

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

Dissertação de Mestrado

Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos

Eubis Pereira Machado

Eubis Pereira Machado

Uma Técnica para Compensação Dinâmica de
Transformadores de Potencial Capacitivos

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

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.
Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Março de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M149t

2009 Machado, Eubis Pereira.

Uma técnica para compensação dinâmica de transformadores de potencial capacitivos / Eubis Pereira Machado — Campina Grande, 2009.
62 f.: il.

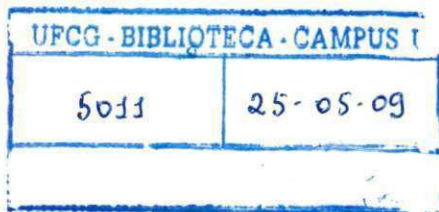
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Dr. Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D. e Dr. Damásio Fernandes Júnior.

1. Transformador de Potencial Capacitivo. 2. Resposta em Frequência.
3. Compensação Dinâmica. I. Título.

CDU – 621.314.222(043)




**UMA TÉCNICA PARA COMPENSAÇÃO DINÂMICA DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIAL CAPACITIVOS**

EUBIS PEREIRA MACHADO

Dissertação Aprovada em 20.03.2009


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador


DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Orientador


FERNANDO AUGUSTO MOREIRA, Ph.D., UFBA
Componente da Banca


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO - 2009

Aos meus pais, *Antonio* e *Maria* que me apoiam em todos os momentos, DEDICO.
À minha esposa, *Sandgy Ana* pelo amor, incentivo e compreensão, OFEREÇO.

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.

Ao CNPq pelo aporte financeiro deste trabalho.

Aos professores Damásio Fernandes Júnior e Washington Luiz Araújo Neves pelo apoio, compreensão e confiança a mim depositados.

Aos professores Edson Guedes e Núbia Brito pela confiança e presteza.

Aos meus amigos Kleber e George pelo companheirismo, amizade e contribuições no decorrer do mestrado.

Aos funcionários da Miniblio-COPELE, Suênia, Ângela e Pedro.

Aos amigos Karcus, Célio, Ferdinando, Ângelo, Michelle, Gustavo, Wilker e Nelson pela colaboração e disposição de sempre ajudar.

Aos meus pais Antonio e Maria pelo inesgotável amor, carinho e dedicação prestados.

À minha esposa Sandgy Ana pelo companheirismo, amor e compreensão.

Aos meus irmãos, em especial, Hélio, Eleneide e Wilton (In Memoriam) que sempre acreditaram na minha perseverança nos estudos.

A Josival Amorim pelo apoio e incentivo.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Glossário	viii
Lista de Símbolos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos e Contribuições	2
1.3 Organização do Trabalho	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Izykowski <i>et al.</i> (1998)	5
2.2 Zadeh (2004)	7
2.3 Zadeh & Li (2007)	8
2.4 Kang <i>et al.</i> (2007)	9
2.5 Sinopse Bibliográfica	10
3 Fundamentação Teórica	12
3.1 Modelo de TPC para Análise de Compensação	13
3.2 Metodologia para Obtenção dos Parâmetros do TPC	14
3.2.1 Ajuste de Funções não Lineares	15
3.2.2 Software TPCalc	17

3.3	Distúrbios da Tensão Secundária de TPCs	23
4	O Método Proposto	26
4.1	Modelo Analítico do TPC Compensado	28
4.2	Estimação dos Parâmetros do Modelo	28
4.3	Análise da Compensação no Domínio do Tempo	30
4.3.1	Resposta no Tempo por Método de Integração	31
4.3.2	Compensador para um TPC de 138 kV	33
4.3.3	Compensador para um TPC de 230 kV	34
4.4	Análise da Compensação no Domínio da Frequência	36
4.4.1	Resposta em Frequência do TPC de 138 kV Compensado	36
4.4.2	Resposta em Frequência do TPC de 230 kV Compensado	37
4.5	Implementação da Técnica de Compensação	39
5	Avaliação e Validação do Método	41
5.1	Monitoramento da Distorção Harmônica de Sistemas de Alta Tensão	41
5.1.1	Avaliação da Distorção Harmônica com um TPC de 138 kV	43
5.2	Mitigação da Reposta Transitória de TPCs	44
5.2.1	Compensação Dinâmica de um TPC de 138 kV	45
5.2.2	Compensação Dinâmica de um TPC de 230 kV	47
6	Conclusões	51
	Referências Bibliográficas	57
	Apêndice A O Problema dos Mínimos Quadrados	58
	Apêndice B Coeficientes da Planta do Compensador	61

Lista de Figuras

2.1	Modelo geral do TPC proposto por Izykowski <i>et al.</i> (1998).	6
2.2	Modelo simplificado do TPC proposto por Izykowski <i>et al.</i> (1998) com parâmetros refletidos ao secundário.	6
2.3	Modelo do TPC adotado por Zadeh (2004).	8
2.4	Modelo do TPC adotado no trabalho de Kang <i>et al.</i> (2007).	10
3.1	Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz.	12
3.2	Modelo geral de um TPC para frequências acima de 1 kHz.	13
3.3	Modelo simplificado de um TPC para frequências de 10 Hz a 10 kHz.	14
3.4	Modelo do TPC com impedâncias equivalentes.	14
3.5	Tela principal do software TPCalc.	18
3.6	Resposta em frequência do ganho do TPC de 138 kV após o processo de ajuste.	19
3.7	Resposta em frequência da fase do TPC de 138 kV após o processo de ajuste.	20
3.8	Montagem para a medição de resposta em frequência de um TPC de 230 kV.	21
3.9	Resposta em frequência do ganho do TPC de 230 kV após o processo de ajuste.	22
3.10	Resposta em frequência da fase do TPC de 230 kV após o processo de ajuste.	22
3.11	(a) Tensão secundária do TPC quando da ocorrência de uma mudança abrupta na tensão primária. (b) Detalhe da tensão secundária apresentada na Figura 3.11(a).	24
3.12	(a) Tensão secundária do TPC de 138 kV. (b) Tensão primária do TPC de 138 kV distorcida harmonicamente.	24
4.1	Diagrama de blocos de compensação do TPC.	27
4.2	Comportamento do ajuste paramétrico.	29
4.3	Ganho da função $\alpha(s)$	30

4.4	Fase da função $\alpha(s)$	30
4.5	Relação de transformação de tensão do TPC de 138 kV – ganho.	37
4.6	Relação de transformação de tensão do TPC de 138 kV – fase.	37
4.7	Relação de transformação de tensão do TPC de 230 kV – ganho.	38
4.8	Relação de transformação de tensão do TPC de 230 kV – fase.	38
4.9	Estratégia para implementação da técnica de compensação.	39
5.1	Monitoração da distorção harmônica de consumidor industrial.	43
5.2	Tensão no PAC.	44
5.3	Tensão secundária do TPC.	44
5.4	Tensão secundária para um curto-circuito franco no primário do TPC de 138 kV- $\theta = 90^\circ$	45
5.5	Tensão transitória do TPC de 138 kV - $\theta = 90^\circ$	46
5.6	Tensão secundária para um curto-circuito franco no primário do TPC de 138 kV- $\theta = 0^\circ$	46
5.7	Tensão transitória do TPC de 138 kV - $\theta = 0^\circ$	47
5.8	Sistema elétrico fictício.	47
5.9	Tensão secundária para um curto-circuito bifásico na Barra 1 da Figura 5.8.	48
5.10	Tensão secundária durante o curto-circuito.	49
5.11	Tensão secundária durante eliminação do curto-circuito.	49
A.1	Algoritmo para implementação do método de Levenberg-Marquardt.	59

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros de um TPC de 138 kV reportados de Kojovic <i>et al.</i> (1994).	18
3.2	Parâmetros de um TPC de 138 kV recalculados após o processo de ajuste.	19
3.3	Estimativas iniciais para os parâmetros do TPC de 230 kV.	21
3.4	Parâmetros calculados para o TPC de 230 kV após o ajuste de curvas.	21
4.1	Parâmetros da planta do TPC compensado.	29
4.2	Parâmetros de um TPC de 138 kV calculados pelo TPCalc.	33
4.3	Zeros e pólos do compensador para o TPC de 138 kV.	33
4.4	Seções de segunda ordem do compensador no plano s para o TPC de 138 kV.	34
4.5	Coefficientes do filtro digital recursivo para o TPC de 138 kV.	34
4.6	Parâmetros de um TPC de 230 kV calculados pelo TPCalc.	34
4.7	Zeros e pólos do compensador para o TPC de 230 kV.	35
4.8	Seções de segunda ordem do compensador no plano s para o TPC de 230 kV.	35
4.9	Coefficientes do filtro digital recursivo para o TPC de 230 kV.	35
5.1	Componentes harmônicas presentes no PAC.	43
5.2	Dados de sequência da linha de transmissão.	48
5.3	Tensão das fontes.	48
5.4	Impedâncias das fontes.	48
B.1	Coefficientes da função de transferência do compensador.	61
B.2	Variáveis auxiliares.	62

Glossário

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ATP	Alternative Transients Program.
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
CSF	Circuito Supressor de Ferroressonância.
DSP	Digital Signal Processing.
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.
EMTP	Electromagnetic Transients Program.
GSE	Grupo de Sistemas Elétricos.
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
PAC	Ponto de Acoplamento Comum.
RNA	Redes Neurais Artificiais.
THD	Total Harmonic Distortion.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.
TPCalc	Software para o Cálculo de Parâmetros de TPC.
TPI	Transformador de Potencial Indutivo.

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_{ps}	Capacitância parasita entre o enrolamento primário e secundário do TPI.
C_p	Capacitância parasita do enrolamento primário do TPI.
C_s	Capacitância parasita do enrolamento secundário do TPI.
L_c	Indutância do reator de compensação.
L_d	Indutância da bobina de drenagem.
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_f	Resistência do circuito supressor de ferroressonância.
R_c	Resistência série do reator de compensação.

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

$\alpha(s)$	Função de transferência do modelo de TPC compensado.
$G_{COM}(s)$	Função de transferência do compensador analógico.
$G_{COM}(z)$	Função de transferência do compensador na forma digital.
$G_{TPC}(s)$	Função de transferência do TPC.
$H_{TPC}(s)$	Função de transferência do TPC compensado.

Coefficientes das Funções de Transferências

A_i	Coefficientes do numerador da função de transferência do TPC.
a_j	Coefficientes do denominador da função de transferência do compensador analógico.
B_i	Coefficientes do denominador da função de transferência do TPC.
b_j	Coefficientes do numerador da função de transferência do compensador analógico.
c_i	Coefficientes do denominador da função de transferência do filtro digital recursivo.
D_i	Coefficientes do denominador da função de transferência do modelo de TPC compensado.
d_j	Coefficientes do numerador da função de transferência do filtro digital recursivo.
k_0	Coefficiente de escalamento do filtro digital recursivo.

k_{ij} j -ésimo coeficiente da i -ésima seção do filtro digital recursivo.

Sinais de Tensão

V_i Tensão primária do TPC no domínio da frequência.

V_o Tensão secundária do TPC no domínio da frequência.

V_h Tensão rms do h -ésimo harmônico.

v_i Tensão primária no domínio do tempo.

v_n Tensão de saída da n -ésima seção do filtro digital recursivo.

v_o Tensão secundária no domínio do tempo.

V_{sc} Tensão secundária compensada no domínio da frequência.

v_{sc} Tensão secundária compensada no domínio do tempo.

Vetores e Matrizes

$\nabla F(\mathbf{a})$ Vetor gradiente da função objetivo.

$\nabla^2 F(\mathbf{a})$ Matriz Hessiana da função objetivo.

ω_i i -ésima frequência.

σ_i i -ésimo desvio associado as medições da resposta em frequência.

\mathbf{a}_k Vetor de parâmetros na k -ésima iteração.

\mathbf{I} Matriz Identidade.

\mathbf{p}_k Vetor com as direções de busca na k -ésima iteração.

$F(\mathbf{a})$ Função objetivo.

$J(\mathbf{a})$ Matriz jacobiana da função objetivo.

y_i i -ésimo ponto da resposta em frequência de referência.

Outros Símbolos

Δt Passo de integração.

δ_{COM}	Ângulo de fase do compensador.
δ_{TPC}	Ângulo de fase do TPC.
μ_k	Parâmetro definido na k -ésima iteração do método de Levenberg-Marquardt.
$\phi(s)$	Função racional imprópria.
θ	Ângulo de incidência do curto-circuito sobre a tensão primária do TPC.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma técnica de compensação para corrigir dinamicamente os distúrbios apresentados pela tensão secundária de TPCs. A técnica de compensação baseia-se na filtragem digital recursiva da tensão secundária de um modelo de TPC, cuja resposta em frequência é utilizada como dado de entrada de um software que computa os elementos lineares do modelo. Os parâmetros do compensador (filtro digital recursivo) são obtidos a partir da função de transferência do TPC e de um modelo para o TPC compensado, cujos parâmetros são estimados a partir de um processo de ajuste de curvas. A avaliação da técnica é feita por meio de simulações digitais utilizando o ATP (Alternative Transients Program) e a linguagem MODELS, que permite uma interação dinâmica com o ATP. Apresentam-se as análises da compensação dinâmica de dois TPCs: um TPC de 138 kV reportado na literatura e outro de 230 kV emprestado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). Para avaliar a estratégia de compensação nos domínios tempo-frequência, três estudos de casos são analisados: a resposta do TPC com o compensador proposto, a resposta do TPC sem a compensação e a resposta de um divisor de tensão ideal. As simulações digitais comprovam que a compensação dinâmica da tensão secundária de TPCs pode ser utilizada para aumentar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de medição, proteção e controle.

Palavras-Chave: Transformador de potencial capacitivo; resposta em frequência; compensação dinâmica; transitórios eletromagnéticos.

Abstract

The aim of this work is to present a compensation technique to dynamically correct the disturbances produced by the coupling capacitor voltage transformers (CCVT) secondary voltage. The compensation technique is based on the recursive digital filter of the CCVT secondary voltage, whose frequency response is used as input data to a software that computes the linear elements of the CCVT model. The parameters of the compensator (recursive digital filter) are obtained from the CCVT transfer function and from a compensated CCVT model, whose parameters are estimated from a fitting process. The validation of the technique is carried out by means of digital simulations using the ATP (Alternative Transients Program) and the MODELS language, which provides a dynamic interaction with the ATP. The analysis of the dynamic compensation of two CCVT are presented: one CCVT unit of 138 kV reported in literature and one unit of 230 kV made available by Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). In order to evaluate the strategy of compensation in time and frequency domains, three case studies are analyzed: the CCVT response with the proposed compensator, the CCVT response without compensation and the response of an ideal voltage divider. The digital simulations show that the dynamic compensation of the CCVT may be used to improve the performance and reliability of measurement, protection and control systems.

Keywords: Coupling capacitor voltage transformer; frequency response; dynamic compensation; electromagnetic transients.

Capítulo 1

Introdução

Por motivos técnicos e econômicos, os sistemas de transmissão de energia com tensões acima de 138 kV fazem uso de transformadores de potencial capacitivos (TPCs) para monitorar os níveis de tensão dos sistema de energia elétrica (D'AJUZ *et al.*, 1985; ARRILLAGA; WATSON, 2003). 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 a confiabilidade da proteção são de extrema importância para o setor elétrico.

Os TPCs geram certos problemas para os relés de distância. Durante uma falta na linha da transmissão, quando a tensão primária entra em colapso e a energia armazenada nos capacitores e indutores precisa ser dissipada, o TPC gera 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 de proteção é alvo de pesquisas na comunidade científica.

Os TPCs apresentam erros de medição quando submetidos a sinais que apresentam componentes de frequência diferentes da fundamental, logo, não podem monitorar com precisão sinais com componentes harmônicas (ARRILLAGA; WATSON, 2003; XIAO *et al.*, 2004). Vários distúrbios do sistema elétrico como, por exemplo, manobras de linhas de transmissão e curto-circuitos distorcem o sinal de tensão que passa a apresentar componentes de frequência diferentes da fundamental. Muito esforço tem sido concentrado no sentido de tornar a tensão do secundário dos TPCs uma réplica de sua tensão primária, todavia, as técnicas apresentadas na literatura não contemplam uma forma efetiva para tal realização.

1.1 Motivação

Como na maioria dos transdutores de tensão, os TPCs devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão. Todavia, devido à própria característica construtiva desses equipamentos, a tensão obtida nos terminais de baixa tensão só é uma réplica da tensão primária na operação em regime permanente. Durante as operações de manobras do sistema de energia elétrica, a tensão do barramento do TPC pode conter componentes de frequências diferentes da fundamental que propiciam uma tensão secundária não fidedigna à tensão do sistema. Essa tensão secundária não condizente com a realidade é processada pelos sistemas de proteção e controle o que pode levá-los a realizar operações inapropriadas como, por exemplo, a retirada indevida de equipamentos do sistema.

Na literatura existem abordagens com intuito de reproduzir a tensão primária no secundário quando a tensão no primário do TPC entra em colapso devido a um curto-circuito no sistema. Contudo, as metodologias passíveis de implementação em hardware consideram um modelo impreciso de TPC, são limitadas a análises no domínio do tempo e não contemplam uma metodologia de obtenção dos parâmetros do modelo utilizado. Estudos realizados mostram ainda que há complexidade no processo de obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em frequências elevadas, o que torna necessária a realização de medições em laboratório de resposta em frequência (KOJOVIC *et al.*, 1994).

Esta dissertação está relacionada com trabalhos do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) inseridos na linha de pesquisa denominada Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Também há um projeto de pesquisa em andamento, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do edital universal (FERNANDES JÚNIOR *et al.*, 2007a).

1.2 Objetivos e Contribuições

Os objetivos gerais deste trabalho são elaborar e implementar um método de compensação dinâmica da tensão secundária de um modelo preciso de TPC, de forma que a tensão compensada seja uma réplica autêntica do sinal do primário em um grande espectro de frequência. Com isso se pretende diminuir os erros das medições para fins de monitoramento da qualidade de energia, reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente

aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão e corrigir os distúrbios da tensão secundária, aumentando o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de proteção e controle.

O método foi desenvolvido e avaliado empregando-se um programa do tipo EMTP - Electromagnetic Transients Program (DOMMEL, 1996), mais especificamente o ATP (Alternative Transients Program) (LEUVEN EMTP CENTER, 1987) fazendo uso da linguagem MODELS (DUBE, 1996), a qual proporciona uma interação dinâmica com o próprio ATP. Dessa forma, o processo de compensação dos distúrbios da tensão secundária do TPC ocorrerá em tempo de execução da simulação digital.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Avaliar o estado da arte concernente a compensação dinâmica da resposta transitória de TPCs;
- Desenvolver uma estratégia para compensar a tensão secundária de um modelo de TPC, tomando-se como base os parâmetros R , L e C calculados pelo software TPCalc (Software para o Cálculo dos Parâmetros de TPCs) (NEVES *et al.*, 2007);
- Utilizar a linguagem MODELS para implementar um banco de filtros digitais recursivos, cuja função é mitigar os transitórios gerados pelos elementos armazenadores de energia do TPC e tornar a relação de transformação de tensão desse transdutor invariável com a frequência;
- Avaliar o efeito da compensação do TPC nos domínios do tempo e da frequência;
- Validar a técnica de compensação a partir da comparação entre as respostas do TPC compensado, do TPC sem compensação e de um divisor de tensão ideal.

As principais contribuições deste trabalho estão relacionadas com a apresentação de um método que corrige simultaneamente o ganho e a fase da relação de transformação de tensão do TPC em um grande espectro de frequência (10 Hz a 10 kHz), e com o desenvolvimento de um filtro digital recursivo em cascata (compensador) que supera problemas de complexidade computacional e instabilidades numéricas observados em trabalhos encontrados na literatura.

1.3 Organização do Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica das publicações mais significativas referentes a compensação dinâmica de TPCs.

No capítulo 3 apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, onde são abordados um modelo de TPC para análise da compensação, a metodologia de estimação dos seus parâmetros e alguns distúrbios da tensão secundária aos quais a compensação destina-se a correção.

Aspectos relativos ao método proposto são delineados no capítulo 4. Um modelo de TPC compensado e o cálculo dos seus parâmetros, análises no domínio do tempo e da frequência bem como a estratégia de compensação desenvolvida são apresentados de forma detalhada nesse capítulo.

São apresentados no capítulo 5 os resultados obtidos com a utilização da estratégia de compensação proposta, assim como suas respectivas análises.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Desde a década de 50 vêm-se buscando métodos para mitigar os distúrbios da tensão secundária de TPCs quando a tensão do sistema de transmissão/subtransmissão de energia sofre uma mudança brusca de estado. Provavelmente o primeiro trabalho voltado para cancelar o comportamento transitório de TPCs foi realizado por Harder (1951), que em conjunto com a *Westinghouse Company*, desenvolveu e patenteou um circuito para compensação de TPCs com o intuito de melhorar o desempenho dos relés direcionais de atuação rápida. Mais tarde, Hughes (1975) estudou o comportamento dos relés de distância supridos diretamente por um TPC e a partir do equipamento compensado. Assim como Harder (1951), Hughes (1975) verificou que os TPCs podem proporcionar efeitos severos sobre os circuitos de proteção de atuação rápida, uma vez que eles operam em conjunto com as oscilações transitórias.

Ao longo dos anos, outros trabalhos foram realizados com o objetivo de cessar o comportamento transitório do TPC durante uma falta no sistema. Dentre as metodologias adotadas observam-se o uso de métodos determinísticos (métodos que dependem do estado inicial da tensão secundária e da tensão primária do TPC) e métodos que utilizam Redes Neurais Artificiais (RNA) para a tarefa de reconhecimento de formas de onda padrão.

