



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

PRISCILLA BANDEIRA SOBREIRA

**Influência da Correção da Tensão Secundária de
Transformadores de Potencial Capacitivos na Estimação
de Fasores e no Monitoramento de Harmônicos**

Campina Grande, Paraíba.

Novembro de 2014

PRISCILLA BANDEIRA SOBREIRA

Influência da Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos na Estimação de Fasores e no Monitoramento de Harmônicos

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

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande, Paraíba.

Novembro de 2014

PRISCILLA BANDEIRA SOBREIRA

Influência da Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos na Estimação de Fasores e no Monitoramento de Harmônicos

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

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Aos meus pais, Roberto e Sineide, por todo o suporte dado ao longo desses anos, a eles eu dedico todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fornecer saúde, determinação e força para enfrentar essa jornada.

Agradeço aos meus pais, Sineide e Roberto, que não mediram esforços para me proporcionar uma educação de qualidade e são parte fundamental nesta conquista. Sem o apoio e a base familiar dada por eles eu não chegaria até aqui.

Ao professor Damásio Fernandes Jr. pela orientação, apoio e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Não poderiam faltar os meus agradecimentos a todos os colegas de curso, que compartilharam comigo os prazeres e dificuldades desta jornada. Mais que colegas, hoje são amigos que levarei para toda a vida.

E por fim, a todos os familiares e amigos que sempre me apoiaram, incentivaram e entenderam os momentos de ausência.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 ZADEH (2004)	3
2.2 ZADEH E LI (2007)	4
2.3 IZYKOWSKI <i>et al.</i> (1998)	4
2.4 MACHADO (2009)	5
2.5 SILVA (2010)	5
2.6 SINOPSE BIBLIOGRÁFICA	5
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO	6
3.2 RELÉS DIGITAIS	7
3.3 ESTIMAÇÃO DE FASORES DE TENSÃO	8
3.3.1 JANELAS DE AMOSTRAGEM PARA OS ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL	8
3.3.2 FILTROS <i>ANTI-ALIASING</i>	9
3.3.3 ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO	10
3.3.4 ALGORITMO DE FOURIER DE MEIO CICLO	12
4 MODELO DO COMPENSADOR	13
4.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO DO TPC	13
4.2 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DO FILTRO DIGITAL RECURSIVO	16
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO DIGITAL RECURSIVO	19
4.4 IMPLEMENTAÇÕES NO SIMULADOR RTDS TM (<i>REAL TIME DIGITAL SIMULATOR</i>)	20
4.4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO COMPENSADOR NO RTDS TM	20

4.4.2	SISTEMA DE CONTROLE UTILIZADO NA ESTIMAÇÃO FASORIAL NO RTDS TM	21
5	ANÁLISES E RESULTADOS	23
5.1	COMPENSAÇÃO DE UM TPC DE 230 kV	23
5.2	AVALIAÇÃO DO COMPENSADOR NA ESTIMAÇÃO FASORIAL DA TENSÃO	25
5.3	AVALIAÇÃO DO COMPENSADOR NA PRESENÇA DE DISTÚRBIOS PROVOCADOS POR HARMÔNICOS	27
6	CONCLUSÃO	30
7	REFERÊNCIAS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de TPC utilizado por ZADEH (2004).	3
Figura 2. Modelo simplificado de TPC utilizado por IZYKOWSKI <i>et al.</i> (1998).....	4
Figura 3. Modelo geral de um TPC a 60 Hz.....	7
Figura 4. Janela móvel de amostras (ANDERSON, 1999).	9
Figura 5. Resposta em frequência dos filtros ideal, Chebyshev e Butterworth.....	10
Figura 6. Módulo da resposta em frequência dos filtros de Fourier de um ciclo.	12
Figura 7. Modelo do TPC utilizado para o cálculo dos seus parâmetros.	13
Figura 8. Curva de amplitude da relação de tensão de um TPC de 230 kV.....	14
Figura 9. Curva de fase da relação de tensão de um TPC de 230 kV.....	14
Figura 10. Tela principal do <i>software</i> TPCalc 1.1.....	15
Figura 11. Representação gráfica do processo de correção da tensão secundária do TPC.	16
Figura 12. Ganho do TPC compensado.	17
Figura 13. Fase do TPC compensado.....	18
Figura 14. Implementação do compensador no módulo CBuilder do RTDS TM	21
Figura 15. Sistema utilizado para obtenção de fasores de tensão.....	22
Figura 16. Representação gráfica de um sistema de 230 kV.....	23
Figura 17. Formas de onda da tensão obtidas para uma falta inicializada no zero da tensão primária.	24
Figura 18. Formas de onda da tensão obtidas para uma falta inicializada no pico da tensão primária.	25
Figura 19. Módulo do fasor tensão para uma falta inicializada no zero da tensão primária. ...	26
Figura 20. Módulo do fasor tensão para uma falta inicializada no pico da tensão primária. ...	27
Figura 21. Sistema elétrico utilizado para observar os distúrbios harmônicos.	28
Figura 22. Formas de onda das tensões obtidas para a simulação de distúrbios harmônicos. .	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros externados pelo TPCalc para o TPC de 230 kV.....	15
Tabela 2. Coeficientes da função de transferência $\varphi(s)^{-1}$	17
Tabela 3. Pólos e Zeros do Compensador.....	18
Tabela 4. Coeficientes dos filtros de segunda ordem para o TPC de 230 kV.....	20
Tabela 5. Dados da linha de transmissão de 230 kV.....	23
Tabela 6. Tensões e impedâncias do sistema de 230 kV.....	23

