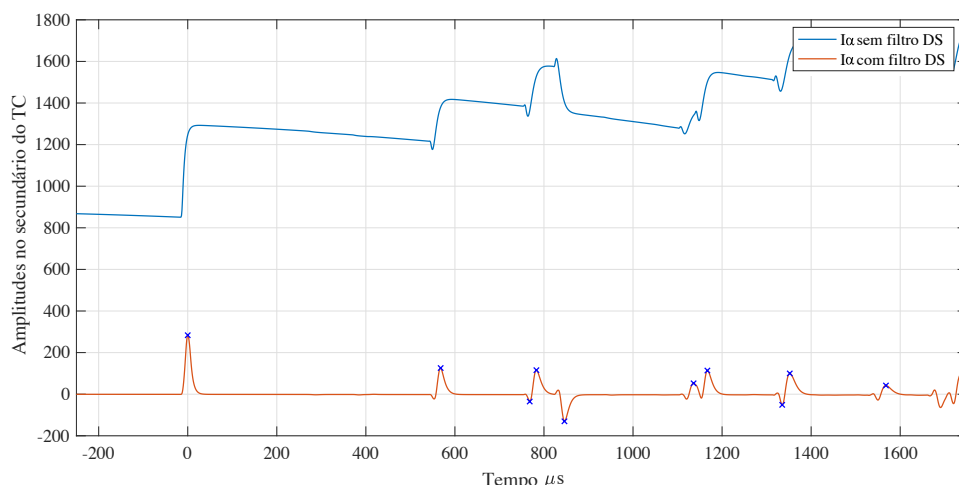


Figura 4.7. Resultado das OV's em um curto circuito em 40% da LT sem linha adjacente

Como o valor de $TWLPT$ não foi alterado, pode-se afirmar também que as duas janelas de observação permanecem as mesmas, não tendo que alterá-las. Sendo:

$$ObsWindow1_{Circuito2} = ObsWindow1_{Circuito1} = 1671,5652 \mu s \quad (4.12)$$

$$ObsWindow2_{Circuito2} = ObsWindow2_{Circuito1} = 1402,9710 \mu s \quad (4.13)$$

Com esta janela de observação ($ObsWindow1$) para os dados de entrada do curto circuito monofásico AT com resistência de falta nula, foram analisados apenas 10 primeiros picos. Já com a $ObsWindow2$, evidencia-se que apenas 5 hipóteses podem ser analisadas. Isso porque são os 5 picos que possuem a mesma polaridade da onda pioneira e estão dentro da segunda janela de observação.

4.5.1 RTT de um Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2

Por serem bem menos pontos analisados, o vetor DT torna-se bem menor e mais fácil de ser visualizado. Para estes valores do vetor DT, analisou-se, para cada hipótese, quantas vezes os valores de $F(hip)$ e $R(hip)$ se equivaleram aos valores do vetor DT. Isso foi mostrado em azul para o $F(4)$ e em vermelho para o $R(4)$ apenas para constatação. Neste aspecto, o valor de $TWTOL1$ permaneceu em $10 \mu s$. Não foi escolhida a primeira hipótese pois o $R(1)$ não se iguala a nenhum valor de DT. O mesmo motivo para o $R(2)$ e $R(3)$. Tudo isso pode ser visualizado no vetor DT em (4.13).

$$DT = [15, 17, 31, 63, 78, 168, 185, 199, 200, 215, 216, 216, 233, 278, 290, 321, 353, 368, 384, 399, 401, 432, 489, 506, 552, 567, 568, 568, 569, 584, 599, 722, 767, 768, 783, 784, 785, 800, 846, 1000, 1136, 1167, 1335, 1352, 1568]$$
(4.14)

Se a entrada for um sinal analógico, é importante salientar que estes valores de DT não serão inteiros. Porém, como para a igualdade com DT utiliza-se a tolerância $TWTOL1$ de $10 \mu s$, este arredondamento não traz malefícios. As mesmas análises com as outras hipóteses foram realizadas e o resultado está na Tabela 4.25. Com isso, determinaram-se os pesos NM e $N1_M$.

