



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA  
IMPACTO DA MEDIÇÃO DE SINAIS DE TENSÃO EM MÉTODOS DE  
LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS BASEADOS NO DOMÍNIO DO  
TEMPO**

**CABO DE SANTO AGOSTINHO  
DEZEMBRO DE 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA**

**IMPACTO DA MEDIÇÃO DE SINAIS DE TENSÃO EM MÉTODOS DE  
LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS BASEADOS NO DOMÍNIO DO  
TEMPO**

**Trabalho apresentado ao Curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal Rural de Pernambuco como  
requisito para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Prof. Dr. Raphael Leite de Andrade  
Reis, orientador**

**CABO DE SANTO AGOSTINHO  
DEZEMBRO DE 2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S587i

Silveira, Mirella Ilka Pereira da  
IMPACTO DA MEDIÇÃO DE SINAIS DE TENSÃO EM MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE CURTOS  
CIRCUITOS BASEADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO / Mirella Ilka Pereira da Silveira. - 2019.  
69 f. : il.

Orientador: Raphael Leite de Andrade Reis.  
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2019.

1. Linhas de Transmissão. 2. Localização de Falhas. 3. Ondas Viajantes. 4. Transformador de Potencial Capacitivo. I. Reis, Raphael Leite de Andrade, orient. II. Título

CDD 621.3

---

**MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA**

**IMPACTO DA MEDIÇÃO DE SINAIS DE TENSÃO EM MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS BASEADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

**Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Data de aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_**

**Banca examinadora**

---

**Prof. Dr. Raphael Leite de Andrade Reis, UACSA, UFRPE**  
**orientador**

---

**Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto, UACSA, UFRPE**  
**examinador**

---

**Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo, UACSA, UFRPE**  
**examinador**

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus por ser o autor da minha vida, o meu guia e meu sustento em todos os momentos.

Aos meus pais, que sempre estiveram comigo e me ensinaram a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu esposo, Eduardo, por estar sempre ao meu lado, sendo fortaleza, alegria, motivação, confiança, por ser sempre tão positivo e acreditar que tudo daria certo.

Aos meus familiares, em especial a minha avó Inalva e aos meus sogros por sempre terem uma palavra de ânimo.

A todos os meus professores de graduação que sem dúvida foram fundamentais na construção da minha vida profissional. Em especial ao professor Raphael pela orientação, paciência, conselhos e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento do TCC. Ao professor Ítalo, que sempre me ajudou em todos os assuntos relacionados à coordenação do curso.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes, ao Edivaldo pelo auxílio na solução de problemas encontrados no desenvolvimento do algoritmo e ao Gabriel, por toda ajuda.

Aos amigos da Tambaú pela amizade e compreensão, em especial ao Igor, meu supervisor de estágio.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse realizado.

## Resumo

Neste trabalho, avaliações acerca do impacto da utilização de medições de sinais de tensão no desempenho de métodos de localização de curtos-circuitos em linhas de transmissão (LT) baseados no domínio do tempo são realizadas. Para tanto, algoritmos de localização de faltas considerando medições de um e dois terminais da LT foram implementados no *software* Matlab®, sendo os dados de entrada das rotinas fornecidas por meio de medições de tensão e corrente provenientes de um transformador de potencial capacitivo (TPC) e de um transformador de corrente (TC), respectivamente. O desempenho das técnicas de localização de faltas é investigado por meio de várias simulações de curtos-circuitos em um sistema elétrico de potência (SEP) de 230 kV, considerando-se variações nos parâmetros de falta, como a resistência e o ângulo de incidência, além da resposta dinâmica do TPC em algoritmos de um terminal, a qual normalmente não é reportada na literatura. Dos resultados obtidos, constata-se que o algoritmo de dois terminais mostrou-se como mais robusto, uma vez que mais informações do SEP são utilizadas como dados de entrada da rotina, muito embora dependa de um canal de comunicação. No que tange ao algoritmo de um terminal, a resposta dinâmica do TPC pode alterar a polaridade das ondas viajantes detectadas no terminal monitorado, comprometendo, desta forma, a confiabilidade deste tipo de método caso mecanismos para compensar a resposta em frequência do dispositivo de medição não estejam disponíveis.

**Palavras-chave:** Linhas de transmissão; Localização de Faltas; Ondas Viajantes; Transformador de Potencial Capacitivo.

## **Abstract**

In this work, the impact of voltage measurements on the performance of traveling wave-based fault location functions is evaluated. Basically, one- and two-ended fault location algorithms were implemented in Matlab, being the voltage and current measurements used as data input for the routines taken from a coupling capacitive voltage transformer (CCVT) and a current transformer (CT), respectively. The performance of the fault location techniques is investigated by several short-circuit simulations in a 230 kV electrical power system, considering variations in the fault parameters such as resistance and inception angle. The CCVT dynamic response is also taken into account, especially in the one-terminal routine, which is rarely reported in the literature. From the obtained results, it can be seen that the two-terminal algorithm has shown to be more robust, since more information about the power network is used as input data, although it depends on a communication path. Regarding the one-terminal function, the CCVT dynamic response end may change the wave polarities detected at the monitored end, which affects the technique if ways to compensate the CCVT frequency response are not available.

**Keywords:** CCVT; Fault location; Transmission Lines; Traveling waves.

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma da classificação dos principais modelos de LT .....                            | 17 |
| Figura 2 - Circuito equivalente ao modelo PI para linhas curtas .....                                | 18 |
| Figura 3 - Circuito equivalente ao modelo PI para linhas médias.....                                 | 18 |
| Figura 4 - Modelo de J. Marti .....  | 23 |
| Figura 5 - Circuito equivalente ao modelo IARMA .....  | 24 |
| Figura 6 - Diagrama Unifilar genérico de um SEP .....  | 27 |
| Figura 7 - Ilustração das ondas viajantes incidentes, transmitida e refletida .....                  | 28 |
| Figura 8 - Onda de corrente em um ponto de junção .....  | 29 |
| Figura 9 - Atenuação dos coeficientes wavelet ao longo do tempo .....                                | 37 |
| Figura 10 - Diagrama de Bewley .....   | 30 |
| Figura 11 - (a) sinal senoidal com ruído; (b) coeficientes da TWDR; (c) coeficientes da TWD.....     | 36 |
| Figura 12 - Circuito básico de um TPC .....  | 38 |
| Figura 13 - Representação do SEP estudado.....   | 48 |
| Figura 14 – Metodologia utilizada durante as simulações .....  | 48 |
| Figura 15 - Circuito equivalente TPC.....  | 49 |
| Figura 16 - (a) Resposta em frequência de módulo (pu); (b) Resposta em frequência de fase (pu) ..... | 50 |
| Figura 17 - Resposta dinâmica dos sinais de tensão do primário e do secundário do TPC .....          | 51 |
| Figura 18 - Coeficientes <i>wavelet</i> para simulação com TPC ideal.....                            | 53 |
| Figura 19 - Coeficientes <i>wavelet</i> para simulação com TPC .....                                 | 53 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Síntese da revisão bibliográfica sobre localização de curtos-circuitos baseados na teoria das ondas viajantes ..... | 46 |
| Tabela 2 - Parâmetros de entrada para os algoritmos de um terminal.....  | 55 |
| Tabela 3 - Resultados obtidos para o algoritmo de um terminal.....   | 56 |
| Tabela 4 - Influência do ângulo de incidência para algoritmo de um terminal.....   | 57 |
| Tabela 5 - Influência da resistência de falta para algoritmo de um terminal .....  | 58 |
| Tabela 6 - Resultados obtidos para o algoritmo de dois terminais .....   | 59 |
| Tabela 7 - Resultados obtidos para o algoritmo de dois terminais .....   | 60 |

## Glossário e Lista de Símbolos

|          |   |
|----------|---|
| $x$      | Posição   |
| $V$      | Tensão  |
| $i$      | Corrente  |
| $V_R$    | Tensão de saída   |
| $I_R$    | Corrente de saída   |
| $\gamma$ | Constante de propagação   |
| $C$      | Capacitância  |
| $L$      | Indutância  |
| $t$      | Tempo   |
| $f_1$    | Ondas de tensão e corrente que se propagam no sentido positivo de $x$ . |
| $f_2$    | Ondas de tensão e corrente que se propagam no sentido negativo de $x$ . |
| $\omega$ | Frequência angular  |
| $V_m$    | Tensão de saída   |
| $V_k$    | Tensão de entrada   |
| $I_m$    | Corrente de saída   |
| $I_k$    | Corrente de entrada   |
| $\tau$   | Tempo de propagação mínimo da onda.                                     |
| AT       | Curto-circuito envolvendo a fase A e a terra                            |
| ABT      | Curto-circuito envolvendo a fase A, B e a terra                         |
| AB       | Curto-circuito envolvendo a fase A e B                                  |
| ABC      | Curto-circuito envolvendo a fase A, B e C                               |

## Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos e Contribuições</b> .....  | <b>14</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Organização do Trabalho</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Linhas de Transmissão</b> .....  | <b>16</b> |
| 2.1.1      | Modelos a Parâmetros Concentrados .....   | 17        |
| 2.1.2      | Modelos a Parâmetros Distribuídos .....   | 18        |
| 2.1.2.1.   | Modelos Constantes com a Frequência .....   | 19        |
| 2.1.2.1.1  | Modelo PI.....  | 19        |
| 2.1.2.1.2  | Modelo de <i>Bergeron</i> .....   | 20        |
| 2.1.2.2    | Modelos Dependentes da Frequência.....  | 21        |
| 2.1.2.2.1  | Modelos no Domínio Modal.....   | 22        |
| 2.1.2.2.2  | Modelos no Domínio de Fases .....   | 24        |
| <b>2.2</b> | <b>Localização de Curtos-circuitos em Linhas de Transmissão</b> ..                          | <b>25</b> |
| 2.2.1      | Ondas Viajantes .....   | 25        |
| 2.2.2      | Reflexões e Refrações .....   | 26        |
| 2.2.4      | Diagrama de <i>Bewley</i> .....   | 29        |
| 2.2.5      | Localização de faltas utilizando dados provenientes de um terminal .....                    | 31        |
| 2.2.6      | Localização de faltas utilizando dados provenientes de dois terminais .....                 | 31        |
| <b>2.3</b> | <b>Fundamentos da Transformada <i>Wavelet</i> aplicada à detecção de transitórios</b> ..... | <b>32</b> |
| 2.3.1      | Atenuação e Distorção das Ondas Viajantes .....   | 36        |
| <b>2.4</b> | <b>Transformador de Potencial Capacitivo</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>39</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Detecção de faltas baseada na teoria das ondas viajantes</b> .....                       | <b>39</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Localização de faltas baseada na teoria das ondas viajantes</b> .                        | <b>41</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Impacto do TPC em algoritmos de localização de faltas</b> .....                          | <b>44</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Síntese da Revisão Bibliográfica</b> .....   | <b>45</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Metodologia</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Impacto do Transformador de Potencial Capacitivo</b> .....                               | <b>49</b> |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 4.2.1                                   | Impacto do TPC na localização de faltas com dados de um terminal .....    | 51        |
| 4.2.2                                   | Impacto do TPC na localização de faltas com dados de dois terminais ..... | 58        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> |   | <b>62</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

As linhas de transmissão (LTs) integram elementos importantes do sistema elétrico, sendo destinadas a transportar a energia elétrica entre as subestações. No Brasil, as LTs exercem um valor importante devido às grandes distâncias entre os centros consumidores e as usinas de geração, e, devido a seus tamanhos, estão mais suscetíveis à ocorrência de distúrbios, a exemplos de descargas atmosféricas. Neste cenário, a aplicação de algoritmos que apontem precisa e rapidamente o local da falta em LTs é fundamental, de modo a possibilitar um maior índice de continuidade do serviço do fornecimento de energia elétrica, o qual é fator determinante para medir os indicadores de qualidade das concessionárias de energia frente ao setor elétrico. Desta forma, a determinação do ponto de ocorrência do distúrbio é essencial para agilizar as atividades das equipes de manutenção das empresas no restabelecimento do serviço de energia elétrica (SAHA *et al.*, 2010).

Vários algoritmos são reportados na literatura para localização de curtos-circuitos em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), de onde se destacam as funções baseadas na teoria de ondas viajantes, sendo, inclusive, embarcadas nos dispositivos de proteção mais atuais (FISCHER *et al.*, 2012). A classificação dos algoritmos de localização de faltas se dá quanto ao número de terminais nos quais são feitas as medições, bem como quanto à utilização de dados de tensão e corrente de medições sincronizadas ou não. Geralmente, as técnicas são divididas em quatro grupos: 1) métodos baseados em componentes fundamentais, em 2) componentes de alta frequência, 3) métodos baseados em inteligência artificial e 4) métodos baseados na teoria de ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010).

Os algoritmos que utilizam o método baseado em componentes fundamentais calculam o ponto de defeito a partir da impedância estimada do trecho da linha pelo

dispositivo de proteção, porém esses algoritmos estão sujeitos a erros devido aos efeitos da corrente de carga, resistência, acoplamento mútuo, etc (SAHA *et al.*, 2010) (DAS *et al.*, 2014).

A fim de ultrapassar os erros causados pelos métodos das componentes fundamentais, algoritmos baseados em inteligência artificial têm sido desenvolvidos e apresentados nos últimos anos, como o proposto em Chen & Maun (2000). Apesar de terem um bom desempenho apresentam limitadas aplicações em campo por serem bastante complexos e exigirem alto custo computacional, e também, por dependerem das propriedades do sistema monitorado necessita de atualização dos algoritmos, caso aconteça alterações nas configurações do SEP analisado (LOPES, 2014).

Com vistas a minimizar as limitações dos algoritmos baseados em componentes fundamentais, a análise de faltas em LTs por meio da teoria de ondas viajantes vem sendo difundida cada vez mais nos últimos anos entre os pesquisadores e em aplicações reais, destacando-se pela exatidão de seus resultados em comparação com os outros métodos tradicionalmente utilizados. Embora seja tipicamente mencionado que a utilização de altas taxas de amostragem se configura como uma limitação para aplicação dessas técnicas, o progresso atual da tecnologia dos conversores analógicos/digitais (A/D) de altas taxas de amostragem e do processamento de sinais tem tornado possível a aplicação de tais rotinas (FISCHER *et al.*, 2012). Além disso, técnicas de processamento paralelo tendem a viabilizar altas velocidades para execução de tais tarefas (SILVEIRA *et al.*, 2001).

Os pontos de ocorrência dos curtos-circuitos podem ser estimados por meio de algoritmos que dependem de medições oriundas de um ou mais terminais monitorados da LT. Basicamente, as técnicas que utilizam dados de dois terminais da linha são relatadas como mais robustas devido a depender apenas da detecção da primeira frente de onda no terminal monitorado, embora necessitem de canais de comunicação para troca de informações, que podem apresentar esquemas de sincronização ou não. Já as funções de um terminal necessitam de medições provenientes de apenas um terminal monitorado da LT, não requisitando, desta forma, canais de comunicação e seus dispositivos associados, configurando-se

como uma alternativa de menor custo. Entretanto, técnicas mais robustas se fazem necessárias para identificar corretamente as ondas viajantes refletidas do ponto de falta, cujas soluções reportadas na literatura ainda são afetadas por fatores como resistência de falta, transformador de potencial capacitivo (TPC), entre outros (SAHA *et al.*, 2010).