2.1 Izykowski *et al.* (1998)

Izykowski *et al.* (1998) propuseram um algoritmo de compensação digital baseado na inversão da função de transferência de um TPC simplificado. Eles apresentam um modelo geral de TPC, Figura 2.1, que contempla a coluna capacitiva (C_1 e C_2), o reator de compensação (L_c e R_c), o transformador indutivo (L_{T1} , R_{T1} , L_m , R_m , L_{T2} e R_{T2}), o circuito supressor de ferroressonância (L_1 , R_1 e R_2) e a carga secundária (R_0 e L_0).

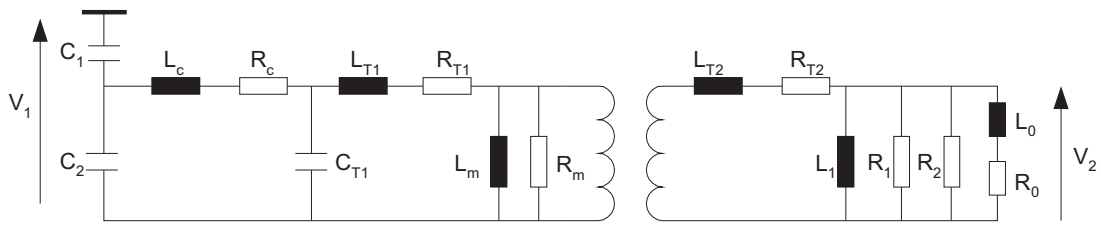


Figura 2.1 – Modelo geral do TPC proposto por Izykowski *et al.* (1998).

No modelo geral, foram realizadas simplificações a fim de facilitar o projeto do algoritmo de compensação. No modelo simplificado, Figura 2.2, foram considerados apenas o equivalente Thévenin do divisor capacitivo, o reator de compensação e o filtro supressor de ferroressonância, todos referenciados ao secundário do transformador de potencial indutivo (TPI). Izykowski *et al.* (1998) afirmam que não há erro significativo causado pelas simplificações do modelo geral do TPC.

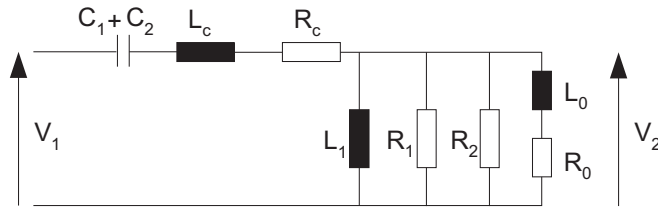


Figura 2.2 – Modelo simplificado do TPC proposto por Izykowski *et al.* (1998) com parâmetros refletidos ao secundário.

A partir do modelo simplificado, a relação de transformação no plano s entre a tensão primária e secundária é

$$G_{TPC}(s) = \frac{A_3 s^3 + A_2 s^2}{B_4 s^4 + B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}. \quad (2.1)$$

Com intuito de reproduzir a tensão primária nos terminais secundários do TPC, um compensador com função de transferência $G_{COM}(s)$ foi aplicado na saída do TPC tal que,

$$G_{TPC}(s)G_{COM}(s) = 1. \quad (2.2)$$

Como função de transferência do compensador, Izykowski *et al.* (1998) propuseram a equação 2.3

$$G_{COM}(s) = \frac{B_4 s^4 + B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}{(A_3 s + A_2)(A_4 s^3 + A_5 s^2 + A_6 s + A_7)}, \quad (2.3)$$

em que, $B_4, B_3, B_2, B_1, B_0, A_3, A_2$ são os coeficientes da função de transferência do TPC e A_4, A_5, A_6, A_7 são coeficientes a serem selecionados pelo projetista a fim de satisfazer a dinâmica desejada do TPC compensado. Como consequência da compensação, a função de transferência entre a tensão primária e a secundária compensada assume a forma

$$G_{TPC}(s)G_{COM}(s) = \frac{s^2}{A_4s^3 + A_5s^2 + A_6s + A_7}. \quad (2.4)$$

Segundo Izykowski *et al.* (1998), os coeficientes A_4, A_5, A_6, A_7 foram computados a partir da síntese de um TPC ideal o qual apresenta um comportamento dinâmico aceitável. Assim o fazendo, foi utilizada a regra de integração trapezoidal para realizar a discretização da função de transferência do compensador. Por meio das equações de diferença associadas ao sistema discretizado, tem-se um compensador digital na forma de um filtro recursivo, cuja tensão secundária se expressa do seguinte modo:

$$v_{com}(n) = \sum_{i=0}^{i=4} \frac{N_i}{M_0} v_2(n-1) - \sum_{i=0}^{i=4} \frac{M_i}{M_0} v_{com}(n-1), \quad (2.5)$$

sendo n , amostra no tempo presente, N_i, M_i , (para $i = 0, \dots, 4$) parâmetros obtidos em função dos coeficientes da Equação 2.3 e v_2 a tensão secundária não compensada suprida por um conversor A/D.

Na análise no domínio do tempo, foi utilizado o ATP para avaliar o desempenho do método proposto a partir da aplicação de uma falta no sistema de transmissão. No primeiro caso, é aplicada uma falta no zero da tensão e no segundo, no pico da tensão. No primeiro estudo, observa-se que a tensão compensada se estabiliza mais rapidamente, já no segundo o efeito da compensação é pouco visível, pois o transitório é desprezível.

A utilização de um modelo simplificado de TPC para o projeto do compensador, a falta de uma metodologia para determinar os parâmetros do equipamento e a restrição do estudo para frequências menores que 800 Hz constituem algumas limitações do trabalho de Izykowski *et al.* (1998).

2.2 Zadeh (2004)

Zadeh (2004) utiliza o 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 e de sua solução e a escolha

de um algoritmo de treinamento da rede. Para obter a base de dados para treinamento da rede, foi utilizado o modelo de TPC mostrado na Figura 2.3 e uma combinação de diferentes condições de faltas que visam generalizar as diversas condições de operação do sistema.

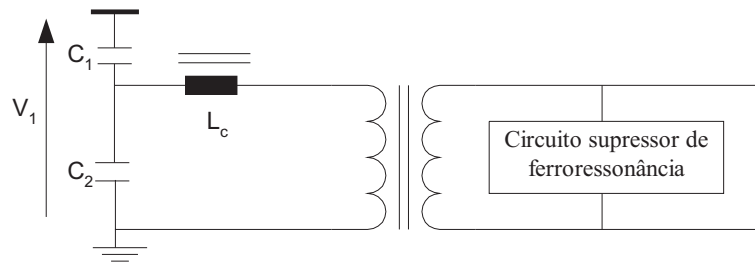


Figura 2.3 – Modelo do TPC adotado por Zadeh (2004).

No modelo da Figura 2.3 são observados quatro elementos: coluna capacitiva (C_1 e C_2), reator de compensação (L_c), transformador de potencial indutivo e circuito supressor de ferroressonância. Uma vez que o modelo não contempla a capacitância parasita do reator de compensação e do transformador de potencial indutivo, o mesmo é válido apenas para frequências próximas da fundamental (KEZUNOVIC *et al.*, 1992).

Segundo Zadeh (2004), a RNA foi treinada para obter a função de transferência inversa do TPC quando este está frente a curto-circuitos nos sistemas de energia. Para validar a metodologia adotada, foram realizadas simulações digitais em um programa do tipo EMTP. A partir dos estudos de caso apresentados, uma réplica da tensão primária pôde ser obtida na saída da RNA, tendo como dados de entrada a tensão secundária distorcida pelo transitório do TPC.

No trabalho foi apresentada uma técnica de compensação dinâmica da tensão secundária do TPC. 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 de curto-circuitos.

2.3 Zadeh & Li (2007)

Zadeh & Li (2007) motivaram-se nas limitações dos trabalhos que usam a função de transferência para compensar a tensão secundária de um TPC. Esses métodos frequentemente envolvem considerações que quase sempre não são válidas como, por exemplo, a mudança

da função de transferência a partir da variação da natureza da carga instalada no terminal secundário (ZADEH; LI, 2007). Os mesmos avaliam o impacto da natureza ativa ou passiva do circuito supressor de ferroressonância (CSF) na operação da proteção de distância e realizam a compensação da tensão secundária a partir da metodologia apresentada em Zadeh (2004).

No trabalho de Zadeh & Li (2007) é verificada 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 de tensão e corrente do sistema. Segundo Zadeh & Li (2007) a técnica de compensação proposta pode ser implementada em hardware possuindo um Processador Digital de Sinais (DSP) para aplicações em tempo real.

As limitações do trabalho de Zadeh & Li (2007) se enquadram nas mesmas limitações do trabalho de Zadeh (2004).

2.4 Kang *et al.* (2007)

Kang *et al.* (2007) propõem uma técnica para obter a tensão do barramento do TPC a partir dos valores instantâneos da tensão e corrente no terminal secundário desse equipamento. Por tratar-se de uma análise no domínio do tempo, os autores puderam considerar os efeitos da não linearidade do núcleo magnético do transformador de potencial indutivo (TPI) na estimação da tensão primária. Nesse trabalho são citadas algumas limitações do trabalho de Izykowski *et al.* (1998) por utilizarem um modelo bastante simplificado na análise do problema. Enfatizam ainda que a tensão primária transformada para o lado secundário do TPC apresenta erros que não podem ser desconsiderados até mesmo na operação em regime permanente. Para apresentação da metodologia adotada, foi considerado o circuito equivalente mostrado na Figura 2.4.

O modelo de TPC adotado contempla cinco elementos: equivalente de Thévenin da coluna capacitiva (C_{eq}), reator de compensação (R_c e L_c), transformador de potencial indutivo (C_{T1} , R_{T1} , L_{T1} , R_{T2} , L_{T2} , L_m e R_m), circuito supressor de ferroressonância (L_1 , R_1 e R_2) e carga (R_0 e L_0).

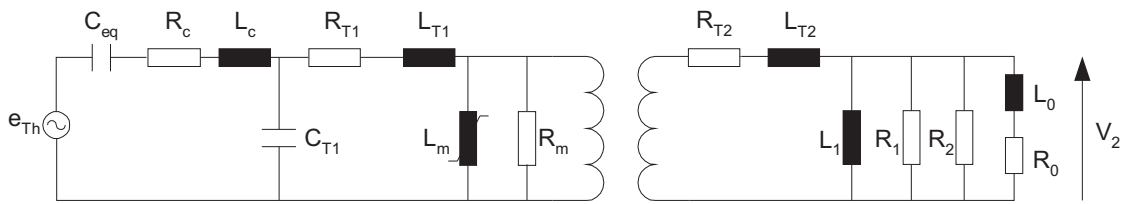


Figura 2.4 – Modelo do TPC adotado no trabalho de Kang *et al.* (2007).

Aplicando as leis de Kirchhoff, os autores obtiveram um expressão analítica para a tensão primária do TPC em função das tensões nodais do circuito. Com o objetivo de avaliar seu método, Kang *et al.* (2007) testaram-no com alguns tipos de faltas em um sistema com duas barras. Embora tenham ocorrido alguns problemas de oscilações numéricas proporcionadas pelo cálculo da tensão no capacitor e corrente no indutor, o método proposto apresentou bons resultados para os casos avaliados.

De fato, para obter uma réplica da tensão do sistema, seria necessário ter um divisor de tensão ideal que relacionasse a tensão primária e secundária apenas por uma relação de transformação invariante com a frequência. A necessidade do conhecimento de todos os parâmetros, lineares e não lineares, e a ausência de uma metodologia para implantação do algoritmo proposto nos relés com processamento digital de sinais dificulta a aplicação prática do algoritmo constituindo-se, portanto, em limitações do trabalho.

2.5 Sinopse Bibliográfica

Na revisão bibliográfica, observam-se que todos os estudos são concentrados na melhoria da resposta transitória do TPC frente a um curto-circuito no sistema, não havendo nenhuma iniciativa para suprimir outros tipos de distúrbios apresentados da tensão secundária. No tocante aos modelos de TPCs, há estudos que contemplam apenas alguns elementos do equipamento, outros fazem uso de um modelo completo. Contudo, os trabalhos analisados supõem que todos os parâmetros do modelo de TPC são conhecidos. Isso pode ser considerado como uma limitação dos trabalhos, uma vez que há uma moderada complexidade na obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em frequências elevadas (KEZUNOVIC *et al.*, 1992; KOJOVIC *et al.*, 1994; FERNANDES JÚNIOR, 1999).

Kang *et al.* (2007) utilizam um modelo detalhado de TPC para estudo no domínio do tempo, mas não apresentam uma metodologia para obtenção dos parâmetros do modelo

nem um procedimento para aplicação prática da técnica implementada. Neste trabalho de dissertação, a partir de um modelo de TPC para estudos no domínio tempo/frequência e de um método para obtenção dos seus parâmetros em uma larga faixa de frequência, é apresentada uma técnica generalizada para a compensação dinâmica da tensão secundária de TPCs com intuito de obter uma réplica mais precisa da tensão primária no secundário.

Zadeh (2004) e Zadeh & Li (2007) contemplam um método para corrigir um tipo de distúrbio da tensão secundária. Todavia, esta dissertação aborda uma técnica generalizada e, portanto, utilizada para mitigar outros fenômenos transitórios que podem ocorrer na tensão secundária de TPCs.

Zadeh & Li (2007) afirmam que os métodos que utilizam a função de transferência para compensar a tensão secundária de TPCs não levam em consideração a modificação da função de transferência do TPC, quando há mudanças da natureza da carga instalada no terminal secundário. Variações da carga secundária proporciona alterações na curva de resposta em frequência para o módulo e a fase da relação entre as tensões terminais do TPC. Baseada nessa característica, esta dissertação contempla uma técnica em que os parâmetros da função de transferência (elementos R , L e C) são ajustados de forma a reproduzir a resposta em frequência do TPC, independentemente da natureza da carga instalada no terminal secundário.

Izykowski *et al.* (1998) fazem uso de um modelo simplificado de TPC para facilitar o projeto de um compensador que entra em operação somente quando é detectado uma falta no sistema. Nesta dissertação, a partir de um modelo preciso de TPC, é desenvolvido uma cascata de filtros recursivos para correção *online* da tensão secundária de TPCs.

Izykowski *et al.* (1998) afirmam ainda que projetos que almejam um compensador mais ideal, na tentativa de obter uma resposta em frequência completamente plana para o TPC, leva a concepção de filtros muito complexos que podem apresentar problemas de estabilidade numérica e condições iniciais. Todavia, nesta dissertação é apresentado um compensador na forma de um filtro digital recursivo com seções de segunda ordem em cascata, que possibilita uma resposta em frequência praticamente plana no espectro de 10 Hz a 10 kHz, para o ganho e a fase da relação de transformação de tensão do TPC, além de superar os problemas de complexidade computacional avaliados na literatura.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

Por motivos técnicos e econômicos, os sistemas de transmissão de energia com tensões acima de 138 kV fazem uso de TPCs para transformar tensões de transmissão em tensões suportáveis pelos instrumentos de medição e proteção. Na Figura 3.1 apresenta-se o esquema elétrico básico de um TPC típico na frequência de operação do sistema. Nessa Figura, as capacitâncias C_1 e C_2 estão usualmente imersas em óleo isolante dentro de uma coluna de porcelana e possuem a função de reduzir o nível de tensão do sistema para alimentar o enrolamento primário de um TPI, o qual fornecerá uma tensão secundária V_0 aos instrumentos de medição e proteção ali introduzidos.

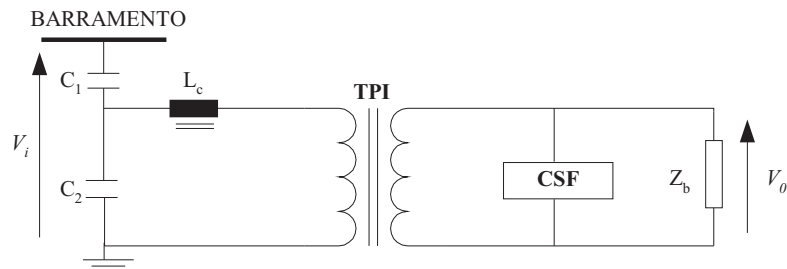


Figura 3.1 – Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz.

Como na maioria dos transdutores de tensão, os TPCs devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão. Contudo, os mesmos só conseguem fazê-lo quando o sinal do primário V_i apresenta apenas a frequência fundamental. Isso porque o reator de compensação L_c forma um circuito ressonante sintonizado na frequência de regime do sistema para evitar diferenças de fase entre as tensões V_i e V_0 nessa frequência (D'AJUZ *et al.*, 1985; ARRILLAGA; WATSON, 2003).

O reator de compensação e o TPI possuem núcleo de material ferromagnético e, além

de introduzirem perdas de energia no cobre e no núcleo, esses elementos podem produzir ferroressonância devido à possibilidade de as capacitâncias do circuito entrarem em ressonância com as não linearidades no núcleo ferromagnético. Esse fenômeno transitório compromete a qualidade do sinal de tensão do equipamento, levando a informações falsas que poderiam ser transferidas aos instrumentos de medição e proteção. Por causa disso, os TPCs são equipados com um circuito supressor de ferroressonância (CSF), normalmente conectado no lado secundário do TPI, para amenizar esse tipo de problema (KOJOVIC *et al.*, 1992; TZIOUVARAS *et al.*, 2000).

3.1 Modelo de TPC para Análise de Compensação

Na realidade, o esquema elétrico da Figura 3.1 é válido apenas para frequências próximas de 60 Hz. Um modelo aplicável para estudos em frequências acima de 1 kHz precisa levar em consideração as capacitâncias parasitas entre os enrolamentos e as capacitâncias parasitas entre cada enrolamento e a terra (KEZUNOVIC *et al.*, 1992; IRAVANI *et al.*, 1998).

Um modelo geral de TPC operando em frequências acima de 1 kHz pode ser representado conforme a Figura 3.2. 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) (KEZUNOVIC *et al.*, 1992). Contudo, uma representação detalhada do TPC exige dados que não são facilmente fornecidos pelos fabricantes nem mesmo medidos.

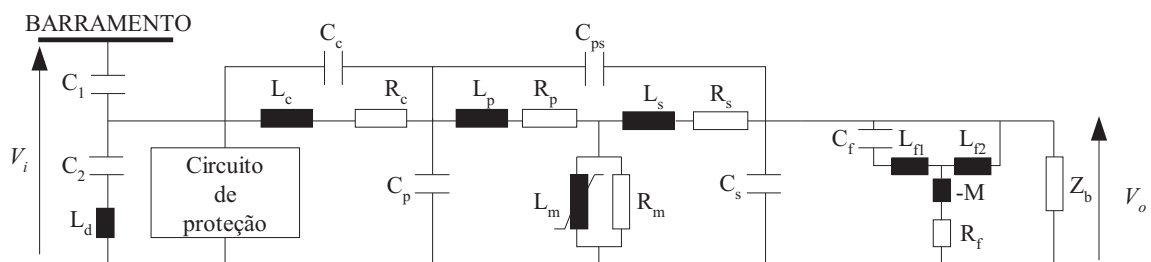


Figura 3.2 – Modelo geral de um TPC para frequências acima de 1 kHz.

Com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo, Kezunovic *et al.* (1992) e FERNANDES JÚNIOR (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, os autores concluí-

ram que L_d , C_{ps} , R_s , L_s e C_s não provocam alterações significativas nas curvas de resposta em frequência do TPC, dando indicação de que podem ser suprimidos do modelo sem comprometer os resultados. Após as simplificações do modelo, o circuito equivalente do TPC passou a apresentar apenas os parâmetros mais relevantes, cuja topologia é mostrada na Figura 3.3. Esse modelo, acrescido dos elementos limitadores de tensão e dos elementos que contêm núcleo ferromagnético, tem sido utilizado com sucesso em estudos de transitórios eletromagnéticos (FERNANDES JÚNIOR *et al.*, 2007b; NEVES *et al.*, 2007).

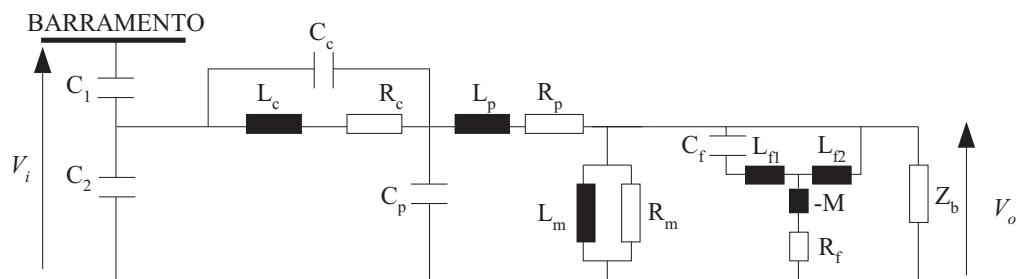


Figura 3.3 – Modelo simplificado de um TPC para frequências de 10 Hz a 10 kHz.

3.2 Metodologia para Obtenção dos Parâmetros do TPC

Num projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em conjunto com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), Neves *et al.* (2007) desenvolveram um software denominado TPCalc para o cálculo dos parâmetros lineares do TPC, cujo algoritmo é descrito em FERNANDES JÚNIOR (2003).

Para desenvolver a equação que descreve o modelo matemático do TPC foram utilizadas as impedâncias equivalentes dos elementos do circuito da Figura 3.3.