Tabela 4.25. Valores de R e de F com seus respectivos pesos NM e $N1_M$ para o curto em 40% da LT do sistema analisado 2.

| Hipótese | $F(hip)\mu s$ | $R(hip)\mu s$ | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ |
|----------|---------------|---------------|-----------|--------------|
| 1 | 568 | 824,9710 | 4 | 0 |
| 2 | 783 | 609,9710 | 3 | 0 |
| 3 | 1136 | 256,9710 | 1 | 0 |
| 4 | 1167 | 225,9710 | 1 | 3 |
| 5 | 1352 | 40,9710 | 1 | 1 |

4.5.2 ETW de um Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2

Com os padrões definidos a partir de cada hipótese, montaram-se os vetores $ET(1)$ até o $ET(5)$. Os resultados separados de cada padrão foram omitidos, ou seja, mostrou-se apenas os resultados finais de cada vetor ET. Os valores de cada ET pode ser visualizado na Tabela 4.26.

Mesmo que o tamanho do vetor DT tenha dado pequeno, isso não refletiu para os tamanhos de ET , principalmente para a 5ª hipótese. Como se quer fazer a comparação de quantas vezes os TPKs coincidiram com os valores de $ET(hip)$, traçou-se o gráfico para melhor visualização. Para tanto, os pontos vermelhos equivalem aos TPKs enquanto que as barras azuis equivalem aos valores de $ET(hip)$, porém com uma tolerância $TWTOL2$ em que para este circuito, escolheu-se $TWTOL2 = 10 \mu s$ a fim de se conseguir os resultados. Este valor diverge do valor

escolhido para o sistema 1, isso porque com a mesma tolerância utilizada nos dois sistemas, este não trouxe resultados coerentes. Desta forma, aumentou-se a tolerância de forma a fazer a análise dos resultados até alcançar uma correta localização da falta.

O valor de NS é o último peso a ser calculado. Após isso, deve-se apenas analisar qual o valor da *flag* $WGHT$. Analisando a Figura 4.8, percebe-se, para cada hipótese, o valor de $NS(hip)$. Perceba que na 5ª hipótese não foi possível perceber, manualmente, quais pontos vermelhos (TPKs) estão dentro de ET com sua tolerância $TWTOL2$, não sendo trazido nenhuma justificativa para o uso deste valor em Guzmán *et al.* (2017). Ressalta-se que o uso de $TWTOL2$ diferente trouxe respostas plausíveis e com fontes de erros pequenas para este sistema quando comparado com o valor de $10 \mu s$ utilizado no sistema 1.