Neste contexto, embora seja comumente reportado que o uso de medições de sinais de tensão oriundas de TPC afeta o desempenho de técnicas de localização de faltas baseadas na teoria de ondas viajantes, poucos trabalhos avaliam o impacto da resposta dinâmica de tais equipamentos, principalmente no que tange às rotinas de um terminal. Portanto, de modo a preencher tal lacuna existente na literatura, investigações acerca do impacto da resposta em frequência do TPC em algoritmos de localização de faltas de um e dois terminais são realizadas neste trabalho. Para tanto, avaliou-se o impacto do TPC sobre a polaridade das ondas viajantes, bem como de parâmetros de falta, a exemplo da resistência e do ângulo de incidência.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

A principal contribuição deste trabalho consiste em apresentar as limitações de se utilizar dados de tensões provenientes de TPC como entrada de algoritmos de localização de faltas em LT baseados na teoria de ondas viajantes, correlacionando a resposta dinâmica do equipamento com a alteração da polaridade dos surtos, algo que normalmente não é reportado na literatura. Para tanto, os objetivos são:

- Implementar um SEP de 230 kV no ATP (*Alternative Transientes Program*) para simulação das faltas;
- Implementar um algoritmo para detecção da ocorrência de curtos-circuitos utilizando a Transformada *Wavelet*;
- Implementar métodos para localizar faltas com dados de um e dois terminais;
- Realizar análise de sensibilidade para o TPC, resistência de falta e ângulo de incidência.

### 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Além deste capítulo introdutório, é apresentado no capítulo 2 uma fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, em que são abordados alguns dos principais conceitos sobre as linhas de transmissão, seus modelos e classificações, além de métodos de localização de curtos-circuitos. Na última seção, uma abordagem sobre os fundamentos da transformada *wavelet* é apresentada.

No capítulo 3, uma revisão bibliográfica acerca de métodos de localização de faltas e detecção de distúrbios em LT através de ondas viajantes é realizada, incluindo os algoritmos de um e dois terminais, além da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) e da Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR).

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada durante os estudos e os resultados obtidos das simulações, em que é feita uma análise do impacto dos parâmetros de falta e do TPC.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

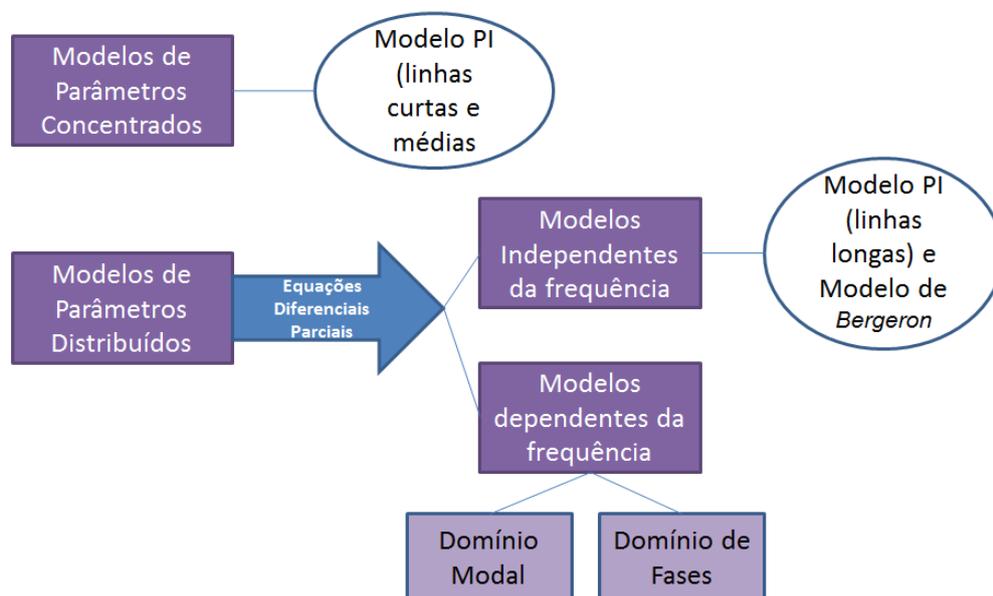
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Linhas de Transmissão

As LTs transportam a energia das usinas elétricas geradoras até as unidades consumidoras. As LTs podem ser classificadas conforme a natureza de seus parâmetros e a relação com a frequência (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001), além da classificação pelo seu comprimento. As linhas são tipicamente classificadas como curtas, caso apresentem até 80 km do seu comprimento; médias para aquelas com comprimento entre 80 km a 240 km e longas para as que têm seu comprimento superior a 240 km (GLOVER *et al.*, 2011). No que se refere ao transporte de energia, as LTs classificam-se em baixa, média ou alta tensão (WELTON, 2010).

As redes de transmissão ou distribuição apresentam especificidades elétricas de resistência, indutância, condutância e capacitância. A resistência é expressa em ohm ( $\Omega$ ). A indutância e a capacitância existem decorrentes dos campos magnéticos e elétricos ao redor do condutor, sendo expressas em Henry (H) e Faraday (F), respectivamente. Já a condutância (G) representa a capacidade com que a corrente elétrica flui por um condutor e relaciona-se com fugas de corrente que acontecem nos isoladores e pelo efeito corona (WELTON, 2010). Por apresentar um valor tipicamente pequeno diante da corrente que passa nas LTs, seus valores são normalmente desconsiderados em análises simplificadas das linhas. Portanto, os valores de resistência, indutância e capacitância são cruciais para a modelagem matemática das LTs (WELTON, 2010). Um fluxograma com a classificação dos principais modelos de LT com seus parâmetros concentrados ou distribuídos e dependentes, ou não da frequência é apresentado na Figura 1 (RESTREPO *et al.*, 2008) (ARAÚJO; NEVES, 2015).

Figura 1 - Fluxograma da classificação dos principais modelos de LT



Fonte: Autoria Própria

### 2.1.1 Modelos a Parâmetros Concentrados

Os modelos de LT a parâmetros concentrados são indicados para modelar as linhas curtas e médias, pois a variação dos parâmetros diante do seu comprimento é muito pequena, podendo, deste modo, ser desprezada (ARAÚJO; NEVES, 2015). O motivo dessa pequena variação se dá porque a extensão da LT é muito menor que o comprimento de onda, isto é, para uma frequência de 60 Hz, o comprimento de onda é de aproximadamente 5.000 km. O modelo típico de parâmetros concentrados é o modelo PI.

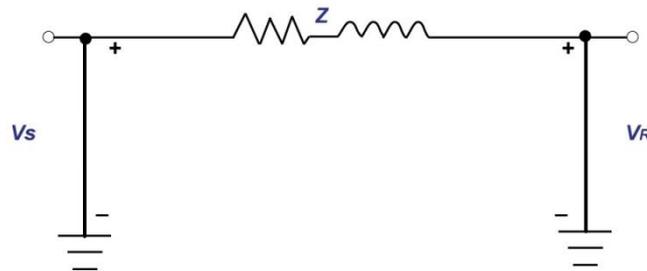
#### Modelo PI

Para linhas curtas, as LTs são representadas pela resistência em série com a indutância, sendo a capacitância desprezada. Já para linhas médias, a capacitância é considerada e concentrada na admitância total da linha (GRAINGER; STEVENSON, 1994), conforme:

$$Y = j\omega Cl, \quad (2.1)$$

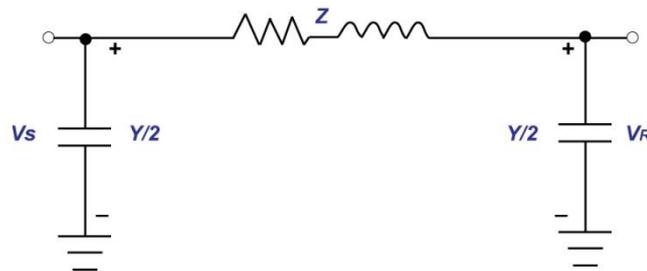
em que:  $Y$  é a admitância total da linha (S),  $C$  é a capacitância (F/km) e  $l$  é o comprimento da linha (km). O circuito PI para linhas curtas está representado na Figura 2, e para linhas médias na Figura 3. Em ambas as figuras,  $V_S$  e  $V_R$  consistem nas tensões nos terminais emissor e receptor, respectivamente.

Figura 2 - Circuito equivalente ao modelo PI para linhas curtas



Fonte: Autoria Própria

Figura 3 - Circuito equivalente ao modelo PI para linhas médias



Fonte: Autoria Própria

### 2.1.2 Modelos a Parâmetros Distribuídos

No modelo de linhas a parâmetros distribuídos, os parâmetros longitudinais e transversais da LT são distribuídos ao longo da sua extensão, sendo a distribuição desses parâmetros ao longo da linha relacionada com o modo como as tensões e as correntes se comportam diante de uma falta ou operações como manobras e

chaveamentos (MARTI, 1982). Esses modelos ainda podem ser classificados como dependentes ou independentes da frequência (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001) (RESTREPO *et al.*, 2008) (ARAÚJO; NEVES, 2015).

#### 2.1.2.1. Modelos Constantes com a Frequência

São considerados modelos de linhas independentes da frequência aqueles cuja relação entre a frequência ao longo da LT e os parâmetros seja constante. Geralmente essa frequência é padrão (60 Hz). Os principais modelos de LTs com parâmetros distribuídos e frequência constante são: o modelo PI para linhas longas e o modelo de Bergeron (DIEFENTHÄLER, *et al.*, 2019).

##### 2.1.2.1.1 Modelo PI

Para o modelo PI são utilizadas as equações diferenciais parciais (EDP), ajustadas ao circuito PI equivalente, em que as EDPs para tensão e corrente são funções da posição ( $x$ ), conforme:

$$\frac{dV(x)}{dx} = zI(x), \quad (2.2)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x), \quad (2.3)$$

em que  $z$  e  $y$  são a impedância e a admitância por unidade de comprimento e a impedância característica da linha é dada por  $Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$ . Através do estudo e manipulações matemáticas as equações para corrente elétrica e tensão são obtidas para qualquer comprimento da LT e são descritas pelas equações (2.4) e (2.5) (GRAINGER; STEVENSON, 1994):

$$V(x) = V_R \cosh(\gamma x) + Z_c \sinh(\gamma x) I_R, \quad (2.4)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R, \quad (2.5)$$

#### 2.1.2.1.2 Modelo de Bergeron

As primeiras soluções das equações do modelo de Bergeron foram obtidas por d'Alembert. Este modelo é baseado na teoria das ondas viajantes e também é denominado como método das características. Basicamente, o fenômeno de propagação de energia em uma LT é levado em consideração de modo que à medida que a onda viajante se propaga ao longo da linha, a mesma fica suscetível aos efeitos de atenuação e dispersão, demorando um tempo finito até que seja refletida por uma das extremidades da linha (DOMEL, 1969).

A princípio, considera-se uma linha com indutância ( $L$ ) e capacitância ( $C$ ) por unidade de comprimento e sem perdas (DOMMEL, 1969). Neste caso, em um determinado ponto  $x$  ao longo da linha, as tensões e correntes são explicitadas conforme:

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}, \quad (2.7)$$

A solução das equações (2.6) e (2.7) pode ser expressa por:

$$i(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt), \quad (2.8)$$

$$V(x, t) = Zf_1(x - vt) + Zf_2(x + vt), \quad (2.9)$$

sendo  $Z$  a impedância de surto da LT dada por  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , em um determinado ponto  $x$  da linha e  $v$  a velocidade de propagação da onda, dada por  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , sendo  $L$  e  $C$  a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da LT, respectivamente. Se a velocidade de propagação for relativa ao modo aéreo,  $L$  e  $C$  são valores de sequência positiva. Porém, se a velocidade de propagação da onda for relativa ao modo terra,  $L$  e  $C$  são valores de sequência zero. O modo aéreo pode ser conceituado pelo uso de condutores nus montados em apoios por meio de isoladores, já o modo terra é constituído pelo uso de condutores isolados ao longo de seu comprimento. Geralmente, o modo aéreo é mais utilizado devido ao seu baixo custo comparado ao modo terra.

### 2.1.2.2 Modelos Dependentes da Frequência

A modelagem das LTs baseada em modelos dependentes da frequência consideram os efeitos da frequência sobre os parâmetros dos condutores, portanto, atuam em determinada faixa de frequência. Este modelo representa uma LT com mais precisão e consideram fenômenos como a propagação de ondas, transitórios eletromagnéticos, sobretensões, entre outros (WELTON, 2010) (HOSHMEH; SCHMIDT, 2017). Embora representem com maior precisão os transitórios eletromagnéticos induzidos no SEP, algumas desvantagens desse modelo estão na complexidade dos cálculos matemáticos e no custo computacional para a solução em relação ao tempo de simulação (RESTREPO *et al.*, 2008), o que ocorre pelo uso de numerosas técnicas computacionais e matemáticas, como a utilização de convolução recursiva, transformada inversa de *Fourier*, entre outras

(MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001). Métodos baseados nesse modelo requerem a transformação da resposta do domínio da frequência para o domínio do tempo. Teoricamente, podem ser classificados em modelos desenvolvidos no domínio modal e no domínio de fases.

Para os modelos que são desenvolvidos no domínio modal, é empregada uma transformação modal às variáveis de entrada, em que são obtidos três modos de propagação desacoplados, isto é, cada modo tem uma velocidade de propagação e matriz de impedância própria. Para obter os valores no domínio de fase, uma transformação inversa é empregada, de modo a apresentar os resultados em valores de componentes de fase. Transformadas típicas para obtenção dos modos aéreos e terra são dados pelas matrizes de transformação de *Clarke*, *Wedepohl*, etc. (MARTI; TAVIGHI, 2018) (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001). Diante da complexidade encontrada no modelo de LTs que aplicam matrizes de transformação modal dependentes da frequência, estudos propuseram modelos apoiados na solução de equações diretamente no domínio de fases.

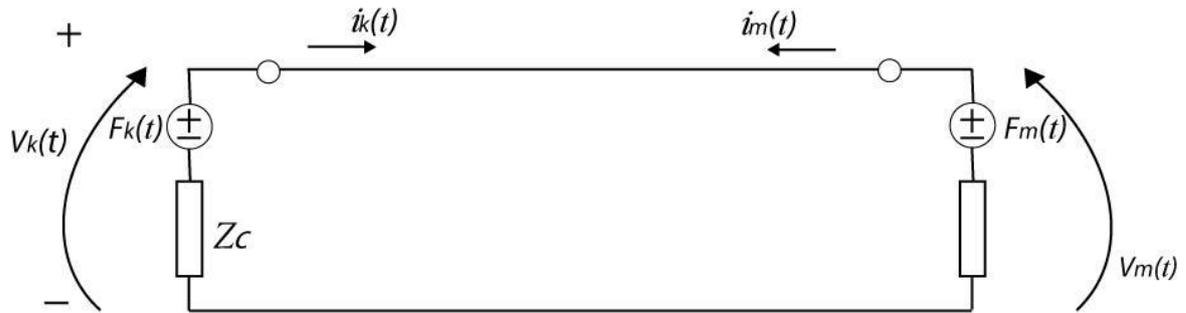
#### 2.1.2.2.1 Modelos no Domínio Modal

Os modelos no domínio modal baseiam-se na aplicação de uma transformação modal às entradas do sistema, em que são obtidos três modos de propagação desacoplados, em que cada fase do sistema tem uma velocidade de propagação e uma matriz própria de impedância. Os modos de propagação são os autovalores dos sistemas de equação que descrevem o comportamento de uma LT e a matriz de transformação consiste em um conjunto linear independente dos autovetores do sistema. A transformação inversa é aplicada posteriormente para obtenção dos resultados em componentes de fase (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001).

