

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

## Tese de Doutorado

Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto  
da Resposta Transitória do TPC

Célio Anésio da Silva

Campina Grande – Paraíba – Brasil

© Célio Anésio da Silva, maio de 2014

Célio Anésio da Silva

Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto  
da Resposta Transitória do TPC

*Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado 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

Maio de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586f Silva, Célio Anésio da.  
Filtros digitais recursivos para redução do impacto da resposta transitória do TPC / Célio Anésio da Silva. – Campina Grande, 2014.  
63 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior".  
Referências.

1. Transformador de Potencial Capacitivo. 2. Filtros Digitais Recursivos. 3. Simulação em Tempo Real. 4. Transitórios Eletromagnéticos. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Fernandes Júnior, Damásio. III. Título.

CDU 621.314.222.8(043)

**"FILTROS DIGITAIS RECURSIVOS PARA REDUÇÃO DO IMPACTO DA RESPOSTA  
TRANSITÓRIA DO TPC"**

**CÉLIO ANÉSIO DA SILVA**

**TESE APROVADA EM 29/05/2014**

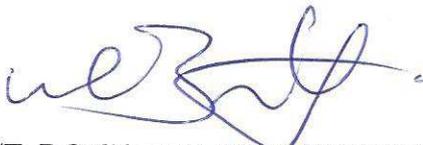
  
**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Orientador(a)

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

  
**ARTURO SUMAN BRETAS, Ph.D., UFRGS**  
Examinador(a)

**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)

  
**WALLACE DO COUTO BOAVENTURA, D.Sc., UFMG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Aos meus pais, Severino e Socorro, e ao meu irmão, Alex, que souberam respeitar minha escolha pela busca desse sonho, DEDICO.*

*À minha esposa, Ildênia, pela compreensão, OFEREÇO.*

*Élio Inácio da Silva*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus acima de tudo e de todos por sempre estar presente, dando-me forças para vencer os desafios e abençoando-me em cada fase da vida.

Aos meus pais Severino e Socorro pelo inesgotável amor, carinho, compreensão e dedicação.

Aos professores Damásio Fernandes e Washington Neves pela amizade, pela orientação e pelos ensinamentos dignos de verdadeiros facilitadores desde a minha graduação.

Aos amigos Eubis, Felipe, Paulo e Rômulo pelo companheirismo e contribuições no decorrer deste trabalho de doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI) pelo aporte financeiro deste trabalho.

Aos meus amigos Nelson, Wilker, Michelle, Daphne, Francisco, Ana vitória e Yonatha pela colaboração e disposição de sempre ajudar.

Aos meus amigos James “*in memoriam*”, Severina “*in memoriam*”, Cláudio, Vicente, Valdir, Isabel e Vanuska por todo incentivo e amizade.

Aos professores do DEE, pelas contribuições ao longo da minha formação.

Aos funcionários do DEE, Adail, Francisco, Eduardo, Simone, Selma, Suênia, Ângela e Pedro.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições que vieram no intuito de enriquecer esta pesquisa.

*Célio Américo da Silva*

# Resumo

Um novo método de obtenção de parâmetros de filtros digitais recursivos (FDR) é apresentado para reduzir o impacto da resposta transitória dos Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC) sobre o desempenho dos sistemas de medição, proteção e controle. Assumindo uma topologia predefinida, os parâmetros dos filtros são obtidos a partir da resposta em frequência do TPC de interesse. Diferentemente das técnicas reportadas na literatura, o método se aplica com facilidade a TPC de diferentes classes de tensão e independe das características operacionais do sistema. Para tanto, faz-se necessário conhecer a resposta em frequência do TPC em questão, no espectro de frequência de interesse. A validação do método é realizada através de simulações digitais em tempo real via simulador RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*). As análises são baseadas em dados de sistemas elétricos reais e no funcionamento dinâmico dos filtros através da estimação dos fasores das tensões e estudos de localização de falta. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a presença dos FDR reduz significativamente os erros de medição causados pelos TPC quando submetidos a condições transitórias. Portanto, os FDR surgem como uma forma simples e de baixo custo para melhorar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de medição, proteção e controle.

Palavras-chave – Transformador de potencial capacitivo; filtros digitais recursivos; simulações em tempo real; transitórios eletromagnéticos.

# Abstract

A new method for obtaining recursive digital filter (FDR) parameters is presented in order to reduce the impact of Coupling Capacitor Voltage Transformer (CCVT) transient response on the performance of the measurement, protection and control systems. Assuming a pre-defined topology, the filter parameters are obtained from the CCVT frequency response of interest. Unlike the techniques reported in the literature, the method applies easily to CCVT of different voltage classes and it does not depend on the operating characteristics of the system, therefore, it is necessary to know the frequency response of the CCVT on the frequency spectrum of interest. The method is validated is through digital simulation using the RTDS<sup>TM</sup> (Real Time Digital Simulator). The analyzes are based on data obtained from electrical systems in service and on the dynamic performance of the filters by estimating the phasors of voltages and fault location studies. It is shown that the presence of FDR significantly reduces measurement errors caused by CCVT when subjected to transient conditions, therefore, the FDR arises as a simple and low cost alternative to improve the performance and reliability of measurement systems, protection and control.

Keywords – Coupling capacitor voltage transformer; recursive digital filter; real time simulations; electromagnetic transients.

# Sumário

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>Glossário</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>Lista de Símbolos</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1. Introdução</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivação do Trabalho .....                                       | 2           |
| 1.2 Objetivos da Tese .....   | 3           |
| 1.3 Contribuições da Tese .....                                       | 3           |
| 1.4 Organização da Tese .....   | 6           |
| <b>2. Fundamentação Teórica</b>                                       | <b>7</b>    |
| 2.1 Transformadores de Potencial .....                                | 7           |
| 2.2 Histórico dos Transformadores de Potencial Capacitivos .....      | 8           |
| 2.3 Elementos dos Transformadores de Potencial Capacitivos .....      | 9           |
| 2.4 Modelo de TPC para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos ..... | 10          |
| <b>3. Revisão Bibliográfica</b>                                       | <b>12</b>   |
| 3.1 SIGUERDIDJANE <i>et al.</i> [1997] .....                          | 12          |
| 3.2 IZYKOWSKI <i>et al.</i> [1998] .....                              | 13          |
| 3.3 SAHA <i>et al.</i> [2001] .....                                   | 13          |
| 3.4 ZADEH [2004] .....  | 14          |
| 3.5 ZADEH & LI [2007] .....   | 14          |
| 3.6 PAJUELO <i>et al.</i> [2009] .....                                | 15          |
| 3.7 MACHADO [2009] .....  | 15          |
| 3.8 SILVA [2010] .....  | 16          |
| 3.9 SANTOS [2011] .....   | 16          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.10      | MACHADO [2013] .....                                    | 17        |
| 3.11      | Sinopse Bibliográfica .....                             | 17        |
| <b>4.</b> | <b>Método Proposto</b>                                  | <b>19</b> |
| 4.1       | Fundamentação do Método .....                           | 20        |
| 4.2       | Estudo de Caso 01: FDR para o TPC de 230 kV .....       | 25        |
| 4.3       | Estudo de Caso 02: FDR para o TPC de 500 kV .....       | 29        |
| <b>5.</b> | <b>Resultados e Análises</b>                            | <b>33</b> |
| 5.1       | Análise de Proteção de Distância .....                  | 34        |
| 5.1.1     | Representação do Relé de Distância .....                | 34        |
| 5.1.2     | Sistema Elétrico de 230 kV Adotado .....                | 35        |
| 5.1.3     | Sistema Elétrico de 500 kV Adotado .....                | 36        |
| 5.1.4     | Resultados para Análises de Proteção de Distância ..... | 37        |
| 5.2       | Análise de Localização de Falta .....                   | 43        |
| 5.3       | Resultados para Análises de Medição .....               | 53        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusões</b>                                       | <b>57</b> |
|           | <b>Referências Bibliográficas</b>                       | <b>60</b> |

# Lista de Figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | (a) Esquema de um transformador de potencial do tipo indutivo;<br>(b) Esquema de um transformador de potencial do tipo capacitivo<br>[Carvalho Jr., 2008] ..... | 8  |
| 2.2 | Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz .....   | 9  |
| 2.3 | Modelo geral do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos .....   | 10 |
| 2.4 | Modelo do TPC adotado para estimação dos seus parâmetros lineares .....   | 11 |
| 4.1 | Modelo do TPC adotado para estudos de transitórios eletromagnéticos<br>[FERNANDES Jr., 2003] .....  | 20 |
| 4.2 | Resposta em frequência da função que ditará a dinâmica dos FDR:<br>(a) Amplitude; (b) Fase .....  | 23 |
| 4.3 | Curvas da relação de tensão do TPC de 230 kV [FERNANDES Jr., 2003]:<br>(a) Ganho; (b) Fase .....  | 26 |
| 4.4 | Curvas da relação de tensão ajustada e medida para o TPC de 230 kV:<br>(a) Ganho; (b) Fase .....  | 26 |
| 4.5 | Resposta em frequência do TPC de 230 kV, do filtro projetado e do<br>conjunto TPC mais FDR: (a) Ganho; (b) Fase .....   | 28 |
| 4.6 | Modelo de TPC de 500 kV proposto por PAJUELO <i>et al.</i> [2009] .....   | 29 |
| 4.7 | Curvas da relação de tensão do TPC de 500 kV [PAJUELO <i>et al.</i> , 2009]:<br>(a) Ganho; (b) Fase .....   | 29 |
| 4.8 | Curvas da relação de tensão ajustada e medida para o TPC de 500 kV:<br>(a) Ganho; (b) Fase .....  | 30 |
| 4.9 | Resposta em frequência do TPC de 500 kV, do filtro projetado e do<br>conjunto TPC mais FDR: (a) Ganho; (b) Fase .....   | 32 |
| 5.1 | Arquitetura básica de um relé microprocessado .....   | 34 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.2  | Sistema elétrico de 230 kV adotado para avaliar o funcionamento do relé de distância modelado .....  | 36 |
| 5.3  | Sistema elétrico de 500 kV adotado para avaliar o funcionamento do relé de distância modelado .....  | 37 |
| 5.4  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão:<br>(a) Formas de onda da tensão primária e tensão secundária do TPC de 230 kV; (b) Formas de onda da tensão primária e tensão secundária filtrada pelo FDR ..... | 38 |
| 5.5  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão:<br>(a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....                         | 39 |
| 5.6  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão:<br>(a) Formas de onda das tensões primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Formas de onda das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....           | 39 |
| 5.7  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão:<br>(a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....                         | 40 |
| 5.8  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão:<br>(a) Formas de onda das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Formas de onda das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....           | 41 |
| 5.9  | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão:<br>(a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....                         | 41 |
| 5.10 | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão:<br>(a) Formas de onda das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Formas de onda das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....           | 42 |
| 5.11 | Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão:<br>(a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR .....                         | 42 |
| 5.12 | Sistema elétrico de 230 kV adotado para avaliar o estudo de localização de falta .....   | 44 |
| 5.13 | Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....  | 45 |
| 5.14 | Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....  | 46 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.15 | Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora ..... | 46 |
| 5.16 | Registro de simulação de falta ABCT: (a) Comportamento das variáveis $d_P$ , $d_S$ e $d_C$ ; (b) Detalhe .....  | 47 |
| 5.17 | Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 46 |
| 5.18 | Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 48 |
| 5.19 | Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 48 |
| 5.20 | Registro de simulação de falta AT: (a) Comportamento das variáveis $d_P$ , $d_S$ e $d_C$ ; (b) Detalhe .....  | 49 |
| 5.21 | Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 49 |
| 5.22 | Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 50 |
| 5.23 | Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 50 |
| 5.24 | Registro de simulação de falta BT: (a) Comportamento das variáveis $d_P$ , $d_S$ e $d_C$ ; (b) Detalhe .....  | 51 |
| 5.25 | Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 51 |
| 5.26 | Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 52 |
| 5.27 | Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora .....   | 52 |
| 5.28 | Registro de simulação de falta CT: (a) Comportamento das variáveis $d_P$ , $d_S$ e $d_C$ ; (b) Detalhe .....  | 53 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.29 | Simulação de extinção de falta, sistema de 230 kV: (a) $V_P$ e $V_S$ ; (b) $V_P$ e $V_C$                  | 54 |
| 5.30 | Detalhe de simulação de extinção de falta, sistema de 230 kV: (a) $V_P$ e $V_S$ ; (b) $V_P$ e $V_C$ ..... | 54 |
| 5.31 | Simulação de extinção de falta, sistema de 500 kV: (a) $V_P$ e $V_S$ ; (b) $V_P$ e $V_C$                  | 55 |
| 5.32 | Detalhe de simulação de extinção de falta, sistema de 500 kV: (a) $V_P$ e $V_S$ ; (b) $V_P$ e $V_C$ ..... | 55 |

# Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Sinopse da revisão bibliográfica .....  | 18 |
| 4.1 | Parâmetros da função de transferência que ditará o comportamento dinâmico de um TPC ideal .....                                       | 23 |
| 4.2 | Coefficientes da função de transferência do TPC de 230 kV após o processo de ajuste .....   | 27 |
| 4.3 | Zeros e pólos da planta do filtro analógico para redução do impacto da resposta transitória do TPC de 230 kV .....                    | 27 |
| 4.4 | Coefficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 230 kV ..... | 28 |
| 4.5 | Coefficientes da função de transferência do TPC de 500 kV após o processo de ajuste .....   | 30 |
| 4.6 | Zeros e pólos da planta do filtro analógico para redução do impacto da resposta transitória do TPC de 500 kV .....                    | 31 |
| 4.7 | Coefficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 500 kV ..... | 32 |
| 5.1 | Dados do modelo do sistema elétrico 230 kV adotado para realizar as simulações .....  | 36 |
| 5.2 | Dados do modelo do sistema elétrico de 500 kV adotado para realizar as simulações .....   | 37 |
| 5.3 | Erro médio calculado para o sistema elétrico de 230 kV .....  | 40 |
| 5.4 | Erro médio calculado para o sistema elétrico de 500 kV .....  | 43 |

# Glossário

|               |  |
|---------------|--|
| <b>ATP</b>    | <i>Alternative Transients Program.</i>                                 |
| <b>CBA</b>    | Congresso Brasileiro de Automática.                                    |
| <b>CPU</b>    | <i>Central Processing Unit.</i>  |
| <b>DSP</b>    | <i>Digital Signal Processor.</i>                                       |
| <b>EMTP</b>   | <i>Electromagnetic Transients Program.</i>                             |
| <b>FDR</b>    | <i>Filtro Digital Recursivo.</i>                                       |
| <b>IED</b>    | <i>Intelligent Electronic Device.</i>                                  |
| <b>IPST</b>   | <i>International Conference on Power Systems Transients.</i>           |
| <b>RNA</b>    | Redes Neurais Artificiais.   |
| <b>RTC</b>    | Relação de Transformação de Corrente.                                  |
| <b>RSCAD™</b> | Software usado para criar circuitos que irão ser simulados pelo RTDS™. |
| <b>RTDS™</b>  | <i>Real Time Digital Simulator.</i>                                    |
| <b>RTP</b>    | Relação de Transformação de Potencial.                                 |
| <b>SBA</b>    | Sociedade Brasileira de Automática.                                    |
| <b>SBSE</b>   | Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.                             |
| <b>SIR</b>    | <i>System Impedance Ratio.</i>   |
| <b>TC</b>     | Transformador de Corrente.   |
| <b>THD</b>    | <i>Total Harmonic Distortion</i>                                       |
| <b>TP</b>     | Transformador de Potencial.  |
| <b>TPC</b>    | Transformador de Potencial Capacitivo.                                 |
| <b>TPI</b>    | Transformador de Potencial Indutivo.                                   |
| <b>UFCG</b>   | Universidade Federal de Campina Grande.                                |

# Lista de Símbolos

## Parâmetros do Modelo Geral do TPC

|          |   |
|----------|---|
| $C_1$    | Capacitância superior do divisor capacitivo.                |
| $C_2$    | Capacitância inferior do divisor capacitivo.                |
| $C_c$    | Capacitância parasita do reator de compensação.             |
| $C_f$    | Capacitância do circuito supressor de ferroressonância.     |
| $C_p$    | Capacitância parasita do enrolamento primário do TPI.       |
| $L_c$    | Indutância do reator de compensação.                        |
| $L_{f1}$ | Indutância do circuito supressor de ferroressonância.       |
| $L_{f2}$ | Indutância do circuito supressor de ferroressonância.       |
| $L_m$    | Indutância de magnetização do TPI.                          |
| $L_p$    | Indutância de dispersão do enrolamento primário do TPI.     |
| $L_s$    | Indutância de dispersão do enrolamento secundário do TPI.   |
| $M$      | Indutância mútua do circuito supressor de ferroressonância. |
| $R_c$    | Resistência série do reator de compensação.                 |
| $R_f$    | Resistência do circuito supressor de ferroressonância.      |
| $R_m$    | Resistência do ramo de magnetização do TPI.                 |
| $R_p$    | Resistência do enrolamento primário do TPI.                 |
| $R_s$    | Resistência do enrolamento secundário do TPI.               |
| $Z_b$    | Carga do terminal secundário do TPC.                        |

## Funções de Transferência

|                   |  |
|-------------------|--|
| $G_{FDR}(s)$      | Função de transferência do filtro analógico.         |
| $G_{FDR}(z)$      | Função de transferência do filtro digital recursivo. |
| $H_{TPC}(s)$      | Função de transferência do TPC na forma analógica.   |
| $\varphi(s)^{-1}$ | Função que dita a dinâmica de um TPC ideal.          |

### **Coefficientes das Funções de Transferências**

- $k_o$  Coeficiente de escalamento do filtro digital recursivo.  
 $k_{ij}$   $j$ -ésimo coeficiente da  $i$ -ésima seção do filtro digital recursivo.

### **Sinais de Tensão do TPC**

- $V$  Tensão que alimenta o enrolamento primário do TPI.  
 $V_P$  Tensão primária do TPC.  
 $V_S$  Tensão secundária do TPC.  
 $V_C$  Tensão secundária do TPC filtrada.

### **Parâmetros Associados as Análises de Localização de Falhas**

- $\hat{V}_E$  Fasor de tensão na barra emissora.  
 $\hat{V}_R$  Fasor de tensão na barra receptora.  
 $\hat{I}_E$  Fasor de corrente na barra emissora.  
 $\hat{I}_R$  Fasor de corrente na barra receptora.  
 $Z_C$  Impedância característica da linha de transmissão.  
 $\gamma$  Constante de propagação da linha de transmissão.  
 $L$  Comprimento da linha de transmissão.  
 $r$  Resistência série da linha de transmissão.  
 $l$  Indutância série da linha de transmissão.  
 $g$  Condutância *shunt* da linha de transmissão.  
 $c$  Capacitância *shunt* da linha de transmissão.  
 $\omega$  Frequência angular nominal do sistema.  
 $d$  Distância de localização da falta.  
 $d_P$  Distância de localização da falta calculada a partir da tensão primária.  
 $d_S$  Distância de localização da falta calculada a partir da tensão secundária.  
 $d_C$  Distância de localização da falta calculada a partir da tensão secundária filtrada.

# Capítulo 1

## Introdução

A crescente demanda por energia requerida pelos grandes centros de carga tem exigido cada vez mais o empenho de pesquisadores para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para geração, transmissão e distribuição de energia. Desta forma, empresas do setor elétrico têm gradativamente modernizado suas subestações fazendo uso de dispositivos microprocessados, com destaque para os relés de proteção digital.

Os relés de proteção são projetados para atuar quando condições anormais ocorrem no sistema de potência – condições de sobrecarga, curtos-circuitos e perda de sincronismo. Desta forma, pesquisadores têm concentrado esforços para elaborar esquemas de proteção desenvolvidos para detectar essas diversas condições, usando técnicas e experiências adquiridas pela operação do sistema, objetivando ter sistemas cada vez menos vulneráveis a desligamentos impróprios.

Os esquemas de proteção dos sistemas elétricos de potência são geralmente constituídos de componentes distintos tais como relés de sobrecorrente, relés de distância, relés auxiliares e relés de religamento. Para que se tenha um esquema completo e funcional é necessário que todos os equipamentos estejam conectados entre si, resultando assim num oneroso custo para elaboração de projeto, execução das instalações e implantação de medidas preventivas de manutenção, requerendo um significativo investimento em tempo, dinheiro e potencial humano. Alternativamente, os relés microprocessados, também chamados de relés digitais, oferecem vantagens sobre os esquemas que utilizam componentes distintos, com destaque para: esquema total com dimensões físicas reduzidas, ocupando menor espaço no painel;

número de componentes reduzido; projeto e a fiação são mais simples e a implementação é menos dispendiosa; e testes de instalação e manutenção podem ser consideravelmente reduzidos.

No presente contexto, os relés microprocessados estão cada vez mais presentes nos sistemas elétricos de potência de empresas que trabalham com geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Atualmente, esse tipo de relé tem sido denominado IED, do inglês *Intelligent Electronic Device*. Os IED apresentam algumas vantagens, tais como flexibilidade na implementação de algoritmos de proteção, flexibilidade funcional, implementação de rotinas de detecção, classificação e localização de falta entre outras; contribuindo assim para o bom funcionamento da operação e controle dos sistemas de energia elétrica.

Os sistemas de transmissão de energia com tensões acima de 138 kV fazem uso de transformadores de potencial capacitivos (TPC) para reduzir o nível de tensão a valores em que os relés são designados para operar. Devido aos elevados níveis de tensão, esses sistemas requerem atuações rápidas e seguras do sistema de proteção. Assim, estudos relacionados aos meios de reduzir o tempo de atuação e aumentar confiabilidade, seletividade e velocidade do sistema de proteção são de extrema importância para o setor elétrico.

Idealmente, as tensões aplicadas aos relés deviam ser uma réplica fiel da tensão aplicada ao primário do TPC. Contudo, capacitores, indutores e elementos não-lineares do TPC fazem com que o sinal secundário não siga a tensão primária quando esta entra em colapso. Tal fenômeno se deve ao fato de que o fluxo magnético nos indutores e o campo elétrico dos capacitores não podem variar instantaneamente. Dessa forma, durante uma mudança abrupta da tensão primária, a energia armazenada nos capacitores e indutores proporciona transitórios severos que possuem amplitude e duração significantes que afetam o desempenho dos relés de proteção [KASZTENNY *et al.*, 2000].

A busca por metodologias que permitam amenizar o impacto de tais fenômenos sobre os relés é alvo de pesquisas na comunidade científica.

## 1.1 Motivação do Trabalho

Os TPC através dos seus terminais secundários fornecem informações do sinal de tensão dos sistemas elétricos de potência para equipamentos de controle, proteção e medição. Falhas destes equipamentos podem causar saídas intempestivas de linhas de transmissão que resultam em penalidades severas impostas pelos órgãos reguladores do setor elétrico.

Este fato requer agilidade da manutenção para recompor o sistema elétrico no menor tempo possível, bem como medidas preventivas no sentido de reduzir os desligamentos não programados.

Diversos são os relatos de empresas nacionais e internacionais sobre falhas de TPC que levaram a saídas intempestivas de linhas de transmissão, além de queima de equipamentos auxiliares de baixa tensão e danos irreparáveis a alguns TPC.

A necessidade de continuidade das várias pesquisas reportadas na literatura direcionando a estratégia de correção da tensão secundária de TPC para aplicações de rotina em subestações que operam com tensões de 230 e 500 kV fomentaram este trabalho tese.

## 1.2 Objetivos da Tese

Esta tese tem por objetivo contribuir com o estado da arte dos TPC, em específico para área de transitórios eletromagnéticos. Como objetivos específicos, destacam-se:

- Avaliar o estado da arte das técnicas propostas para correção da tensão secundária dos TPC;
- Descrever o método proposto para o projeto de FDR que reduzam o impacto da resposta transitória dos TPC, apresentado dois estudos de casos, um para operar em sistemas de 230 kV e outro para 500 kV;
- Submeter os FDR de 230 e 500 kV a testes de diferentes condições de faltas;
- Avaliar o funcionamento do método proposto diante de estudos de localização de faltas;
- Verificar a possível aplicação dos FDR para possível monitoramento de harmônicos em sistemas elétricos de potência.

## 1.3 Contribuições da Tese

Na tese é proposto um novo método para projetos de filtros digitais recursivos (FDR) capazes de realizar a correção da tensão secundária de TPC com topologias diferentes, 230 e 500 kV, substituindo, desta forma, o uso de diversas técnicas propostas na literatura, para reduzir o impacto da resposta transitória dos TPC. A técnica dispensa o conhecimento prévio dos parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do modelo de TPC analisado, assim como, independe da topologia interna do equipamento. Nos estudos apresentados evidencia-se que o método proposto tem ampla aplicabilidade podendo ser utilizado tanto para estudos de transitórios eletromagnéticos como estudos de regime permanente.

Diversos trabalhos encontrados na literatura apontam os TPC como equipamentos causadores de erros durante as medições de tensão para estimação de fasores, quando operando em regime transitório, [PAJUELO *et al.*, 2009] e [KASZTENNY *et al.*, 2000]. Neste cenário, os FDR surgem como uma alternativa eficaz e de custo reduzido capaz de realizar a correção da tensão secundária de TPC com topologias diferentes. Para a citada finalidade, os FDR são projetados para serem implementados dentro da unidade de processamento dos relé digitais.

O método proposto foi avaliado a partir de simulações em tempo real, usando o RTDS™ (*Real Time Digital Simulator*), considerando diferentes condições de faltas para estudos de proteção de distância e localização de faltas em sistemas de 230 e 500 kV. Além desses, foram realizados estudos de casos para o monitoramento de harmônicos considerando sistemas de 230 e 500 kV.

