

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## **Dissertação de Mestrado**

# **Influência de Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing Sobre Métodos de Localização de Falhas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes**

Raphael Leite de Andrade Reis

Campina Grande – Paraíba – Brasil  
© Raphael Leite de Andrade Reis, julho de 2015

**Raphael Leite de Andrade Reis**

**Influência de Transformadores de Potencial  
Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing Sobre Métodos de  
Localização de Falhas Baseados na Teoria de Ondas  
Viajantes**

*Dissertação de mestrado apresentada à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento  
às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências  
no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Julho de 2015


FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- R375i Reis, Raphael Leite de Andrade.  
Influência de transformadores de potencial capacitivos e filtros anti-aliasing sobre métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes / Raphael Leite de Andrade Reis. – Campina Grande, 2015.  
57 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.
- "Orientação: Ph. D. Washington Luiz Araújo Neves, D.Sc. Damásio Fernandes Júnior."
- Referências.
1. Ondas Viajantes. 2. Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC). 3. Localização de Faltas. 4. Detecção de Faltas. 5. Transitórios Eletromagnéticos. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Fernandes Júnior, Damásio. III. Título.
- CDU 621.372.2(043)

**"INFLUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS E FILTROS ANTI-ALIASING SOBRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA TEORIA DE ONDAS"**

**RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/07/2015**



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Orientador(a)



**DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)



**NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*À minha mãe, Terezinha, por ser a base e o exemplo da minha vida. À minha esposa, Érika, pela compreensão e carinho. À memória da minha Tia, Sônia, sempre tão presente em minhas orações. DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me guiar no sentido de ultrapassar os percalços do dia a dia, dando-me sabedoria e paciência, além de me conceder a oportunidade de concretizar mais uma etapa da minha vida.

À minha mãe, Terezinha, por representar a minha base, por confiar e por me incentivar na busca dos meus objetivos e à minha Tia, Ivanê, pelo amor e apoio.

À minha esposa Érika, por todo amor, carinho, compreensão e dedicação.

Ao meu Tio, Marcelo, por todo carinho ao longo da vida.

Aos professores Washington Neves e Damásio Fernandes Júnior, não só pela orientação, mas, principalmente, pela amizade e confiança em mim depositadas.

A Felipe pelas inúmeras vezes que dedicou seu tempo em esclarecimentos e sugestões essenciais para a realização desse trabalho.

Aos amigos do P&D CHESF, Daphne, Jamile e Cecília, por me ensinarem o verdadeiro significado da palavra equipe.

A Alana, Ericson, Yonatha, Huilman e Selma pela amizade e inúmeras contribuições.

Aos meus amigos Euler, Raphael, Igor, Estácio, Artur, Abinadabe e tantos outros que compartilharam comigo momentos especiais e, mesmo que indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho.

Aos funcionários da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia.

À CAPES pelo apoio financeiro.

*Raphael Leite de Andrade Reis*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	ix
<b>Lista de Tabelas</b>	xi
<b>Lista de Símbolos</b>	xiii
<b>Glossário</b>	xv
<b>Resumo</b>	xvi
<b>Abstract</b>	xvii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1    Motivação da Dissertação	2
1.2    Objetivos	2
1.3    Contribuições	3
1.4    Organização da Dissertação	3
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
2.1    PAJUELO <i>et al.</i> (2008)	5
2.2    BAINY <i>et al.</i> (2012)	6
2.3    LOPES <i>et al.</i> (2012)	6
2.4    SILVA <i>et al.</i> (2012)	8
2.5    LOPES <i>et al.</i> (2013)	9
2.6    REIS (2015)	10
2.7    Síntese Bibliográfica	11
<b>3. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>13</b>
3.1    Localização de Faltas em Linhas de Transmissão	13
3.1.1    Detecção de Transitórios	15
3.1.1.1    Método Baseado na Tdq0	16
3.1.1.2    Métodos Baseados na TWDR	17
3.2    Transformadores de Potencial Capacitivos	20
3.3 <i>System Impedance Ratio</i> (SIR)	21
3.4    Filtros <i>Anti-Aliasing</i>	22
<b>4. Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros <i>Anti-Aliasing</i> Avaliados...</b>	<b>24</b>
4.1    Filtros <i>Anti-Aliasing</i> Avaliados	24
4.2    TPC de 230 kV Avaliados	25

4.3	TPC de 500 kV Avaliados	29
<b>5.</b>	<b>Análises e Resultados</b> .....	<b>31</b>
5.1	Resultados Obtidos para o SEP de 230 kV	33
5.2	Resultados Obtidos para o SEP de 500 kV	43
<b>6.</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>48</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>50</b>
	<b>Apêndice A. Topologia e Parâmetros dos TPC Avaliados</b> .....	<b>54</b>
A.1	Topologia dos TPC de 230 kV Avaliados	54
A.2	Topologia do TPC de 500 kV Avaliado	57



# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Atuação indevida do relé para uma falta fora da primeira zona (SILVA <i>et al.</i> , 2012).....	8
<b>Figura 2.2</b> – Respostas em frequência de dois modelos de TPC. (a) Componentes transitórias são atenuadas na faixa de frequência em estudo e (b) Componentes transitórias são amplificadas na faixa de frequência em estudo (LOPES <i>et al.</i> , 2013).....	10
<b>Figura 3.1</b> – Diagrama de reflexões de uma falta no ponto $F$ de uma LT de comprimento $\ell$ (LOPES, 2014).....	13
<b>Figura 3.2</b> – Exemplo de detecção do instante inicial de um distúrbio utilizando a Tdq0: (a) Sinais de tensão trifásico; (b) Coeficientes $c_{dif}$ ; (c) Coeficientes $c_{dif}^2$ ...16	16
<b>Figura 3.3</b> – Exemplo de detecção do instante inicial de um distúrbio utilizando a Transformada <i>Wavelet</i> : (a) Sinais de tensão trifásico; (b) Coeficientes $w$ ; (c) Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> $\varepsilon_w$ .....	18
<b>Figura 3.4</b> – Esquema elétrico básico de um TPC típico a 60 Hz.....	19
<b>Figura 3.5</b> –Exemplo de amostragem de dois sinais senoidais com frequência de amostragem de 1 kHz, sendo o sinal $S_1$ com frequência de 60 Hz (amostras representas por círculos) e o sinal $S_2$ com frequência de 940 Hz (amostras representas por quadrados).....	22
<b>Figura 4.1</b> –Respostas em frequência dos filtros ideal, Butterworth e Chebyshev: (a) Ganho; (b) Fase.....	24
<b>Figura 4.2</b> – Resposta em frequência do TPC 1: (a) Módulo; (b) Fase.....	25
<b>Figura 4.3</b> – Resposta em frequência do TPC 2: (a) Módulo; (b) Fase.....	26
<b>Figura 4.4</b> – Resposta em frequência do TPC 3: (a) Módulo; (b) Fase.....	26
<b>Figura 4.5</b> – Resposta em frequência do TPC 4: (a) Módulo; (b) Fase.....	26
<b>Figura 4.6</b> – Tensões primária e secundária dos TPC 1, 2, 3 e 4 durante uma falta trifásica.....	27
<b>Figura 4.7</b> – Resposta em frequência do TPC 5: (a) Módulo; (b) Fase.....	28

<b>Figura 4.8</b> – Tensões primária e secundária do TPC 5 devido a uma falta fase-terra.....	29
<b>Figura 5.1</b> – SEP composto de dois equivalentes Thévenin e uma LT simples.....	30
<b>Figura 5.2</b> – Representação dos erros estatísticos na forma de <i>boxplots</i> das estimações dos locais de falta para o TPC 1 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes $w$ da TWDR e (c) Energia $\varepsilon_w$ da TWDR.....	35
<b>Figura 5.3</b> – Representação dos erros estatísticos na forma de <i>boxplots</i> das estimações dos locais de falta para o TPC 2 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes $w$ da TWDR e (c) Energia $\varepsilon_w$ da TWDR.....	36
<b>Figura 5.4</b> – Representação dos erros estatísticos na forma de <i>boxplots</i> das estimações dos locais de falta para o TPC 3 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes $w$ da TWDR e (c) Energia $\varepsilon_w$ da TWDR.....	37
<b>Figura 5.5</b> – Representação dos erros estatísticos na forma de <i>boxplots</i> das estimações dos locais de falta para o TPC 4 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes $w$ da TWDR e (c) Energia $\varepsilon_w$ da TWDR.....	38
<b>Figura 5.6</b> – Representação dos erros estatísticos na forma de <i>boxplots</i> das estimações dos locais de falta para o TPC 5 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes $w$ da TWDR e (c) Energia $\varepsilon_w$ da TWDR.....	44
<b>Figura A.1</b> – Topologia do TPC 1. (Fonte: FERNANDES Jr., 2003).....	53
<b>Figura A.2</b> – Topologia do TPC 2. (Fonte: IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).....	53
<b>Figura A.3</b> – Topologia do TPC 3. (Fonte: CARVALHO Jr, 2008).....	54
<b>Figura A.4</b> – Topologia do TPC 4. (Fonte: CARVALHO Jr, 2008).....	54
<b>Figura A.5</b> – Topologia do TPC 5. (Fonte: PAJUELO <i>et al.</i> , 2008).....	56

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Resumo da revisão bibliográfica referente à influência dos TPC nos processos de estimação de fasores, proteção de distância e algoritmo de localização de faltas.....	11
<b>Tabela 5.1</b> – Dados de sequência das LT.....	30
<b>Tabela 5.2</b> – Parâmetros dos Equivalentes Thévenin.....	30
<b>Tabela 5.3</b> – Variáveis de simulação utilizadas para a geração da base de dados.....	31
<b>Tabela 5.4</b> – Influência dos TPC e filtros <i>anti-aliasing</i> sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 230 kV de 200 km.....	32
<b>Tabela 5.5</b> – Influência dos TPC e filtros <i>anti-aliasing</i> sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 230 kV de 400 km.....	33
<b>Tabela 5.6</b> – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando os TPC avaliados para o SEP de 230 kV de 200 km.....	39
<b>Tabela 5.7</b> – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando os TPC avaliados para o SEP de 230 kV de 400 km.....	40
<b>Tabela 5.8</b> – Casos não detectados pelos algoritmos de detecção de faltas quando considerado o TPC 2.....	41
<b>Tabela 5.9</b> – Influência dos TPC e filtros <i>anti-aliasing</i> sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 500 kV....	42
<b>Tabela 5.10</b> – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando o TPC avaliado para o SEP de 500 kV de 200 km e 400 km.....	44
<b>Tabela 5.11</b> – Casos não detectados pelos algoritmos de detecção de faltas quando considerado o TPC 5.....	45
<b>Tabela A.1</b> – Parâmetros dos TPC de 230 kV avaliados.....	54
<b>Tabela A.2</b> – Característica $\lambda - i$ dos TPI utilizados nos TPC 1 e 4.....	55

<b>Tabela A.3</b> – Característica $\lambda - i$ dos TPI e dos Circuitos Supressores de Ferroressonância (CSF) utilizados nos TPC 2 e 3.....	55
<b>Tabela A.4</b> – Característica não linear $v - i$ do pararraios tipo SiC do TPC 1.....	55
<b>Tabela A.5</b> – Dados dos centelhadores dos pararraios utilizados nos TPC 1, 3 e 4.....	55
<b>Tabela A.6</b> – Parâmetros do TPC de 230 kV avaliado.....	56

# Lista de Símbolos

$F$	–	Ponto de aplicação da falta.
$\ell$	–	Comprimento da linha de transmissão.
$d$	–	Distância da Barra 1 ao ponto de falta.
$t_{11}$	–	Instante de chegada da primeira onda viajante à Barra 1.
$t_{21}$	–	Instante de chegada da primeira onda viajante à Barra 2.
$t_{12}$	–	Instante de chegada da onda refletida no ponto de falta à Barra 1.
$t_{22}$	–	Instante de chegada da onda refletida no ponto de falta à Barra 2.
$t_{23}$	–	Instante de chegada da onda refletida no ponto de falta à Barra 2.
$t_{21r}$	–	Instante de chegada da onda refratada no ponto de falta à Barra 1.
$t_{22r}$	–	Instante de chegada da onda refratada no ponto de falta à Barra 1.
$t_{11r}$	–	Instante de chegada da onda refratada no ponto de falta à Barra 2.
$v_p$	–	Velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo.
$L$	–	Indutância de sequência positiva.
$C$	–	Capacitância de sequência positiva.
$\Delta t$	–	Passo de integração.
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	–	Erro máximo admissível da estimação do local do defeito.
$\varepsilon$	–	Erro percentual da estimação do local do defeito.
$c$	–	Velocidade da luz no vácuo.
$V_d$	–	Componente de eixo direto.
$c_{dif}$	–	Coefficiente de diferença.
$c_{dif}^2$	–	Quadrado do coeficiente de diferença.
$w$	–	Coefficiente <i>wavelet</i> .
$x$	–	Sinal de entrada para o cálculo dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$\tilde{h}$	–	Coefficiente do filtro <i>wavelet</i> .
$N$	–	Número de coeficientes do filtro <i>wavelet</i> .
$\mu$	–	Média dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$\sigma$	–	Desvio padrão dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$\varepsilon_w$	–	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$\Delta k$	–	Número de amostras em um ciclo da componente fundamental.

$\mu_{\varepsilon_w}$	–	Média da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$\sigma_{\varepsilon_w}$	–	Desvio padrão da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$E_1$	–	Limiar da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> .
$C_1$	–	Capacitância superior do divisor capacitivo.
$C_2$	–	Capacitância inferior do divisor capacitivo.
$L_c$	–	Reator de compensação do TPC.
$\omega L_c$	–	Reatância do reator de compensação do TPC.
$\omega$	–	Frequência angular em rad/s.
$Z_b$	–	Carga do terminal secundário do TPC.
$V_{PRI}$	–	Tensão primária.
$V_{SEC}$	–	Tensão secundária.
$V_{SEC+But2}$	–	Tensão secundária filtrada pelo filtro Butterworth de 2 <sup>a</sup> ordem.
$V_{SEC+But3}$	–	Tensão secundária filtrada pelo filtro Butterworth de 3 <sup>a</sup> ordem.
$V_{SEC+Che3}$	–	Tensão secundária filtrada pelo filtro Chebyshev de 3 <sup>a</sup> ordem.
$f$	–	Frequência de um sinal analógico.
$f_s$	–	Frequência de amostragem.
$f_c$	–	Frequência de corte do filtro analógico.
$f_1$	–	Frequência fundamental do sinal analógico 1.
$f_2$	–	Frequência fundamental do sinal analógico 2.
$S_1$	–	Sinal analógico 1.
$S_2$	–	Sinal analógico 2.
$R$	–	Resistência em $\Omega/\text{km}$ da LT.
$X$	–	Reatância em $\Omega/\text{km}$ da LT.
$\omega C$	–	Susceptância em $\mu\text{S}/\text{km}$ da LT.
$V_{th}$	–	Tensão equivalente de Thévenin.
$Z_{th}$	–	Impedância equivalente de Thévenin.
$R_1$	–	Resistência de sequência positiva.
$X_1$	–	Reatância de sequência positiva.
$R_0$	–	Resistência de sequência zero.
$X_0$	–	Reatância de sequência zero.

# Glossário

ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ATP	–	<i>Alternative Transients Program.</i>
CAPES	–	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
GSE	–	Grupo de Sistemas Elétricos.
LT	–	Linha de Transmissão.
SEP	–	Sistema Elétrico de Potência.
TC	–	Transformador de Corrente.
Tdq0	–	Transformada de Park.
TI	–	Transformador para Instrumentos.
TP	–	Transformador de Potencial.
TPC	–	Transformador de Potencial Capacitivo.
TPI	–	Transformador de Potencial Indutivo.
TWD	–	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta.
TWDR	–	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante.
UFCEG	–	Universidade Federal de Campina Grande.

# Resumo

Neste trabalho é avaliada a influência de diferentes modelos de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC) de 230 kV e 500 kV e filtros *anti-aliasing* sobre um método de localização de faltas de dois terminais baseado na teoria de ondas viajantes, considerando-se dados sincronizados, quando apenas os sinais de tensão estão disponíveis para medição. Vários cenários de faltas foram simulados no *Alternative Transients Program* (ATP). Em cada caso, a localização do curto-circuito foi estimada tomando como entrada do algoritmo localizador os sinais de tensão do primário, secundário e secundário filtrados dos TPC. Para possibilitar um estudo mais detalhado, três métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes foram utilizados. Dos resultados obtidos, constata-se que as estimativas dos locais do distúrbio são diretamente influenciadas pela resposta em frequência dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing*, apresentando melhores estimativas nos casos em que há amplificação dos componentes de alta frequência da tensão secundária dos equipamentos.

**Palavras-chave:** TPC, ondas viajantes, localização de faltas, detecção de faltas, transitórios eletromagnéticos.



# Abstract

In this work, the influence of 230 kV and 500 kV Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT) and anti-aliasing filters on a two-terminal synchronized travelling wave-based fault location algorithm is analyzed, when only voltage measurements are available. Several fault scenarios were simulated using the Alternative Transients Program (ATP). In each case, the fault location was estimated using two-terminal synchronized voltage samples taken from the primary, secondary and filtered secondary terminals of the modeled CCVT. To provide a more thorough study, three different transient detection methods available in the literature were used to implement the analyzed fault location method. The obtained results indicate that the estimated fault locations are directly affected by the CCVT and CCVT+anti-aliasing filter frequency responses, resulting in a better performance of the fault location algorithm when the secondary voltage high frequency components are amplified.

**Keywords:** CCVT, travelling waves, fault location, transient detection, electromagnetic transients.

# Capítulo 1

## Introdução

Para permitir a transmissão de energia elétrica até os pontos mais remotos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), as linhas de transmissão (LT) apresentam grandes extensões físicas e, por isso, são mais susceptíveis a problemas de natureza mecânica, elétrica ou térmica, dentre os quais destacam-se os curtos-circuitos. Nesta situação, os sistemas de proteção dependem fundamentalmente de detecção, classificação e localização de faltas confiáveis, a fim de extinguir o defeito o mais rápido possível.

Após a isolamento das faltas, o pronto restabelecimento da continuidade de serviço é necessário para evitar desligamentos prolongados, fato este que tem motivado a busca por meios de localizar, de maneira eficiente, o ponto de ocorrência das faltas. Além disso, órgãos regulamentadores, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cobram das concessionárias eficiência com relação à qualidade do serviço prestado, medida por meio de indicadores que consideram a frequência e a duração média das interrupções (BRASIL, 2015).

A atuação do sistema de proteção devido a um distúrbio no SEP depende das informações provenientes dos transformadores para instrumentos (TI), como os transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Para sistemas com tensão de operação superior a 138 kV, os transformadores de potencial capacitivos (TPC) são economicamente mais viáveis que os TP, devido a uma requisição maior de isolamento, por exemplo (D'AJUZ *et al.*, 1985). Estas informações, antes de serem convertidas para a forma digital por um conversor analógico-digital (A/D), passam por um filtro passa-baixas denominado de filtro *anti-aliasing*, que tem como objetivo remover as componentes de frequência maiores que a frequência de Nyquist do sinal analógico, evitando assim, uma sobreposição de espectros (SAHA *et al.*, 2010).

O funcionamento correto e seguro dos relés está sujeito aos erros inerentes dos TI. Durante o regime permanente, a tensão secundária dos TPC é praticamente uma réplica da tensão primária na frequência industrial, apresentando uma precisão aceitável para a maioria das aplicações de proteção (PAJUELO *et al.*, 2008). Entretanto, durante a

ocorrência de faltas, a tensão secundária pode ser bastante diferente da tensão primária. Esse fenômeno é resultante da energia armazenada nos capacitores e indutores do TPC que gera transitórios com amplitude e duração significantes que podem reproduzir informações falsas a serem transferidas aos relés (FERNANDES Jr., 2003; SILVA *et al.*, 2011) e aos algoritmos de detecção e localização de faltas, podendo ocasionar atuações indevidas do sistema de proteção e cálculos imprecisos de locais de ocorrência dos distúrbios (SAHA *et al.*, 2010).

## 1.1 Motivação da Dissertação

Ao longo dos anos, vários pesquisadores têm voltado suas atenções para análise da influência dos TPC sobre a atuação de sistemas de proteção e controle. É bem conhecido que o comportamento transitório dos TPC, quando submetidos a distúrbios provenientes do SEP, apresenta uma característica dinâmica indesejável e que afeta significativamente o desempenho dos sistemas de proteção, de monitoramento de harmônicos, de estimação de fasores, etc. (KASZTENNY *et al.*, 2000; SAHA *et al.*, 2010; HOU *et al.*, 1996).