O modelo de J. Marti tem sido utilizado como modelo padrão para os modelos a parâmetros dependentes da frequência no domínio modal (MARTI, 1982b). As equações representadas no domínio da frequência e a solução são dadas pelas relações de *Woodruff*, sendo transformada logo após para o domínio do tempo. Na

Figura 4 o circuito equivalente para o modelo J. Marti é ilustrado e as principais equações são descritas a partir da equação (2.10):

Figura 4 - Modelo de J. Marti



Fonte: Autoria Própria

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega), \quad (2.10)$$

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega), \quad (2.11)$$

$$B_k(\omega) = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)t}, \quad (2.12)$$

$$B_m(\omega) = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)t}. \quad (2.13)$$

em que:  $F_k$  e  $F_m$  são funções de propagação de ondas progressivas e  $B_k$  e  $B_m$  são funções de propagação das ondas regressivas. A impedância característica ( $Z_c$ ) e a constante de propagação ( $\gamma$ ) são expressas por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R(\omega) + j\omega L(\omega)}{G(\omega) + j\omega C(\omega)}}, \quad (2.14)$$

$$\gamma = \sqrt{(R(\omega) + j\omega L(\omega))(G(\omega) + j\omega C(\omega))}. \quad (2.15)$$

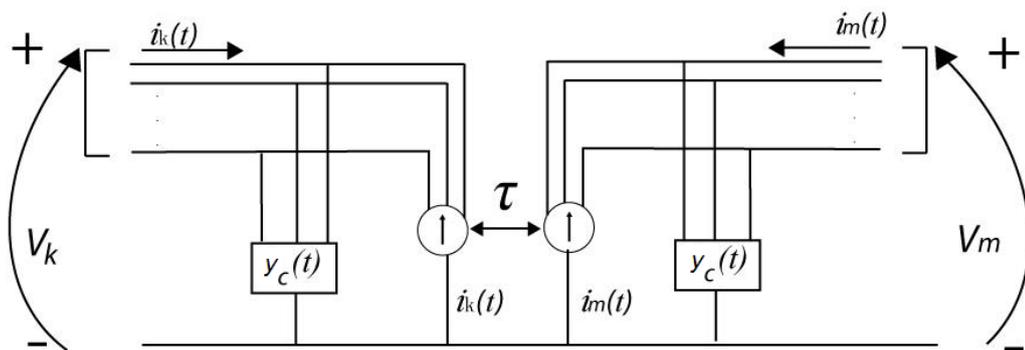
A relação entre as tensões do sistema pode ser definida conforme:

$$v_m(t) - Z_c i_m(t) = v_k(t - \tau) + Z_c i_k(t - \tau). \quad (2.16)$$

### 2.1.2.2.2 Modelos no Domínio de Fases

Estes modelos possuem uma maior complexidade, porém são mais precisos quando comparados aos modais e podem ser aplicados a LTs de diferentes geometrias e configurações (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001). Este modelo permite transformar as equações de linha do domínio da frequência diretamente para o domínio do tempo. Destaca-se o modelo proposto por (NODA *et al.*, 1996), em que as equações de linha são baseadas no modelo IARMA (*Interpolated Auto-Regressive Moving Average*). O circuito equivalente a este modelo é apresentado na Figura 5 e as principais equações são descritas a partir da equação (2.17):

Figura 5 - Circuito equivalente ao modelo IARMA



Fonte: Autoria Própria

$$I_k(\omega) = Y_c(\omega)V_k(\omega) - e^{-j\omega\tau}H^T(\omega)Y_c(\omega)V_m(\omega) + I_m(\omega), \quad (2.17)$$

$$I_m(\omega) = Y_c(\omega)V_m(\omega) - e^{-j\omega\tau}H^T(\omega)Y_c(\omega)V_k(\omega) + I_k(\omega), \quad (2.18)$$

em que:  $H(\omega)$  é a matriz de deformação da onda no domínio de fase,  $\tau$  o tempo de propagação mínimo da onda e  $Y_c$  a matriz de admitância característica. As equações no domínio do tempo, aplicando a transformada, são:

$$i_k(t) = y_c(t)v_k(t) - i'_k(t), \quad (2.19)$$

$$i_m(t) = y_c(t)v_m(t) - i'_m(t), \quad (2.20)$$

$$i'_k(t) = h^T[y_c(t)v_m(t-\tau) + i_m(t-\tau)], \quad (2.21)$$

$$i'_m(t) = h^T[y_c(t)v_k(t-\tau) + i_k(t-\tau)], \quad (2.22)$$

em que  $h(t)$  é a transformada inversa de *Fourier* de  $H(\omega)$ .

## 2.2 Localização de Curtos-circuitos em Linhas de Transmissão

Os princípios básicos de análise e de localização de faltas são descritos de forma comparativa, sendo analisados em relação à sua eficácia na detecção e localização.

Embora as técnicas de localização de faltas possam ser enquadradas em métodos baseados em fasores e métodos baseados no domínio do tempo (SAHA *et al.*, 2001), as análises realizadas neste trabalho são voltadas para as técnicas baseadas no domínio do tempo (ou teoria de ondas viajantes), uma vez que se configuram como as tendências mais recentes a serem embarcadas nos dispositivos de proteção e localização de curtos-circuitos (SHARMA; MYNAM, 2018), além de apresentarem desafios no contexto de localização de faltas com dados de um terminal, principalmente no que tange à detecção de ondas refletidas do ponto de ocorrência do distúrbio.

### 2.2.1 Ondas Viajantes

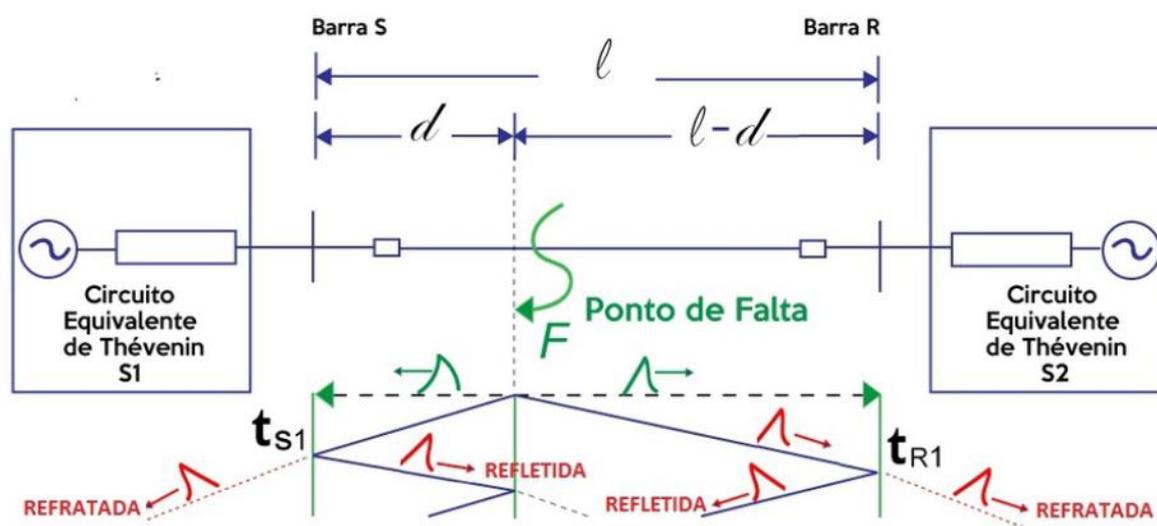
Ondas viajantes são sinais de alta frequência gerado por qualquer distúrbio em uma LT que viajam de um extremo de uma linha para o outro, onde sofrem reflexões e refrações. Esses distúrbios podem ser gerados a partir de uma descarga atmosférica ou de uma interrupção das condições de regime permanente do SEP. Basicamente, os sinais elétricos (tensão e corrente) se comportam como surtos, trafegando ao longo da linha, sofrendo atenuações à medida que se propagam, devido às perdas na LT (GREENWORD, 1971).

Uma falta incidente em uma LT gera tanto ondas viajantes de corrente como de tensão. Essas ondas viajam até encontrar um ponto de descontinuidade, como uma falta, ou um barramento do SEP. Ao encontrar tal ponto de descontinuidade, a onda viajante sofrerá reflexões e refrações, gerando novas ondas que se propagam ao longo do sistema. Os surtos refletidos e refratados podem ser estimados a depender dos coeficientes de reflexão e refração em descontinuidades, da velocidade de propagação da onda e da impedância de surto da LT. Vale ressaltar que, durante a propagação ao longo da linha, as ondas viajantes são atenuadas principalmente por perdas resistivas e por corrente de fuga, além de poderem sofrer distorções na sua forma de onda (NAIDU, 1985).

### 2.2.2 Reflexões e Refrações

O conceito de ondas viajantes aplicado à localização de faltas pode ser melhor compreendido pelo diagrama apresentado na Figura 6, o qual consiste em um diagrama unifilar de um SEP contendo duas barras (S e R) conectadas por meio de uma LT de comprimento  $\ell$ . Conectadas às barras S e R, os circuitos elétricos correspondentes são representados por seus respectivos circuitos equivalentes de Thévenin S1 e S2.

Figura 6 - Diagrama Unifilar genérico de um SEP

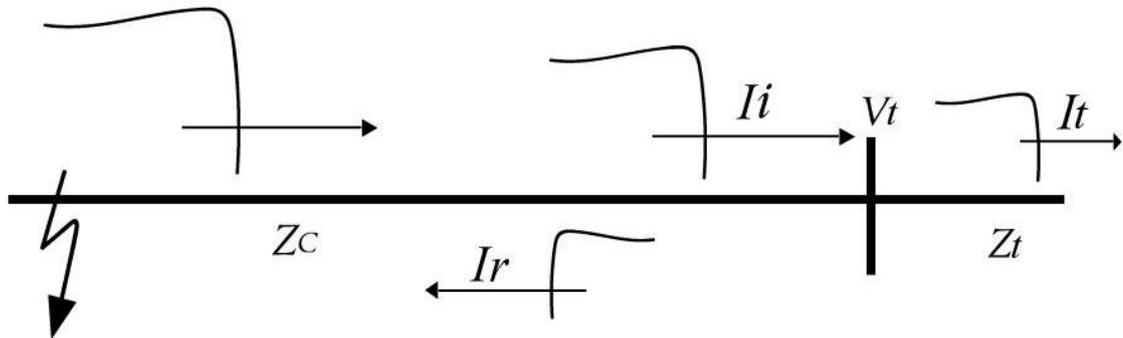


Fonte: Autoria Própria

Conforme ilustrado na Figura 6, a ocorrência de uma falta produz em um ponto  $d$  qualquer distante da barra S1 ondas de tensão que se propagam a partir do ponto de defeito (descontinuidade) em ambos os terminais. Ao encontrar uma descontinuidade, essas ondas se refletem e retornam ao ponto de defeito, onde haverá novas reflexões e refrações. A primeira onda que atinge o terminal monitorado é denominada de onda incidente, sendo as duas ondas originadas dela denominadas ondas refletidas e refratadas (transmitidas). Essas ondas satisfazem as leis de *Kirchoff*, como também as equações diferenciais das LTs e obedecem aos princípios de conservação de energia (BEWLEY, 1963).

As ondas viajantes de tensão e corrente são relacionadas pela impedância característica da linha ( $Z_c$ ). Quando a onda incidente de tensão e corrente,  $V_i$  e  $I_i$ , respectivamente, atinge um terminal da linha, uma parte da onda é transmitida e outra refletida. Os subscritos  $i$ ,  $r$  e  $t$ , referem-se às ondas incidente, refletida e transmitida ou refratada, respectivamente. A relação entre as ondas incidente, refletida e refratada depende da impedância vista do ponto de descontinuidade (terminação), conforme ilustrado na Figura 7 e nas equações (2.23) a (2.26):

Figura 7 - Ilustração das ondas viajantes incidentes, transmitida e refletida



Fonte: Autoria Própria

$$Z_t = \frac{V_t}{I_t} = \frac{V_i + V_r}{I_i + I_r}, \quad (2.23)$$

sendo  $V_t$  e  $I_t$  a tensão e corrente na barra, respectivamente,  $V_r$  e  $I_r$  a tensão e corrente refletidas na barra, respectivamente, como:

$$Z_c = \frac{V_i}{I_i} \quad (2.24)$$

e

$$Z_c = -\frac{V_r}{I_r}, \quad (2.25)$$

obtém-se de (2.23), (2.24) e (2.25):

$$I_r = \frac{Z_c - Z_t}{Z_c + Z_t} I_i = \Gamma I_i, \quad (2.26)$$

sendo  $\Gamma$  o coeficiente de reflexão das correntes.

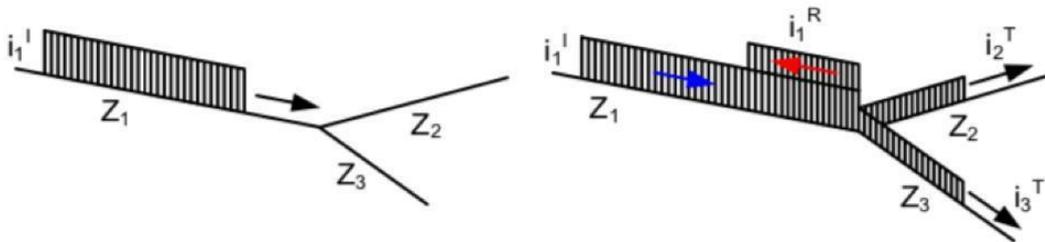
Por meio de manipulações com as equações (2.24), (2.25) e (2.26), tem-se:

$$I_t = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_t} I_i = T I_i, \quad (2.27)$$

em que T é o coeficiente de transmissão.

Para terminações que apresentam múltiplos segmentos de linha conectados, conforme apresentado na Figura 8, os coeficientes  $\Gamma$  e T são dados por:

Figura 8 - Onda de corrente em um ponto de junção



Fonte: (GUZMÁN *et al.*, 2018)

$$\Gamma = \frac{z_1 - z_p}{z_1 + z_p}, \quad (2.28)$$

$$T = \frac{2 \cdot z_1}{z_1 + z_p}, \quad (2.29)$$

sendo  $z_1$  é a impedância característica da linha de transmissão 1 e  $z_p$  é a impedância equivalente das impedâncias características dos segmentos 2 e 3, conectados em paralelo.