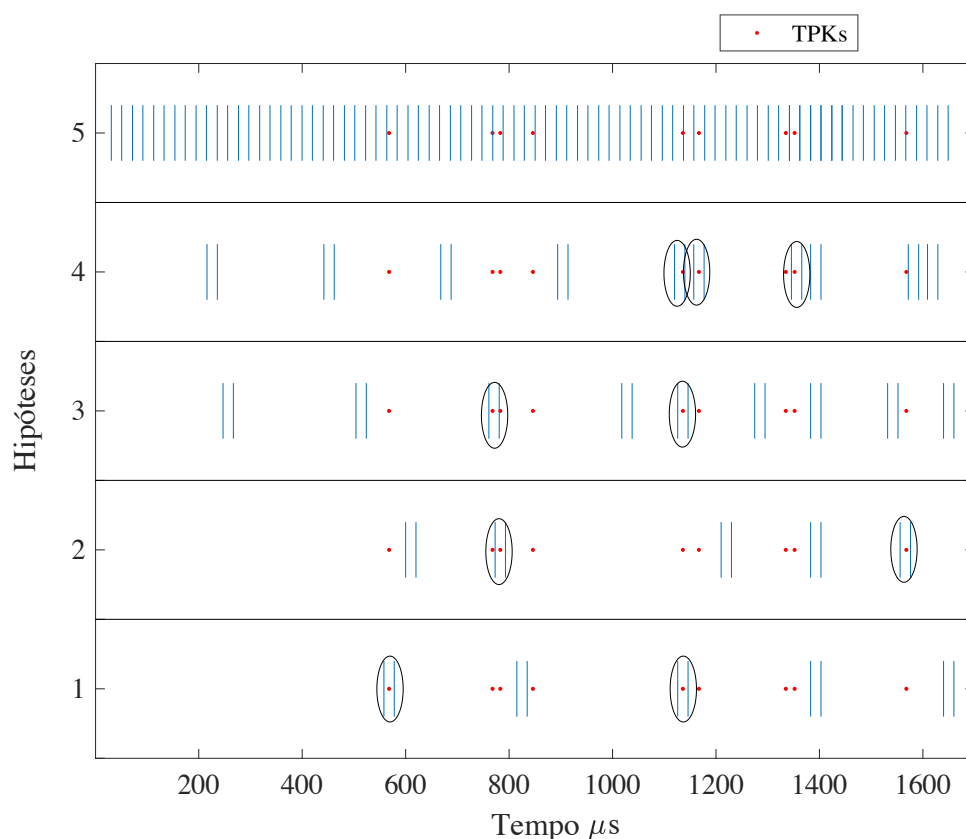


Figura 4.8. Resultado das 5 hipóteses para o curto circuito em 40% da LT do sistema analisado 2

De acordo com a implementação, o resultado de NS pode ser visto na Tabela 4.27.

Tabela 4.26. Vetores ET do ETW em 40% da LT do sistema analisado 2

| ET(1) | ET(2) | ET(3) | ET(4) | ET(5) |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 568 | 609,9710 | 256,9710 | 225,9710 | 40,9710 |
| 824,9710 | 783 | 513,9420 | 451,9420 | 81,9420 |
| 1136 | 1219,9420 | 770,9130 | 677,9130 | 122,9130 |
| 1392,9710 | 1392,9710 | 1027,8840 | 903,8840 | 163,8840 |
| 1649,9420 | 1566 | 1136 | 1129,8550 | 204,8550 |
| | - | 1284,8550 | 1167 | 245,8260 |
| - | - | 1392,9710 | 1355,8260 | 286,7970 |
| - | - | 1541,8260 | 1392,9710 | 327,7680 |
| - | - | 1649,9420 | 1581,7970 | 368,7390 |
| - | - | - | 1618,9420 | 450,6810 |
| - | - | - | - | 491,6520 |
| - | - | - | - | 532,6230 |
| - | - | - | - | 573,5940 |
| - | - | - | - | 614,5650 |
| - | - | - | - | 655,5360 |
| - | - | - | - | 696,5070 |
| - | - | - | - | 737,4780 |
| - | - | - | - | 778,4490 |
| - | - | - | - | 819,4200 |
| - | - | - | - | 860,3910 |
| - | - | - | - | 901,3620 |
| - | - | - | - | 942,3330 |
| - | - | - | - | 983,3040 |
| - | - | - | - | 1024,2750 |
| - | - | - | - | 1065,2460 |
| - | - | - | - | 1106,2170 |
| - | - | - | - | 1147,1880 |
| - | - | - | - | 1188,1590 |
| - | - | - | - | 1229,1300 |
| - | - | - | - | 1270,1010 |
| - | - | - | - | 1311,0720 |
| - | - | - | - | 1352 |
| - | - | - | - | 1352,0430 |
| - | - | - | - | 1392,97100 |
| - | - | - | - | 1393,0140 |
| - | - | - | - | 1433,9420 |
| - | - | - | - | 1433,9850 |
| - | - | - | - | 1474,9560 |
| - | - | - | - | 1515,9270 |
| - | - | - | - | 1556,8981 |
| - | - | - | - | 1597,8691 |
| - | - | - | - | 1638,8401 |

Tabela 4.27. Valores dos pesos $NS(hip)$ para o curto circuito em 40% do sistema analisado 2

| Hipótese | $NS(hip)$ |
|----------|-----------|
| Hip 1 | 2 |
| Hip 2 | 2 |
| Hip 3 | 2 |
| Hip 4 | 3 |
| Hip 5 | 4 |

4.5.3 O Fator $WGHT$ - *Weighting Factor* para o Curto em 40% da LT do Sistema Analisado 2

Para a *flag* $WGHT$, o resultado está mostrado na Tabela 4.28. Lembra-se ainda que a comparação de $R(hip)$ com os valores de TPK é realizada nesta etapa.