Referente à divulgação dos resultados preliminares da pesquisa, listam-se as seguintes publicações:

Artigo publicado em periódico:

1. **SILVA, C. A.**; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Coupling Capacitor Voltage Transformer: A Device to Correct Its Secondary Voltage in Real Time. *Brazilian Society for Automatics - SBA: Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, p. 339-348, 2 April 2013. DOI: 10.1007/s40313-013-0014-5

Artigos publicados em anais de conferências nacionais e internacionais:

1. **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.
2. BAINY, R. G.; SOUZA, J. F.; LOPES, F. V.; OTTO, R. B.; PESENTE, J. R.; **SILVA, C. A.** Compensação da Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos em Dinâmica em Dispositivo Digital de Sinal (DSP) para Estudos Elétricos na Usina Hidrelétrica de Itaipu. *XV Encontro Regional Iberoamericano do Cigré-ERAC*, Porto Iguazu-Brasil, maio 2013.
3. MACHADO, E. P.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; **SILVA, C. A.**; GODOY, M. V. Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de

- Potencial Capacitivos. *XIII Encontro Regional Iberoamericano do Cigré-ERAC*, Puerto Iguacu-Argentina, maio 2009.
4. SILVA, K. M.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; FERNANDES Jr. D.; NEVES, W. L. A.; COUTINHO, P. R. L. N.; 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 Distância. *XIX Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2012*, Campina Grande - PB, setembro 2012.
  5. SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Um Dispositivo para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Aplicação em Tempo Real. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2010*, Bonito-MS, setembro 2010.
  6. SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; BAINY, R. G.; PESENTE, J. R.; OTTO, R. B. Um Método para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Validação em Tempo Real. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, maio 2012.
  7. LOPES, F. V.; SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; CARDOSO, L. F.; PESENTE, J. R.; OTTO, R. B. Redução de Erros na Estimação Fasorial de Tensão via Correção dos Sinais Secundários de Transformadores de Potencial Capacitivos. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, maio 2012.
  8. BAINY, R. G.; CARDOSO, L. C.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; Pesente, J. R.; OTTO, R. B. Influência de Modelos de Transformadores de Potencial Capacitivo Sobre a Estimação de Fasores de Tensão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, maio 2012.
  9. SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Um Filtro Digital Recursivo para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Uma Abordagem em Tempo Real. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010*, Belém-PA, maio 2010.

Artigos aceito para publicação em conferência nacional:

1. **SILVA, C. A.**; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A. Redução do Impacto da Resposta Transitória de TPCs via Filtros Digitais Recursivos. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014*, Foz do Iguaçu-PR, abril 2014.
2. LOPES, F. V.; BAINY, R. G.; **SILVA, C. A.**; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A. Benefícios da Correção da Tensão Secundária de TPCs sobre a Localização de Falta Baseada em Componentes Fundamentais. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014*, Foz do Iguaçu-PR, abril 2014.

## 1.4 Organização da Tese

Além deste capítulo introdutório, esta tese está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido no qual são abordados os conceitos fundamentais sobre os transformadores de potencial, especificamente os do tipo capacitivos. O capítulo ainda contempla o resumo histórico, a funcionalidade de cada um dos elementos que constituem o modelo de TPC adotado e a modelagem do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos;
- No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica dos métodos mais relevantes propostos para redução do impacto da resposta transitória dos TPC. As principais contribuições e limitações dos trabalhos encontrados na literatura são destacadas;
- No Capítulo 4, apresenta-se o método proposto para projetar filtros digitais recursivos (FDR) para reduzir os impactos da resposta transitória dos TPC, se caracterizando como a contribuição desta tese. Como estudo de caso, destaca-se os projetos de FDR para TPC de 230 e 500 kV reportados na literatura;
- No Capítulo 5, analisa-se o funcionamento dos FDR quando operando em conjunto com os TPC de 230 e 500 kV. Baseado nos fasores das tensões, resultados obtidos através de simulações de diferentes condições de faltas são apresentados. A influência dos FDR para estudos de localização de falta, baseado no método de dois terminais, também é analisado. Por fim, apresenta-se estudos de caso para os FDR quando utilizados para aplicações de medição – monitoramento de harmônicos. Todos os estudos foram realizados através do do RTDS<sup>TM</sup>, um equipamento versátil que permite realizar simulações de sistemas elétricos em tempo real, fazendo com que os resultados obtidos sejam mais realísticos;
- Por fim, as conclusões da tese são apresentadas no Capítulo 6.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Este capítulo destina-se a apresentação de conceitos fundamentais sobre os transformadores de potencial, especificamente sobre os do tipo capacitivos, contemplando o resumo histórico, a funcionalidade de cada um dos elementos que o constituem e a sua modelagem para estudos de transitórios eletromagnéticos.

### 2.1 Transformadores de Potencial

Os tipos de transformadores de potencial mais utilizados são: os transformadores de potencial do tipo indutivo (TPI); os transformadores de potencial do tipo capacitivo (TPC); os transformadores de potencial do tipo resistivos (TPR); e os transformadores de potencial do tipo misto.

Os TPR e transformadores de potencial do tipo mistos têm aplicações restritas em laboratórios para medição de impulsos ou tensão contínua. Já os TPI têm sua utilização quando as tensões são compreendidas entre 600 V e 69 kV. Para tensões compreendidas entre 69 kV e 138 kV não existe preferência na utilização, porém em sistemas onde se utiliza PLC (*Power Line Carrier*) a utilização dos TPC torna-se necessária. Para tensões superiores a 138 kV os TPC são dominantes por apresentarem custo de produção inferior aos TPI. Na Figura 2.1 mostra-se esquematicamente como são constituídos os TPI e TPC.

Atualmente os TPC são usados em sistemas de potência com bastante sucesso, como uma forma conveniente e econômica de transformar tensões de transmissão em tensões suportáveis pelos instrumentos de controle, medição e proteção.

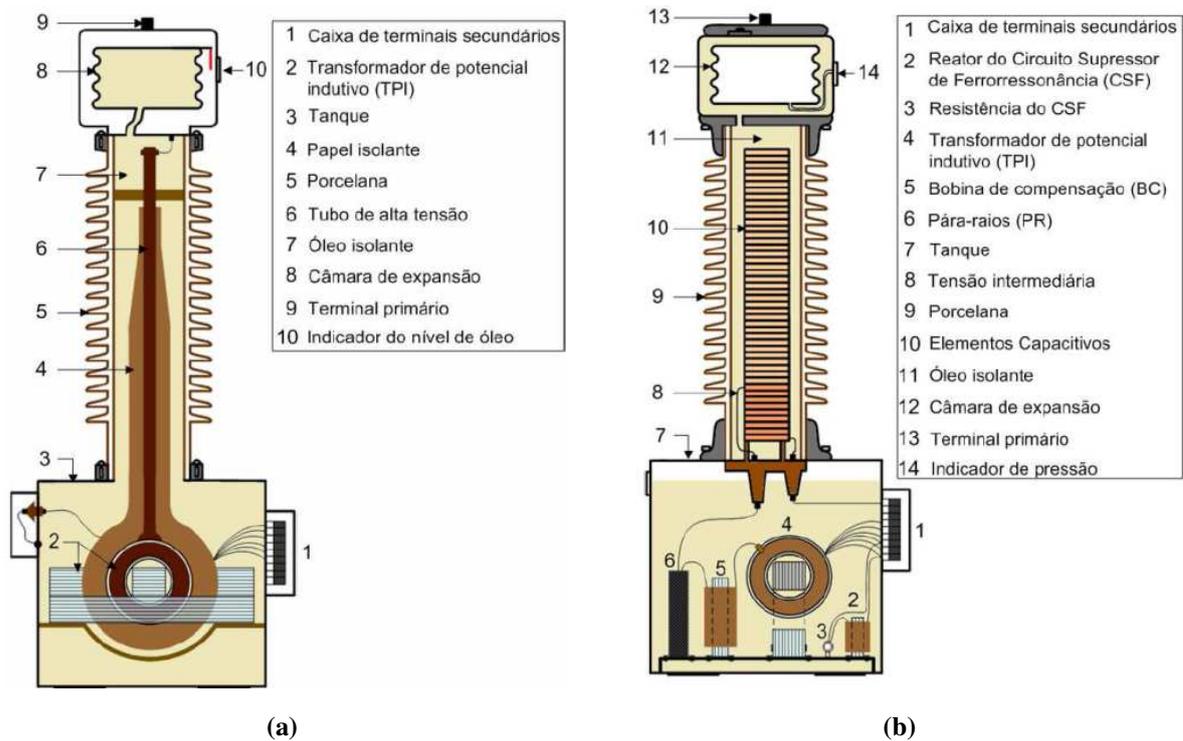


Figura 2.1 – (a) Esquema de um transformador de potencial do tipo indutivo; (b) Esquema de um transformador de potencial do tipo capacitivo [Carvalho Jr., 2008].

## 2.2 Histórico dos Transformadores de Potencial Capacitivos

Na década de 30, os equipamentos utilizados em sistemas de potência para alimentar instrumentos indicadores e dispositivos de proteção eram os divisores de potencial capacitivos. Entretanto, esses equipamentos apresentavam a inconveniência da limitação de potência para a carga a ser alimentada [SWEETANA & FLUGUM, 1966]. Posteriormente, passou-se a utilizar os divisores capacitivos acoplados a um transformador com o propósito de aumentar a gama de cargas possíveis de serem alimentadas.

Embora a inclusão do transformador tenha permitido a elevação da tensão intermediária do divisor, existia restrição do equipamento para medição em virtude de ainda não apresentar o ajuste necessário para reduzir significativamente o efeito da coluna capacitiva. Esse problema só foi resolvido com o advento da transmissão de grandes quantidades de energia elétrica em níveis de tensão superiores a 138 kV, estimulando os fabricantes a produzirem TPC para medição, o que foi conseguido a partir de mudanças internas ao equipamento, de forma a garantir que a tensão secundária fosse uma réplica fiel da tensão primária [SWEETANA & FLUGUM, 1966].

Essa alteração permitiu a utilização dos TPC ao invés dos transformadores de potencial do tipo indutivo (TPI) em sistemas de potência que operam em níveis de tensão iguais ou superiores a 138 kV, pois a partir deste nível de tensão a utilização dos TPI torna-se pouco viável devido ao seu alto custo e suas grandes dimensões [SWEETANA & FLUGUM, 1966; D'AJUZ *et al.*, 1985].

### 2.3 Elementos dos Transformadores de Potencial Capacitivos

O esquema elétrico básico de um TPC típico a 60 Hz é mostrado na Figura 2.2. De acordo com a figura, o primário é constituído por dois conjuntos de elementos capacitivos,  $C_1$  e  $C_2$ , ligados em série, havendo uma derivação intermediária  $b$  correspondente a uma tensão  $V$  que alimenta o enrolamento primário de um TPI, o qual fornecerá uma tensão secundária  $V_s$  aos instrumentos de medição e proteção ali inseridos.

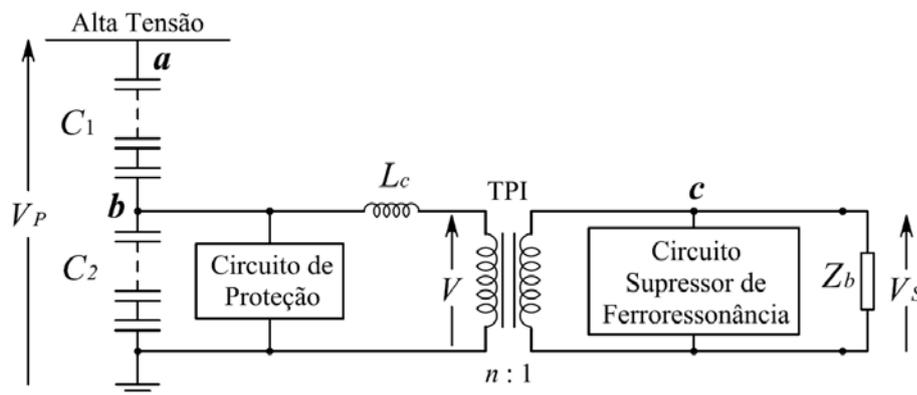


Figura 2.2 - Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz.

Um reator de compensação ( $L_c$ ) é projetado e construído pelo fabricante para controlar a defasagem no divisor capacitivo. Esse reator ajustável é colocado em série com o primário do TPI, de modo que o conjunto tenha uma reatância  $\omega.L_c$  que satisfaça a igualdade a seguir.

$$\omega.L_c = \frac{1}{\omega.(C_1 + C_2)} \quad (2.1)$$

Sob certas condições, como por exemplo, em um religamento sem sucesso de uma linha de transmissão, ou logo após a eliminação de um curto-circuito no secundário de um TPC, poderão surgir sobretensões no capacitor  $C_2$  bem como oscilações de baixas frequências ( $1/3$ ,  $1/5$ ,  $1/7$  da frequência fundamental) que podem ocasionar o fenômeno da ferroressonância. Esse fenômeno é, basicamente, a ressonância das capacitâncias do circuito com algum valor particular de indutância não-linear dos elementos que contêm núcleo ferromagnético.

O fenômeno da ferroressonância não pode ser tolerado em um TPC, uma vez que informações falsas poderiam ser transferidas aos instrumentos de medição, proteção ou controle, assim como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas. Para amenizar esse tipo de problema, normalmente é colocado um circuito supressor de ferroressonância (CSF) em um dos enrolamentos do TPI, geralmente no enrolamento secundário. Existem vários tipos de configurações para os CSF, as quais são classificadas em passivas ou ativas. Denomina-se CSF passivo quando este for constituído de resistores, capacitores ou indutores e, é dito CSF ativo, quando este possuir dispositivos semicondutores.

O comportamento em regime permanente dos TPC é bastante conhecido e reportado na literatura. Entretanto, o comportamento desses equipamentos quando submetidos a condições transitórias necessitam de maiores investigações.

#### 2.4 Modelo de TPC para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

Um modelo de TPC aplicável para estudos de transitórios eletromagnéticos precisa levar em consideração as capacitâncias parasitas entre os enrolamentos e as capacitâncias parasitas entre cada enrolamento e a terra [KEZUNOVIC *et al.*, 1992; KOJOVIC *et al.*, 1994; FERNANDES Jr., 2003]. Um modelo geral de TPC operando em frequências entre 10 Hz e 10 kHz pode ser representado conforme a Figura 2.3. Ele consiste basicamente de seis elementos principais: coluna capacitiva ( $C_1$  e  $C_2$ ), reator de compensação ( $R_c$ ,  $L_c$  e  $C_c$ ), circuito de proteção contra sobretensões, TPI ( $R_p$ ,  $L_p$ ,  $C_p$ ,  $C_{ps}$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $C_s$ ,  $R_m$  e  $L_m$ ), CSF ( $R_f$ ,  $L_f$  e  $C_f$ ) e bobina de drenagem ( $L_d$ ). Contudo, uma representação detalhada do TPC exige dados não são disponibilizados pelos fabricantes.

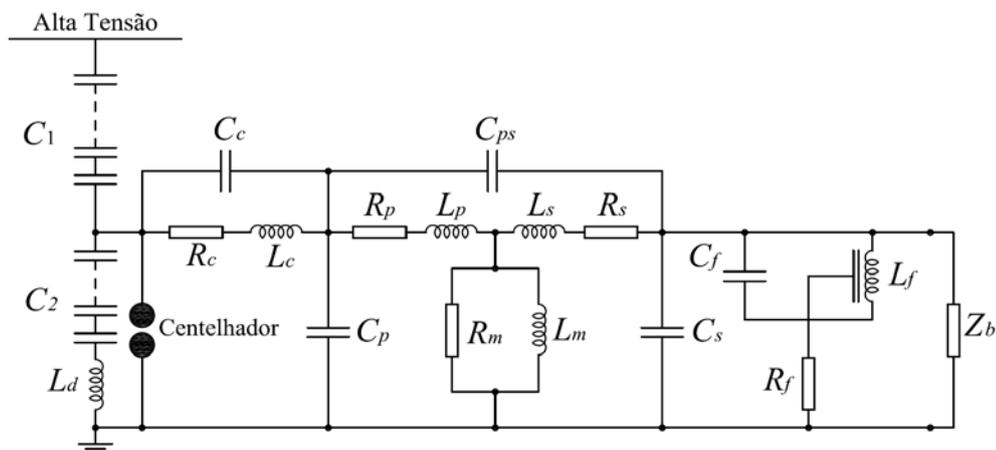
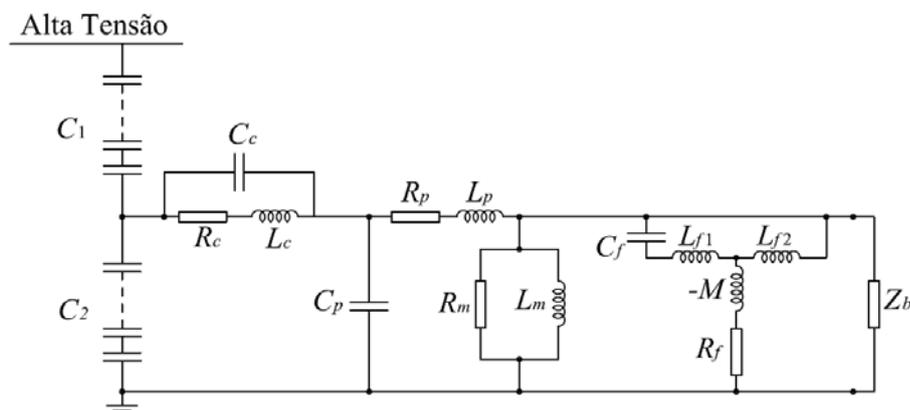


Figura 2.3 - Modelo geral do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo apresentado, KEZUNOVIC *et al.* [1992] e FERNANDES Jr. [1999] realizaram uma análise de sensibilidade num espectro de 10 Hz a 10 kHz para detectar quais parâmetros apresentam maior relevância na resposta em frequência do modelo de TPC. Após as análises de sensibilidade, concluiu-se que  $L_d$ ,  $C_{ps}$ ,  $R_s$ ,  $L_s$  e  $C_s$  não provocam alterações significativas nas curvas de resposta em frequência do TPC analisado, dando indicação de que podem ser suprimidos do modelo sem comprometer os resultados. Desta forma, o circuito equivalente do TPC passou a apresentar apenas os parâmetros mais relevantes acrescido dos elementos limitadores de tensão e dos elementos com núcleo ferromagnético, cuja topologia é mostrada na Figura 2.4. Tal topologia tem sido utilizada com sucesso em estudos de transitórios eletromagnéticos [FERNANDES Jr., 2003; NEVES *et al.*, 2007].



**Figura 2.4 - Modelo do TPC adotado para estudos com frequência de interesse até 10 kHz.**

Em regime permanente quando o TPC opera na frequência nominal a tensão no seu secundário é uma réplica da tensão ao qual seu primário está submetido. Todavia, variações abruptas na tensão primária do TPC podem induzir o sistema de proteção a atuar de forma indevida. Por exemplo, durante a ocorrência de uma falta são geradas formas de ondas transitórias nos terminais secundários do TPC, devido ao armazenamento de energia nos elementos indutivos e capacitivos. Desta forma, tensões transitórias oriundas do TPC podem afetar o tempo de tomada de decisão dos relés, criando sérios riscos para a segurança do sistema de proteção.

No próximo capítulo contempla-se o levantamento do estado da arte referente às publicações mais significativas relacionadas a correção da resposta transitória dos TPC.

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

Diante da nova perspectiva de utilização do computador na proteção de sistemas elétricos de potência, surgiram a partir do início da década de 70 os primeiros algoritmos para estimação de fasores, principalmente voltados para a proteção de distância de linhas de transmissão. Desde então, alguns pesquisadores vêm propondo métodos para obtenção de uma cópia fiel da tensão primária no secundário dos TPC na busca de melhorias na técnica de estimação fasorial utilizado na proteção de distância. Dentre as técnicas utilizadas, observam-se o uso de métodos que dependem do estado inicial da tensão secundária do TPC e métodos que utilizam Redes Neurais Artificiais (RNA) para a tarefa de reconhecimento de formas de onda padrão. A viabilidade desses métodos se deu a partir da década de 90 com o desenvolvimento dos relés microprocessados. Esses relés possuem processadores robustos e rápidos, capazes de calcular inúmeros parâmetros necessários para definir a atuação ou não de um relé.

A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os estudos destinados a redução do impacto da resposta transitória do TPC. As principais contribuições e limitações dos trabalhos encontrados na literatura são destacadas, delineando-se o estado da arte.

### **3.1 SIGUERDIDJANE *et al.* [1997]**

Baseados na análise de sistemas lineares, SIGUERDIDJANE *et al.* [1997] implementaram um filtro digital não recursivo para corrigir os transitórios da tensão secundária de um TPC. A fim de reduzir a complexidade do modelo de TPC e facilitar a inversão de sua função de transferência realizaram simplificações no circuito equivalente. A partir de uma rotina

computacional usando a versão digital da inversa da função de transferência os autores afirmam que obtiveram um filtro digital não recursivo que atenua os transitórios da tensão secundária do modelo de TPC analisado. No estudo de caso verificou-se que a atuação do filtro cessa o transitório do TPC, todavia proporciona um atraso da ordem de um ciclo no sinal enviado para o relé de distância.

### 3.2 IZYKOWSKI *et al.* [1998]

No trabalho de IZYKOWSKI *et al.* [1998] é proposto um algoritmo para compensação dinâmica da tensão secundária do TPC. O algoritmo para compensação é baseado na função de transferência inversa de um modelo de TPC simplificado. Para isso, os autores apresentam um modelo geral de TPC. A partir do modelo adotado, foram realizadas simplificações no modelo a fim de facilitar o projeto do algoritmo de compensação. No circuito equivalente simplificado considera-se apenas o circuito equivalente Thévenin do divisor capacitivo, o reator de compensação e o circuito supressor de ferroressonância, todos referenciados ao secundário do TPI. Segundo os autores, os erros causados pelas simplificações do modelo adotado para o TPC são insignificantes. No entanto, verificam-se algumas limitações, tais como, a utilização de um modelo simplificado de TPC para o projeto do compensador, a falta de uma metodologia para determinar os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do equipamento e a restrição do estudo para frequências menores que 1 kHz.

### 3.3 SAHA *et al.* [2001]

Com intuito de cancelar a dinâmica de um modelo de TPC, SAHA *et al.* [2001] implementaram uma RNA com estrutura multi-camadas recursiva para obter a inversa da função de transferência do TPC. O modelo de TPC adotado contempla a coluna capacitiva, o reator de compensação, o transformador indutivo, o circuito supressor de ferroressonância e a carga secundária. Uma vez que o treinamento da RNA requer dados representativos do fenômeno considerado, os autores representaram um sistema de 400 kV no ATP (*Alternative Transients Program*) e aplicaram alguns tipos de faltas com o intuito de obter um conjunto de respostas associadas ao modelo do TPC. A partir do banco de dados, a RNA foi então treinada para processar o sinal de saída do TPC e propor uma estimativa para a tensão primária. A partir do estudo de caso apresentado, pôde-se observar que a RNA corrigiu o transitório proporcionado pelos elementos armazenadores de energia. Como na maioria das técnicas de inteligência artificial, fez-se necessário um banco de dados para realizar o treinamento da RNA, bem como a escolha de um algoritmo de treinamento da rede.

### 3.4 ZADEH [2004]

ZADEH (2004) faz uso do conceito de RNA para realizar a compensação da tensão secundária de um TPC de 400 kV frente a curto-circuitos em linhas de transmissão. Como na maioria das técnicas de inteligência artificial, é necessária uma base de dados para realizar o treinamento da RNA, a seleção do domínio do problema-solução, a escolha de um algoritmo de treinamento da rede, entre outros parâmetros estruturais. A RNA foi treinada para obter a função de transferência inversa do TPC quando o mesmo estiver diante de curto-circuitos no sistema. A validação da metodologia adotada deu-se a partir de simulações digitais realizadas em um programa do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). A partir dos estudos de caso apresentados, uma réplica da tensão primária foi obtida na saída da RNA, tendo como dados de entrada a tensão secundária distorcida pelo transitório do TPC.

Em resumo, no trabalho de ZADEH [2004] é apresentada uma técnica de compensação dinâmica da tensão secundária do TPC a partir do conceito de RNA. Contudo, o mesmo limita-se a estudos no domínio do tempo e não apresenta uma forma efetiva de se reproduzir a tensão primária quando há outros tipos de distúrbios diferentes dos curto-circuitos analisados.

### 3.5 ZADEH & LI [2007]

O trabalho de ZADEH & LI [2007] surgiu motivado pelas limitações dos trabalhos que fazem uso da função de transferência do TPC para compensar sua tensão secundária. Tais métodos frequentemente envolvem considerações que nem sempre são válidas, a exemplo da mudança da função de transferência a partir da variação da natureza da carga instalada no terminal secundário. Os autores avaliam o impacto da natureza ativa ou passiva do circuito supressor de ferroressonância na operação da proteção de distância e realizam a compensação da tensão secundária a partir da metodologia proposta por ZADEH [2004].

A contribuição do trabalho de ZADEH & LI [2007] é a eficiência da compensação dinâmica da tensão transitória do TPC durante o processo de medição da impedância de sequência positiva, do trecho da linha entre o local da falta e o local de instalação do relé, obtida em função dos valores da tensão e da corrente do sistema. Segundo os autores, a técnica de compensação proposta pode ser implementada em hardware possuindo um processador digital de sinais para aplicações em tempo real. A utilização de uma base de dados que depende do modelo de TPC adotado bem como do sistema avaliado são limitações do trabalho.

### 3.6 PAJUELO *et al.* [2009]

No trabalho de PAJUELO *et al.* [2009] foi proposto um aprimoramento para a técnica dos mínimos quadrados não-recursivo, pois, segundo os autores, o algoritmo tradicional apresenta dificuldades para estimar a componente fundamental da tensão transitória de TPC. A partir de simplificações num modelo de TPC, os autores obtiveram a função de transferência e computaram os pólos associados. Tomando-se a frequência de oscilação e a constante de decaimento de cada pólo, propuseram um modelo matemático para a tensão transitória do TPC. Incorporando esse modelo matemático à técnica dos mínimos quadrados tradicional, os autores obtiveram uma melhoria durante o processo de estimação de fasores. Apesar de a técnica implementada apresentar melhorias sobre a técnica dos mínimos quadrados tradicional, ela está associada a um modelo específico de TPC de 500 kV e requer o conhecimento dos seus parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$ .

### 3.7 MACHADO [2009]

Em MACHADO [2009] é proposta uma metodologia para correção da tensão secundária do TPC. Sendo também apresentado um método para obtenção dos parâmetros do modelo, válido para uma faixa de frequência compreendida entre 10 Hz e 10 kHz. O método proposto utiliza o modelo de TPC proposto por KEZUNOVIC *et al.* [1992], a função de transferência do modelo desenvolvida por FERNANDES Jr. [2003] e um *software* para obtenção dos parâmetros desenvolvido por NEVES *et al.* [2007] - os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do modelo de TPC em análise são obtidos a partir do método de ajuste não linear aplicado ao dados da resposta em frequência do equipamento, técnica dependente do topologia do TPC adotado.