RESUMO

Quando ocorre uma falta em um sistema elétrico de potência, a tensão secundária do transformador de potencial capacitivo (TPC) não representa instantaneamente uma réplica da tensão primária, devido ao fato de a energia armazenada nos elementos que o compõem não mudar instantaneamente sua carga ou fluxo. Os erros de amplitude e fase apresentados pela tensão secundária do TPC, na ocorrência de manobras e curto-circuitos, podem proporcionar operações mal sucedidas por parte dos dispositivos de proteção e controle. Dentro deste contexto, é apresentado um filtro corretor (compensador) para a tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos, implementado no RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*). Para realizar o projeto do compensador, foram utilizados dados da resposta em frequência do TPC, estimação dos parâmetros do modelo de TPC e cálculo dos coeficientes da função de transferência do compensador. Foram realizadas simulações de faltas e distorções provocadas por componentes harmônicas a fim de que se possa observar o comportamento da tensão secundária compensada e sem compensação. Foi realizado também um estudo sobre a influência da correção da tensão secundária do TPC na obtenção de fasores de tensão, por meio de métodos de estimação fasorial bastante utilizados na proteção e controle de sistemas elétricos de potência. A correção da tensão secundária do TPC faz com que a estimação fasorial da tensão seja mais próxima da realidade.

Palavras-chave: Algoritmos de estimação fasorial; compensador; distorções harmônicas; faltas; transformador de potencial capacitivo.

1 INTRODUÇÃO

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

O bom funcionamento do sistema de proteção é condicionado à atuação precisa dos relés, que por sua vez, estão submetidos a erros de medição inerentes aos transformadores para instrumentos, tais como os transformadores de corrente (TC) e os TPC.

Em regime transitório, os TPC geram certos problemas para os relés de distância. Estudos mostram que quando a tensão no barramento de um TPC sofre variação devido a uma falta no sistema 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. Esta energia armazenada causa transitórios na tensão secundária do TPC que depende, dentre outros fatores, do ponto de inicialização da falta.

O TPC gera transitórios severos que possuem amplitude e duração significantes que podem afetar o desempenho dos relés de proteção. A busca por soluções que permitam mitigar tais fenômenos sobre relés de proteção é alvo de pesquisas na comunidade científica.

Nessas condições, a resposta transitória do TPC inclui componentes de frequência não presentes no sinal de entrada e que, por consequência, pode ocasionar erros no cálculo dos fasores fundamentais de tensão e, conseqüentemente, comprometer o desempenho de algumas funções de proteção que requerem a análise dos sinais secundários dos TPC.

1.1 OBJETIVO

Os objetivos deste trabalho são os seguintes: fazer uma revisão bibliográfica sobre a correção da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos em tempo real, implementar um filtro digital (compensador) para a tensão secundária do TPC e realizar um

estudo sobre a influência da correção da tensão secundária do TPC sobre o fasor de tensão obtido por algoritmos de estimação fasorial e no monitoramento de harmônicos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis seções, além desta seção introdutória. Na Seção 2 faz-se uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais significativos sobre métodos para a correção da tensão secundária do TPC.

Na Seção 3 é apresentada a fundamentação teórica sobre transformadores de potencial capacitivos e relés digitais. Nesta Seção também é abordado o tema da estimação fasorial.