Tabela 4.28. Valores da *flag* $WGHT(hip)$

| $WGHT(hip)$ | Valor da $FLAG$ |
|-------------|-----------------|
| $WGHT(1)$ | 1 |
| $WGHT(2)$ | 0 |
| $WGHT(3)$ | 0 |
| $WGHT(4)$ | 0 |
| $WGHT(5)$ | 0 |

4.5.4 Resultados do SETWFL-SEL para Curto Monofásico em 40% da LT do Sistema Analisado 2

Com os pesos já calculados e sem obter informações sobre outros métodos de localização de falta, a Tabela 4.29 mostra os resultados finais dos pesos.

Tabela 4.29. Resultado dos pesos

| Hipótese | $NM(hip)$ | $N1_M(hip)$ | $NS(hip)$ | $WGHT(hip)$ | $N(hip)$ |
|----------|-----------|--------------|-----------|-------------|----------|
| 1 | 4 | 0 | 2 | 1 | 6 |
| 2 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 3 | 3 | 0 | 4 |
| 5 | 1 | 1 | 4 | 0 | 2 |

Com estes resultados, percebe-se que a hipótese dada como correta pelo algoritmo é a primeira. Isso porque possui o maior peso final ($N = 6$). Portanto, analisando-se a Tabela 4.30, consegue-se perceber que, segundo o algoritmo, o curto circuito foi em 81,5523 km a partir do terminal local. Como foi escolhido, na simulação, um curto em 40% da linha, tem-se que o curto circuito original ocorreu no km 80. Portanto, com erro levemente superior do que o circuito 1 obteve, pode-se também dizer que o resultado do sistema 2 está dentro do aceitável.

Tabela 4.30. Localização da falta para cada hipótese no CC na LT em 40% do sistema analisado 2

| Hipótese | Localização da Falta (km) |
|----------|---------------------------|
| 1 | 81,5523 |
| 2 | 112,4215 |
| 3 | 163,1046 |
| 4 | 1167,5555 |
| 5 | 194,1174 |

4.6 ANÁLISES PONTUAIS QUE REVELARAM PROBLEMAS NO MÉTODO SETWFL-SEL

Em alguns casos analisados, a formulação do SETWFL-SEL não gerou resultados esperados. Aqui serão explicitados os resultados obtidos com as referidas análises explicando o porquê dos erros verificados

4.6.1 Curto Circuito no Meio da Linha de Transmissão

Para um curto circuito exatamente no meio da LT, tem-se que as OV's sendo produzidas como em todos os casos avaliados. Levando-se em consideração que as ondas possuem a mesma velocidade de propagação, estas percorrerão o mesmo espaço durante um determinado tempo. Porém, deve-se considerar a referência de medição de corrente definida pelo TC. A seguir, é mostrado como se comportam as OV's medidas pelos TC's e o que isso resulta.

A Figura 4.10 ilustra a polaridade dos TC's que são conectados à uma linha de transmissão. Perceba que, no curto circuito mostrado na figura, que foi exatamente no meio da LT, a corrente que chega a partir da falta ($-i$) e a que vai para o terminal remoto vai como positiva ($+i$) para

o TC local. Como a polaridade de uma OV, ao refletir a partir de uma terminação, depende de como é esta terminação, deve-se fazer uma análise do seu comportamento. Considera-se aqui uma impedância da terminação, que depende de vãos conectados a ela, sendo tipicamente menor do que uma impedância Z_S (impedância de surto) da LT. Por isso, (4.15) torna-se verdadeira.