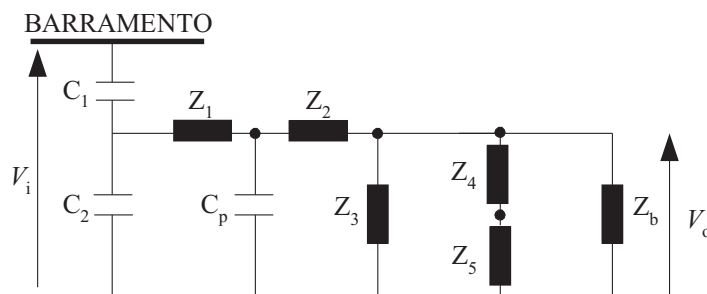


Figura 3.4 – Modelo do TPC com impedâncias equivalentes.

As expressões para as impedâncias do circuito da Figura 3.4 são:

$$Z_1 = (R_c + sL_c) // (1/sC_c) \quad (3.1)$$

$$Z_2 = R_p + sL_p \quad (3.2)$$

$$Z_3 = R_m // sL_m \quad (3.3)$$

$$Z_4 = (sL_{f1} + 1/sC_f) // sL_{f2} \quad (3.4)$$

$$Z_5 = R_f - sM, \quad (3.5)$$

sendo o símbolo $//$ de indicação de que os elementos estão conectados em paralelo.

Uma vez que as funções de transferência do modelo, amplitude e fase da relação de tensão representada por V_o/V_i , dependem não linearmente dos elementos do equipamento, faz-se necessário o uso de uma técnica de ajuste de funções não lineares para computar os parâmetros do TPC.

3.2.1 Ajuste de Funções não Lineares

No TPCalc se tem como função objetivo

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - M(\omega_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right)^2, \quad (3.6)$$

a qual quantifica a similaridade entre a resposta em frequência de referência y_i e a resposta do modelo $M(\omega_i; \mathbf{a})$, cujo vetor paramétrico \mathbf{a} deseja-se determinar.

Na Equação 3.6, i é o i -ésimo valor de frequência e σ_i é o desvio relacionado às medições de resposta em frequência do TPC.

O problema de mínimos quadrados não lineares está relacionado ao problema de resolução de sistemas de equações não lineares e a otimização em um espaço multidimensional. Sua solução geralmente baseia-se em métodos iterativos, destacando-se o método de Newton por servir de base a vários outros (MADSEN *et al.*, 2004).

Método de Newton

O método de Newton usa uma aproximação quadrática para a função objetivo a partir da expansão da série de Taylor de segunda ordem em torno de um ponto \mathbf{a}_i . A aproximação da série de Taylor de segunda ordem em uma dimensão n pode ser escrita na seguinte forma matricial

$$F(\mathbf{a} + \mathbf{p}) \approx F(\mathbf{a}) + \mathbf{p}^T \nabla F(\mathbf{a}) + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \nabla^2 F(\mathbf{a}) \mathbf{p}. \quad (3.7)$$

O passo \mathbf{p} é obtido impondo-se que o valor da função $F(\mathbf{a} + \mathbf{p})$ seja mínimo, o que equivale a seu gradiente com respeito a \mathbf{p} ser igual a zero. Dessa forma,

$$\nabla F(\mathbf{a} + \mathbf{p}) = \nabla F(\mathbf{a}) + \nabla^2 F(\mathbf{a})\mathbf{p} , \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{a})\mathbf{p} = -\nabla F(\mathbf{a}). \quad (3.9)$$

Os operadores $\nabla F(\mathbf{a})$ e $\nabla^2 F(\mathbf{a})$ são denominados vetor gradiente e matriz Hessiana, respectivamente. O primeiro é o vetor que contém as primeiras derivadas da função objetivo e o segundo é a matriz que contém informações relacionadas às primeiras e segundas derivadas da função objetivo. Maiores detalhes podem ser consultados no Apêndice A.

O processo iterativo baseado na aproximação de $F(\mathbf{a})$ por um modelo quadrático é designado método de Newton. O vetor de soluções na k -ésima iteração é dado por

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \mathbf{p}_k. \quad (3.10)$$

Sendo \mathbf{p}_k a direção de busca que satisfaz

$$\nabla^2 F(\mathbf{a}_k)\mathbf{p}_k = -\nabla F(\mathbf{a}_k). \quad (3.11)$$

Esse método apresenta a inconveniência do cálculo das segundas derivadas da função objetivo para computar a matriz Hessiana. O método apresenta convergência local, logo, para garantir convergência para um ponto estacionário da função objetivo, é necessário que a estimativa inicial \mathbf{a}_0 esteja próxima da solução (RAO, 1996).

Método de Gauss-Newton

Com intuito de eliminar o cálculo das segundas derivadas da função objetivo para computar a matriz Hessiana, Karl Friedrich Gauss (1777-1855) sugeriu que a parte das segundas derivadas da função objetivo fosse ignorada. Assim, as equações iterativas na k -ésima iteração ficam com o seguinte aspecto:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \mathbf{p}_k. \quad (3.12)$$

Sendo \mathbf{p}_k a direção de busca que satisfaz,

$$[J(\mathbf{a})^T J(\mathbf{a})] \mathbf{p}_k = -\nabla F(\mathbf{a}_k), \quad (3.13)$$

onde a matriz $J(\mathbf{a}) \in \Re^{m \times n}$ é definida como Jacobiano e contém as primeiras derivadas parciais da função objetivo $F(\mathbf{a})$.

O método iterativo obtido a partir da aplicação da Equação 3.13 é conhecido como método de Gauss-Newton. Esse método supera a inconveniência do cálculo das segundas derivadas da função objetivo, contudo, assim como o método de Newton, esse método apresenta características de convergência local e pode não convergir em problemas com grandes resíduos (DENNIS JUNIOR; SCHNABEL, 1996).

Método de Levenberg-Marquardt

Levenberg (1944) e mais tarde Marquardt (1963) sugeriram a Equação 3.14 como modificação do método de Gauss-Newton para torná-lo global e superar problemas de convergência (DENNIS JUNIOR; SCHNABEL, 1996; MADSEN *et al.*, 2004).

$$[J(\mathbf{a})^T J(\mathbf{a}) + \mu_k \mathbf{I}] \mathbf{p}_k = -\nabla F(\mathbf{a}_k), \quad (3.14)$$

onde, $\mathbf{I} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ é a matriz identidade e $\mu_k \geq 0$ é um parâmetro definido na k -ésima iteração.

Na literatura, o algoritmo Levenberg-Marquardt foi especialmente desenvolvido para problemas de mínimos quadrados não lineares (CHONG; ZAK, 2001), cuja direção de busca satisfaz \mathbf{p}_k na equação 3.14. O parâmetro μ_k proporciona os seguintes efeitos (MADSEN *et al.*, 2004):

1. Para todo $\mu_k \geq 0$, a matriz Hessiana de $F(\mathbf{a})$ é positivo definida, o que assegura que \mathbf{p}_k está na direção descendente;
2. Para grandes valores de μ_k , $\mathbf{p}_k = -\frac{\nabla F(\mathbf{a}_k)}{\mu_k}$ é um pequeno passo na direção descendente, aproximando-se do método do máximo declive descendente;
3. Se μ_k é muito pequeno, então o método iguala-se ao método de Gauss-Newton que é bom quando a iteração atual está próxima da solução ótima \mathbf{a}^* .

O software TPCalc utiliza o método de Levenberg-Marquardt para solução do problema de mínimos quadrados não lineares, cuja estratégia de atualização do parâmetro μ_k foi proposto por Press *et al.* (2007).

3.2.2 Software TPCalc

O software possui várias funcionalidades, entre as quais, calcula os parâmetros lineares que reproduzem a resposta em frequência do ganho e da fase do TPC, permite uma

análise de sensibilidade no domínio da frequência para detectar quais dos seus parâmetros apresentam maior relevância no modelo e externa um arquivo com o modelo computacional do equipamento no formato de cartão do programa ATP (MACHADO *et al.*, 2008).

O primeiro contato com o software é por meio de sua janela principal, conforme pode ser visualizada na Figura 3.5. A mesma apresenta caixas editáveis, dando uma orientação sobre a ordem de grandeza dos parâmetros que servem de entrada para o programa, podendo o usuário editar as estimativas iniciais para o conjunto de parâmetros, ou ainda utilizar dados da biblioteca do software .

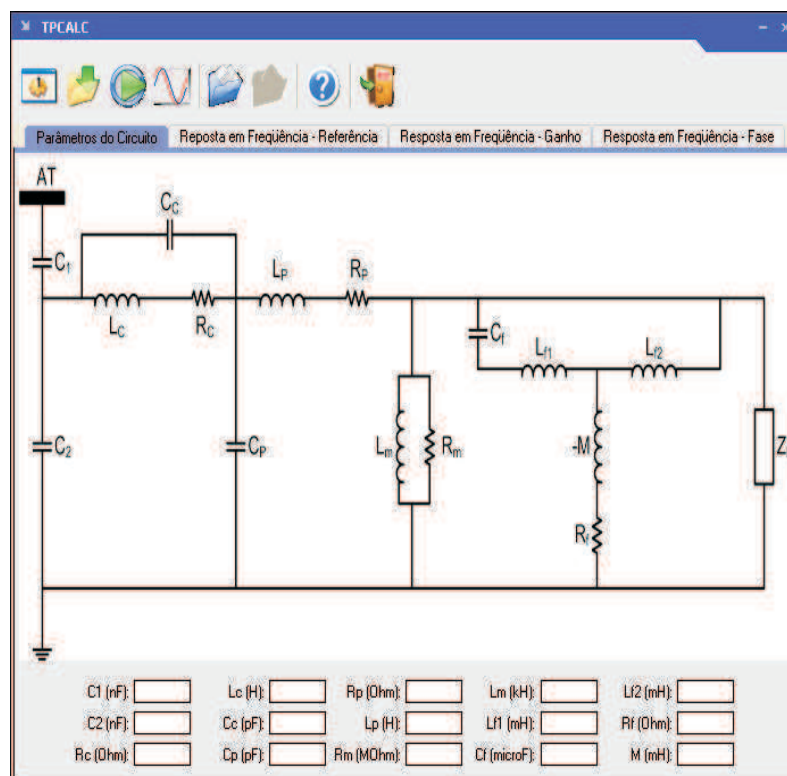


Figura 3.5 – Tela principal do software TPCalc.

Cálculo dos Parâmetros de um TPC de 138 kV

Os parâmetros R , L e C de um TPC de 138 kV (KOJOVIC *et al.*, 1994) são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de um TPC de 138 kV reportados de Kojovic *et al.* (1994).

$C_1 = 5,65 \text{ nF}$	$C_p = 154,0 \text{ pF}$	$L_{f1} = 481,0 \text{ mH}$
$C_2 = 81,1 \text{ nF}$	$R_p = 400,0 \Omega$	$C_f = 9,6 \mu\text{F}$
$R_c = 228,0 \Omega$	$L_p = 2,85 \text{ H}$	$L_{f2} = 247,0 \text{ mH}$
$L_c = 56,5 \text{ H}$	$R_m = 1,0 \text{ M}\Omega$	$R_f = 37,5 \Omega$
$C_c = 127,0 \text{ pF}$	$L_m = 10,0 \text{ kH}$	$M = 163,0 \text{ mH}$

A fim de verificar o desempenho do software no cálculo de parâmetros de TPCs, os parâmetros da Tabela 3.1 foram utilizados para reproduzir as curvas de resposta em frequência de amplitude e fase da relação de tensão do TPC e os resultados obtidos foram utilizados como dados de entrada para o TPCalc, com o objetivo de recalculer os parâmetros do TPC. Um conjunto de estimativa inicial, construído a partir de valores fisicamente realizáveis para os parâmetros de um circuito que contém resistores, indutores e capacitores foram dados como estimativas iniciais para o software.

Os parâmetros recalculados após o processo de ajuste são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de um TPC de 138 kV recalculados após o processo de ajuste.

$C_1 = 5,65 \text{ nF}$	$C_p = 156,0 \text{ pF}$	$L_{f1} = 332,8 \text{ mH}$
$C_2 = 81,1 \text{ nF}$	$R_p = 360,0 \text{ } \Omega$	$C_f = 127,57 \text{ } \mu\text{F}$
$R_c = 71,31 \text{ } \Omega$	$L_p = 2,83 \text{ H}$	$L_{f2} = 225,6 \text{ mH}$
$L_c = 56,16 \text{ H}$	$R_m = 510,0 \text{ M}\Omega$	$R_f = 39,59 \text{ } \Omega$
$C_c = 127,7 \text{ pF}$	$L_m = 6,51 \text{ kH}$	$M = 134,2 \text{ mH}$

Os resultados do ajuste são mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7, para módulo e fase, respectivamente.

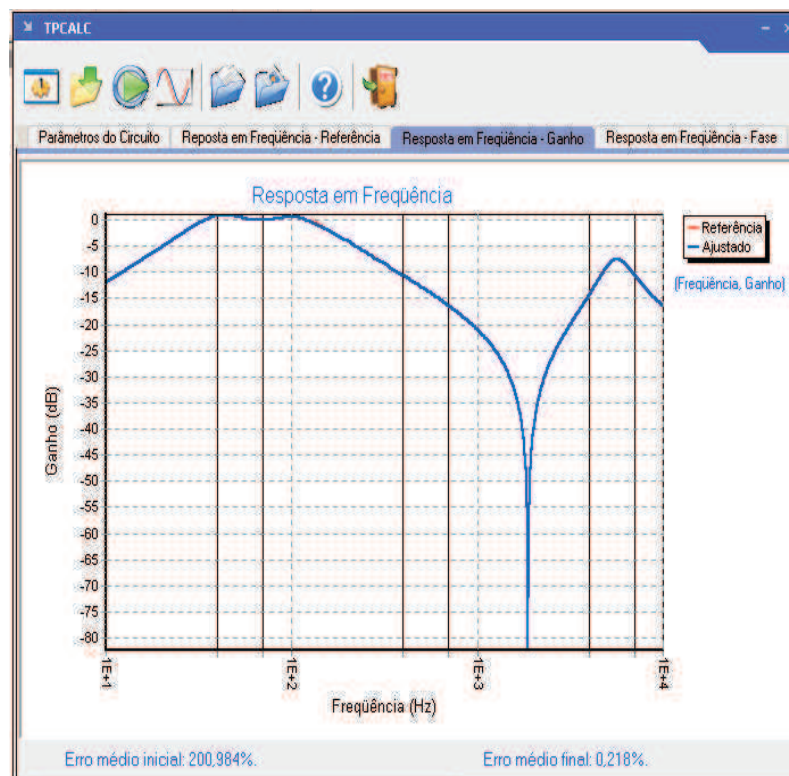


Figura 3.6 – Resposta em frequência do ganho do TPC de 138 kV após o processo de ajuste.

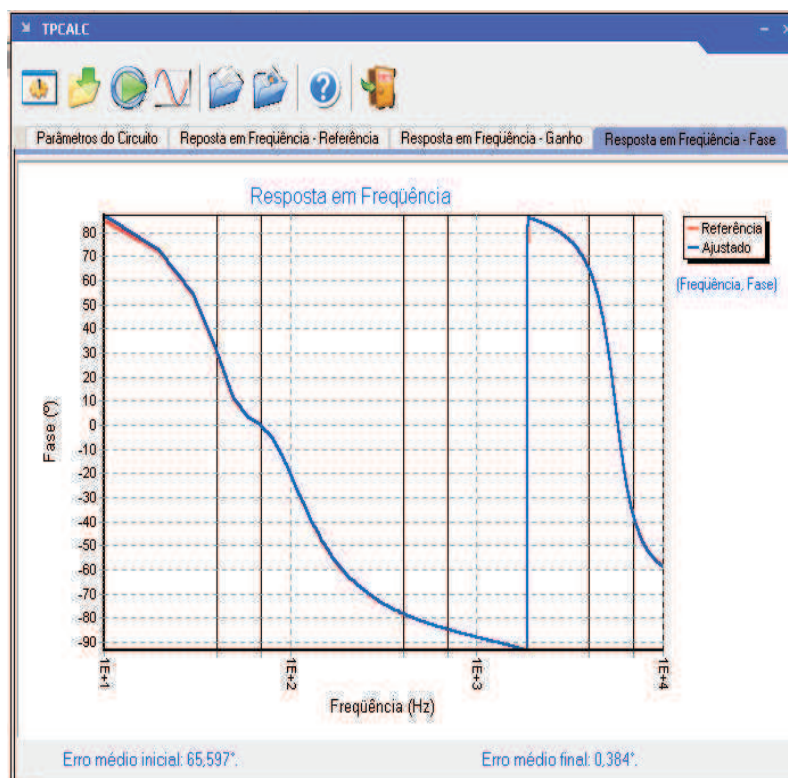


Figura 3.7 – Resposta em frequência da fase do TPC de 138 kV após o processo de ajuste.

Observam-se que as curvas obtidas com os parâmetros originais do TPC de 138 kV (Tabela 3.1) e as curvas obtidas com os parâmetros recalculados (Tabela 3.2) são coincidentes em todo espectro avaliado. Os erros do ganho e fase da relação de tensão do TPC calculados no início do processo iterativo foram 200,984 % e 65,597 graus, respectivamente. Após o processo de ajuste, os erros passaram a ser 0,218 % para o ganho e 0,384 graus para a fase.

Cálculo dos Parâmetros de um TPC de 230 kV

Os parâmetros de um TPC de 230 kV foram estimados a partir dos dados de resposta em frequência de amplitude e fase da sua relação de tensão, medidos no Laboratório de Alta Tensão da UFCG (FERNANDES JÚNIOR, 1999).

Para realizar as medições de resposta em frequência de ganho e fase de um TPC de 230 kV, de 10 Hz a 10 kHz, FERNANDES JÚNIOR (1999) realizou o diagrama de montagem apresentado na Figura 3.8.

Nesse diagrama, a tensão secundária é obtida nos terminais de baixa tensão quando da aplicação de um sinal no terminal primário. Para a leitura das frequências e das diferenças de fase entre o sinal aplicado e o sinal de tensão no secundário foi utilizado um osciloscópio

digital não representado no diagrama.

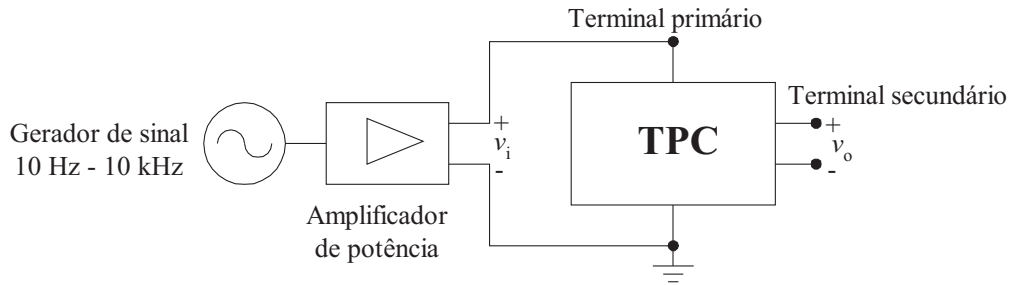


Figura 3.8 – Montagem para a medição de resposta em frequência de um TPC de 230 kV.

Tomando-se as medições de resposta em frequência do TPC de 230 kV como dados de entrada para o TPCalc, bem como um conjunto de estimativas iniciais fisicamente possíveis para os parâmetros do TPC, foi possível realizar um ajuste de curvas para o ganho e fase do TPC. Os parâmetros utilizados como estimativas iniciais do processo de ajuste são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Estimativas iniciais para os parâmetros do TPC de 230 kV.

$C_1 = 10,0 \text{ nF}$	$C_p = 30,0 \text{ pF}$	$L_{f1} = 3,0 \text{ mH}$
$C_2 = 65,4 \text{ nF}$	$R_p = 30,0 \text{ k}\Omega$	$C_f = 170,0 \text{ }\mu\text{F}$
$R_c = 3,0 \text{ k}\Omega$	$L_p = 170,0 \text{ H}$	$L_{f2} = 170,0 \text{ mH}$
$L_c = 170,0 \text{ H}$	$R_m = 1826,6 \text{ M}\Omega$	$R_f = 1,7 \text{ }\Omega$
$C_c = 3,0 \text{ nF}$	$L_m = 17,0 \text{ kH}$	$M = 8 \text{ mH}$

Os parâmetros estimados para o TPC de 230 kV são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros calculados para o TPC de 230 kV após o ajuste de curvas.

$C_1 = 10,0 \text{ nF}$	$C_p = 512,8 \text{ pF}$	$L_{f1} = 4,1 \text{ mH}$
$C_2 = 65,4 \text{ nF}$	$R_p = 7,7 \text{ k}\Omega$	$C_f = 226,9 \text{ }\mu\text{F}$
$R_c = 505,0 \text{ }\Omega$	$L_p = 98,3 \text{ H}$	$L_{f2} = 30,5 \text{ mH}$
$L_c = 338,5 \text{ H}$	$R_m = 1826,6 \text{ M}\Omega$	$R_f = 4,3 \text{ }\Omega$
$C_c = 668,9 \text{ nF}$	$L_m = 7,0 \text{ kH}$	$M = 3,9 \text{ mH}$

Com base nas Figuras 3.9 e 3.10, nota-se que os erros são relativamente pequenos para quase toda a faixa de frequência. Os erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC calculados no início do processo iterativo foram 134,49% e 36,67 graus, respectivamente. Após o processo de ajuste, os erros passaram a ser 3,74% e 7,00 graus.