Na Seção 4 é apresentado um modelo para o compensador da tensão secundária do TPC, a partir de um método para obtenção dos parâmetros R , L e C do TPC, e da relação de transformação do TPC. Foi também implementado o filtro digital recursivo através da transformação bilinear, apresentando um conjunto de filtros de segunda ordem que implementam a função de transferência do compensador.

Na Seção 5 são mostradas as descrições de como foram feitas as implementações do compensador no RSCAD (*software* do RTDS™), e de um sistema (formado por blocos de controle do RSCAD) que realiza a estimação fasorial do fasor tensão.

Na Seção 6 são realizadas simulações de faltas, distorções provocadas por componentes harmônicos e um estudo sobre a influência da compensação da tensão secundária no cálculo do fasor da tensão.

Na Seção 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o passar dos anos, alguns pesquisadores propuseram métodos para que a tensão secundária seja uma cópia fiel da tensão primária do TPC.

2.1 ZADEH (2004)

No trabalho de ZADEH (2004) foi apresentada uma técnica de compensação dinâmica da tensão secundária a partir do conceito de RNA (Redes Neurais Artificiais). O modelo para o TPC adotado por esse trabalho é mostrado na Figura 1.

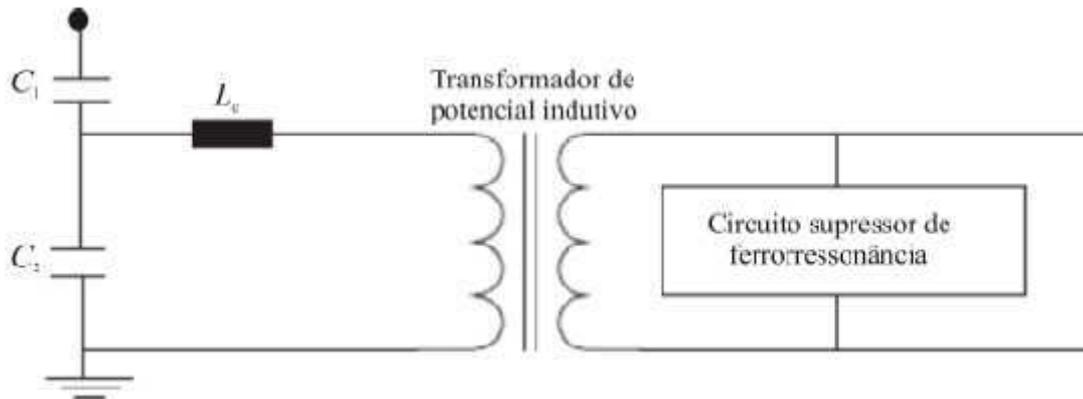


Figura 1. Modelo de TPC utilizado por ZADEH (2004).

O reator de compensação (L_c) tem a função de evitar diferenças de fase entre as tensões do primário e secundário do TPC. O circuito supressor de ferroressonância tem a função de amenizar possíveis oscilações de tensão, originadas pelo fenômeno da ferroressonância entre elementos indutores e capacitores que compõe o TPC.

Esse modelo do TPC é válido apenas para frequências próximas a frequência fundamental do sistema. A rede neural é treinada para fornecer a função de transferência inversa do TPC apenas nas ocorrências de faltas, mas não é treinada para outros tipos de distúrbios diferentes de curto-circuitos presentes no sistema elétrico de potência.

Como limitações desse trabalho, pode-se citar a realização de estudos apenas no domínio do tempo, a utilização de um modelo simplificado de TPC e falta de uma metodologia para correção da tensão secundária do TPC em meio a distúrbios diferentes de curto-circuitos.

2.2 ZADEH E LI (2007)

No trabalho de ZADEH & LI (2007) foi realizado a correção da tensão secundária a partir da metodologia proposta por ZADEH (2004), mas avaliou o impacto da natureza ativa ou passiva do circuito supressor de ferorrressonância na operação da proteção de distância.

A contribuição desse trabalho é a eficiência da compensação dinâmica da tensão transitória do TPC durante o processo de estimação da impedância de sequência positiva, do trecho da linha entre o local da falta e o local de instalação do relé, obtida em função dos valores da tensão e da corrente do sistema, mas as limitações desse trabalho são as mesmas limitações do trabalho de ZADEH (2004).