$$Z_T < Z_S \quad (4.15)$$

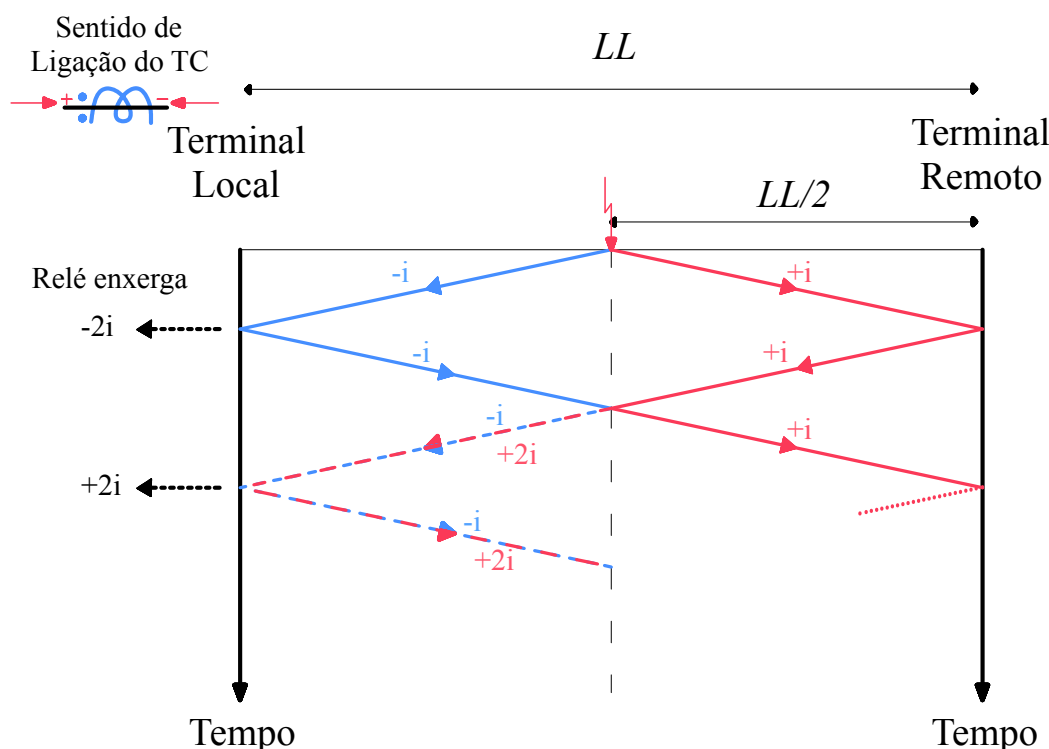


Figura 4.9. Análise da observação das correntes pelo relé

De fato, o que é mostrado na Figura 4.9 coincide com o que foi analisado. Uma vez que a OV encontrou o final da LT com uma impedância de terminação menor que a impedância entre a LT e a falta, seu coeficiente de reflexão fica positivo. Isso leva a entender que uma reflexão neste ponto não sofrerá inversão de polaridade.

Como o TC é um equipamento, ele medirá o somatório da OV que chega a partir da falta com a OV que sai dele para a falta como explicado em 2.20. Por este motivo, sua medição ficará em $(-2i)$ na OV pioneira que sensibilizou o relé como mostrado na figura. Perceba que as ondas, aqui representadas por azuis e vermelhas, acabam se sobrepondo uma vez que possuem

a mesma velocidade de propagação. Esta é a consideração mais razoável a ser feita para este método visto que resulta em erros.

Continuando o mesmo raciocínio e levando-se em consideração que o terminal remoto também terá uma terminação cuja impedância é menor que Z_S , a OV refletida no terminal remoto também terá a mesma polaridade que a incidente. Logo, caso haja medição no terminal remoto - sua medição deve ser $(2i)$ para a referência do Tc utilizada.

Quando uma OV enxerga um curto circuito em sua frente, por definição, possui uma impedância baixa de forma a visualizar algo muito parecido com uma terminação com vários vãos. Desta maneira, o coeficiente de reflexão a partir do curto circuito também é positivo, não alterando a polaridade. Deve-se atentar que o coeficiente de refração em um curto circuito tem, tipicamente, o valor de 2. Ao refratar a onda advinda do terminal remoto, seu valor acaba ficando $(+2i)$ enquanto que a OV advinda do terminal local porém refletida na falta com coeficiente de reflexão positivo possui valor $(-i)$, como mostra a Figura 4.9. Desta maneira, o que chega ao TC é o valor $(+2i - i)$ resultando em $(+i)$. Novamente, como o coeficiente de reflexão do terminal local é positivo, ele reflete $(+i)$. Sua leitura então, no segundo ponto do terminal local é de $(+2i)$. Perceba que na primeira OV recebida pelo terminal local, sua polaridade era definida como $(-2i)$ enquanto que a segunda onda que chegou ao terminal local teve sua polaridade de $(+2i)$. Ou seja, polaridades invertidas.