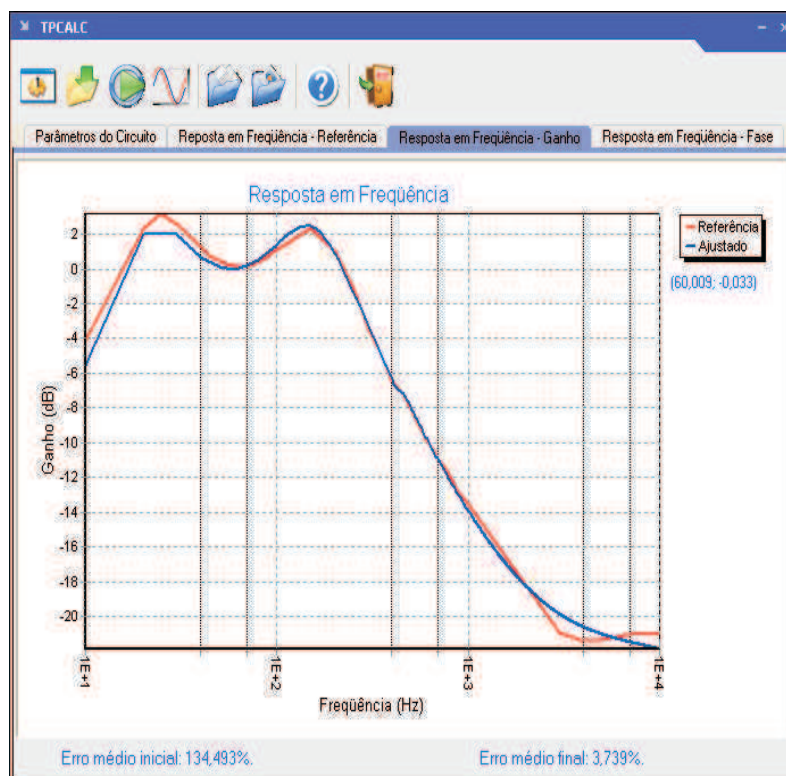


Figura 3.9 – Resposta em frequência do ganho do TPC de 230 kV após o processo de ajuste.

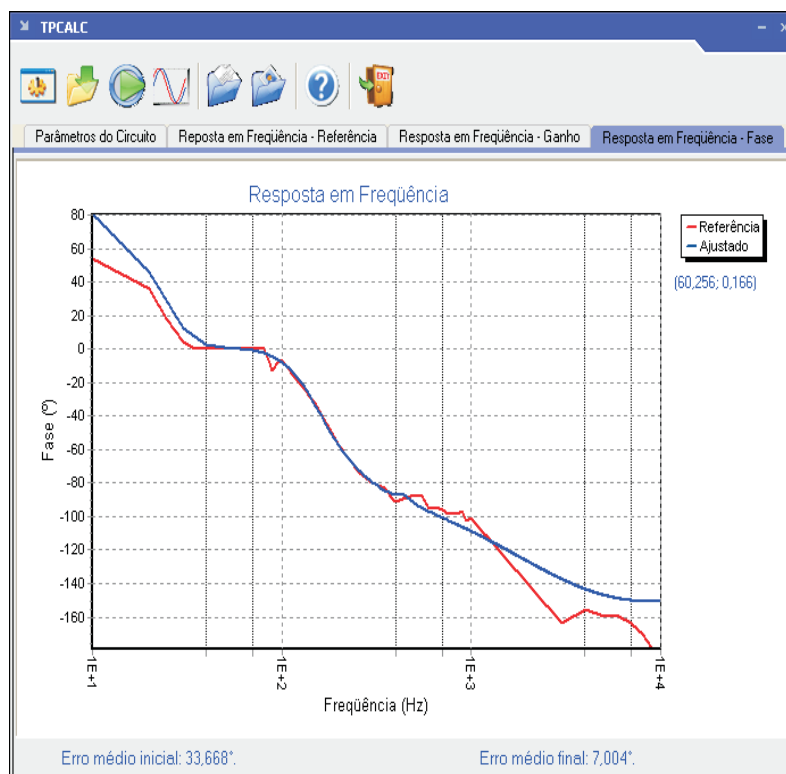


Figura 3.10 – Resposta em frequência da fase do TPC de 230 kV após o processo de ajuste.

3.3 Distúrbios da Tensão Secundária de TPCs

Os distúrbios da tensão secundária de TPCs afetam os sistemas de proteção (HARDER, 1951; HUGHES, 1975; KASZTENNY *et al.*, 2000; PAJUELO, 2006) bem como as medições para fins de monitoramento/faturamento (BRADLEY *et al.*, 1986; XIAO *et al.*, 2004).

Do ponto de vista de proteção, sabe-se que na ocorrência de uma falta no sistema de transmissão/subtransmissão de energia elétrica, a tensão secundária do TPC não representa instantaneamente uma réplica da tensão primária. Isso acontece porque a energia armazenada nos elementos, como capacitores e indutores, não mudam instantaneamente sua carga ou fluxo. A energia armazenada nesses elementos causam transitórios na tensão de saída do TPC que dependem, dentre outros fatores, do ponto de inicialização da falta (KASZTENNY *et al.*, 2000). Nessas condições, a resposta transitória do TPC inclui componentes não presentes no sinal de entrada e que, por consequência, pode levar o sistema de proteção a operar de forma inadequada (PAJUELO, 2006). Um dos objetivos da compensação dinâmica da tensão secundária do TPC é amenizar esse tipo de distúrbio.

Analisando os TPCs como elementos transdutores de tensão, eles possuem uma relação de transformação de tensão ajustada pelo fabricante somente para a frequência fundamental do sistema. Logo, os sinais medidos no terminal secundário têm precisão apenas para esta frequência. Isso retrata que os TPCs não conseguem reproduzir os sinais transitórios oriundos de manobras do sistema nem mesmo os sinais distorcidos harmonicamente devido a presença de dispositivos de eletrônica de potência como, por exemplo, inversores e retificadores encontrados nos grandes centros industriais. A compensação do TPC permite tornar a relação de transformação de tensão invariável com a frequência, o que propicia uma medição mais adequada tanto de amplitude quanto de fase do sinal de alta tensão.

Adotando o conjunto de parâmetros R , L e C da Tabela 3.2 para o TPC de 138 kV, foi obtida a resposta transitória do modelo de TPC quando da ocorrência de uma mudança abrupta na tensão primária. Para efeito de comparação, as Figuras 3.11(a) e 3.11(b) mostram a resposta de um divisor de tensão ideal (TPC IDEAL) e a resposta do modelo de TPC utilizado (TPC REAL).

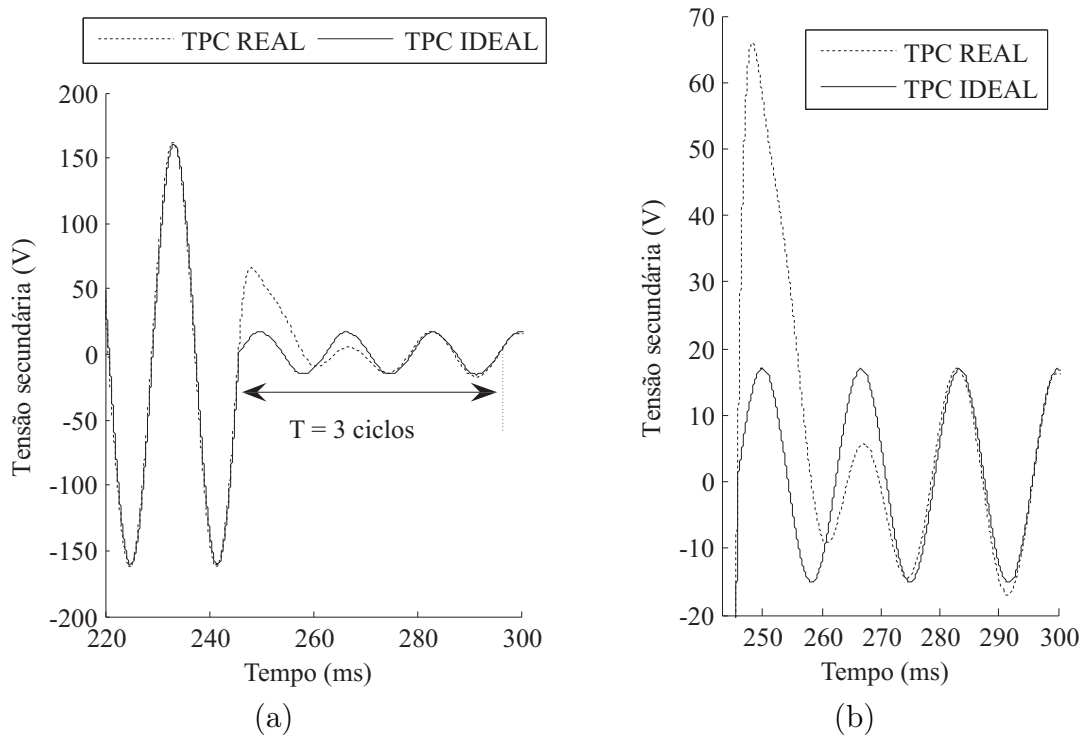


Figura 3.11 – (a) Tensão secundária do TPC quando da ocorrência de uma mudança abrupta na tensão primária. (b) Detalhe da tensão secundária apresentada na Figura 3.11(a).

Com base nas Figuras 3.11(a) e 3.11(b), observa-se que durante o colapso da tensão primária do TPC, o sinal do secundário não segue a tensão de um divisor de tensão ideal antes que se passem 3 ciclos de operação na base de 60 Hz.

A Figura 3.12(a) representa um sinal de tensão de 138 kV distorcido harmonicamente, enquanto na Figura 3.12(b) tem-se o sinal nos terminais secundários do TPC de 138 kV.

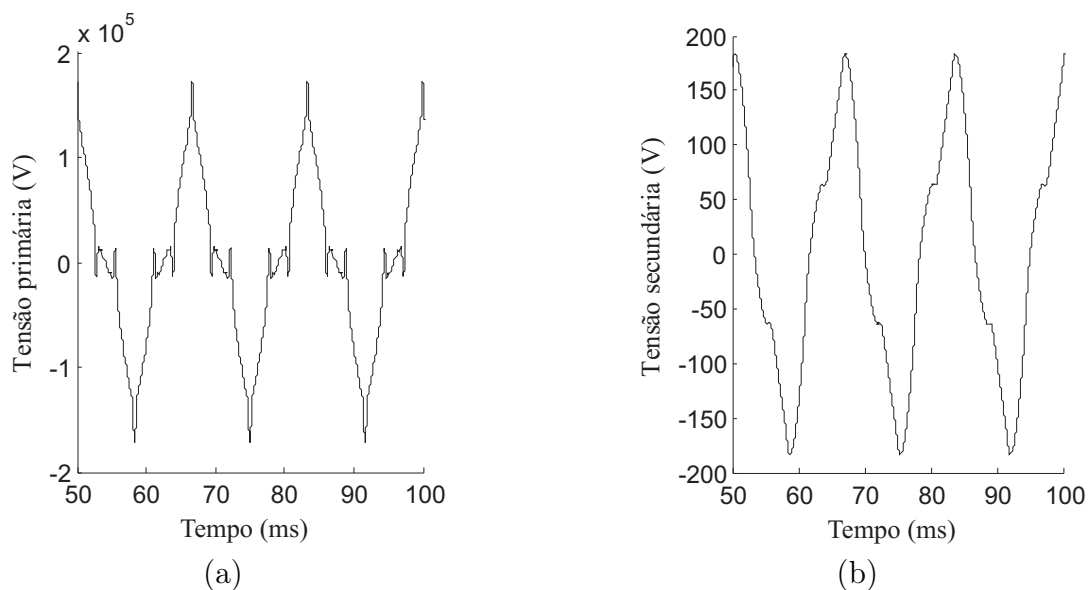


Figura 3.12 – (a) Tensão secundária do TPC de 138 kV. (b) Tensão primária do TPC de 138 kV distorcida harmonicamente.

Observa-se claramente que durante operações de medição da tensão com componentes de frequências diferentes da fundamental, alguns espectros são atenuados ou amplificados de acordo com a relação de transformação de tensão do TPC. A compensação dinâmica tem como objetivo corrigir as relações de ganho e fase do TPC. Dessa forma, o sinal secundário compensado passa a conter praticamente todas as componentes de frequência presentes no sinal do primário.

Os aspectos relativos à implementação do método proposto, assim como os resultados da compensação no domínio da frequência de dois TPCs com diferentes níveis de tensão, são apresentados de forma detalhada no capítulo 4.

Capítulo 4

O Método Proposto

Conforme se verifica na literatura, as técnicas de compensação dinâmica implementáveis em DSP são fundamentadas na modelagem da inversa da função de transferência do TPC. Idealmente, para tornar a relação de transformação de tensão dos TPCs invariável com a frequência, a função de transferência do compensador deve corresponder à inversa da função de transferência do TPC. Todavia, tal implementação levaria a compensadores no domínio do tempo com funções impulso ou suas derivadas, pois o número de pólos do compensador seria menor que o número de zeros. A compensação apenas dos pólos dominantes do TPC introduz melhorias na dinâmica desse transdutor, contudo, o TPC compensado não possui resposta em frequência plana e necessita de compensadores por avanço/atraso de fase para ajustar o ganho e a fase nas condições normais de operação.

Até agora, os estudos reportados na literatura são limitados quanto ao domínio de estudo tempo/frequência, ao uso de um modelo de TPC simplificado e à falta de uma metodologia para obtenção dos parâmetros do TPC e do compensador.

A partir da relação de transformação de tensão de um modelo de TPC e de um método de obtenção dos seus parâmetros R , L e C , é desenvolvido um compensador o qual tem seu desempenho testado no domínio da frequência e do tempo. O software ATP e a linguagem MODELS são utilizados para desenvolver e avaliar a técnica de compensação implementada, uma vez que há uma interação dinâmica em tempo de execução entre esses (DUBE, 1996).

Segundo FERNANDES JÚNIOR (1999), a relação de transformação de tensão do modelo de TPC da Figura 3.3 pode ser expressa na forma

$$G_{TPC}(s) = \frac{A_7s^7 + A_6s^6 + A_5s^5 + A_4s^4 + A_3s^3 + A_2s^2}{B_8s^8 + B_7s^7 + B_6s^6 + B_5s^5 + B_4s^4 + B_3s^3 + B_2s^2 + B_1s + B_0}. \quad (4.1)$$

Nessa equação, os coeficientes $A_n, n = 2, \dots, 7$ e $B_m, m = 0, \dots, 8$ são funções não

lineares dos elementos R , L e C do modelo de TPC.

Para obter uma compensação ideal, isto é, ganho unitário e um mínimo de deslocamento de fase entre a tensão primária e secundária compensada, verifica-se que a planta do compensador e do TPC definidas por $G_{COM}(s)$ e $G_{TPC}(s)$, respectivamente, devem possuir a relação

$$G_{TPC}(s)G_{COM}(s) = 1. \quad (4.2)$$

Isolando $G_{COM}(s)$ na Equação 4.2, verifica-se que o compensador é instável no domínio do tempo. Como solução dessa inconveniência, propõe-se alterar a Equação 4.2 para forma

$$G_{TPC}(s)G_{COM}(s)\phi(s) = 1, \quad (4.3)$$

em que $\phi(s)$ é uma função racional imprópria. Assim, a planta do compensador assume a expressão

$$G_{COM}(s) = [G_{TPC}(s)\phi(s)]^{-1}. \quad (4.4)$$

Substituindo (4.4) em (4.3), tem-se:

$$G_{TPC}(s)G_{TPC}(s)^{-1}\phi(s)^{-1} = 1, \quad (4.5)$$

$$\alpha(s) = 1, \quad (4.6)$$

onde, $\alpha(s)$ é uma função racional própria que corresponderá a função de transferência do TPC compensado. Por consequência, $\alpha(s)$ ditará a reposta em frequência bem como o comportamento dinâmico e de regime do TPC compensado.

O diagrama de blocos mostrado na Figura 4.1 sintetiza o exposto acima. Nessa Figura, $V_i(s)$, $V_o(s)$ e $V_{sc}(s)$ correspondem, respectivamente, à tensão primária do TPC, tensão secundária não compensada e tensão secundária compensada.

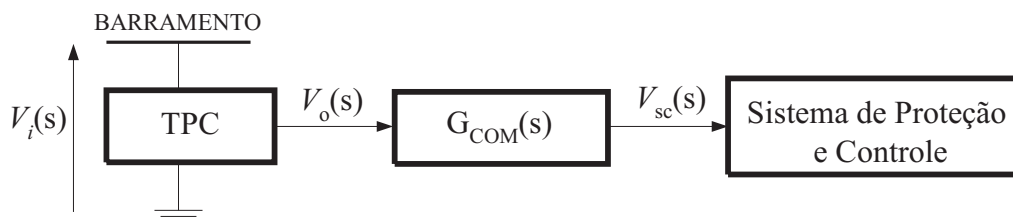


Figura 4.1 – Diagrama de blocos de compensação do TPC.

A partir da Figura 4.1 e da Equação 4.4, verifica-se que a tensão primária do TPC e a tensão secundária compensada estão relacionadas pela equação

$$V_{sc}(s) = V_i(s)\alpha(s). \quad (4.7)$$

Após a compensação da tensão secundária, todos os pólos do TPC são compensados. O cancelamento apenas dos pólos dominantes não atende às especificações de resposta em frequência desejadas, isto é, ganho unitário e deslocamento de fase mínimo. Portanto, toda dinâmica do TPC é cancelada, ficando a cargo da função $\alpha(s)$ o comportamento dinâmico e a resposta em frequência do TPC compensado.

4.1 Modelo Analítico do TPC Compensado

Conforme ressaltado na seção anterior, a função $\alpha(s)$ conduz a resposta em frequência do TPC compensado e sua transformada inversa o comportamento dinâmico. As características necessárias para essa função podem ser determinadas a partir da análise da Equação 4.8, que corresponde a substituição de $G_{TPC}(s)$ na Equação 4.4.

$$G_{COM}(s) = \left[\frac{B_8 s^8 + B_7 s^7 + B_6 s^6 + B_5 s^5 + B_4 s^4 + B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}{s^2(A_7 s^5 + A_6 s^4 + A_5 s^3 + A_4 s^2 + A_3 s + A_2)} \right] \alpha(s). \quad (4.8)$$

Nessa expressão, nota-se que a inversão da função de transferência do TPC acarreta um pólo duplo na origem. A fim de cancelar esses pólos indesejáveis, $\alpha(s)$ deve possuir pelo menos um zero duplo na origem. Essa característica de $\alpha(s)$ pode ser considerada sua primeira condição de contorno. Como segunda condição de contorno, observa-se que o compensador no domínio do tempo é livre de funções impulso ou suas derivadas somente se $\alpha(s)$ for uma função estritamente própria.

Tomando-se como base essas duas condições de contorno de $\alpha(s)$, a expressão mais simples que se pode obter para a função de transferência do TPC compensado é dada pela Equação 4.9.

$$\alpha(s) = \frac{s^2}{D_3 s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0}. \quad (4.9)$$

Uma vez que $\alpha(s)$ é uma função não linear em s , os elementos D_i , (para $i = 0, \dots, 3$) podem ser determinados a partir da técnica dos mínimos quadrados não lineares apresentados na seção 3.2.1.

4.2 Estimação dos Parâmetros do Modelo

Para computar os elementos D_i , $i = 0, \dots, 3$ implementou-se o método de Levenberg-Marquardt para minimizar a função objetivo dado pela Equação 4.10. Esse método foi escolhido pelo motivo de não necessitar do cálculo das segundas derivadas da função objetivo e por apresentar características de convergência para o ótimo global.

$$F(\mathbf{D}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha(\omega_i; \mathbf{D}))^2. \quad (4.10)$$

Nessa Equação, ω_i é o i -ésimo valor de frequência, \mathbf{D} é o vetor paramétrico a ser determinado, y_i é a resposta em frequência de referência e $\alpha(\omega_i; \mathbf{D})$ é a função de transferência do modelo de TPC compensado.

A Figura 4.2 mostra o comportamento do ajuste paramétrico durante o processo recursivo. No decorrer do ajuste, observa-se que o parâmetro μ_k definido na subseção 3.2.1 varia dinamicamente permitindo que a norma do vetor gradiente ($|\nabla|$) da função objetivo tenda para zero. Ao final de 70 iterações, a função objetivo $F(\mathbf{D})$ praticamente assume a menor representação em ponto flutuante, indicando que houve um bom ajuste paramétrico.