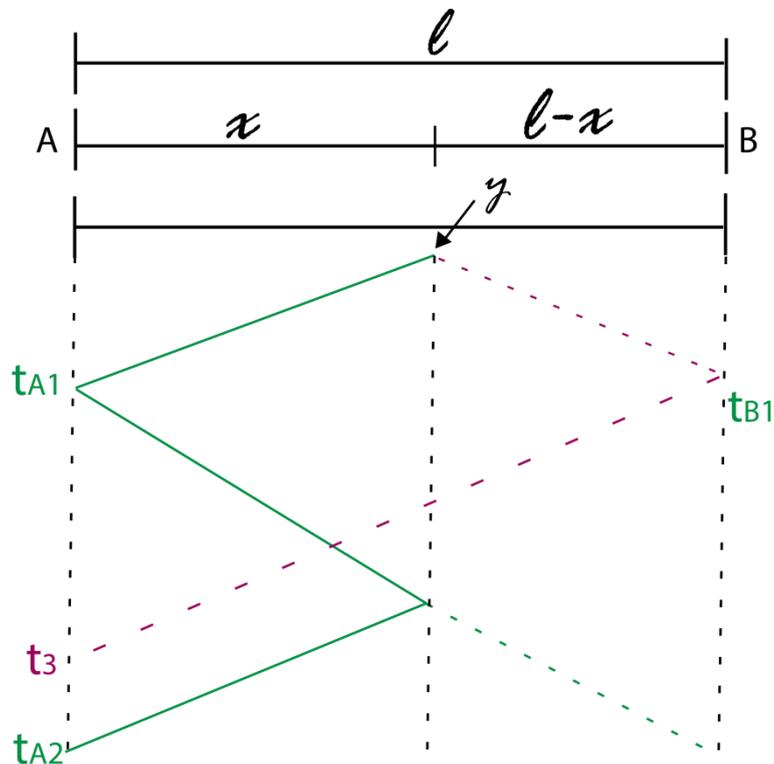
#### 2.2.4 Diagrama de *Bewley*

Os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes podem ser melhor compreendidos por meio do diagrama de *Bewley*, ou diagrama espaço-tempo (BEWLEY, 1963). Este diagrama é representado pela posição e

direção de cada onda viajante (incidente, refletida e transmitida) em cada instante de tempo. Conhecendo-se os conceitos de atenuação e distorção é possível fazer uma análise dos registros oscilográficos das ondas viajantes do sinal representado (NAIDU, 1985).

O diagrama de *Bewley* é um gráfico simples que apresenta as relações de tempo-espço dos sinais analisados da LT com pontos de descontinuidade. Basicamente, quando uma onda atinge uma descontinuidade, esta sofre reflexões e refrações sucessivas até serem completamente amortecidas e o estado de pós falta seja alcançado. Um exemplo do diagrama de *Bewley* é apresentado na Figura 9 para uma falta ocorrendo à  $x$  km do terminal monitorado (barra A). Os tempos  $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$  e  $t_3$  referem-se aos tempos de detecção da onda incidente, da onda refletida do ponto de falta e da onda refratada da barra B, respectivamente, no terminal monitorado. Basicamente, os algoritmos de localização de faltas baseados no domínio do tempo residem na identificação correta dos referidos tempos.

Figura 9 - Diagrama de Bewley



### 2.2.5 Localização de faltas utilizando dados provenientes de um terminal

Segundo Gale *et al.* (1993) conhecendo-se os tempos  $t_{A1}$  e  $t_{A2}$  na Figura 9, a distância do ponto de falta  $x$  referente a barra A ao terminal monitorado pode ser calculada conforme:

$$x = \frac{v \cdot (t_{A2} - t_{A1})}{2}, \quad (2.30)$$

em que  $v$  é a velocidade de propagação das ondas,  $t_{A1}$  é o tempo em que a primeira frente de onda (incidente) é detectada no ponto de medição e  $t_{A2}$  é o tempo de propagação da primeira onda refletida do ponto de falta, ou seja,  $t_{A2}$  é o tempo de retorno da primeira frente de onda até o ponto de falta e do ponto de falta até a barra monitorada. A velocidade de propagação das ondas é definida pelos parâmetros da linha ( $v = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ ), conforme exposto na seção 2.1.2.

Diante da independência de sincronização de dados entre os terminais da LT, as técnicas baseadas em um terminal tornam-se mais simples, contudo, são mais passíveis a erros devido à dependência da determinação de ondas refletidas do ponto de falta, que podem se confundir com ondas refratadas em outros pontos do SEP, a exemplo do instante  $t_3$  ilustrado na Figura 10 (REIS, 2019).

### 2.2.6 Localização de faltas utilizando dados provenientes de dois terminais

Segundo Gale *et al.* (1993), caso existam medições dos dois terminais da LT, a distância  $x$  do curto circuito pode ser estimada conforme:

$$x = \frac{\ell - (t_{B1} - t_{A1}) * v}{2}, \quad (2.31)$$

Sendo  $t_{A1}$  e  $t_{B1}$  os instantes de detecção das ondas incidentes detectadas nas barras A e B, respectivamente, cujos tempos são apresentados na Figura 9.

A estimação de  $x$  depende da velocidade que pode ser calculada por  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , ou aproximado de valores típicos a exemplo de 98% da velocidade da luz (REIS, 2019a).

A exatidão das técnicas de um e dois terminais dependem da detecção correta dos instantes de tempo  $t_{A1}$ ,  $t_{B1}$  e  $t_{A2}$ . Para tanto, alguns métodos são reportados na literatura, a exemplo do baseado na Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR), cujos fundamentos básicos são descritos na seção 2.3.

### 2.3 Fundamentos da Transformada *Wavelet* aplicada à detecção de transitórios

A transformada *wavelet* é uma ferramenta que tem sido bastante empregada no estudo de localização de faltas em LTs, de modo que sua aplicabilidade tem despertado um grande interesse dos pesquisadores de diversas áreas (BRITO, 1996).

Basicamente, a transformada *wavelet* possibilita a representação de um sinal simultaneamente nos dois domínios do tempo e da frequência, o que tipicamente não é possível utilizando a transformada de *Fourier*. Segundo Santoso *et al.* (1996), a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) é uma ferramenta atraente para detectar transitórios induzidos por distúrbios no SEP. Os transitórios resultantes das faltas não são estacionários nos domínios do tempo e da frequência, e diante desta característica, a transformada *wavelet* permite analisá-los de maneira apropriada.

Em 1992, Daubechies iniciou os estudos e conceituou a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) (DAUBECHIES, 1992). A eficácia da análise *wavelet* depende da escolha da *wavelet* mãe. Segundo Ngu *et al.* (2009), a *wavelet* mãe Daubechies 4, ou db4, é uma das mais apropriadas para realizar uma detecção rápida dos transitórios em sistemas de potência.

De acordo com Mallat (1989) o algoritmo rápido para o cálculo da TWD, conforme:

$$c_1(k) = \sum_n g(n - 2k)c_0(n), \quad (2.32)$$

$$d_1(k) = \sum_n h(n - 2k)c_0(n), \quad (2.33)$$

sendo  $c_1(k)$  e  $d_1(k)$  os coeficientes de aproximação e detalhe (coeficientes *wavelet*) da escala 1, respectivamente. Já  $g(k)$  e  $h(k)$  são os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente, e  $c_0$  o sinal original, que pode ser tensão ou corrente. A quantidade de filtros escala,  $g(k)$ , e *wavelet*,  $h(k)$ , dependem da *wavelet* mãe a ser utilizada. Os coeficientes do filtro da *wavelet* mãe db4 para TWD são (DAUBECHIES, 1992):

$$g(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (2.34)$$

$$g(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (2.35)$$

$$g(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (2.36)$$

$$g(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (2.37)$$

$$h(1) = g(4), \quad (2.38)$$

$$h(2) = -g(3), \quad (2.39)$$

$$h(3) = g(2), \quad (2.40)$$

$$h(4) = -g(1). \quad (2.41)$$

A partir das equações (2.32) e (2.33) percebe-se que para o cálculo da TWD é utilizado um processo de subamostragem por um fator de dois. Como consequência, esse processo pode afetar o uso da TWD diante de aplicações como a localização de faltas através das ondas viajantes. Porém, a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR) não realiza tal processo de subamostragem, sendo mais indicada para o desenvolvimento de algoritmos de localização de faltas (PERCIVAL; WALDEN 2000). Uma das vantagens da aplicação da TWDR é que esta pode ser aplicada a um número qualquer de amostras, enquanto a TWD só pode ser aplicada a um número total de amostras que seja potência de dois.

As propriedades de redundância e invariância no tempo da TWDR possibilita a reconstrução de sinais que apresentam menos distorções do que a TWD (PERCIVAL; WALDEN 2000). Os filtros *wavelet* da TWDR são obtidos diretamente a partir dos filtros da TWD, conforme:

$$\check{g}(l) = \frac{g(l)}{\sqrt{2}}, \quad (2.42)$$

$$\check{h}(l) = \frac{h(l)}{\sqrt{2}}, \quad (2.43)$$

sendo  $\check{g}(l)$  e  $\check{h}(l)$  os filtros escala e *wavelet* da TWDR, respectivamente.

Basicamente, os coeficientes *wavelet* também podem ser relacionados com uma função de distribuição de probabilidade normal, com parâmetros definidos pela média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  (PARSONS *et al.*, 1999). De acordo com Costa & Souza (2011), espera-se que, durante o regime permanente de operação os coeficientes *wavelet* dos sinais de tensão e corrente estejam dentro de um limiar  $[W1, W2] = [\mu-$

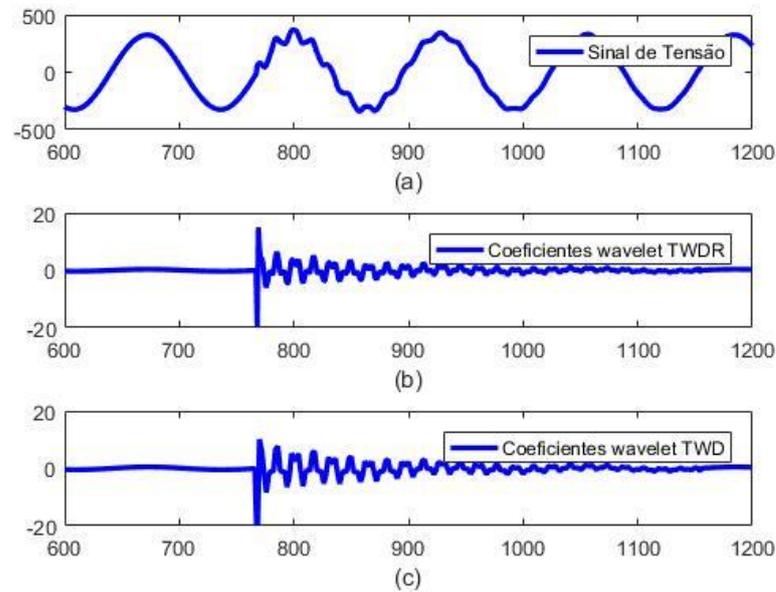
$4\sigma, \mu + 4\sigma]$ . Caso o coeficiente *wavelet* não esteja dentro do referido limiar, haverá detecção dos transitórios induzidos pelo curto-circuito, uma vez que seus valores apresentam maior amplitude em relação ao estado estacionário.

No decorrer da operação do sistema em regime permanente, os sinais de tensão e corrente são compostos comumente por componentes de frequência fundamental, alguns harmônicos e ruídos com baixas e altas frequências. Segundo Grainger & Stevenson (1994) os ruídos apresentam distribuição de probabilidade normal.

Segundo Costa & Souza (2011), é possível relacionar o valor da primeira amostra ao tempo em que ocorre a ultrapassagem dos valores do coeficiente *wavelet* do limiar de regime permanente. Portanto, para o algoritmo de dois terminais, deve-se considerar a primeira amostra ( $k_{f1}$  e  $k_{f2}$ ) relacionada ao tempo de início da falha proveniente dos barramentos S e R, conforme ilustrado na Figura 6. Reportando os coeficientes *wavelet* de regime permanente como referência, um aumento rápido, ou diminuição desses coeficientes, seja em um dos sinais de tensão ou corrente possibilita a detecção do curto-circuito.

Um exemplo do cálculo dos coeficientes *wavelet* é ilustrado na Figura 10, em que os coeficientes da *wavelet* db4 da TWDR e TWD foram calculados para um sinal senoidal genérico com adição de ruído no sétimo período da senóide, os transitórios foram gerados a partir da função que gera valores aleatórios no matlab. Os coeficientes obtidos pela TWDR e pela TWD são ilustrados nas Figuras 10b e 10c, respectivamente.

Figura 10 - (a) sinal senoidal com ruído; (b) coeficientes da TWDR; (c) coeficientes da TWD

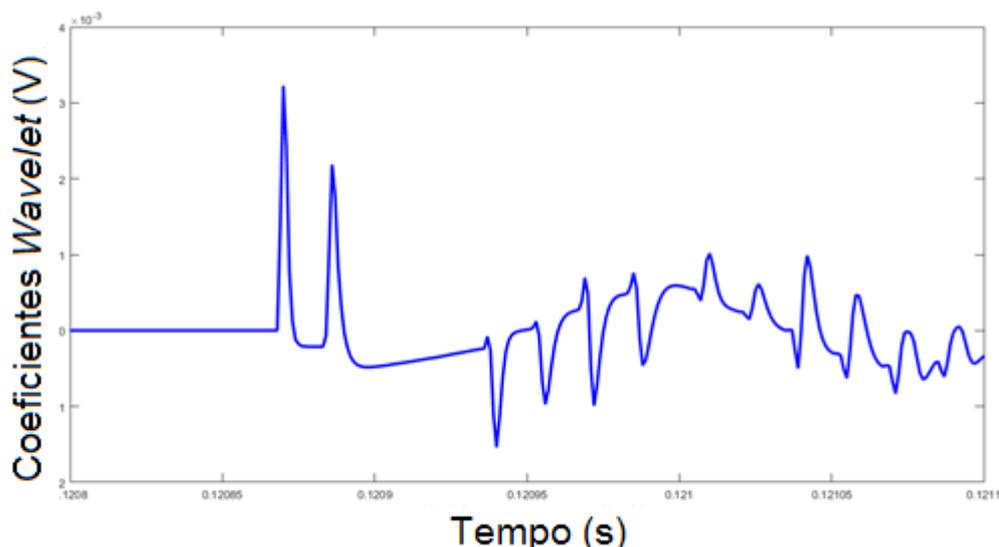


Fonte: Autoria Própria

### 2.3.1 Atenuação e Distorção das Ondas Viajantes

As distorções e as atenuações das ondas ao longo da linha ocorrem devido ao efeito pelicular (*skin*), que causa um aumento da resistência do condutor e uma diminuição em sua reatância interna. À medida que as ondas viajam na linha, suas amplitudes diminuem, ou seja, são atenuadas devido às perdas de energia causada pela resistência do condutor (BEWLEY, 1963). Um exemplo de atenuação em ondas viajantes pode ser relacionado com o sinal obtido para os coeficientes wavelet conforme é ilustrado na Figura 11, que mostra a atenuação do sinal ao longo do tempo.