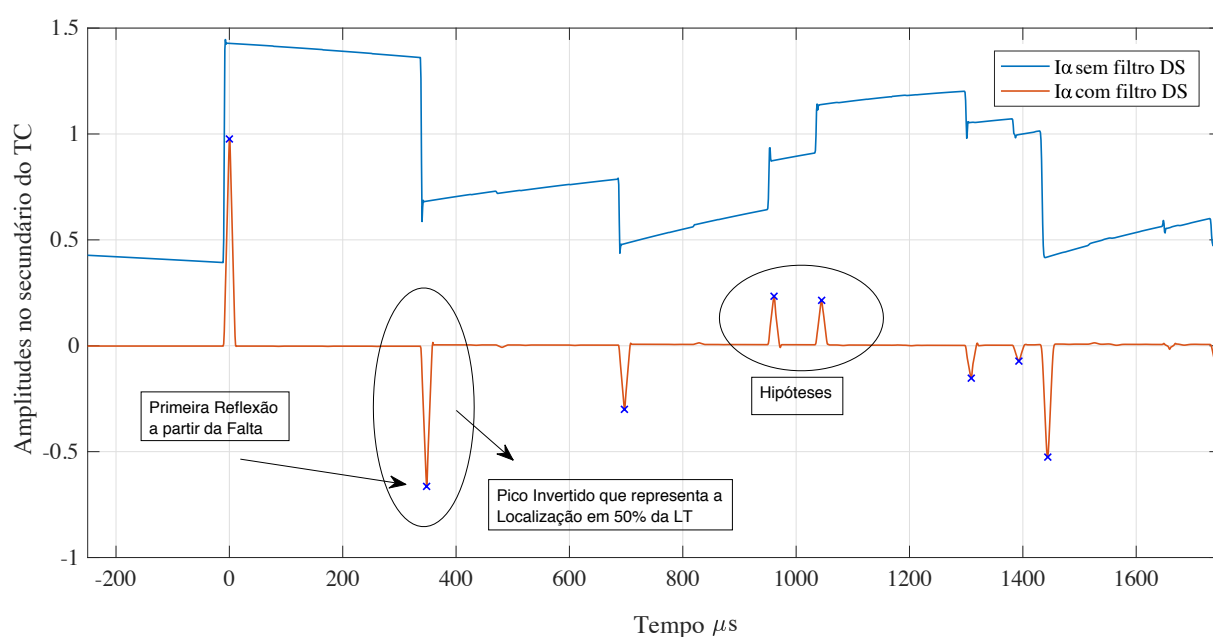


Figura 4.10. Análise de curto circuito exatamente no meio da LT

Assumindo este exemplo que desconsidera a dispersão e a atenuação da OV, perceba que, quando o curto circuito está exatamente no meio da LT, a OV que chega no terminal local correspondente à reflexão, onda a qual está intrinsecamente ligado à localização da falta, podem estar com polaridade invertida. Desta maneira, o método SETWFL-SEL deixa de considerá-la uma vez que as hipóteses analisadas somente possuem a mesma polaridade da primeira OV incidente. Como, neste caso, a polaridade é trocada, já que as OVs que vieram do terminal local com a que veio do remoto se sobrepõem, o método não acertará nunca uma vez que não considera esta inversão de fases, pelo menos de acordo com a análise da literatura atual.

4.6.2 Curto Circuito em 99% da Linha de Transmissão

Este curto circuito gerou problemas de forma a exigir uma maior quantidade de hipóteses a serem analisadas. Como já foi mencionado, o algoritmo analisa apenas 15 hipóteses dentro da janela de observação 2. Porém, quando se analisa uma falta em 99% da LT, o resultado obtido consiste em 18 hipóteses para a linha de transmissão simulada na Figura 4.11.