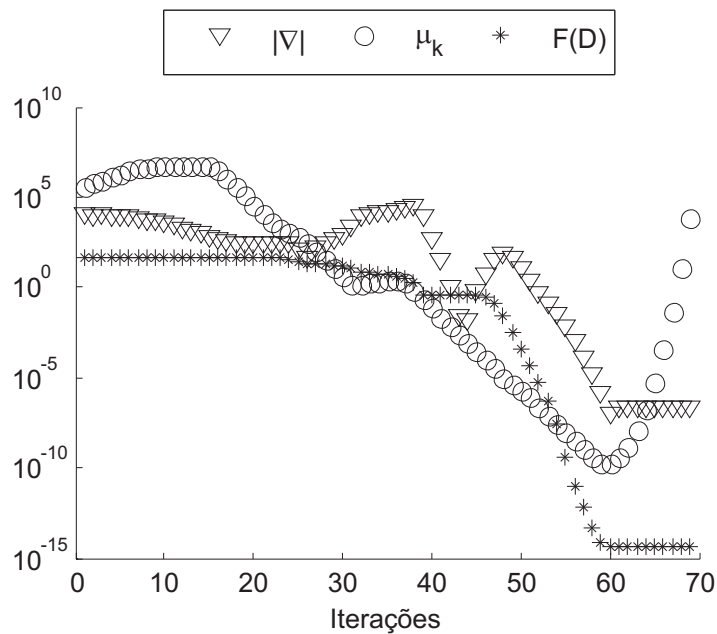


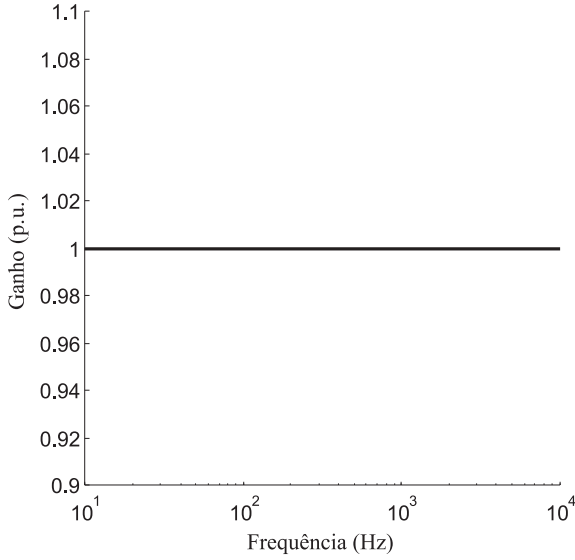
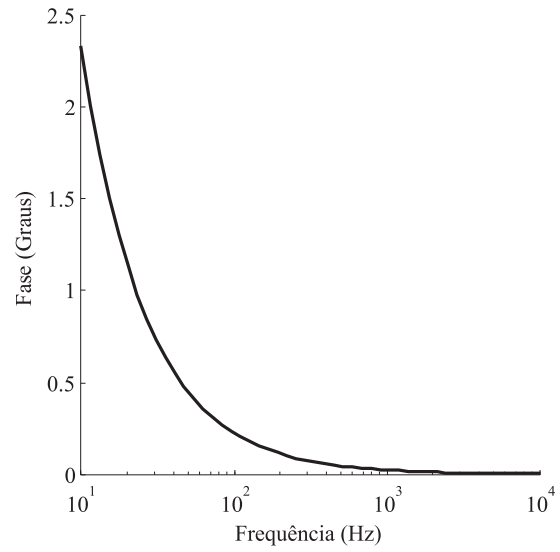
Figura 4.2 – Comportamento do ajuste paramétrico.

Os parâmetros obtidos durante o processo de ajuste são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros da planta do TPC compensado.

D_3	D_2	D_1	D_0
$4,85 \times 10^{-10}$	1,00	2,44	2,98

O comportamento do ganho e da fase do modelo de TPC compensado no espectro de frequências entre 10 Hz e 10 kHz é mostrado nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

**Figura 4.3** – Ganho da função $\alpha(s)$.**Figura 4.4** – Fase da função $\alpha(s)$.

Observa-se que as características de ganho e fase de $\alpha(s)$ obedecem às especificações desejadas para um TPC compensado.

4.3 Análise da Compensação no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo permite verificar o comportamento em regime permanente e transitório do TPC com e sem a técnica de compensação proposta. Contudo, para obter a resposta no domínio do tempo de um sistema representado no domínio da frequência, é necessário realizar a conversão entre esses dois domínios.

Considerando o diagrama de blocos mostrado na Figura 4.1 e as Equações 4.8 e 4.9, a função de transferência do compensador, $G_{COM}(s)$, pode ser generalizada por

$$G_{COM}(s) = \frac{V_{sc}(s)}{V_o(s)} = \frac{b_8s^8 + b_7s^7 + b_6s^6 + b_5s^5 + b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_8s^8 + a_7s^7 + a_6s^6 + a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}. \quad (4.11)$$

Os parâmetros $a_j, b_j, j = 0, \dots, 8$ são funções não lineares dos elementos R, L e C do TPC e dos parâmetros $D_i, i = 0, \dots, 3$ da função de transferência do modelo de TPC compensado. No Apêndice B são apresentadas as expressões dos coeficientes da função de transferência do compensador.

A equação dinâmica do compensador é obtida a partir da aplicação da transformada inversa de Laplace sobre a Equação 4.11,

$$\begin{aligned} \frac{d^8 v_{sc}(t)}{dt^8} + a_7 \frac{d^7 v_{sc}(t)}{dt^7} + \dots + a_1 \frac{dv_{sc}(t)}{dt} + a_0 v_{sc}(t) = \\ b_8 \frac{d^8 v_o(t)}{dt^8} + b_7 \frac{d^7 v_o(t)}{dt^7} + \dots + b_1 \frac{dv_o(t)}{dt} + b_0 v_o(t). \end{aligned} \quad (4.12)$$

Essa equação diferencial linear de coeficientes constantes corresponde a equação dinâmica de um filtro analógico cuja solução no tempo fornece a tensão de saída do TPC compensado.

4.3.1 Resposta no Tempo por Método de Integração

As equações diferenciais de coeficientes constantes podem ser solucionadas diretamente por meio de métodos numéricos de integração que permitem discretizar e, portanto, tornar as equações diferenciais em equações de diferença. Ogata (1995) apresenta sete formas diferentes para se obter as equações de diferença a partir das equações diferenciais. Nem todas as características de um sistema são mantidas após sua discretização. Um sistema pode apresentar um grau de distorção diferente tanto na resposta transitória como na resposta em frequência, dependendo do período de amostragem e da forma de discretização (ZANETTA JÚNIOR, 2003; ARAÚJO; NEVES, 2005).

Os programas do tipo EMTP utilizam o método de integração trapezoidal cuja técnica de mapeamento entre o plano s e o plano z é denominada de transformação bilinear (DOMMEL, 1996). Essa transformação é obtida fazendo-se,

$$s = \frac{2}{\Delta t} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right). \quad (4.13)$$

Aplicando essa transformação à planta do compensador, obtém-se uma função de transferência discreta no domínio z cuja forma é

$$\frac{V_{sc}(z)}{V_o(z)} = \frac{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4} + d_5 z^{-5} + d_6 z^{-6} + d_7 z^{-7} + d_8 z^{-8}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + c_4 z^{-4} + c_5 z^{-5} + c_6 z^{-6} + c_7 z^{-7} + c_8 z^{-8}}. \quad (4.14)$$

Os coeficientes d_j com $j = 0, \dots, 8$ e c_i com $i = 1, \dots, 8$ são funções do passo de integração Δt e dos coeficientes a_j e b_j da equação diferencial linear no tempo contínuo.

Reescrevendo a Equação 4.14, tem-se:

$$V_{sc}(z) = [d_0 + d_1 z^{-1} + \dots + d_8 z^{-8}]V_o(z) - [c_1 z^{-1} + \dots + c_8 z^{-8}]V_{sc}(z), \quad (4.15)$$

cuja transformada inversa é dada por

$$v_{sc}(n) = [d_0 v_o(n) + d_1 v_o(n-1) + \dots + d_8 v_o(n-8)] - [c_1 v_{sc}(n-1) + \dots + c_8 v_{sc}(n-8)]. \quad (4.16)$$

Contudo, foram encontrados problemas na realização direta desse filtro digital. Isso provavelmente está associado ao fato de que os filtros de ordem elevada quando implementados diretamente podem tornar-se altamente sensíveis à quantização de seus coeficientes

(LYONS, 2004; DINIZ *et al.*, 2004) e portanto, qualquer variação em um único coeficiente a_j ou b_i da equação diferencial do filtro analógico pode provocar variações significativas nos pólos e zeros do filtro digital. Uma solução para isso foi a implementação da função de transferência de ordem elevada através da conexão de quatro seções de segunda ordem formando um filtro digital em cascata (compensador).

Filtro Digital em Cascata

A fim de lidar com os problemas da implementação do filtro digital de ordem elevada, convém desenvolver a função de transferência do filtro analógico de ordem alta através da conexão de subfiltros com seções de segunda ordem. A formação dos pares de pólos e zeros em seções de segunda ordem e a ordenação dessas seções possuem um amplo espectro de possibilidades (LYONS, 2004). Contudo, um método simples de dispor as cascatas em seções de segunda ordem foi proposto por Oppenheim & Schaffer (1989) e adaptado a seguir na forma de um algoritmo:

1. Fatorar a função de transferência do filtro analógico na forma de pólos e zeros;
2. Determinar os pólos, ou par de pólos próximos da origem;
3. Determinar o zero, ou par de zeros, próximo do pólo, ou par de pólos, encontrado no passo 2;
4. Combinar esses pólos e zeros em filtros de seções de segunda ordem;
5. Repetir os passos 2-4 até que todos os pólos e zeros tenham sido combinados em seções de segunda ordem;
6. A disposição final da ordem das cascatas deverá obedecer a ordem crescente ou decrescente da distância dos pólos a origem do plano s .

A conexão de seções de segunda ordem na forma de cascata tem função de transferência expressa na forma da Equação 4.17.

$$G_{COM}(z) = \frac{V_{sc}(z)}{V_o(z)} = k_0 \prod_{i=1}^4 \frac{k_{i1} + k_{i2}z^{-1} + k_{i3}z^{-2}}{1 + k_{i4}z^{-1} + k_{i5}z^{-2}}. \quad (4.17)$$

Onde, k_0 e k_{ij} , com $i = 1, \dots, 4$ e $j = 1, \dots, 5$ são, respectivamente, a constante de escalamento do filtro e os coeficientes das seções de segunda ordem do filtro digital recursivo.

A constante de escalamento do filtro pode ser definida pela razão entre um valor da tensão secundária v_o e a tensão secundária compensada v_{sc} em um ponto de operação n .

$$k_0 \equiv \frac{v_o(n)}{v_{sc}(n)}. \quad (4.18)$$

Diniz *et al.* (2004) apresentam uma forma para diluir a constante k_0 no cálculo dos coeficientes k_{ij} do filtro. Todavia, por questões de simplicidade, esta dissertação considera o cálculo da constante de escalamento durante o processo de sintonia do filtro.

Os coeficientes k_{ij} são obtidos a partir da aplicação da transformação bilinear sobre as seções de segunda ordem obtidas no plano s . A transformação bilinear consiste basicamente em mapear a metade esquerda do plano s no interior do círculo unitário do plano z .

4.3.2 Compensador para um TPC de 138 kV

Para computar o compensador do TPC de 138 kV (KOJOVIC *et al.*, 1994), deve-se inicialmente conhecer os elementos R , L e C do TPC. Um conjunto de parâmetros calculados pelo TPCalc para o TPC de 138 kV foram apresentados na Tabela 3.2 da seção 3.2.2 e repetidos aqui por conveniência.

Tabela 4.2 – Parâmetros de um TPC de 138 kV calculados pelo TPCalc.

$C_1 = 5,65 \text{ nF}$	$C_p = 156,0 \text{ pF}$	$L_{f1} = 332,8 \text{ mH}$
$C_2 = 81,1 \text{ nF}$	$R_p = 360,0 \text{ } \Omega$	$C_f = 127,57 \text{ } \mu\text{F}$
$R_c = 71,31 \text{ } \Omega$	$L_p = 2,83 \text{ H}$	$L_{f2} = 225,6 \text{ mH}$
$L_c = 56,16 \text{ H}$	$R_m = 510,0 \text{ M}\Omega$	$R_f = 39,59 \text{ } \Omega$
$C_c = 127,7 \text{ pF}$	$L_m = 6,51 \text{ kH}$	$M = 134,2 \text{ mH}$

A partir dos parâmetros da Tabela 4.1 e dos elementos R , L e C da Tabela 4.2, os pólos e zeros da planta do compensador são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Zeros e pólos do compensador para o TPC de 138 kV.

Zeros	Pólos
$-4,5772347$	$-1,9058880 \times 10^5$
$-6,6138894 \times 10^5$	$-2,0622911 \times 10^9$
$-7,2300352 \times 10^3 \pm 3,4386047 \times 10^4 i$	$-1,6014972 \times 10^2 \pm 3,4304315 \times 10^2 i$
$-3,2528708 \times 10^2 \pm 5,0652148 \times 10^2 i$	$-2,0176990 \pm 1,1805215 \times 10^4 i$
$-1,0935545 \times 10^2 \pm 2,5315622 \times 10^2 i$	$-1,2197169 \pm 1,2200400 i$

Os zeros e pólos emparelhados e ordenados em seções de segunda ordem são apresentados na Tabela 4.4. Nessa tabela, a variável i corresponde à posição da seção na

cascata.

Tabela 4.4 – Seções de segunda ordem do compensador no plano s para o TPC de 138 kV.

i	Seção i
1	$\frac{(s-zero_1)(s-zero_2)}{(s-polo_1)(s-polo_2)}$
2	$\frac{(s-zero_3)(s-zero_4)}{(s-polo_3)(s-polo_4)}$
3	$\frac{(s-zero_5)(s-zero_6)}{(s-polo_5)(s-polo_6)}$
4	$\frac{(s-zero_7)(s-zero_8)}{(s-polo_7)(s-polo_8)}$

Aplicando a transformação bilinear sobre as seções dessa última Tabela, obtém-se os respectivos coeficientes das seções de segunda ordem do filtro digital recursivo, os quais são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficientes do filtro digital recursivo para o TPC de 138 kV.

Coeficientes	Seção i			
	1	2	3	4
k_{i1}	$2,138589 \times 10^{-4}$	1,101399	$9,997585 \times 10^{-1}$	1,001083
k_{i2}	$-9,929909 \times 10^{-5}$	-1,935160	-1,992998	-1,999972
k_{i3}	$-1,145448 \times 10^{-4}$	$9,570304 \times 10^{-1}$	$9,932755 \times 10^{-1}$	$9,988962 \times 10^{-1}$
k_{i4}	$9,757111 \times 10^{-1}$	-1,996788	-1,986072	-1,999976
k_{i5}	$-2,409026 \times 10^{-2}$	$9,968022 \times 10^{-1}$	$9,999598 \times 10^{-1}$	$9,999756 \times 10^{-1}$

Determinados os coeficientes, a constante de escalamento do filtro foi calculada durante o processo de sintonia, obtendo-se $k_0 = \frac{163}{1,88 \times 10^{-3}} = 86,7 \times 10^3$.

4.3.3 Compensador para um TPC de 230 kV

Os coeficientes do compensador do TPC de 230 kV são calculados a partir da mesma metodologia desenvolvida para o TPC de 138 kV.

Um conjunto de parâmetros calculados pelo TPCalc para o TPC de 230 kV são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de um TPC de 230 kV calculados pelo TPCalc.

$C_1 = 10,0 \text{ nF}$	$C_p = 512,8 \text{ pF}$	$L_{f1} = 4,1 \text{ mH}$
$C_2 = 65,4 \text{ nF}$	$R_p = 7,7 \text{ k}\Omega$	$C_f = 226,9 \text{ }\mu\text{F}$
$R_c = 505,0 \text{ }\Omega$	$L_p = 98,3 \text{ H}$	$L_{f2} = 30,5 \text{ mH}$
$L_c = 338,5 \text{ H}$	$R_m = 1826,6 \text{ M}\Omega$	$R_f = 4,3 \text{ }\Omega$
$C_c = 668,9 \text{ nF}$	$L_m = 7,0 \text{ kH}$	$M = 3,9 \text{ mH}$

Uma vez que os parâmetros do modelo de TPC compensado são os mesmos para qualquer TPC, os coeficientes da versão analógica do compensador, cujas expressões são indicadas no Apêndice B, foram calculados a partir dos dados das Tabelas 4.1 e 4.6.

Os zeros e pólos da versão analógica do filtro são mostrados a seguir.

Tabela 4.7 – Zeros e pólos do compensador para o TPC de 230 kV.

Zeros	Pólos
$-9,0792584 \times 10^{-1}$	$-1,0654706 \times 10^6$
$-2,5778226 \times 10^7$	$-2,0622911 \times 10^9$
$-9,6076636 \times 10^2 \pm 4,5401484 \times 10^3 i$	$-6,1174841 \times 10^2; -1,9872212 \times 10^2$
$-4,6467886 \times 10^2 \pm 8,3552911 \times 10^2 i$	$-9,6969696 \times 10^2 \pm 4,5000688 \times 10^3 i$
$-6,0476265 \times 10^1 \pm 1,1903186 \times 10^2 i$	$-1,2197169 \pm 1,2200400 i$

Os zeros e pólos pareados e ordenados em seções de segunda ordem são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Seções de segunda ordem do compensador no plano s para o TPC de 230 kV.

i	Seção i
1	$\frac{(s-zero_1)(s-zero_2)}{(s-pólo_1)(s-pólo_2)}$
2	$\frac{(s-zero_3)(s-zero_4)}{(s-pólo_3)(s-pólo_4)}$
3	$\frac{(s-zero_5)(s-zero_6)}{(s-pólo_5)(s-pólo_6)}$
4	$\frac{(s-zero_7)(s-zero_8)}{(s-pólo_7)(s-pólo_8)}$

Aplicando a transformação bilinear sobre as seções da Tabela 4.8, tem-se os coeficientes do filtro digital para o TPC de 230 kV.

Tabela 4.9 – Coeficientes do filtro digital recursivo para o TPC de 230 kV.

Coeficientes	Seção i			
	1	2	3	4
k_{i1}	$1,990661 \times 10^{-3}$	1,006066	$9,9449915 \times 10^{-1}$	1,000593
k_{i2}	$-3,063315 \times 10^{-5}$	-1,990849	-1,979708	-1,999975
k_{i3}	$-1,959992 \times 10^{-3}$	$9,869283 \times 10^{-1}$	$9,852996 \times 10^{-1}$	$9,993835 \times 10^{-1}$
k_{i4}	1,683718	-1,991916	-1,978705	-1,999976
k_{i5}	$6,837794 \times 10^{-1}$	$9,919280 \times 10^{-1}$	$9,808024 \times 10^{-1}$	$9,999756 \times 10^{-1}$

A constante de escalamento do filtro para o TPC de 230 kV corresponde à mesma constante $k_0 = 86,7 \times 10^3$ obtida para o filtro do TPC de 138 kV.

4.4 Análise da Compensação no Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência consiste em uma etapa importante do processo de compensação dinâmica, uma vez que a tensão secundária fornecida pelos TPCs geralmente é utilizada pelo processo de estimação de fasores normalmente adotado pelos sistemas de proteção.

Conhecida a resposta em frequência de dois sistemas em cascata, a resposta do sistema resultante é obtida pelo produto das respostas em frequência dos sistemas (LYONS, 2004). Dessa forma, utilizando a resposta em frequência do TPC e do compensador, pretende-se avaliar o comportamento do TPC compensado no espectro de 10 Hz a 10 kHz.

4.4.1 Resposta em Frequência do TPC de 138 kV Compensado

Com o objetivo de certificar-se de que a metodologia de compensação da tensão secundária de TPCs estava funcionando adequadamente no domínio da frequência, foi utilizado o caso teste de um TPC com tensão nominal de 138 kV, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 4.2.

A partir dos parâmetros do TPC, foram geradas as curvas de resposta em frequência do ganho e fase de sua relação de tensão. Utilizando o conceito de fasores, conclui-se que, se $G_{TPC}(j\omega)$ e $G_{COM}(j\omega)$ correspondem, respectivamente, a função de transferência do TPC e do compensador, então o TPC compensado deve possuir uma resposta em frequência expressa na forma da Equação 4.19.

$$H_{TPC}(j\omega) = |G_{TPC}(j\omega)| \times |G_{COM}(j\omega)| \angle(\delta_{TPC} + \delta_{COM}). \quad (4.19)$$

Nas Figuras 4.5 e 4.6 apresentam-se, respectivamente, a resposta em frequência do ganho e da fase do TPC de 138 kV compensado. Como resultado da compensação, observa-se que a relação de transformação de tensão tornou-se praticamente independente da frequência de operação.

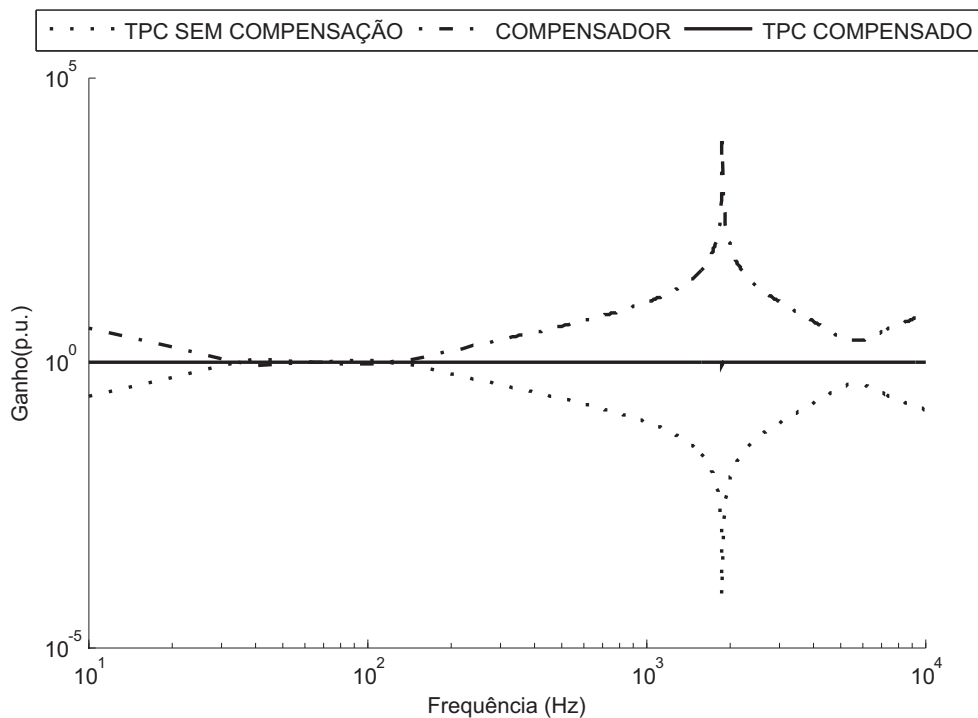


Figura 4.5 – Relação de transformação de tensão do TPC de 138 kV – ganho.