No que tange ao impacto da resposta em frequência dos TPC sobre algoritmos de detecção e localização de faltas, poucos trabalhos são reportados, ainda mais quando se considera o conjunto TPC+filtro *anti-aliasing*. Visando preencher esta lacuna, a realização de uma investigação da influência de diferentes modelos de TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre alguns métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes é realizada neste trabalho.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a influência do comportamento dinâmico de diferentes modelos de TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre alguns métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Para tanto, os objetivos específicos são:

- Modelar alguns tipos de TPC de diferentes classes de tensão;
- Implementar alguns tipos de filtros *anti-aliasing* de diferentes ordens;

- Implementar algoritmos de detecção e localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes;
- Avaliar a influência dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, considerando diferentes situações de faltas em LT reais variando os seguintes parâmetros:
  - Resistência de falta;
  - Ângulo de incidência de falta;
  - Local de aplicação de falta;
  - Tipo de falta.

### 1.3 Contribuições

As contribuições do trabalho proposto configuram-se sobre a influência do comportamento dinâmico de diferentes modelos de TPC de 230 kV e 500 kV sobre métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, a partir de uma grande quantidade de simulações de distúrbios em LT fictícias modeladas a parâmetros reais, em busca de verificar a relação existente entre a resposta em frequência dos TPC e os erros obtidos das localizações de curtos-circuitos estimadas.

Além disso, como os filtros *anti-aliasing* são primordiais para o processamento dos sinais oriundos dos TI pelos relés numéricos de proteção antes da realização da conversão A/D, uma investigação concernente à influência de três filtros em conjunto com a resposta dos TPC sobre os métodos de detecção avaliados é realizada neste trabalho, fato ainda pouco retratado na literatura.

### 1.4 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos, além deste capítulo introdutório, da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica acerca da influência de TPC sobre algoritmos de localização de faltas, proteção de SEP e processos de estimação de fasores.
- A fundamentação teórica sobre métodos de localização e detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, além de TPC e filtros *anti-aliasing*, é apresentada no Capítulo 3.
- No Capítulo 4, os modelos de TPC e filtros *anti-aliasing* utilizados neste trabalho, para avaliar a influência da resposta em frequência dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre a estimação do local dos distúrbios, são apresentados.
- No Capítulo 5, os resultados de simulações digitais de faltas via ATP em LT, são apresentados. Além disso, é feita uma análise do impacto do comportamento dinâmico dos dispositivos sobre o desempenho do método de localização de falta considerado.
- Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

## Revisão Bibliográfica

Vários trabalhos relacionados aos impactos da resposta em frequência dos TPC sobre algoritmos de proteção de sistemas e sobre processos de estimação de fasores são bastante reportados na literatura. No entanto, a influência do comportamento dinâmico de diferentes modelos de TPC, frente a distúrbios no sistema, para algoritmos de detecção e localização de faltas, necessita de maiores investigações.

### 2.1 PAJUELO *et al.* (2008)

PAJUELO *et al.* (2008) analisaram o impacto da influência de um modelo TPC sobre os relés de distância, nos domínios do tempo e da frequência. A maioria dos relés de distância utiliza, para tomar decisões, informações de amplitude e ângulo de fase na frequência fundamental, que são obtidas pelos dispositivos a partir de um processo de estimação de fasores. O comportamento transitório do TPC causa um atraso no processo de estimação para produzir valores mais precisos, comprometendo, assim, a confiabilidade do algoritmo de proteção utilizado pelo relé. Na tentativa de superar este problema, os autores propuseram um método para reduzir os erros provenientes da estimação dos fasores em um modelo específico de TPC.

Segundo PAJUELO *et al.* (2008), o erro do processo de estimação de fasores provocado pelo TPC apresenta algumas características típicas, tais como: duração limitada de três a cinco ciclos, sendo a quantidade de ciclos dependente das características de resposta do TPC, e comportamento oscilatório com decaimento no tempo.

Apesar de analisar a influência do TPC sobre a proteção de distância nos domínios do tempo e da frequência, a partir da utilização do processo convencional de estimação de fasores executado pelos relés e da utilização do método para reduzir os erros de estimação, o trabalho se desenvolve em apenas um modelo de TPC.

## 2.2 BAINY *et al.* (2012)

BAINY *et al.* (2012) analisaram dois modelos de TPC, reportados da literatura, sob o ponto de vista da influência destes equipamentos sobre o cálculo de fasores de tensão. A diferença entre os modelos de TPC abordados reside no fato de que um deles não contempla as capacitâncias parasitas tanto do reator de compensação quanto dos enrolamentos do transformador de potencial indutivo (TPI) e, para evidenciar a influência das respostas transitórias dos TPC em estudo, os autores realizaram a estimação dos fasores de tensão secundária para cada modelo de TPC, comparando os resultados obtidos com os fasores de tensão primária, os quais são considerados como valores de referência.

Segundo BAINY *et al.* (2012), no regime permanente, os fasores estimados são bem próximos dos fasores ideais, entretanto, durante a falta, o cálculo dos fasores das tensões secundárias sofre atraso devido ao fato de que a tensão secundária dos TPC não acompanha as variações abruptas da tensão primária provenientes do distúrbio. Este fato pode induzir atuações indevidas de funções de proteção que utilizam o processo de estimação de sinais de tensão. Desta forma, diferentes respostas em frequência dos TPC podem promover desempenhos distintos de sistemas de proteção idênticos.

A simulação de apenas dois tipos de falta com resistências e ângulos de incidência fixos e a utilização de dois modelos de TPC de mesma classe de tensão configuram as limitações do trabalho.

## 2.3 LOPES *et al.* (2012)

LOPES *et al.* (2012) apresentaram análises da influência de diferentes modelos de TPC de 230 kV, obtidos na literatura, sobre um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes, descrito em LOPES (2011), que utiliza a Transformada de Park para detecção dos transitórios eletromagnéticos aplicada aos sinais de tensão capturados nos pontos monitorados da linha, com o objetivo de verificar o impacto da resposta em frequência dos equipamentos sobre a confiabilidade e precisão da técnica de detecção e localização de faltas proposta.

Para desenvolver o tal estudo, quatro modelos de TPC foram utilizados, cujos projetos são detalhados em FERNANDES Jr. (2003), IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004) e em CARVALHO Jr. (2008), onde os sinais de tensão

obtidos do primário dos TPC são considerados os sinais de referência e os sinais de tensão obtidos do secundário são os sinais de interesse. Por apresentarem circuitos elétricos distintos, as respostas em frequência de ganho e fase de cada modelo apresentam diferenças relevantes entre si.

A avaliação da influência dos TPC sobre a localização de faltas foi realizada através de simulações digitais de faltas em uma LT real de 230 kV com 225,2 km de extensão fazendo uso do *software* ATP, com um passo de simulação de 5  $\mu$ s e erro admissível de 7,5 km, sendo classificadas como localizações satisfatórias valores abaixo do erro admissível, em que foram utilizados, como variáveis de entrada, sinais de tensão medidos em diferentes pontos do SEP. Para tanto, diferentes casos de faltas foram considerados a partir da variação dos tipos de curtos-circuitos, dos valores da resistência e ângulo de incidência, bem como dos pontos de ocorrência dos distúrbios.

Segundo LOPES *et al.* (2012), o algoritmo localizador de faltas promove números diferentes de localizações satisfatórias para cada modelo de TPC empregado, fato este que evidencia um comportamento distinto das tensões secundárias dos diferentes modelos de TPC avaliados quando submetidos à condições de distúrbios.

Os autores verificaram que alguns modelos de TPC apresentaram uma certa melhoria no número de localizações satisfatórias devido ao fato de que os transitórios provenientes das respostas em frequência dos TPC são amplificados ou se comportam de maneira aproximadamente linear na faixa de 60 Hz e 20 kHz, faixa esta típica de eventos relacionados à ocorrência de faltas em LT longas (CIGRE Working Group 02.33, 1990). Por outro lado, outros modelos de TPC apresentaram comportamento semelhante a um filtro passa-baixas na faixa de frequência correspondente, promovendo uma atenuação dos transitórios e, conseqüentemente, dificultando a detecção e localização de faltas por ondas viajantes.

Uma contribuição adicional do trabalho encontra-se no fato da percepção de que a interação entre LT e TPC exerce influência sobre a localização de faltas, uma vez que os diferentes projetos de TPC podem promover pontos de ressonância distintos entre seus componentes, bem como implicar em impedâncias equivalentes diferentes para cada modelo.

Algumas limitações observadas no trabalho residem na utilização de modelos de TPC de mesma classe de tensão, além de uma verificação voltada para apenas um algoritmo localizador de faltas baseado na teoria de ondas viajantes.

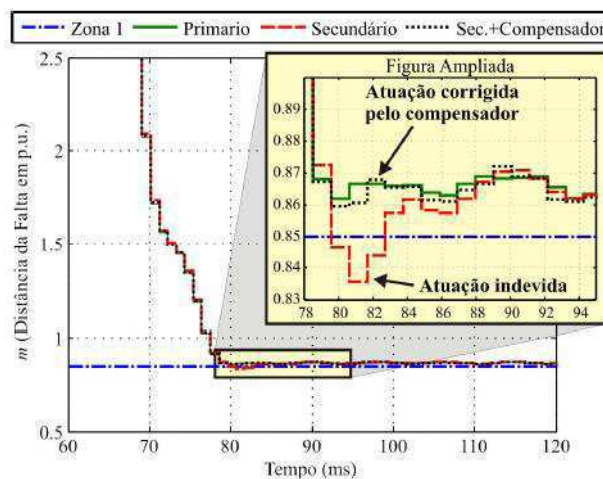


## 2.4 SILVA *et al.* (2012)

SILVA *et al.* (2012) apresentaram uma análise do impacto da correção da tensão secundária dos TPC sobre a proteção de distância de linhas de transmissão em um sistema de 230 kV, bem como a influência dos erros de medição provenientes da resposta transitória dos TPC sobre o cálculo dos fasores de tensão.

Os autores constataram que, para os diferentes tipos de faltas simulados em um sistema de 230 kV com 180 km de extensão, os tempos de atuação médios das unidades dos relés foram maiores quando considerados os sinais de tensão obtidos dos terminais secundários do TPC em relação aos sinais de tensão obtidos do primário. Assim, a resposta transitória do TPC causa retardos na geração do sinal de *trip* por parte do sistema de proteção.

Do ponto de vista da seletividade da proteção de distância, para o caso de uma falta simulada em um ponto imediatamente além da primeira zona de atuação do relé, ou seja, fora da primeira zona, e, ao considerar a tensão secundária do TPC, o relé atua indevidamente em primeira zona, isto é, o relé se torna sobrealçado, conforme apresentado na Figura 2.1.



**Figura 2.1** – Atuação indevida do relé para uma falta fora da primeira zona (SILVA *et al.*, 2012).

Diante disto, a resposta transitória do TPC pode comprometer a questão da seletividade do sistema de proteção devido às oscilações nos sinais de tensão obtidos do secundário do TPC.

Algumas limitações do trabalho encontram-se na utilização de apenas um modelo de TPC, de um tipo de proteção de distância, no caso, a característica  $mho$  polarizada com

memória de sequência positiva, e a análise de apenas um tipo de falta para estudo da seletividade.

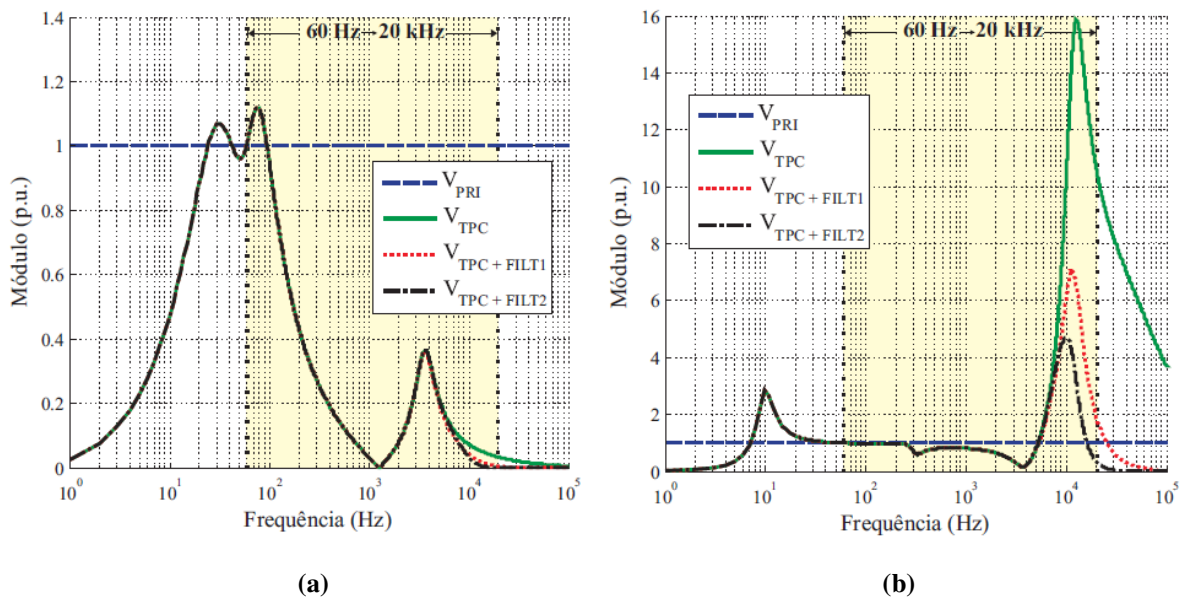
## 2.5 LOPES *et al.* (2013)

LOPES *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de um algoritmo de localização de faltas baseado na análise de componentes transitórias frente à influência de quatro modelos de TPC e dois filtros *anti-aliasing* de ordens distintas.

Embora a tensão no secundário de um TPC durante o regime permanente do SEP seja praticamente uma réplica do sinal primário, erros indesejáveis são percebidos durante a ocorrência de transitórios. Tais discrepâncias são ainda maiores quando a influência dos filtros *anti-aliasing* é considerada, o que pode comprometer o desempenho de algoritmos de localização de faltas baseado na análise de componentes transitórias.

Os autores realizaram comparações entre os erros das localizações de falta estimadas quando consideradas medições ideais de tensão (obtidas diretamente do circuito primário do SEP), medições secundárias (apenas com o TPC) e medições secundárias filtradas (com o TPC e filtro *anti-aliasing* em cascata) e verificaram que, para frequências diferentes da fundamental, as respostas transitórias das tensões com apenas o TPC e com o conjunto TPC+filtro diferem entre si e impossibilitam uma medição precisa de sinais de alta frequência, podendo, portanto, comprometer o desempenho do algoritmo de localização de faltas.

Na Figura 2.2a é apresentado o caso em que a resposta em frequência de ganho de um modelo de TPC e do conjunto TPC+filtro não contribui positivamente para a obtenção de uma localização de falta mais precisa, na faixa de frequência de 60 Hz e 20 kHz, faixa esta típica de eventos relacionados à ocorrência de faltas em LT longas (CIGRE Working Group 02.33, 1990), uma vez que as componentes transitórias são bastante atenuadas pela resposta do equipamento, dificultando a detecção do transitório. Em contrapartida, na Figura 2.2b é apresentado o caso em que a resposta em frequência de ganho de outro modelo TPC e do conjunto TPC+filtro contribui positivamente para a obtenção de uma localização de falta mais precisa, na faixa de frequência considerada, visto que as componentes transitórias são amplificadas pela resposta do equipamento, auxiliando a detecção do transitório.



**Figura 2.2** – Respostas em frequência de dois modelos de TPC. (a) Componentes transitórias são atenuadas na faixa de frequência em estudo e (b) Componentes transitórias são amplificadas na faixa de frequência em estudo (LOPES *et al.*, 2013).

Os modelos de TPC, o algoritmo de localização de faltas e o SEP analisado foram os mesmos que os descritos em LOPES *et al.* (2012), com a contribuição adicional do impacto da influência dos filtros *anti-aliasing* sobre a localização das faltas.

As mesmas limitações observadas no trabalho de LOPES *et al.* (2012) são, também, limitações do trabalho em questão, com o acréscimo da análise de apenas um tipo de filtro *anti-aliasing*.

## 2.6 REIS (2015)

No trabalho proposto, o autor analisa o desempenho de um algoritmo de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes frente à influência de cinco modelos de TPC, sendo quatro de 230 kV e um de 500 kV, disponíveis na literatura, e três filtros *anti-aliasing* de ordens distintas. Para possibilitar um estudo mais detalhado, três métodos de detecção de faltas são utilizados.

Para realizar a análise sugerida, vários cenários de faltas foram simulados no ATP, de tal modo que foram feitas comparações entre os erros das localizações de falta estimadas quando consideradas medições ideais de tensão (obtidas diretamente do primário do TPC), medições secundárias e medições secundárias filtradas (com o TPC e

filtro *anti-aliasing* em cascata) a fim de verificar a relação existente entre as respostas transitórias dos TPC e dos conjuntos TPC+filtro.

Dos resultados obtidos, comprova-se que quando os transitórios induzidos pelas faltas são atenuados pelo comportamento dinâmico dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing*, as estimativas dos locais de faltas diferem das obtidas quando o sinal de referência é utilizado, apresentado maiores erros uma vez que o desempenho dos métodos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes são comprometidos pela atenuação dos transitórios de alta frequência. Por outro lado, quando os transitórios de alta frequência são amplificados pelo comportamento dinâmico dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing*, os erros obtidos pelas localizações de faltas estimadas são menores, visto que os métodos de detecção identificam mais facilmente o início dos distúrbios.

A utilização de SEP com apenas uma LT e duas barras, com baixos níveis de ruídos, pode-se caracterizar como limitação do trabalho.

## 2.7 Síntese Bibliográfica

De acordo com os trabalhos apresentados, observa-se que os estudos são voltados para análise da influência da resposta em frequência de diferentes modelos de TPC sobre o processo de estimação de fasores, proteção de distância e algoritmo de detecção e localização de faltas.

Da revisão bibliográfica fica evidente que o comportamento transitório da resposta em frequência dos TPC afeta o desempenho dos processos outrora citados, seja de maneira positiva, no caso em que a resposta do TPC amplifica as componentes transitórias auxiliando, assim, no algoritmo localizador de falta baseado na teoria de ondas viajantes, seja de maneira negativa, nos demais casos. Uma limitação comum entre os trabalhos analisados reside na utilização de modelos de TPC para uma mesma classe de tensão.

Na literatura são encontrados um grande número de trabalhos referentes à influência da resposta do TPC frente ao monitoramento de harmônicos e sobre sistemas de proteção e estimação de fasores. Ademais, poucas análises a respeito da influência do TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* sobre algoritmos de detecção e localização de faltas são encontrados.

Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo dos artigos referenciados.

**Tabela 2.1** – Resumo da revisão bibliográfica referente à influência dos TPC nos processos de estimação de fasores, proteção de distância e algoritmo de localização de faltas.

Referências	EF*	PD*	LF *		FAT*
			Tdq0	TWDR	
<b>PAJUELO <i>et al.</i> (2008)</b>	√	√	-	-	-
<b>BAINY <i>et al.</i> (2012)</b>	√	-	-	-	-
<b>LOPES <i>et al.</i> (2012)</b>	-	-	√	-	-
<b>SILVA <i>et al.</i> (2012)</b>	√	√	-	-	-
<b>LOPES <i>et al.</i> (2013)</b>	-	-	√	-	√
<b>REIS (2015)</b>	-	-	√	√	√

\*onde EF = Estimação de fasores; PD = Proteção de distância; LF = Algoritmo de localização de faltas; FAT = Filtros *anti-aliasing*; Tdq0 = Método baseado na Transformada de Park e TWDR = Método baseado na Transformada *Wavelet* Discreta Redundante.

## Fundamentação Teórica

### 3.1 Localização de Falhas em Linhas de Transmissão

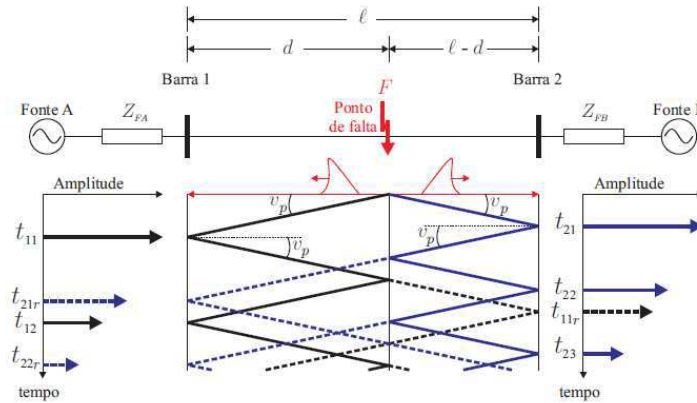
Quando uma falta ocorre em um determinado ponto de uma LT, os sinais transitórios de tensão e corrente trafegam para os terminais da mesma, sofrendo reflexões e refrações sucessivas entre o ponto de falta e os terminais da LT até que os transitórios sejam completamente amortecidos e o estado de pós-falta seja alcançado.