A contribuição do trabalho se dá pela técnica generalizada para a correção da tensão secundária do TPC a fim de obter uma réplica da tensão primária no secundário. Essa técnica é fundamentada na filtragem digital da tensão secundária, adotando a função de transferência inversa do TPC como função base para o projeto de um filtro digital recursivo. Além disso, segundo o autor a técnica é passível de ser implementada em um processador digital de sinais.

A validação do método proposto se dá por meio de simulações digitais dos modelos de TPC em um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, onde são apresentadas as correções da tensão secundária de dois TPC, um de 138 kV e outro de 230 kV. Embora o método possa ser utilizado em aplicações dedicadas, em que se conhece, a priori, o modelo de TPC, a dificuldade na obtenção dos parâmetros do modelo e a existência de várias topologias podem inviabilizar a técnica.

### 3.8 SILVA [2010]

No trabalho de SILVA [2010] é apresentado o protótipo de um dispositivo capaz de realizar a correção da tensão secundária do TPC, denominado compensador. O funcionamento do dispositivo fundamenta-se no uso do modelo de TPC proposto por KEZUNOVIC *et al.* [1992], na inversão da função de transferência do modelo de TPC adotado e em um *software* para obtenção dos parâmetros do TPC desenvolvido em NEVES *et al.* [2007]. O método adotado tem como base a implementação em hardware do filtro digital recursivo proposto em MACHADO [2009], para tanto fez uso de um DSP (*Digital Signal Processor*) para realizar o processamento do sinal da tensão secundária.

A validação da técnica proposta para correção da tensão secundária do TPC foi realizada mediante simulações em tempo real através do simulador RTDS<sup>TM</sup>. Para tanto, o referido trabalho teve o compromisso de apresentar os benefícios que o compensador trará tanto para o sistema de medição como para o sistema de proteção dos sistemas de potência. Como limitação do trabalho destaca-se a falta de robustez do dispositivo para aplicação em campo, justificada pelo mesmo ainda está em fase de protótipo. Além disso, a validação do funcionamento compensador deu-se apenas em simulações, de forma que nenhum dado comprova a eficiência do compensador para aplicação em sistemas reais. A presença de componentes indesejadas, ruído, no sinal corrigido é uma limitação do trabalho.

### 3.9 SANTOS [2011]

No trabalho de SANTOS [2011] sugere-se um compensador para corrigir a tensão secundária de um TPC representado no RTDS<sup>TM</sup>. O projeto do compensador é baseado nos trabalhos de MACHADO [2009] e SILVA [2010]. Os parâmetros do compensador são obtidos a partir de um modelo preciso de TPC, um método para obtenção de seus parâmetros lineares ( $R$ ,  $L$  e  $C$ ) e sua relação de transformação. Segundo a autora, o compensador sugerido permite que a tensão secundária compensada do TPC possa reproduzir a dinâmica da tensão primária, em meio a distúrbios e transitórios eletromagnéticos que ocorrem em sistemas elétricos de potência.

Como resultados são apresentados dados de simulações de faltas, distorções provocadas por componentes harmônicos e um estudo inicial sobre a influência do compensador em algoritmos de estimação fasorial, que validam o funcionamento do compensador na correção da tensão secundária do TPC. Resultados que comprovem maior segurança e velocidade do sistema de proteção a partir da compensação não foram apresentados.

### 3.10 MACHADO [2013]

Um novo método de correção numérica de transitórios de baixa frequência de TPC é apresentado pelo autor. O método proposto é baseado em um filtro digital simples que recupera a forma do sinal primário, cujas frequências estão compreendidas entre 10 e 60 Hz, a partir de amostras da tensão secundária. O método se destaca por não depender diretamente da topologia do transformador nem das características operacionais do sistema protegido.

Como resultados são apresentadas simulações digitais a partir de dados reais do Sistema Interligado Nacional. Como estudo de caso, quatro TPC de diferentes classes de tensão analisados e as simulações comprovam a eficiência do método proposto.

Como limitação do trabalho, verifica-se que o mesmo tem sua aplicação restrita para estudos de proteção, onde o espectro de frequência de interesse é restrito, baseado apenas na componente fundamental.

### 3.11 Sinopse Bibliográfica

A partir das técnicas utilizadas para redução do impacto da resposta transitória da tensão secundária dos TPC, observa-se que os estudos são concentrados na melhoria da resposta transitória do TPC frente a um curto-circuito no sistema, não havendo uma metodologia simultânea para análise de harmônicos presentes na tensão secundária dos TPC. Existem estudos que contemplam apenas alguns elementos do TPC, outros fazem uso de um modelo mais completo. Contudo, a maioria dos trabalhos analisados supõe que todos os parâmetros do modelo de TPC são conhecidos. Sendo essa uma das principais limitações de muitos trabalhos, uma vez que há certa complexidade na obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em frequências acima de 1 kHz. Na Tabela 3.1 tem-se uma síntese do levantamento bibliográfico realizado.

De acordo com a literatura, os trabalhos propostos têm aplicações restritas, ou para estudos de curto-circuito ou para estudos de proteção. Desta forma, na presente tese propõe-se um novo método para projetar FDR para reduzir os efeitos da resposta transitória da tensão secundária dos TPC, objetivando aplicabilidade em sistemas de medição, proteção e controle, simultaneamente. É com o objetivo de contribuir nesta linha de pesquisa que se propõe esta tese.

**Tabela 3.1 - Sinopse da revisão bibliográfica.**

| Referências                        | Métodos  | Limitações   |
|------------------------------------|--|--|
| SIGUERDIDJANE <i>et al.</i> [1997] | Filtro digital não recursivo   | Atraso de um ciclo no sinal  |
| IZYKOWSKI <i>et al.</i> [1998]     | Filtro digital recursivo<br>ATP<br>Passível de ser implementado em DSP   | Função de transferência do modelo de TPC simplificado  |
| SAHA <i>et al.</i> [2001]          | RNA<br>ATP   | Necessita de um banco de dados   |
| ZADEH [2004]                       | RNA<br>ATP   | Estudos de curto-circuito  |
| ZADEH & LI [2007]                  | RNA<br>ATP   | Base de dados que depende do modelo de TPC adotado bem como do sistema avaliado                                  |
| PAJUELO <i>et al.</i> [2009]       | Mínimos quadrados não-recursivo  | TPC específico<br>Dependência dos parâmetros   |
| MACHADO [2009]                     | Domínio do tempo e frequência<br>Modelo completo de TPC<br>Filtro digital recursivo<br>TPC 138 kV e 230 kV                                 | ATP/Models<br>Aplicação em campo   |
| SILVA [2010]                       | Domínio do tempo e frequência<br>Filtro digital recursivo<br>Simulações em tempo real  | Dispositivo em fase de protótipo<br>Conversor D/A mal condicionado<br>Falta de robustez para aplicações em campo |
| SANTOS [2011]                      | Método baseado em MACHADO [2009] e SILVA [2010]<br>Validação mediante simulações via RTDS <sup>TM</sup>                                    | Estudo de caso<br>Falta de robustez para aplicações em campo   |
| MACHADO [2013]                     | Filtro digital simples<br>Independente dos parâmetros $R$ , $L$ e $C$ do modelo de TPC   | ATP<br>Aplicação restrita a proteção   |
| TRABALHO PROPOSTO                  | Independente dos parâmetros $R$ , $L$ e $C$ do modelo de TPC<br>Utiliza dados de resposta em frequência do TPC<br>Simulações em tempo real | Relés de arquitetura fechada   |

No capítulo seguinte são apresentadas as etapas dos projetos de FDR para reduzir os impactos da resposta transitória dos TPC. Destacando-se os projetos de FDR para TPC de 230 e 500 kV, reportados na literatura.

## Capítulo 4

### Método Proposto

Conforme evidenciado nos capítulos anteriores, muitos pesquisadores têm concentrado esforços para fazer com que a tensão secundária dos TPC seja uma réplica da tensão ao qual seu primário está submetido. A maioria dos estudos têm aplicabilidade restrita devido ao método adotado ou devido a considerações que comprometem determinados tipos de análises, por exemplo, simplificações de circuito equivalente, considerar que os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  são conhecidos e utilização de espectro frequência limitado para validação da técnica proposta.

Neste capítulo detalha-se o método proposto para projetos de filtros digitais recursivos (FDR) capazes de reduzir os impactos da resposta transitória dos TPC independente de qual seja a aplicação de interesse – proteção ou medição. Os FDR foram idealizados para serem implementados em unidades de processamento, tais como relés microprocessados, com o objetivo de proporcionar menor erro de medição independente de qual seja as condições operacionais do sistema ao qual o TPC esteja instalado. Desta forma, espera-se aumentar a segurança, a seletividade e a velocidade de decisão dos dispositivos de proteção, assim como obter um dispositivos com maior aplicabilidade, tal como para monitoramento de harmônicos em sistemas elétricos de potência ou mesmo para viabilizar estudos de localização de faltas mais exatos.

O método proposto para obter os FDR para operar em conjunto com um determinado TPC depende tanto da resposta em frequência do TPC, como de um modelo de equipamento para estudos de transitórios eletromagnéticos. Como estudo de caso, neste capítulo apresenta-se o

projeto de um FDR para operar em conjunto com um TPC de 230 kV [FERNANDES Jr., 2003] e outro para operar em conjunto com um TPC de 500 kV [PAJUELO *et al.*, 2009].

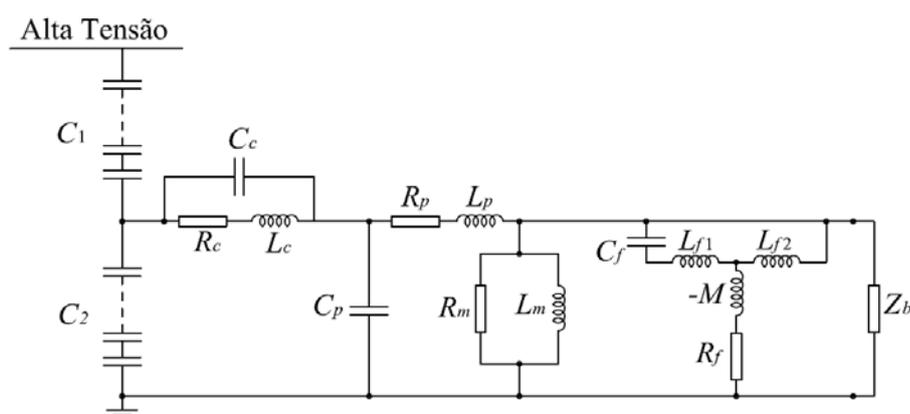
#### 4.1 Fundamentação do Método

Os FDR para redução da resposta transitória de um TPC são definidos em cinco etapas:

- Obtenção de dados de resposta em frequência do TPC de interesse;
- Escolha do modelo de TPC;
- Determinação da função de transferência do modelo de TPC;
- Cálculo dos coeficientes da função de transferência do TPC; e
- Cálculo dos coeficientes do FDR.

Os dados de resposta em frequência usados como dados de entrada na rotina de cálculo dos FDR podem ser obtidos de duas formas, através de medição ou simulação, conforme disponibilidade de tais dados. Idealmente, o laudo do ensaio de resposta em frequência de um TPC deveria ser fornecido pelos fabricantes no ato da entrega do equipamento.

O modelo de TPC adotado para estudos de transitórios eletromagnéticos foi apresentado na Figura 2.4, por conveniência repetiu-se a mesma como Figura 4.1 nesta subseção. Segundo FERNANDES Jr. [2003], o modelo apresenta os parâmetros mais relevantes na representação de um TPC, isto é, coluna capacitiva, reator de compensação, transformador de potencial do tipo indutivo e do circuito supressor de ferroressonância.



**Figura 4.1 – Modelo do TPC adotado para estudos de transitórios eletromagnéticos [FERNANDES Jr., 2003].**

O método proposto para especificar os FDR para operar em conjunto com um TPC é baseado na função de transferência de um modelo do TPC predefinido. Aplicando o conceito de

divisor de tensão ao modelo apresentado, obtém-se a função de transferência modelo de TPC, a qual pode ser expressa como:

$$H_{TPC}(s) = \frac{A_7 \cdot s^7 + A_6 \cdot s^6 + A_5 \cdot s^5 + A_4 \cdot s^4 + A_3 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_1 \cdot s^1 + A_0}{s^8 + B_7 \cdot s^7 + B_6 \cdot s^6 + B_5 \cdot s^5 + B_4 \cdot s^4 + B_3 \cdot s^3 + B_2 \cdot s^2 + B_1 \cdot s^1 + B_0}. \quad (4.1)$$

Sendo  $A_m$  e  $B_m$ ,  $m = 0, 1, \dots, 7$ , os coeficientes da função de transferência do modelo, funções lineares dos elementos  $R$ ,  $L$  e  $C$  do modelo. Os valores dos elementos  $R$ ,  $L$  e  $C$  de um TPC embora permita gerar as curvas de resposta em frequência do equipamento raramente são conhecidos – geralmente não são fornecidos pelos fabricantes desses equipamentos – sendo esta uma das principais limitações da maioria dos trabalhos encontrados na literatura. Embora alguns trabalhos apresentem metodologias e até ferramentas computacionais para tais fins, essa tarefa é de difícil domínio por apresentar frequentes erros de natureza numérica durante a inversão de matrizes.

Motivado por tais limitações, no presente trabalho de tese sugere-se representar o comportamento do TPC através uma função racional baseada no modelo de TPC apresentado anteriormente, isto é, pela Equação 4.1. A vantagem do método se dá pela conveniência de calcular apenas os coeficientes  $A_m$  e  $B_m$ , diferente dos outros trabalhos que propõe calcular os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$ . Desta forma, o método aqui proposto resulta em expressões consideravelmente mais simples e conseqüentemente menos vulneráveis a problemas de natureza numérica.

A obtenção dos coeficientes  $A_m$  e  $B_m$  se dá através de uma rotina de ajuste que utiliza o método de Levenberg-Marquardt para minimizar a função objetivo dada pela Equação 4.2, sendo,  $\omega_i$  é o  $i$ -ésimo valor de frequência,  $\bar{A}$  é o vetor de parâmetros, isto é,  $\bar{A} = [A_7 \ A_6 \ A_5 \ A_4 \ A_3 \ A_2 \ A_1 \ A_0 \ B_7 \ B_6 \ B_5 \ B_4 \ B_3 \ B_2 \ B_1 \ B_0]^T$  a ser determinado,  $y_i$  é a resposta em frequência de referência e  $H(\omega_i; \bar{A})$  é a função de transferência do modelo de TPC.

$$F(\bar{A}) = \sum_{i=1}^n (y_i - H(\omega_i; \bar{A}))^2. \quad (4.2)$$

Conhecidos os parâmetros  $A_m$  e  $B_m$  da função de transferência do modelo adotado, facilmente pode-se representar a Equação 4.1 como uma função de zeros e pólos, isto é:

$$H_{TPC}(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3)(s + z_4)(s + z_5)(s + z_6)(s + z_7)}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5)(s + p_6)(s + p_7)(s + p_8)}. \quad (4.3)$$

Aproximando a resposta em frequência por uma função racional na forma de zeros e pólos, é possível evitar problemas de instabilidade durante a implementação do filtro de ordem elevada. Além disso, o modelo de TPC e a carga instalada no seu terminal secundário são generalizados, superando assim mais uma limitação de alguns trabalhos encontrados na literatura – os que fazem uso de RNA.

Para obter a função de transferência de um TPC ideal, isto é, com módulo unitário em todo o espectro de frequência de interesse e o mínimo de deslocamento de fase entre a tensão primária e secundária, verifica-se que a planta do FDR e do modelo do TPC devem possuir no domínio de Laplace a relação definida por

$$H_{TPC}(s)G_{FDR}(s) = 1 \angle 0^\circ . \quad (4.4)$$

Desta forma, sugere-se que a função de transferência do FDR,  $G_{FDR}(s)$ , seja obtida pela inversão direta da função de transferência do TPC,  $H_{TPC}(s)$ . Contudo, a inversão produziria uma função racional imprópria, pois a função de transferência do filtro teria o grau do numerador maior que o grau do denominador. Como solução para evitar que o filtro assuma o comportamento de um impulso, propõe-se alterar a Equação 4.4 para

$$H_{TPC}(s)G_{FDR}(s)\varphi(s) = 1 \angle 0^\circ . \quad (4.5)$$

Sendo,  $\varphi(s)$  uma função racional imprópria que ditará a dinâmica de um TPC ideal. Assim, a planta do FDR assume a seguinte forma:

$$G_{FDR}(s) = [H_{TPC}(s)\varphi(s)]^{-1} . \quad (4.6)$$

Substituindo a Equação 4.6 na Equação 4.4 tem-se:

$$H_{TPC}(s)H_{TPC}(s)^{-1}.\varphi(s)^{-1} = 1 \angle 0^\circ , \quad (4.7)$$

$$\varphi(s)^{-1} = 1 \angle 0^\circ . \quad (4.8)$$

Por consequência,  $\varphi(s)^{-1}$  ditará a resposta em frequência e, seu correspondente no tempo, o comportamento dinâmico e de regime da relação de transformação do TPC operando junto com o FDR. A primeira condição desejável a ser atendida por  $\varphi(s)^{-1}$  é que quando  $\omega \rightarrow \infty$   $\varphi(s)^{-1} = 1 \angle 0^\circ$ . A segunda condição é que o grau do numerador seja menor que o grau do denominador. Tomando-se como base tais condições, adotou-se a Equação 4.9 como a função de transferência que ditará o comportamento dinâmico do TPC.

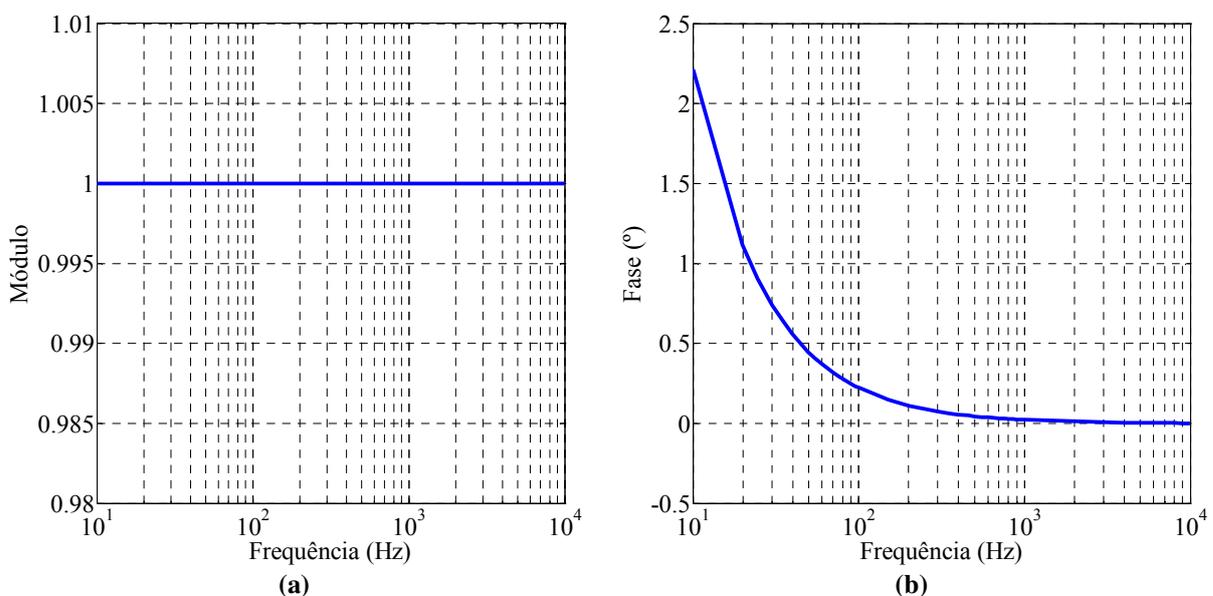
$$\varphi(s)^{-1} = \frac{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0}{s^3 + D_2 \cdot s^2 + D_1 \cdot s + D_0} \quad (4.9)$$

A função de transferência de um TPC ideal pode ser representada por uma expressão de 3ª ordem [IZYKOWSKI *et al.*, 1998]. Como  $\varphi(s)^{-1}$  é uma função não linear dos elementos  $C_2$ ,  $C_1$ ,  $C_0$ ,  $D_2$ ,  $D_1$  e  $D_0$  foi necessário fazer uso da técnica dos mínimos quadrados não-lineares para calcular tais coeficientes. Os parâmetros obtidos após o processo de ajuste são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Parâmetros da função de transferência que ditará o comportamento dinâmico de um TPC ideal.**

| $n$ | $C_n$        | $D_n$       |
|-----|--------------|-------------|
| 2   | 2,0623E+009  | 2,0623E+009 |
| 1   | 8,7225E+007  | 5,1181E+009 |
| 0   | -1,0641E+008 | 6,2442E+009 |

A análise da compensação no domínio da frequência consiste de uma etapa importante no processo de filtragem, uma vez que a tensão secundária será utilizada durante o processo de estimação de fasores empregado pelos sistemas de proteção e controle. A partir das condições estabelecidas para a dinâmica do TPC ideal obtém-se as respostas de amplitude e fase apresentadas na Figura 4.2.



**Figura 4.2 – Resposta em frequência da função que ditará a dinâmica dos FDR: (a) Amplitude; (b) Fase.**

Observa-se que as características de módulo e fase de  $\varphi(s)^{-1}$  possuem comportamento aceitável, isto é, módulo unitário e deslocamento de fase mínimo no espectro de 10 Hz a

10 kHz. Desta forma, pode-se afirmar que a dinâmica estabelecida pela Equação 4.9 é aceitável para ditar o comportamento dinâmico para um suposto TPC ideal. Portanto, a função de transferência do FDR para operar em conjunto com um TPC será definida por 4.10, baseado em 4.6:

$$G_{FDR}(s) = \frac{(s+z_1)(s+z_2)(s+z_3)(s+z_4)(s+z_5)(s+z_6)(s+z_7)(s+z_8)(s+z_9)(s+z_{10})}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_4)(s+p_5)(s+p_6)(s+p_7)(s+p_8)(s+p_9)(s+p_{10})}. \quad (4.10)$$

Sendo,  $z_n$  e  $p_n$ ,  $n = 1, \dots, 10$  os zeros e pólos da função racional do filtro, respectivamente. O FDR proposto neste trabalho apresenta ordem elevada quando comparado as soluções apresentadas em outros trabalhos encontrados na literatura, inclusive publicados por este autor. Porém, o espectro de frequência de atuação do FDR neste sugerido vai depender dos dados de resposta em frequência utilizados durante o processo de ajuste, de 10 Hz a 10 kHz, desta forma, resultando em uma ferramenta de maior aplicabilidade, principalmente quando as análises de interesse forem além da componente fundamental – benefício garantido pela utilização de um FDR projetado a partir de um modelo de TPC obtido para estudos de transitórios eletromagnéticos.

A fim de lidar com os problemas da implementação de filtros digitais recursivos de ordem elevada, desenvolveu-se a função de transferência do FDR proposto através da conexão de sub-filtros com seções de segunda ordem, Equações 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

$$G_1(s) = \frac{(s-z_1)(s-z_2)}{(s-p_1)(s-p_2)} \quad (4.11)$$

$$G_2(s) = \frac{(s-z_3)(s-z_4)}{(s-p_3)(s-p_4)} \quad (4.12)$$

$$G_3(s) = \frac{(s-z_5)(s-z_6)}{(s-p_5)(s-p_6)} \quad (4.13)$$

$$G_4(s) = \frac{(s-z_7)(s-z_8)}{(s-p_7)(s-p_8)} \quad (4.14)$$

$$G_5(s) = \frac{(s-z_9)(s-z_{10})}{(s-p_9)(s-p_{10})} \quad (4.15)$$

A implementação do processo de filtragem digital se deu mediante o mapeamento ou transformação dos pontos do plano  $s$  para o plano  $z$ , através do método da transformação bilinear definida pela Equação 4.16. Considerando  $T_d = 50 \mu s$ , tempo de amostragem

utilizado. Desta forma, obteve-se a função de transferência dos FDR no domínio discreto, Expressão 4.17, na qual  $k_{ij}$ , com  $i = 1, \dots, 5$  e  $j = 1, \dots, 5$  são os coeficientes das seções de segunda ordem dos FDR.

$$s = \frac{2}{T_d} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (4.16)$$

$$G_{FDR}(z) = \frac{V_f(z)}{V_o(z)} = \prod_{i=1}^5 \frac{k_{i1} + k_{i2} \cdot z^{-1} + k_{i3} \cdot z^{-2}}{1 + k_{i4} \cdot z^{-1} + k_{i5} \cdot z^{-2}}. \quad (4.17)$$

#### 4.2 Estudo de Caso 01: FDR para o TPC de 230 kV

Conforme dito anteriormente, os FDR sugeridos nesta tese são projetados a partir de dados de resposta em frequência, para este estudo de caso os valores de resposta em frequência usados como dados de entrada na rotina de cálculo foram obtidos por FERNANDES Jr. [2003], através de ensaio realizado com um TPC completo, desde a sua coluna capacitiva até os terminais secundários. O TPC utilizado foi disponibilizado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) durante um projeto de pesquisa e desenvolvimento executado pelo Grupo de Sistemas Elétricos da Universidade Federal de Campina Grande (GSE-UFCG).

O ensaio de resposta em frequência foi realizado no Laboratório de Alta Tensão da UFCG mediante o uso de um gerador de sinal, contemplando uma faixa de frequência de 10 Hz a 10 kHz, a tensão fornecida pelo gerador foi amplificada em até 100 vezes por um amplificador de potência, cujo valor máximo de tensão pico a pico foi de 2.000 V, o sinal de tensão foi aplicado entre a coluna capacitiva do TPC e um ponto referencial para a terra.

As curvas de resposta em frequência para o ganho e para a fase do TPC de 230 kV ensaiado são apresentadas na Figura 4.3. De acordo com as mesmas, observa-se que o TPC não funciona como um divisor de tensão ideal, sendo a tensão secundária uma função tanto da tensão ao qual o primário do TPC está submetido, como também da frequência do sinal aplicado ao primário do equipamento.

Tomando-se os pontos da medição de resposta em frequência como dados de entrada para a rotina de ajuste, foi possível realizar o ajuste de curvas, conforme pode ser verificado na Figura 4.4. Os coeficientes da função de transferência calculados para o TPC de 230 kV após o processo de ajuste são mostrados na Tabela 4.2.