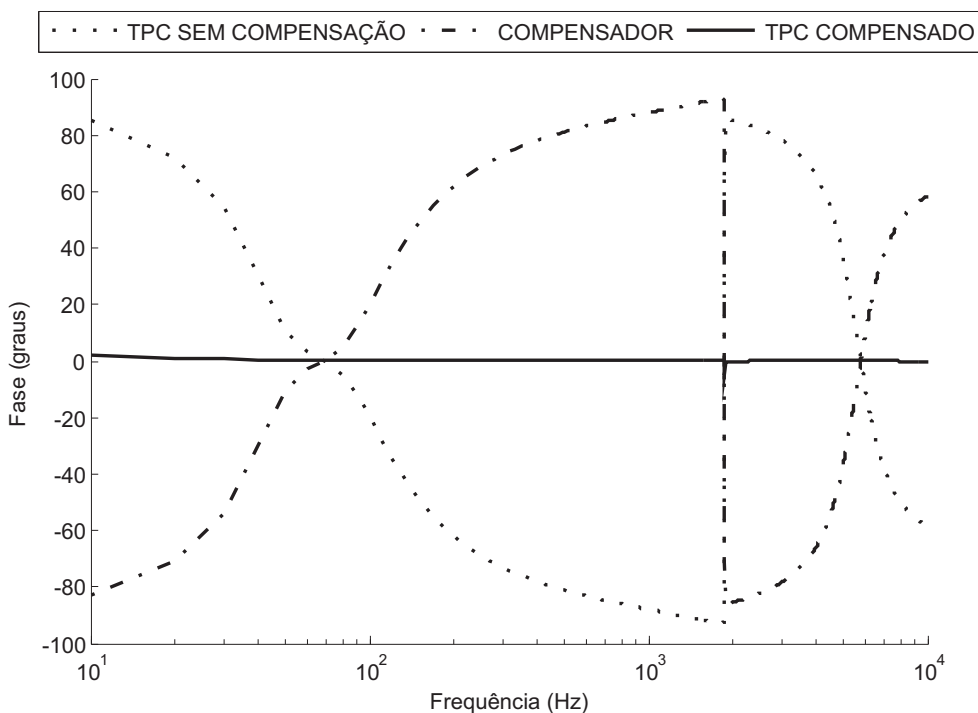


Figura 4.6 – Relação de transformação de tensão do TPC de 138 kV – fase.

4.4.2 Resposta em Frequência do TPC de 230 kV Compensado

Para validar a metodologia de compensação dinâmica implementada, foi utilizada a resposta em frequência de um TPC de 230 kV da Passoni&Villa cujas medições foram realizadas por FERNANDES JÚNIOR (1999) no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 apresentam-se, respectivamente, a resposta em frequência do ganho e da fase do TPC de 230 kV compensado.

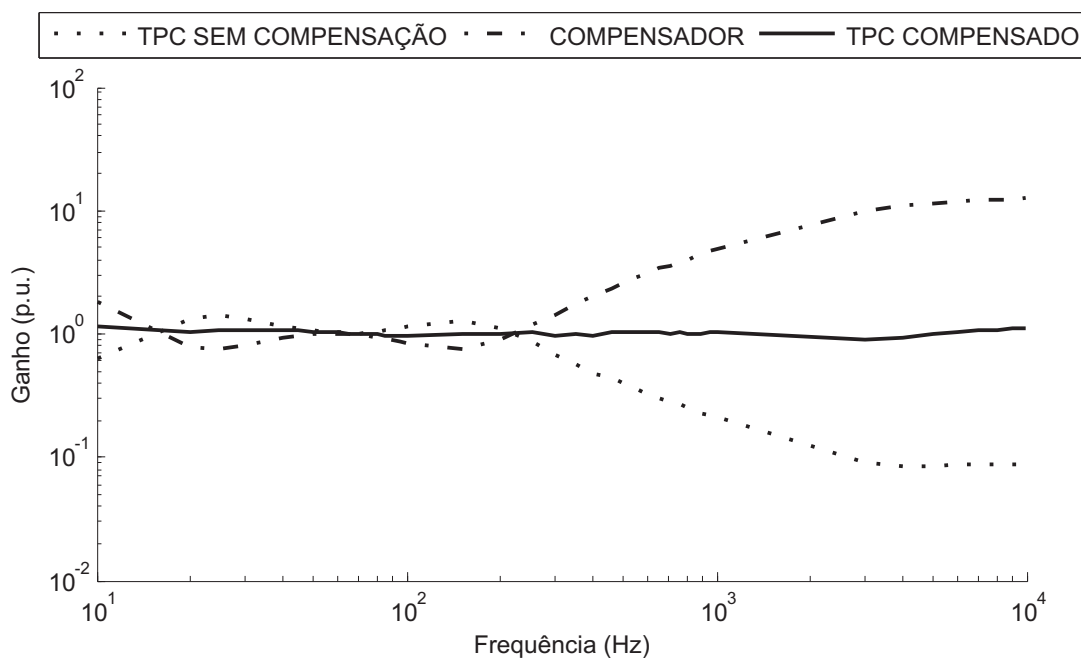


Figura 4.7 – Relação de transformação de tensão do TPC de 230 kV – ganho.

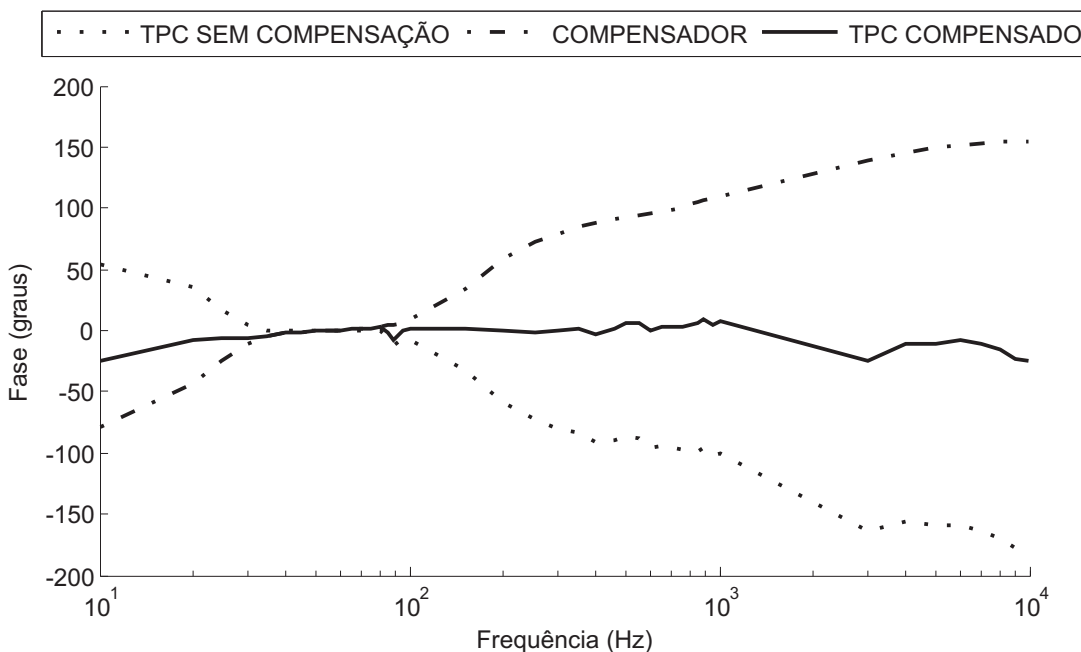


Figura 4.8 – Relação de transformação de tensão do TPC de 230 kV – fase.

Com base nessas Figuras, observa-se que a resposta em frequência do equipamento compensado aproxima-se das características desejadas para um TPC ideal, isto é, relação de transformação unitária e um mínimo de deslocamento de fase.

4.5 Implementação da Técnica de Compensação

Para realizar a implementação da técnica de compensação proposta nesta dissertação, foi utilizada a linguagem MODELS (DUBE, 1996) por permitir incorporar o compensador às simulações digitais em tempo de execução do ATP.

A MODELS é uma linguagem de uso geral, baseada na descrição de estruturas, ou modelos, com características semelhantes à programação orientada a objetos. Os modelos podem ser desenvolvidos separadamente, agrupados em uma ou mais bibliotecas e usados em outros modelos como blocos independentes (DUBE, 1996). A MODELS possui uma interface pré-definida que pode ser utilizada pelo usuário para conectar programas desenvolvidos em FORTRAN, C, e C++ e incorporadas em tempo de execução ao ATP.

Na Figura 4.9, apresenta-se o diagrama de blocos simplificado do esquema proposto para implementar a estratégia de compensação dinâmica de TPCs no ATP.

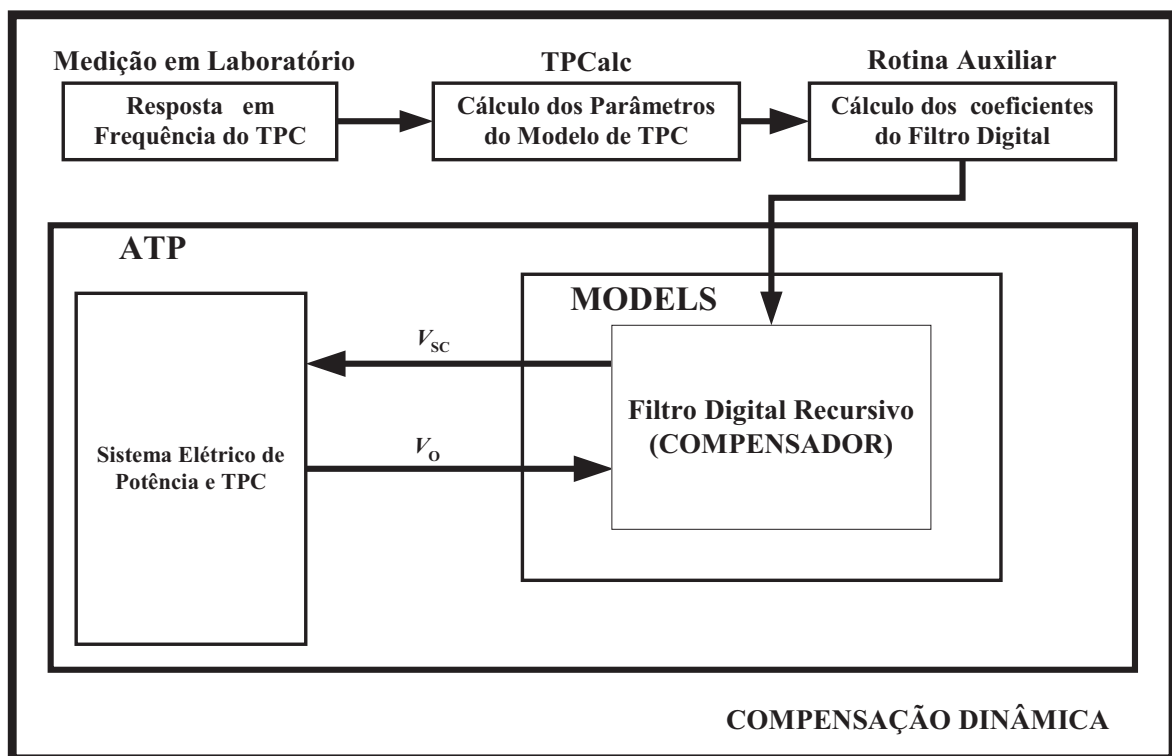


Figura 4.9 – Estratégia para implementação da técnica de compensação.

Tendo como base de dados a resposta em frequência do TPC em estudo, o software TPCalc é utilizado para calcular os parâmetros e externar o modelo computacional do TPC no formato de cartão do ATP. Esse cartão é incorporado a um arquivo base que

contém os demais cartões da simulação e instruções desenvolvidas na linguagem MODELS que controlam o fluxo de dados entre o compensador e o TPC. A partir dos elementos R , L e C do modelo de TPC, uma rotina foi desenvolvida para implementar o algoritmo descrito na subseção 4.3.1. Essa rotina é utilizada de forma *offline* para computar os pares de pólos e zeros que compõem os coeficientes de cada seção do filtro digital e a ordem em que cada seção é introduzida na cascata. Por fim, a tensão secundária v_o do TPC é lida pela MODELS, processada pelo filtro digital recursivo e disponibilizada na forma do sinal v_{sc} como a tensão secundária compensada.

Os resultados obtidos com a utilização da estratégia de compensação proposta, bem como suas respectivas análises, são apresentados no capítulo 5.

Capítulo 5

Avaliação e Validação do Método

O método desenvolvido para compensação dinâmica da tensão secundária de TPCs é avaliado através do programa ATP fazendo uso da linguagem MODELS, a qual proporciona uma interação dinâmica em tempo de execução com o próprio ATP. São realizadas simulações de monitoramento da distorção harmônica de um sistema de alta tensão e curtos-circuitos com diferentes ângulos de incidência. Como validação do método, apresenta-se a compensação dinâmica de dois TPCs: um de 138 kV (KOJOVIC *et al.*, 1994) e um outro TPC de 230 kV (FERNANDES JÚNIOR, 1999). O desempenho da técnica é comparado com a resposta do TPC sem compensação (TPC REAL) e a resposta de um divisor de tensão ideal (TPC IDEAL).

5.1 Monitoramento da Distorção Harmônica de Sistemas de Alta Tensão

Com o crescimento dos grandes consumidores conectados diretamente nos sistemas de transmissão de energia, tem crescido a necessidade de medir e monitorar a distorção harmônica nos sistemas de transmissão (BRADLEY *et al.*, 1986). Portanto, torna-se muito importante ter medições precisas e confiáveis da distorção harmônica, a fim de obter parâmetros para projetos de filtros e resolver eventuais litígios entre fornecedores e consumidores de energia sobre os níveis da taxa de distorção harmônica (THD) no ponto de acoplamento comum (PAC) (TANASKOVIC *et al.*, 2005).

Para medir com precisão a distorção harmônica nos sinais de tensão, um divisor capacitivo ou um divisor resistivo é normalmente recomendado (ARRILLAGA; WATSON, 2003). Contudo, esses instrumentos são caros e nem sempre são convenientes (XIAO *et al.*, 2004). Com a finalidade de monitorar a THD com uso da tensão secundária do TPC, Tanaskovic

et al. (2005) apresentam um modelo especial de TPC desenvolvido pela *Trench Company* que possui terminais específicos para essa finalidade. Para evitar o dispêndio financeiro na compra de um modelo específico de TPC, a técnica de compensação apresentada nesta dissertação pode ser utilizada como uma ferramenta que permite os TPCs monitorarem adequadamente a qualidade de energia dos sistemas de transmissão.

Harmônicos, por definição, ocorrem em operações de regime permanente e são múltiplos inteiros da frequência fundamental. A distorção da forma de onda que produz os harmônicos está presente continuamente no sistema, ou pelo menos tem duração de alguns segundos. Em condições normais de operação a forma de onda da tensão contém apenas a componente fundamental; assim, o valor rms pode ser expresso simplesmente como

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{1p}, \quad (5.1)$$

onde V_{1p} é o valor de pico da tensão .

Um sinal de tensão distorcido harmonicamente é composto por senóides com frequências múltiplas da fundamental. O valor rms da forma de onda resultante é computado como a soma dos quadrados dos valores rms de todas as componentes individuais, isto é,

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_m^2)}. \quad (5.2)$$

A fim de tornar as componentes harmônicas como função da amplitude da fundamental, optou-se reescrever a Equação 5.2 na forma (GRADY, 2006)

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{2} (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_m^2). \quad (5.3)$$

Adotando a relação $V_i = \frac{V_1}{i}$, (para $i = 1, 2, 3, \dots, m$), tem-se

$$\begin{aligned} V_{rms}^2 &= \frac{1}{2} \left[V_1^2 + \left(\frac{V_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{V_1}{3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{V_1}{m} \right)^2 \right] \\ &= \frac{1}{2} V_1^2 \left(1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{m^2} \right). \end{aligned} \quad (5.4)$$

Tomando-se apenas os harmônicos de sequência positiva e negativa (DUGAN *et al.*, 2004) da Equação 5.4, a forma de onda resultante pode ser utilizada como uma aproximação do sinal de tensão de cargas alimentadas por conversores e retificadores.

5.1.1 Avaliação da Distorção Harmônica com um TPC de 138 kV

Na Tabela 5.1, apresenta-se um sinal de $\frac{138}{\sqrt{3}}$ kV rms para emular a tensão no PAC de um consumidor industrial.

Tabela 5.1 – Componentes harmônicas presentes no PAC.

Índice Harmônico	Tensão (kV) _{rms}
1	108,21
5	21,64
7	15,46
11	9,84
13	8,32
17	6,36
19	5,70
23	4,70
25	4,32

A Figura 5.1 representa um diagrama de blocos contendo um consumidor industrial, um sistema de potência e um TPC de 138 kV para monitorar a qualidade de energia no PAC.

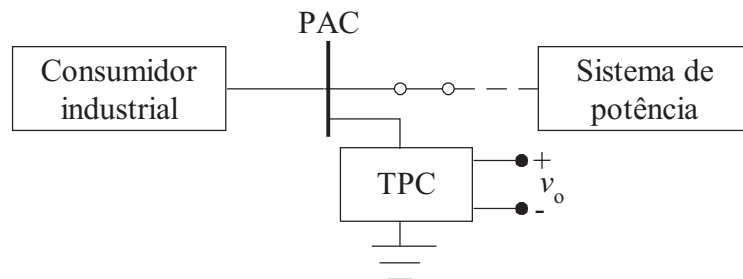
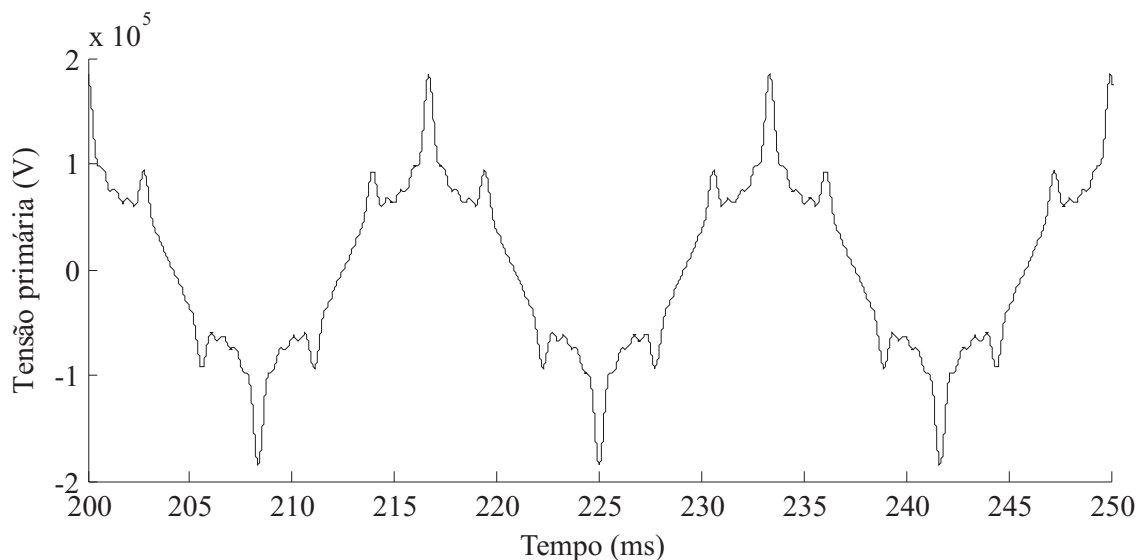
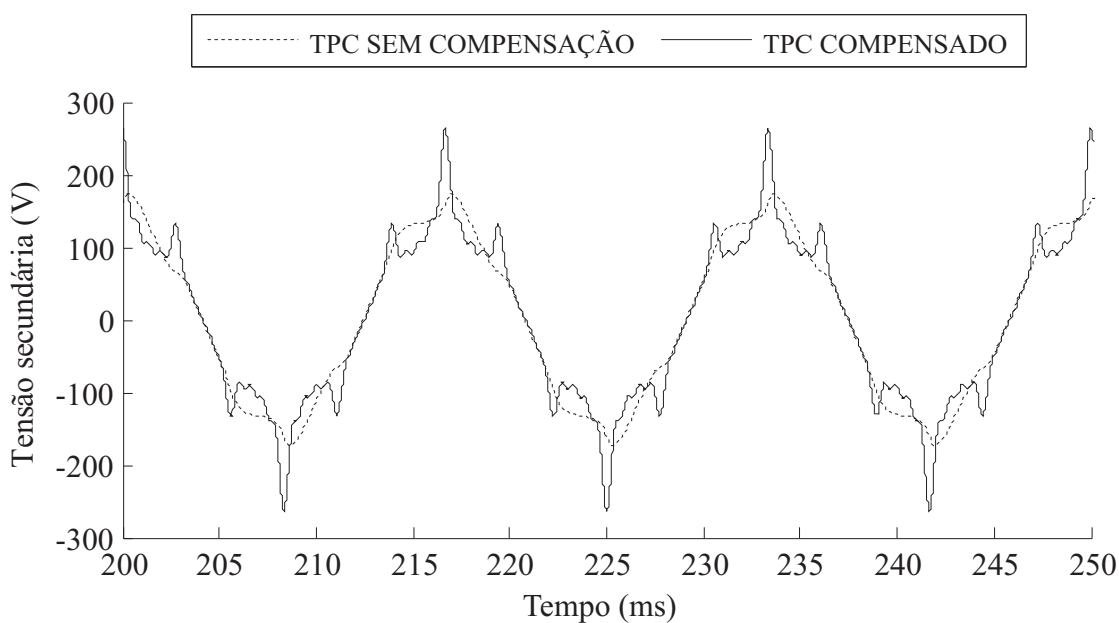


Figura 5.1 – Monitoração da distorção harmônica de consumidor industrial.