O desenvolvimento de técnicas de localização de faltas usando dados digitais de tensão e/ou corrente tem se destacado ao longo dos anos, sendo de fundamental importância para o pronto restabelecimento do serviço. Tipicamente, os algoritmos de localização de faltas são classificados nas seguintes categorias: métodos baseados em componentes fundamentais; métodos baseados em componentes de alta frequência; métodos baseados em inteligência artificial; e métodos baseados na teoria de ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010). Neste trabalho será considerado apenas os métodos baseados na teoria de ondas viajantes, que consideram as ondas de tensão e/ou corrente viajando como ondas eletromagnéticas em velocidades muito próximas à velocidade da luz (NAIDU, 1985).

Para melhor entendimento da teoria de ondas viajantes, é apresentado na Figura 3.1 o diagrama de reflexões das ondas progressivas, que se deslocam no sentido positivo de um eixo de referência, e regressivas, que se deslocam no sentido negativo de um eixo de referência, referentes a uma falta ocorrida no ponto  $F$  de uma LT de comprimento  $\ell$ , localizada a uma distância  $d$  da Barra 1. Também é apresentado o Diagrama de reflexões com eixo de tempo que computam os instantes de chegada das ondas incidentes ( $t_{11}$  e  $t_{21}$ ), refletidas ( $t_{12}$ ,  $t_{22}$  e  $t_{23}$ ) e refratadas no ponto de falta ( $t_{21r}$ ,  $t_{22r}$  e  $t_{11r}$ ) às barras 1 e 2. É considerado, por simplicidade, que as ondas se propagam com uma velocidade  $v_p$ .

A parte crucial dos métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes reside na detecção dos instantes de incidência das ondas viajantes nos terminais

monitorados. Várias pesquisas voltam-se para o desenvolvimento de técnicas mais precisas para a detecção do instante inicial dos distúrbios, uma vez que, quanto mais confiável for o valor estimado da detecção do instante de incidência dos transitórios nos terminais monitorados, mais confiável será o método de localização de faltas (COSTA, 2006; LIN *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2013).



**Figura 3.1** – Diagrama de reflexões de uma falta no ponto  $F$  de uma LT de comprimento  $l$  (LOPES, 2014).

Após a detecção dos instantes de incidência das ondas viajantes, é possível estimar a distância  $d$  do ponto de falta em relação aos terminais da LT, a partir do conhecimento do comprimento da LT e sabendo que a velocidade de propagação das ondas,  $v_p$ , é próxima da velocidade da luz.

De acordo com GALE *et al.* (1993), os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes são classificados de acordo com o número de terminais monitorados, com a utilização de ondas refletidas no ponto de falta e de pulsos elétricos para a localização do defeito. Embora não necessitem da sincronização de dados, os métodos de um terminal são mais susceptíveis a erros, uma vez que dependem da detecção de ondas refletidas no ponto de falta, as quais, em alguns casos, podem ser confundidas com ondas refletidas e/ou refratadas em outros pontos do SEP, como os instantes de detecção  $t_{12}$ , que corresponde ao instante em que a onda refletida no ponto  $F$  é detectada e  $t_{21r}$ , que corresponde ao instante em que a onda é refratada do terminal 2 (ver Figura 3.1). Já os métodos de dois terminais, os quais requerem a sincronização de dados, são referenciados como sendo os mais robustos e menos susceptíveis a erros, pois necessitam apenas da detecção do instante de chegada das primeiras ondas eletromagnéticas aos terminais da LT, como os instantes  $t_{11}$  e  $t_{21}$  (ver Figura 3.1).

O método de estimação do local do distúrbio utilizado neste trabalho consiste no método de dois terminais admitindo que os dados são perfeitamente sincronizados, sendo a distância do local da falta  $d$  calculada segundo a Equação (3.1) (GALE *et al.*, 1993):

$$d = \frac{\ell + (t_{11} - t_{21})v_p}{2}, \quad (3.1)$$

sendo  $\ell$  o comprimento da LT,  $t$  o instante de incidência da onda viajante e  $v_p$  a velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo ( $v_p = 1/\sqrt{LC}$ ).

Devido ao processo de digitalização dos sinais pelos conversores A/D, os tempos de trânsito das ondas viajantes até o terminal monitorado da LT são múltiplos do passo de integração  $\Delta t$  utilizado pelos conversores. Desta forma, alguns erros verificados na estimação do local do defeito não se enquadram como imprecisões do algoritmo localizador, pois são provenientes de limitações do *hardware* empregado na digitalização dos sinais analógicos avaliados. O erro máximo admissível para a estimação do local do defeito é dado pela Equação (3.2) (LOPES *et al.*, 2013):

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (3.2)$$

sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo.

É importante destacar que os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes utilizam altas taxas de amostragem, fato este que limitou seu uso por alguns anos, embora sejam considerados como um dos mais robustos. No entanto, com o avanço dos sistemas de aquisição de dados e a necessidade de estimação dos locais dos distúrbios de maneira mais rápida e precisa, estes métodos estão sendo cada vez mais utilizados na atualidade (SAHA *et al.*, 2010).

### 3.1.1 Detecção de Transitórios

Parte crucial dos métodos de localização de falta baseados na teoria de ondas viajantes, a etapa de detecção de transitórios possibilita o cálculo do instante de tempo em que as ondas viajantes chegam aos terminais monitorados. Dentre as técnicas de detecção presentes na literatura, destacam-se aqui, os métodos baseados na transformada de Park (Tdq0) (LOPES *et al.*, 2013) e na Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) (COSTA *et al.*, 2011; COSTA, 2014).



### 3.1.1.1 Método Baseado na Tdq0

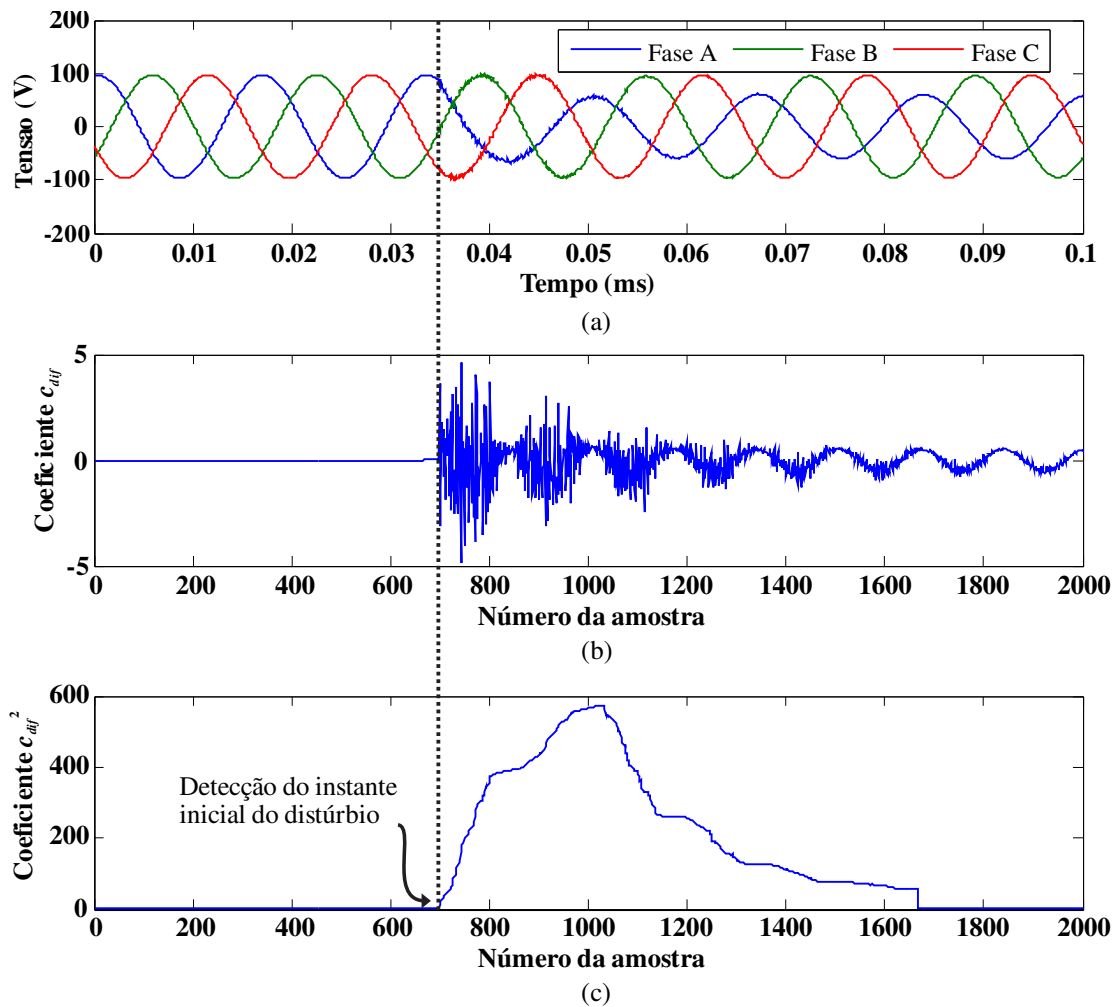
O método baseado na Tdq0 gera um eixo referencial girante na frequência dos fasores de tensão e corrente do SEP de tal modo que, para um observador no eixo referencial síncrono, os componentes de eixo direto de regime permanente dos sinais de tensão e corrente apresentam valores desprezíveis. Todavia, quando ocorre um distúrbio no SEP, grandes variações surgem, possibilitando a identificação do transitório. A implementação do método consiste de três passos: processamento das componentes de eixo direto  $V_d$ ; calibração do algoritmo auto-adaptativo e detecção do instante de ocorrência da falta (LOPES *et al.*, 2013).

A identificação dos transitórios seria perceptível a partir variações bruscas de  $V_d$ , no entanto, em faltas com alta impedância, os coeficientes  $V_d$  poderiam ser fortemente atenuados, comprometendo, assim, a detecção do distúrbio. Desta forma, em cada amostra do processo é calculado o quadrado do coeficiente de diferenças  $c_{dif}^2$ , que visa ao aumento da sensibilidade do algoritmo. O coeficiente  $c_{dif}$  é calculado mediante a Equação (3.3).

$$c_{dif}(k) = \frac{V_d(k) - V_d(k-1)}{\Delta t}, \quad (3.3)$$

O limiar utilizado para detectar crescimentos abruptos de  $c_{dif}^2$  é auto-adaptativo, de tal maneira que seus valores são ajustados automaticamente de acordo com os níveis de ruído elétrico e de desbalanceamento durante a operação normal do SEP. Este valor é atualizado a cada conversão A/D a partir dos dados de regime permanente, o que evita a necessidade de calibrações manuais do algoritmo.

Na Figura 3.2 é apresentado um exemplo de detecção de transitório utilizando a Tdq0 devido a uma falta fase-terra em um SEP de 230 kV simulada no ATP. O passo de integração deve ser pequeno o suficiente para gerar sinais mais próximos de sinais contínuos. Aqui foi utilizado um passo de integração de 5  $\mu$ s. O SEP de potência utilizado é igual ao ilustrado na Figura 3.1, sendo modelado com parâmetros reais, o qual será também utilizado para as avaliações das influências dos TPC sobre o processo de estimação do local do distúrbio.



**Figura 3.2** – Exemplo de detecção do instante inicial de um distúrbio utilizando a Tdq0: (a) Sinais de tensão trifásico; (b) Coeficientes  $c_{dif}$ ; (c) Coeficientes  $c_{dif}^2$ .

### 3.1.1.2 Métodos Baseados na TWDR

Os métodos baseados na transformada *wavelet* são fortemente influenciados pela escolha da *wavelet* mãe. Na literatura especializada é indicada a *wavelet* Daubechies 4 (db 4) para detecção rápida de transitórios (BOLLEN *et al.*, 2006), uma vez que os quatro coeficientes dos filtros da db 4 possibilitam um cálculo rápido dos coeficientes *wavelet* (COSTA *et al.*, 2011).

A TWDR é uma variante da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), onde diferenciam-se por não haver o processo de subamostragem por 2 na TWDR, tornando-a mais adequada para o processo de detecção de faltas (COSTA *et al.*, 2011). Tanto a TWDR como a TWD utilizam filtros passa-baixas e passa-altas, cujos valores de seus

coeficientes dependem da *wavelet* mãe escolhida, para dividir a banda de frequência de um sinal de entrada  $x$  em componentes de baixa e alta frequências em várias escalas.

Os coeficientes *wavelet* de primeira escala são matematicamente calculados conforme descrito na Equação (3.4):

$$w(k) = \sum_{n=1}^N \tilde{h}(n)x(k - N + n), \quad (3.4)$$

sendo  $w$  o coeficiente *wavelet* na amostra  $k$  do sinal de entrada  $x$ ,  $\tilde{h}$  os coeficientes do filtro *wavelet* e  $N$ , o número de coeficientes do filtro. Para o caso de utilização da db 4,  $N$  é igual a 4. Os coeficientes do filtro *wavelet*, considerando a db 4, são:

$$\tilde{h}(1) = -0,0915; \tilde{h}(2) = -0,1585; \tilde{h}(3) = 0,5915 \text{ e } \tilde{h}(4) = -0,3415 \quad (3.5)$$

É fato que, durante o regime permanente, os sinais de tensão e corrente são compostos por uma componente de frequência fundamental, alguns harmônicos e ruídos de baixa e alta frequências com distribuição de probabilidade normal (STEVENSON JR., 1994). Os coeficientes *wavelet*, em regime normal de operação, são bastante influenciados pelos ruídos de alta frequência, de tal modo que seus comportamentos podem ser aproximados por uma função com distribuição de probabilidade normal com parâmetros dados pela amplitude média  $\mu$  e o desvio padrão  $\sigma$ . Assim, durante o regime permanente, espera-se que todos os coeficientes *wavelet* estejam dentro do intervalo  $[\mu - 4\sigma, \mu + 4\sigma]$ , cujos limiares correspondem aos limiares para detecção da falta (COSTA *et al.*, 2011).

De forma semelhante ao método baseado na Tdq0, a energia dos coeficientes *wavelet*  $\varepsilon_w$  é levada em consideração para detecção das componentes de alta frequência induzidas por uma falta. Esta energia é calculada conforme descrito na Equação (3.6) (COSTA, 2014):

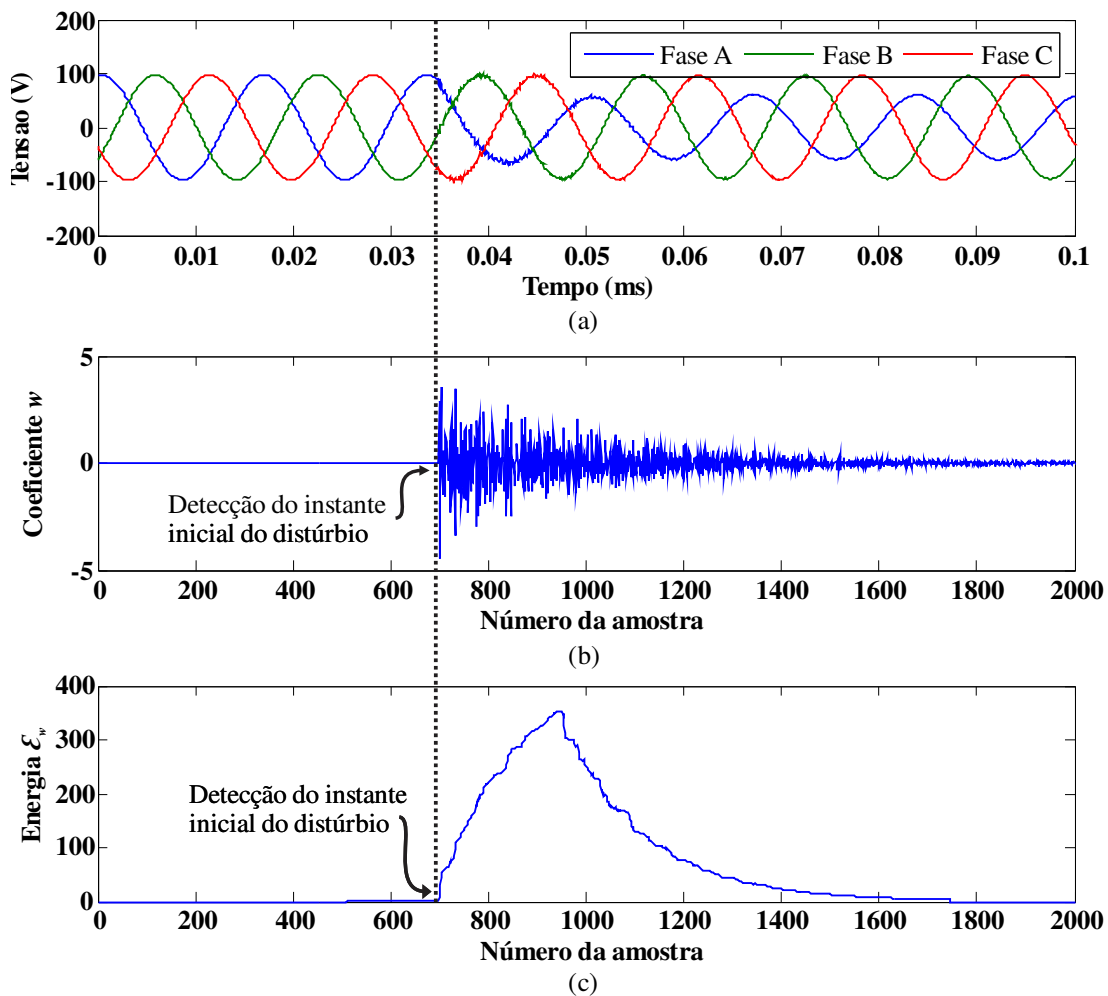
$$\varepsilon_w(k) = \sum_{n=k-\Delta k+N}^k w^2(n), \quad (3.6)$$

sendo  $\Delta k$  o número de amostras contidas em um ciclo da fundamental.

A energia  $\varepsilon_w$  apresenta um comportamento praticamente constante durante o regime permanente no SEP, sendo influenciada pelos ruídos de alta frequência. Contudo, após a ocorrência de um distúrbio, variações abruptas em  $\varepsilon_w$  são perceptíveis, facilitando

a detecção dos transitórios. Assim como o método baseado nos coeficientes *wavelet*, assume-se que a energia  $\varepsilon$  apresenta um comportamento descrito por uma distribuição de probabilidade normal com parâmetros dados pela energia média  $\mu_{\varepsilon_w}$  e desvio padrão  $\sigma_{\varepsilon_w}$ . As faltas são detectadas quando  $\varepsilon_w(k) > E_1$ , sendo  $E_1 = \mu_{\varepsilon_w} + 4\sigma_{\varepsilon_w}$  (COSTA, 2014).

O mesmo exemplo ilustrado na Figura 3.2 para detecção do instante inicial de ocorrência de uma falta fase-terra é apresentado na Figura 3.3, mas, neste caso, fez-se o uso dos métodos baseados nos coeficientes  $w$  e na energia  $\varepsilon_w$ . Vale destacar que o método baseado na energia  $\varepsilon_w$  utilizado neste trabalho não leva em consideração os coeficientes *wavelet* com efeito de borda.



**Figura 3.3** – Exemplo de detecção do instante inicial de um distúrbio utilizando a Transformada *Wavelet*: (a) Sinais de tensão trifásico; (b) Coeficientes  $w$ ; (c) Energia dos coeficientes *wavelet*  $\varepsilon_w$ .

### 3.2 Transformadores de Potencial Capacitivos

Os TPC são dispositivos projetados para alimentarem instrumentos elétricos de medição, proteção ou controle, sendo o enrolamento primário ligado em derivação com o SEP de forma que o secundário reproduz uma tensão proporcional à do primário (CARVALHO Jr., 2008). Por motivos técnicos e econômicos, os TPC são utilizados em sistemas cuja tensão de operação é superior a 138 kV (D'AJUZ *et al.*, 1985). Além disso, estes equipamentos apresentam, no seu aspecto construtivo, a possibilidade de transmissão de sinais pelas LT, como sinais de teleproteção, através do sistema *carrier*, em que os elementos capacitivos do TPC servem como caminho de entrada e saída dos dados.

Na Figura 3.4 é apresentado um esquema elétrico básico de um TPC típico a 60 Hz, onde o primário do TPC é constituído por dois conjuntos de elementos capacitivos ligados em série ( $C_1$  e  $C_2$ ), cujo ponto intermediário corresponde a uma tensão na faixa de 10 a 20 kV, de forma a permitir a utilização de um TPI de dimensões reduzidas, com menor isolamento. O TPI, por sua vez, reduz a tensão de seu enrolamento primário para a tensão  $V_o$  que alimenta os instrumentos de medição e controle ali inseridos.