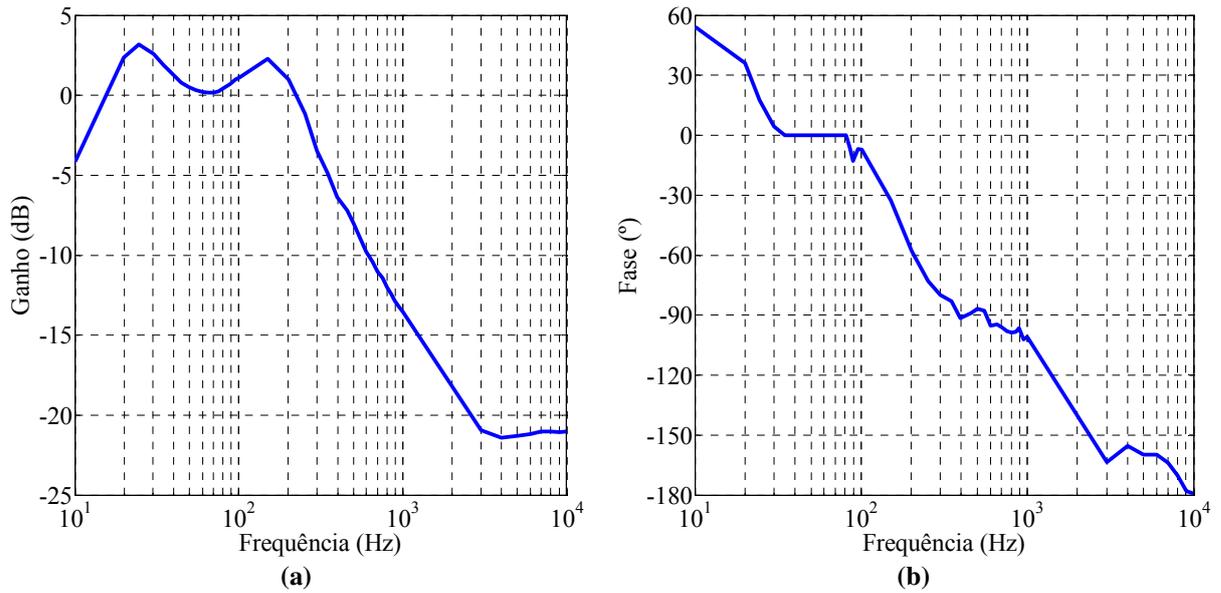


Figura 4.3 – Curvas da relação de tensão do TPC de 230 kV [FERNANDES Jr., 2003]: (a) Ganho; (b) Fase.

O cálculo dos coeficientes da função de transferência do TPC compreende uma das mais importantes etapas do projeto do FDR, pois a partir desses que os coeficientes dos FDR são calculados.

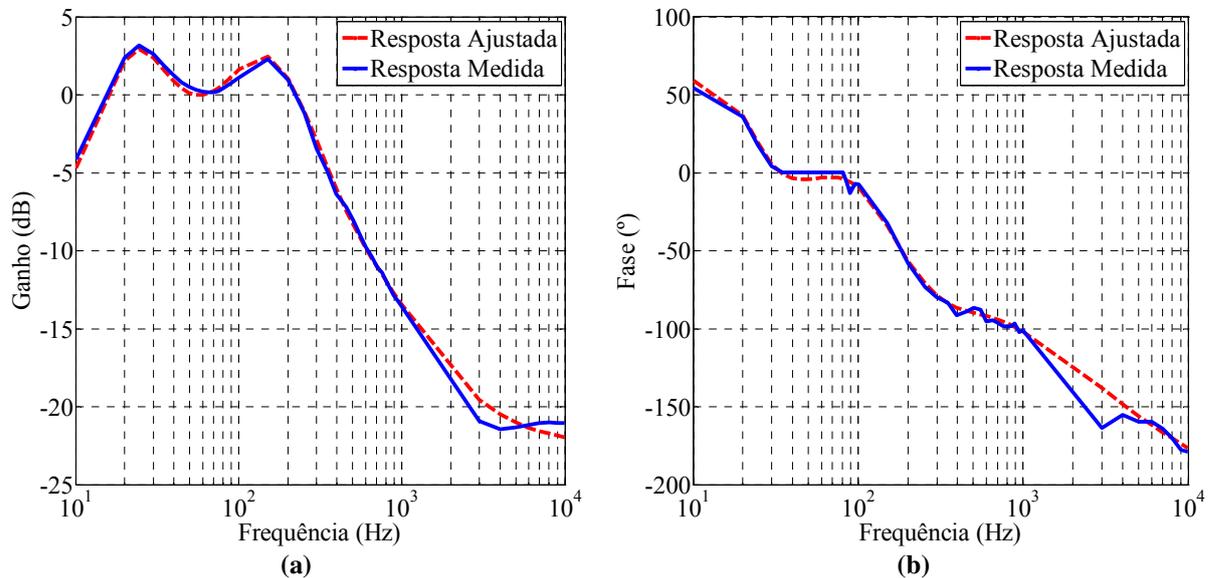


Figura 4.4 – Curvas da relação de tensão ajustada e medida do TPC de 230 kV: (a) Ganho; (b) Fase.

Conforme dito anteriormente, a função de transferência dos FDR para operar em conjunto com o TPC é definida pela Equação 4.6, que resulta em:

$$G_{FDR230}(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3)(s + z_4)(s + z_5)(s + z_6)(s + z_7)(s + z_8)(s + z_9)(s + z_{10})}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5)(s + p_6)(s + p_7)(s + p_8)(s + p_9)(s + p_{10})} \quad (4.18)$$

Sendo,  $z_n$  e  $p_n$ ,  $n = 1, \dots, 10$  os zeros e pólos da função racional do filtro, respectivamente. Na Tabela 4.3 são listados os zeros e pólos da função de transferência apresentada anteriormente.

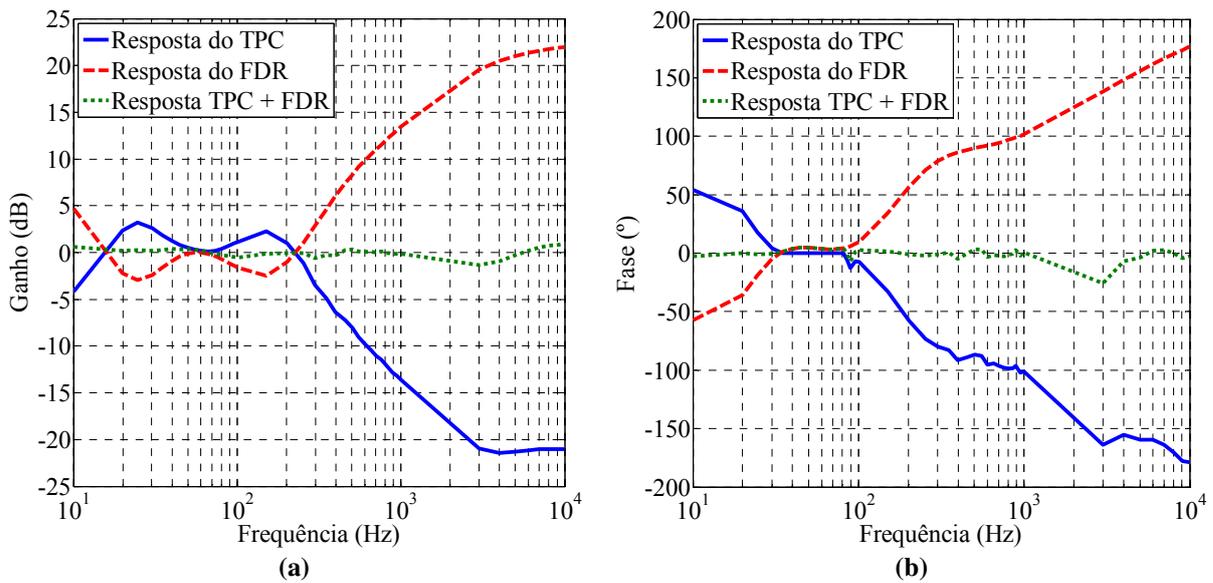
**Tabela 4.2 – Coeficientes da função de transferência do TPC de 230 kV após o processo de ajuste.**

| $m$ | $A_m$        | $B_m$       |
|-----|--------------|-------------|
| 7   | -2,8637E+003 | 2,7895E+005 |
| 6   | 3,4751E+007  | 1,7019E+009 |
| 5   | 2,0088E+011  | 4,5304E+012 |
| 4   | 5,7443E+014  | 5,6346E+015 |
| 3   | 4,5698E+017  | 4,0984E+018 |
| 2   | 1,5590E+020  | 1,3905E+021 |
| 1   | 2,1372E+022  | 1,8358E+023 |
| 0   | 3,9506E+023  | 1,7797E+025 |

**Tabela 4.3 – Zeros e pólos da planta do filtro analógico para redução do impacto da resposta transitória do TPC de 230 kV.**

| $n$ | Zeros ( $z_n$ )                | Pólos ( $p_n$ )                |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| 1   | -2,727713E+05                  | -2,062300E+09                  |
| 2   | -4,777357E+02                  | -1,699137E+04                  |
| 3   | -2,206919E+03 - j 1,473905E+03 | -1,932415E+03 - j 2,105441E+03 |
| 4   | -2,206919E+03 + j 1,473905E+03 | -1,932415E+03 + j 2,105441E+03 |
| 5   | -5,760963E+02 - j 7,596547E+02 | -3,159505E+02 - j 1,888885E+02 |
| 6   | -5,760963E+02 + j 7,596547E+02 | -3,159505E+02 + j 1,888885E+02 |
| 7   | -6,745732E+01 - j 1,295496E+02 | -1,240872E+00 - j 1,219845E+00 |
| 8   | -6,745732E+01 + j 1,295496E+02 | -1,240872E+00 + j 1,219845E+00 |
| 9   | -2,492811E-01                  | -3,379271E+02                  |
| 10  | 2,069861E-01                   | -2,171026E+01                  |

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de resposta em frequência do TPC de 230 kV, do FDR projetado e do conjunto TPC mais FDR, no domínio  $s$ . Analisando o comportamento do conjunto TPC mais FDR no domínio da frequência observa-se uma melhoria significativa na dinâmica do TPC quando operando em conjunto como o FDR proposto, embora a resposta do conjunto ainda apresente divergência comparado ao caso ideal, tal fato se deve por estarmos manipulando o comportamento de um equipamento real modelado através de medições e dados experimentais.



**Figura 4.5 – Resposta em frequência do TPC de 230 kV, do filtro projetado e do conjunto TPC mais FDR: (a) Ganho; (b) Fase.**

O FDR foi obtido através do método da transformação bilinear aplicado a função de transferência do FDR analógica, Expressão 4.17 – anteriormente apresentada. Na Tabela 4.4 são indicados os valores dos coeficientes dos filtros de segunda ordem para o FDR de 230 kV, sendo os  $k_{i1}$  função dos zeros e pólos de  $G_1(s)$ , os  $k_{i2}$  função dos zeros e pólos de  $G_2(s)$ , os  $k_{i3}$  função dos zeros e pólos de  $G_3(s)$ , e assim por diante.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de tese foi desenvolvida uma rotina que calcula os coeficientes  $k_{ij}$  a partir do tempo de amostragem do sinal discretizado e dos zeros e pólos da função racional do filtro proposto.

**Tabela 4.4 – Coeficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 230 kV.**

| Coefic.  | Seção (i)     |               |               |               |               |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|          | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             |
| $k_{i1}$ | 1,077144E-04  | 1,005990E+00  | 1,013280E+00  | 1,003324E+00  | 9,910857E-01  |
| $k_{i2}$ | -2,500838E-05 | -1,796930E+00 | -1,967614E+00 | -1,999849E+00 | -1,982169E+00 |
| $k_{i3}$ | -7,827118E-05 | 8,068294E-01  | 9,565708E-01  | 9,965786E-01  | 9,910836E-01  |
| $k_{i4}$ | 5,962399E-01  | -1,796930E+00 | -1,968565E+00 | -1,999876E+00 | -1,982160E+00 |
| $k_{i5}$ | -4,037056E-01 | 8,128194E-01  | 9,688989E-01  | 9,998759E-00  | 9,821784E-01  |

O funcionamento no domínio do tempo para o FDR projetado para operar junto com o TPC de 230 kV será analisado no próximo capítulo. A seguir apresenta-se as etapas do projeto dos FDR para operar em conjunto com um TPC 500 kV.

### 4.3 Estudo de Caso 02: FDR para o TPC de 500 kV

O TPC de 500 kV adotado como objeto de estudo neste trabalho de tese é o mesmo reportado no trabalho de PAJUELO *et al.* [2009]. O modelo de TPC sugerido pelos autores contempla o divisor capacitivo, o reator de compensação, o transformador de potencial intermediário e o circuito supressor de ferroressonância, conforme é destacado na Figura 4.6.

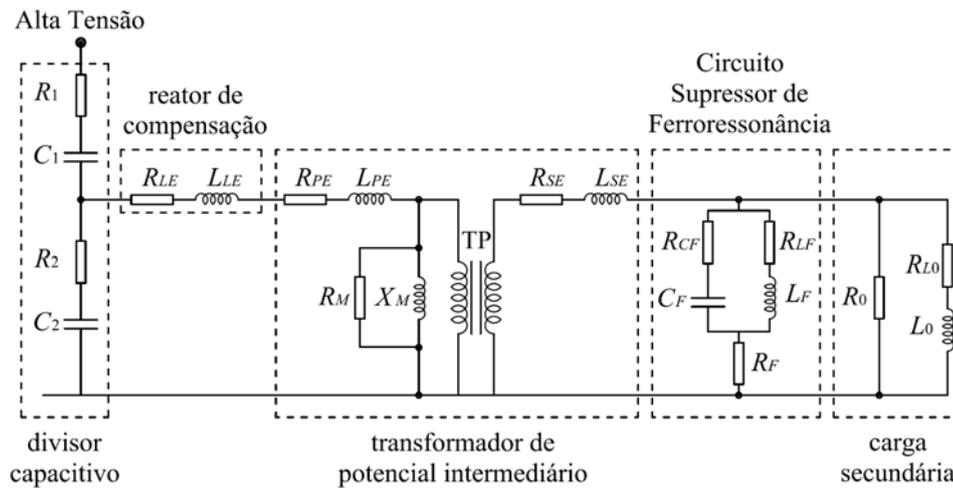


Figura 4.6 – Modelo de TPC de 500 kV proposto por PAJUELO *et al.* [2009].

Como o modelo de TPC em foco tem seus parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  conhecidos, os dados de resposta em frequência necessários na concepção do FDR de interesse foram obtidos a partir de simulação digital. As curvas de módulo e fase da resposta em frequência do TPC em análise são apresentadas na Figura 4.7.

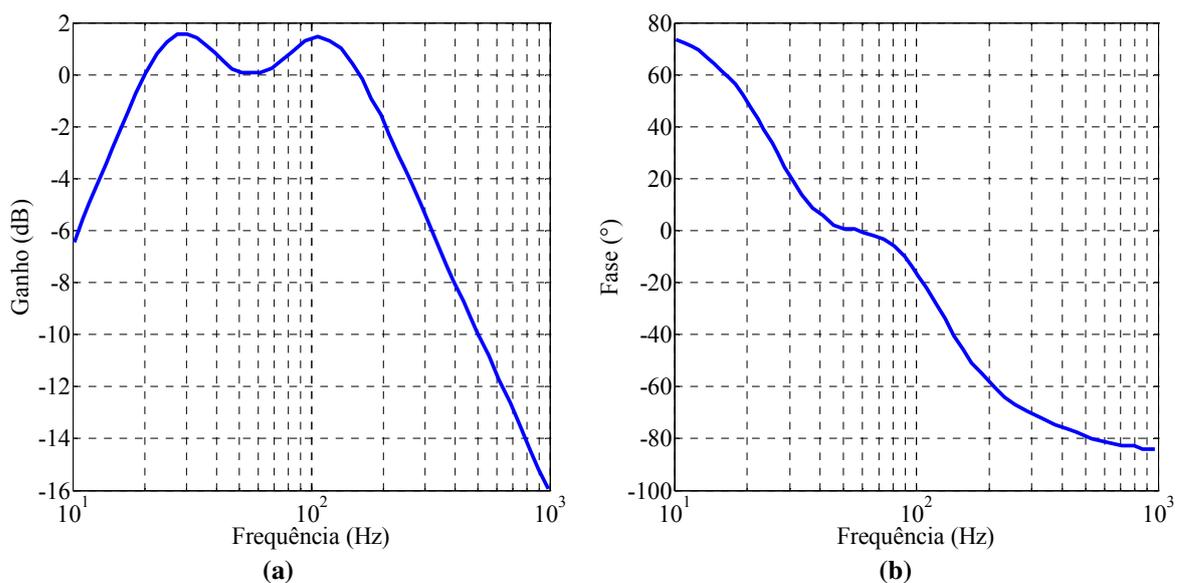


Figura 4.7 – Curvas da relação de tensão do TPC de 500 kV [PAJUELO *et al.*, 2009]: (a) Ganho; (b) Fase.

A partir da Figura 4.7 verifica-se que análogo ao caso do TPC de 230 kV, a resposta em frequência do TPC de 500 kV também diverge do caso ideal – divisor capacitivo ideal. Portanto, sugere-se projetar um FDR para operar em conjunto com tal TPC, de modo a forçar a tensão secundária ser uma réplica da tensão ao qual o primário do TPC está conectado.

Tomando-se os dados de resposta em frequência como dados de entrada para a rotina de ajuste, foi possível realizar o ajuste de curvas, conforme pode ser verificado na Figura 4.8. Os coeficientes da função de transferência calculados para o TPC de 500 kV após o processo de ajuste não linear são mostrados na Tabela 4.5.

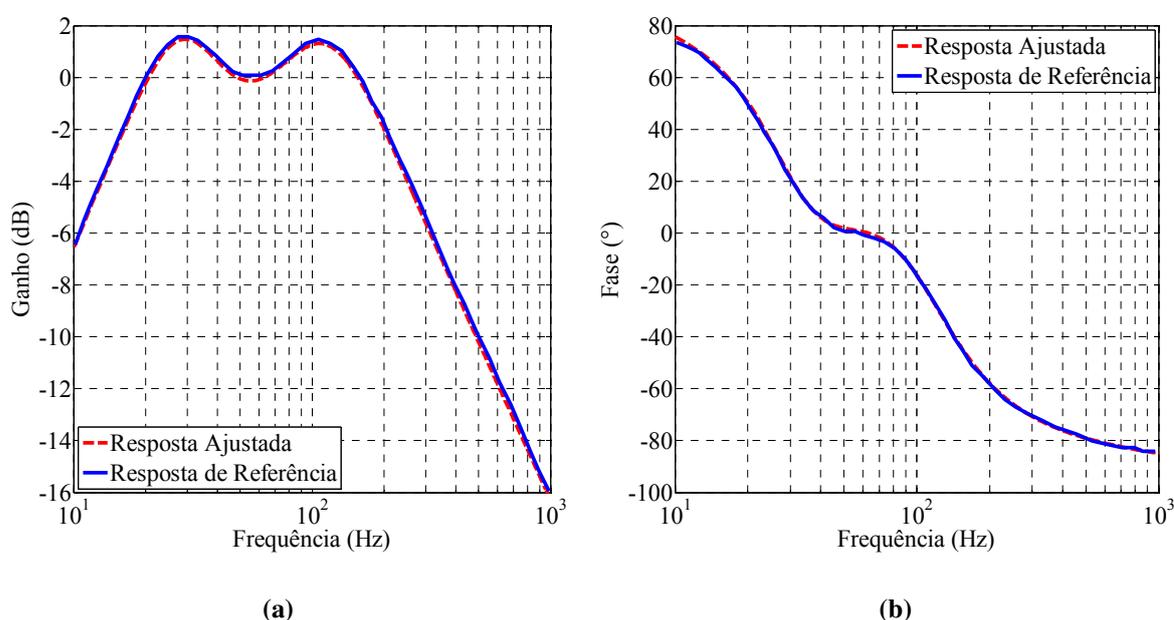


Figura 4.8 – Curvas da relação de tensão ajustada e de referência do TPC de 500 kV: (a) Ganho; (b) Fase.

Tabela 4.5 – Coeficientes da função de transferência do TPC de 500 kV após o processo de ajuste.

| $m$ | $A_m$        | $B_m$       |
|-----|--------------|-------------|
| 7   | 8,3415E+002  | 8,0003E+004 |
| 6   | 7,6197E+007  | 4,4731E+008 |
| 5   | 3,8213E+011  | 5,6859E+011 |
| 4   | 2,9939E+014  | 4,0631E+014 |
| 3   | 9,8486E+016  | 1,3936E+017 |
| 2   | 1,5896E+019  | 2,3788E+019 |
| 1   | 2,6325E+020  | 2,3909E+021 |
| 0   | -3,1553E+020 | 4,1420E+022 |

Análogo ao estudo de caso anterior, a função de transferência dos FDR para operar em conjunto com o TPC de 500 kV é definida pela Equação 4.6, que resulta em:

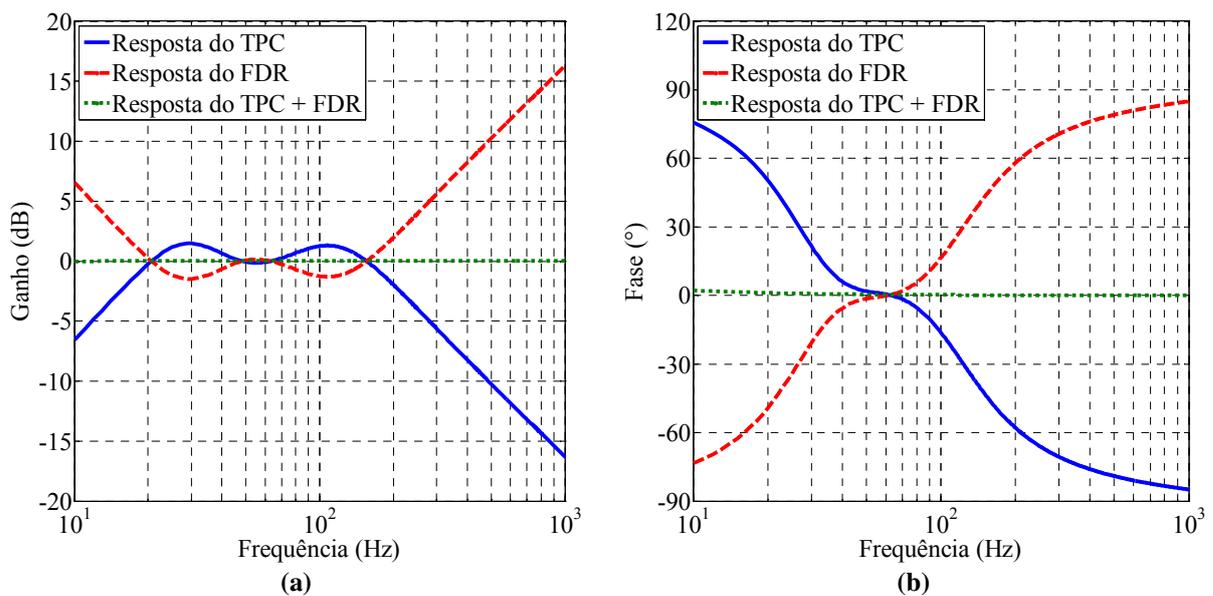
$$G_{FDR500}(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3)(s + z_4)(s + z_5)(s + z_6)(s + z_7)(s + z_8)(s + z_9)(s + z_{10})}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5)(s + p_6)(s + p_7)(s + p_8)(s + p_9)(s + p_{10})}. \quad (4.18)$$

Sendo,  $z_n$  e  $p_n$ ,  $n = 1, \dots, 10$  os zeros e pólos da função racional do filtro, respectivamente. Na Tabela 4.6 são listados os zeros e pólos da função de transferência em foco.

**Tabela 4.6 – Zeros e pólos da planta do filtro analógico para redução do impacto da resposta transitória do TPC de 500 kV.**

| $n$ | Zeros ( $z_n$ )                 | Pólos ( $p_n$ )                |
|-----|---------------------------------|--------------------------------|
| 1   | -7,406634E+04                   | -2,062300E+09                  |
| 2   | -4,495778E+03                   | -8,607282E+04                  |
| 3   | -4,417412E+002 - j 5,717408E+02 | -2,053193E+02 - j 2,053193E+02 |
| 4   | -4,417412E+002 + j 5,717408E+02 | -2,053193E+02 + j 2,053193E+02 |
| 5   | -9,738355E+001 - j 1,525498E+02 | -1,240872E+00 - j 1,219845E+00 |
| 6   | -9,738355E+001 + j 1,525498E+02 | -1,240872E+00 + j 1,219845E+00 |
| 7   | -3,413236E+02                   | -4,397667E+03                  |
| 8   | -2,131332E+01                   | -4,470142E+02                  |
| 9   | -2,492811E-01                   | -1,122042E+00                  |
| 10  | -2,069861E-01                   | -1,986015E+01                  |

Na Figura 4.9 são apresentadas as curvas de resposta em frequência do TPC de 500 kV, do FDR projetado e do conjunto TPC mais FDR. Para este caso a análise no domínio da frequência evidencia a correção do comportamento dinâmico do TPC 500 kV quando operando em conjunto como os FDR propostos.



**Figura 4.9 – Resposta em frequência do TPC de 500 kV, do filtro projetado e do conjunto TPC mais FDR: (a) Ganho; (b) Fase.**

Os resultados para o TPC de 500 kV são melhores do que os apresentados para o TPC de 230 kV devido ao fato dos dados de resposta em frequência do TPC de 500 kV ter sido obtidos através de simulações, além disso, o espectro de frequência analisado limitou-se a 1 kHz.

Aplicando a transformação bilinear aos sub-filtros que formam a função de transferência do filtro analógico, projetado para operar em conjunto com o TPC de 500 kV, obtém-se a função de transferência do FDR de 500 kV no domínio discreto, Expressão 4.17. Na Tabela 4.7 estão especificados os valores dos coeficientes dos filtros de segunda ordem para o FDR em foco.

O funcionamento do FDR projetado para o TPC de 500 kV será analisado no capítulo que segue.