2.3 IZYKOWSKI *et al.* (1998)

No trabalho de IZYKOWSKI *et al.* (1998) é proposto um algoritmo para correção dinâmica da tensão secundária do TPC. O algoritmo para correção é baseado na função inversa da função de transferência de um modelo de TPC simplificado. Os autores apresentam um modelo geral de TPC (Figura 2) que contempla a coluna capacitiva (C), a impedância equivalente da soma entre as impedâncias do reator de compensação e do transformador de potencial indutivo (L' e R'), o circuito supressor de ferroressonância (L_1 , R_1 e R_2) e a carga secundária (R_0 e L_0).

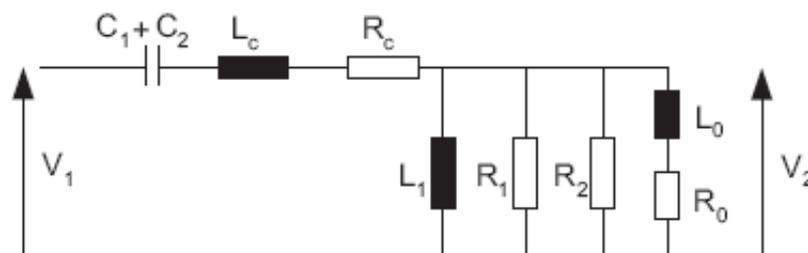


Figura 2. Modelo simplificado de TPC utilizado por IZYKOWSKI *et al.* (1998).

Algumas limitações desse trabalho são: a utilização de um modelo simplificado de TPC, a falta de uma metodologia para determinar os parâmetros do equipamento e a restrição do estudo para frequências menores que 1 kHz.

2.4 MACHADO (2009)

No trabalho de MACHADO (2009) foi apresentada uma técnica de compensação para corrigir dinamicamente os distúrbios apresentados pela tensão secundária de TPC. Os parâmetros do compensador foram 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. Simulações de curto-circuito são realizadas em um programa do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), contudo não são apresentados estudos para verificação da influência do compensador na proteção de sistemas elétricos.

2.5 SILVA (2010)

No trabalho de SILVA (2010) foi apresentado o protótipo de um dispositivo capaz de realizar a correção da tensão secundária do TPC, denominado compensador. O compensador foi projetado a partir dos parâmetros lineares do TPC e de um modelo analítico para o TPC compensado.

A validação da técnica proposta para correção da tensão secundária do TPC foi realizada mediante simulações em tempo real utilizando o simulador RTDSTM. No referido trabalho foram apresentados os benefícios que o compensador pode trazer tanto para o sistema de medição como para o sistema de proteção.

2.6 SINOPSE BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos abordados têm como objetivo desenvolver um algoritmo de compensação eficaz para a correção da tensão secundária em transformadores de potencial capacitivo em regime transitório, de modo a melhorar a atuação de relés de proteção e de sistemas de medição e controle.

Quanto aos modelos de TPC utilizados, há estudos que contemplam o modelo completo e outros que simplificam, considerando apenas alguns elementos do equipamento. Uma limitação dos trabalhos analisados é que consideram que todos os parâmetros do modelo do TPC são conhecidos, uma vez que há complexidade na obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em frequências elevadas (KEZUNOVIC *et al.*, 1992; FERNANDES Jr., 2003).

A pesquisa desenvolvida por SILVA (2010) possibilitou a correção da tensão secundária do TPC em tempo real, utilizando o simulador RTDSTM, melhorando o desempenho dos sistemas de proteção, medição e controle.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO

Nos sistemas de transmissão de energia com tensões elevadas são utilizados transformadores de potencial capacitivos para reduzir tensões de transmissão a tensões suportáveis pelos instrumentos de medição e proteção. O regime permanente de um TPC já foi amplamente estudado no passado. Em contraposição, pouco se conhecia sobre seu regime transitório.

Na Figura 3 é apresentado um modelo geral para um TPC. Podem-se observar dois conjuntos de capacitâncias C_1 e C_2 no enrolamento primário do TPC, havendo uma derivação intermediária b , correspondente a uma tensão V que alimenta o enrolamento primário de um transformador de potencial indutivo (TPI), o qual fornece uma tensão secundária V_o aos instrumentos de medição e proteção ali inseridos.

Os elementos que compõem o TPC podem influenciar o regime transitório do mesmo e distorcer consideravelmente o sinal de tensão em seus terminais secundários. Quando uma falha provoca a redução da tensão primária, a tensão secundária do TPC não a acompanha instantaneamente devido à energia armazenada em capacitores e indutores presentes no transformador. São estes componentes armazenadores de energia que causam os transitórios em questão.