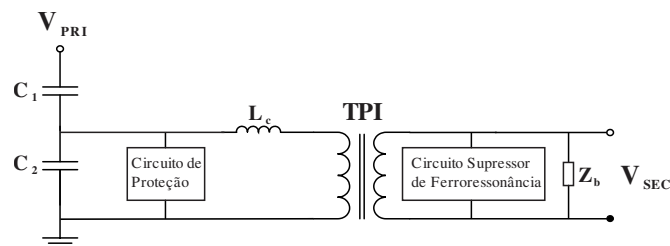


Figura 3.4 – Esquema elétrico básico de um TPC típico a 60 Hz.

Além de isolar o enrolamento secundário do enrolamento primário, os TPC devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao SEP de maneira fidedigna no lado de baixa tensão. Para realizar essa tarefa, um reator de compensação  $L_c$  é projetado pelo fabricante e colocado em série com o primário do TPI para compensar a defasagem imposta pela coluna capacitiva ao sinal proveniente do SEP, isto é, o reator de compensação atua no sentido de evitar diferenças de fase entre  $V_i$  e  $V_o$  na frequência fundamental. Deste modo, é necessário que a reatância  $\omega L_c$  seja igual a reatância da coluna capacitiva, satisfazendo a igualdade descrita na Equação (3.7) (SILVA, 2009; CARVALHO Jr., 2008).

$$\omega L_c = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)}. \quad (3.7)$$

Ainda assim, pequenos erros podem existir devido à corrente de magnetização e à carga  $Z_b$  do TPC (FERNANDES Jr., 2003).

Nos terminais secundários do TPC são conectados os circuitos supressores de ferrorressonância (CSF), que tem como finalidade minimizar as oscilações de tensão que possam vir a ocorrer devido ao fenômeno da ferrorressonância. De forma sucinta, esse fenômeno se deve à interação entre as capacitâncias com algum valor particular de indutância não linear dos elementos dos materiais ferromagnéticos, que possibilitam diversas frequências ressonantes, podendo fazer com que informações falsas sejam transferidas aos instrumentos de medição, proteção ou controle, bem como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas (SILVA, 2009).

Em regime permanente, a tensão secundária dos TPC é praticamente uma réplica da tensão primária na frequência fundamental, apresentando, assim, uma precisão aceitável para a maioria das aplicações de proteção. Em contrapartida, durante faltas em LT, a tensão secundária pode ser bastante diferente da tensão primária, fato este que pode comprometer a confiabilidade de algoritmos de proteção e localização de faltas (PAJUELO *et al.*, 2008; REIS *et al.*, 2015a).

### 3.3 System Impedance Ratio (SIR)

Considere uma falta trifásica no ponto  $F$  do SEP ilustrado na Figura 3.1, a qual está distante  $d$  km da barra 1. Nesta situação, a tensão de sequência positiva  $\hat{V}_{Barra1}$  pode ser calculada a partir do divisor de tensão:

$$\hat{V}_{Barra1} = \hat{E}_{th1} \frac{dZ_{L1}}{Z_{th1} + dZ_{L1}}. \quad (3.8)$$

Normalizando a Equação (3.8) pela impedância total da LT  $\ell Z_{L1}$ , tem-se:

$$\hat{V}_{Barra1} = \hat{E}_{th1} \frac{d_{p.u.}}{\frac{Z_{th1}}{\ell Z_{L1}} + d_{p.u.}} = \hat{E}_{th1} \frac{d_{p.u.}}{SIR + d_{p.u.}}. \quad (3.9)$$

A partir da Equação (3.9), o valor do SIR, definido por  $\frac{Z_{th1}}{\ell Z_{L1}}$ , pode influenciar diretamente no comportamento da mudança de estado da tensão da barra quando da ocorrência de faltas na LT (MACHADO, 2013). De fato, o SIR é o parâmetro externo

que mais agrava a resposta transitória dos TPC (HOU *et al.*, 1996), de tal modo que, em SEP com valores elevados do SIR, pequenos valores de tensão de falta no ponto de medição são observados. Essa situação constitui um problema sério, uma vez que a energia armazenada nos capacitores e indutores dos TPC não é função do SIR, fazendo com que a amplitude dos transitórios da tensão secundária destes equipamentos componham a maior parte do sinal de tensão vista pelos dispositivos de proteção (MACHADO, 2013).

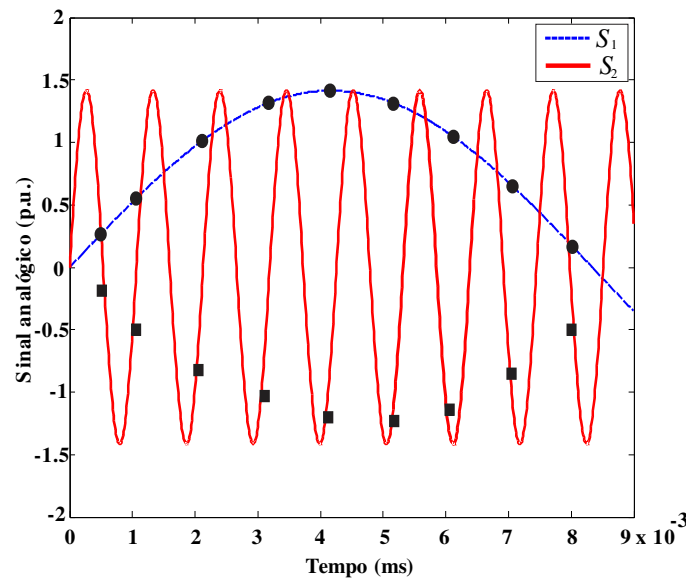
Em termos quantitativos, a tensão no terminal monitorado  $\hat{V}_{Barra1}$  corresponde a superposição da tensão da fonte conectada ao terminal  $\hat{E}_{th1}$  e componentes de frequência harmônica devido ao comportamento dinâmico do TPC. De acordo com a Equação (3.9), quanto maior for o valor do SIR, menor será  $\hat{V}_{Barra1}$  e mais evidente será o comportamento transitório dos TPC sobre a tensão a ser monitorada.

### 3.4 Filtros *Anti-Aliasing*

Para que uma determinada componente de frequência  $f$  do sinal analógico possa ser completamente reconstituída durante um processo de amostragem realizado por conversores A/D, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, igual a  $2f$ , frequência esta denominada de frequência de Nyquist. Como os transitórios eletromagnéticos oriundos de distúrbios no SEP possuem componentes de alta frequência superpostas a frequência fundamental, e como a taxa de amostragem dos relés de proteção são fixas, faz-se necessário realizar uma filtragem analógica antes dos relés realizarem o processamento dos sinais obtidos dos TI para evitar a ocorrência da sobreposição de espectro (ou *aliasing*) (MACHADO, 2013). Para isso, são utilizados filtros passa-baixas, denominados de filtros *anti-aliasing*, cuja frequência de corte deve ser, no máximo, igual a metade da taxa de amostragem (PHADKE *et al.*, 2009).

Segundo SAHA *et al.* (2010), caso a frequência de amostragem  $f_s$  utilizada pelos conversores A/D para reconstituir, com fidelidade, o sinal analógico de frequência fundamental  $f_1$  não obedeça ao critério de Nyquist, componentes de frequência  $f_1$ ,  $f_s - f_1$ ,  $f_s + f_1$ ,  $2f_s - f_1$ , etc., podem aparecer no sinal digitalizado, além de promover uma defasagem de  $\pi$  radianos, caracterizando, assim, o fenômeno *aliasing*.

Para ilustrar o processo de sobreposição de espectros, é apresentado na Figura 3.5 a digitalização de um sinal de frequência fundamental  $f_1$  de 60 Hz,  $S_1$ , e de um sinal de frequência fundamental  $f_2$  de 940 Hz,  $S_2$ , utilizando uma frequência de amostragem  $f_s$  de 1 kHz. Percebe-se, da Figura 3.5, que o sinal digitalizado proveniente de  $S_1$ , representado por círculos no gráfico, contém a informação de  $S_1$ , permitindo, assim, que o sinal analógico possa ser completamente reconstituído. Por outro lado, o sinal amostrado proveniente de  $S_2$ , representado por quadrados no gráfico, não representa fielmente a informação contida no sinal  $S_2$ , visto que tal sinal foi digitalizado na frequência  $f_s$ , não obedecendo o Teorema de Nyquist. Neste caso, há surgimento de uma nova componente de frequência de 60 Hz ( $f_s - f_2$ ) no sinal amostrado, além de uma defasagem de 180 graus como consequência do fenômeno *aliasing*.



**Figura 3.5** –Exemplo de amostragem de dois sinais senoidais com frequência de amostragem de 1 kHz, sendo o sinal  $S_1$  com frequência de 60 Hz (amostras representas por círculos) e o sinal  $S_2$  com frequência de 940 Hz (amostras representas por quadrados).

Existem diversos tipos de filtros analógicos, como Butterworth, Chebyshev, Bessel. Em algoritmos de proteção, os filtros Butterworth de segunda ordem são normalmente os mais utilizados (PHADKE *et al.*, 2009) devido ao fato de não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem (COURY *et al.*, 2007).



## Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros *Anti-Aliasing* Avaliados

O comportamento dinâmico de quatro modelos de TPC de 230 kV e um modelo de 500 kV são analisados conjuntamente com três filtros *anti-aliasing* dos tipos Butterworth e Chebyshev para verificar suas influências sobre o processo de estimação do local do defeito.

### 4.1 Filtros *Anti-Aliasing* Avaliados

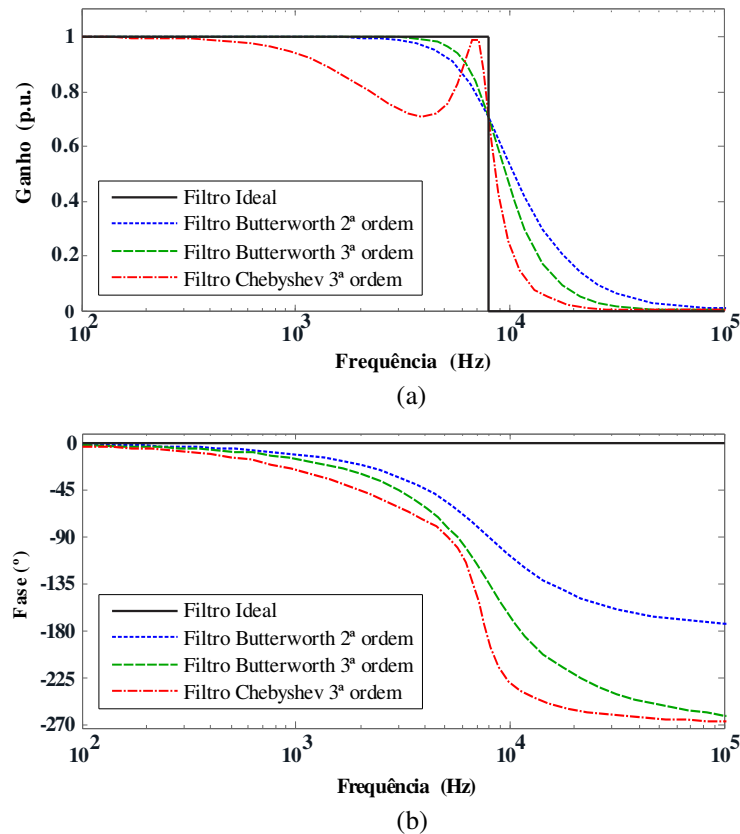
São utilizados três tipos de filtros *anti-aliasing* para avaliar os seus desempenhos conjuntamente com os diferentes modelos de TPC considerados frente ao processo de estimação do local do defeito. São eles: filtros Butterworth de segunda e terceira ordens e filtro Chebyshev de terceira ordem. As funções de transferência destes filtros estão apresentadas nas Equações (4.1), (4.2) e (4.3), respectivamente.

O algoritmo de localização de faltas utiliza uma taxa de amostragem  $f_s$  de 20 kHz, sendo assim, a frequência de corte  $f_c$  dos filtros *anti-aliasing* deve ser, no máximo, igual a  $f_s/2$ , o que corresponde a 10 kHz. Deste modo,  $f_c$  foi adotada como sendo 8 kHz. As respostas em frequência de módulo e fase de cada filtro são apresentadas na Figura 4.1.

$$H(s) = \frac{2,527 \cdot 10^9}{s^2 + 7,109 \cdot 10^4 s + 2,527 \cdot 10^9}. \quad (4.1)$$

$$H(s) = \frac{1,27 \cdot 10^{14}}{s^3 + 1,1005 \cdot 10^5 s^2 + 5,053 \cdot 10^9 s + 1,27 \cdot 10^{14}}. \quad (4.2)$$

$$H(s) = \frac{3,183 \cdot 10^{13}}{s^3 + 3,002 \cdot 10^4 s^2 + 2,346 \cdot 10^9 s + 3,183 \cdot 10^{13}}. \quad (4.3)$$



**Figura 4.1** –Respostas em frequência dos filtros ideal, Butterworth e Chebyshev: (a) Ganho; (b) Fase.

## 4.2 TPC de 230 kV Avaliados

Quatro modelos de TPC de 230 kV são considerados neste trabalho. Para fins de simplificação, os dispositivos são referenciados por TPC 1, TPC 2, TPC 3 e TPC 4. A topologia e os parâmetros do TPC 1, do TPC 2, dos TPC 3 e 4 estão disponíveis em FERNANDES Jr. (2003), IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004), CARVALHO Jr. (2008), respectivamente, e são também apresentados no Apêndice A.

Por possuírem circuitos elétricos distintos, as respostas em frequência desses modelos de TPC apresentam diferenças significativas entre si, levando-os a apresentarem comportamentos dinâmicos diferentes quando ocorrem fenômenos de natureza transitória no SEP (REIS *et al.*, 2015a; REIS *et al.*, 2015b).

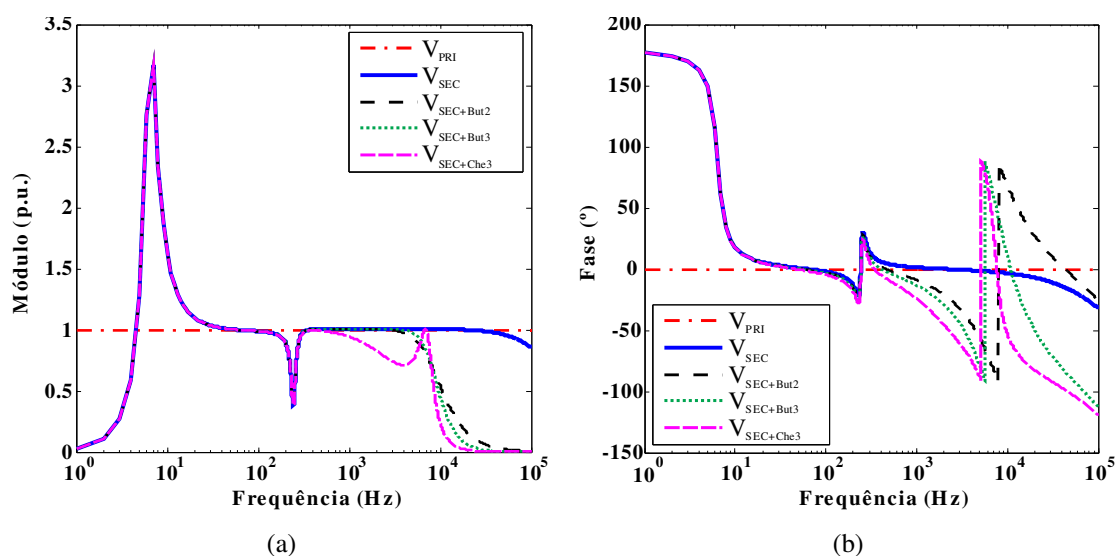
Com o intuito de simular as respostas em frequência de módulo e fase dos TPC analisados, utilizou-se a rotina *Frequency Scan* do ATP, que utiliza repetições de solução fasorial de regime permanente da função de transferência a partir do incremento

automático da frequência de fontes senoidais, que são delimitadas entre uma frequência inicial e final escolhidas pelo usuário (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). A faixa de frequência utilizada foi de 1 Hz a 100 kHz.

As respostas em frequência dos quatro modelos de TPC de 230 kV, sendo considerados os sinais primário ( $V_{PRI}$ ), secundário ( $V_{SEC}$ ), secundário e filtro *anti-aliasing* Butterworth de segunda ordem ( $V_{SEC+But2}$ ), secundário e filtro *anti-aliasing* Butterworth de terceira ordem ( $V_{SEC+But3}$ ) e secundário e filtro *anti-aliasing* Chebyshev de terceira ordem ( $V_{SEC+Che3}$ ) são ilustradas nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

De modo a permitir análises comparativas entre as respostas em frequência dos TPC e a tensão obtida nos terminais primário dos equipamentos (neste trabalho, a tensão do primário é tomada como o sinal de referência), todas as respostas em frequência de módulo foram normalizadas para valores em por unidade (p.u.). As curvas de resposta em frequência de fase são apresentadas em termos de graus elétricos ( $^{\circ}$ ).

Em todos os modelos de TPC avaliados, pode ser visto que, na frequência fundamental, a tensão secundária se aproxima muito da tensão primária (1 p.u.), mesmo quando considerados os sinais filtrados. Em contrapartida, para frequências diferentes da fundamental, a tensão secundária difere da tensão primária. Sendo assim, pequenos desvios no sinal de tensão primário ocasionados por faltas no SEP não são apropriadamente seguidos pela tensão secundária dos TPC.



**Figura 4.2** –Resposta em frequência do TPC 1: (a) Módulo; (b) Fase.

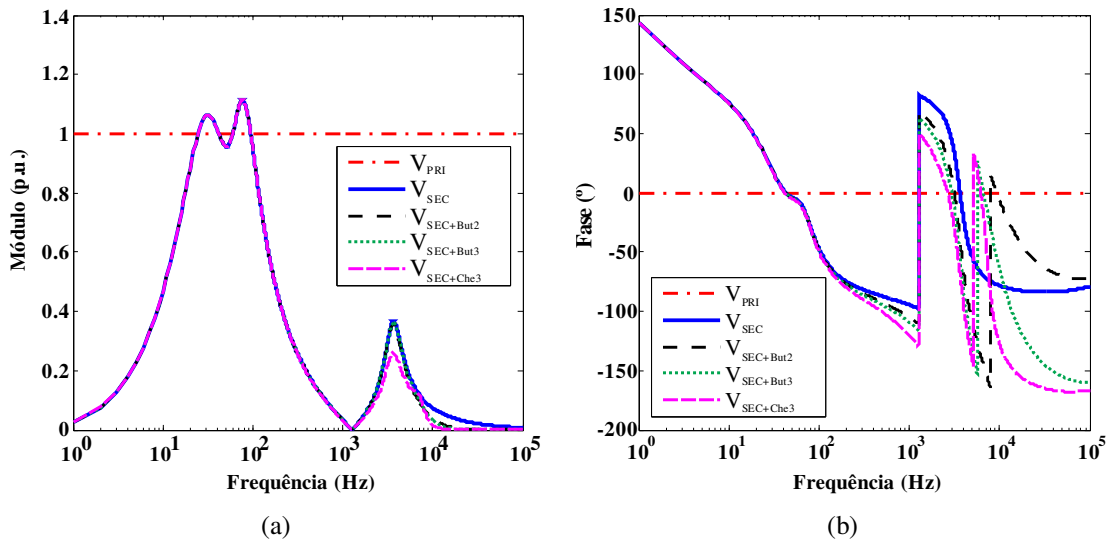


Figura 4.3 –Resposta em frequência do TPC 2: (a) Módulo; (b) Fase.

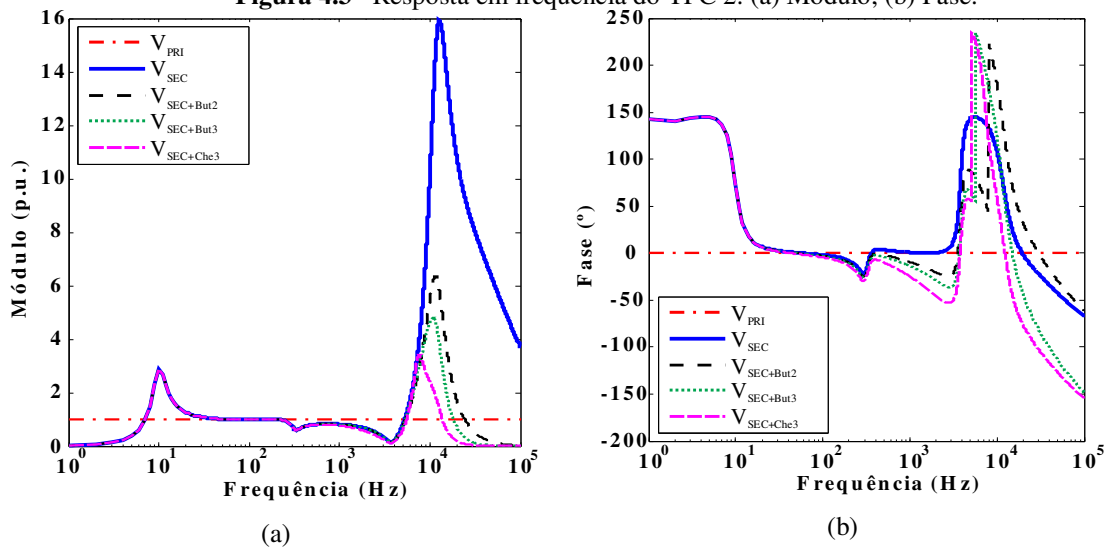


Figura 4.4 –Resposta em frequência do TPC 3: (a) Módulo; (b) Fase.

