



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GERALDO LANDIM DE FRANÇA NETO

**Uma Técnica Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para
Localização de Falhas em Linhas de Transmissão
Monitoradas em Dois Terminais**

Campina Grande, Paraíba

Março de 2015

GERALDO LANDIM DE FRANÇA NETO

Uma Técnica Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para
Localização de Falhas em Linhas de Transmissão
Monitoradas em Dois Terminais

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande, Paraíba

Março de 2015

GERALDO LANDIM DE FRANÇA NETO

Uma Técnica Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para
Localização de Falhas em Linhas de Transmissão
Monitoradas em Dois Terminais

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que, mesmo distante, sempre me apoiou e depositou em mim a confiança de que eu precisava para concluir meus estudos. Em especial, aos meus pais, Geraldo e Maria, que nunca mediram esforços para me oferecer boas condições de estudo.

Ao professor Damásio Fernandes pela atenção e oportunidades que sempre me foram dadas, assim como pelo belo exemplo de conduta pessoal e profissional.

A Adail e Tchaikovsky por estarem sempre à disposição para prestar qualquer ajuda ou esclarecimento, tornando tudo mais simples durante o curso.

Por fim, agradeço aos queridos amigos que pude conhecer no decorrer do curso e que certamente levarei juntos comigo ao longo da vida.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	3
2.2. ONDAS VIAJANTES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	3
2.3. TRANSFORMADA DE PARK (Tdq0) APLICADA À DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	5
2.4. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	7
2.4.1. GALE <i>et al.</i> (1993).....	8
2.4.2. LIN <i>et al.</i> (2008).....	10
2.4.3. GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	11
2.4.4. JIAN <i>et al.</i> (1998).....	13
2.4.5. COSTA <i>et al.</i> (2010)	15
2.4.6. FENG <i>et al.</i> (2008).....	15
2.4.7. SINOPSE BIBLIOGRÁFICA	17
2.5. <i>ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM</i> (ATP)	17
3. MÉTODO PROPOSTO.....	19
3.1. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO EM ANÁLISE	19
3.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS NOS DOIS TERMINAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO	20
3.3. APLICAÇÃO DA Tdq0 E CÁLCULO DOS COEFICIENTES <i>cdif2</i>	21
3.4. IDENTIFICAÇÃO DO INSTANTE INICIAL DOS TRANSITÓRIOS E CÁLCULO DO PONTO DE Falta	23
4. RESULTADOS E ANÁLISES	26
5. CONCLUSÕES	29
6. REFERÊNCIAS	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de transmissão nacional (Fonte: ONS, 2015).....	2
Figura 2 - Elemento incremental de uma linha monofásica sem perdas.	4
Figura 3 – Ondas viajantes de tensão e corrente.	5
Figura 4 - Aplicação da Transformada de Park (Td _{q0}). (a) Transformação realizada no estudo de máquinas elétricas. (b) Transformação realizada como método de detecção de distúrbios e localização de faltas.	6
Figura 5 - Ilustração da Td _{q0} aplicada à detecção de distúrbios.....	7
Figura 6 - Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.	9
Figura 7 - Linha de transmissão monitorada em dois terminais (Fonte: LOPES, 2011).....	12
Figura 8 - Método de 3 terminais proposto por FENG <i>et al.</i> (2008).	16
Figura 9 - Identificação do tempo de trânsito.	24
Figura 10 - Comprimento a ser considerado no método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes.	25
Figura 11 – Sistema elétrico no qual foi simulada uma falta monofásica.	27
Figura 12 - Formas de onda das tensões de fase monitoradas no terminal 1 da LT.....	27
Figura 13 - Transitórios na fase A dos terminais 1 (em vermelho) e 2 (em verde) da LT. ...	27
Figura 14 - Formas de onda das tensões monitoradas nos dois terminais da LT e coeficientes [<i>cdif</i>] ₂	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.....	9
Tabela 2 - Equações propostas por FENG <i>et al.</i> (2008).....	16
Tabela 3 - Parâmetros da linha de transmissão simulada.	26

RESUMO

Dentre os diversos componentes de um sistema elétrico de potência (SEP), as linhas de transmissão possuem papel de extrema importância, uma vez que possibilitam a interligação da geração de energia elétrica até o seu destino final - a distribuição de energia para os consumidores. Portanto, é necessário que esta transmissão de energia ocorra sob baixos níveis de perdas e apresente boa continuidade de serviço. Com o auxílio da Transformada de Park, pode-se detectar a ocorrência de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais e, a partir disto, determinar a localização do ponto da falta utilizando-se a teoria de ondas viajantes. A precisão do método proposto neste trabalho depende da frequência de amostragem dos registradores digitais de perturbação (RDP) instalados nos dois terminais da linha de transmissão. É necessário ainda o uso do GPS, de maneira que as informações obtidas nos terminais possam ser sincronizadas. O algoritmo desenvolvido neste trabalho foi implementado no MATLAB[®] para, em seguida, ser incorporado às simulações digitais realizadas via linguagem MODELS do ATP (*Alternative Transients Program*). Os resultados apresentados evidenciam o bom desempenho da transformada de Park na detecção de transitórios em linhas de transmissão.

Palavras-chave: Faltas em linhas de transmissão; localização de faltas; transformada de Park; transitórios eletromagnéticos.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos componentes de um sistema elétrico de potência (SEP), as linhas de transmissão possuem papel de extrema importância, uma vez que possibilitam a interligação da geração de energia elétrica até o seu destino final - a distribuição de energia para os consumidores. Portanto, é necessário que esta transmissão de energia ocorra sob baixos níveis de perdas e apresente boa continuidade de serviço. O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por longas linhas de transmissão que, além de ligar as unidades geradoras aos grandes centros consumidores, também interligam os sistemas elétricos das diferentes regiões do país. A Figura 1 ilustra o sistema de transmissão nacional até o ano de 2015. Tal sistema compreendia aproximadamente 100 mil km em 2013 e tinha investimentos previstos de R\$ 31 bilhões em quase 23 mil km de linhas até 2014.

Por terem grandes extensões, as linhas de transmissão apresentam maior susceptibilidade a distúrbios provenientes da ação dos ventos, chuvas, descargas atmosféricas, entre outros. Evidentemente, a realização de um diagnóstico rápido e preciso de defeitos ocorridos no sistema de transmissão é de fundamental importância para o seu pronto restabelecimento. Neste contexto, percebe-se que a aplicação de métodos eficientes para localização de faltas se torna cada vez mais essencial, pois podem evitar interrupções de fornecimento de energia de longa duração, assegurando, conseqüentemente, boas taxas de continuidade de serviço e uma restauração rápida da linha com defeito.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho visa a elaboração de um algoritmo para a localização de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais baseando-se na teoria de ondas viajantes. Como objetivo específico, pretende-se utilizar o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP (*Alternative Transients Program*) para incorporar as rotinas desenvolvidas no MATLAB[®] às simulações digitais e avaliar essas rotinas considerando uma situação de falta em linhas de transmissão.