**Tabela 4.7 – Coeficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 500 kV.**

| <i>Cofic.</i> | <i>Seção (i)</i> |               |               |               |               |
|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               | 1                | 2             | 3             | 4             | 5             |
| $k_{i1}$      | 1.952066E-05     | 1.005748E+00  | 1.004827E+00  | 8.990728E-01  | 9.994772E-01  |
| $k_{i2}$      | -9.746075E-06    | -1.966758E+00 | -1.999834E+00 | -1.781974E+00 | -1.998951E+00 |
| $k_{i3}$      | -4.651829E-06    | 9.622940E-01  | 9.950891E-01  | 8.829175E-01  | 9.994742E-01  |
| $k_{i4}$      | 1.365407E+00     | -1.966758E+00 | -1.999875E+00 | -1.779793E+00 | -1.998951E+00 |
| $k_{i5}$      | 3.654319E-01     | 9.680421E-01  | 9.998751E-01  | 7.841716E-01  | 9.989514E-01  |

## Capítulo 5

# Resultados e Análises

A idealização do método proposto neste trabalho de tese surgiu motivado pela necessidade de ter uma ferramenta para redução da resposta transitória dos TPC independente de qual fosse o tipo de aplicação – proteção ou medição. Permitir análises em um amplo espectro de frequência e independente dos parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do TPC foram condições de compromisso para concepção do método, desta forma, espera-se fornecer a engenheiros e pesquisadores uma ferramenta versátil de ampla aplicação para estudos de sistema elétricos de potência.

O funcionamento dos FDR projetados para reduzir o impacto da resposta transitória dos TPC de 230 e 500 kV serão analisados separadamente fazendo uso de dados de dois sistemas elétricos equivalentes, de acordo com o nível de tensão ao qual o TPC está designado para operar. Os desvios presentes na tensão secundária dos TPC podem tornar um relé sub ou sobrealçado e, conseqüentemente, podem ocasionar operações indevidas dos sistemas de proteção. Desta forma, o uso dos FDR que realizem a correção da tensão secundária surge como alternativa eficaz e com custo reduzido para aumentar a segurança e a confiabilidade da proteção de distância, minimizando erros na identificação de faltas dentro da primeira zona e, portanto, evitando atuações impróprias.

Para avaliar o funcionamento dos FDR propostos fez-se uso de dados de sistemas elétricos reais e um modelo de relé para proteção de distância, a partir de então diferentes situações de faltas serão realizadas.

## 5.1 Análise de Proteção de Distância

### 5.1.1 Representação do Relé de Distância

A arquitetura básica de um relé microprocessado é composta de seis unidades, as quais são ilustradas na Figura 5.1 com descrições na sequência:

1. Unidade de Condicionamento de Sinais: onde os transformadores auxiliares garantem a isolamento elétrica entre o circuito de força e o circuito eletrônico de controle, seguido de um filtro *anti-aliasing* que limita o espectro de frequências do sinal a ser processado (tensão ou corrente);
2. Unidade de Aquisição de Dados: nesta unidade operam o circuito que realiza a amostragem dos sinais, o circuito multiplexador e o conversor A/D (analógico-digital);
3. Unidade de Processamento de Dados: local onde os dados são computados, e conseqüentemente, onde as decisões são definidas;
4. Unidade de Memória: parte do hardware onde os algoritmos são armazenados, contemplando também o registro das variáveis e constantes;
5. Unidade de Comunicação: nesta configura-se o tipo de comunicação que o dispositivo realizará com outros elementos do sistema elétrico;
6. Unidade de Interface Lógica: a qual tem por fim enviar ou receber *trips* de comando para o disjuntor.

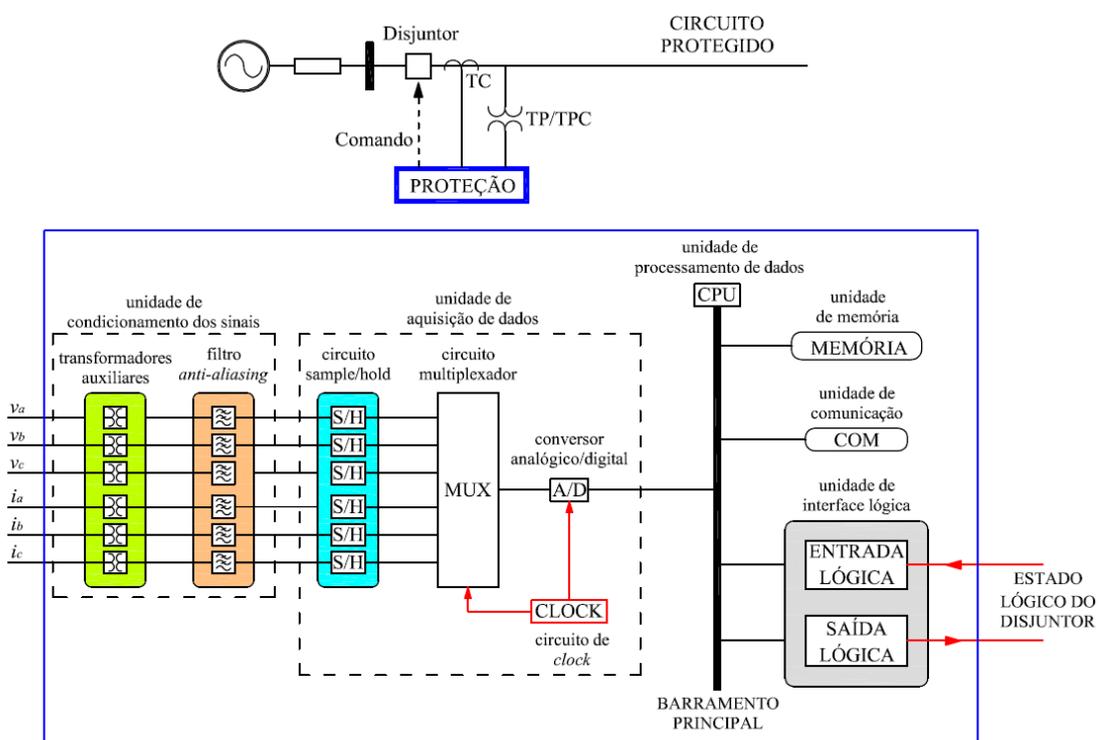


Figura 5.1 – Arquitetura básica de um relé microprocessado.

As unidades de condicionamento dos sinais e a unidade de aquisição de dados foram modeladas para contemplar as três tensões e as três correntes secundárias dos TPC e TC, respectivamente. Para implementar os filtros *anti-aliasing* fez-se uso de seis filtros passa-baixas de segunda ordem, com frequência de corte igual a 180 Hz. Os circuitos que realizam a amostragem dos sinais de tensão e corrente foram configurados para operar com frequência de amostragem de 960 Hz, que corresponde a 16 amostras por ciclo.

Contemplando as unidades de processamento de dados e memória, modelou-se no software CBuilder um bloco que implementa o algoritmo do Cosseno Modificado ABB, [HART *et al.*, 2000]. Neste bloco os dados de entrada são as variáveis relativas às tensões e correntes discretas no tempo, e os dados de saída consistem num grupo de doze variáveis que correspondem às seis grandezas de interesse –  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  expressas como um número complexo (partes real e imaginária) estimado mediante o algoritmo do Cosseno Modificado ABB.

Outra função desempenhada pelas unidades de processamento de dados e memória é o cálculo das impedâncias de sequência positiva ( $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ ,  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  e  $Z_{ca}$ ) que servirão de parâmetro para determinar a distância de localização de uma falta. Tal função foi modelada através de blocos pertencentes ao software RSCAD<sup>TM</sup> que realizam operações matemáticas com números complexos.

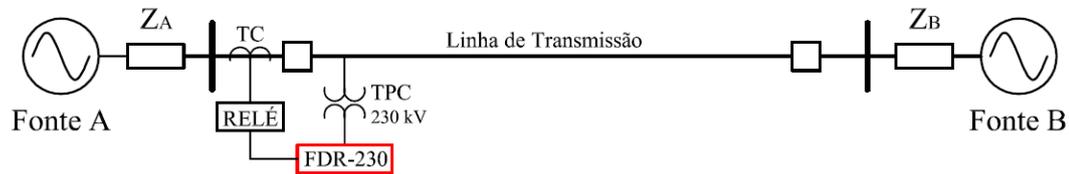
Após o cálculo das impedâncias de sequência positiva, chega-se ao último estágio de operação do relé, o processo de comparação das grandezas medidas com valores previamente armazenados na memória (valores de referência) para em seguida tomar a decisão de atuação ou não. Tal modelagem se deu mediante a utilização de blocos existentes no próprio RSCAD<sup>TM</sup>, software que acompanha o RTDS<sup>TM</sup>.

A lógica que dita o funcionamento do relé distância consiste em verificar se a impedância de operação é maior que a impedância de polarização, comparador de magnitude. Adicionalmente, foi implementado um modelo de relé, o qual foi proposto em SCHWEITEZER & ROBERTS [1993], baseado na atuação de um comparador do tipo cosseno com característica mho polarizada e com memória de tensão de sequência positiva.

### 5.1.2 Sistema Elétrico de 230 kV Adotado

Para avaliar o funcionamento dos FDR projetados para o TPC de 230 kV quando operando em conjunto com o relé de distância modelado serão utilizados dados de um sistema elétrico

real simplificado de 230 kV. Os dados de entrada do relé modelado serão os sinais de tensão e corrente secundárias dos modelos de TPC e TC, respectivamente, conforme ilustrado na figura a seguir.



**Figura 5.2 – Sistema elétrico de 230 kV adotado para avaliar o funcionamento do relé de distância modelado.**

Na modelagem foram utilizados dados de uma linha de transmissão de 180 km de extensão, cujos valores de resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero são correspondentes às de uma linha real de 230 kV. Os dados da linha e dos equivalentes das Fontes A e B são apresentados na Tabela 5.1.

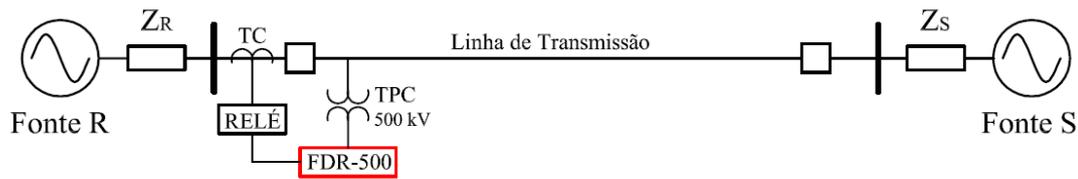
Na modelagem dos transformadores para instrumento adotou-se um modelo de TC (transformador de corrente) ideal com relação de transformação de corrente (RTC) igual a 2500:5; e o modelo de TPC apresentado no capítulo anterior para estudos de transitórios eletromagnéticos, cuja topologia do circuito equivalente foi apresentada na Figura 3.1.

**Tabela 5.1 – Dados do modelo do sistema elétrico 230 kV adotado para realizar as simulações.**

| Linha de Transmissão                           | Fonte A                               | Fonte B                               |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $L = 180 \text{ km}$                           | $V_A = 1,02 / 0^\circ$                | $V_B = 0,98 / 10^\circ$               |
| $Z_{L,0} = 0,532 + j 1,541 \ \Omega/\text{km}$ | $Z_{A,0} = 1,014 + j 18,754 \ \Omega$ | $Z_{B,0} = 1,127 + j 20,838 \ \Omega$ |
| $Y_{L,0} = j 2,293 \ \mu\text{S}/\text{km}$    |                                       |                                       |
| $Z_{L,1} = 0,098 + j 0,510 \ \Omega/\text{km}$ | $Z_{A,1} = 0,871 + j 25,661 \ \Omega$ | $Z_{B,1} = 0,968 + j 28,513 \ \Omega$ |
| $Y_{L,1} = j 3,252 \ \mu\text{S}/\text{km}$    |                                       |                                       |

### 5.1.3 Sistema Elétrico de 500 kV Adotado

De forma análoga a subseção anterior, um sistema elétrico simplificado de 500 kV foi modelado para avaliar o funcionamento dos FDR projetados para operar em conjunto como o TPC de 500 kV. Os dados de entrada do relé de distância modelado são os sinais de tensão e corrente secundárias dos modelos de TPC e TC, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 5.3.



**Figura 5.3 – Sistema elétrico de 500 kV adotado para avaliar o funcionamento do relé de distância modelado.**

Na modelagem foram utilizados dados de uma linha de transmissão, cujos valores de resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero são correspondentes às de uma linha real. Os dados da linha e dos equivalentes das Fontes *R* e *S* são apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Dados do modelo do sistema elétrico de 500 kV adotado para realizar as simulações.**

| Linha de Transmissão                             | Fonte R                                | Fonte S                                |
|--|--|--|
| $L = 240 \text{ km}$                             | $V_A = 1,00 / 0^\circ$                 | $V_B = 0,99 / -10^\circ$               |
| $Z_{L,0} = 0,3996 + j 0,9921 \ \Omega/\text{km}$ | $Z_{A,0} = 1,1268 + j 20,838 \ \Omega$ | $Z_{B,0} = 1,1268 + j 20,838 \ \Omega$ |
| $Y_{L,0} = j 3,0839 \ \mu\text{S}/\text{km}$     |  |  |
| $Z_{L,1} = 0,0333 + j 0,3170 \ \Omega/\text{km}$ | $Z_{A,1} = 0,9681 + j 28,513 \ \Omega$ | $Z_{B,1} = 0,9681 + j 28,513 \ \Omega$ |
| $Y_{L,1} = j 5,2033 \ \mu\text{S}/\text{km}$     |  |  |

Na modelagem dos transformadores para instrumento adotou-se um modelo de TC ideal com RTC igual a 2000:5; e o modelo de TPC apresentado no capítulo anterior.

#### 5.1.4 Resultados para Análises de Proteção de Distância

Foi utilizando o software RSCAD<sup>TM</sup> do RTDS<sup>TM</sup> para modelar os sistemas elétricos de 230 e 500 kV, os FDR de 230 e 500 kV, bem como as unidades de processamento do modelo de relé de proteção de distância, considerando a característica mho polarizada com memória de tensão de sequência positiva. Para os casos implementados foi desenvolvida uma lógica de controle de falta capaz de realizar em tempo real todos os tipos de faltas, fase-terra, entre fases ou entre as fases e a terra, além de controlar o ângulo de incidência, o tempo de duração e a impedância da falta.

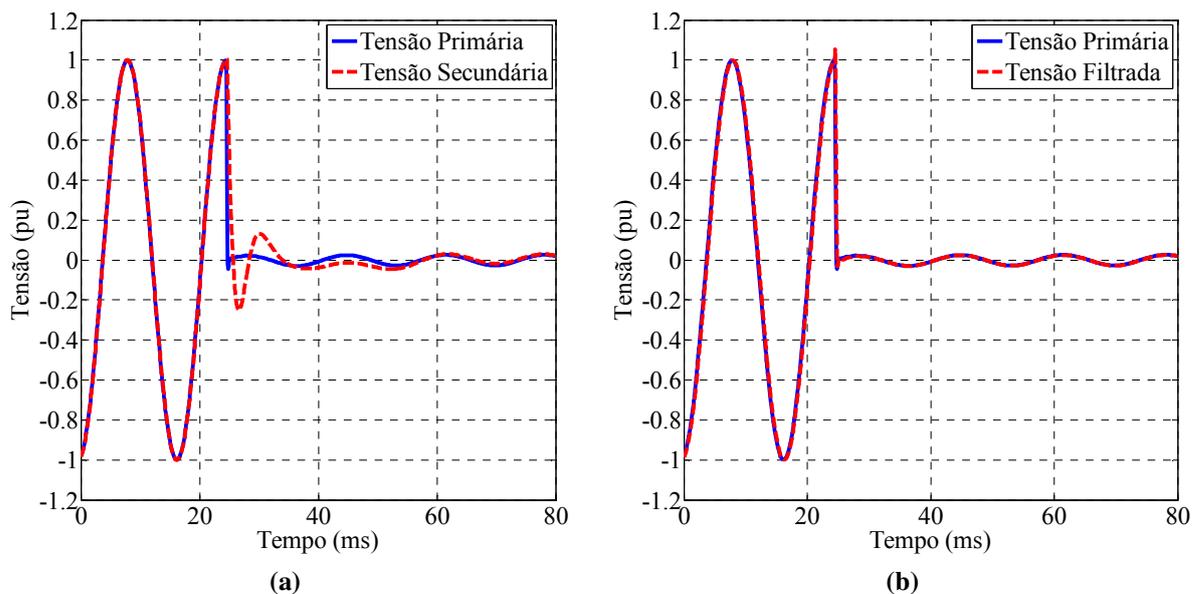
Após ter modelado os sistemas elétricos simplificados de 230 e 500 kV, e as unidades de processamento do relé de proteção de distância, simulações de falta foram realizadas para analisar o comportamento dos fasores das tensões diante da ocorrência de faltas – faltas

iniciadas tanto no pico como no zero da tensão. A seguir são apresentados os resultados obtidos.

- Sistema Elétrico de 230 kV

Os registros de uma simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão são apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5, na Figura 5.4 são apresentadas as formas de ondas das tensões primária, secundária e secundária filtrada do TPC 230 kV. Os fasores obtidos a partir das tensões apresentadas na Figura 5.4 são destacados na Figura 5.5. A partir das citadas figuras é possível identificar a redução dos erros de medição devido a presença do TPC de 230 kV.

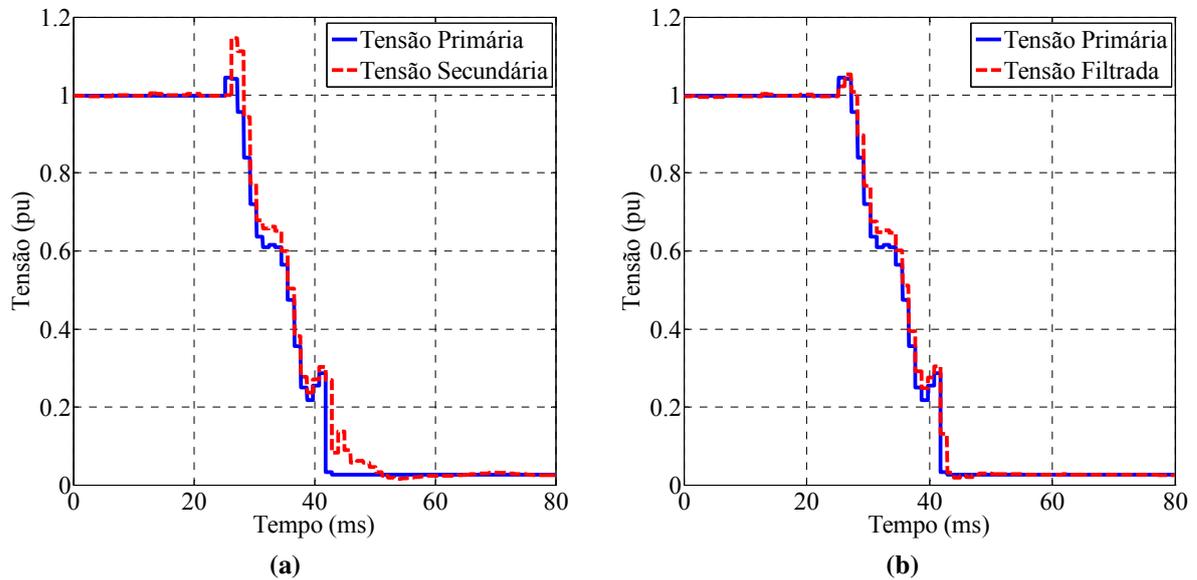
Nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentados os registros de uma simulação de falta iniciada no zero da tensão primária, a partir das figuras observa-se que a presença dos FDR reduzem significativamente o impacto da resposta transitória da tensão secundária do TPC de 230 kV.



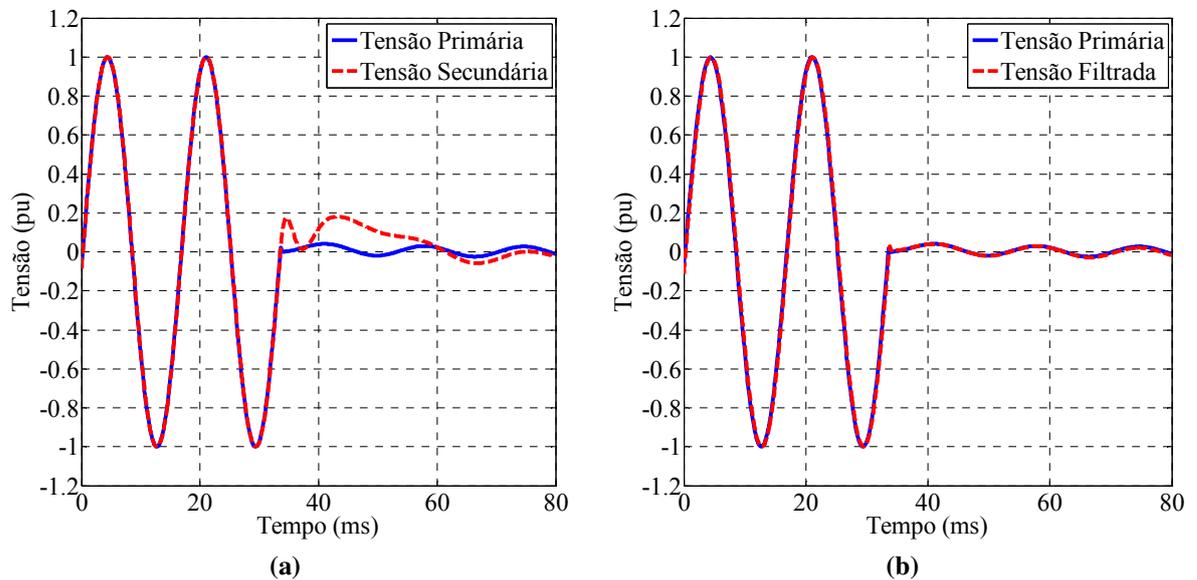
**Figura 5.4 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão: (a) Formas de onda da tensão primária e tensão secundária do TPC de 230 kV; (b) Formas de onda da tensão primária e tensão secundária filtrada pelo FDR.**

Os resultados apresentados evidenciam a primeira contribuição do método proposto: a tensão secundária filtrada se aproxima de uma réplica da tensão primária do TPC, fazendo com que os cálculos dos fasores das tensões sejam cada vez menos afetados pelos erros de medições causados pela resposta transitória do TPC. Portanto, o desempenho dos FDR projetados têm se mostrado eficaz na redução da resposta transitória do TPC diante de diferentes condições de falta. Desta forma, conclui-se que a presença do FDR operando em conjunto com um relé

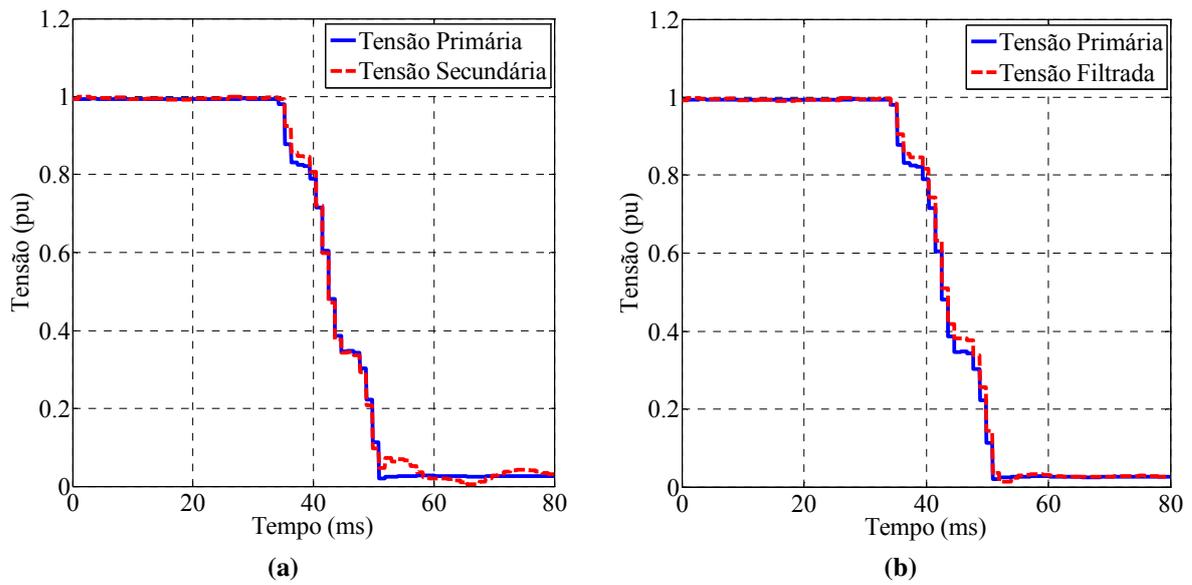
de proteção de distância possibilitará atuações mais seguras do sistema de proteção, proporcionando melhor seletividade e confiabilidade – independente da condição de falta.



**Figura 5.5 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão: (a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR.**



**Figura 5.6 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão: (a) Formas de onda das tensão primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Formas de onda das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR.**



**Figura 5.7 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão: (a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 230 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR.**

Para quantificar os resultados apresentados adotou-se as Expressões 5.1 e 5.2 para calcular o erro médio presente em cada registro após o início da falta. Para tanto, será analisado os valores das tensões secundária e secundária filtrada tendo como referência a tensão primária,

$$E_{SEM\ FDR} = \frac{1}{N - m} \sum_{i=m}^N \frac{|V_S(i) - V_P(i)|}{|V_P(i)|}, \quad (5.1)$$

$$E_{COM\ FDR} = \frac{1}{N - m} \sum_{i=m}^N \frac{|V_C(i) - V_P(i)|}{|V_P(i)|}. \quad (5.2)$$

Sendo:  $E_{SEM\ FDR}$  o erro calculado sem a presença do FDR,  $E_{COM\ FDR}$  o erro calculado com a presença do FDR,  $N$  o número de amostras analisadas,  $m$  o número de amostras após a ocorrência da falta, e por fim,  $V_P(i)$ ,  $V_S(i)$  e  $V_C(i)$  são as amostras das tensões primária, secundária e secundária filtrada, respectivamente.