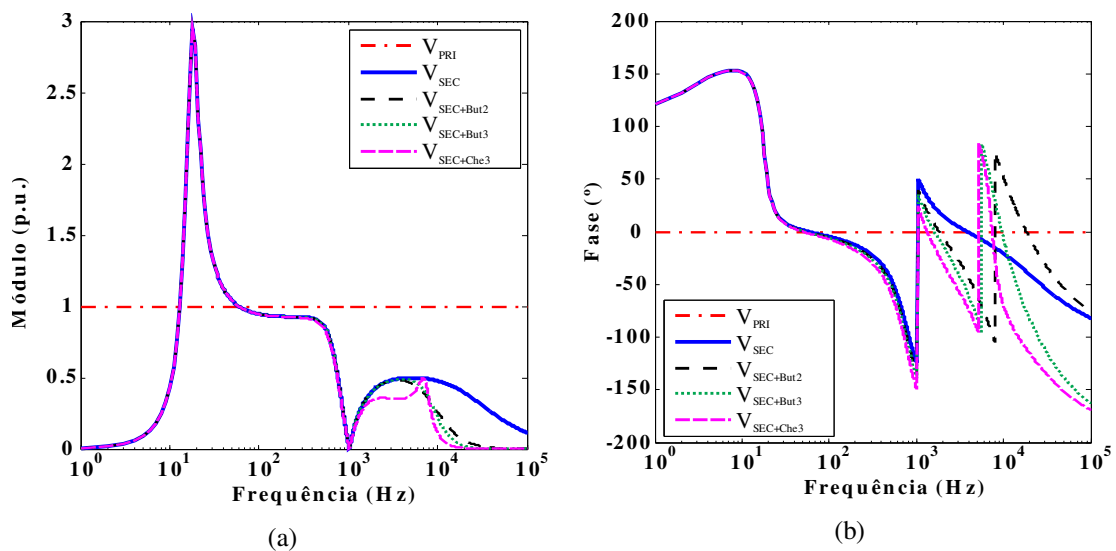
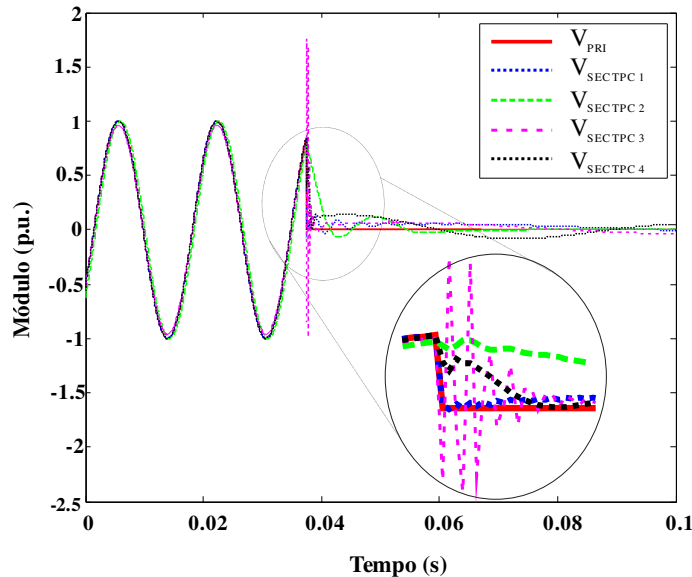


Figura 4.5 –Resposta em frequência do TPC 4: (a) Módulo; (b) Fase.

Para ilustrar a resposta dos modelos de TPC avaliados durante transitórios ocasionados por um curto-circuito, a tensão primária e as tensões secundária dos TPC 1, 2, 3 e 4 devido a uma falta trifásica no ponto de medição de um SEP de 230 kV, sistema este descrito no capítulo 5, são apresentadas na Figura 4.6.



**Figura 4.6** –Tensões primária e secundária dos TPC 1, 2, 3 e 4 durante uma falta trifásica.

Da Figura 4.6, pode-se observar que o TPC 3, além de não representar uma réplica da tensão do primário durante a falta, amplifica consideravelmente as componentes de alta frequência. Isto ocorre devido à sua resposta em frequência que apresenta um ganho significativo para altas frequências, conforme apresentado na Fig. 4.4a. Por outro lado, o comportamento dinâmico dos TPC 2 e 4 se configuram por uma atenuação dos componentes transitórios, conforme ilustrado nas Fig. 4.3a e 4.5a, respectivamente. Já para o TPC 1, por apresentar uma resposta em frequência relativamente plana ao longo da faixa de frequência considerada, o sinal secundário tende a se aproximar mais do comportamento do sinal primário, quando comparado com o desempenho dos demais modelos de TPC. Desta forma, o comportamento oscilatório apresentado pelos sinais secundários dos TPC pode comprometer o desempenho dos algoritmos de detecção e localização de faltas.

### 4.3 TPC de 500 kV Avaliado

Um modelo de TPC de 500 kV é considerado neste trabalho, o qual será referenciado por TPC 5. A topologia e os parâmetros do TPC 5 estão disponíveis em PAJUELO *et al.* (2008). Sua resposta em frequência é ilustrada na Figura 4.7.

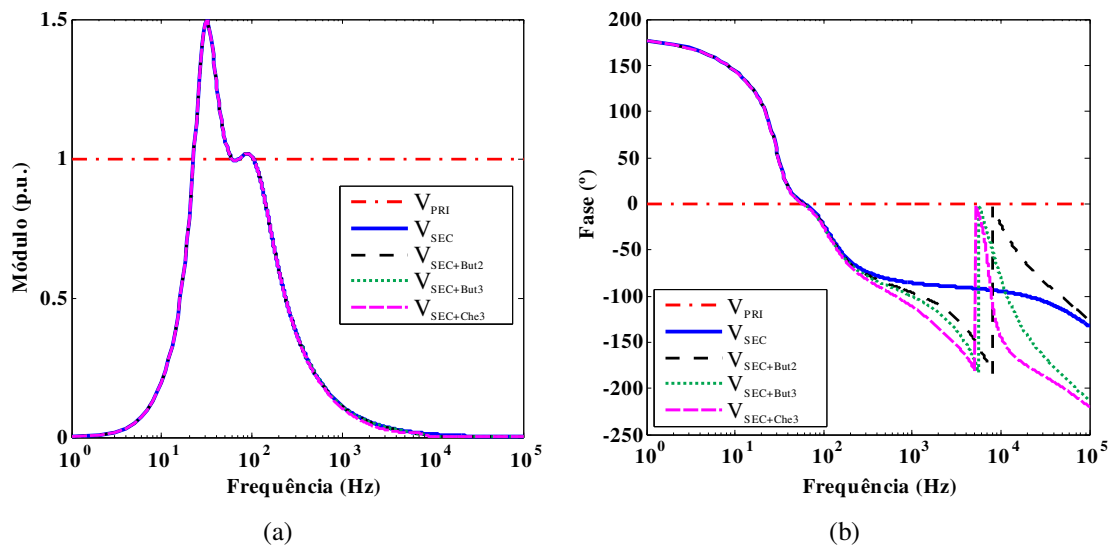
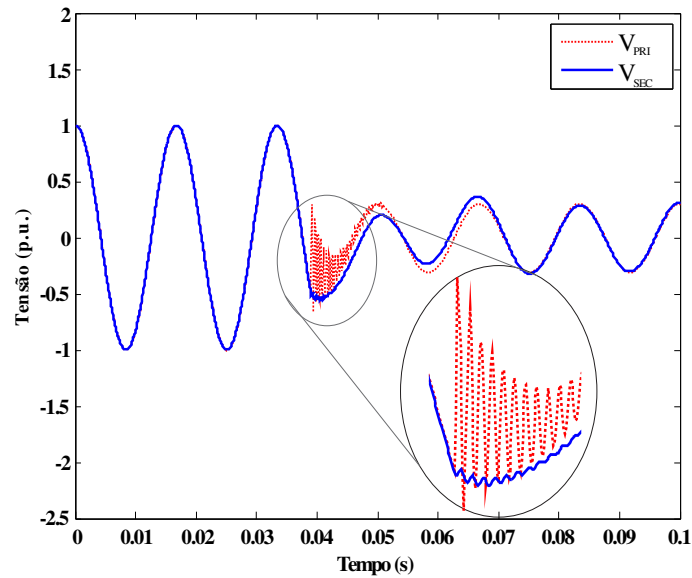


Figura 4.7 –Resposta em frequência do TPC 5: (a) Módulo; (b) Fase.

A partir da análise da resposta em frequência do TPC 5 apresentada na Figura 4.7, constata-se que, na frequência fundamental, a tensão secundária e as tensões secundárias filtradas se aproximam muito da tensão primária (1 p.u.). Por outro lado, para frequências diferentes da fundamental, a tensão secundária e as tensões secundárias filtradas diferem da tensão primária.

Vale frisar que as respostas em frequência de todos os TPC utilizados neste trabalho foram obtidas a partir de simulações no ATP dos parâmetros dos equipamentos, os quais representam estimativas oriundas de medições de resposta em frequência. Os detalhes dessas medições são encontrados nos trabalhos de FERNANDES Jr. (2003), IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004), CARVALHO Jr. (2008) e PAJUELO *et al.* (2008).

A fim de ilustrar no domínio do tempo a resposta transitória do TPC 5 frente a um curto-circuito fase-terra em um SEP de 500 kV, sistema este descrito no capítulo 5, as tensões primária e secundária são apresentadas na Figura 4.8.

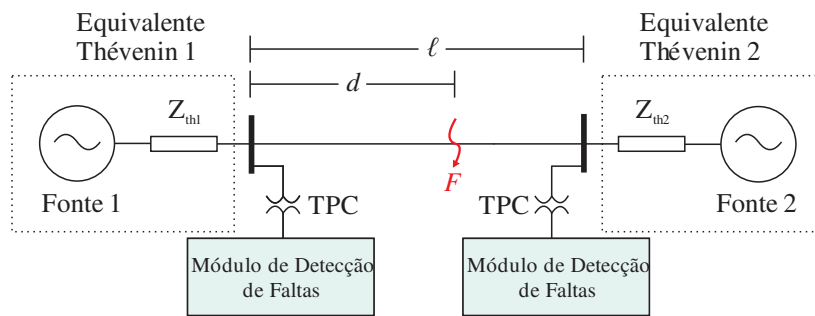


**Figura 4.8** –Tensões primária e secundária do TPC 5 devido a uma falta fase-terra.

Da Figura 4.8, percebe-se que os transitórios induzidos pela falta, presentes no sinal primário, são significativamente amortecidos pelo comportamento dinâmico do TPC 5 (ver Figura 4.7a), fazendo com que o sinal secundário da tensão apresente os componentes de alta frequência fortemente atenuados. Assim, o comportamento transitório do TPC 5 pode comprometer o desempenho de algoritmos de detecção e localização de faltas que dependam da análise de componentes de alta frequência.

## Análises e Resultados

Vários cenários de curtos-circuitos foram simulados no *software* ATP em dois SEP fictícios, um de 230 kV e outro de 500 kV, porém modelados a parâmetros reais, assumindo as LT de 200 km e 400 km. Embora não seja comum encontrar uma LT de 400 km no SEP brasileiro, esta extensão é utilizada neste trabalho para analisar a sensibilidade dos algoritmos avaliados face à variação do comprimento das LT. O SEP é ilustrado na Figura 5.1 e seus parâmetros são apresentados nas Tabela 5.1 e 5.2.



**Figura 5.1** – SEP composto de dois equivalentes Thévenin e uma LT simples.

**Tabela 5.1** – Dados de sequência das LT.

Tensão	Sequência	$R$ ( $\Omega/km$ )	$X$ ( $\Omega/km$ )	$\omega C$ ( $\mu\bar{U}/km$ )
230 kV	Positiva	0.098	0.510	3.252
	Zero	0.532	1.541	2.293
500 kV	Positiva	0.0333	0.3170	5.2033
	Zero	0.3996	0.9921	3.0839

**Tabela 5.2** – Parâmetros dos Equivalentes Thévenin.

Tensão	Fonte	$V_{th}$ (p.u.)	$Z_{th}$			
			$R_1$ ( $\Omega$ )	$X_1$ ( $\Omega$ )	$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )
230 kV	1	$1.02 \angle 0^\circ$	0.8713	25.661	1.0141	18.754
	2	$0.98 \angle -10^\circ$	0.9681	28.513	1.1268	20.838
500 kV	1	$1.00 \angle 0^\circ$	0.9681	28.513	1.1268	20.838
	2	$0.99 \angle -10^\circ$	0.9681	28.513	1.1268	20.838

A cada simulação, o ângulo de incidência do distúrbio, a resistência, o local e o tipo de falta foram variados, gerando, assim, uma base de dados para verificar a influência



dos TPC e dos filtros *anti-aliasing* sobre o processo de estimação do local do curto-circuito. As variáveis de simulação são apresentadas na Tabela 5.3. O passo de integração utilizado no ATP foi de 5  $\mu$ s.

**Tabela 5.3** – Variáveis de simulação utilizadas para a geração da base de dados.

Variáveis de Simulação	Valores
Local da falta (km)	20, 40, 60, 80, ..., 140, 160, 180 ( $\ell = 200$ km)
	40, 80, 120, 160, ..., 280, 320, 360 ( $\ell = 400$ km)
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC
Resistência de falta ( $\Omega$ )	1, 25, 50, 230
Ângulo de incidência de falta ( $^\circ$ )	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180

Um total de 252 cenários de faltas foram simulados para cada tipo de curto-circuito, resultando em um total de 2520 situações para cada sinal do TPC considerado. Após cada simulação, o local do defeito foi estimado utilizando  $V_{Pri}$  (embora a utilização de  $V_{Pri}$  não seja possível em situações práticas, sua análise é imprescindível para efeitos comparativos uma vez que este sinal é tomado como referência),  $V_{Sec}$ ,  $V_{Sec+But2}$ ,  $V_{Sec+But3}$  e  $V_{Sec+Che3}$ .

Os conversores A/D utilizados pelos algoritmos de detecção avaliados neste trabalho digitalizam os sinais resultantes das simulações do ATP a uma frequência de amostragem  $f_s$  de 20 kHz, o que corresponde a um passo de integração de 50  $\mu$ s. Sendo assim, o erro máximo admissível  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  é de 7,5 km. O  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  é dado pela Equação (3.2) e é repetido nesta seção por conveniência (Equação (5.1)). Cabe ressaltar que  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  ocorre devido a uma limitação do *hardware*, uma vez que depende da taxa de amostragem utilizada. Deste modo, nos casos em que os erros de estimação do local da falta sejam superiores ao limiar de 7,5 km serão classificados como casos não satisfatórios (NS). Caso contrário, serão classificados como casos satisfatórios (S).

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta t \cdot c}{2} = \frac{50\mu \cdot 300000}{2} = 7,5 \text{ km.} \quad (5.1)$$

O erro percentual é calculado segundo a Equação (5.2):

$$\varepsilon_k = \frac{|d - \tilde{d}_k|}{\ell} \cdot 100, \quad (5.2)$$

sendo  $d$  e  $\tilde{d}$  os locais de falta real e estimado, respectivamente, e  $k = Pri, Sec, Sec+But2, Sec+But3$  ou  $Sec+Che3$ .

## 5.1 Resultados Obtidos para o SEP de 230 kV

O número de simulações não satisfatórias (NS) e o percentual de simulações satisfatórias (S (%)) das estimações dos locais de falta utilizando os métodos de detecção baseados na Tdq0, nos coeficientes *wavelet*  $w$  da TWDR e na energia dos coeficientes *wavelet*  $\varepsilon_w$  da TWDR, considerando os SEP de 230 kV de 200 km e 400 km estão descritos nas Tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente.

**Tabela 5.4** – Influência dos TPC e filtros *anti-aliasing* sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 230 kV de 200 km.

$\ell$	TPC	Sinal Avaliado	N*	Tdq0		TWDR			
				NS	S (%)	$w$		$\varepsilon_w$	
						NS	S (%)	NS	S (%)
200	TPC 1	$V_{Pri}$	2520	4	99,8413	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec}$	2520	2	99,9206	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec+But2}$	2520	0	100	15	99,4048	6	99,7619
		$V_{Sec+But3}$	2520	1	99,9603	11	99,5635	0	100
		$V_{Sec+Che3}$	2520	16	99,3651	0	100	0	100
	TPC 2	$V_{Pri}$	2520	4	99,8413	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec}$	2520	40	98,4127	59	97,6587	68	97,3016
		$V_{Sec+But2}$	2520	40	98,4127	49	98,0555	68	97,3016
		$V_{Sec+But3}$	2520	61	97,5794	58	97,6984	70	97,2222
		$V_{Sec+Che3}$	2520	139	94,4841	66	97,3810	74	97,0635
	TPC 3	$V_{Pri}$	2520	4	99,8413	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec}$	2520	3	99,8810	0	100	0	100
		$V_{Sec+But2}$	2520	3	99,8810	0	100	5	99,8016
		$V_{Sec+But3}$	2520	0	100	7	99,7222	13	99,4841
		$V_{Sec+Che3}$	2520	7	99,7222	17	99,3254	2	99,9206
	TPC 4	$V_{Pri}$	2520	4	99,8413	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec}$	2520	6	99,7619	7	99,7222	8	99,6825
		$V_{Sec+But2}$	2520	6	99,7619	4	99,8413	15	99,4048
		$V_{Sec+But3}$	2520	15	99,4048	2	99,9206	9	99,6429
		$V_{Sec+Che3}$	2520	32	98,7302	7	99,7222	22	99,1270

\*onde: N = Número total de simulações.

**Tabela 5.5** – Influência dos TPC e filtros *anti-aliasing* sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 230 kV de 400 km.

$\ell$	TPC	Sinal Avaliado	N*	Tdq0		TWDR			
				NS	S (%)	w		$\varepsilon_w$	
						NS	S (%)	NS	S (%)
400	TPC 1	$V_{Pri}$	2520	0	100	4	99,8413	2	99,9206
		$V_{Sec}$	2520	0	100	4	99,8413	0	100
		$V_{Sec+But2}$	2520	0	100	0	100	5	99,8016
		$V_{Sec+But3}$	2520	2	99,9206	1	99,9603	0	100
		$V_{Sec+Che3}$	2520	1	99,9603	3	99,8810	1	99,9603
	TPC 2	$V_{Pri}$	2520	0	100	4	99,8413	2	99,9206
		$V_{Sec}$	2520	3	99,8810	38	98,4921	76	96,9841
		$V_{Sec+But2}$	2520	8	99,6825	49	98,0555	68	97,3016
		$V_{Sec+But3}$	2520	36	98,5714	49	98,0555	67	97,3413
		$V_{Sec+Che3}$	2520	90	96,4286	60	97,6190	63	97,5000
	TPC 3	$V_{Pri}$	2520	0	100	4	99,8413	2	99,9206
		$V_{Sec}$	2520	0	100	0	100	1	99,9603
		$V_{Sec+But2}$	2520	1	99,9603	4	99,8413	0	100
		$V_{Sec+But3}$	2520	0	100	3	99,8810	2	99,9603
		$V_{Sec+Che3}$	2520	0	100	2	99,9206	6	99,7619
	TPC 4	$V_{Pri}$	2520	0	100	4	99,8413	2	99,9206
		$V_{Sec}$	2520	0	100	0	100	3	99,8809
		$V_{Sec+But2}$	2520	2	99,9206	8	99,6825	10	99,6032
		$V_{Sec+But3}$	2520	8	99,6825	2	99,9206	9	99,6429
		$V_{Sec+Che3}$	2520	12	99,5238	4	99,8413	17	99,3254

\*onde: N = Número total de simulações.