Horizonte 2015

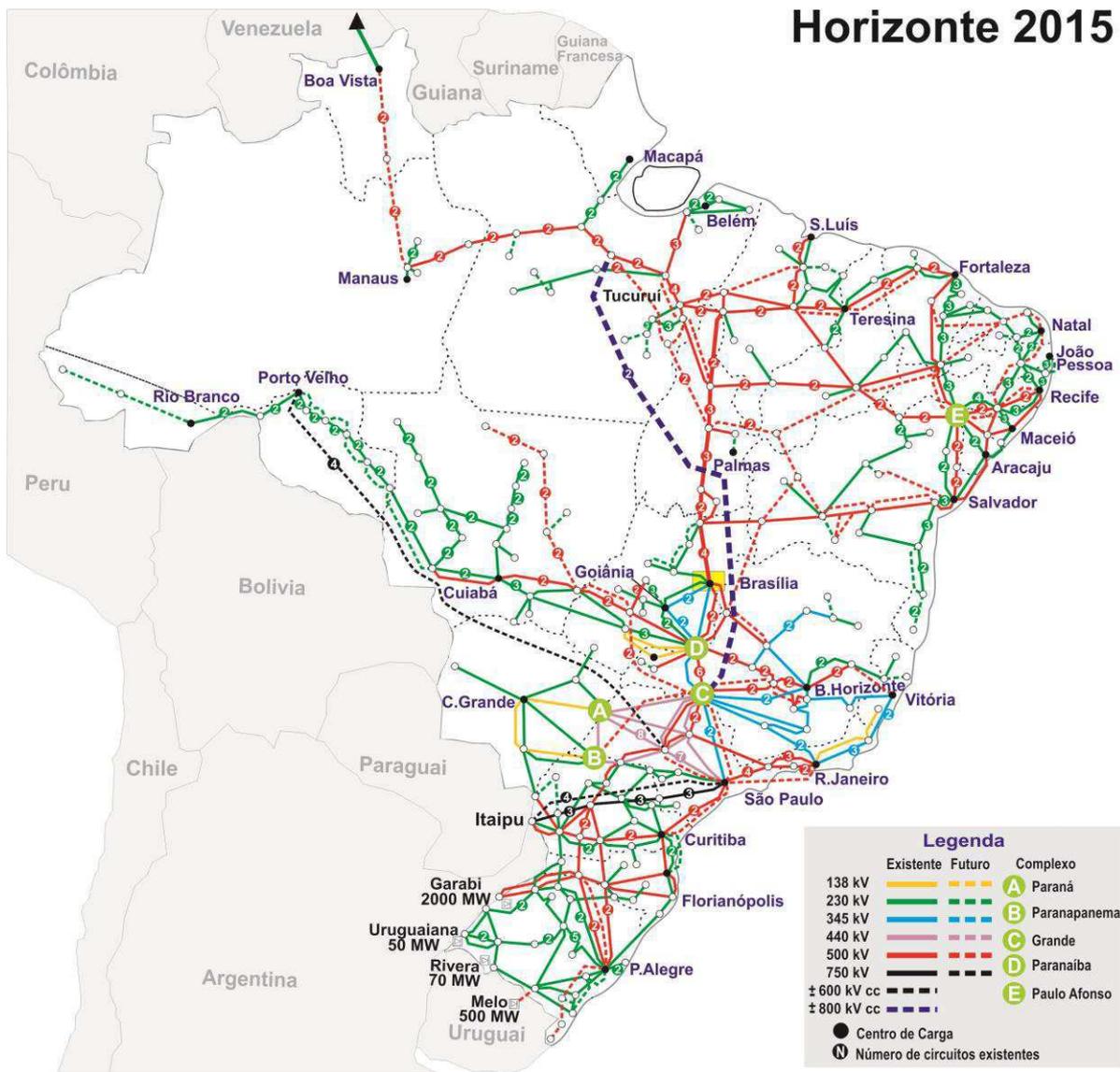


Figura 1 - Sistema de transmissão nacional (Fonte: ONS, 2015).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Qualquer sistema elétrico, por melhor projetado que seja, está sujeito a distúrbios causados por diversos fatores, sejam estes humanos ou naturais. Os tipos mais relevantes de distúrbios são as faltas. Estas faltas são interpretadas como desligamentos não programados dos componentes de um sistema elétrico. As faltas são ainda classificadas de acordo com o número de fases envolvidas, sendo usualmente denominadas monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra ou trifásicas. As que ocorrem mais comumente são as faltas monofásicas e bifásicas.

Em uma linha de transmissão, a ocorrência e a eliminação de faltas são fenômenos importantes e que devem ser estudados porque causam variações bruscas nos valores de tensão e corrente que podem comprometer o sistema elétrico em questão. Quando ocorrem faltas em um determinado ponto de uma linha de transmissão (LT), transitórios eletromagnéticos são gerados e se propagam em ondas viajantes em direção aos terminais da LT. Tendo-se em vista que os parâmetros de uma LT são distribuídos, estas ondas não chegam aos terminais instantaneamente. Na verdade, esses transitórios levam um determinado tempo de trânsito para chegar aos terminais e este tempo pode ser utilizado na localização em que a falta ocorreu.

2.2. ONDAS VIAJANTES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Atualmente, os modelos mais utilizados na modelagem de linhas de transmissão são baseados na solução das equações de onda e corrente. O desenvolvimento a seguir ilustra isso.

De acordo com a Figura 2, pode-se chegar às equações (1) e (2).

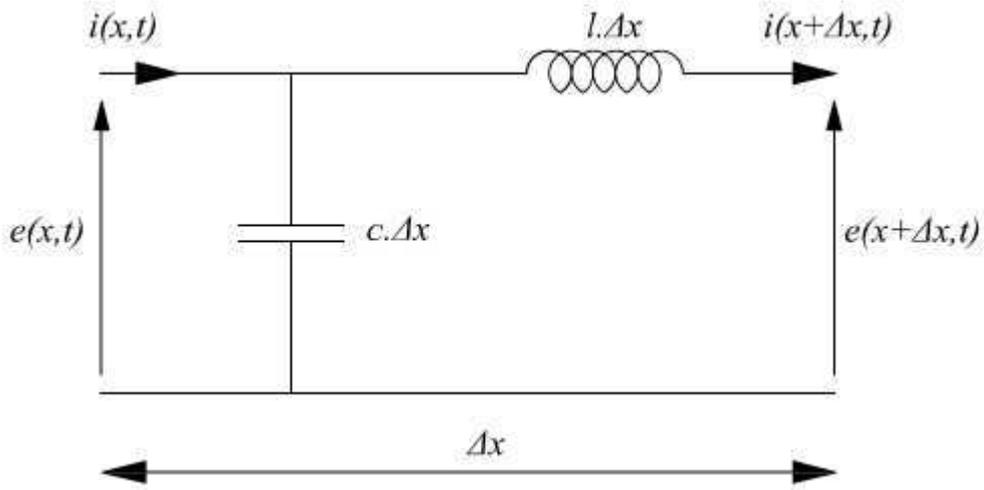


Figura 2 - Elemento incremental de uma linha monofásica sem perdas.

$$e(x + \Delta x, t) = e(x, t) - l\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x + \Delta x, t) \quad (1)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - c\Delta x \frac{\partial}{\partial t} e(x, t), \quad (2)$$

em que, l e c são os valores de indutância série e capacitância *shunt* por unidade de comprimento da linha de transmissão. Fazendo-se o elemento incremental Δx tender a zero, chega-se às equações de onda da tensão e da corrente da LT, mostradas nas equações (3) e (4), respectivamente.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (4)$$

Por fim, uma análise das equações (3) e (4) fornece as seguintes soluções gerais no domínio temporal.

$$e(x, t) = f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (5)$$

$$i(x, t) = \frac{f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) - f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right)}{Z} \quad (6)$$

Onde f_1 e f_2 podem ser interpretadas como funções de ondas viajantes que se superpõem e se propagam em sentidos opostos. $Z = \sqrt{l/c}$ é a impedância de surto da LT e v é a velocidade de propagação das ondas. A Figura 3 ilustra esta interpretação.

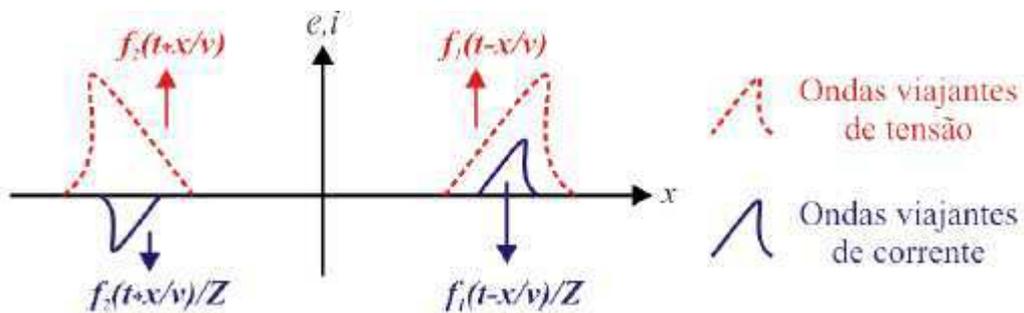


Figura 3 – Ondas viajantes de tensão e corrente.