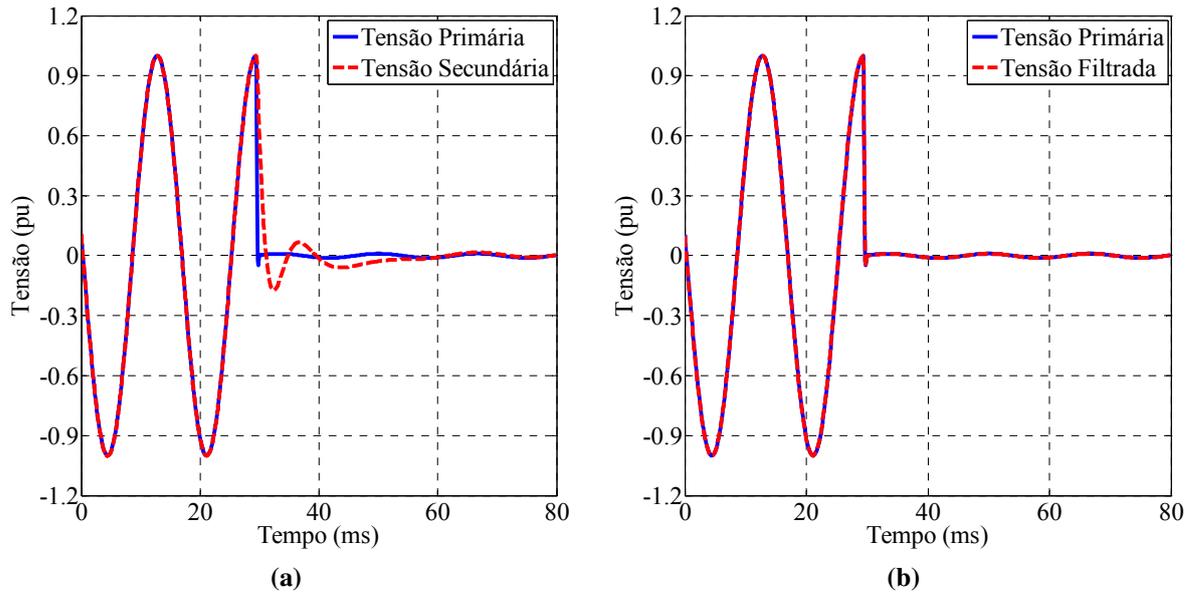
Na Tabela 5.3 apresentam-se os erros associados aos registros obtidos para o sistema elétrico de 230 kV, nela observa-se que a presença do FDR reduz significativamente o erro associado a tensão secundária do TPC, independente de qual seja a referência de início da falta.

**Tabela 5.3 – Erro médio calculado para o sistema elétrico de 230 kV.**

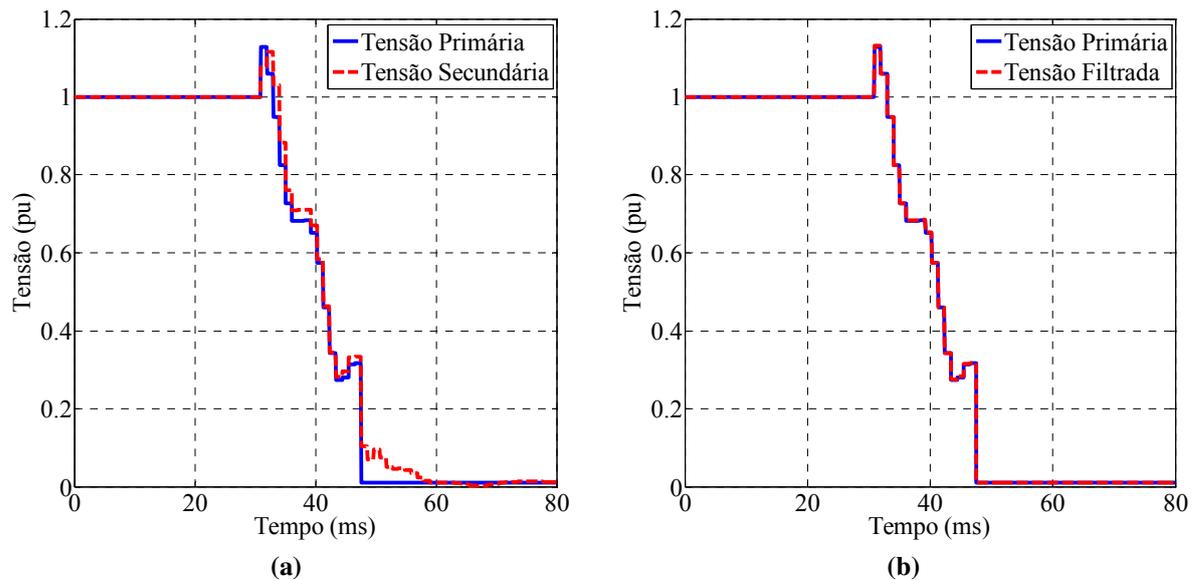
| Início da Falta | $E_{SEM\ FDR}$ | $E_{COM\ FDR}$ |
|-----------------|----------------|----------------|
| Zero da Tensão  | 70,8415        | 3,6984         |
| Pico da Tensão  | 48,0233        | 1,2581         |

- Sistema Elétrico de 500 kV

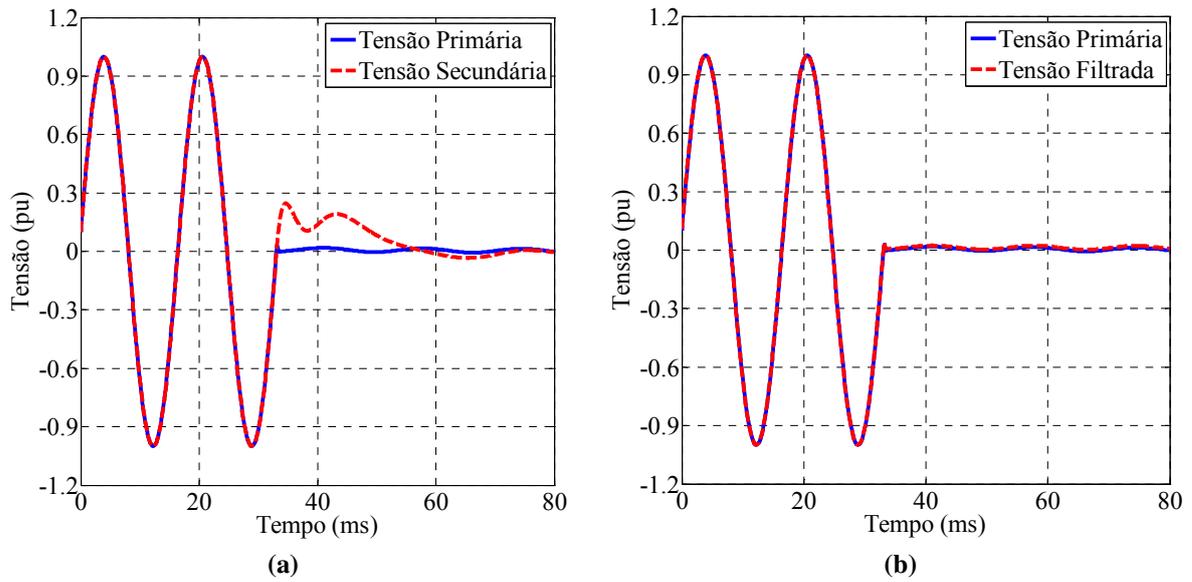
Semelhante ao estudo de caso apresentado anteriormente, simulações de falta fase-terra iniciadas no pico e no zero da tensão primária do TPC de 500 kV foram realizadas para o sistema elétrico de 500 kV. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, onde são destacadas as formas de onda das tensões de interesse e seus respectivos fasores.



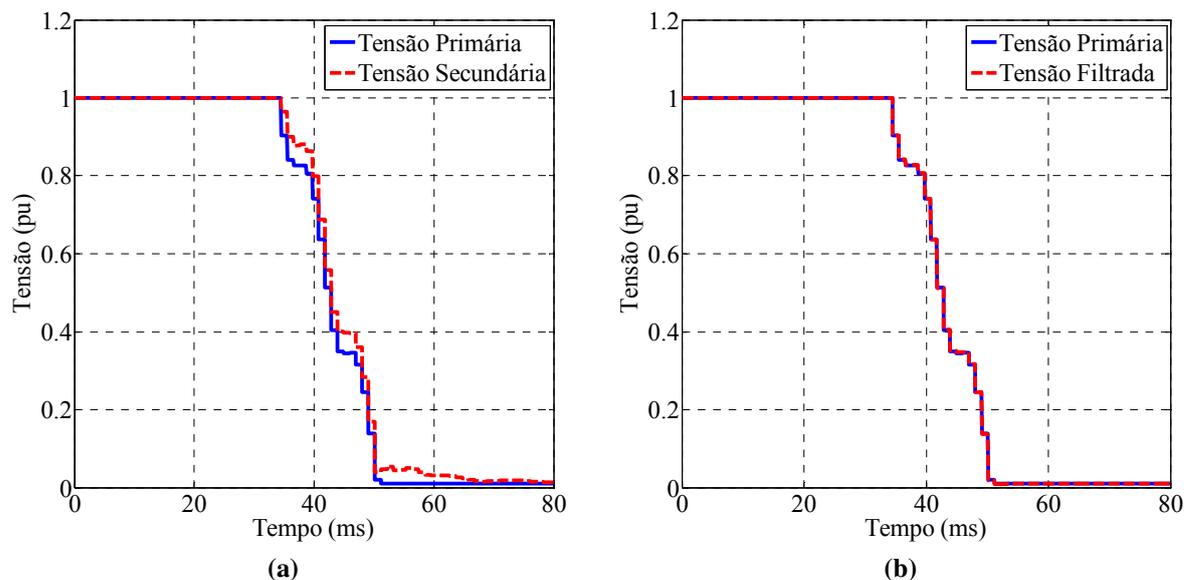
**Figura 5.8 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão: (a) Formas de onda das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Formas de onda das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR.**



**Figura 5.9 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no pico da tensão: (a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Fasores das tensão primária e secundária filtrada pelo FDR.**



**Figura 5.10 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão: (a) Formas de onda das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Formas de onda das tensão primária e secundária filtrada pelo FDR.**



**Figura 5.11 – Registro de simulação de falta fase-terra iniciada no zero da tensão: (a) Fasores das tensões primária e secundária do TPC de 500 kV; (b) Fasores das tensões primária e secundária filtrada pelo FDR.**

Em termos quantitativos, na Tabela 5.3 são apresentados os erros associados aos registros obtidos para o sistema elétrico de 500 kV, na mesma observa-se que a presença do FDR reduz significativamente o erro associado a tensão secundária do TPC, independente de qual seja a referência de início da falta. Neste caso o erro é reduzido em aproximadamente dez vezes.

**Tabela 5.4 – Erro médio calculado para o sistema elétrico de 500 kV.**

| Início da Falta | $E_{SEM\ FDR}$ | $E_{COM\ FDR}$ |
|-----------------|----------------|----------------|
| Zero da Tensão  | 1005,37        | 107,7304       |
| Pico da Tensão  | 39,3991        | 0,3026         |

Os resultados obtidos com os FDR projetados para os TPC de 230 e de 500 kV ao longo desta etapa de avaliação comprovam a redução do impacto da resposta transitória dos TPC a partir da filtragem da tensão secundária. Geralmente observa-se que as faltas iniciadas no zero da tensão proporcionam tensões transitórias mais significantes, analisando os resultados obtidos, percebe-se que em todos os casos o uso dos FDR promovem maior exatidão das medições realizadas pelos TPC para o qual foi projetado. Diante de tal fato espera-se reduzir os tempos de decisão dos relés de proteção de distância a partir da realização de medições de tensão mais exatas.

No geral, dependendo do modelo de TPC utilizado, as respostas transitórias destes equipamentos irão exercer influência maior ou menor sobre o desempenho da proteção de distância e, conseqüentemente, as melhorias provenientes da filtragem dos sinais secundários dos TPC poderão ser mais ou menos significantes. Mesmo assim, diante dos resultados apresentados, verifica-se que o uso dos FDR apenas contribui para o desempenho mais eficiente dos sistemas de proteção, possivelmente podendo melhorar tanto o tempo de tomada de decisão dos relés quanto à segurança da proteção de distância, utilizada em linhas de transmissão.

## 5.2 Análise de Localização de Falta

O método de localização de faltas baseado em componentes fundamentais é referenciado como um dos mais exatos disponíveis na literatura, visto que é imune ao efeito capacitivo das linhas de transmissão e à resistência de falta. Desta forma, será avaliado o impacto da resposta transitória dos TPC sobre métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais através do desempenho do algoritmo de dois terminais proposto por JOHNS & JAMALI [1990].

Para facilitar a compreensão do método avaliado, adotou-se o sistema elétrico equivalente esquematizado na Figura 5.12, o qual tem a mesma configuração apresentada para na subseção 5.1.2. Considerando uma falta localizada a uma distância  $d$  da Barra A, propõe-se que a localização do defeito seja estimada pela Equação 5.1. Sendo,  $\hat{V}_E$ ,  $\hat{V}_R$ ,  $\hat{I}_E$  e  $\hat{I}_R$  são os

fasores das tensões e correntes modais (modos aéros) nas barras emissora (da esquerda) e receptora (da direita), respectivamente,  $Z_C$  é a impedância característica da linha definida pela Equação 5.2, e  $\gamma$  é a constante de propagação da linha calculada pela Equação 5.3, na qual  $\omega$  é a frequência angular do sistema e  $r$ ,  $l$ ,  $g$  e  $c$  são a resistência série, indutância série, condutância *shunt* e capacitância *shunt* da linha, por unidade de comprimento, respectivamente. Neste método a distância de localização da falta é estimada a partir da barra emissora (da esquerda).



Figura 5.12 – Sistema elétrico de 230 kV adotado para avaliar o estudo de localização de falta.

$$d = \frac{\tanh^{-1} \left[ \frac{\hat{V}_A - \hat{V}_B \cosh(\gamma L) + Z_C \hat{I}_B \sinh(\gamma L)}{Z_C \hat{I}_A - \hat{V}_A \sinh(\gamma L) + Z_C \hat{I}_B \cosh(\gamma L)} \right]}{\gamma} \quad (5.1)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (5.2)$$

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \quad (5.3)$$

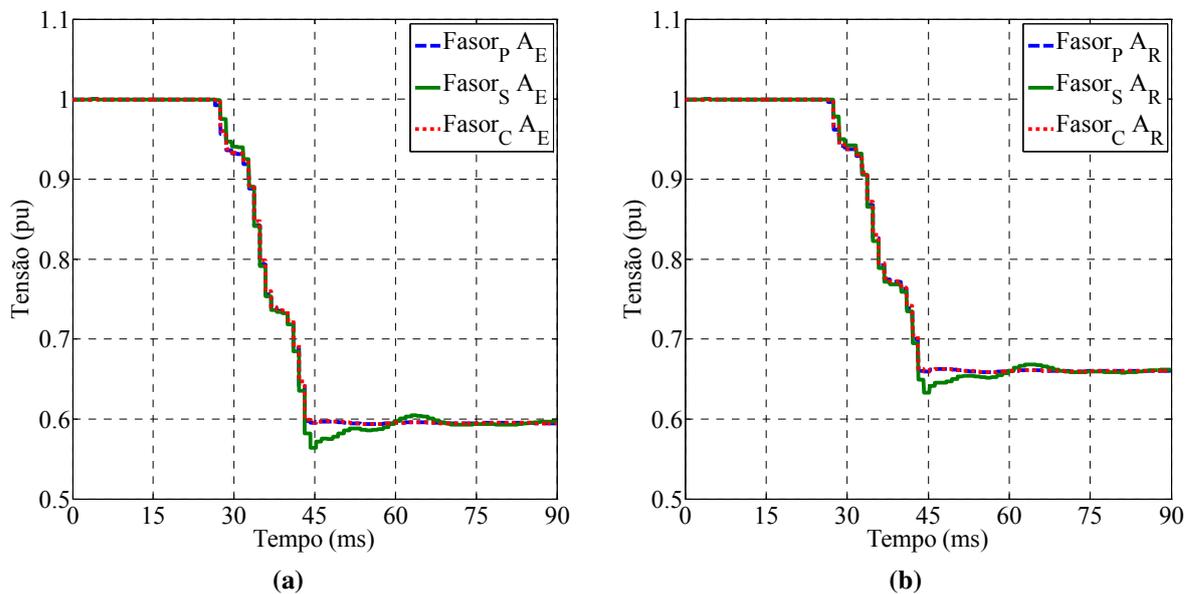
Para avaliar apenas a influência dos TPC sobre o citado método de localização de faltas e analisar os possíveis benefícios que os FDR poderão proporcionar, os TC do sistema foram modelados como ideais, evitando-se problemas de saturação ou de desvios de módulo e fase das correntes requeridas para cálculo de  $d$  usando a Equação 5.1.

A influência dos erros provenientes da resposta transitória dos TPC sobre a localização de faltas baseada na análise de componentes fundamentais é avaliada por meio de simulações digitais via RTDS<sup>TM</sup>. Para viabilizar a localização de faltas baseada em dados de dois terminais, assume-se a existência de IED nos terminais da linha, cujos relógios se encontram perfeitamente sincronizados. A comunicação entre os IED é realizada por meio de um canal de comunicação confiável, através do qual são trocadas informações dos fasores das tensões e correntes medidos nas extremidades da linha de transmissão.

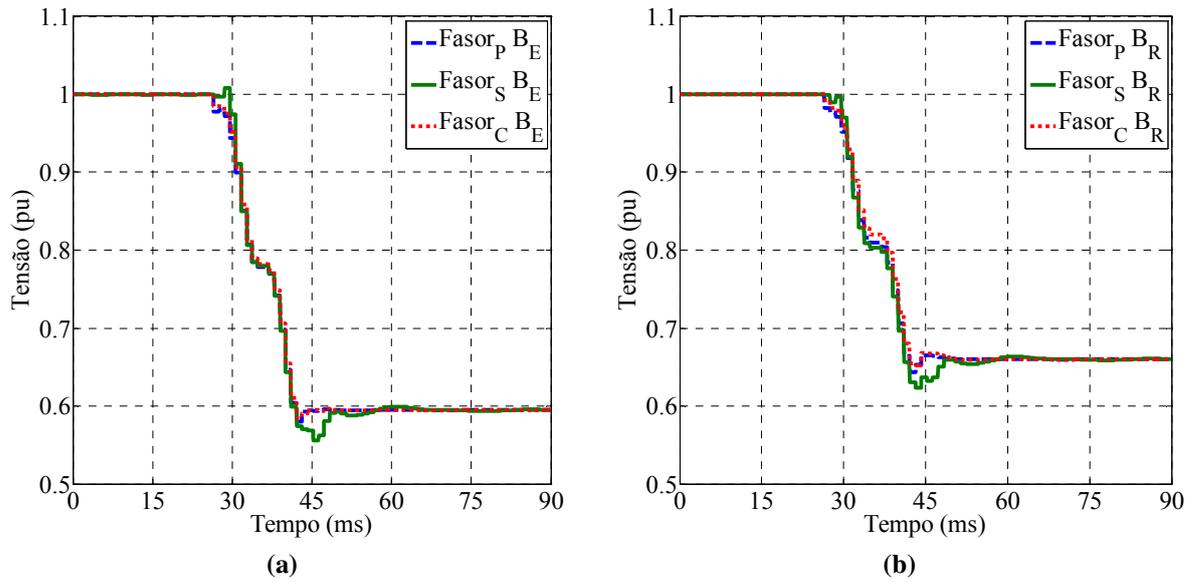
As análises são realizadas considerando diferentes condições de faltas, com ângulos de incidência  $0^\circ$  tendo como referência a fase A do sistema, considerando o SIR (*System Impedance Ratio*) nas barras igual ao do sistema original. Para o sistema elétrico de 230 kV foram simuladas faltas a uma distância 40% e 80% da barra emissora. Já para o sistema elétrico de 500 kV foram simuladas faltas a uma distância 45% e 85% da barra emissora. Para cada caso, são calculadas as localizações  $d_p$ ,  $d_s$  e  $d_c$ , as quais são obtidas por meio da aplicação do método de localização de faltas avaliado considerando as tensões primárias, secundárias e secundárias filtradas via FDR, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

✓ Estudo de Caso 01: Falta ABCT à 40% da linha de 230 kV

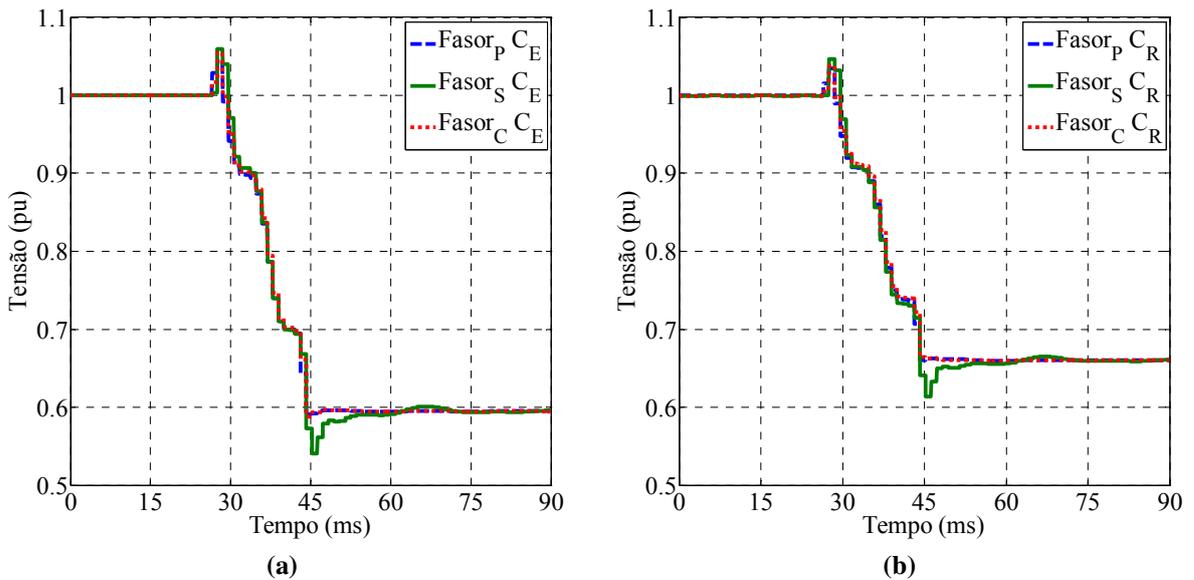
No presente estudo de caso foi simulada uma falta trifásica para terra localizada à 72 km (40%) da barra emissora. Nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresenta-se os fasores das tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária (Fasor<sub>P</sub>), secundária (Fasor<sub>S</sub>) e secundária filtrada (Fasor<sub>C</sub>).



**Figura 5.13 – Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**

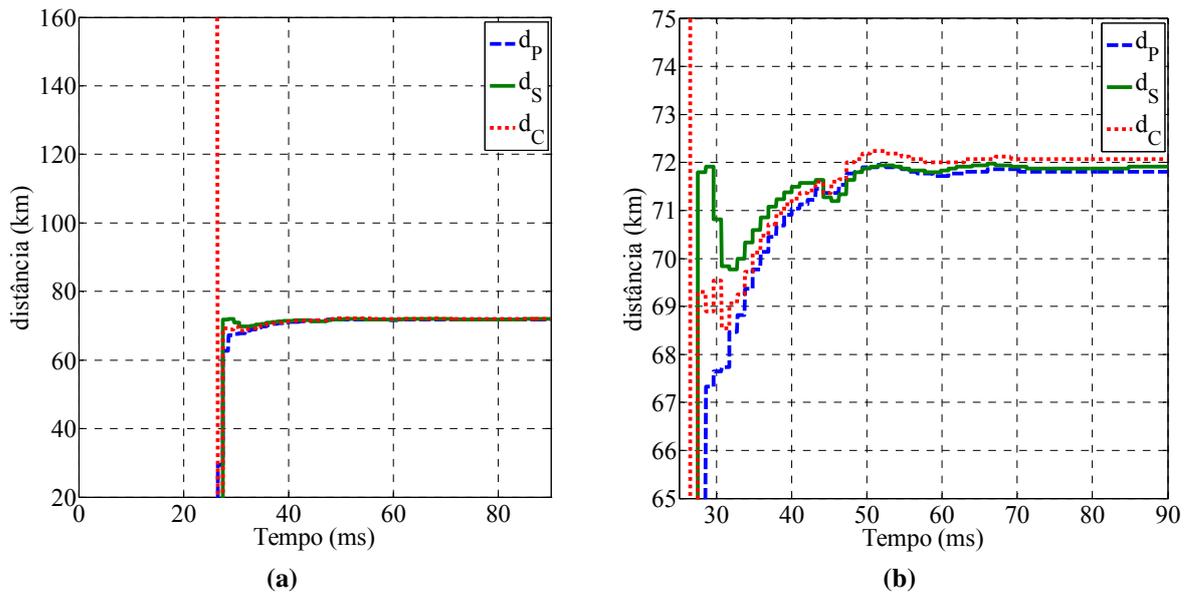


**Figura 5.14 – Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**



**Figura 5.15 – Registro de simulação de falta ABCT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**

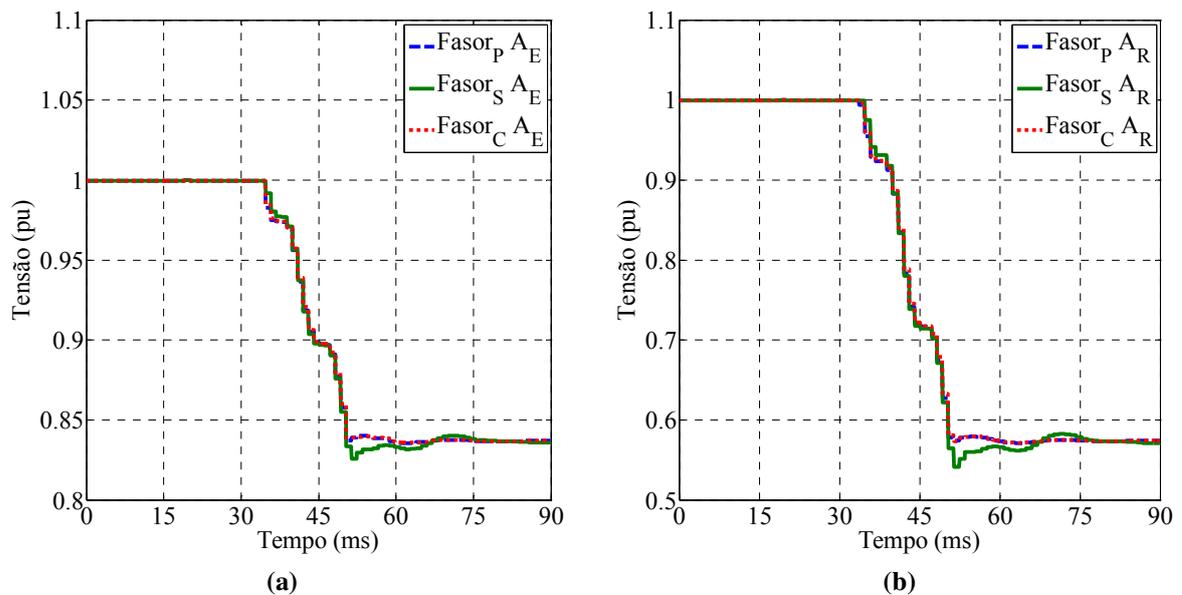
Na Figura 5.16 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta  $d_p$ ,  $d_s$  e  $d_c$ , calculadas a partir das tensões primárias, secundárias e secundárias filtradas via FDR, respectivamente. A partir das figuras apresentadas neste estudo de caso, verifica-se que embora a presença dos FDR possibilitem a realização de medições mais exatas, os erros causados pelas tensões transitórias do TPC de 230 kV, em estudo, não comprometeria o funcionamento do método utilizado para localização de faltas.