Dos resultados obtidos nas Tabelas 5.4 e 5.5, constata-se que as estimações dos locais de falta são normalmente diferentes quando se consideram os sinais diferentes de  $V_{Pri}$  (sinal de referência). Isto se deve ao fato de que as respostas em frequência dos TPC afetam diretamente os algoritmos de localização de distúrbios baseados na teoria de ondas viajantes. Além disso, as localizações estimadas dos curtos-circuitos foram mais comprometidas quando os sinais  $V_{Sec}$ ,  $V_{Sec+But2}$ ,  $V_{Sec+But3}$  e  $V_{Sec+Che3}$  dos TPC 2 e 4 foram tomados como entradas dos algoritmos de detecção de transitórios. De fato, uma vez que o comportamento dinâmico destes TPC atenuam as componentes de alta

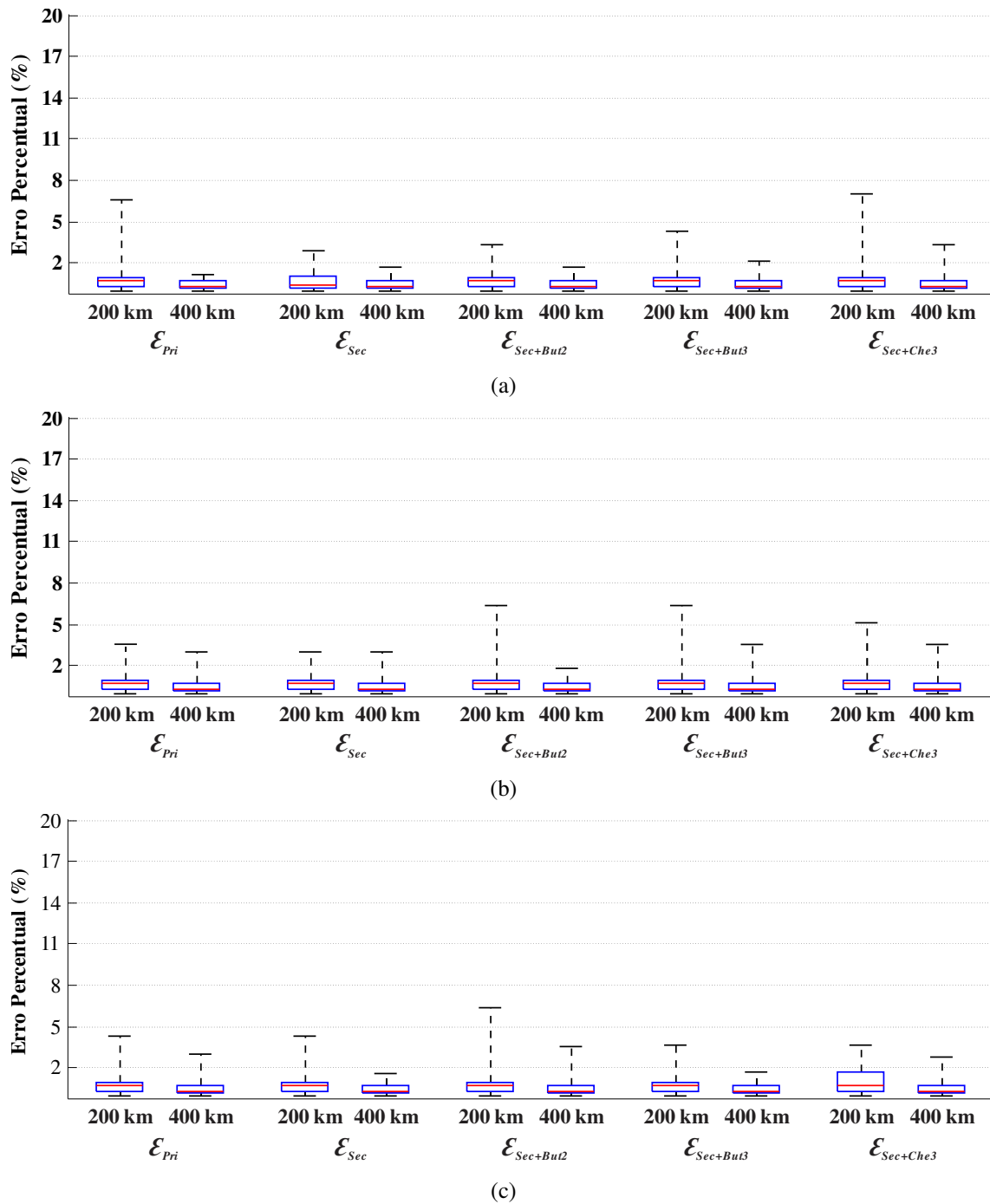
frequência (ver Figuras 4.3a e 4.5a), o desempenho dos algoritmos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes é prejudicado. Por outro lado, quando os sinais secundários e secundários filtrados dos TPC 1 e 3 são levados em consideração, observa-se uma certa melhora nas estimações, fato este que se deve ao comportamento transitório do TPC 1, que apresenta uma resposta em frequência aproximadamente plana ao longo da faixa de frequência analisada (ver Figura 4.2a) e do TPC 3, que amplifica consideravelmente as componentes harmônicas de alta frequência (ver Figura 4.4a), auxiliando, assim, o processo de detecção das faltas.

Analisando-se apenas o número de locais de faltas estimados com a utilização dos filtros *anti-aliasing*, constata-se que o número de casos NS é superior quando o filtro Chebyshev de 3ª ordem é considerado. Assim, as oscilações presentes na faixa de passagem da resposta em frequência deste tipo de filtro (ver Figura 4.1a) prejudicam os algoritmos de detecção, tornando sua utilização inviável para o fim considerado.

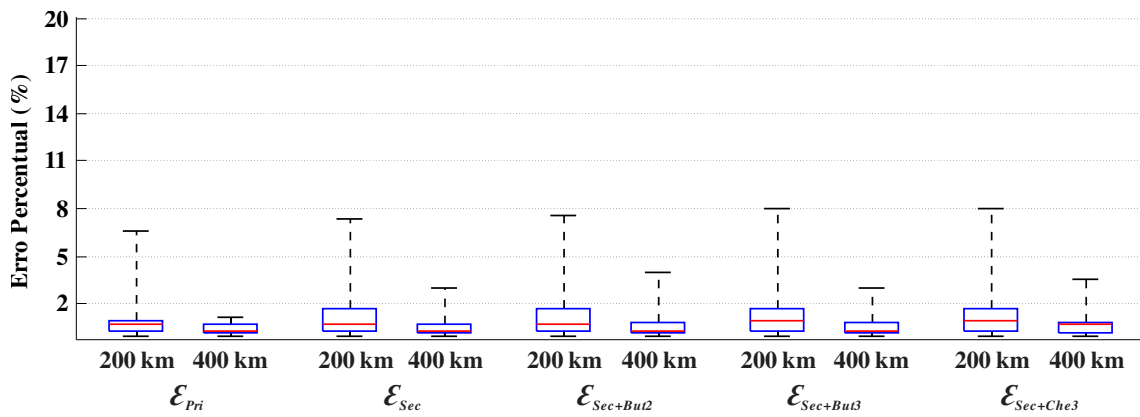
Ainda dos resultados dispostos nas Tabelas 5.4 e 5.5, observa-se que o número de estimações dos pontos de faltas NS diminuíram quando o comprimento  $\ell$  da LT aumentou. Isto ocorre porque quando  $\ell$  aumenta, o SIR diminui, a tensão na barra monitorada passa a ser constituída em maior parte pela tensão da fonte, fazendo com que a influência das respostas em frequência dos TPC seja menos evidente. A influência do SIR sobre a tensão no terminal monitorado é expressa segundo a Equação (3.9), a qual é repetida na Equação (5.3) por conveniência.

$$\hat{V}_{Barra1} = \hat{E}_{th1} \frac{d_{p.u.}}{\frac{Z_{th1}}{\ell Z_{L1}} + d_{p.u.}} = \hat{E}_{th1} \frac{d_{p.u.}}{SIR + d_{p.u.}} \quad (5.3)$$

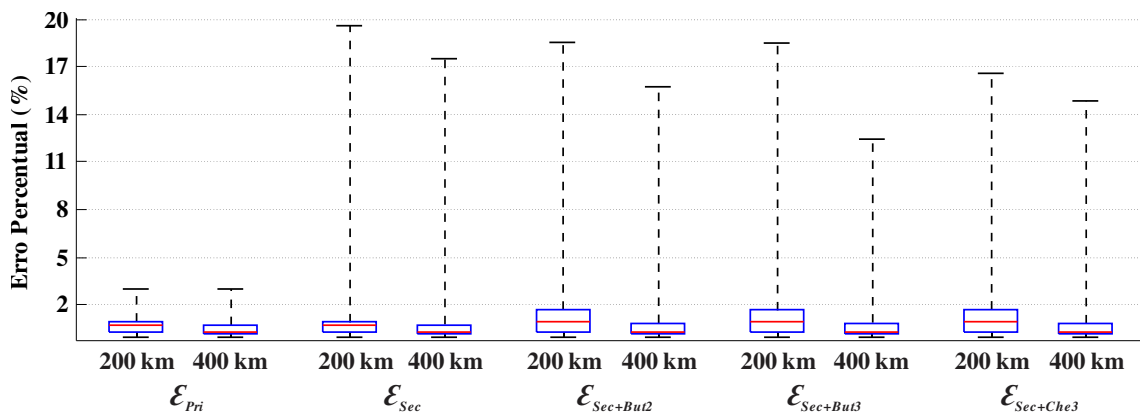
Para permitir uma avaliação mais detalhada acerca dos resultados obtidos, os erros percentuais  $\mathcal{E}_{Pri}$ ,  $\mathcal{E}_{Sec}$ ,  $\mathcal{E}_{Sec+But2}$ ,  $\mathcal{E}_{Sec+But3}$  e  $\mathcal{E}_{Sec+Che3}$  são apresentados em forma de *boxplots*, que são gráficos que permitem uma representação visual da distribuição de um conjunto de dados por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. A cauda superior, o quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 100%, 75%, 50% e 25% dos casos analisados. Os *boxplots* obtidos para cada um dos TPC avaliados são apresentados nas Figuras 5.2 a 5.5.



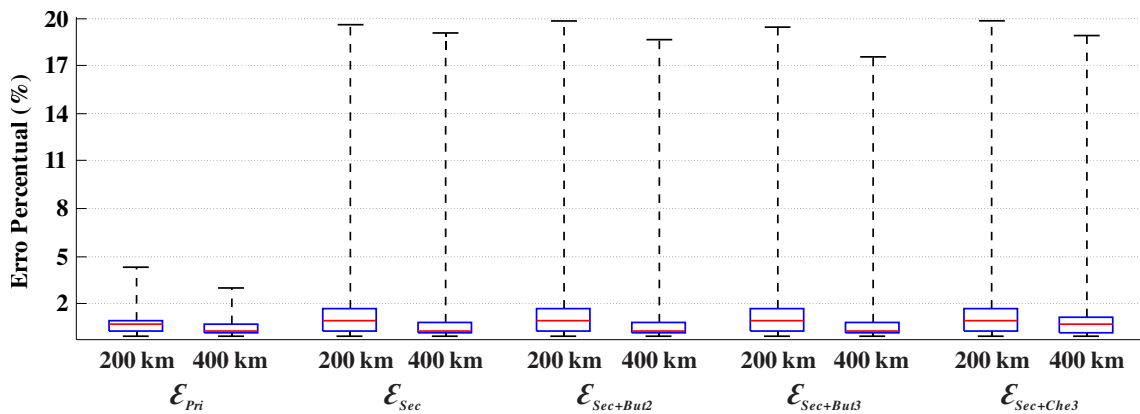
**Figura 5.2** – Representação dos erros estatísticos na forma de *boxplots* das estimações dos locais de falta para o TPC 1 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes  $w$  da TWDR e (c) Energia  $\mathcal{E}_w$  da TWDR.



(a)

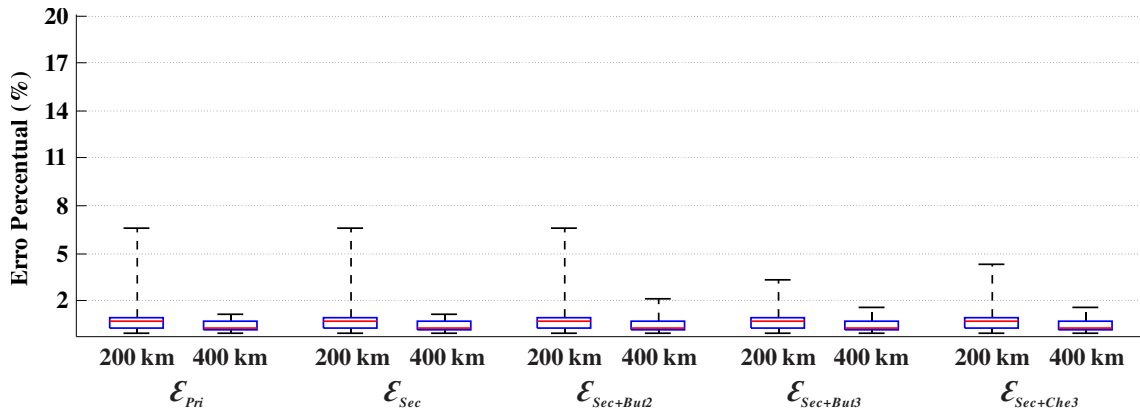


(b)

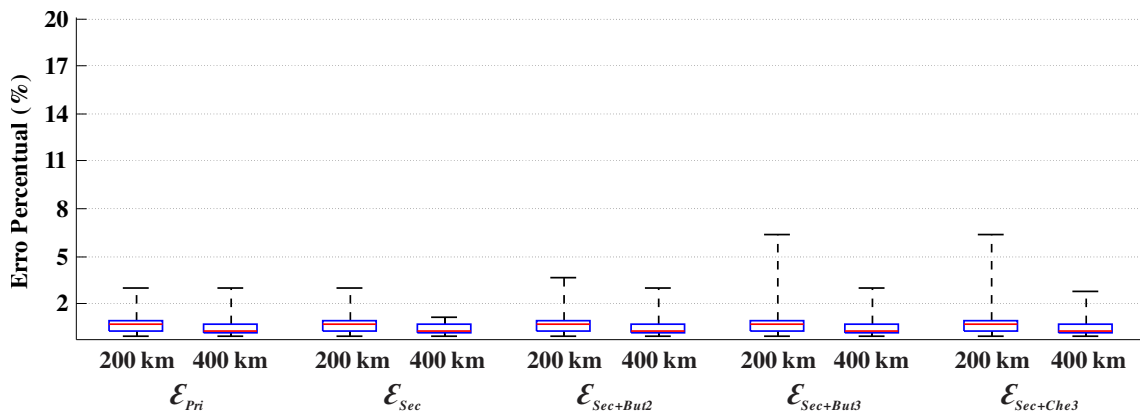


(c)

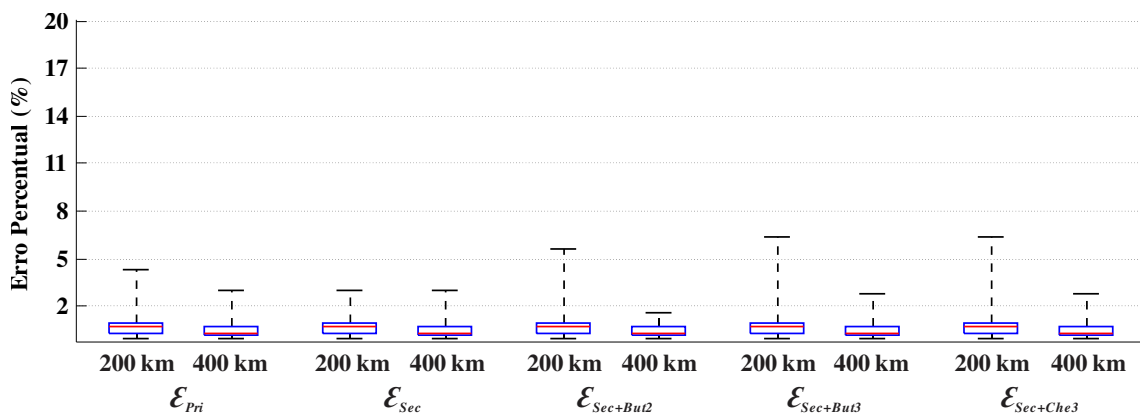
**Figura 5.3** – Representação dos erros estatísticos na forma de *boxplots* das estimações dos locais de falta para o TPC 2 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes  $w$  da TWDR e (c) Energia  $\epsilon_w$  da TWDR.



(a)

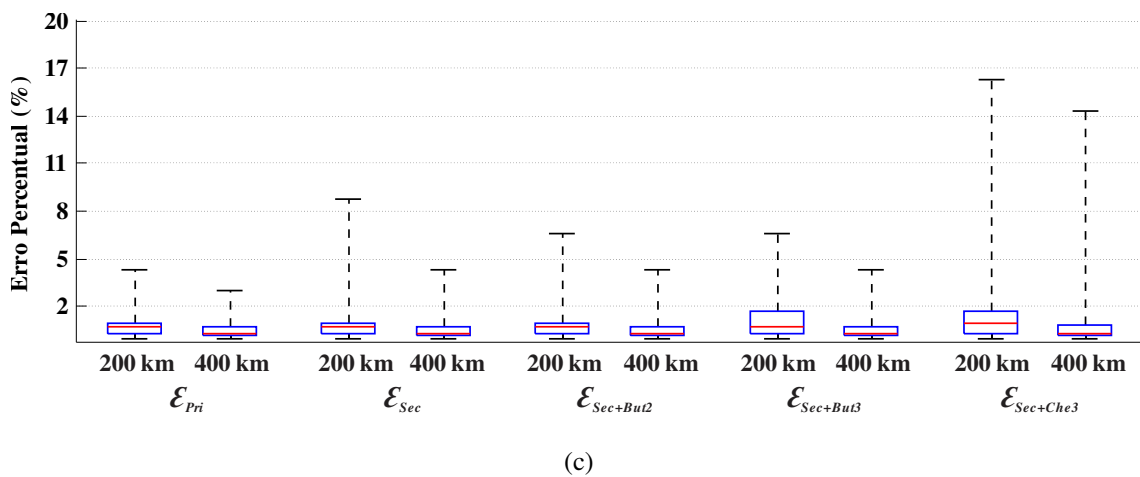
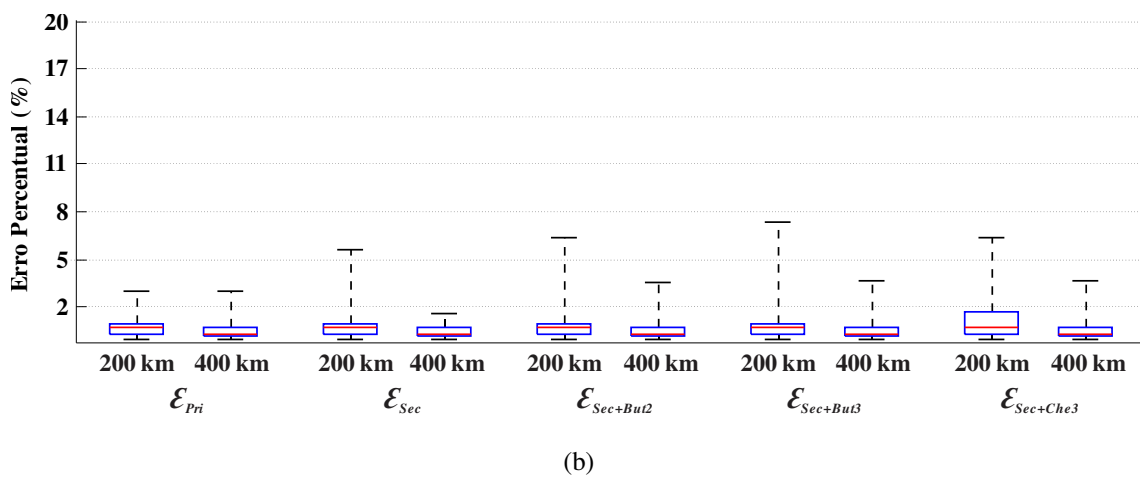
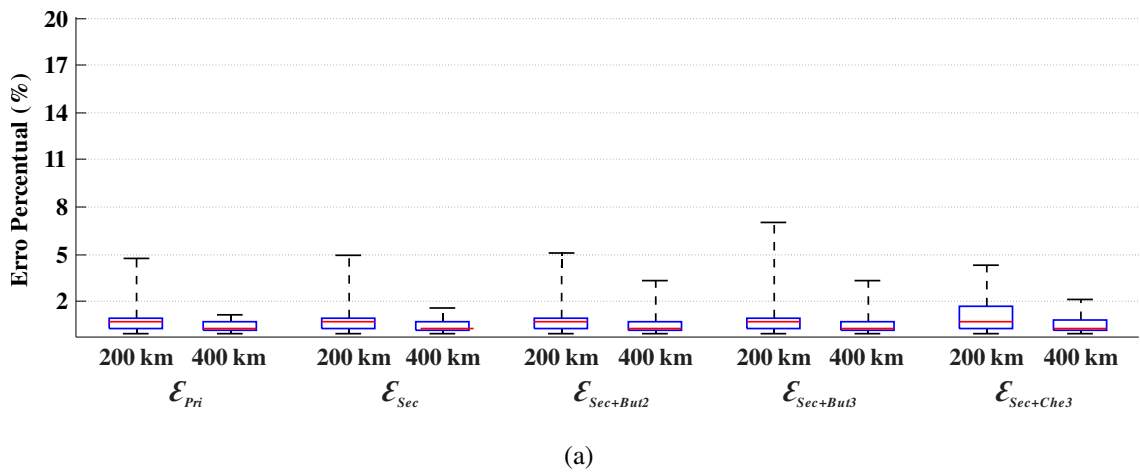


(b)



(c)

**Figura 5.4** – Representação dos erros estatísticos na forma de *boxplots* das estimações dos locais de falta para o TPC 3 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes  $w$  da TWDR e (c) Energia  $\epsilon_w$  da TWDR.