2.3. TRANSFORMADA DE PARK (Tdq0) APLICADA À DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A Tdq0 decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo (componente de eixo direto d) e a outra em quadratura com este mesmo eixo (componente de eixo em quadratura q). Tal conceito se tornou bastante útil no estudo de máquinas de pólos salientes pelo fato de que, devido às saliências do rotor, cada fase do estator verifica uma indutância variável no tempo e as grandezas transformadas, que giram em sincronismo com ele, verificam caminhos magnéticos constantes (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Com o auxílio da Transformada de Park, pode-se detectar a ocorrência de faltas em uma LT e, a partir disto, determinar a localização do ponto da falta. Considerando que o sistema referencial das grandezas transformadas gira na frequência da rede em sincronismo com os fasores das fases de um dado sistema trifásico, as grandezas transformadas, em regime permanente, não identificarão variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos vetores será nula. Na ocorrência de transitórios, a velocidade relativa entre tais grandezas se torna diferente de zero, fazendo com que os sinais gerados possuam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório (LOPES, 2011).

Na Figura 4 é apresentada a analogia entre a aplicação da Tdq0 no estudo de máquinas elétricas e na localização de faltas.

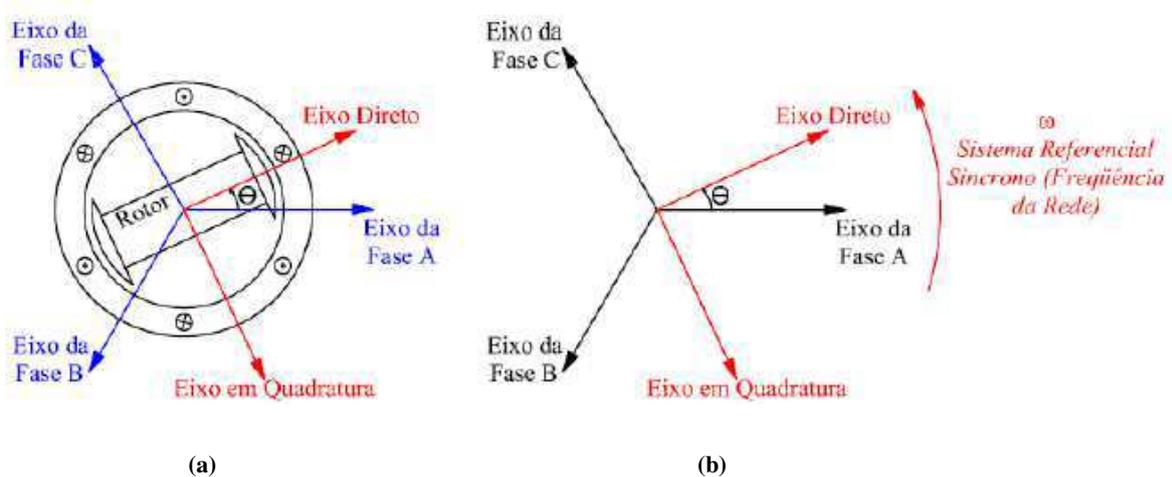


Figura 4 - Aplicação da Transformada de Park (Tdq0). (a) Transformação realizada no estudo de máquinas elétricas. (b) Transformação realizada como método de detecção de distúrbios e localização de faltas.

Basicamente, o que se faz é alinhar a componente de eixo direto V_d com a fase V_A de um sistema trifásico. Sob essa hipótese, o valor de V_d , isto é, os coeficientes obtidos de acordo com a frequência de amostragem do sistema, são aproximadamente nulos quando o sistema encontra-se em regime permanente. Uma vez que uma falta ocorre no sistema, esses coeficientes não mais serão nulos e a falta pode ser detectada. Entretanto, existem situações de falta em que o simples monitoramento dos coeficientes V_d não é suficiente, pois a variação destes é tão pequena que o sistema de detecção interpreta erroneamente essa variação como característica de um sistema em regime permanente.

Visando solucionar este problema, faz-se o cálculo dos coeficientes c_{dif} , que são proporcionais à diferença entre o valor de V_d atual e o imediatamente anterior. Visando-se ainda uma maior robustez do sistema de detecção, elevam-se esses coeficientes ao quadrado, obtendo-se $[c_{dif}]^2$. Uma ilustração deste fato é apresentada na Figura 5, a qual foi obtida através de simulações no MATLAB[®]. Pode-se perceber que a amplitude dos coeficientes $[c_{dif}]^2$ é bem maior do que a dos coeficientes de V_d . Desta maneira, o sistema de detecção torna-se bem mais sensível à detecção de transitórios eletromagnéticos. O procedimento de cálculo dos coeficientes será mostrado adiante.

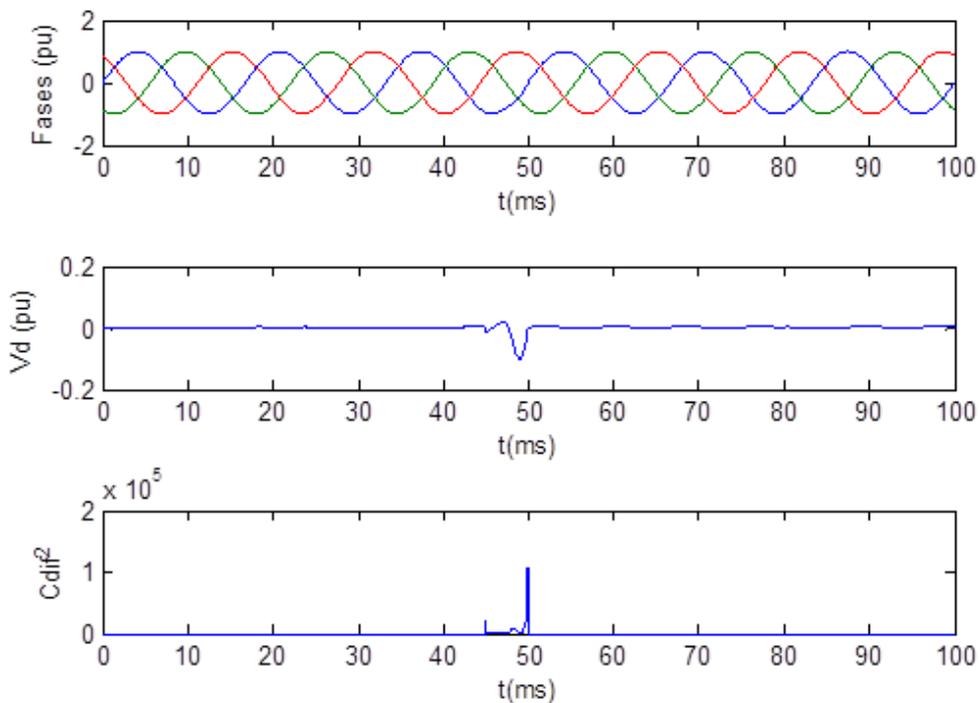


Figura 5 - Ilustração da Tdq0 aplicada à detecção de distúrbios.

2.4. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Nos últimos anos, a possibilidade de detecção e localização de faltas em linhas de transmissão através do estudo dos transitórios eletromagnéticos em determinadas partes do sistema elétrico tornou-se um tema que despertou o interesse de vários pesquisadores. Os

métodos de localização de falta mais conhecidos baseiam-se no monitoramento de um, dois ou três terminais. Os métodos que utilizam mais de um terminal são considerados mais precisos e só podem ser implementados com o auxílio do GPS (*Global Positioning System*), de forma que este aparelho sincronize as informações dos diferentes pontos de monitoramento.

2.4.1. GALE *et al.* (1993)

GALE *et al.* (1993) relacionam os diversos métodos de localização de faltas separando-os em quatro grupos denominados A, B, C e D. Dentre os critérios utilizados para a alocação dos métodos em cada um dos quatro grupos, destacam-se o número de terminais monitorados, a utilização de pulsos elétricos e a utilização de ondas refletidas em um mesmo terminal. Como é mostrado na Tabela 1, os métodos do tipo A e C monitoram apenas um terminal e utilizam ondas refletidas. Porém, os do tipo A não utilizam pulsos elétricos, enquanto os do tipo C utilizam. Por sua vez, os métodos do tipo B e D fazem o monitoramento de dois terminais. Os métodos do tipo B também fazem uso de pulsos elétricos e de ondas refletidas. Já os do tipo D não utilizam nem pulsos elétricos e nem ondas refletidas.