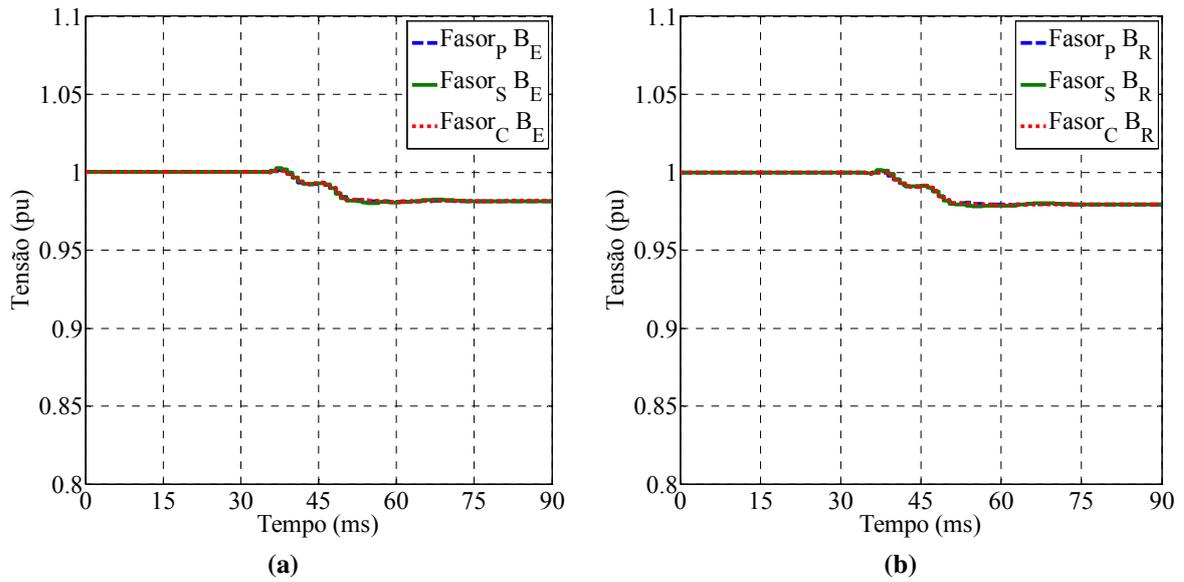
**Figura 5.16 – Registro de simulação de falta ABCT: (a) Comportamento das variáveis  $d_P$ ,  $d_S$  e  $d_C$ ; (b) Detalhe.**

✓ Estudo de Caso 02: Falta AT à 80% da linha de 230 kV

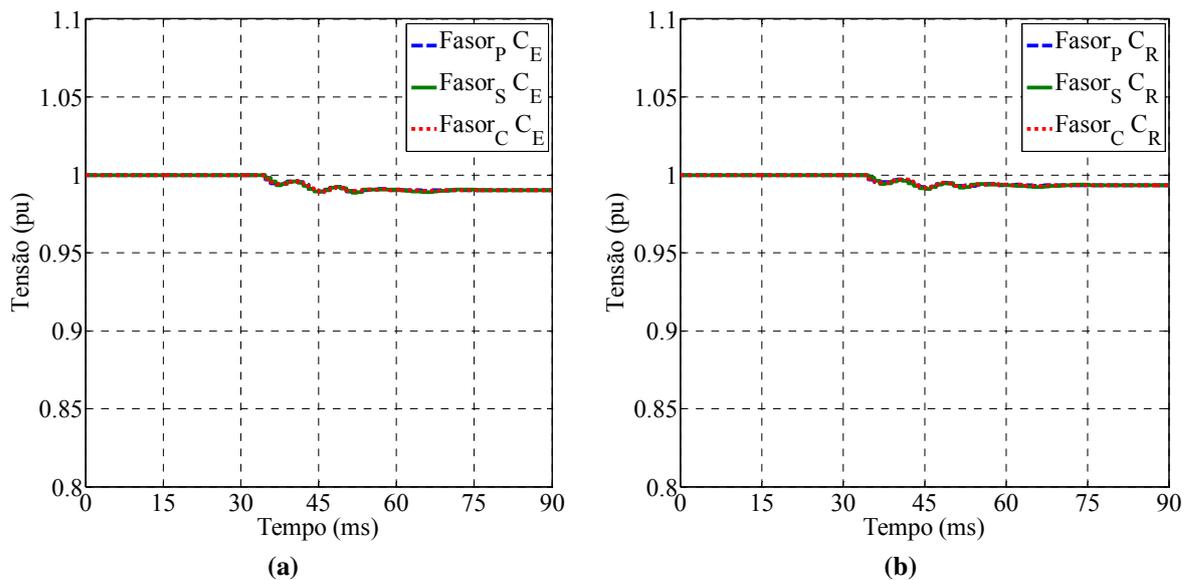
No caso em foco foi simulada uma falta da fase A para terra localizada à 144 km (80%) da barra emissora. Nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 apresenta-se os fasores das tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária (Fasor<sub>P</sub>), secundária (Fasor<sub>S</sub>) e secundária filtrada (Fasor<sub>C</sub>).



**Figura 5.17 – Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**



**Figura 5.18 – Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**



**Figura 5.19 – Registro de simulação de falta AT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**

O comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta  $d_p$ ,  $d_s$  e  $d_c$ , calculadas a partir das tensões primárias, secundárias e secundárias filtradas via FDR, é apresentado na Figura 5.20. Embora o uso dos FDR propicie obter medições mais exatas, resultando assim no cálculo de fasores mais confiáveis, os resultados apresentados para os estudos de caso indicam que a resposta transitória do TPC de 230 kV analisado não compromete o funcionamento do método de localização avaliado.

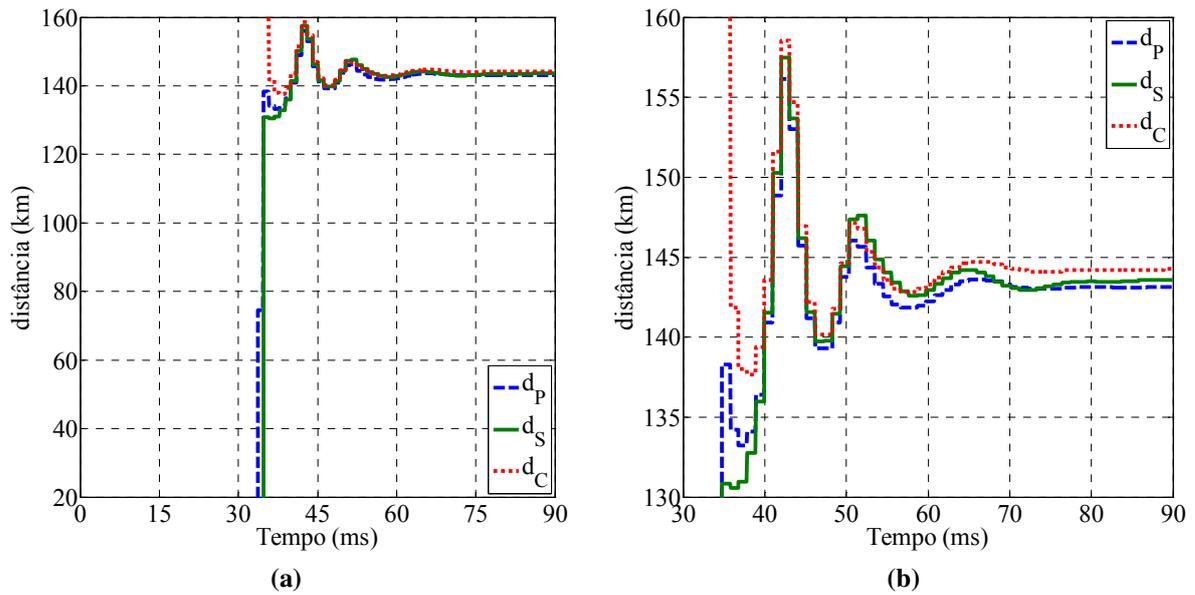


Figura 5.20 – Registro de simulação de falta AT: (a) Comportamento das variáveis  $d_p$ ,  $d_s$  e  $d_c$ ; (b) Detalhe.

✓ Estudo de Caso 03: Falta BT à 55% da linha de 500 kV

Para o sistema de 500 kV foi simulada uma falta da fase B para terra localizada à 132 km (55%) da barra emissora. Nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresenta-se os fasores das tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária (Fasor<sub>P</sub>), secundária (Fasor<sub>S</sub>) e secundária filtrada (Fasor<sub>C</sub>).

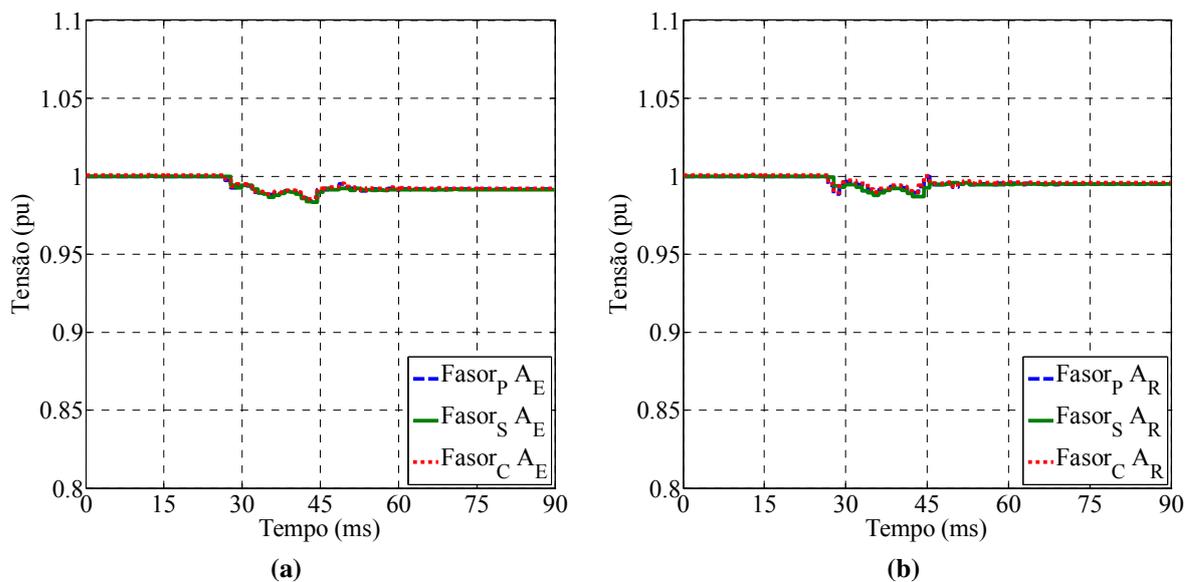


Figura 5.21 – Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.

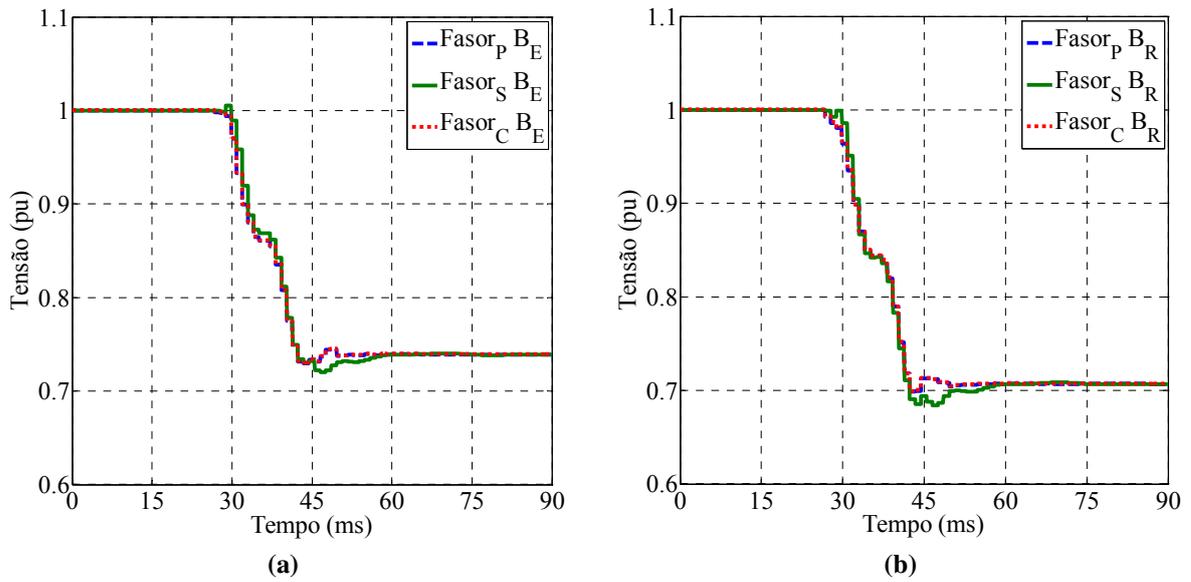


Figura 5.22 – Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.

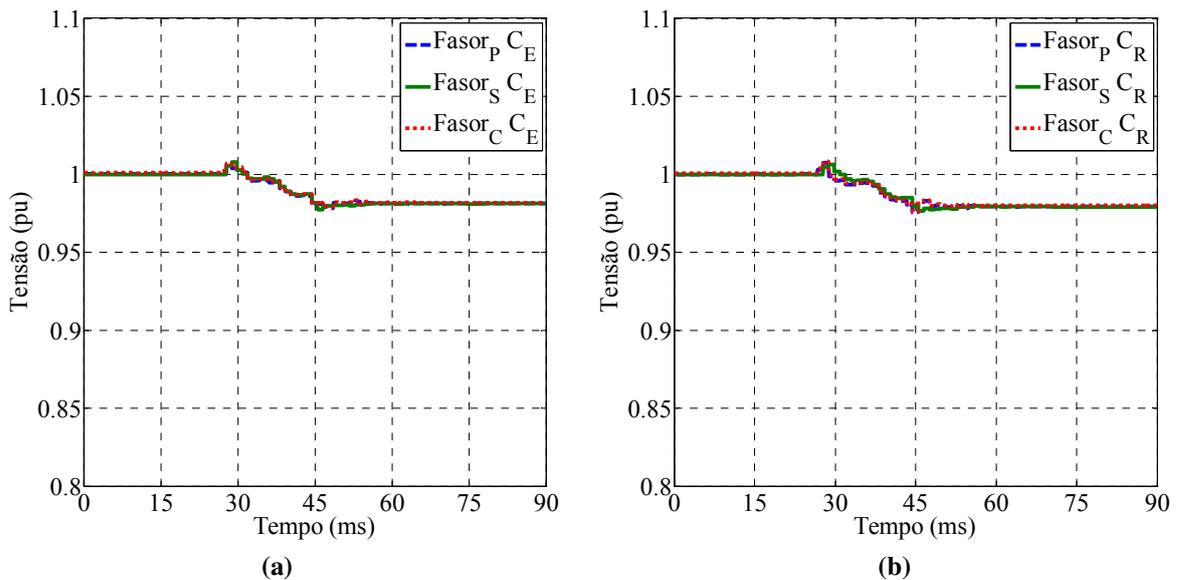


Figura 5.23 – Registro de simulação de falta BT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.

Na Figura 5.24 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta  $d_P$ ,  $d_S$  e  $d_C$ .

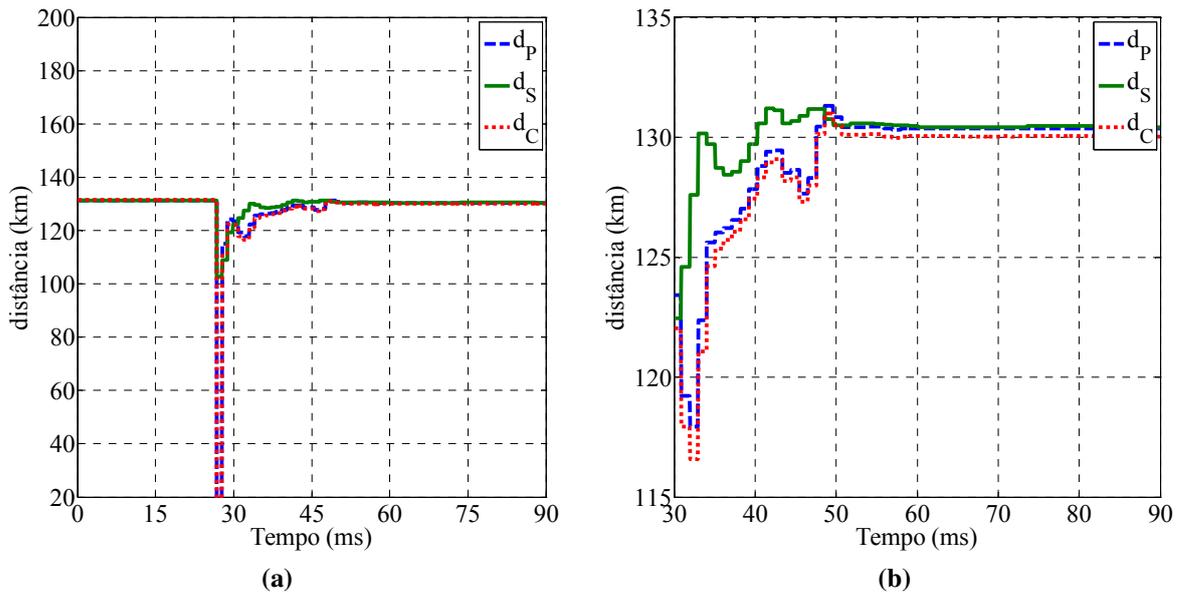


Figura 5.24 – Registro de simulação de falta BT: (a) Comportamento das variáveis  $d_P$ ,  $d_S$  e  $d_C$ ; (b) Detalhe.

✓ Estudo de Caso 04: Falta CT à 85% da linha de 500 kV

Para concluir as análises de localização de faltas foi simulada uma falta da fase C para terra localizada à 204 km (85%) da barra emissora. Nas Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresenta-se os fasores das tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária (Fasor<sub>P</sub>), secundária (Fasor<sub>S</sub>) e secundária filtrada (Fasor<sub>C</sub>). E na Figura 5.28 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta  $d_P$ ,  $d_S$  e  $d_C$ .

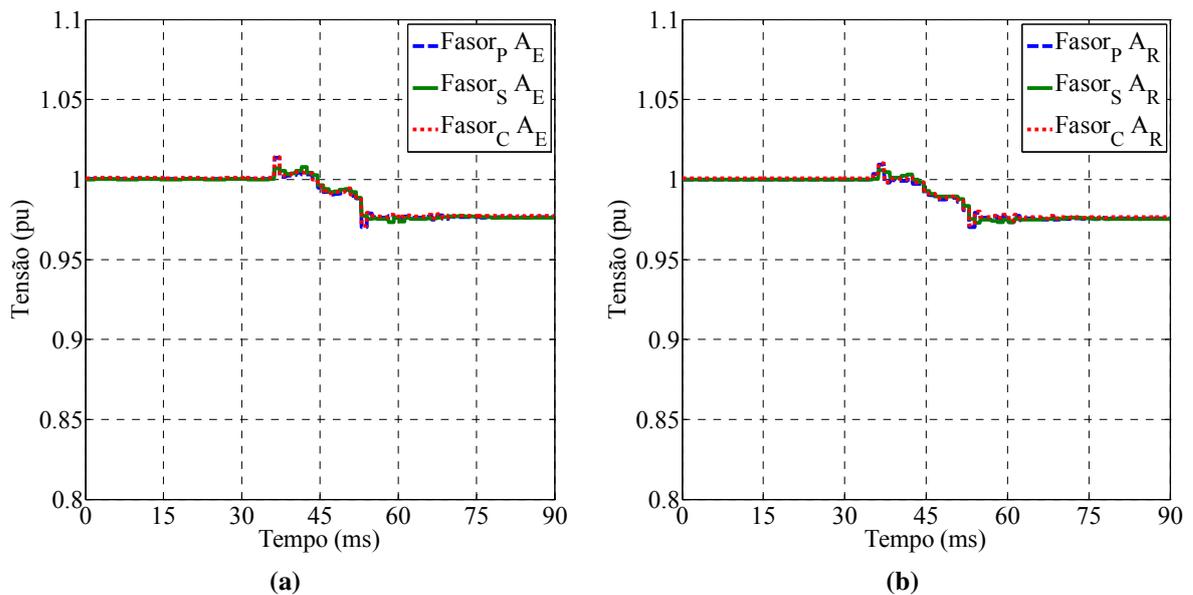
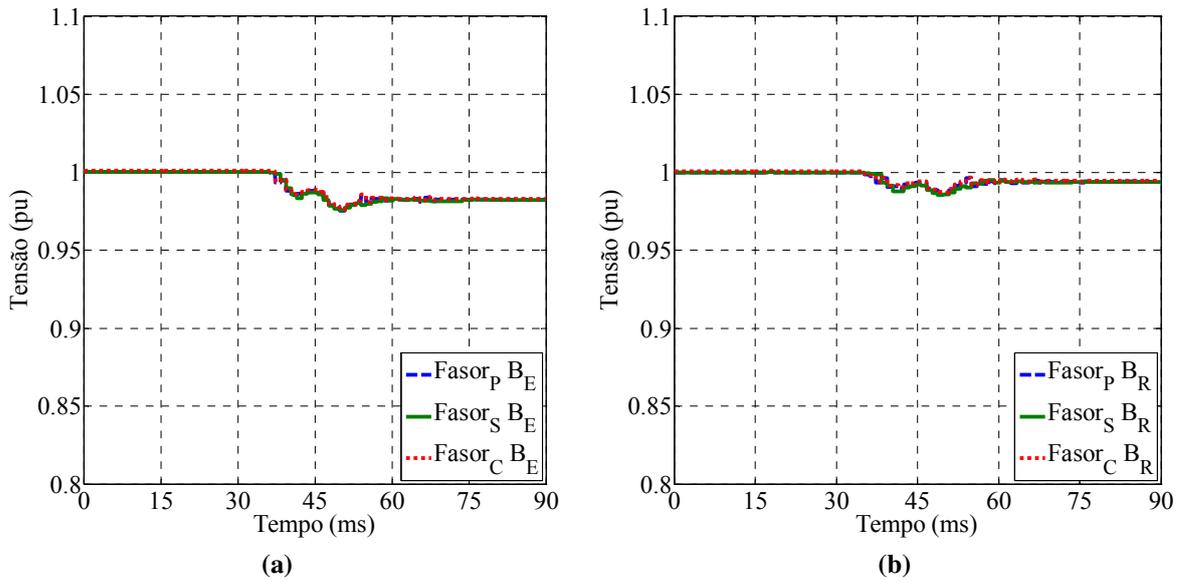
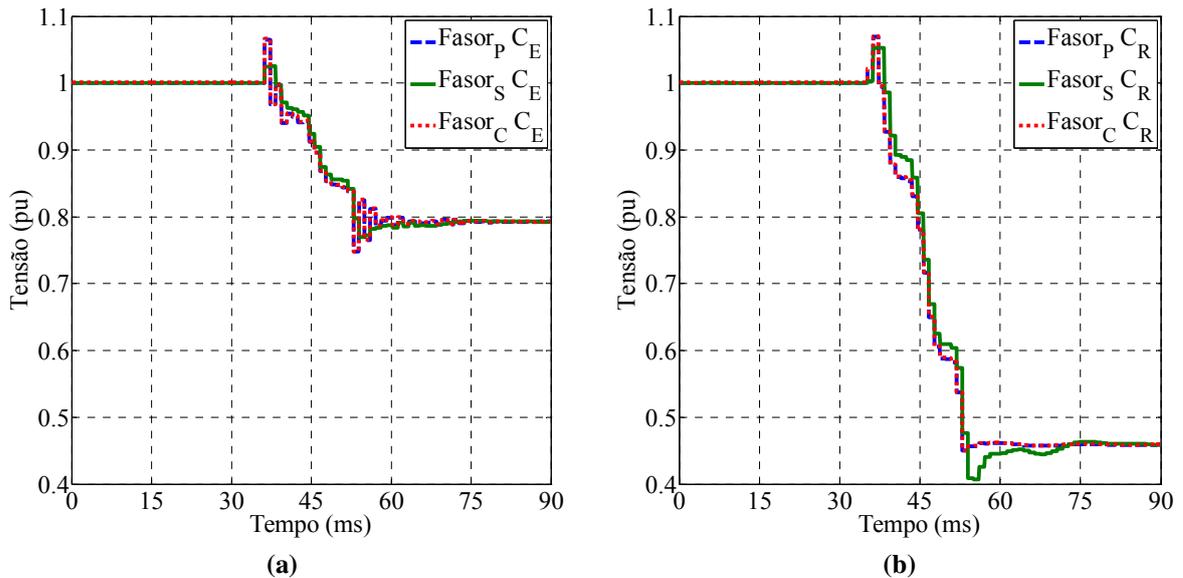


Figura 5.25 – Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase A: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.



**Figura 5.26 – Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase B: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**



**Figura 5.27 – Registro de simulação de falta CT: (a) Fasores das tensões primária, secundária e secundária filtrada pelo FDR na fase C: (a) Barra emissora; (b) Barra receptora.**

Embora a eficiência dos FDR seja evidente para redução da resposta transitória dos TPC de 230 e 500 kV analisados, os resultados apresentados foram obtidos avaliando-se apenas métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais. Desta forma, para outros modelos de TPC ou considerando outros algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes de alta frequência e na teoria das ondas viajantes os benefícios da correção da tensão secundária dos TPC podem ser ainda mais expressivos.