**Figura 5.5** – Representação dos erros estatísticos na forma de *boxplots* das estimações dos locais de falta para o TPC 4 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes  $w$  da TWDR e (c) Energia  $\epsilon_w$  da TWDR.

Em geral, os erros máximos apresentados nos *boxplots* das Figuras 5.2 a 5.5 são maiores para as situações em que os sinais secundários e secundários filtrados dos TPC 2 e 4 são considerados. Além disso, observa-se na Figura 5.3 que os erros obtidos para



estimações de faltas utilizando o TPC 2 apresentaram os piores resultados dentre os TPC avaliados. De fato, a resposta em frequência deste TPC compromete significativamente o desempenho dos algoritmos de detecção de distúrbios baseados na teoria de ondas viajantes uma vez que os transitórios são fortemente atenuados. Por outro lado, o método baseado na Tdq0 mostrou-se menos imune a esta atenuação devido ao fato de que este algoritmo, além de ser sensível as componentes de alta frequência, é também sensível a desbalanceamentos do SEP. Já para os TPC 1 e 3, a utilização dos sinais secundários auxiliaram os métodos de detecção considerados uma vez que os erros máximos obtidos foram iguais ou menores quando o sinal secundário foi levado em consideração.

Em termos gerais, os erros máximos obtidos foram maiores quando a entrada dos algoritmos de detecção eram os sinais filtrados, quando comparado aos erros máximo obtidos com os sinais secundários.

Os erros médios e os desvios padrão dos erros obtidos para cada um dos métodos de detecção avaliados são dispostos nas Tabela 5.6 e 5.7.

**Tabela 5.6** – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando os TPC avaliados para o SEP de 230 kV de 200 km.

$\ell$	TPC	Erro Percentual ( $\varepsilon_k$ )	Tdq0		TWDR			
			$\mu_k$	$\sigma_k$	$w$		$\varepsilon_w$	
					$\mu_k$	$\sigma_k$	$\mu_k$	$\sigma_k$
200	TPC 1	$\varepsilon_{Pri}$	0,8223	0,5966	0,8359	0,5979	0,8334	0,5954
		$\varepsilon_{Sec}$	0,8221	0,5912	0,8349	0,5962	0,8362	0,6001
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,8469	0,6158	0,8593	0,6907	0,8566	0,6608
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,8487	0,6203	0,8623	0,6822	0,8552	0,6289
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,8633	0,6711	0,8584	0,6338	0,8810	0,6672
	TPC 2	$\varepsilon_{Pri}$	0,8238	0,6064	0,8359	0,5979	0,8306	0,5907
		$\varepsilon_{Sec}$	0,9524	0,8722	1,0013	1,3164	1,5197	1,4398
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	1,0575	0,9839	1,0719	1,2159	2,0764	1,5509
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	1,1422	1,1105	1,1876	1,3156	2,0538	1,3831
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	1,2670	1,3221	1,3237	1,4630	1,8399	1,4622
	TPC 3	$\varepsilon_{Pri}$	0,8238	0,6064	0,8359	0,5979	0,8306	0,5907
		$\varepsilon_{Sec}$	0,8238	0,5993	0,8330	0,5930	0,8350	0,5963
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,8235	0,5987	0,8344	0,5954	0,8439	0,6253
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,8227	0,5753	0,8406	0,6277	0,8659	0,7011
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,8429	0,6199	0,8656	0,7118	0,8653	0,6489
	TPC 4	$\varepsilon_{Pri}$	0,8239	0,6064	0,8359	0,5979	0,8306	0,5907
		$\varepsilon_{Sec}$	0,8288	0,6101	0,8463	0,6351	0,8673	0,6917
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,8456	0,6154	0,8582	0,6530	0,8886	0,7242
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,8757	0,6871	0,8509	0,6314	0,9472	0,7840
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,8998	0,7378	0,8870	0,7085	1,0686	1,1505

**Tabela 5.7** – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando os TPC avaliados para o SEP de 230 kV de 400 km.

$\ell$	TPC	Erro Percentual ( $\varepsilon_k$ )	Tdq0		TWDR			
			$\mu_k$	$\sigma_k$	$w$		$\varepsilon_w$	
					$\mu_k$	$\sigma_k$	$\mu_k$	$\sigma_k$
400	TPC 1	$\varepsilon_{Pri}$	0,4724	0,3563	0,4753	0,3690	0,4759	0,3630
		$\varepsilon_{Sec}$	0,4758	0,3606	0,4754	0,3692	0,4744	0,3589
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,4766	0,3615	0,4783	0,3636	0,4849	0,3836
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,4821	0,3692	0,4826	0,3721	0,4766	0,3616
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,4878	0,3778	0,4818	0,3744	0,4836	0,3719
	TPC 2	$\varepsilon_{Pri}$	0,4724	0,3563	0,4762	0,3700	0,4763	0,3657
		$\varepsilon_{Sec}$	0,4816	0,3734	0,5949	1,2922	0,6242	1,5545
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,5341	0,4336	0,5902	1,1371	0,6943	1,6025
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,5647	0,4844	0,5754	0,9255	0,7024	1,4093
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,6142	0,6051	0,6155	0,9533	0,9621	1,8632
	TPC 3	$\varepsilon_{Pri}$	0,4724	0,3563	0,4762	0,3700	0,4763	0,3657
		$\varepsilon_{Sec}$	0,4723	0,3559	0,4731	0,3573	0,4762	0,3700
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,4747	0,3599	0,4767	0,3707	0,4772	0,3622
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,4740	0,3584	0,4770	0,3688	0,4795	0,3670
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,4751	0,3597	0,4800	0,3695	0,4861	0,3842
	TPC 4	$\varepsilon_{Pri}$	0,4724	0,3563	0,4762	0,3700	0,4765	0,3659
		$\varepsilon_{Sec}$	0,4738	0,3582	0,4756	0,3604	0,4849	0,3899
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,4838	0,3751	0,4874	0,3906	0,4944	0,4129
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,4939	0,3974	0,4803	0,3729	0,4864	0,3979
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,5003	0,3950	0,4865	0,3854	0,5628	1,3522

Dos resultados apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, nota-se que os erros médios e os desvios padrão são menores para  $\ell$  igual a 400 km pois as influências dos TPC são menos evidentes nestes casos em que o SIR é menor. Os melhores resultados são perceptíveis para os TPC 1 e 3 em ambos comprimentos de LT avaliados. Com relação ao desempenho dos métodos de detecção, novamente percebe-se que o algoritmo baseado na Tdq0 apresenta maior eficácia frente aos demais métodos avaliados.

Alguns cenários de curtos-circuitos quando o TPC 2 é levado em consideração não foram detectados. Estas situações correspondem, principalmente, aos casos em que os transitórios são consideravelmente atenuados, como em faltas fase-terra com instante de aplicação do distúrbio próximo a passagem da tensão pelo zero (ângulo de incidência igual a 90°) e faltas com alta resistência (230  $\Omega$ ). Além disso, adiciona-se o fato de que o comportamento dinâmico do TPC 2 atenua significativamente as componentes de alta frequência (ver Figura 4.3a). Estes resultados estão dispostos na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** – Casos não detectados pelos algoritmos de detecção de faltas quando considerado o TPC 2.

$\ell$	Sinal Avaliado	Tdq0	TWDR	
		CND*	$w$	$\varepsilon_w$
			CND*	CND*
200	$V_{Pri}$	0	0	0
	$V_{Sec}$	0	5	9
	$V_{Sec+But2}$	0	12	10
	$V_{Sec+But3}$	0	9	9
	$V_{Sec+Che3}$	0	21	20
400	$V_{Pri}$	0	0	0
	$V_{Sec}$	0	10	8
	$V_{Sec+But2}$	0	18	8
	$V_{Sec+But3}$	0	17	8
	$V_{Sec+Che3}$	0	30	20

\*onde: CND = Casos Não Detectados.

Da Tabela 5.8, observa-se que os métodos avaliados baseados na TWDR são significativamente afetados pela influência dos TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* uma vez que, em situações nas quais os transitórios são amortecidos pela própria característica da falta adicionada ao fato da atenuação imposta pelo comportamento transitório dos TPC, o desempenho destes algoritmos é prejudicado. O fato destes métodos utilizarem limiares definidos pela média e desvio padrão dos coeficientes  $w$  e da energia dos coeficientes  $w$ , com base em um comportamento descrito por uma função distribuição de probabilidade normal, pode comprometer o desempenho destes algoritmos em situações de forte atenuação dos transitórios. Por outro lado, o método baseado na Tdq0, que utiliza um limiar auto-adaptativo, não foi comprometido nestes casos críticos.

Portanto, para o SEP de 230 kV, o comportamento dinâmico dos TPC e dos conjuntos TPC+filtros *anti-aliasing* afetam diretamente os métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Caso a resposta em frequência do TPC atenuar as componentes de alta frequência, o desempenho dos algoritmos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes são comprometidos. Em contrapartida, caso a resposta em frequência do TPC apresente uma característica plana para altas frequências ou amplifique tais componentes, o desempenho dos métodos de detecção é melhorado, visto

que estes procedimentos dependem da identificação de transitórios em altas frequências induzidos pelas faltas e, quanto maior a amplitude, mais fácil será a identificação.

No que tange à influência dos filtros *anti-aliasing*, caso a resposta em frequência do filtro apresente oscilações na faixa de passagem, as estimações dos locais de faltas são prejudicadas, tornando-o inviável para o devido fim, caso este observado no filtro Chebyshev de 3ª ordem. Quanto aos filtros Butterworth, analisando-se os casos NS, os erros máximos, os erros médios e os desvios padrão obtidos, pode-se afirmar que o filtro Butterworth de 2ª ordem apresentou um desempenho ligeiramente superior ao do filtro Butterworth de 3ª ordem.

Por ser não só sensível a componentes de alta frequência, mas também aos desbalanceamentos no SEP, o método baseado na Tdq0 apresentou-se como o mais eficaz, dentre os métodos avaliados, para estimação dos locais dos distúrbios, mesmo nos casos em que os transitórios são significativamente atenuados.

## 5.2 Resultados Obtidos para o SEP de 500 kV

O número de simulações não satisfatórias (NS) e o percentual de simulações satisfatórias (S (%)) das estimações dos locais dos distúrbios utilizando os métodos de detecção baseados na Tdq0, nos coeficientes *wavelet*  $w$  da TWDR e na energia dos coeficientes *wavelet*  $\epsilon_w$  da TWDR, considerando os SEP de 500 kV de 200 km e 400 km estão descritos na Tabela 5.9.

Dos resultados obtidos na Tabela 5.9, nota-se que, devido ao fato da resposta em frequência do TPC 5 atenuar consideravelmente as componentes harmônicas de alta frequência (ver Figura 4.7a), as estimações dos locais do curto-circuito são piores quando os sinais secundário e secundário filtrados são as entradas dos algoritmos de detecção, afetando diretamente o desempenho dos métodos de detecção baseado na teoria de ondas viajantes.

Analisando-se apenas o número de locais de faltas estimados com a utilização dos filtros *anti-aliasing*, observa-se que as o número de simulações NS é superior quando o filtro Chebyshev de 3ª ordem é considerado. Resultado semelhante quando o SEP de 230 kV foi analisado.

**Tabela 5.9** – Influência dos TPC e filtros *anti-aliasing* sobre o método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para o SEP de 500 kV.

$\ell$	TPC	Sinal Avaliado	N*	Tdq0		TWDR			
				NS	S (%)	$w$		$\varepsilon_w$	
						NS	S (%)	NS	S (%)
200	TPC 5	$V_{Pri}$	2520	0	100	0	100	4	99,8413
		$V_{Sec}$	2520	10	99,6032	92	96,3492	91	96,3889
		$V_{Sec+But2}$	2520	44	98,2540	94	96,2698	94	96,2698
		$V_{Sec+But3}$	2520	34	98,6508	96	96,1905	99	96,0714
		$V_{Sec+Che3}$	2520	51	97,9762	101	95,9921	133	94,7222
400	TPC 5	$V_{Pri}$	2520	0	100	0	100	3	99,8810
		$V_{Sec}$	2520	8	99,6825	81	96,7857	83	96,7063
		$V_{Sec+But2}$	2520	40	98,4127	81	96,7857	84	96,6670
		$V_{Sec+But3}$	2520	33	98,6905	79	96,8651	88	96,5080
		$V_{Sec+Che3}$	2520	47	98,1349	90	96,4286	112	95,5555

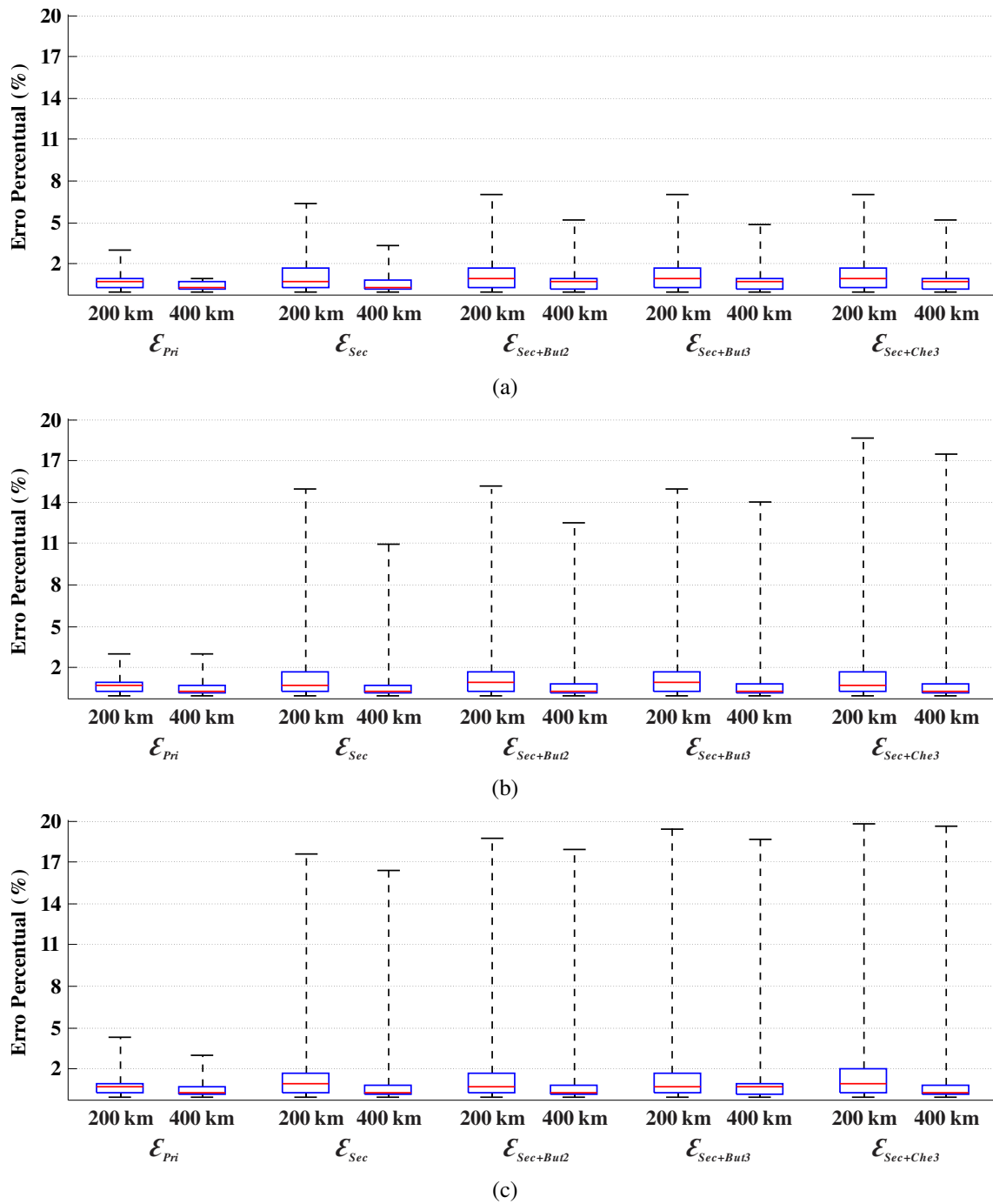
\*onde: N = Número total de simulações.

Ainda da Tabela 5.9, percebe-se que quando  $\ell$  aumentou, o número de estimações dos pontos de faltas NS diminuíram. Neste caso, o SIR diminuiu, fazendo com que a influência das respostas em frequência do TPC seja menos evidente.

Os *boxplots* referentes as análises do TPC 5 são apresentados na Figura 5.6.

Em termos gerais, os erros máximos apresentados nos *boxplots* da Figura 5.6 são maiores para as situações em que os sinais secundários e secundários filtrados dos TPC 5 são levados em consideração. De fato, a atenuação promovida pela resposta em frequência do TPC 5 compromete consideravelmente o desempenho dos métodos de detecção avaliados.

O algoritmo baseado na Tdq0 apresentou o melhor comportamento frente a influência do TPC e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* quando comparado com os algoritmos baseados na TWDR. No que concerne a influência dos filtros, os erros obtidos quando considerado o filtro Chebyshev de 3ª ordem foram superiores aos demais. Os erros médios e os desvios padrão dos erros são dispostos na Tabela 5.10.



**Figura 5.6** – Representação dos erros estatísticos na forma de *boxplots* das estimações dos locais de falta para o TPC 5 utilizando os métodos de detecção: (a) Tdq0; (b) Coeficientes  $w$  da TWDR e (c) Energia  $\epsilon_w$  da TWDR.

**Tabela 5.10** – Erros médios percentual ( $\mu_k$ ) e desvios padrão ( $\sigma_k$ ) das localizações de faltas estimadas considerando o TPC avaliado para o SEP de 500 kV de 200 km e 400 km.

$\ell$	TPC	Erro Percentual ( $\varepsilon_k$ )	Tdq0		TWDR			
			$\mu_k$	$\sigma_k$	$w$		$\varepsilon_w$	
					$\mu_k$	$\sigma_k$	$\mu_k$	$\sigma_k$
200	TPC 5	$\varepsilon_{Pri}$	0,8149	0,5613	0,8249	0,5791	0,8382	0,6075
		$\varepsilon_{Sec}$	0,8948	0,7078	0,9663	1,3028	1,5467	1,7495
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	1,1045	0,9661	1,1593	1,3418	1,6439	1,6409
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	1,2446	1,0693	1,2029	1,4284	1,6471	1,6671
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	1,3211	1,1537	1,0829	1,2608	1,8187	1,7051
400	TPC 5	$\varepsilon_{Pri}$	0,4717	0,3555	0,4771	0,3689	0,4816	0,3764
		$\varepsilon_{Sec}$	0,5289	0,4745	0,5409	1,0254	0,7526	1,3771
		$\varepsilon_{Sec+But2}$	0,6081	0,5968	0,5508	0,9222	0,7192	1,3845
		$\varepsilon_{Sec+But3}$	0,6722	0,6474	0,6134	0,9514	0,8087	1,5130
		$\varepsilon_{Sec+Che3}$	0,7875	0,8059	0,5829	0,8925	0,5997	1,5535

Os casos de curtos-circuitos não identificados quando o TPC 5 é levado em consideração são apresentados na Tabela 5.11. Semelhante aos casos críticos ocorridos para os SEP de 230 kV, estas situações correspondem, principalmente, as ocasiões em que os transitórios são significativamente atenuados, como em faltas fase-terra com instante de aplicação do distúrbio próximo a passagem da tensão pelo zero (ângulo de incidência igual a 90°) e faltas com alta resistência (230  $\Omega$ ). Além disso, adiciona-se o fato de que o comportamento dinâmico do TPC 5 atenua consideravelmente as componentes de alta frequência (ver Figura 4.7a).

**Tabela 5.11** – Casos não detectados pelos algoritmos de detecção de faltas quando considerado o TPC 5.

$\ell$	Sinal Avaliado	Tdq0	TWDR	
		CND*	$w$	$\varepsilon_w$
			CND*	CND*
200	$V_{Pri}$	0	0	0
	$V_{Sec}$	0	158	149
	$V_{Sec+But2}$	0	151	154
	$V_{Sec+But3}$	0	152	154
	$V_{Sec+Che3}$	0	184	167
400	$V_{Pri}$	0	0	0
	$V_{Sec}$	0	162	159
	$V_{Sec+But2}$	0	157	162
	$V_{Sec+But3}$	0	157	163
	$V_{Sec+Che3}$	0	188	181

\*onde: CND = Casos Não Detectados.