GALE *et al.* (1993) declaram que métodos que utilizam apenas um terminal (A e C) evitam a utilização do GPS, porém são mais complexos e mais susceptíveis a erros. A descrição a seguir ilustra essa informação.

A Figura 6 mostra um diagrama de reflexões que representa a propagação de ondas viajantes decorrentes de uma falta em uma linha de transmissão.

Tabela 1 - Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.

Classificação Tipo do método	Utiliza pulsos elétricos	Número de terminais utilizados		Utiliza ondas refletidas
		1	2	
TIPO A		√		√
TIPO B	√		√	√
TIPO C	√	√		√
TIPO D			√	

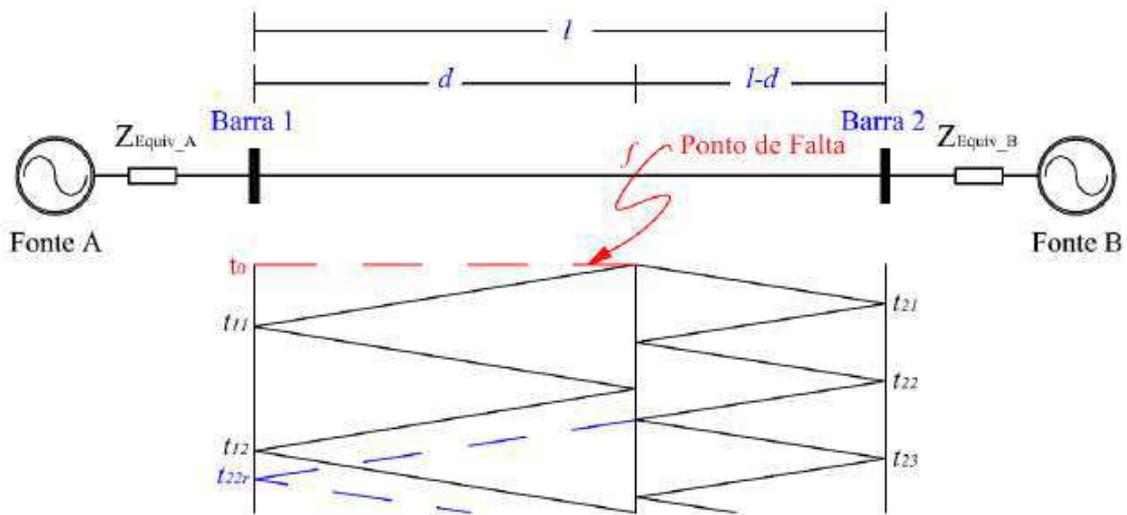


Figura 6 - Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.

Onde: t_{11} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 1;

t_{21} = Instante de chegada da primeira onda incidente à barra 2;

t_{12} = Instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à barra 1;

t_{22} e t_{23} = Instante de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à barra 2;

t_{22r} = Instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à barra 1.

Assumindo que v é a velocidade das ondas viajantes, para os métodos que utilizam um terminal, a distância do ponto da falta ao terminal da barra 1 é calculada por:

$$d = \frac{(t_{12} - t_{11}) \cdot v}{2} \quad (7)$$

Com o auxílio da Figura 6, percebe-se que o instante t_{12} pode ser confundido com o instante t_{22r} . Isto acaba por gerar erros nos cálculos e conseqüentemente na localização da falta. Por outro lado, os métodos que utilizam dois terminais, sobretudo os que não utilizam ondas refletidas (D) são baseados em um princípio bastante simples. Tais métodos consideram apenas os primeiros instantes de chegada dos transitórios às barras 1 e 2, isto é, consideram apenas os instantes t_{11} e t_{21} . Com esses instantes sincronizados via GPS, a distância da falta à barra 1 pode ser calculada pela equação (8).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (8)$$

De fato, métodos que utilizam dois terminais são mais robustos e precisos que métodos que utilizam apenas um terminal, pois independem do instante de detecção de ondas refletidas e refratadas em outros pontos do sistema elétrico.

2.4.2. LIN *et al.* (2008)

Devido à presença de ruídos no sistema, um método de localização de faltas menos sensível a ruídos baseado na correlação dos sinais de tensão nos dois terminais foi proposto por LIN *et al.* (2008). O sinal de correlação indica a força e a direção da relação entre duas variáveis aleatórias. Para isso, utilizam a equação (9) a seguir.

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt \quad (9)$$

Onde: $R_{xy}(\tau)$ = Coeficientes de correlação;

$x(t)$ e $y(t)$ = Sinais de tensão medidos nas barras 1 e 2;

τ = Tempo de trânsito entre a barra 1 e o ponto de falta.

O método propõe que o tempo de trânsito τ pode ser obtido através da diferença entre os tempos de ocorrência de um terço do valor de pico de R_{xy} (na borda de subida) e da metade do valor de pico de R_{xy} (na borda de descida), conforme apresentado na equação (10) (LOPES, 2011).

$$\tau = (t_{11} - t_{21}) = \left[t \Big|_{R_{xy} = \left(\frac{1}{3}\right)MAX(R_{xy}) \rightarrow Subida} - t \Big|_{R_{xy} = \left(\frac{1}{2}\right)MAX(R_{xy}) \rightarrow Descida} \right]. \quad (10)$$

Calculado o tempo de trânsito, a distância da barra 1 ao ponto de falta pode ser encontrada utilizando-se a equação (8). Entretanto, este método não apresenta boa precisão quando comparado com os outros métodos, pelo fato de determinar empiricamente o tempo de trânsito τ .

2.4.3. GIRGIS *et al.* (1992)

GIRGIS *et al.* (1992) propõem um método baseado nos fasores fundamentais de tensão e corrente para a determinação do ponto da falta. Neste método, utilizam o sistema apresentado na Figura 7.

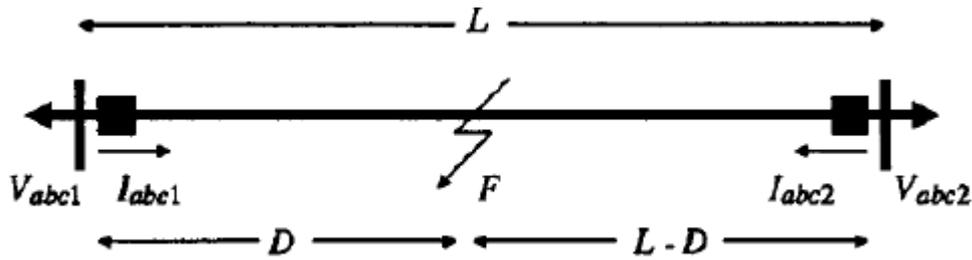


Figura 7 - Linha de transmissão monitorada em dois terminais (Fonte: LOPES, 2011).

A tensão no ponto da falta, VF_{abc} , se expressa das seguintes maneiras:

$$VF_{abc} = V_{abc1} - D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad (11)$$

ou

$$VF_{abc} = V_{abc2} - (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \quad (12)$$

Sendo: VF_{abc} = Tensão no ponto de ocorrência da falta;

V_{abc1} e V_{abc2} = Fasores de tensão trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;

I_{abc1} e I_{abc2} = Fasores de corrente trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;

Z_{abc} = Matriz impedância série, por unidade de comprimento;

L = Comprimento da linha de transmissão;

D = Distância entre a barra 1 e o ponto de falta.

Combinando-se (11) e (12), chega-se à seguinte equação:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (13)$$

Por fim, são analisadas cada fase do sistema, chegando-se ao seguinte equacionamento.

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (14)$$

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \cdot \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \cdot I_{i2}); \quad j = a, b, c \quad (15)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot (I_{i1} + I_{i2}); \quad j = a, b, c \quad (16)$$

De posse das equações anteriores, a distância do ponto da falta à barra 1 (D) pode ser obtida solucionando-se a equação (14) por meio do método dos mínimos quadrados. A equação (17) apresenta a solução encontrada.

$$D = (M^+ \cdot M)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y \quad (17)$$

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

O método de GIRGIS *et al.* (1992) é aplicável em linhas monitoradas em dois e três terminais, sendo uma técnica independente do tipo de falta. O ponto negativo deste método é o fato de os erros serem maiores quando ocorrem faltas de baixa impedância, uma vez que a maioria das faltas em linhas de transmissão longas ocorre em condições de baixa impedância. O grande número de variáveis envolvidas também torna o método mais susceptível a erros, pois torna os procedimentos computacionais mais complexos.