Figura 11 - Atenuação dos coeficientes wavelet ao longo do tempo



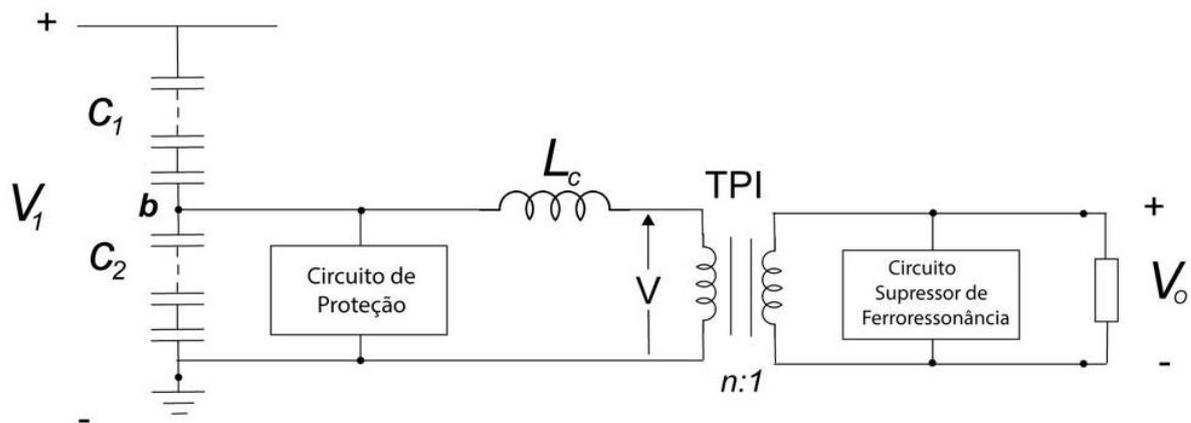
Fonte: Autoria Própria

## 2.4 Transformador de Potencial Capacitivo

Os transformadores de potencial capacitivo (TPC) são dispositivos utilizados em sistemas de alta tensão para propiciar tensões reduzidas aos equipamentos de medição, controle e proteção conectados em seus terminais secundários. O desempenho destes equipamentos está suscetível a erros pertinentes a atuação do TPC de maneira que a utilização de modelos digitais de TPC tem grande importância para estudo dos sistemas elétricos de potência, de modo a antecipar o desempenho desses equipamentos e como eles afetam a atuação dos relés de proteção. Em regime permanente, a tensão secundária do TPC consiste em uma réplica da tensão primária, porém, a existência de distúrbios no SEP pode afetar as medições provenientes do equipamento (SAHA *et al.*, 2010). De fato, como a energia elétrica e magnética não pode variar de maneira instantânea, as componentes de frequência que não aparecem no sinal do primário pode aparecer no sinal do secundário do dispositivo (PAJUELO *et al.*, 2008). Diante disso, um curto-circuito no SEP pode afetar o desempenho dos algoritmos de localização de faltas, frente ao comportamento dinâmico dos TPC.

Na Figura 12 o circuito elétrico básico de um TPC é ilustrado, em que,  $C_1$  e  $C_2$  são um conjunto de capacitores ligados em série,  $L_c$  é um reator de compensação que compensa a defasagem imposta pelo divisor capacitivo e o ponto  $b$  é uma derivação intermediária correspondente a uma tensão que alimenta o enrolamento primário de um transformador de potencial indutivo (TPI), que tem a finalidade de fornecer a tensão secundária aos instrumentos de proteção e medição ali instalados. Para diminuir o problema de ferroressonância, é instalado nos terminais secundários um circuito supressor de ferroressonância (CSF), uma vez que este fenômeno pode ser causado pelos efeitos não lineares dos elementos presentes no núcleo ferromagnético do transformador, bem como em situações de curtos-circuitos (PAJUELO, *et al.* 2008).

Figura 12 - Circuito básico de um TPC



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na década de 50, já havia disponíveis na literatura numerosas técnicas para localização de faltas, o que levou o Instituto Americano de Energia Elétrica (AIEE) a apresentar no Relatório do Comitê da AIEE (1955) uma ampla revisão bibliográfica de tais algoritmos. Até os dias atuais, o estudo de localização de curtos-circuitos em sistemas de energia elétrica vem se evidenciando como tema de muitas pesquisas em contexto mundial, principalmente devido ao avanço da tecnologia dos dispositivos de proteção e dos sistemas de aquisição de dados (AIEE COMMITTEE REPORT, 1955), (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2005), (SAHA *et al.*, 2010).

A classificação dos algoritmos de localização de faltas se dá quanto ao número de terminais monitorados, bem como da utilização das técnicas de filtragem envolvidas ou à necessidade de medições sincronizadas, entretanto, os algoritmos podem ser divididos em quatro grupos referentes ao método utilizado: métodos baseados em componentes fundamentais, métodos baseados em componentes de alta frequência, métodos baseados em inteligência artificial e métodos baseados na teoria das ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010). Apesar de uma grande variedade de classes serem reportadas na literatura, apenas as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes serão analisadas neste trabalho, uma vez que se tratam das tendências mais recentes embarcadas em relés reais.

Nas próximas seções será realizada uma revisão bibliográfica da técnica utilizada como ferramenta para implementação dos algoritmos deste trabalho e dos métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes utilizando medições de um e dois terminais monitorados da LT.

#### 3.1 Detecção de faltas baseada na teoria das ondas viajantes

Considerando a robustez da Transformada *Wavelet* (TW) em discriminar e identificar com precisão os instantes de incidência dos surtos nos terminais monitorados, a ferramenta mostra-se propícia a aplicação na localização de faltas em sistemas elétricos (SILVA, 2003). A TW foi desenvolvida como alternativa à

Transformada de *Fourier* de Tempo Curto (STFT) visando solucionar o problema de resolução, relacionada com o comportamento tempo-frequência de sinais. As *wavelets* são o resultado de décadas de pesquisa na busca de funções mais apropriadas do que os senos e cossenos, para a análise de sinais (PARENTONI, 2006). De fato, em sua breve história dentro do campo de processamento de sinais, a teoria das *wavelets* tem se mostrado uma importante adição à coleção de ferramentas de tratamento de sinais (PARENTONI, 2006).

A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) ultrapassa alguns obstáculos comparada à análise da Transformada Rápida de *Fourier* (TRF), pois permite estudar um sinal em diferentes níveis de resolução no domínio do tempo e da frequência, possibilitando a detecção e localização de transitórios compostos de componentes de baixa e alta frequência (WILKINSON; COX, 1996). Além disso, computacionalmente o cálculo da TWD é mais rápido do que o cálculo da TRF (PERCIVAL; WALDEN, 2000), o que constitui uma vantagem para aplicações de algoritmos de localização de faltas.

No contexto de detecção de faltas, Santoso *et al.* (1996) apresentaram estudos para detectar e localizar perturbações referentes a qualidade de energia elétrica, com destaque para distúrbios com transitórios rápidos e lentos. Para distúrbios com variações rápidas, as *wavelets* Daubechies 4 ou 6 (db4 ou db6) foram mais adequadas, já para distúrbios com mudanças suaves nas formas de onda, as *wavelets* db8 e db10 foram mais convenientes. Segundo os autores, a db4 é mais apropriada para análise de transitórios de chaveamento, ao passo que a db10 foi mais adequada para análise de afundamentos de tensão e distorções harmônicas.

Entre as técnicas existentes utilizadas na detecção de transitórios, a TWD foi originalmente a mais utilizada (SAHA *et al.*, 2010), apesar da existência da TWDR (Transformada *Wavelet* Discreta Redutante), que consiste em uma versão da TWD e também tem sido amplamente utilizada na detecção de transitórios rápidos de falta em SEP (PERCIVAL; WALDEN, 2000). Ainda que a TWD tenha sido precursora, Costa *et al.* (2010b) recomendam a TWDR como a técnica mais apropriada para detectar transitórios, uma vez que não utiliza o processo de subamostragem por dois, necessário pela TWD, trazendo como consequências a perda de resolução dos sinais no tempo.

Kim & Aggarwal (2001) apresentaram uma técnica de janelamento de dados, em que cada janela avaliava o somatório dos coeficientes *wavelets* em valor absoluto, no qual foi implementado um algoritmo para detectar faltas através dos coeficientes *wavelet* de primeira escala das correntes de fase. A técnica estabelece um limiar, ao qual a falta era detectada se o valor referente a uma determinada janela ultrapassasse o limiar pré-estabelecido. Todavia, por utilizar um limiar pré-definido, a técnica é bastante afetada por ruídos e faltas com alta resistência.

Basicamente, a presença de ruídos elétricos nos sinais de tensão e corrente em LTs pode afetar a detecção da localização correta do curto-circuito. Neste cenário, Xiaoli *et al.* (2007) e Costa *et al.* (2008) apresentaram métodos baseados em energias janeladas do coeficiente *wavelet* obtidos através da TWD. Esses artifícios são mais robustos e a implementação é relativamente simples. Porém, estes algoritmos demandam o monitoramento separado das fases do SEP analisado e podem apresentar diferentes desempenhos dependendo da *wavelet* mãe utilizada. Além disso, testes para ângulos de incidência iguais a zero, são escassos. Visando obter um processo mais robusto para detectar transitórios Costa *et al.* (2010a) propuseram o uso de energias janeladas dos coeficientes *wavelet* por meio da TWDR, a qual não realiza a subamostragem por dois.

Neste trabalho, será utilizada a TWDR na análise dos sinais de tensão e corrente das fases da LT para detectar a ocorrência da falta, segundo técnica reportada em Costa *et al.* (2010a).

### **3.2 Localização de faltas baseada na teoria das ondas viajantes**

Em 1988, Christopoulos *et al.* (1988) propuseram um esquema de proteção de LT utilizando medições de um terminal para determinar o intervalo de tempo entre a onda viajante incidente e a primeira onda refletida do ponto de falta respectivo. Contudo, para defeitos próximos ao terminal monitorado, a técnica mostrou-se suscetível a erros, dado que as polaridades das ondas refletidas do ponto de falta podem ser confundidas com as polaridades das ondas refletidas de uma linha

adjacente, principalmente se esta for curta, ocasionando a atuação inapropriada do sistema de proteção.

Uma técnica de um terminal para a proteção de LTs utilizando a teoria das ondas viajantes é também reportada em Vitins (1978), a qual utiliza modelos de LT a parâmetros distribuídos, em que se utilizou o cálculo da diferença entre os tempos das ondas viajante incidente e refletida. Essa diferença entre os tempos é extraída das formas de onda de corrente e de tensão das componentes fundamentais compostas pelos transitórios superpostos, medidos a partir da correlação. Por utilizar componentes fundamentais, a rotina pode ser afetada por parâmetros como saturação do transformador de corrente, componente CC de decaimento exponencial, etc.

Gale *et al.* (1993a) classificam os mecanismos baseados na teoria de ondas viajantes em grupos, nos quais os principais são os que abordam a utilização de ondas refletidas do ponto de falta, a quantidade de terminais monitorados e a aplicação de pulsos elétricos para a localização do curto-circuito. Segundo os autores, métodos de dois terminais são mais robustos, entretanto, métodos de um terminal fornecem maior economia, muito embora as ondas refratadas possam ser confundidas com refletidas.

Ainda na década de 90, Bo *et al.* (1996) propuseram uma técnica para proteção de LT que dependia de um equipamento projetado para ser conectado ao TC, a fim de detectar transitórios induzidos por faltas, estimando primeiro o trecho de ocorrência da falta e, posteriormente, o local do distúrbio através da identificação de ondas refletidas, reincidindo na mesma limitação do trabalho reportado por Christopoulos *et al.* (1988).

Jian *et al.* (1998) propuseram um nova concepção para localização de faltas a partir de dados de dois terminais, em que são utilizadas duas velocidades de propagação para ondas viajantes, calculadas a partir da frequência dominante dos distúrbios através de parâmetros de dilatação da transformada *wavelet* contínua. Contudo, a necessidade de se identificar as frequências dominantes dos sinais monitorados para estimar duas velocidades de propagação se configura em uma limitação da técnica proposta, em virtude de existir algoritmos de dois terminais

reportados na literatura que dependem somente de uma velocidade de propagação das ondas viajantes baseadas nos parâmetros da LT e que se mostram precisas (GALE *et al.*, 1993b).

Com vistas a eliminar a influência da velocidade Gilany *et al.* (2007) apresentaram um método independente da velocidade. Todavia, faz-se necessário um equipamento que detecta altas frequências dos sinais de tensão acoplados ao TPC, o que pode impossibilitar sua aplicabilidade devido a aquisição de dispositivos adicionais a serem introduzidos na subestação.

Jie *et al.* (1999) utilizaram a função de correlação auxiliar adicional a fim de amplificar a amplitude dos picos da função de correlação, removendo o valor médio dos sinais, de modo a estimar o atraso entre ondas incidente e refletida do ponto de falta. Apesar de atingir bons resultados em relação à precisão do método, análises de sensibilidade para situações críticas, a exemplo de ângulo de incidência próximos de 0° não foram testadas, assim como o impacto da resposta dinâmica do TPC não foram avaliadas.

Já Pathirana *et al.* 2002 utilizaram um método que combina um algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes e um método baseado em fasores para estimar o local da falta, sendo a onda refletida da falta identificada por auxílio da rotina baseada em fasores. No entanto, por depender de componentes fundamentais, a técnica mostra-se sensível a fatores como saturação do TC, não homogeneidade do SEP, etc.

Sistemas localizadores de falta que utilizam dados de apenas um terminal da LT são geralmente mais atrativos em relação ao lado operacional, visto que não precisam de um sistema de comunicação em ambos extremos da linha, contabilizando assim também um menor custo de instalação. Já os sistemas que utilizam dados de ambos os terminais da linha tendem a ser mais robustos, uma vez que mais informações do SEP estão disponíveis nos terminais monitorados. Teoricamente, os métodos de localização de faltas de um e dois terminais possuem a mesma precisão, visto que ambos requerem a detecção de duas frentes de onda cada. No entanto, tipicamente é reportado que os métodos de localização de faltas de dois terminais são mais robustos frente aos de um terminal (SAHA *et al.*, 2001).

Todavia, apesar das respostas em frequência dos TPC tradicionais serem reconhecidamente limitadas, percebe-se que pouco é reportado acerca das limitações do uso de tensão em rotinas de um terminal baseadas no domínio do tempo. Sendo assim, faz-se necessário investigar.

### 3.3 Impacto do TPC em algoritmos de localização de faltas

É conhecido que o desempenho de algoritmos de localização de faltas pode ser afetado por erros de medição que podem ocorrer no SEP devido a dados falsos fornecidos pelo TPC. Portanto, faz-se necessário o estudo de trabalhos que examinam e aprimoram métodos a fim de apresentar algoritmos mais robustos que com soluções mais imunes ao impacto causado pelos erros de medição do TPC.