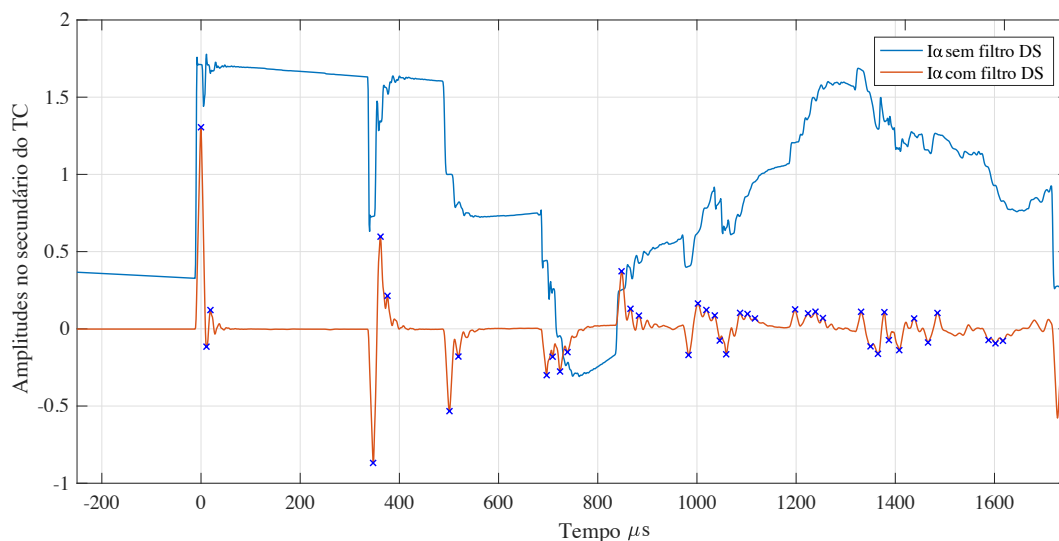


Figura 4.11. Curto circuito em 99% da LT tendo como resposta 18 Hipóteses

A explicação para este tipo de erro pode estar vinculada à grande quantidade de OVs que se apresentam dentro de uma janela de observação determinada. Perceba que para um curto circuito em 99% da LT existirá uma grande quantidade de ondas refletidas a partir da falta com mesma polaridade que ela. Dessa maneira, a quantidade de hipóteses cresce muito. O mesmo pode ser analisado para as OVs em 1% da LT que foi omitido uma vez que a análise é bem

parecida. Caso haja linhas de transmissão adjacentes tudo isso pode piorar uma vez que mais OVs serão analisadas pelo relé local. A Figura 4.11 mostra a grande quantidade de OVs que chegam ao terminal local em um curto circuito em 1% da LT. Perceba que o SETWFL-SEL não possuirá resultados em curtos como estes uma vez que somente analisa até a 15ª hipótese e, para esses casos, mais de 15 hipóteses são calculadas.

Tentou-se aumentar a quantidade de hipóteses analisadas de forma a tentar chegar em resultados satisfatórios, porém não foi possível vislumbrar soluções para o problema.

CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho foram apresentadas simulações de curtos circuitos monofásicos de tal maneira a analisar o método de localização de faltas pela teoria de ondas viajantes baseado-se apenas em registros oscilográficos de um terminal da linha. Desta maneira, foram avaliados 3 casos distintos detalhando a aplicação do método.

Inicialmente, foram tratados os conceitos fundamentais para o entendimento do que é uma OV. Além disso, foi necessário entender como funcionam as metodologias utilizadas atualmente para a localização de faltas no sistema de transmissão de energia elétrica, entre eles, os métodos DETWFL - *Double Ended Traveling Wave Fault location*; SEZFL - *Single Ended Impedance Fault Location*, o DEZFL - *Double Ended Impedance Fault Location* e o SETWFL *Single Ended Impedance Fault Location* analisado.

Após esta análise, foi feito um passo a passo do que o método SETWFL-SEL faz, como ele lida com os dados em questão de filtragem, e o que se deve fazer, dentro das janelas de observação, para que se resulte em uma localização de falta satisfatória. Para isso, foram esclarecidos os métodos RTT e ETW que estimam os pesos necessários para cada hipótese do algoritmo. Com isso, consegue-se calcular a localização do curto de forma confiável.