2.4.4. JIAN *et al.* (1998)

Um dos maiores desafios enfrentados pelos pesquisadores é achar o valor mais próximo possível do real da velocidade de propagação das ondas viajantes e o tempo de

chegada das frentes de onda às barras monitoradas. Obviamente, quanto mais precisos estes valores, mais preciso será o método. Comumente, atribui-se a mesma velocidade – frequentemente a velocidade da luz - às ondas que viajam a diferentes terminais. JIAN *et al.* (1998) afirmam que ondas que se direcionam a diferentes terminais têm componentes de frequência dominante diferentes e, portanto, possuem velocidades de propagação diferentes. Tendo-se tal fato em vista, JIAN *et al.* (1998) propõem um cálculo espectral a fim de se determinar a frequência dominante de cada onda viajante antes do cálculo da localização da falta. O método proposto baseia-se nos valores do coeficiente η e no equacionamento a seguir.

$$\eta = \frac{|t_2 - t_1|}{l} \cdot v \quad (18)$$

$$se: \eta = grande \rightarrow d = \frac{v_1 v_2 \cdot (t_1 - t_2) + v_1 l}{v_1 + v_2} \quad (19)$$

$$se: \eta = pequeno \rightarrow d = \frac{v \cdot (t_1 - t_2) + l}{2} \quad (20)$$

Onde: l = Comprimento da linha;

v = Velocidade de propagação da onda mais rápida;

t_1 e t_2 = Tempo de chegada das ondas viajantes às barras 1 e 2;

v_1 e v_2 = Velocidade de propagação das ondas viajantes às barras 1 e 2;

d = Distância do ponto da falta à barra 1.

O método proposto por JIAN *et al.* (1998) de fato pode melhorar a precisão da localização das faltas, visto que as frequências dominantes dos sinais transitórios influenciam em sua velocidade de propagação. Porém, uma análise espectral de tais sinais em tempo real torna-se complexa devido à falta dos registros oscilográficos completos.

2.4.5. COSTA *et al.* (2010)

COSTA *et al.* (2010) propõem um método baseado no uso da transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR), que é uma variante da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) clássica. O método consiste no cálculo dos coeficientes *Wavelet* que, em regime permanente, possuem valores muito próximos de zero. No caso de transitórios, tais coeficientes assumem valores diferentes de zero, o que torna a detecção de faltas possível.

A limitação de tal método consiste no fato de que os primeiros coeficientes da TWDR dependem dos valores iniciais e finais do sinal original, o que acaba gerando um efeito de borda nos primeiros coeficientes gerados, podendo ser interpretados como distúrbios quando, na verdade, não o são.

Vale salientar que para a TWDR se faz necessário o monitoramento individual das três fases do sistema em estudo para a detecção correta dos transitórios. Outra característica a ser destacada é que esta transformada utiliza amostras de instantes passados do sistema para o cálculo dos coeficientes *Wavelet* atuais de interesse. Tal dependência não apenas causa o efeito de borda apresentado, mas também torna a implementação de algoritmos localizadores de falta mais complexa (LOPES, 2011).

2.4.6. FENG *et al.* (2008)

Diferentemente dos métodos apresentados anteriormente, FENG *et al.* (2008) propõem um método que independe do cálculo da velocidade de propagação das ondas viajantes. Para isso, são utilizados três instantes de tempo de chegada diferentes. Desta forma, são utilizadas três barras de monitoramento. O sistema proposto é mostrado na Figura 8.

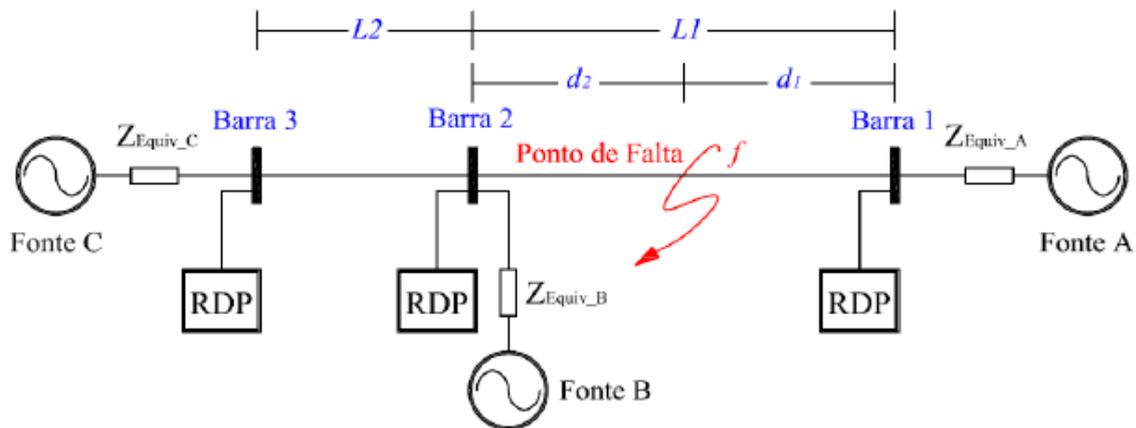


Figura 8 - Método de 3 terminais proposto por FENG *et al.* (2008).

FENG *et al.* (2008) utilizam a Transformada *Wavelet* para a detecção do instante de chegada das ondas e o equacionamento apresentado na Tabela 2 para o cálculo do ponto da falta.

Tabela 2 - Equações propostas por FENG *et al.* (2008).

Equações Preliminares	Equação para localização da falta
$\begin{cases} (t_1 - t_o) \cdot v = d_1 \\ (t_2 - t_o) \cdot v = d_2 \\ (t_3 - t_o) \cdot v = L_2 + d_2 \\ d_1 + d_2 = L_1 \end{cases}$	$d_2 = \frac{(t_2 - t_1) \cdot L_2}{2 \cdot (t_3 - t_2)} + \frac{L_1}{2}$

Onde: t_o = Instante inicial da falta ocorrida no ponto f ;

v = Velocidade de propagação das ondas viajantes;

t_1 e t_2 e t_3 = Tempos de chegada das ondas nas barras 1, 2 e 3;

d_2 = distância entre a barra 2 e o ponto f de ocorrência da falta.

Aqui, deve-se frisar que a velocidade de propagação das ondas deve ser considerada igual em todas as direções, o que é uma fonte de erros, como afirmam JIAN *et al.* (1998). Além disso, a necessidade de três Registradores Digitais de Perturbações (RDP) e do conhecimento do comprimento de mais trechos da linha de transmissão torna o método mais dispendioso que métodos baseados no monitoramento de apenas dois terminais.

2.4.7. SINOPSE BIBLIOGRÁFICA

Pode-se notar que os métodos propostos diferem basicamente na forma de detecção dos transitórios e no método do cálculo do ponto de falta.

Evidencia-se o uso crescente da Transformada *Wavelet* na análise e detecção de distúrbios em sistemas elétricos. Métodos como o da correlação, por outro lado, não são muito utilizados. Os métodos baseados em componentes de frequência fundamental ainda são largamente utilizados apesar de apresentarem erros consideráveis quando comparados com métodos baseados em componentes de alta frequência. O desenvolvimento dos RDP torna os métodos baseados em componentes de alta frequência cada vez mais populares e precisos.

Neste trabalho, será utilizado um método baseado na Transformada de Park e no monitoramento de apenas dois terminais. Para o cálculo do ponto da falta, utiliza-se a equação (8) proposta por GALE *et al.* (1993).

2.5. ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)

O ATP é um programa utilizado para realizar simulações digitais de fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência. Além do cálculo de transitórios, o ATP tem capacidade de modelagem bastante extensa e recursos adicionais que permitem a simulação de redes complexas e sistemas de controle de estrutura arbitrária.