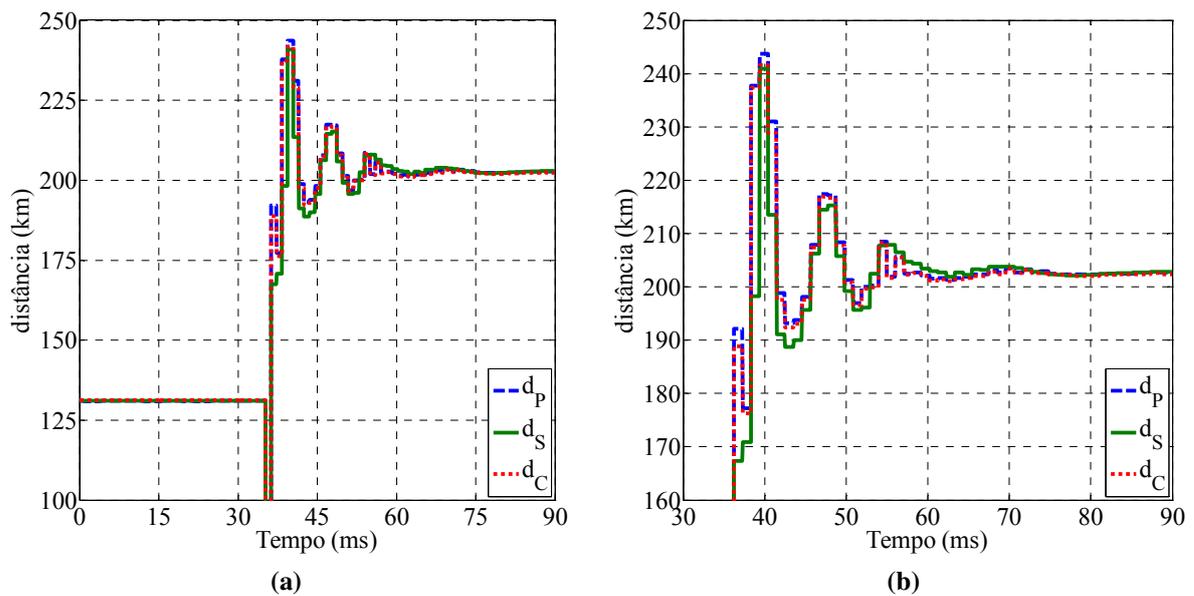


Figura 5.28 – Registro de simulação de falta CT: (a) Comportamento das variáveis  $d_P$ ,  $d_S$  e  $d_C$ ; (b) Detalhe.

### 5.3 Resultados para Análises de Medição

Teoricamente os TPC deveriam reproduzir fielmente a tensão primária em seu secundário. Porém na prática, os TPC não reproduzem de forma fidedigna a tensão do primário nos terminais secundários quando há ocorrência de manobras no sistema ou mesmo quando os sinais aplicados ao primário possuem frequência diferente da nominal do sistema. Desta forma, esses equipamentos podem proporcionar operações mal sucedidas por parte dos equipamentos de proteção.

Para ilustrar o impacto do uso dos FDR sobre o possível monitoramento de harmônicos ou subharmônicos nos sistemas elétricos de potência avalia-se os casos de extinção de uma falta tanto no sistema de 230 kV como no sistema de 500 kV. Na Figura 5.29a são apresentadas a tensão primária ( $V_P$ ) e tensão secundária ( $V_S$ ) do TPC de 230 kV, e na Figura 5.29b apresenta-se o comportamento da tensão primária ( $V_P$ ) e a correspondente tensão secundária filtrada pelos FDR ( $V_C$ ). Os detalhes do fenômeno transitório na tensão podem ser visualizados na Figura 5.30.

Os resultados apresentados podem ser considerados como um caso de teste extremo devido ao elevado nível de distorção da forma de onda apresentada no primário do TPC em estudo. Desta forma, comprova-se a boa atuação dos FDR projetados.

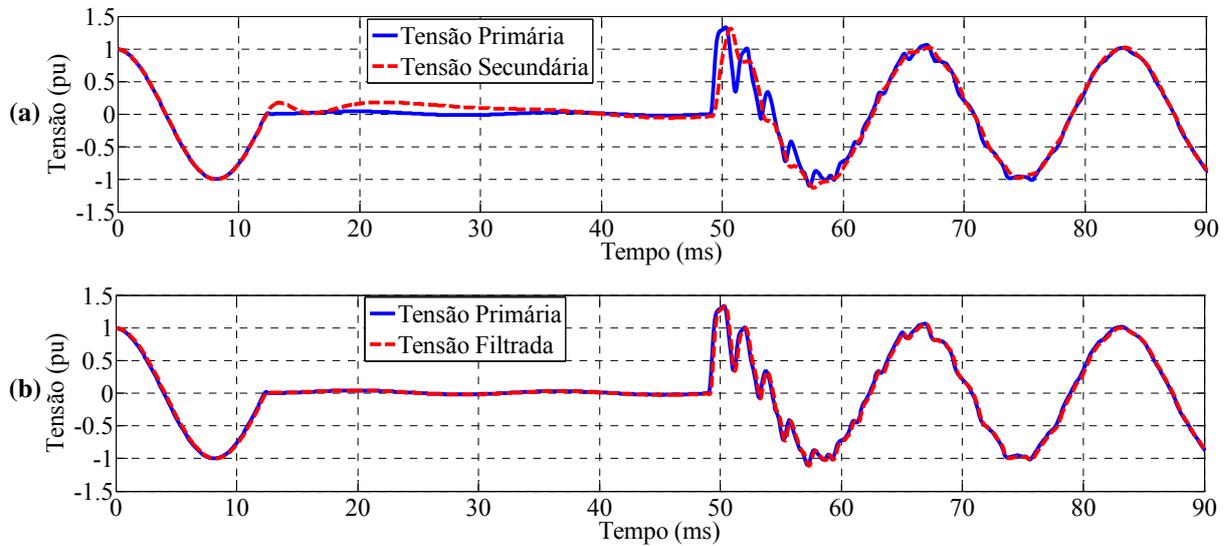


Figura 5.29 – Simulação de extinção de falta, sistema de 230 kV: (a)  $V_P$  e  $V_S$ ; (b)  $V_P$  e  $V_C$ .

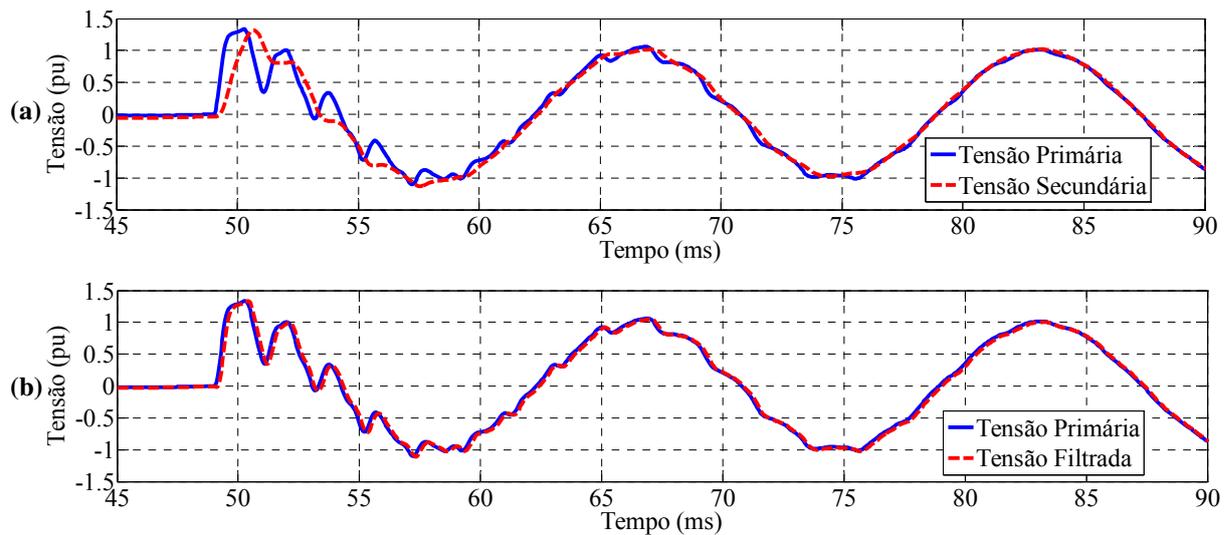


Figura 5.30 – Detalhe de simulação de extinção de falta, sistema de 230 kV: (a)  $V_P$  e  $V_S$ ; (b)  $V_P$  e  $V_C$ .

Para o caso do sistema de 500 kV são apresentadas a tensão primária ( $V_P$ ) e tensão secundária ( $V_S$ ) do TPC de 500 kV na Figura 5.31a. Na Figura 5.31b apresenta-se o comportamento da tensão primária ( $V_P$ ) e a correspondente tensão secundária filtrada pelos FDR ( $V_C$ ), o detalhe transitório é evidenciado na Figura 5.32.

Análogo ao caso do sistema elétrico de 230 kV, os resultados obtidos para o sistema elétrico de 500 kV comprovam que os FDR também poderão ser usados para monitorar harmônicos ou subharmônicos em sistemas de potência proporcionando mais exatidão ao sistema de medição, dispensando o uso de equipamentos específicos para tal fim [TANASKOVIC *et al.*, 2005].

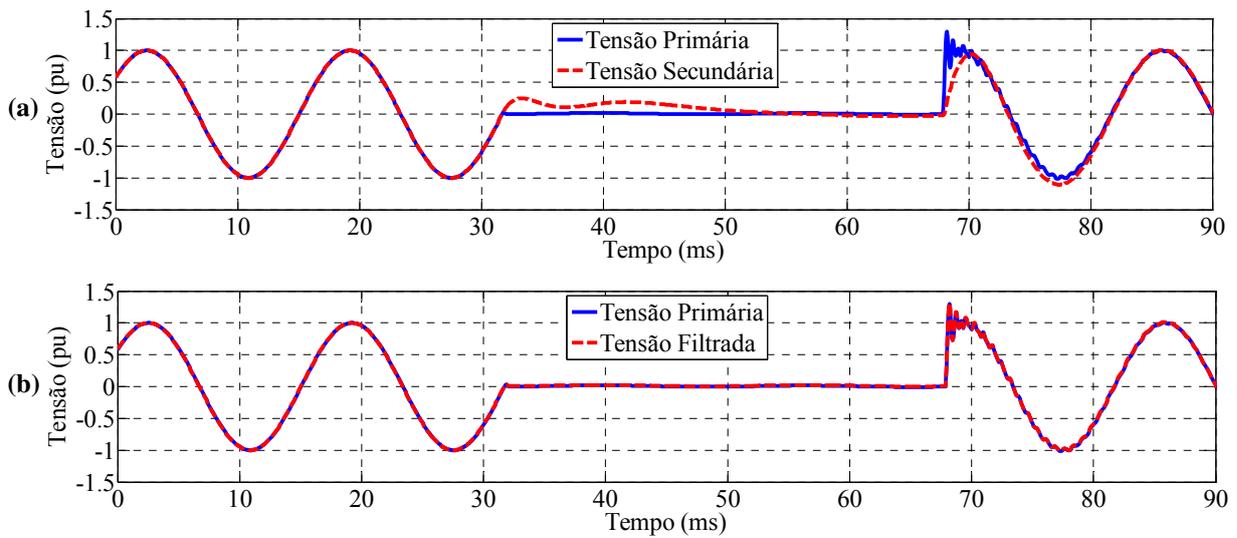


Figura 5.31 – Simulação de extinção de falta, sistema de 500 kV: (a)  $V_P$  e  $V_S$ ; (b)  $V_P$  e  $V_C$ .

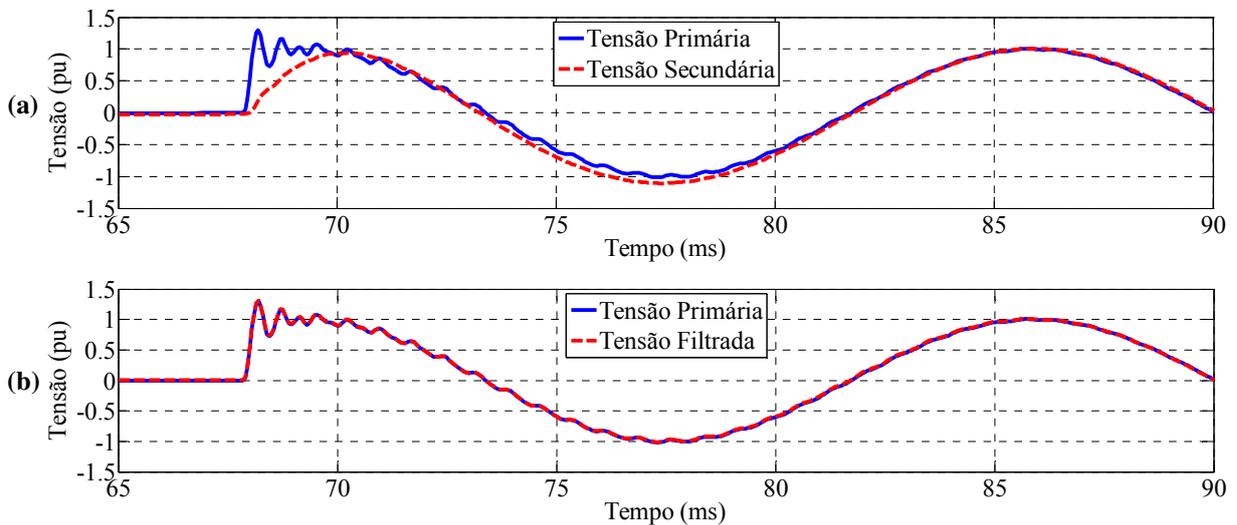


Figura 5.32 – Detalhe de simulação de extinção de falta, sistema de 500 kV: (a)  $V_P$  e  $V_S$ ; (b)  $V_P$  e  $V_C$ .

Comparando o método proposto nesta tese com outros métodos reportados na literatura merece destacar que:

1. Em muitos trabalhos reportados na literatura os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do modelo de TPC sob análise são conhecidos, porém na prática tais dados não são disponibilizados pelos fabricantes desses equipamentos. Desta forma, alguns autores propõem técnicas para calcular os elementos do modelo do TPC. Mesmo assim tal tarefa tem se mostrado de difícil domínio, limitada por problemas de natureza numérica;
2. Alguns autores propõem filtros digitais para mesma finalidade que os FDR aqui propostos, porém de ordem muito inferior à dos FDR propostos nesta tese. Os

trabalhos citados apresentam resultados bastante satisfatórios para os casos analisados, porém em aplicações restritas a estudos de proteção, onde o espectro de atuação dos filtros limita-se a 60 Hz. Desta forma, sendo contra indicados para realizar estudos de transitórios eletromagnéticos;

3. No trabalho de mestrado do autor desta tese foi proposto um dispositivo em fase de protótipo, denominado de compensador, que tinha por objetivo realizar a correção da tensão secundária dos TPC. O citado trabalho serviu como base para idealização desta tese e as limitações encontradas de maior relevância foram aqui superadas: generalização da técnica para TPC de topologias diferentes, independente da classe de tensão do equipamento. Além disso, o fato de os fabricantes poderem oferecer um pacote de funções adicionais para os seus relés existentes permite aplicabilidade real dos FDR aqui propostos.

No próximo capítulo apresentam-se as conclusões da tese.

## Capítulo 6

### Conclusões

Nesta tese foi apresentado um novo método para projeto de filtros digitais recursivos, denominados de FDR, para reduzir o impacto da resposta transitórias dos TPC. São necessários apenas os dados de resposta em frequência do equipamento, objeto de estudo, e a função de transferência de um modelo de TPC consolidado para estudo de transitórios eletromagnéticos. O método proposto possibilita realizar estudos em sistemas elétricos de potência de modo mais exatos e tem maior aplicabilidade do que alguns trabalhos reportados na literatura, benefício obtido devido a largura da banda de atuação dos FDR ser de até 10 kHz e pela generalização da técnica.

Por conveniência, os FDR foram dimensionados para ser executados em dispositivos com taxa de amostragem igual a 50  $\mu$ s, mesmo passo de cálculo usado pelo RTDS<sup>TM</sup>. Porém, as análises são baseadas no comportamento dos fasores das tensões, calculados a partir do algoritmo do Cosseno Modificado ABB, considerando uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo. No entanto, outras taxas de amostragem podem ser utilizadas – na rotina desenvolvida o usuário define a taxa de amostragem a ser utilizada.

Os estudos se concentraram em dois TPC, reportados na literatura, um de 230 kV e outro de 500 kV. Considerando dados de sistemas elétricos reais de 230 e 500 kV, foram realizadas simulações digitais de faltas ao longo das linhas de transmissão. Para tanto, utilizou-se o RTDS<sup>TM</sup> para simular os sistemas elétricos de potência e o software CBuilder para implementar os modelos de TC, TPC, FDR, algoritmos de estimação de fasores e lógica do relé.

Analisando os resultados obtidos para ambos os TPC, percebe-se que o uso dos FDR reduz, de fato, as irregularidades do sinal secundário dos TPC e, conseqüentemente, surge como uma alternativa para melhorar o tempo de atuação e a segurança dos relés de proteção de distância. Ainda neste contexto, sabe-se que as análises apresentadas neste trabalho se limitaram apenas para os TPC de 230 e 500 kV, reportados na literatura. Portanto, acredita-se que para outros modelos de TPC as melhorias no desempenho da proteção de distância possam ser ainda mais relevantes.

De fato, os desvios presentes nas tensões secundárias dos TPC podem tornar o relé sub ou sobrealcançado e, conseqüentemente, podem ocasionar a operação indevida do sistema de proteção. Sendo assim, o uso dos FDR surge como alternativa para melhorar a segurança da proteção de distância, minimizando erros na identificação de faltas dentro da primeira zona e, portanto, evitando atuações desnecessárias.

Alguns trabalhos reportados na literatura apontam os TPC como equipamentos causadores de erros durante a localização de faltas. Os erros de medição originados pelos TPC são evidentes quando o sistema é submetido a condições de sobrecarga, curtos-circuitos e perda de sincronismo. Baseado no exposto, neste trabalho de tese avaliou-se a influência da resposta transitória dos TPC de 230 e 500 kV – analisados – sobre o método de localização de faltas baseado em componentes fundamentais. A avaliação fundamentou-se em quatro estudos de casos, onde diferentes condições de faltas foram simuladas, os resultados apresentados evidenciam que a presença dos FDR proporcionam redução da resposta transitória dos TPC, resultando no cálculo dos fasores das tensões mais exatos. Porém, verificou-se que os modelos de TPC analisados não comprometem o funcionamento do método de localização de falta analisado. Tais resultados não podem ser generalizados, pois para outros modelos de TPC ou considerando outros algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes de alta frequência e na teoria das ondas viajantes os benefícios proporcionados pelo uso dos FDR, correção da tensão secundária de TPC, podem ser ainda mais significativos.

Além de ser independente dos parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  dos TPC, os FDR propostos para redução da resposta transitória dos TPC possibilitam realizar análises em um amplo espectro de frequência. Desta forma, o método sugerido permite obter medições de sinais primários com exatidão, podendo até ser usado para monitorar componentes harmônicas em sistema elétricos de potência. Dispensando o uso de TPC específicos para tal finalidade.

Neste cenário, os FDR surgem como uma alternativa eficaz e com custo mínimo capaz de realizar a correção da tensão secundária de TPC com topologias diferentes. Para a citada finalidade os FDR foram projetados para ser implementados dentro da unidade de processamento de relé microprocessados independente de qual seja sua arquitetura ou fabricante, desde que o relé tenha uma arquitetura aberta. Desta forma, justifica-se a aplicabilidade da pesquisa para possível uso em campo.

### **Estudos Futuros**

Como continuação dos estudos aqui realizados, são previstas as seguintes atividades de pesquisa:

1. Avaliar o funcionamento dos FDR como alternativa para reduzir erros de medição para transitórios de alta frequência em estudos de localização de falta baseados na análise de componentes de alta frequência e na teoria das ondas viajantes;
2. Realizar simulações em malha fechada para avaliar o tempo de atuação dos relés quando funcionando com e sem a presença dos FDR, para tanto, sugere-se modelar sistemas com maior quantidade de barras e linhas de transmissão com compensação série e em derivação. Tornando os estudos cada vez mais realísticos;
3. Investigar os possíveis benefícios do uso dos FDR para otimizar o chaveamento controlado de linhas de transmissão;
4. Avaliar a influência do uso dos FDR quando operando em conjunto com os TPC no processo de detecção, classificação e evolução dos possíveis distúrbios aos quais os sistema elétricos estão expostos;
5. Propor FDR para corrigir a resposta transitória de outros TPC reportados na literatura, com diferentes classes de tensão, criando um banco de dados para estudos de diferentes sistemas elétricos potência;
6. Realizar testes de funcionamento dos FDR a partir de dados de registros com conteúdo harmônico de um sistema elétrico real, inclusive calculando a THD (*total harmonic distortion*) com e sem a presença dos FDR.

# Referências Bibliográficas

- BAINY, R. G.; CARDOSO, L. C.; 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, maio 2012.
- CARVALHO Jr., A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, agosto 2008.
- 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.
- DUBE, L. *Models in ATP: Language Manual*, 1996.
- FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, dezembro 2003.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. Modified Cosine Filters. Patente US006154687A, November 2000.
- IZYKOWSKI, J.; KASZTENNY, B.; ROSOLOWSKI, E.; SAHA, M. M.; HILLSTROM, B. “Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 1, p. 116–122, January 1998.
- JOHNS, A. and JAMALI, S. “Accurate fault location technique for power transmission lines,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 137, no. 6, pp. 395–402, November 1990.
- 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*. Ontario Canada: [s.n.], Vol. 53, 2000.

KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L.; SKENDZIC, V.; FROMEN, C. W.; SEVCIK, D. R.; NILSSON, S. L. “Digital Models of Coupling Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, pp. 1927-1935, October 1992.

KOJOVIC, Lj.; KEZUNOVIC, M.; SKENDZIC, V.; FROMEN, C. W.; and SEVCIK, D. R. “A New Method for the CCVT Performance Analysis Using Field Measurements, Signal Processing and EMTP Modeling”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, pp. 1907-1915, October 1994.

LOPES, F. V.; BAINY, R. G.; SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A. Benefícios da Correção da Tensão Secundária de TPCs sobre a Localização de Falhas Baseada em Componentes Fundamentais. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014*, Foz do Iguaçu-PR, abril 2014.

LOPES, F. V.; SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; CARDOSO, L. F.; PESENTE, J. R.; OTTO, R. B. Redução de Erros na Estimativa Fasorial de Tensão via Correção dos Sinais Secundários de Transformadores de Potencial Capacitivos. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, maio 2012.

MACHADO, E. P. *Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2009.

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, PB, dezembro 2013.

MACHADO, E. P.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; SILVA, C. A.; GODOY, M. V. Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos. *XIII Encontro Regional Iberoamericano do Cigré - ERIAC*, Foz do Iguaçu-Argentina, Maio 2009.

NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; FERNANDES Jr., D.; COSTA, E. G., ALMEIDA; G. J. C.; LIRA, G. R. S.; SILVA, C. A.; MACHADO, E. P.; VASCONCELOS, J. C. R. S.

- A.; GODOY, M. V. *Relatório de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - Representação de Transformadores de Potencial Capacitivos em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, abril 2007.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. “Strengths and Limitations of a New Phasor Estimation Technique to Reduce the CCVT Impact in Distance Protection”. *Electric Power Systems Research*, 2009.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; LUKOWICZ, M.; ROSOLOWSKI, E. “Application of Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection”. In: *IEE. Developments in Power System Protection*. [S.l.], p. 303–306, 2001.
- 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, PB, setembro 2011.
- SCHWEITZER, E. O. and ROBERTS, J. “Distance Relay Element Design”. Forty-Sixth Annual Conference for Protective Relays Engineers, Texas A&M University College Station, 1993.
- SIGUERDIDJANE, H. B.; GAONACH, J.; ROHELLEC, N. L. “Applications of Digital Power Simulators: Advantages”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1137–1142, July 1997.
- SILVA, C. A. *Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2010.
- SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A. Redução do Impacto da Resposta Transitória de TPCs via Filtros Digitais Recursivos. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014*, Foz do Iguaçu-PR, abril 2014
- SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Coupling Capacitor Voltage Transformer: A Device to Correct Its Secondary Voltage in Real Time. Brazilian Society for Automatics - SBA: *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, p. 339-348, 2 April 2013. DOI: 10.1007/s40313-013-0014-5
- 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, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Um Dispositivo para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Aplicação em Tempo Real. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2010*, Bonito-MS, setembro 2010.
- SILVA, C. A.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P. Um Filtro Digital Recursivo para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Uma Abordagem em Tempo Real. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010*, Belém-PA, maio 2010.
- SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; FERNANDES Jr, D.; NEVES, W. L. A.; BAINY, R. G.; PESENTE, J. R.; OTTO, R. B. Um Método para Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos: Validação em Tempo Real. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012*, Goiânia-GO, maio 2012.
- SILVA, K. M.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; FERNANDES Jr. D.; NEVES, W. L. A.; COUTINHO, P. R. L. N.; 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 Distância. *XIX Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2012*, Campina Grande - PB, setembro 2012.
- SWEETANA, A. and FLUGUM, R. W. “A New Metering Accuracy Capacitive Potential Device”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, No. 5, pp. 499-510, May 1966.
- TANASKOVIC, M., NABI, A., MISUR, S., DIAMANTI, P., and McTAGGART, R. “Coupling Capacitor Voltage Transformers as Harmonics Distortion Monitoring Devices in Transmission Systems”. *International Conference on Power Systems Transients 2005 – IPST 2005*, Montreal – Canada, June 2005.
- ZADEH, H. K. “Correction of Capacitive Voltage Transformer Distorted Secondary Voltages Using Artificial Neural Networks”. In: *7<sup>th</sup> Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering*. Serbia and Montenegro: [s.n.], 2004.
- ZADEH, H. K. and LI, Z. “A Compensation Scheme for CVT Transient Effects Using Artificial Neural Network”. *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 30-38, 2007.