Neste contexto, Pajuelo *et al.* (2008) apresentaram análises do desempenho do TPC para métodos de estimação de fasores, sendo o algoritmo desenvolvido a partir do conhecimento dos parâmetros do circuito elétrico do dispositivo e da carga conectada em seus terminais. Todavia, o modelo do TPC utilizado exhibe a resposta em frequência restringida em 600 Hz, impossibilitando sua utilização em SEP que usam frequências superiores.

Já Hou & Roberts (1996) investigaram os transitórios da tensão do secundário dos TPC e constataram que estes diminuíam a componente fundamental da tensão de falta, podendo levar os relés e localizadores de faltas a atuarem de maneira indevida.

Na tentativa de minimizar o impacto dos transformadores para instrumentos no desempenho de localizadores de falta, Spoor & Zhu (2006) propuseram um algoritmo de um terminal que considera a resposta dinâmica dos transformadores para instrumentos. Basicamente, a técnica utiliza a TWC baseada no cálculo da energia dos coeficientes *wavelet*. Apesar de manter a polaridade das ondas refletidas, a necessidade de conhecer a resposta em frequência dos transformadores para instrumentos (TI) na escolha da escala apropriada para aplicar na transformada consiste numa limitação da rotina, necessitando de no mínimo 20

escalas. Além disso, as avaliações acerca do impacto da dinâmica dos TPC, por exemplo, não foram realizadas.

Diante do exposto, fica evidente a escassez de trabalhos que estudam modelos de TPC de forma a propiciar simulações mais precisas em técnicas de localização de faltas. Além disso, poucos avaliam o impacto dos TPC acerca das limitações do uso de tensão em funções de localização de faltas baseadas no domínio do tempo com dados de um terminal, de modo a preencher tal lacuna na literatura, análises acerca dos impactos do uso dos sinais de tensão em algoritmos de localização de curtos-circuitos são realizadas neste trabalho.

### **3.4 Síntese da Revisão Bibliográfica**

Na Tabela 1 são apresentados os resumos de alguns dos principais trabalhos de localização de faltas para um e dois terminais avaliados. O emprego de técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes vem progredindo junto ao desenvolvimento da tecnologia digital dos dispositivos de proteção com altas taxas de amostragem. A utilização de transformadas para extrair as componentes de alta frequência dos sinais de tensão e corrente é fundamental para possibilitar a detecção das primeiras ondas incidentes no(s) terminal(is) monitorado(s).

Os métodos baseados na teoria das ondas viajantes de dois terminais são mais precisos (SAHA *et al.*, 2010), embora falhas possam ocorrer na comunicação entre os terminais monitorados. Deste modo, o monitoramento de apenas um terminal torna-se mais econômico diante do custo associado com equipamentos, de forma que, o estudo de técnicas de um terminal vêm crescendo a fim de obter algoritmos com maior robustez.

Apesar de métodos de um terminal independentes da velocidade de propagação de ondas viajantes serem reportados na literatura, seus desempenhos são tipicamente afetados pela dificuldade de detectar corretamente as ondas refletidas no terminal monitorado, consistindo assim em uma limitação, de tal forma que este é um dos maiores desafios a ser vencido na literatura para que novas

formulações sejam propostas a fim de obter algoritmos mais robustos e imunes a tal problemática.

Basicamente, poucos trabalhos avaliam o desempenho dos algoritmos de localização para ângulos incidentes próximos de  $0^\circ$ , bem como o impacto do TPC na utilização dos sinais de tensão como dados de entrada dos algoritmos de localização. Portanto, análises de sensibilidade dos parâmetros que mais afetam o desempenho de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, considerando medições de um e dois terminais da LT são realizadas neste trabalho, considerando, principalmente, o impacto da resposta dinâmica dos TPC.

Tabela 1 - Síntese da revisão bibliográfica sobre localização de curtos-circuitos baseados na teoria das ondas viajantes

| Referência                           | Número de Terminais | Detecção do transitório | Impacto do TPC |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------|
| (CHRISTOPOULOS <i>et al.</i> , 1988) | 1                   | -                       |                |
| (VITINS, 1978)                       | 1                   | -                       |                |
| (GALE <i>et al.</i> , 1993b)         | 1 e 2               | -                       |                |
| (BO <i>et al.</i> , 1996)            | 1                   | -                       |                |
| (JIAN <i>et al.</i> , 1998)          | 2                   | TW                      |                |
| (GILANY <i>et al.</i> , 2007)        | 2                   | TW                      |                |
| (JIE <i>et al.</i> , 1999)           | -                   | -                       |                |
| (PATHIRANA <i>et al.</i> , 2002)     | 1                   | TW                      |                |
| (SPOOR; ZHU, 2006)                   | 1                   | TW                      |                |
| TRABALHO PROPOSTO                    | 1 e 2               | TW                      | ✓              |

Fonte: Autoria Própria

Legenda:

TW = Transformada *Wavelet*

## 4 ANÁLISES E RESULTADOS

A metodologia utilizada durante os estudos, as simulações e os resultados obtidos são apresentados neste capítulo.

### 4.1 Metodologia

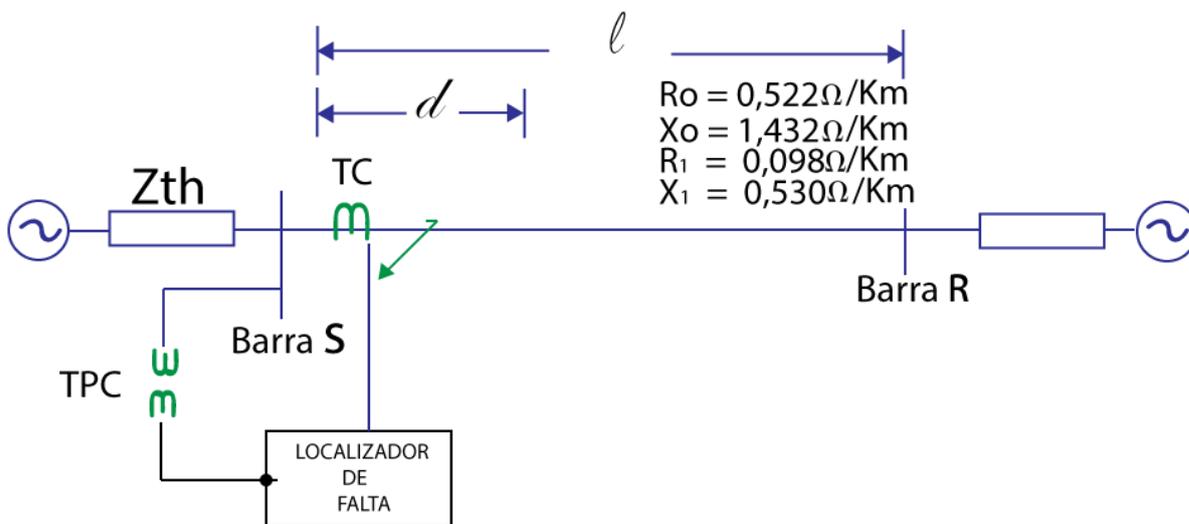
O sistema elétrico de 230 kV composto por uma LT transposta com 100 km de extensão, ilustrado na Figura 13, foi utilizado nas simulações realizadas no ATP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), a LT foi modelada a parâmetros distribuídos constantes com a frequência, cujos parâmetros foram obtidos de uma linha real que interliga as subestações Recife-Bongi (LOPES, 2014). O intervalo de amostragem utilizado foi de  $1 \mu s$ . Os dados obtidos pela simulação no ATP foram carregados no *software* Matlab®.

Após os dados serem carregados no Matlab®, a rotina reportada em Costa *et al.* (2010a) foi implementada para identificar as ondas incidentes nos terminais monitorados, representados pelas amostras  $k_{f1}$  e  $k_{f2}$  referentes aos tempos  $t_{B1}$  e  $t_{A1}$ , de modo que o local da falta é estimado por meio da equação (2.30) para a função de um terminal e da equação (2.31) para a função de dois terminais. Como o método reportado em Costa *et al.* (2010a) só possibilita identificar a primeira onda incidente no ponto de medição, a onda refletida do ponto de falta para aplicação da técnica de um terminal foi identificada de forma manual a partir do pico do coeficiente *wavelet* estimado e correspondente ao refletido surto.

Por fim, uma análise de sensibilidade dos parâmetros de curtos-circuitos que mais podem afetar o desempenho dos algoritmos de localização de faltas, tais como: o impacto do TPC, da resistência e ângulo de incidência é realizada neste trabalho. O modelo de TPC utilizado neste trabalho é reportado em IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE (2004), para estudos de proteção. Como o objetivo aqui é investigar o impacto de medições de tensão em funções de localização de faltas baseadas no domínio do tempo, o TC é utilizado como um modelo ideal.

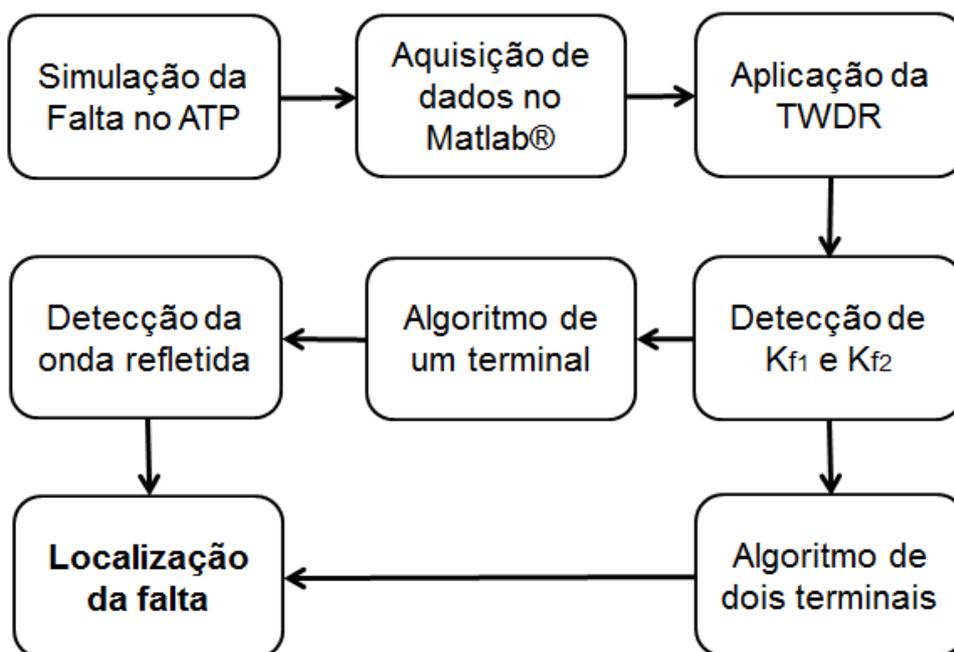
Na Figura 14 é apresentada a metodologia utilizada durante os estudos.

Figura 13 - Representação do SEP estudado



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – Metodologia utilizada durante as simulações



Fonte: Autoria Própria

Os ângulos de incidência para as faltas avaliadas são definidos com base na função cosseno no ambiente de simulações do ATP. Além disso, o erro da simulação é dado por:

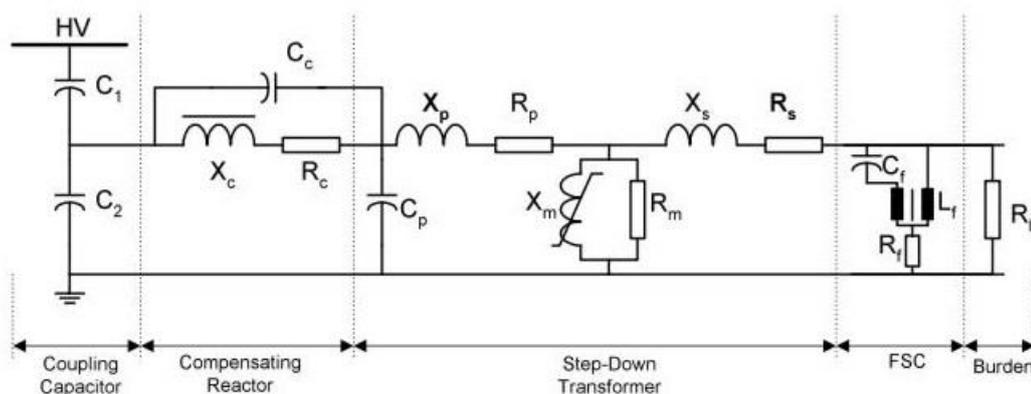
$$\varepsilon(\%) = \frac{d - \tilde{d}}{\ell} \cdot 100, \quad (4.1)$$

em que  $d$  é a distância real da falta até a barra monitorada,  $\tilde{d}$  é a distância estimada na simulação e  $\ell$  é o comprimento da linha.

## 4.2 Impacto do Transformador de Potencial Capacitivo

Conforme exposto na seção 2.4, um curto-circuito no SEP pode afetar o desempenho dos algoritmos de localização de faltas devido ao comportamento transitório dos TPC. Com vistas a avaliar o impacto do TPC com mais detalhes frente a algoritmos de localização de faltas baseados no domínio do tempo, o TPC relatado em (IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE, 2004) é utilizado, cujo circuito equivalente é ilustrado na Figura 15. Os parâmetros do TPC são também reportados em (IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE, 2004).

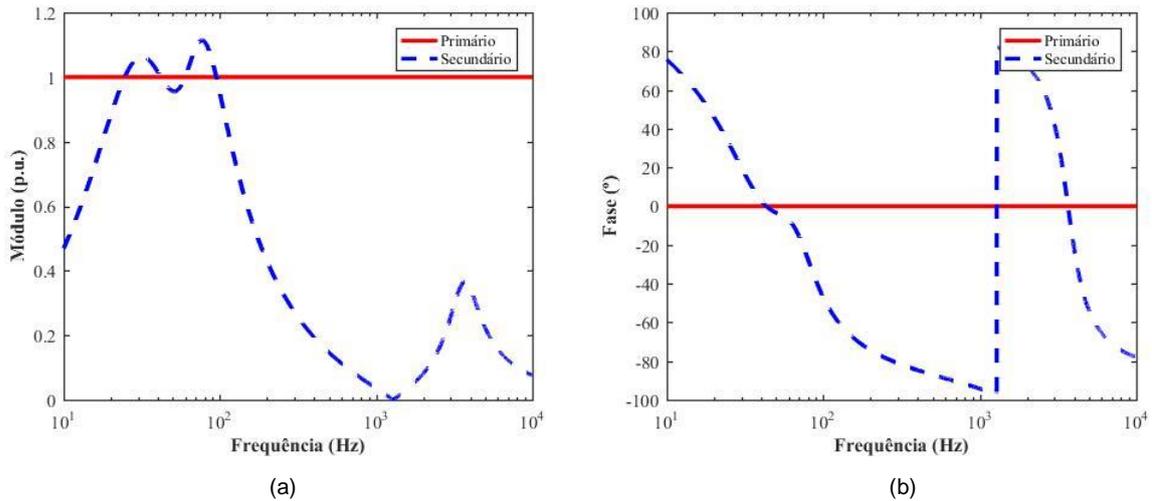
Figura 15 - Circuito equivalente TPC



Fonte: (IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE, 2004)

A resposta em frequência para o modelo avaliado é ilustrada na Figura 16a, para a resposta de módulo, e na Figura 16b para a resposta de fase, ao longo de um espectro de 10 Hz a 10 kHz.