A partir da década de 60, iniciou-se o desenvolvimento do programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) por Herman W. Dommel, para a *Bonneville Power Administration* (BPA). O programa inicial trabalhava com simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão utilizavam o método Bergeron.

Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que o tornou uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos.

Divergências entre Scott Meyer e o EPRI (*Electric Power Research Institute*), que investiu no projeto do EMTP a partir de 1984, levaram à criação de uma nova versão do EMTP, a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o Leuven EMTP Center (LEC). Esta nova versão é denominada ATP – *Alternative Transients Program*, que constitui a continuação das versões anteriores do programa (AMON FILHO; PEREIRA, 1994).

A MODELS é uma linguagem de descrição de uso geral apoiado por um amplo conjunto de ferramentas de simulação para a representação e estudo de sistemas variantes no tempo. Esta linguagem permite a descrição de componentes de controle e circuitos criados pelo usuário, definindo uma interface simples para conectar outros programas, como o MATLAB[®] ao ATP.

3. MÉTODO PROPOSTO

3.1. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO EM ANÁLISE

O método proposto neste trabalho utiliza a equação (8) para determinar a distância do ponto da falta a um dos terminais monitorados. Como se pode ver, deve-se conhecer a velocidade de propagação das ondas viajantes. Para isso, devem-se determinar os parâmetros da LT. Os parâmetros de resistência, indutância e capacitância de uma LT são distribuídos ao longo de sua extensão (ARAÚJO; NEVES, 2005) e dependem de fatores como a estrutura das torres de transmissão e da resistividade do solo por onde a linha passa. Obviamente, quanto mais preciso o cálculo dos parâmetros da LT, mais precisa será a localização da falta.

Nos casos em que os fatores supracitados são conhecidos, pode-se utilizar o LINE CONSTANTS do ATP para o cálculo dos parâmetros. Para os casos em que os parâmetros de sequência positiva e zero são conhecidos, utiliza-se a equação (21).

$$v_m = \frac{\omega}{\text{Im}[\sqrt{(R_m + j\omega L_m) \cdot (j\omega C_m)}]} \quad (21)$$

Os parâmetros R_m , L_m e C_m são valores por unidade de comprimento. O m indica o modo de propagação das componentes da transformada de Clarke, que, para o estudo em questão é o modo de propagação aéreo, tendo-se em vista que este abrange todos os tipos de falta.

3.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS NOS DOIS TERMINAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Os valores de tensão e corrente são monitorados em duas extremidades diferentes através de RDP e precisam, portanto, ser sincronizados. Para isso, o método exige o uso de um GPS. Logo, a exatidão do método proposto depende da qualidade destes aparelhos.

No caso dos RDP, um fator de interesse é a sua frequência de amostragem. Usualmente, encontram-se RDP com frequências de amostragem entre 15 kHz e 20 kHz. Partindo-se do princípio que os tempos de trânsito das ondas viajantes são múltiplos do período de amostragem dos RDP, quanto menor for esse período de amostragem (ou seja, quanto maior for a frequência de amostragem), maior será a resolução do algoritmo na identificação dos transitórios eletromagnéticos.

Um parâmetro importante que tem relação com a frequência de amostragem dos RDP é o erro que eles podem causar no cálculo do ponto de falta. Este erro é determinado pela equação (22).

$$e = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (22)$$

Onde c é o valor aproximado da velocidade da luz e Δt é o período de amostragem do RDP. Assim, supondo-se um RDP com frequência de amostragem de 20 kHz, o erro calculado seria em torno de 7,5 km.

3.3. APLICAÇÃO DA Tdq0 E CÁLCULO DOS COEFICIENTES $[c_{dif}]^2$

Como mencionado anteriormente, os coeficientes V_d da Tdq0 são utilizados na detecção dos transitórios nos terminais de monitoramento. Esses coeficientes são obtidos por meio da equação (23).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \theta) & \sin(\omega t + \theta) \\ 0 & -\sin(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde t corresponde aos instantes de tempo sincronizados via GPS e θ é o ângulo de fase da componente de eixo direto V_d , que deve ser alinhado com uma das fases do sistema. Assim, supondo que o ângulo da fase A é θ_v , para o sistema em regime permanente, tem-se:

$$V_A = V \cdot \sin(\omega t + \theta_v) \quad (24)$$

$$V_B = V \cdot \sin(\omega t + \theta_v - 120^\circ) \quad (25)$$

$$V_C = V \cdot \sin(\omega t + \theta_v + 120^\circ). \quad (26)$$

A partir da equação (23), obtém-se:

$$V_d = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot \sin(\theta - \theta_v) \quad (27)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot \cos(\theta - \theta_v) \quad (28)$$

Aqui, pode-se notar que as componentes V_d e V_q são ortogonais. Alinhando-se as componentes V_d e V_A , ou seja, $\theta = \theta_v$, obtêm-se as equações (29) e (30).

$$V_d = 0 \quad (29)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (30)$$

Como dito, para o sistema funcionando em regime permanente, os coeficientes de V_d são nulos.

É importante notar que, tendo-se em vista a adequação do método a sistemas em quaisquer níveis de tensão, é necessária a normalização das grandezas medidas. Para isso, introduz-se o parâmetro V_M , calculado pela equação (31).

$$V_M = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (31)$$

A equação acima pode ser obtida a partir da ortogonalidade das componentes de eixo direto e em quadratura. De (31), chega-se à equação (32).

$$V = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (32)$$

Desta maneira, os sinais que passam a ser monitorados nos terminais da LT são na verdade V_A/V , V_B/V e V_C/V . Os valores destes sinais são aproximadamente unitários quando o sistema opera em regime permanente. A Figura 5 mostrada anteriormente ilustra o valor unitário destes sinais.

Como mencionado anteriormente, o simples cálculo dos coeficientes V_d por vezes não é o suficiente, pois estes apresentam uma atenuação elevada. Portanto, faz-se necessário o cálculo dos coeficientes $[c_{dif}]^2$, como apresentado na equação (33).

$$[c_{dif}(t)]^2 = \left[\frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]^2 \quad (33)$$

Onde Δt é o período de amostragem do RDP. Esses coeficientes são bem mais sensíveis à ocorrência de transitórios e, portanto, proporcionam uma maior robustez ao método de detecção proposto. A Figura 5, mostrada na seção 2, ilustra todo o processo supracitado. No primeiro gráfico, aparecem as três fases monitoradas e normalizadas. Uma pequena perturbação foi simulada no tempo de aproximadamente 45 ms. Percebe-se, pelo segundo gráfico, que os coeficientes V_d , apesar de não mais serem nulos, ainda possuem uma amplitude muito baixa. O terceiro gráfico, por outro lado, mostra os coeficientes $[c_{dif}]^2$ que possuem uma amplitude mais elevada.

3.4. IDENTIFICAÇÃO DO INSTANTE INICIAL DOS TRANSITÓRIOS E CÁLCULO DO PONTO DE FALTA

O instante inicial dos transitórios é calculado a partir dos coeficientes $[c_{dif}]^2$. A detecção dos transitórios é mostrada na Figura 9.

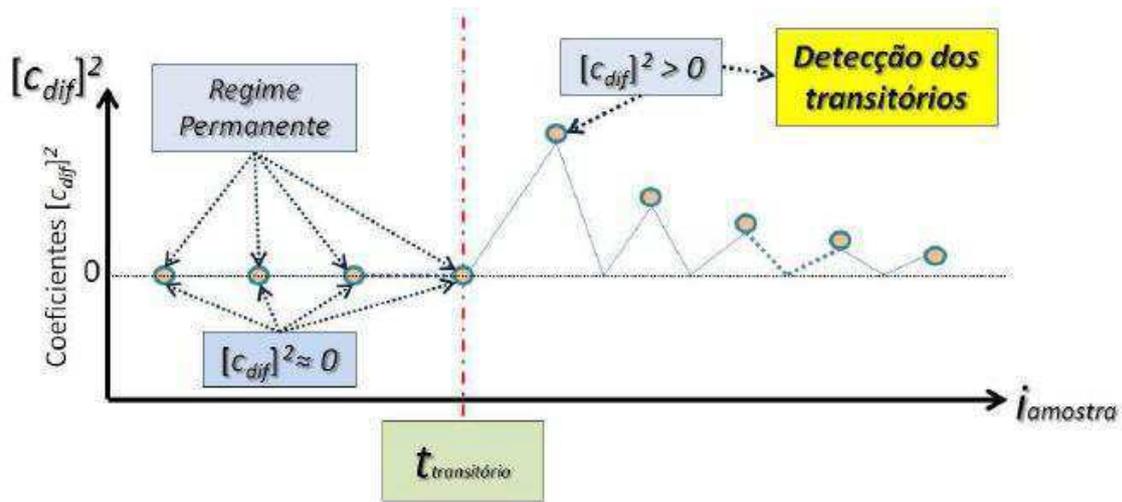


Figura 9 - Identificação do tempo de trânsito.