O sinal de tensão distorcido para simular o PAC é mostrado na Figura 5.2, enquanto a Figura 5.3 apresenta a tensão obtida nos terminais de baixa tensão do TPC de 138 kV.

Observa-se claramente que a tensão secundária obtida diretamente do TPC não representa com fidelidade o sinal monitorado, apresentando atenuações/amplificações de certos espectros de frequência. Contudo, o sinal na saída do compensador é uma réplica da tensão do PAC e, por consequência, pode ser utilizado para monitorar a distorção harmônica de sistemas de alta tensão.

**Figura 5.2** – Tensão no PAC.**Figura 5.3** – Tensão secundária do TPC.

5.2 Mitigação da Reposta Transitória de TPCs

A avaliação de desempenho de equipamentos como relés e localizadores de falta dependem fortemente da precisão dos dados de entrada dos mesmos (COURY *et al.*, 2007). Geralmente, o sinal obtido nos terminais de baixa tensão de um TPC é utilizado para essa finalidade. Contudo, durante uma falta, a tensão secundária desse transdutor apresenta transitórios que podem afetar o desempenho da proteção. Esses transitórios dependem, dentre outros fatores, do ângulo de incidência da falta sobre o sinal da tensão do primário.

5.2.1 Compensação Dinâmica de um TPC de 138 kV

Para avaliar a compensação dinâmica do TPC de 138 kV mediante um curto-circuito franco no terminal primário, optou-se, por simplicidade, uma análise do TPC isolado do sistema.

A Figura 5.4 exhibe a tensão secundária quando é aplicado um curto-circuito franco no barramento do TPC com ângulo de incidência de $\theta = 90^\circ$ sobre o sinal do primário.

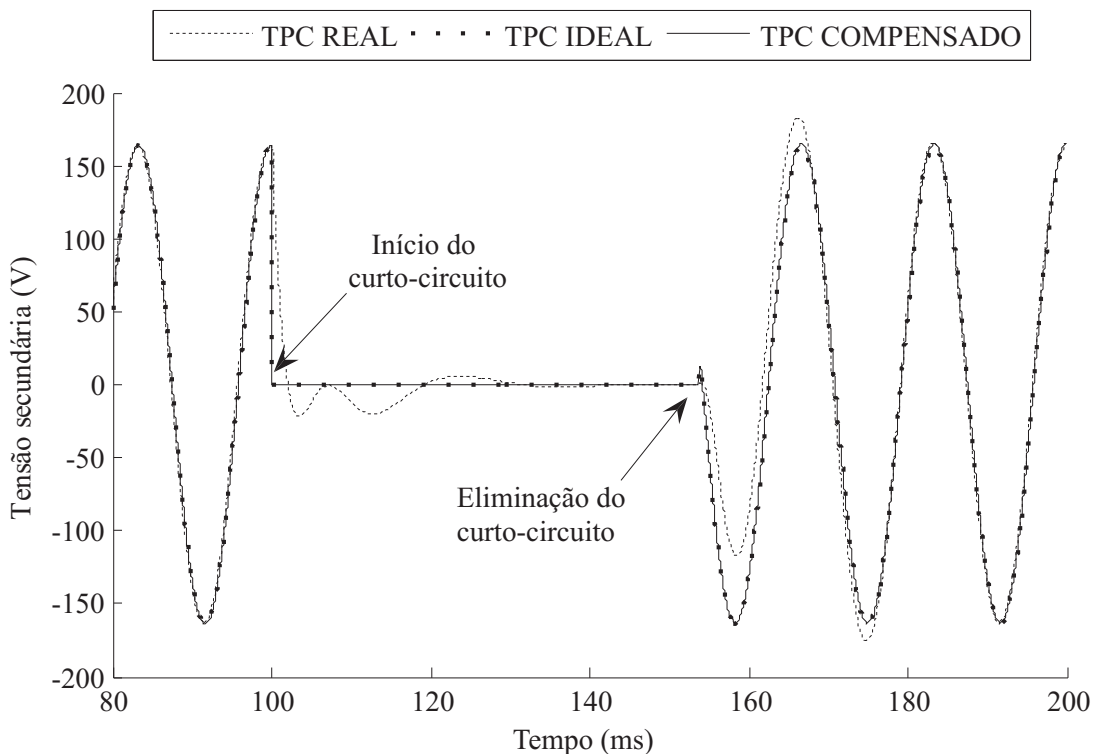


Figura 5.4 – Tensão secundária para um curto-circuito franco no primário do TPC de 138 kV- $\theta = 90^\circ$.

A partir dessa Figura, observa-se claramente que a resposta do TPC sem compensação possui um comportamento transitório com oscilações amortecidas que perduram por mais ou menos três ciclos (base 60 Hz). Já a resposta do TPC compensado apresenta um comportamento similar ao de um divisor de tensão ideal (TPC IDEAL) tanto no regime de curto-circuito quanto na sua extinção.

A Figura 5.5 mostra o comportamento mais detalhado durante o transitório da tensão secundária do TPC. Segundo Kasztenny *et al.* (2000), a forma de onda da tensão secundária do TPC sem compensação (TPC REAL) pode afetar o desempenho da proteção de atuação rápida.

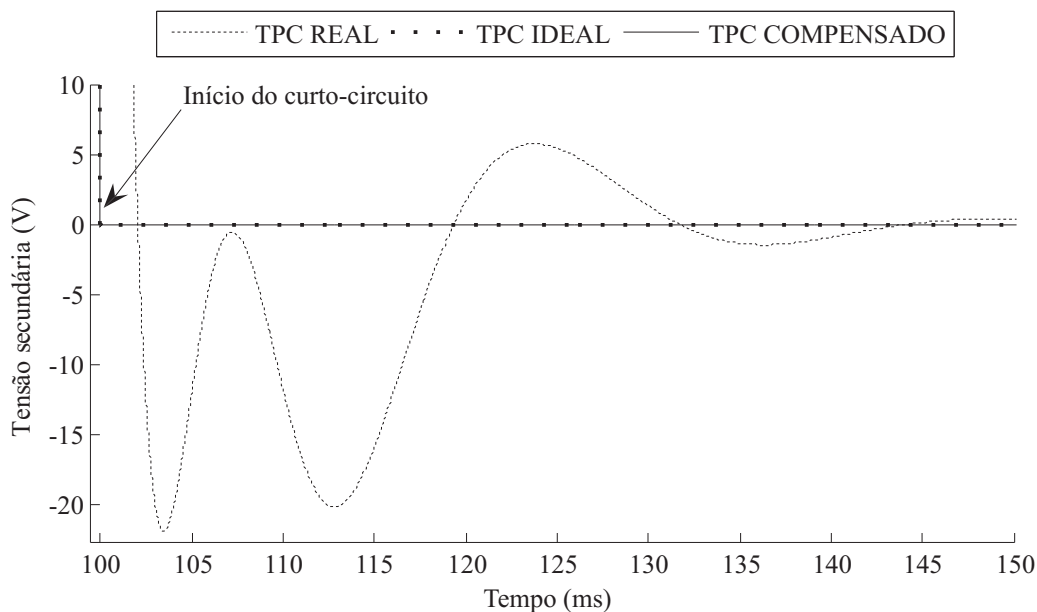


Figura 5.5 – Tensão transitória do TPC de 138 kV - $\theta = 90^\circ$.

Foi avaliado também o caso de um curto-circuito com ângulo de incidência de zero graus sobre a tensão do primário. A Figura 5.6 corresponde ao comportamento da tensão dos terminais de baixa tensão do TPC de 138 kV durante um curto-circuito franco com $\theta = 0^\circ$.

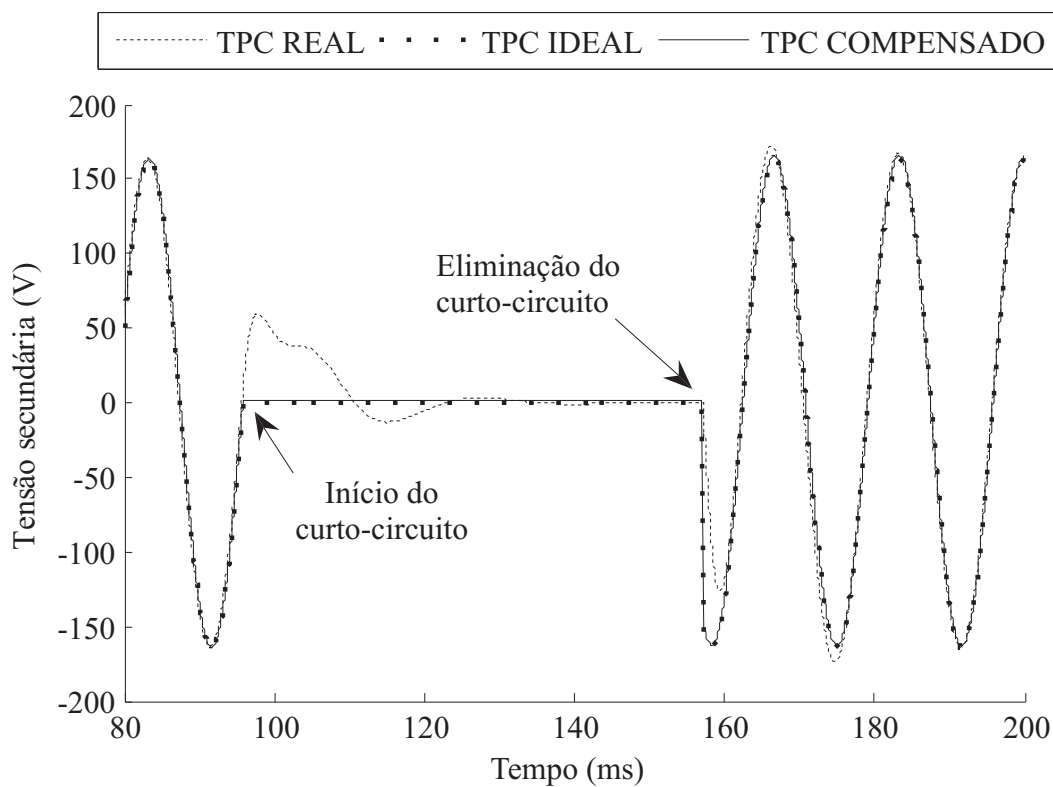


Figura 5.6 – Tensão secundária para um curto-circuito franco no primário do TPC de 138 kV- $\theta = 0^\circ$.

Com o auxílio da Figura 5.7 pode ser verificado que a tensão do TPC compensado apresenta um pequeno decaimento exponencial durante o regime de curto-circuito.

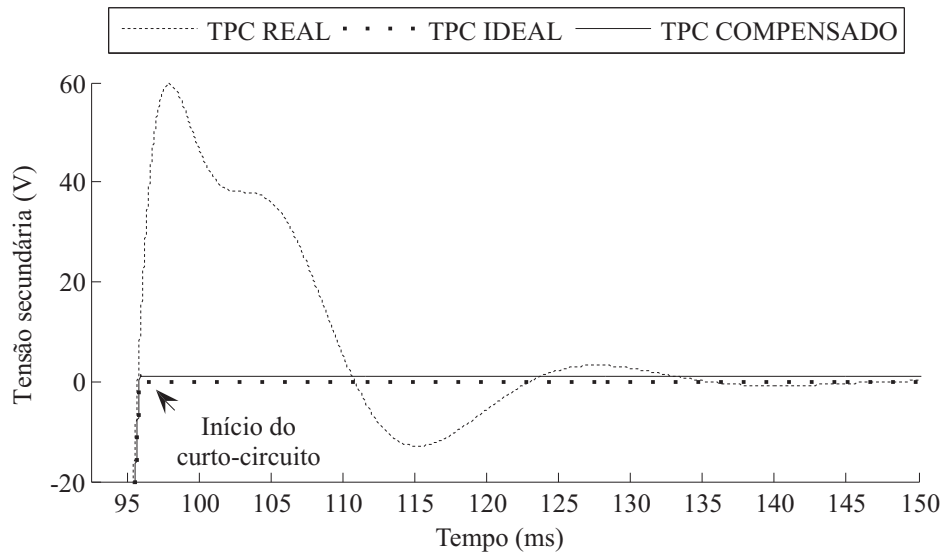


Figura 5.7 – Tensão transitória do TPC de 138 kV - $\theta = 0^\circ$.

A dinâmica apresentada pela tensão compensada está associada aos pólos atribuídos para o modelo de TPC compensado durante o processo de ajuste de curvas de sua função de transferência (Equação 4.9). Uma vez que o decaimento exponencial é muito pequeno, acredita-se que o sinal do TPC compensado pode ser tratado como um nível DC durante o instante de curto-circuito e, portanto, filtrado pelos transformadores de potencial auxiliares das unidades de processamento dos relés digitais (COURY *et al.*, 2007).

5.2.2 Compensação Dinâmica de um TPC de 230 kV

O sistema elétrico simplificado apresentado na Figura 5.8 é utilizado para validar a estratégia de compensação de um TPC de 230 kV. Este sistema consiste de uma linha de transmissão com 200 km de extensão e duas fontes com suas respectivas impedâncias.

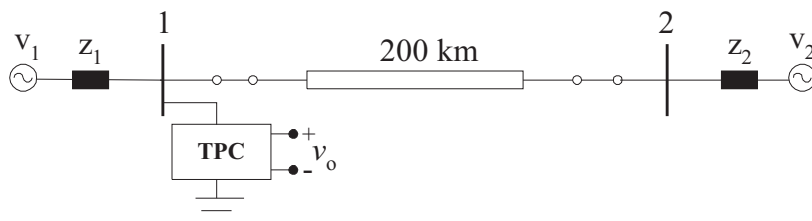


Figura 5.8 – Sistema elétrico fictício.

Os dados desse sistema fictício são apresentados nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.2 – Dados de sequência da linha de transmissão.

Sequência	$R(\Omega/km)$	$X(\Omega/km)$	$\omega C(\mu S/km)$
zero	0,4309	1,5659	2,3301
positiva	0,0888	0,5249	3,1210

Tabela 5.3 – Tensão das fontes.

Fonte	Módulo (kV)	Fase (graus)
1	187,8	0
2	187,8	-10

Tabela 5.4 – Impedâncias das fontes.

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
1	0,2856	5,5610	2,0205	7,2720
2	0,8644	12,2484	12,8150	31,7268

A Figura 5.9 ilustra a tensão secundária em colapso de uma das unidades capacitivas quando da aplicação e eliminação de um curto-circuito bifásico na barra 1 do sistema.

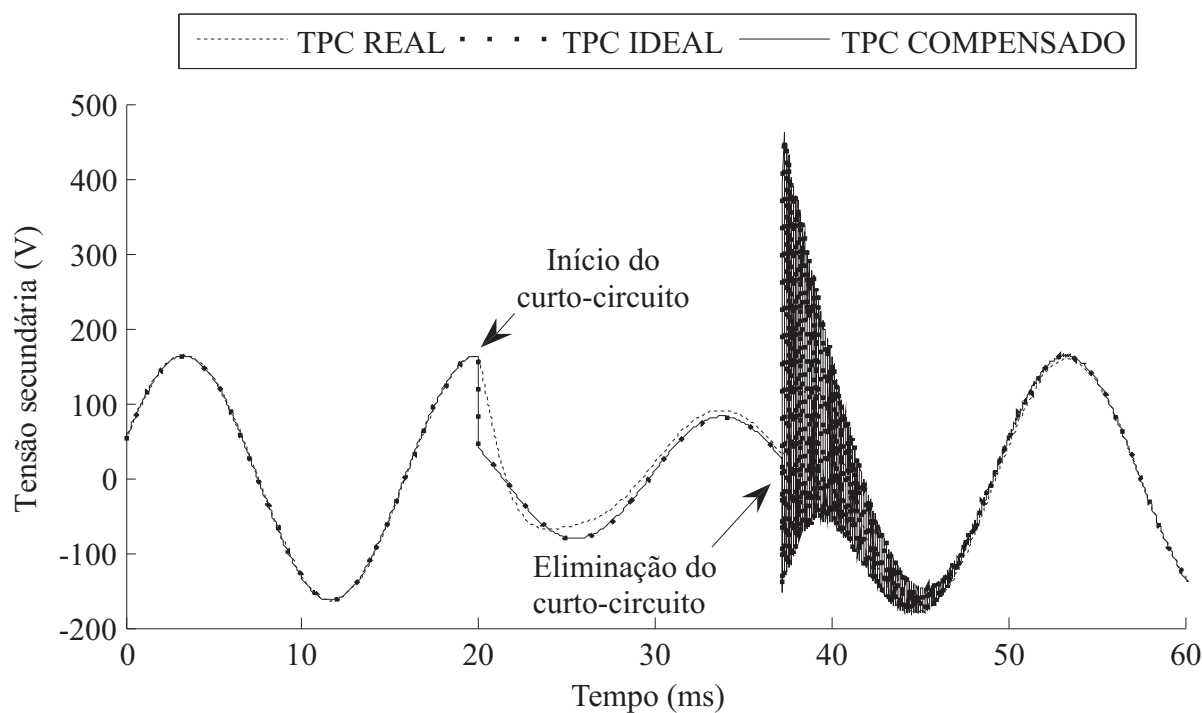


Figura 5.9 – Tensão secundária para um curto-circuito bifásico na Barra 1 da Figura 5.8.

As Figuras 5.10 e 5.11 representam ampliações da área de visualização da Figura 5.9. Observa-se que, diferentemente do TPC compensado, a tensão obtida nos terminais do TPC sem compensação apresenta alterações de fase e amplitude com relação a réplica da tensão do sistema (TPC IDEAL).

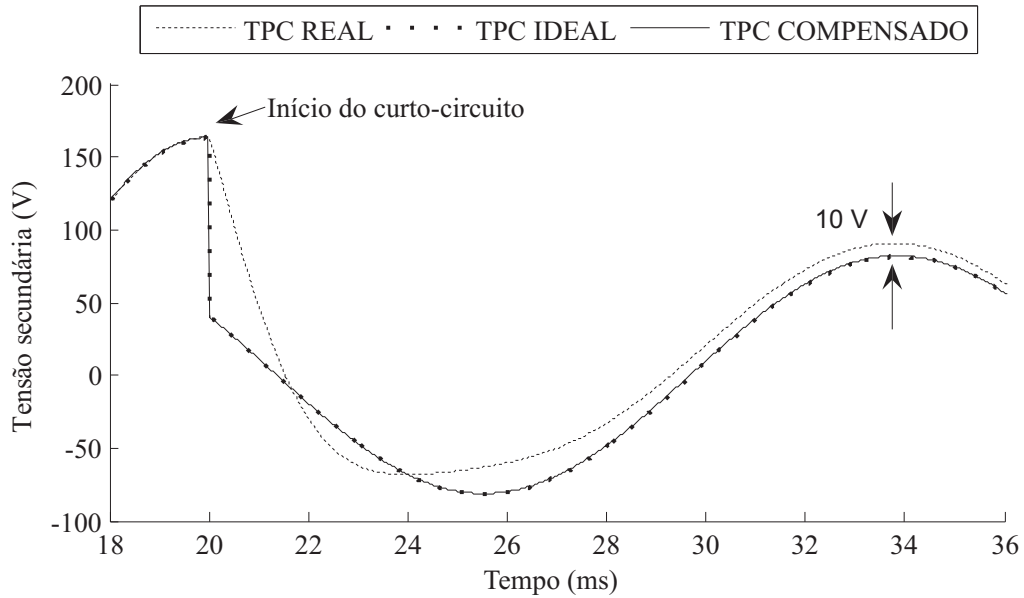


Figura 5.10 – Tensão secundária durante o curto-circuito.