Figura 16 - (a) Resposta em frequência de módulo (pu); (b) Resposta em frequência de fase (pu)

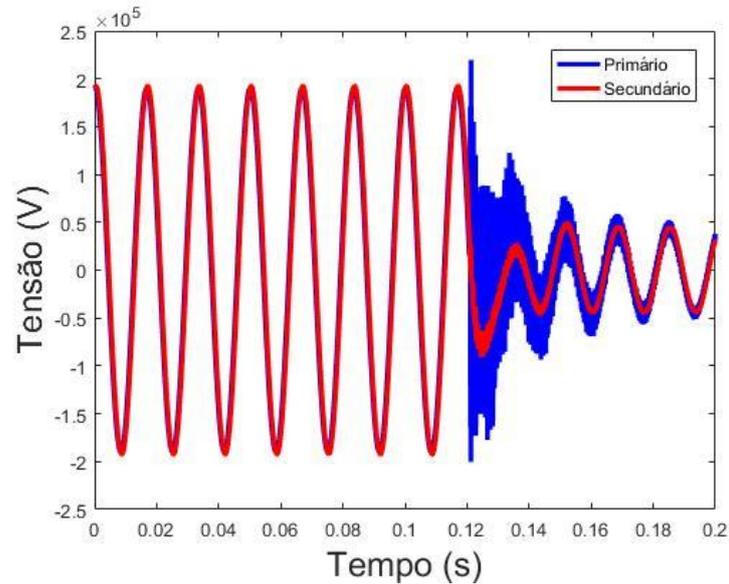


Fonte: Autoria Própria

A partir da resposta em frequência do TPC ilustrada na Figura 16a ocorre uma atenuação dos componentes de altas frequências. Além disso, desvios de fase surgem dos sinais de tensão medidos para componentes diferentes da fundamental, conforme apresentado na Figura 16b. Portanto, mesmo que em regime permanente os sinais do secundário sejam uma réplica do primário, durante curtos-circuitos os sinais do secundário não o são. Assim, estes comportamentos podem impactar o desempenho dos processos de proteção, especialmente para algoritmos de localização de curtos-circuitos em que os dados de tensão são utilizados como entrada de tais técnicas (REIS *et al.*, 2019b).

Apresenta-se, na Figura 17, os sinais de tensão do primário e do secundário do TPC simulado no ATP durante uma falta ABT no SEP da Figura 13, com ângulo incidente de  $90^\circ$  e resistência de falta de  $1 \Omega$  aplicado a 10 km do terminal de medição.

Figura 17 - Resposta dinâmica dos sinais de tensão do primário e do secundário do TPC



Fonte: Autoria Própria

Conforme ilustrado na Figura 17, durante o regime permanente a curva de tensão secundária é idêntica à tensão primária. Contudo, após o ponto de aplicação da falta, a medição de tensão é prejudicada, de modo que os transitórios do secundário são consideravelmente amortecidos, estando de acordo com a resposta em frequência apresentada na Figura 16. Portanto, algoritmos de localização de faltas podem atuar indevidamente diante da atenuação sofrida pelo sinal do secundário durante a ocorrência de uma falta (KASZTENNY *et al.*, 2000).

#### 4.2.1 Impacto do TPC na localização de faltas com dados de um terminal

Os resultados obtidos para o método de localização de faltas de um terminal, considerando-se medições de tensão providas pelo TPC são avaliados. Para possibilitar análises comparativas, os locais de falta são também estimados a partir de medições oriundas de um TPC ideal. Para tanto, um curto circuito (AT, ângulo de incidência de  $0^\circ$  e resistência de falta de  $1 \Omega$ ) a 10 km da barra S do SEP da Figura 13 foi simulado.

Considerando que as ondas viajantes de tensão são relacionadas pela impedância característica, conforme descrito em Guzmán *et al.* (2018), a impedância característica da linha,  $Z_1$ , e a impedância de terminação gerada pela falta,  $Z_p$ , para o sistema representado é dado por:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (4.2)$$

$$Z_p = Z_c // R_f, \quad (4.3)$$

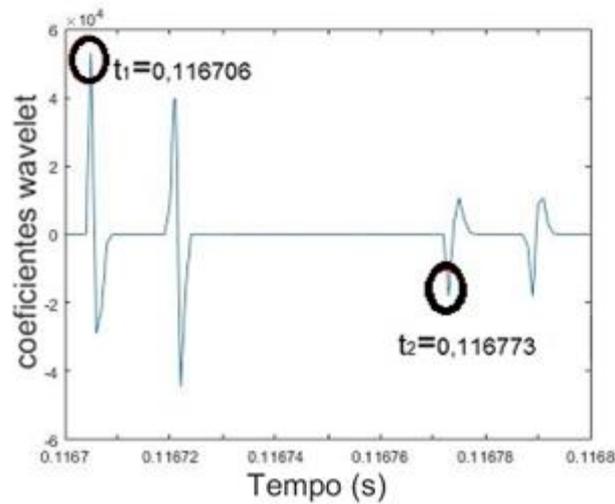
em que,  $L$  e  $C$  são a indutância e a capacitância de sequência positiva da linha, respectivamente e  $R_f$  a resistência de falta, a qual foi considerada igual a  $1 \Omega$  neste caso avaliado. Para o sistema implementado no ATP,  $L = 1,3528 \cdot 10^{-3} \text{ H}$  e  $C = 8,6262 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ . Portanto,  $Z_1 = 396,0108 \Omega$  e  $Z_p = 0,9975 \Omega$ .

Basicamente, a polaridade das ondas refletidas e das ondas refratadas originadas pela descontinuidade na linha devem ser identificadas, de modo a detectar o tempo em que a primeira onda refletida do ponto de falta ( $t_2$ ) atinge o terminal monitorado e o tempo que a onda incidente leva para percorrer a distância entre o ponto de falta e o barramento monitorado  $t_1$ . Assim,  $t_1$  consiste no tempo em que ocorre o primeiro pico no gráfico dos coeficientes *wavelet*, conforme apresentado na Figura 18.

Para encontrar a polaridade da primeira onda refletida, tem-se da equação (2.28):

$$\Gamma = \frac{0,9975 - 396,0108}{0,9975 + 396,0108} = -0,9950. \quad (4.4)$$

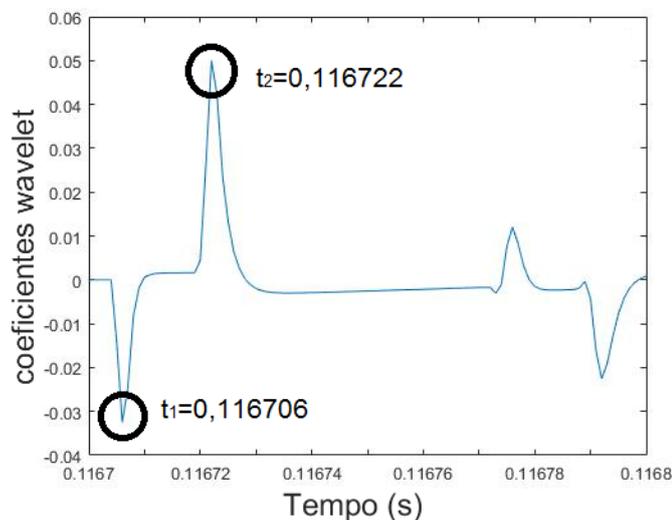
Deste modo, a polaridade das ondas refletidas do ponto de falta é oposta a polaridade da onda incidente do ponto de falta.

Figura 18 - Coeficientes *wavelet* para simulação com TPC ideal

Fonte: Autoria Própria

A partir da equação (2.30), o local da falta pode ser estimado conhecendo-se  $t_1$  e  $t_2$ . Assim, dado que  $t_1$  e  $t_2$  foram estimados iguais a 0,116706 e 0,116773, respectivamente,  $d = 9,81 \text{ km}$ , sendo  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 292,7941 \cdot 10^3$ . Para este caso,  $\varepsilon = 0,19\%$ .

Considerando medições de tensão oriundas do TPC, ilustram-se, na Figura 19, os coeficientes *wavelets* para uma falta com os mesmos parâmetros da anterior:

Figura 19 - Coeficientes *wavelet* para simulação com TPC

Fonte: Autoria Própria

Neste caso, considerando medições do TPC como dados de entrada da rotina,  $t_1$  e  $t_2$  foram estimados iguais a 0,116706 e 0,116722, respectivamente. Logo,  $d = 2,34$  km o que resulta em  $\varepsilon = 7,65\%$ . Deste modo, a resposta dinâmica do TPC afeta a confiabilidade dos algoritmos de localização de faltas de um terminal. Portanto, caso apenas medições de tensão estejam disponíveis, a resposta dinâmica do TPC pode alterar a polaridade das ondas viajantes, fazendo com que o desempenho da técnica seja comprometido.

A influência dos parâmetros de falta sob a precisão dos algoritmos de localização de curtos-circuitos é investigada nesta seção. Assim, várias simulações de faltas são realizadas, considerando-se diferentes tipos de falta, bem como da resistência e do ângulo de incidência de falta.

Para as análises considerando o algoritmo de localização de curtos-circuitos de um terminal, vários cenários de falta foram simulados, os quais são apresentados na Tabela 2. Os resultados obtidos para cada simulação são dispostos na Tabela 3, que foram estimados considerando medições de tensão provenientes do TPC ideal e do TPC avaliado. Todas as simulações foram realizadas para um mesmo ponto de aplicação, ou seja, a 10 km do barramento S.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para os algoritmos de um terminal

| Tipo de falta | Ângulo de Incidência (°) | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------|
| AT            | 0                        | 1                                 |
| AT            | 30                       | 1                                 |
| AT            | 60                       | 1                                 |
| AT            | 90                       | 1                                 |
| ABT           | 0                        | 1                                 |
| ABT           | 30                       | 1                                 |
| ABT           | 60                       | 1                                 |
| ABT           | 90                       | 1                                 |
| AB            | 0                        | 1                                 |
| AB            | 30                       | 1                                 |
| AB            | 60                       | 1                                 |
| AB            | 90                       | 1                                 |
| AT            | 0                        | 100                               |
| AT            | 30                       | 100                               |
| AT            | 60                       | 100                               |
| AT            | 90                       | 100                               |
| ABT           | 0                        | 100                               |
| ABT           | 30                       | 100                               |
| ABT           | 60                       | 100                               |
| ABT           | 90                       | 100                               |
| AB            | 0                        | 100                               |
| AB            | 30                       | 100                               |
| AB            | 60                       | 100                               |
| AB            | 90                       | 100                               |
| AT            | 0                        | 200                               |
| AT            | 30                       | 200                               |
| AT            | 60                       | 200                               |
| AT            | 90                       | 200                               |
| ABT           | 0                        | 200                               |
| ABT           | 30                       | 200                               |
| ABT           | 60                       | 200                               |
| ABT           | 90                       | 200                               |
| AB            | 0                        | 200                               |
| AB            | 30                       | 200                               |
| AB            | 60                       | 200                               |
| AB            | 90                       | 200                               |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 - Resultados obtidos para o algoritmo de um terminal

| Tipo de falta | Ângulo de Incidência (°) | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) | Local da falta - TPC | $\varepsilon$ (%) – TPC | Local da falta – TPC ideal | $\varepsilon$ (%) – TPC ideal |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| AT            | 0                        | 1                                 | 2,3419               | 7,66%                   | 9,8065                     | 0,19%                         |
| AT            | 30                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 9,8065                     | 0,19%                         |
| AT            | 60                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AT            | 90                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 0                        | 1                                 | 9,8066               | 0,19%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 30                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 60                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 90                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 12,2948                    | 2,29%                         |
| AB            | 0                        | 1                                 | 9,8066               | 0,19%                   | 9,9524                     | 0,05%                         |
| AB            | 30                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| AB            | 60                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| AB            | 90                       | 1                                 | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AT            | 0                        | 100                               | 10,0993              | 0,10%                   | 10,6847                    | 0,68%                         |
| AT            | 30                       | 100                               | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AT            | 60                       | 100                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,3925                    | 0,39%                         |
| AT            | 90                       | 100                               | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 0                        | 100                               | 10,0993              | 0,10%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 30                       | 100                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 60                       | 100                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 90                       | 100                               | 2,4882               | 7,51%                   | 12,2948                    | 2,29%                         |
| AB            | 0                        | 100                               | 9,8066               | 0,19%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AB            | 30                       | 100                               | 10,2457              | 0,25%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| AB            | 60                       | 100                               | 10,3921              | 0,39%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AB            | 90                       | 100                               | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AT            | 0                        | 200                               | 10,0993              | 0,10%                   | 10,0261                    | 0,03%                         |
| AT            | 30                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0846                    | 0,08%                         |
| AT            | 60                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| AT            | 90                       | 200                               | 10,2457              | 0,25%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 0                        | 200                               | 10,0993              | 0,10%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| ABT           | 30                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 60                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| ABT           | 90                       | 200                               | 2,4882               | 7,51%                   | 12,2948                    | 2,29%                         |
| AB            | 0                        | 200                               | 10,0993              | 0,10%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AB            | 30                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 10,0993                    | 0,10%                         |
| AB            | 60                       | 200                               | 10,3921              | 0,39%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |
| AB            | 90                       | 200                               | 10,2457              | 0,25%                   | 9,9529                     | 0,05%                         |

Fonte: Autoria Própria

Dos resultados dispostos na Tabela 3, o erro médio dos resultados obtidos em relação à distância da falta estimada considerando medições do TPC foi de 0,87%. Por outro lado, já o erro calculado para os resultados obtidos considerando o TPC ideal foi de 0,29%. Deste modo, constata-se que o TPC tende a aumentar os erros de localização de faltas em LTs. De fato, por alterar as polaridades das ondas viajantes, além de atenuar as componentes de alta frequência, a estimação do local da falta pode ser comprometida.

Na Tabela 4 apresenta-se o erro médio com relação à variação do ângulo de incidência para o algoritmo de um terminal considerando dados de entrada oriundos do TPC e do TPC ideal.

Tabela 4 - Influência do ângulo de incidência para algoritmo de um terminal

| Ângulo de Incidência (°) | Erro Médio (%) – TPC | Erro Médio (%) – TPC ideal |
|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| 0                        | 0,97                 | 0,05                       |
| 30                       | 0,10                 | 0,10                       |
| 60                       | 0,11                 | 0,11                       |
| 90                       | 0,80                 | 0,80                       |

Fonte: Autoria Própria

Diante dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 4 constata-se que os erros obtidos foram maiores considerando o TPC utilizado. Já para o sistema considerando o TPC ideal, o maior erro médio obtido foi para faltas com ângulo de incidência de 90° (conforme exposto na seção 4.1, o ângulo é definido com base na função cosseno). De fato, apesar de não existir incidência de ondas viajantes para este ângulo, é possível que as oscilações induzidas pelo TPC tenham auxiliado a detecção da falta, além disso, ocorreu desvios do TPC para ângulos de 0°, em que se esperava erros menores. Além disso, caso maiores níveis de ruído fossem considerados, maiores erros também seriam obtidos.