O algoritmo consiste na detecção de um valor diferente de zero dos coeficientes $[c_{dif}]^2$. Enquanto este permanecer nulo, não existe transitório. A partir do momento em que o valor de $[c_{dif}]^2$ exceder um determinado limiar, o cálculo do tempo de trânsito é feito por meio da equação (34).

$$t_{transitório} = \frac{i - 1}{F_s} \quad (34)$$

Onde F_s é a frequência de amostragem do RDP e i corresponde ao número da amostra em que foi detectado um valor diferente de zero.

Conhecendo-se os instantes de chegada das ondas viajantes aos dois terminais monitorados, do comprimento da LT em questão e da velocidade das ondas viajantes, utiliza-se a equação (8) e obtém-se a distância do ponto de falta a um dos terminais monitorados.

O comprimento l utilizado na equação (8) representa o comprimento total da linha de transmissão em análise, incluindo também o comprimento dos cabos que ligam os

transformadores de potencial capacitivos (TPC) utilizados na medição aos RDP. A Figura 10 ilustra a distância que deve ser levada em consideração. Tal consideração faz-se necessária porque os transitórios se propagam por todos os cabos.

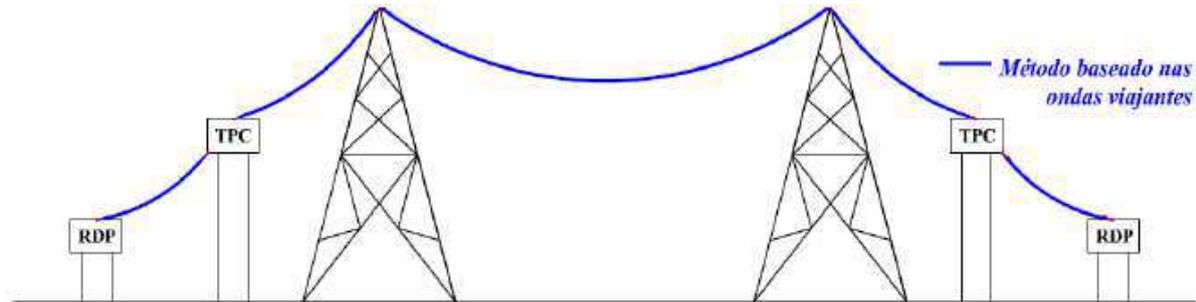


Figura 10 - Comprimento a ser considerado no método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes.

A princípio, pode-se imaginar que o cálculo exato da distância supracitada é um processo de difícil execução, tendo-se em vista as catenárias formadas durante toda a extensão da LT. Entretanto, a obtenção deste comprimento pode ser feita utilizando justamente o processo de detecção de transitórios durante a energização da linha. Para isso, basta energizar a LT em um de seus terminais deixando o outro em aberto. Dessa forma, ondas viajantes serão refletidas na extremidade em aberto. Basta então medir o tempo de chegada dessas ondas ao terminal onde foi realizada a energização. Chamando-se este tempo de t_E , o comprimento l da LT em questão pode ser calculado pela equação (35).

$$l = \frac{t_E \times v}{2} \quad (35)$$

Onde v é a velocidade de propagação das ondas na LT. Aqui, ressalta-se a importância dessa velocidade v . Neste trabalho, será utilizada tal velocidade como sendo igual à velocidade da luz (300000 km/s). Para uma precisão maior do método aqui proposto, a velocidade v deve ser calculada pela equação (21), que depende dos parâmetros das linhas de transmissão. A obtenção precisa desses parâmetros pode assunto para trabalhos futuros.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Com o auxílio do *software* ATP, é possível simular faltas em sistemas elétricos de potência. Estas simulações permitem um maior entendimento dos transitórios que ocorrem durante estes distúrbios.

Para exemplificar o método proposto, foi feita uma simulação de uma falta entre dois terminais monitorados de uma linha de transmissão de 230 kV, com 400 km de extensão, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros da linha de transmissão simulada.

Sequência	R (Ω /km)	X (Ω /km)	ω C (μ S/km)
Zero	0,532	1,541	2,293
Positiva	0,098	0,510	3,252

Na simulação em questão, uma falta monofásica foi introduzida a 368 km de um dos terminais monitorados, que se chamou de Terminal 1 (32 km do Terminal 2). O sistema elétrico no qual foi simulada a falta é ilustrado na Figura 11. Na Figura 12 são mostrados os resultados de simulação no ATP dos valores de tensão monitorados no Terminal 1.

Na Figura 13 são ilustrados os diferentes instantes de “chegada” dos transitórios nos Terminais 1 (em vermelho) e 2 (em verde). É possível observar que a forma de onda na cor verde começa a apresentar um comportamento transitório um pouco antes da forma de onda na cor vermelha. Isso é esperado, já que a falta ocorre mais próxima ao Terminal 2, indicado pela cor verde.

De posse destes valores de tensão registrados, faz-se o cálculo dos coeficientes $[c_{dif}]^2$ através do algoritmo descrito acima e implementado no MATLAB[®].

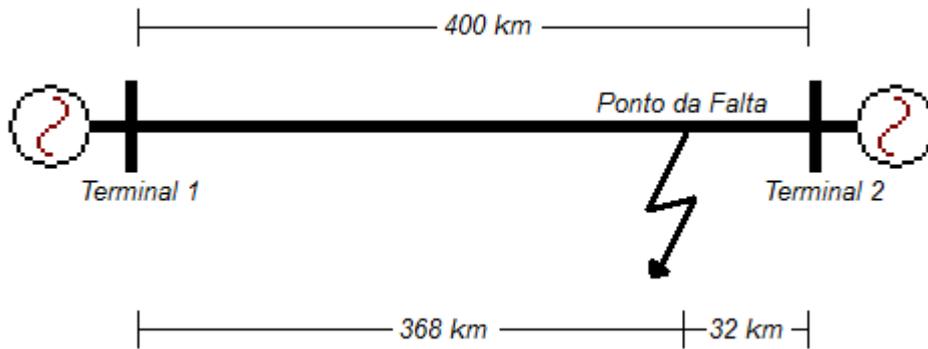


Figura 11 – Sistema elétrico no qual foi simulada uma falta monofásica.

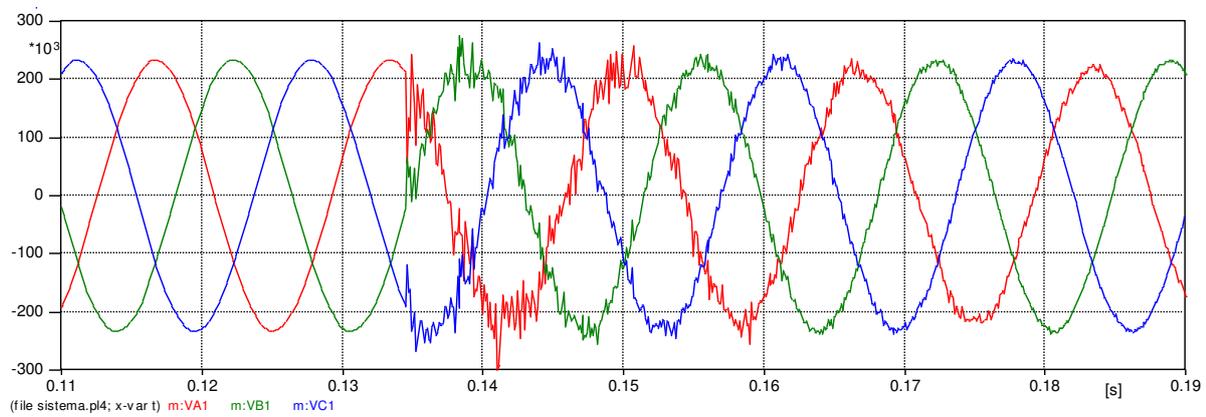


Figura 12 - Formas de onda das tensões de fase monitoradas no terminal 1 da LT.