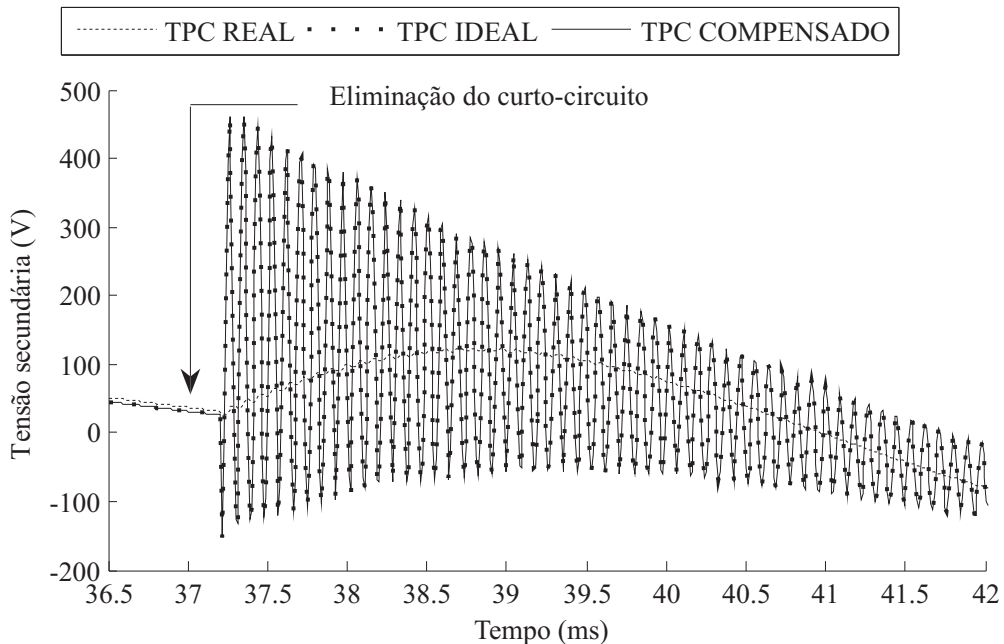


Figura 5.11 – Tensão secundária durante eliminação do curto-circuito.

Durante a eliminação do curto-circuito (Figura 5.11), nota-se claramente que as componentes de alta frequência da tensão primária não são observadas no sinal do secundário

do TPC sem compensação. Isso retrata que o TPC sozinho não representa de forma fidedigna os transitórios do sistema de alta tensão. Todavia, esse fato acontece devido às próprias características construtivas dos TPCs. Esses equipamentos são projetados com um circuito supressor de ferroressonância (CSF), normalmente um filtro rejeita-faixa sintonizado na frequência fundamental do sistema (TZIOUVARAS *et al.*, 2000), para amortecer oscilações de ferroressonância, diferentemente do estudo de caso em análise. Portanto, conforme se verifica na literatura, é indiscutível que o CSF cumpre o papel para o qual se destina, que é amortecer as oscilações de ferroressonância. Todavia, esse circuito impede que os transitórios do sistema de alta tensão sejam avaliados, sem perda de informação, a partir dos sinais obtidos nos terminais secundários do TPC.

Para fins de proteção, observa-se que a compensação dinâmica elimina os transitórios proporcionados pelos elementos armazenadores de energia do TPC, o que contribui para a diminuição do tempo de atuação do sistema de proteção e controle. Para fins de medição, a compensação permite que praticamente todos as componentes de frequência presentes no sinal de alta tensão sejam obtidas no sinal secundário compensado, possibilitando, portanto, uma análise detalhada da qualidade da energia do sistema de potência.

Capítulo 6

Conclusões

Um método para compensação dinâmica da tensão secundária de um modelo de TPC foi apresentado. Compensadores foram obtidos a partir dos parâmetros lineares dos TPCs e de um modelo analítico para o TPC compensado. Um software recentemente desenvolvido pelo GSE da UFCG foi utilizado para identificar os parâmetros dos elementos lineares dos TPCs a partir de dados de resposta em frequência do ganho da relação entre as tensões terminais, abrangendo uma faixa de frequência de 10 Hz a 10 kHz.

Dois TPCs foram avaliados: um TPC de 138 kV cuja resposta em frequência foi simulada via EMTP e um outro TPC de 230 kV cujos dados de resposta em frequência foram obtidos a partir de medições em laboratório. Em ambos os casos, foram realizadas análises no domínio da frequência e do tempo.

Analisando a compensação no domínio da frequência, observou-se que a relação de transformação de tensão do TPC compensado é pouco variável com a frequência. Dessa forma, uma réplica dos sinais de alta tensão com componentes entre 10 Hz e 10 kHz pôde ser devidamente obtida a partir do processo de filtragem digital da tensão medida nos terminais secundários do TPC.

Os estudos no domínio do tempo foram realizados a partir do monitoramento da taxa de distorção harmônica em sistemas de alta tensão e curto-circuitos. No primeiro caso, as componentes de frequência presentes no terminal de alta tensão foram devidamente obtidas a partir da compensação da tensão secundária. No que concerne a curto-circuitos, as análises foram avaliadas durante o regime de falta e após sua extinção. No regime de falta, pôde ser verificado que a compensação mitigou os transitórios proporcionados pelos elementos armazenadores de energia do TPC. Durante a eliminação do curto-circuito, constatou-se que os TPCs sem compensação não representam com fidelidade os transitó-

rios ocorridos no sistema.

Nesta dissertação, os coeficientes do compensador foram calculados tomando-se como referência a resposta em frequência do TPC em análise. Mudanças na natureza da carga instalada nos terminais secundários do TPC influem na resposta em frequência do equipamento e por consequência, nos coeficientes do compensador. A estratégia aqui apresentada permite incorporar as variações da carga aos coeficientes do compensador, o que supera uma inconveniência citada na literatura acerca dos métodos que utilizam a função de transferência como função base para o projeto do compensador.

É importante ressaltar que os resultados obtidos em ambos os domínios de estudo, a priori não devem ser generalizados, cabendo uma análise detalhada do uso do método apresentado. Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

1. Realizar uma análise de sensibilidade para avaliar qual o impacto da variação dos elementos de um TPC sobre um compensador dinâmico projetado a partir dos parâmetros de referência do equipamento;
2. Realizar um estudo que verifique a viabilidade de TPCs com diferentes topologias poderem ter seu compensador projetado a partir da metodologia proposta nesta dissertação. O estudo levaria em consideração a unicidade da relação entre os domínios tempo-frequência, isto é, se dois modelos lineares possuem uma resposta em frequência então eles devem possuir o mesmo comportamento dinâmico no tempo, independentemente de suas descrições físicas;
3. Implantar o compensador em um simulador em tempo real, provavelmente no *RTDSTM* (Real Time Digital Simulator), recentemente adquirido pelo GSE da UFCG. Tal implantação pode vir acompanhada de estudos sobre o impacto da compensação acerca da proteção e controle de sistemas elétricos de energia;
4. Desenvolver um sistema digital que possibilite a compensação da tensão secundária de TPCs. Para isso será necessário implementar o método em um sistema de processamento digital de sinais, tal como um DSP (Digital Signal Processor) e desenvolver um sistema de aquisição de dados da tensão terminal do TPC.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. *Power System Harmonics*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003.
- BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S.; HYLAND, P. R. Harmonic Reponse Test on Voltage Transducers for the New Zeland Power System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 7, p. 1750–1756, July 1986.
- CHONG, E. K. P.; ZAK, S. H. *An Introduction to Optimization*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. São Carlos: Edgard USP, 2007.
- D’AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; FILHO, O. E. M. K. *Equipamentos Elétricos Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. [S.l.]: FURNAS, 1985.
- DENNIS JUNIOR, J. E.; SCHNABEL, R. B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. [S.l.: s.n.], 1996. (SIAM, v. 16).
- DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. *Processamento Digital de Sinais - Projeto e Análise de Sistemas*. [S.l.]: Bookman, 2004.
- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic Transients Program (EMTP)-Theory Book*. Portland: BPA, 1996.
- DUBE, L. *Models in ATP: Language Manual*. [S.l.], February 1996.

- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2004.
- FERNANDES JÚNIOR, D. *Estimação de Parâmetros para Transformadores de Potencial Capacitivo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Setembro 1999.
- FERNANDES JÚNIOR, D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Dezembro 2003.
- FERNANDES JÚNIOR, D.; NEVES, W. L. A.; MACHADO, E. P.; SILVA, C. A. Uma Metodologia para Cálculo de Parâmetros de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. *Projeto CNPq: Edital Universal*. Campina Grande, Setembro 2007.
- FERNANDES JÚNIOR, D.; NEVES, W. L. A.; SILVA, C. A.; MACHADO, E. P.; GO-DOY, M. V. A Coupling Capacitor Voltage Transformer Model from Laboratory Measurements. *Cigré International Technical Colloquium*, Rio de Janeiro, Brazil, September 2007.
- GRADY, M. *Understanding Power System Harmonics*. [S.l.], June 2006.
- HARDER, E. L. Transient Compensation of Potential-Device Burdens. *United States Patent*, April 1951.
- HUGHES, M. A. Capacitor Voltage Transformer System. *United States Patent*, March 1975.
- IRAVANI, M. R.; WANG, X.; POLISHCHUK, I.; RIBEIRO, J.; SARSHAR, A. Digital Time-Domain Investigation of Transient Behaviour of Coupling Capacitor Voltage Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 2, p. 622–629, April 1998.
- IZYKOWSKI, J.; KASZTENNY, B.; ROSOŁOWSKI, 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.

- KANG, Y.-C.; ZHENG, T.; KIM, Y.-H.; JANG, S.-I.; KIM, Y.-G. Compensation of the Secondary Voltage of a CCVT Considering Hysteresis Characteristics of the Core in Time Domain. *IPST conference*, June 2007.
- 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.], 2000. v. 53.
- KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L.; SKENDZIC, V.; FROMEN, C. W.; SEVCIK, D. R.; NILSSON, S. L. Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 4, p. 1927–1935, October 1992.
- KOJOVIC, L.; KEZUNOVIC, M.; NILSSON, S. L. Computer Simulation of a Ferroresonance Suppression Circuit for Digital Modeling Capacitor Voltage Transformers. In: *International Conference on Computer Applications in Design, Simulation and Analysis*. Orlando, Florida: [s.n.], 1992.
- KOJOVIC, L.; KEZUNOVIC, M.; SKENDZIC, V.; FROMEN, C. W.; SEVCIK, D. R. A New Method for the CCVT Performance Analysis Using Field Measurements, Signal Processing and EMTP Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1907–1915, October 1994.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP - Alternative Transient Program: Rule book*. Herverlee, Belgium, 1987.
- LYONS, R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 2004.
- MACHADO, E. P.; SILVA, C. A.; FERNANDES JÚNIOR, D.; NEVES, W. L. A.; LIRA, G. R. S.; GODOY, M. V. Uma Metodologia para o Cálculo de Parâmetros de Transformadores de Potencial Capacitivos. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, Belo Horizonte*, 2008.
- MADSEN, K.; NIELSEN, H.; TINGLEFF, O. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*. 2. ed. [S.l.], April 2004.

- NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; FERNANDES JÚNIOR, 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*. [S.l.], Abril 2007.
- OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. 2. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1995.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1989.
- PAJUELO, E. *An Improved Least Square Voltage Phasor Estimation Technique to Minimize the Impact of CCVT Transients in Protective Relaying*. Dissertação (M. Sc. Thesis) — University of Saskatchewan Saskatoon - Canada, August 2006.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes- The Art of Scientific Computing*. [S.l.]: Cambridge, 2007.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- TANASKOVIC, M.; NABI, A.; MISUR, S.; DIAMANTI, P.; MCTAGGART, R. Coupling Capacitor Voltage Transformers as Harmonics Distortion Monitoring Devices in Transmission Systems. *IPST conference*, June 2005.
- TZIOUVARAS, D. A.; MCLAREN, P.; ALEXANDER, G.; DAWSON, D.; EZSTERGALYOS, J.; FROMEN, C.; GLINKOWSKI, M.; HASENWINKLE, I.; KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L.; KOTHEIMER, B.; KUFFEL, R.; NORDSTROM, J.; ZOCHOLL, S. Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 62–72, January 2000.
- XIAO, Y.; FU, J.; HU, B.; LI, X.; DENG, C. Problems of Voltage Transducer in Harmonic Measurement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 1483–1487, July 2004.

- ZADEH, H. K. Correction of Capacitive Voltage Transformer Distorted Secondary Voltages Using Artificial Neural Networks. In: *7th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering*. Serbia and Montenegro: [s.n.], 2004.
- ZADEH, H. K.; LI, Z. *A Compensation Scheme for CVT Transient Effects Using Artificial Neural Network*. Chicago, USA, 2007.
- ZANETTA JÚNIOR, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. 1. ed. [S.l.]: EDUSP, 2003.

Apêndice A

O Problema dos Mínimos Quadrados

O problema de mínimos quadrados não lineares está relacionado ao problema de resolução de sistemas de equações não lineares e a otimização em um espaço multidimensional. No método de mínimos quadrados não lineares, a preocupação básica é minimizar a norma de uma função vetorial $\mathbf{f} : \mathfrak{R}^n \mapsto \mathfrak{R}^m$, o que equivale a determinar um vetor \mathbf{x}^* que minimiza a função objetivo:

$$F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(\mathbf{x}))^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}). \quad (\text{A.1})$$

O vetor gradiente e a matriz Hessiana da função objetivo são, respectivamente,

$$\nabla F(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}), \quad (\text{A.2})$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x})^T J(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{x}) f_i''(x). \quad (\text{A.3})$$

Nessas Equações, $J(\mathbf{x}) \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ é definido como jacobiano e contém as primeiras derivadas parciais da função residual $f_i(\mathbf{x})$ e $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathfrak{R}^{m \times 1}$ é o vetor de resíduos.

As expressões que definem o jacobiano e o vetor de resíduos são mostradas nas Equações A.4 e A.5, respectivamente.

$$J(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Logo, o método dos mínimos quadrados consiste numa transformação da função objetivo, em que $F(\mathbf{x}) : \mathfrak{R}^m \mapsto \mathfrak{R}$.

Uma vez que a técnica dos mínimos quadrados não lineares está relacionada ao problema de resolução de sistemas de equações não lineares, faz-se necessário utilizar um método apropriado para resolução de tais sistemas, assim como o método de Levenberg-Marquardt.

O algoritmo de Levenberg-Marquardt utilizado para computar os parâmetros do modelo de TPC compensado é apresentado na Figura A.1.

```

Entrada:
 $k = 0$ 
 $\nu = 2$ 
 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ 
 $\mathbf{g} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x})$ 
 $\mathbf{A} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{J}(\mathbf{x})$ 
 $\mu = \tau \cdot \max\{\mathbf{A}_{ii}\}$ 
Resultado:  $\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \varepsilon_1$ 
Inicialização do processo iterativo
enquanto ( $\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \varepsilon_1$ ) e ( $k < k_{max}$ ) faça
  |  $k = k + 1$ 
  | solucionar  $(\mathbf{A} + \mu \mathbf{I})\mathbf{p}_k = -\mathbf{g}$ 
  | se  $\|\mathbf{p}_k\| \leq \varepsilon_2(\|\mathbf{x}\| + \varepsilon_2)$  então
  | | encerrar execução
  | senão
  | |  $\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x} + \mathbf{p}_k$ 
  | |  $L = \frac{1}{2}\mathbf{p}_k^T (\mu \cdot \mathbf{p}_k - \mathbf{g})$ 
  | |  $\varrho = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{x}_{new})}{L}$ 
  | | se  $\varrho > 0$  então
  | | |  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{new}$ 
  | | |  $\mathbf{A} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{J}(\mathbf{x})$ 
  | | |  $\mathbf{g} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x})$ 
  | | | solucionar  $(\mathbf{A} + \mu \mathbf{I})\mathbf{p}_k = -\mathbf{g}$ 
  | | |  $\mu = \mu \cdot \max\{\frac{1}{3}, 1 - (2\varrho - 1)^3\}$ 
  | | |  $\nu = 2$ 
  | | | senão
  | | | |  $\mu = \mu \cdot \nu$ 
  | | | |  $\nu = 2 \cdot \nu$ 
  | | fim
  | fim
fim

```

Figura A.1 – Algoritmo para implementação do método de Levenberg-Marquardt.

Nesse algoritmo, um grande valor de ϱ indica que o parâmetro μ pode ser decrementado na próxima iteração. Se ϱ é pequeno ou mesmo negativo é indicativo de que o parâmetro μ deve ser incrementado para que o método de Levenberg-Marquardt se aproxime do método

do máximo declive descendente e tenha o comprimento do passo de solução reduzido. Os parâmetros $\tau, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ e k_{max} são definidos pelo usuário antes do processo iterativo. A título de exemplo, durante a estimação dos parâmetros do modelo de TPC compensado esses elementos foram definidos como sendo $10^{-2}, 10^{-10}, 10^{-10}$ e 100, respectivamente.

Apêndice B

Coeficientes da Planta do Compensador

Os coeficientes da função de transferência do compensador referente ao modelo de TPC utilizado neste trabalho de dissertação são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Coeficientes da função de transferência do compensador.

Coeficientes	Expressão
b_8	$c_4 f_7 D_3$
b_7	$c_4 f_4 D_3 + c_4 f_7 D_2$
b_6	$c_4 f_6 D_3 + c_4 f_4 D_2 + c_4 f_7 D_1$
b_5	$c_4 f_6 D_2 + c_4 f_3 D_3 + c_4 f_4 D_1 + c_4 f_7 D_0$
b_4	$c_4 f_3 D_2 + c_4 f_5 D_3 + c_4 f_4 D_0 + c_4 f_6 D_1$
b_3	$c_4 f_2 D_3 + c_4 f_5 D_2 + c_4 f_6 D_0 + c_4 f_3 D_1$
b_2	$c_4 f_2 D_2 + c_4 f_5 D_1 + c_4 f_3 D_0$
b_1	$c_4 f_2 D_1 + c_4 f_5 D_0$
b_0	$c_4 f_2 D_0$
a_0	$c_2 f_5$
a_1	$c_2 f_6 + c_1 f_4 c_2 f_5$
a_2	$c_2 f_7 + c_1 f_4 c_2 f_6 + c_1 f_5 c_2 f_5 + c_3 f_3$
a_3	$c_3 f_1 + c_1 f_4 c_2 f_7 + c_1 f_5 c_2 f_6 + c_1 f_6 c_2 f_5 + c_3 f_4$
a_4	$c_3 f_2 + c_1 f_4 c_3 f_1 + c_1 f_5 c_2 f_7 + c_1 f_6 c_2 f_6 + c_1 f_7 c_2 f_5 + c_3 f_5$
a_5	$c_1 f_4 c_3 f_2 + c_1 f_5 c_3 f_1 + c_1 f_6 c_2 f_7 + c_1 f_7 c_2 f_6 + c_3 f_6$
a_6	$c_1 f_5 c_3 f_2 + c_1 f_6 c_3 f_1 + c_1 f_7 c_2 f_7 + c_3 f_7$
a_7	$c_1 f_6 c_3 f_2 + c_1 f_7 c_3 f_1 + c_4 f_1$
a_8	$c_1 f_7 c_3 f_2$

Nessa Tabela, $D_i, i = 0, \dots, 3$ são os parâmetros da função de transferência do modelo de TPC compensado e os coeficientes $c_i f_j$ com $i = 1, \dots, 4$ e $j = 1, \dots, 7$ são variáveis auxiliares cujas expressões são apresentadas na Tabela B.2. Observa-se que a expressão de cada coeficiente é função dos elementos R, L e C do modelo de TPC utilizado nesta dissertação.

Tabela B.2 – Variáveis auxiliares.

Coeficientes	Expressão
c_1f_1	$C_1 + C_2 + C_c$
c_1f_2	$C_1 + C_2 + C_p$
c_1f_3	$C_1C_c + C_2C_c + C_1C_p + C_2C_p + C_cC_p$
c_1f_4	$R_c c_1f_1 + R_p c_1f_2$
c_1f_5	$R_c R_p c_1f_3 + L_c c_1f_1 + L_p c_1f_2$
c_1f_6	$R_c L_p c_1f_3 + R_p L_c c_1f_3$
c_1f_7	$L_c L_p c_1f_3$
c_2f_1	$R_m R_f Z_b L_m$
c_2f_2	$R_m Z_b L_m (L_{f2} - M)$
c_2f_3	$R_m R_f Z_b L_m C_f (L_{f1} + L_{f2})$
c_2f_4	$R_m Z_b L_m C_f (L_{f1} L_{f2} - L_{f1} M - L_{f2} M)$
c_2f_5	$R_m R_f Z_b$
c_2f_6	$R_m Z_b (L_m + L_{f2} - M) + R_f L_m (R_m + Z_b)$
c_2f_7	$(R_m L_m + Z_b L_m) (L_{f2} - M) + R_m R_f Z_b C_f (L_{f1} + L_{f2})$
c_3f_1	$R_f L_m C_f (R_m + Z_b) (L_{f1} + L_{f2}) + R_m Z_b C_f (L_m L_{f1} + L_m L_{f2} + L_{f1} L_{f2} - L_{f1} M - L_{f2} M)$
c_3f_2	$L_m C_f (R_m + Z_b) (L_{f1} L_{f2} - L_{f1} M - L_{f2} M)$
c_3f_3	$c_2f_1 c_1f_2$
c_3f_4	$c_2f_2 c_1f_2 + c_2f_1 R_c c_1f_3$
c_3f_5	$c_2f_3 c_1f_2 + (c_2f_2 R_c + c_2f_1 L_c) c_1f_3$
c_3f_6	$c_2f_4 c_1f_2 + (c_2f_3 R_c + c_2f_2 L_c) c_1f_3$
c_3f_7	$(c_2f_4 R_c + c_2f_3 L_c) c_1f_3$
c_4f_1	$c_2f_4 L_c c_1f_3$
c_4f_2	$C_1 c_2f_1$
c_4f_3	$C_1 c_2f_3 + R_c C_1 C_c c_2f_2 + L_c C_1 C_c c_2f_1$
c_4f_4	$R_c C_1 C_c c_2f_4 + L_c C_1 C_c c_2f_3$
c_4f_5	$C_1 c_2f_2 + R_c C_1 C_c c_2f_1$
c_4f_6	$C_1 c_2f_4 + R_c C_1 C_c c_2f_3 + L_c C_1 C_c c_2f_2$
c_4f_7	$L_c C_1 C_c c_2f_4$