Dos resultados apresentados na Tabela 5.11, observa-se que os métodos avaliados baseados na TWDR são significativamente afetados pela influência do TPC 5 e do conjunto TPC+filtro *anti-aliasing* visto que, nestes casos críticos, adiciona-se o fato do comportamento dinâmico do TPC 5 atenuar as componentes harmônicas de alta frequência, prejudicando, assim, o desempenho destes algoritmos. O método baseado na Tdq0 não foi comprometido nestas ocasiões.

Por conseguinte, para o SEP de 500 kV, os comportamentos transitórios do TPC 5 e do conjunto TPC+filtros *anti-aliasing* afetam diretamente os métodos de detecção de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Como a resposta em frequência deste equipamento atenua consideravelmente as componentes de alta frequência, o desempenho dos algoritmos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes foram comprometidos.

No que concerne a influência dos filtros *anti-aliasing*, as estimações obtidas quando o filtro Chebyshev de 3ª ordem foi considerado foram as piores, em razão das oscilações presentes ao longo da faixa de passagem. Em relação aos filtros Butterworth, percebe-se que o filtro de 2ª ordem apresentou um desempenho ligeiramente superior ao de 3ª ordem.

Novamente, o método baseado na Tdq0 apresentou-se como o mais confiável, dentre os métodos avaliados, para a estimação dos locais dos distúrbios, mesmo nos casos em que os transitórios são significativamente atenuados. Vale ressaltar que os métodos baseados na TWDR avaliados neste trabalho utilizam limiares definidos a partir da média e do desvio padrão dos coeficientes *wavelet* e da energia dos coeficientes *wavelet*, admitindo que estes sigam uma distribuição de probabilidade normal.



## Conclusões

Nesse trabalho foi analisada a influência de quatro modelos de TPC de 230 kV e um modelo de 500 kV, disponíveis na literatura, e de três tipos de filtros *anti-aliasing*, Butterworth de 2ª e 3ª ordens e Chebyshev de 3ª ordem, sobre um método de localização de faltas de dois terminais com dados perfeitamente sincronizados baseado na teoria de ondas viajantes. Para tanto, vários cenários de faltas foram simulados no ATP em dois SEP fictícios de 230 kV e 500 kV, porém modelados a parâmetros reais. Em cada simulação foram modificadas as variáveis do distúrbio, como a resistência, o ângulo de incidência, o tipo e a localização da falta, gerando, assim, uma base de dados apropriada para a análise de simulações em massa, sendo as estimativas dos locais dos distúrbios calculadas tomando como entrada do algoritmo os sinais provenientes do primário, do secundário e do secundário filtrado.

Como parte fundamental do método de localização de faltas, a detecção dos instantes iniciais das faltas foi realizada a partir de três métodos de detecção de transitórios baseados na teoria de ondas viajantes, que são: método baseado na  $Tdq_0$ , método baseado nos coeficientes *wavelet* da TWDR e o método baseado na energia dos coeficientes *wavelet* da TWDR.

Dos resultados obtidos, constatou-se que o comportamento dinâmico dos TPC afeta diretamente o desempenho dos algoritmos de estimação dos locais de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Em casos onde as respostas em frequência destes equipamentos atenuam as componentes harmônicas de alta frequência de suas tensões secundárias, o desempenho dos métodos de detecção pode ser comprometido, fato ainda mais preocupante caso apenas medições de tensão estejam disponíveis nos terminais monitorados. Por outro lado, em situações nas quais o comportamento transitório dos TPC apresenta uma característica aproximadamente plana para altas frequências ou amplifica tais componentes, o processo de detecção do curto-circuito é facilitado, melhorando, assim, o desempenho dos métodos de detecção avaliados.

Do ponto de vista do impacto dos filtros *anti-aliasing* sobre a estimação dos locais de faltas, observou-se que por apresentar oscilações ao longo da faixa de passagem, o filtro Chebyshev de 3ª ordem apresentou os piores resultados, tornando-o inviável para este tipo de análise. Já os filtros Butterworth de 2ª e 3ª apresentaram melhores resultados, sendo o filtro Butterworth de 2ª ordem caracterizado por um desempenho ligeiramente superior ao de 3ª ordem. Como o filtro *anti-aliasing* constitui-se como parte integrante dos dispositivos de proteção, a utilização dos filtros Butterworth de 2ª ordem se faz mais apropriada quando métodos de detecção baseados na teoria de ondas viajantes estiverem sendo utilizados.

A partir da análise comparativa do impacto da resposta em frequência dos TPC e filtros *anti-aliasing* em SEP com comprimentos de LT diferentes, observa-se que, quanto maior a LT, menor será o SIR e, conseqüentemente, menor será a influência deste conjunto sobre o processo de localização de faltas.

Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

- Avaliar a influência de outros modelos de TPC de diferentes classes de tensão e filtros *anti-aliasing* sobre os métodos de detecção utilizados;
- Projetar compensadores para os TPC analisados e avaliar o comportamento do conjunto TPC+compensador frente aos métodos de detecção utilizados;
- Avaliar a influência do comportamento dinâmico dos TPC frente a outros métodos de localização e detecção de faltas, como os métodos baseados em frequência fundamental;
- Verificar o impacto de TI sobre os métodos utilizados e sobre outros métodos baseados na teoria de ondas viajantes;
- Analisar o desempenho dos métodos de localização e detecção de faltas frente ao comportamento transitório dos TI em SEP com maior número de LT, barras e equipamentos.

# Referências Bibliográficas

- BAINY, R. G.; CARDOSO, L. F.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; PESENTE, J. R.; OTTO, R. B. “Influência de Modelos de Transformadores de Potencial Capacitivo Sobre a Estimativa de Fasores de Tensão”. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, 2012.
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y.-H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York, USA: IEEE, 2006.
- BRASIL. Decreto 8.461, de 2 de junho de 2015. Regulamenta a prorrogação das concessões de distribuição de energia elétrica. Brasília: Presidência da República. 2015. Disponível em URL: [http://www.planalto.gov.br/CCIVIL\\_03/\\_Ato2015-2018/2015/Decreto/D8461.htm](http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2015-2018/2015/Decreto/D8461.htm).
- CARVALHO Jr., A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, agosto 2008.
- CIGRE Working Group 02.33. Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients. Rue d’Artois FR-75 008 Paris, 1990.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, agosto 2006.
- 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 2011 – IPST 2011*, Delft – The Netherlands, June 2011.
- COSTA, F. B. “Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of the Wavelet Coefficient Energy”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp. 140 – 153, Fevereiro de 2014.
- COURY, D. V, OLESKOVICZ, M., GIOVANINI. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. São Carlos: EESC– USP, 2007.

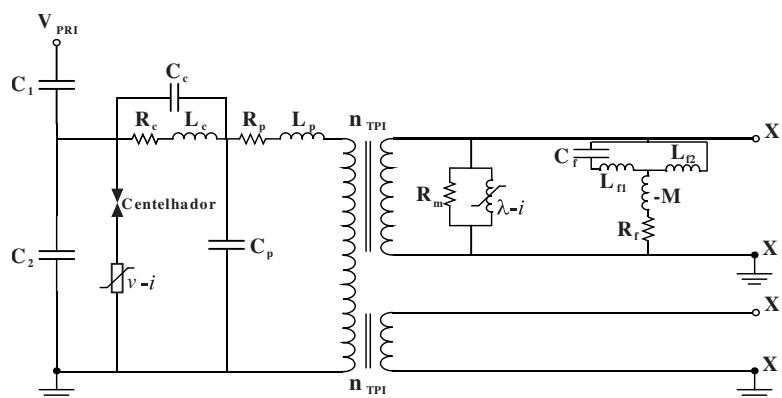
- D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; KASTRUP FILHO, O. e MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro, FURNAS 1985.
- FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, dezembro 2003.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. Fault location based on travelling waves. In: *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.1.: s.n.], 1993. P. 54-59.
- HOU, D.; ROBERTS, J. “Capacitive voltage transformer: transient overreach concerns and solutions for distance relaying,” In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, 1996.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.1], 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>.
- KASZTENNY, B.; SHARPLES, D.; ASARO, V.; POZZUOLI, M. “Distance Relays and Capacitive Voltage Transformers-Balancing Speed and Transient Overreach”. In: *Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station Texas, v. 53, 2000.
- 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. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2008)*, 2008. [S.1.: s.n.], 2008. P. 681-684.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, março 2011.

- LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES W. L. A. “Análise da Influência dos Transformadores de Potencial Capacitivos Sobre a Localização de Falhas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes”. *XIX Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2012*, Campina Grande - PB, Brasil, 2-6 de setembro, 2012.
- LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES W. L. A. Influência dos Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing sobre Algoritmos de Localização de Falhas Baseados em Componentes Transitórias. *X Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Araxá-MG, Brasil, Araxá-MG, Brasil*, junho 2013.
- LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES W. L. A. A traveling-wave detection method based on park’s transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626-1634, 2013, ISSN 0885-8977.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, maio 2014.
- MACHADO, E. P. *Compensação Dinâmica dos Transitórios de Baixa Frequência de Transformadores de Potencial Capacitivos para Otimização da Proteção de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, dezembro 2013.
- NAIDU, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.1]: Grafset, 1985.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. “Phasor Estimation Technique to Reduce the Impact of Coupling Capacitor Voltage Transformer Transients”. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 2, n. 4, p. 588-599, 2008.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2009.
- REIS, R. L. A.; LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D. “Influence of Coupling Capacitor Voltage Transformers on Travelling Wave-Based Fault Locators”. *International Conference on Power Systems Transients 2015 – IPST 2015*, Cavtat – Croatia, June 2015a.

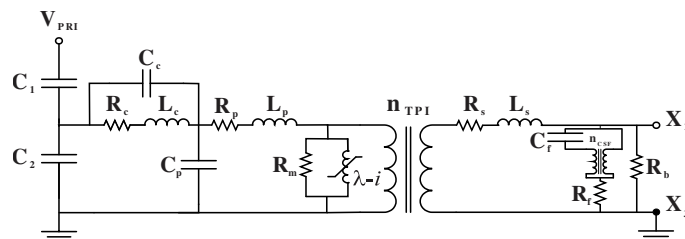
- REIS, R. L. A.; NEVES, W. L. A.; LOPES, F. V.; BARROS, D.; NASCIMENTO, J.; COSTA, C.; BRITO, N.; MORAES, S. “Análise de Distúrbios no Sistema CHESF de Transmissão: Uma Abordagem sobre a Influência dos Transformadores de Potencial Capacitivos”. *XI Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Campina Grande-PB, Brasil, Campina Grande-PB, Brasil, julho 2015b.*
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.
- SANTOS, A. K. X. *Um compensador para a Correção em Tempo Real da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, setembro 2011.
- SILVA, C. A. *Um Filtro Digital Recursivo para Correção da Tensão de Transformadores de Potencial Capacitivos: Uma Abordagem em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, outubro 2009.
- SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L.A. “Correction of the Secondary Voltage of Coupling Capacitor Voltage Transformers in Real Time”. *International Conference on Power Systems Transients 2011 – IPST 2011, Delft – The Netherlands, June 2011.*
- SILVA, K. M.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; DANTAS, K. M.; SOUZA, B. A.; PESENTE, J. R.; BAINY, R. G.; CARDOSO, L. F.; OTTO, R. B. “Avaliação do Impacto da Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos Sobre a Proteção de Distância”. *XIX Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2012, Campina Grande - PB, Brasil, 2-6 de setembro, 2012.*
- STEVENSON JR., W. D.; GRAINGER, J. J. *Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.

## Topologia e Parâmetros dos TPC Avaliados

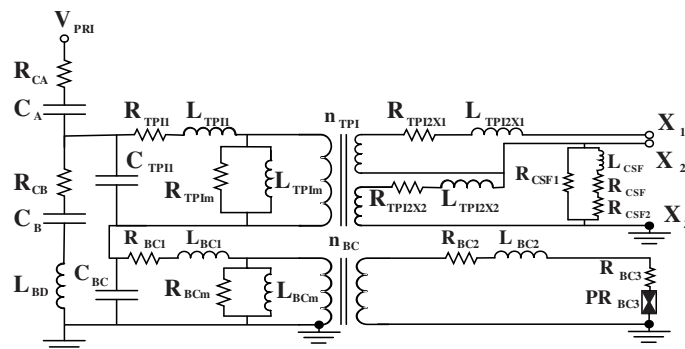
### A.1 Topologia dos TPC de 230 kV Avaliados



**Figura A.1** – Topologia do TPC 1. (Fonte: FERNANDES Jr., 2003).



**Figura A.2** – Topologia do TPC 2. (Fonte: IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).



**Figura A.3** – Topologia do TPC 3. (Fonte: CARVALHO Jr, 2008).

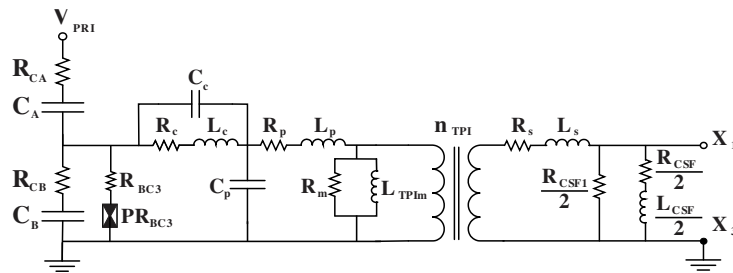


Figura A.4 – Topologia do TPC 4. (Fonte: CARVALHO Jr, 2008).

Tabela A.1 – Parâmetros dos TPC de 230 kV avaliados.

TPC 1		TPC 2		TPC 3		TPC 4	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$C_1$ (nF)	10,4	$C_1$ (nF)	2,43	$C_A$ (pF)	4321	$C_A$ (pF)	4050
$C_2$ (nF)	65,4	$C_2$ (nF)	82	$C_B$ (pF)	38820	$C_B$ (pF)	42138
$C_c$ (nF)	493,2	$C_c$ (pF)	100	$C_{TPI1}$ (pF)	200	$C_p$ (pF)	149,7
$C_p$ (pF)	9,3	$C_p$ (pF)	150	$C_{BC}$ (pF)	1500	$C_c$ (pF)	144,78
$C_f$ ( $\mu$ F)	166,39	$C_f$ ( $\mu$ F)	9,6	$L_{TPI1}$ (H)	6,93	$L_p$ (H)	4,68
$L_c$ (H)	86,3	$L_c$ (H)	153,85	$L_{TPI2X1}$ (mH)	0,0268	$L_s$ (mH)	0,143
$L_p$ (H)	114,7	$L_p$ (H)	7,95	$L_{TPI2X2}$ (mH)	0,0368	$L_C$ (H)	159,57
$L_{f1}$ (mH)	10,87	$L_s$ ( $\mu$ H)	2,653	$L_{BC1}$ (H)	1,32	$L_{CSF}$ (H)	0,354
$L_{f2}$ (mH)	47,39	$R_c$ ( $\Omega$ )	228	$L_{BC2}$ (mH)	3,56	$R_{CA}$ ( $\Omega$ )	2469
$M$ (mH)	-9,31	$R_p$ ( $\Omega$ )	400	$L_{BD}$ (mH)	45	$R_{CB}$ ( $\Omega$ )	243,6
$R_c$ (k $\Omega$ )	9,1	$R_s$ ( $\Omega$ )	0,001	$R_{CA}$ ( $\Omega$ )	1565	$R_p$ ( $\Omega$ )	446
$R_p$ ( $\Omega$ )	920	$R_f$ ( $\Omega$ )	40	$R_{CB}$ ( $\Omega$ )	177,6	$R_s$ (m $\Omega$ )	48,5
$R_m$ ( $\Omega$ )	50,6	$R_b$ ( $\Omega$ )	100	$R_{TPI1}$ ( $\Omega$ )	343	$R_C$ ( $\Omega$ )	608
$R_f$ ( $\Omega$ )	4,99	$n_{CSF}$	1,98	$R_{TPI2X1}$ (m $\Omega$ )	8,6	$R_{BC3}$ ( $\Omega$ )	68,8
$n_{TPI}(X_1 - X_3)$	152,6	$n_{TPI}(X_1 - X_3)$	57,25	$R_{TPI2X2}$ (m $\Omega$ )	11,8	$R_m$ ( $\Omega$ )	8,86
$n_{TPI}(X_2 - X_3)$	152,6	-	-	$R_{BC1}$ ( $\Omega$ )	382	$R_{CSF}$ ( $\Omega$ )	5,56
-	-	-	-	$R_{BC2}$ ( $\Omega$ )	5,64	$R_{CSF1}$ ( $\Omega$ )	186
-	-	-	-	$R_{BC3}$ ( $\Omega$ )	24,8	$n_{TPI}(X_1 - X_3)$	100,5
-	-	-	-	$R_{CSF}$ ( $\Omega$ )	1,33	-	-
-	-	-	-	$R_{CSF1}$ ( $\Omega$ )	74,6	-	-
-	-	-	-	$R_{CSF2}$ ( $\Omega$ )	2,1	-	-
-	-	-	-	$R_{TPI m}$ (M $\Omega$ )	11,2	-	-
-	-	-	-	$R_{BC}$ (M $\Omega$ )	1,26	-	-
-	-	-	-	$n_{TPI}(X_1 - X_3)$	116,13	-	-
-	-	-	-	$n_{TPI}(X_2 - X_3)$	201,1	-	-
-	-	-	-	$n_{BC}$	19,23	-	-



**Tabela A.2** – Característica  $\lambda - i$  dos TPI utilizados nos TPC 1 e 4.

TPC 1		TPC 4	
Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)	Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)
0,076368	0,025772	0,003430	73,5350
0,720881	0,189066	0,004668	77,6537
1,42937	0,396889	0,005875	81,4258
2,14741	0,638099	0,007907	84,8511
2,51167	0,748388	0,790712	1966,0534
2,98930	0,806533	-	-
3,66201	0,863553	-	-
4,58723	0,903317	-	-
5,71204	0,942706	-	-
55,5270	1,55642	-	-
5552,70	1,56224	-	-

**Tabela A.3** – Característica  $\lambda - i$  dos TPI e dos Circuitos Supressores de Ferroressonância (CSF) utilizados nos TPC 2 e 3.

TPC 2				TPC 3			
TPI		CSF		TPI		CSF	
Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)	Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)	Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)	Corrente ( $A_{pico}$ )	Fluxo (V·s)
0,001421	13,7867	0,1	0,035	0,004200	96,6910	1,33700	0,26453
-	-	-	-	0,005435	108,0632	1,72886	0,30314
-	-	-	-	0,026216	128,9544	2,61222	0,34249
-	-	-	-	0,056527	147,6914	8,74420	0,38633
-	-	-	-	5,652736	3513,43	874,42039	7,46552

**Tabela A.4** – Característica não linear  $v - i$  do pararraios tipo SiC do TPC 1.

TPC 1	
Corrente ( $A_{pico}$ )	Tensão de descarga ( $kV_{pico}$ )
100	20,8
200	27,9
500	39,0
1000	42,9
2000	45,5

**Tabela A.5** – Dados dos centelhadores dos pararraios utilizados nos TPC 1, 3 e 4.

TPC 1	TPC 3	TPC 4
Tensão de descarga ( $kV_{pico}$ )	Tensão de descarga ( $kV_{pico}$ )	Tensão de descarga ( $kV_{pico}$ )
82,73	0,275	27,87

## A.2 Topologia do TPC de 500 kV Avaliado

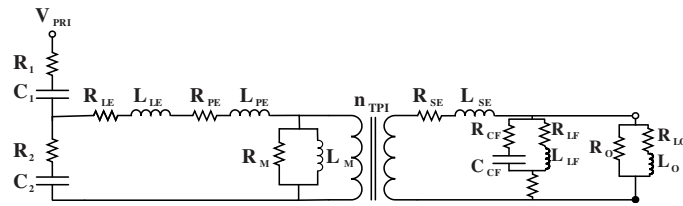


Figura A.5 – Topologia do TPC 5. (Fonte: PAJUELO *et al.*, 2008).

Tabela A.6 – Parâmetros do TPC de 230 kV avaliado.

TPC 5	
Parâmetro	Valor
$C_1$ (nF)	1,605
$C_2$ (nF)	89,991
$C_f$ ( $\mu$ F)	165,36
$L_{LE}$ (H)	67,922
$L_f$ (mH)	54,3
$L_{PE}$ (H)	4,4433
$L_{SE}$ ( $\mu$ H)	649,91
$L_O$ (H)	0,0982
$R_1$ ( $\Omega$ )	3310,7
$R_2$ ( $\Omega$ )	59,0338
$R_{LE}$ ( $\Omega$ )	950,06
$R_f$ ( $\Omega$ )	13,333
$R_{CF}$ ( $\Omega$ )	0,08
$R_{LF}$ ( $\Omega$ )	1,2301
$R_{PE}$ ( $\Omega$ )	850,02
$R_{SE}$ ( $\Omega$ )	0,2467
$R_O$ ( $\Omega$ )	29,551
$R_{LO}$ ( $\Omega$ )	0
$n_{TPI}$	75,8503