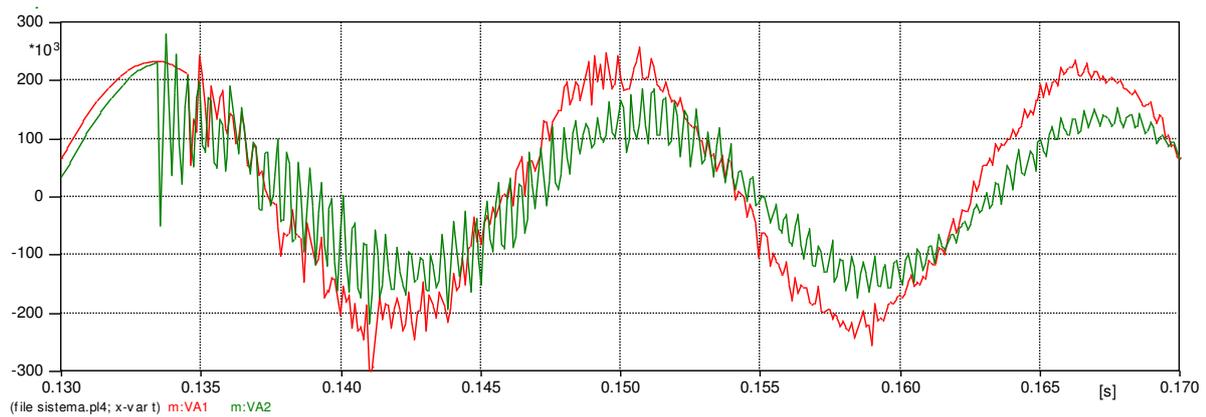


Figura 13 - Transitórios na fase A dos terminais 1 (em vermelho) e 2 (em verde) da LT.

Na Figura 14 são ilustradas as formas de onda das tensões monitoradas nos dois terminais da LT, sendo agora executadas no MATLAB®. Além das tensões nos terminais, têm-se também os coeficientes $[c_{dif}]^2$.

Por meio da diferença entre os instantes de tempo de chegada dos transitórios aos terminais, fez-se o cálculo da distância do ponto da falta ao terminal 1, utilizando-se a equação (8). O valor encontrado foi $d = 367,56$ km. O valor exato é de 368 km. Portanto, tem-se um erro percentual de menos de 1%, que corresponde a aproximadamente meio quilômetro.

Pela equação (22), percebe-se que o valor do erro absoluto na localização da falta (368 – 367,56 = 0,44 km) foi bem menor que o limite aceitável de erro (7,5 km) para a frequência de amostragem utilizada de 20 kHz.

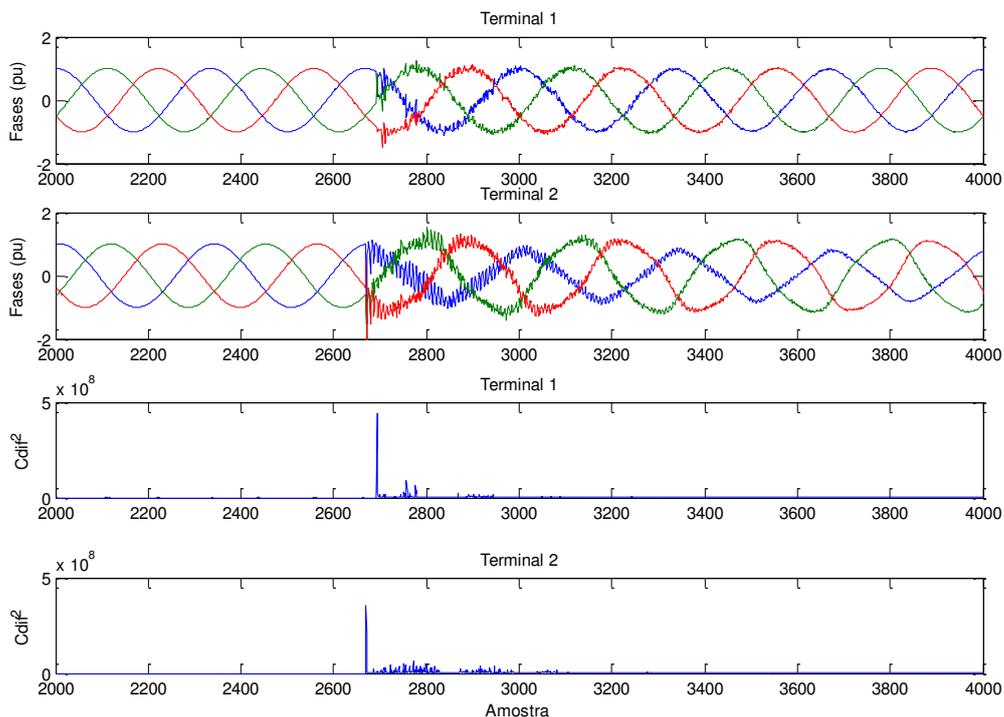


Figura 14 - Formas de onda das tensões monitoradas nos dois terminais da LT e coeficientes $[c_{dif}]^2$.

5. CONCLUSÕES

Um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes utilizando a transformada de Park foi apresentado. Abordou-se todo o processo, desde o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão até o cálculo dos instantes iniciais de transitórios e do ponto onde ocorreu a falta.

Em seguida, foram incorporadas as rotinas implementadas no MATLAB[®] às simulações digitais realizadas via linguagem MODELS do ATP. Os resultados obtidos mostraram que os erros absolutos na localização de faltas foi bem inferior ao limite aceitável de erro para a frequência de amostragem utilizada, comprovando, dessa forma, o bom desempenho da transformada de Park na detecção de transitórios em linhas de transmissão.

O desenvolvimento deste projeto permitiu um maior entendimento dos fenômenos transitórios que ocorrem em sistemas elétricos de potência, assim como o conhecimento de algumas técnicas que permitem uma ação corretiva em um tempo eficiente, de maneira que o sistema como um todo não seja prejudicado e a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica possam se tornar mais seguras, uma vez que estes transitórios causam efeitos indesejáveis em vários equipamentos do sistema elétrico de potência.

6. REFERÊNCIAS

- AMON FILHO, J., PEREIRA, M. P. *Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. São Paulo, 1994.
- ARAÚJO, A. E. A., NEVES W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG – Brasil: Editora UFMG, 2005.
- COSTA, F. B., SOUZA, B. A., BRITO, N. S. D., SILVA, K. M. “Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios”. *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2010*, Belém-PA, Brasil, 18-21 de maio, 2010.
- DOMMEL, H. W., MICHELS, J. “High-speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis”. *IEEE Conference*, Paper No. A78, pp. 214-219, January/February 1978.
- FENG, Z., JUN, L., LI, Z., ZHIHAO, Y. “A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line”. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008*, Nanjing, China, April 6-9, 2008.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., C., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas* - 6a edição. Porto Alegre, RS – Brasil: Editora Bookman, 2006.
- GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., XU BINGYIN GE YAOZHONG CORY, B. J., BARKER, J. R. G. “Fault Location Based on Travelling Waves”. *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 54-59, New York, 1993.
- GIRGIS, A. M., HART, D. G., PETERSON, W. L. “A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 98-107, January 1992.
- JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. “Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform”. *International Conference on Power System Technology - POWERCON'98*, Vol. 1, pp. 533-537, Beijing, China, 18-21 August, 1998.

LEUVEN EMTP CENTER, *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. Heverlee, Belgium, July 1987.

LIN, D., JUN P., WENXIA, S., JUN, T., JUN, Z. “Fault Location for Transmission Line Based on Traveling Waves Using Correlation Analysis Method”. *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 9-13, 2008.

LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2011.