Os erros médios obtidos para a variação da resistência de falta em relação ao algoritmo de um terminal são apresentados na Tabela 5. Esperava-se que maiores erros fossem encontrados para maiores resistências de faltas, analisando a Tabela 5 a diferença dos erros obtidos para o sistema com TPC foi ínfima, ademais erros

obtidos para as simulações com o TPC foram maiores. Além do que se simulações em massa tivessem sido feitas o erro tenderia a aumentar, constatando-se o impacto do TPC sobre o aumento dos erros no processo de localização de faltas.

Tabela 5 - Influência da resistência de falta para algoritmo de um terminal

| Resistência de Falta ( $\Omega$ ) | Erro Médio (%) – TPC | Erro Médio (%) – TPC ideal |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1                                 | 0,85                 | 0,07                       |
| 100                               | 0,87                 | 0,07                       |
| 200                               | 0,89                 | 0,26                       |

Fonte: Autoria Própria

#### 4.2.2 Impacto do TPC na localização de faltas com dados de dois terminais

Para avaliação da técnica de dois terminais baseada no domínio do tempo, os cenários apresentados nas Tabelas 6 e 7 foram considerados, variando-se o tipo, o ângulo de incidência e a resistência de falta. Os resultados correspondentes para cada caso avaliado estão apresentados nas mesmas tabelas. Todas as simulações foram realizadas para um mesmo ponto de descontinuidade, ou seja, a 10 km do barramento S.

Tabela 6 - Resultados obtidos para o algoritmo de dois terminais

| Tipo de falta | Ângulo de Incidência ( $^{\circ}$ ) | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) | Local da falta - TPC | Local da falta – TPC ideal | $\epsilon$ (%) |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------|
| AT            | 0                                   | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 0                                   | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 30                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 30                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 30                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 60                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 60                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 60                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 90                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 90                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AT            | 90                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 0                                   | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 0                                   | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 0                                   | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 30                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 30                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 30                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 60                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 60                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 60                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 90                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 90                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| AB            | 90                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 0                                   | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 0                                   | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 0                                   | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 30                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 30                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 30                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 60                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 60                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 60                                  | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 90                                  | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |
| ABT           | 90                                  | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%         |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Resultados obtidos para o algoritmo de dois terminais

| Tipo de falta | Ângulo de Incidência (°) | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) | Local da falta - TPC | Local da falta - TPC ideal | $\varepsilon$ (%) |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|
| ABT           | 90                       | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 0                        | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 0                        | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 0                        | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 30                       | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 30                       | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 30                       | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 60                       | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 60                       | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 60                       | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 90                       | 1                                 | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 90                       | 100                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |
| ABC           | 90                       | 200                               | 9,8968               | 9,8968                     | 0,103%            |

Fonte: Autoria Própria

Dos resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7, os erros obtidos foram iguais considerando casos com TPC e com TPC ideal. É importante destacar que como o método de dois terminais depende apenas da detecção das primeiras ondas, não há problema com alteração de polaridade, fato que proporcionou a obtenção do mesmo valor do erro para todas as simulações, se simulações em massa com uma maior quantidade de cenários fossem realizadas outros valores para o erro teriam sido encontrados. Cabe ressaltar que estas estimativas foram obtidas para um SEP com System Impedance Ratio (SIR) de valor baixo ( $SIR \cong 0,5$ ), valor este cujo impacto do TPC é menos evidente (REIS *et al.*, 2019a). Este é definido pela razão entre a impedância da fonte e a impedância da linha, valores mais altos do SIR poderiam conduzir a maiores discrepâncias. Todavia, como o impacto do SIR não é objeto de estudo deste trabalho, diferentes valores do SIR não foram avaliados.

## 5 CONCLUSÕES

A identificação do ponto de ocorrência do curto-circuito de maneira cada vez mais exata é de fundamental importância, de modo a conduzir o SEP ao rápido restabelecimento do serviço, aumentando a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Para tanto, faz-se fundamental o estudo de algoritmos para localização de curtos-circuitos.

Neste trabalho realizou-se uma análise do impacto do uso de medições de tensão em métodos de localização de faltas baseados no domínio do tempo, que se configuram como tendências mais recentes dos dispositivos de proteção. Para tanto, técnicas de um e dois terminais foram implementadas.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se a interferência do TPC em alterar a polaridade das ondas viajantes afetando assim, a detecção correta das ondas viajantes no terminal monitorado e, conseqüentemente, na estimação do local da falta.

Com relação ao algoritmo de dois terminais, o mesmo mostrou-se como mais robusto diante da variação da resistência de falta e do ângulo de incidência por depender apenas da detecção da onda viajante incidente nos terminais monitorados. Em contrapartida, a influência do TPC para o algoritmo de um terminal mostrou-se mais susceptível a erros, ocasionando maiores variações se comparado ao algoritmo de dois terminais. Além disso, os erros obtidos das simulações considerando variações na resistência de falta e no ângulo de incidência foram, em geral, maiores para sistemas com TPC real.

Como sugestões para continuidade das pesquisas realizadas neste trabalho, particularmente no que tange ao método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes com dados de um terminal, propõe-se o estudo de formas que viabilizam a detecção mais confiável das ondas refletidas do ponto de ocorrência do curto-circuito. Além disso, fazem-se necessárias análises dos benefícios em se compensar a resposta dinâmica dos TPC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIEE COMMITTEE REPORT. Bibliography and summary of fault location methods. **Transactions of the American institute of electrical engineers. Power apparatus and systems, part III**, v. 74, n. 3, 1955. ISSN 0097-2460.

ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. [S.l.]: Editora UFMG, 2015.

BEWLEY, L. V. **Traveling waves on transmission systems**. New York: Dover Publications Inc, 1963.

BO, Z. Q.; JOHNS, A. T.; AGGARWAL, R. K. A new approach to transmission protection using fault generated high frequency current signals. In: **12th Power Systems Computation Conference**, [S.l.: s.n.], 1996.

BRITO, N. S. D. **Teoria Wavelet e sua Aplicação em Sistemas de Energia Elétrica**. 1996. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

BRITO, N. S. D. **Aplicação da Wavelet Morlet na análise de transitórios em sistemas de potência**. Campina Grande, 1998.

CHEN, Z.; MAUN, J.-C. Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.15, n. 1, p. 370-375, 2000. ISSN 0885-8950.

CHRISTOPOULOS, C.; THOMAS, D. W. P.; WRIGHT, A. Scheme, based on travelling waves, for the protection of major transmission lines. **IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution**, v. 135, n. 1, p. 63 – 73, Jan 1988. ISSN 0143-7046.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. **International Conference on Power Systems Transients**, Delft, Netherlands, June 2011.

COSTA, F. B. et al. A wavelet-based algorithm to analyze oscillographic data with single and multiple disturbances. **IEEE PES General Meeting**, Pittsburgh, USA, p. 1 – 8, 2008. ISSN 1932-5517.

COSTA, F. B. et al. Real-time detection of fault induced transients in transmission lines. **IET Electronics Letters**, p. 753 – 755, May 2010a.

COSTA, F. B. et al. Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Belém: [s.n.], 2010b.

DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. **Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application**. IEEE Access, v. 2, p. 537–557, 2014. ISSN 2169-3536

DAUBECHIES, I. **Ten Lectures on Wavelets**. New Jersey: Springer, 1992.

Diefenthaler, A. T.; Sausen, A.T.Z.R.; Sausen P.S.; Campos M. “Electric Circuits and Mathematical Models of Electric Power Transmission Lines”, **Advances in Mathematics Research**, New York: Nova Science Publishers, v. 25, 2019.

DOMMEL, H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-88, n. 4, Abril 1969.

FERNANDES JR., D. **Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. 2003. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande.

FISCHER, N.; SKENDZIC, V.; MOXLEY, R.; NEEDS, J. Protective relay traveling wave fault location. In: **11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3.

GALE, P. F. et al. Fault location based on traveling waves. In: **Developments in Power System Protection, Fifth International Conference**. [S.l.: s.n.], 1993a. p. 54 – 59.

GALE, P. F. et al. Fault location based on travelling waves. **Fifth International Conference on Developments in Power System Protection**, p. 54 – 59, 1993b.

GILANY, M. et al. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged under-ground cable system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 82 – 89, Jan 2007. ISSN 0885-8977.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S. **Power System Analysis and Design**. New York:Thomson-Engineering publisher: [s.n.], 2002.

GLOVER, J. D. et al. **Power system analysis and design**. Thomson Learning. [S.l.:s.n.], 2008.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994.

GREENWORD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. New York: Wiley Inters-cience, 1971.

GUZMÁN, A. et al. Accurate and Economical Travelling-Wave Fault Locating Without Communications. **Schweitzer Engineering Laboratories, Inc**, 2018.

HOSHMEH, A.; SCHMIDT, U. Full Frequency-Dependent Cable Model for the Calculation of Fast Transients. **Energies**, v. 10, n. 8, 2017.

HOU, D.; ROBERTS, J. Capacitive voltage transformer: transient overreach concerns and solutions for distance relaying. In: **Electrical and Computer Engineering, 1996.**, Canadian Conference on. [S.l.: s.n.], v. 1, p. 119 – 125, 1996. ISSN 0840-7789.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines. **IEEE Std C37**, p. 1 – 36, 2005.

IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE, 2004. **EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing**. Disponível em: <<http://www:pes-psrc.org>>.

JIAN, Q. et al. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In: ON., . I. C. (Ed.). **POWERCON '98**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 1, p. 533 – 537.

JIE, L. et al. Adaptive travelling wave protection algorithm using two correlation functions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 1, p. 126 – 131, Jan 1999. ISSN 0885-8977.

KASZTENNY, B. et al. Digital relays and capacitive voltage transformers: Balancing speed and transient overreach. In: COLLEGE STATION, 2000, Texas. **Texas A&M 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers**. Texas, 2000.

KEZUNOVIC, M. et al. Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 4, p. 1927 – 1935, Oct 1992. ISSN 0885-8977.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transform in power system: Part 2 examples of application to actual power system transients. **Power Engineering Journal**, p. 193 – 202, August 2001.

LEUVEN EMTF CENTER. **ATP - Alternative Transient Program**: Rule book. Hervelee, Belgium, 1987.

LIANG, J. et al. Application of wavelet transform in travelling wave protection. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 22, n. 8, p. 537 – 542, 2000. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www:sciencedirect:com/science/article/pii/S0142061500000338>>.

LOPES, F. V. **Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais**. 2014. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande.

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet rerepresentation. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 11, n. 7, Jul 1989.

MARTI, J. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**. Piscataway, 1982. v. 1, n. ISSN 00189510, p. 147 – 157.

MARTI, J. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-101, n. 1, Jan 1982.

MARTI, J. R.; TAVIGHI, A. Frequency Dependent Multiconductor Transmission Line Model with Collocated Voltage and Current Propagation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 1, Feb 2018.

MARTINEZ-VELASCO, J.; GUSTAVSEN, B. Overview of Overhead Line Models and their Representation in Digital Simulations. **International Conference on Power Systems Transients**, Rio de Janeiro, Jun 2001.

NAIDU, S. R. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. [S.l.]: Editora Grafset - Co-edição Eletrobrás/Universidade Federal do Paraíba, 1985.

NGU, E. E. et al. Influence of various transmission line models on the wavelet transformation based fault location methods. **IEEE International Conference on Signal and Image Processing Application**, p. 48 – 52, Nov 2009.

NODA, T. et al. “Phase Domain Modeling of FrequencyDependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, Jan 1996.

PAJUELO, E. et al. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. **IET Generation Transmission Distribution**, v. 2, n. 4, p. 588 – 599, July 2008.

PARENTONI, M. F. C. **Localização de Falhas por Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão de Três Terminais – Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Itajubá.

PARSONS, A. C. et al. A wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags. **IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting**, v. 2, p. 1310 – 1315, Feb 1999.

PATHIRANA, V. et al. Investigation of a hybrid travelling wave/impedance relay principle. In: CCECE2002, I. (Ed.). **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373)**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 48 – 53. ISSN ISSN 0840-7789.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. **Wavelet Methods for Time Series Analysis (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics)**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.

REIS, R. L. de A. **Aprimoramento de soluções de localização de curtos-circuitos em linhas de transmissão**. 2019a. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande.

REIS, R. L. de A.; NEVES, W. L. A; LOPES, F. V.; FERNANDES JR. D. Coupling Capacitor Voltage Transformers Models and Impacts on Electric Power Systems: A Review. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2019b.

RESTREPO, L. H. et al. Modelos de línea de transmisión para transitorios electromag-néticos en sistemas de potência. **Energía y Computación**, v. 16, n. 1, p. 21 – 32, Jun 2008.

RIBEIRO, P. Wavelet transform: as advanced tool for analysing non-stationary harmonic distortion in power systems. In: **Proceeding of the 1994 IEEE International Conference in Harmonics and Power Systems**, p. 365 – 369, 1994.

SAHA, M. et al. **Fault Location on Power Networks**. [S.l.]: Springer, 1st Ed. London, 2009.

SAHA, M. M. et al. **Fault Location on Power Networks**. London: Springer, 2010. ISSN 9781848828858.

SAHA, M. M. et al. **Fault Location on Power Networks**. London: Springer, 2001. v. 1.

SANTOSO, S. et al. Power quality assessment via wavelet transform analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 924 – 930, Abr 1996.

SHARMA, S.; MYNAM, M. V. Experiência em Campo Com um Relé de Linhas de Transmissão de Ultra-Alta-Velocidade e Localizador de Faltas por Ondas Viajantes. **Schweitzer Engineering Laboratories**, Washigton, EUA, Out 2018.

SILVA, M. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet**. 2003. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, P. M., SEARA, R., ZÜRN, H. H. Localização de Faltas por Ondas Viajantes – Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet. **XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Campinas, 2001.

SOUZA, T. B. P. **Análise de Ondas Viajantes Em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará.

SPOOR, D.; ZHU, J. G. Improved single-ended traveling-wave fault-location algorithm based on experience with conventional substation transducers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p. 1714 – 1720, July 2006. ISSN 0885-8977.

TZIOUVARAS, D. A. et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. **Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 1, p. 62 – 72, Jan 2000. ISSN 0885-8977.

VITINS, M. A correlation method for transmission line protection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-97, n. 5, p. 1607 – 1615, sept/oct 1978.

WELTON, D. M. Transmission Lines: Theory, Types and Application. **Electrical Engineering Developments, Nova Science Publishers**, 2010.

WILKINSON, W. A.; COX, M. D. Discrete Wavelet Analysis of Power System transient. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 4, p. 2018 – 2044, 1996.

XIAOLI, Z. et al. Fault location using wavelet energy spectrum analysis of traveling waves. **International Power Engineering Conference**, 2007.

ZIMATH, S. L. et al. Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults. **IEEE PES T D**, p. 1 – 5, 2010. ISSN 2160-8555.