Em seguida, foram dadas três exemplificações de curtos-circuitos em dois sistemas distintos. O primeiro foi um circuito com linha adjacente, em que as OVs sofrem reflexões também dentro das linhas adjacentes. Já o segundo foi uma linha de transmissão simples, sem nenhuma linha adjacente. Para tanto, aplicaram-se faltas monofásicas em pontos distintos da linha de transmissão para os dois circuitos. Os resultados apresentados foram as respostas da implementação feita a partir do método SETWFL-SEL.

Por fim, após várias simulações concretas em vários pontos distintos das linhas de transmissão, percebeu-se que o método SETWFL-SEL, trazido pelo artigo Guzmán *et al.* (2017), realmente possui resultados promissores para os casos simulados, porém possui limitações como

curtos perto dos terminais e exatamente no centro da linha de transmissão.

Com estas limitações, abre-se espaço para futuros estudos quanto a este método. Entre eles:

- Analisar soluções para o curto circuito exatamente no meio da linha de transmissão
- Analisar o SETWFL-SEL para sinais reais e com simulações em massa.
- Avaliar o comportamento do SETWFL-SEL para quando se tem resultados anteriores de DETWFL
- Avaliar o comportamento do SETWFL-SEL para quando se tem resultados anteriores de DEZFL
- Avaliar o comportamento do SETWFL-SEL para quando se tem resultados anteriores de SEZFL
- Avaliar o comportamento do SETWFL-SEL para quando se tem resultados anteriores de todos os outros métodos
- Avaliar o método SETWFL-SEL para faltas bifásicas, bifásica-terra e trifásicas.
- Avaliar, por meio de uma simulação paramétrica, um análise da variação do pico mínimo detectado após filtragem DS.
- Avaliar diferentes valores de tolerância e dos tamanhos das janelas de observação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERNANDES, A. da S. *Uma Nova Abordagem da Proteção de Linhas de Transmissão Baseada na Comparação de Fases, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica*. [S.l.], 2016. Citado na página 8.
- FERNANDES, P. G. G. *Filtro Anti-Aliasing para Sistemas de Aquisição Sincronizada Implementado em FPGA*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação de Engenharia, 2011. Citado na página 15.
- FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. *ATP – Alternative Transients Program: Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. CLAE: Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996. Citado na página 20.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado na página 8.
- GUZMÁN, A.; KASZTENNY, B.; TONG, Y.; MYNAM, M. *Accurate and Economical Traveling-Wave Fault Locating Without Communications*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA and Bonneville Power Administration, 2017. Citado 15 vezes nas páginas 3, 6, 11, 13, 14, 17, 23, 24, 25, 26, 28, 31, 45, 57, and 65.
- LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; COSTA, C.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N. S. D.; NEVES, W. L. A.; MORAES, S. *Methodology for Protection Performance Evaluation on Power Transmission Networks*. [S.l.], 2018. Citado na página 34.
- LOPES, F.; NEVES, W.; LEITE, E.; RIBEIRO, J. ao. Aplicação do filtro differentiator-smoother durante a análise de ondas viajantes em linhas de transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA). Universidade de Brasília, DF, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 and 21.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados N/ ao Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado na página 2.
- METELLO, E. *Transformada Wavelet Aplicada Localização de Falhas por Ondas Viajantes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Unb - Universidade de Brasília, PPGENE. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 3.
- RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; AO, M. P. B. *Sistemas de Inspeção de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Veículos aéreos não tripulados*. S. J. Campos, SP, Brazil, 2009. Citado na página 1.
- SCHUTZE; MOTTA, A.; REZENDE; BANDEIRA, L. *A Demanda de Energia Elétrica no Brasil*. Departamento de Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015. Citado na página 2.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. *Locating Faults by the Traveling Waves They Launch*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA and Bonneville Power Administration, 2014. Citado 8 vezes nas páginas 2, 5, 6, 11, 12, 13, 16, and 17.

SILVA, M. da. *Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Citado na página 3.

SOUZA, T. P. B. de. *Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas : Abordagem via Transformada Wavelet*. Campus Universitário de Fuamá, Belém-Pará, 2007. Citado na página 19.

TLEIS, N. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. [S.l.]: Elsevier. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 1.

VALINS, T. F. *Relé de Distância Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e Transformada de Wavelet*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Paulo, 2005. Citado na página 16.