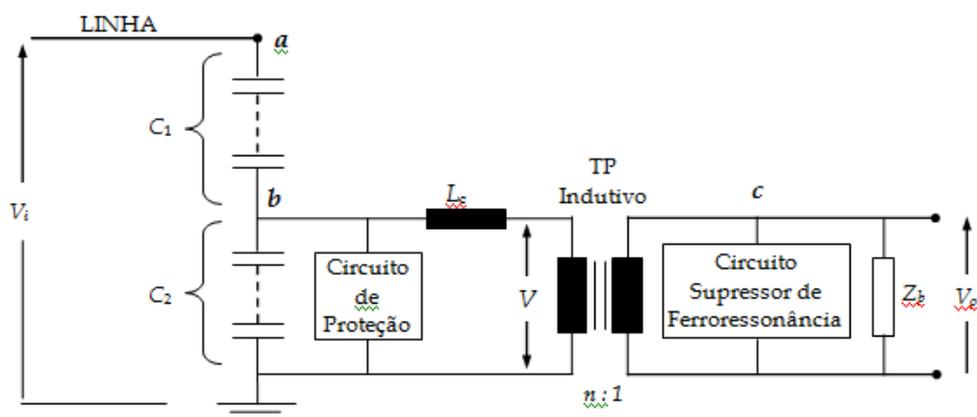


Figura 3. Modelo geral de um TPC a 60 Hz.

Transformadores de tensão e transformadores de corrente possuem comportamento indesejado quando submetidos a falhas, tais como curtos-circuitos, o que afeta a atuação dos relés de proteção. Com a finalidade de melhorar o desempenho do circuito de proteção em regime transitório, compensadores são projetados de modo a fornecer aos relés de proteção uma réplica da tensão primária do TPC, rejeitando, portanto, os transitórios induzidos.

O monitoramento dos sistemas de transmissão é fundamental, especialmente com a crescente demanda de energia. Uma vez que os TPC não são recomendados para monitorar sinais com distorção harmônica, pois alguns espectros de frequência podem ser atenuados ou amplificados de acordo com a relação de transformação de tensão do TPC, filtros digitais são desenvolvidos para corrigir a relação de transformação de tensão do TPC. Estes transformadores, conectados a um filtro, podem, portanto, ser utilizados no monitoramento da qualidade da energia elétrica dos sistemas de alta tensão.

3.2 RELÉS DIGITAIS

A tensão secundária dos TPC é fornecida aos relés digitais de proteção, os quais realizam o processamento da tensão de forma a obter informações sobre o sistema de potência ao qual estão conectados. A partir dessas informações o sistema de proteção determina que ações que devem ser tomadas para manter a operação do sistema elétrico de forma segura e com o mínimo de interrupções.

Uma proteção baseada em técnicas de microprocessadores mantém o mesmo princípio e guarda os mesmos requisitos básicos aplicados aos relés eletromecânicos ou de

indução e aos relés estáticos ou eletrônicos. No entanto, os relés digitais oferecem novas funções, além das funções de seus antecessores, bem como maior velocidade, melhor sensibilidade, acesso remoto e armazenamento de informações.

Enquanto que os relés eletromecânicos utilizam grandezas analógicas da tensão e da corrente e contatos externos, bloqueios, denominados eventos, os relés digitais utilizam técnicas de microprocessamento. No entanto, as grandezas de entrada continuam sendo analógicas e são convertidas internamente para sinais digitais através de conversores analógicos/digitais (A/D).

Os relés digitais têm a capacidade de processar digitalmente os valores medidos do sistema (como tensão, corrente e frequência), e de realizarem operações lógicas e aritméticas.

A tecnologia dos relés digitais pode ser resumida no fato de que os sinais analógicos de entrada são isolados eletricamente pelos transformadores de tensão e de corrente, depois são filtrados analogicamente, processados pelos conversores analógicos/digitais e utilizados nos cálculos dos algoritmos de proteção.

3.3 ESTIMAÇÃO DE FASORES DE TENSÃO

Os relés digitais utilizam algoritmos computacionais que se baseiam no cálculo das componentes de frequência fundamental das tensões e correntes, que por sua vez são calculadas pelos algoritmos de estimação fasorial.

3.3.1 JANELAS DE AMOSTRAGEM PARA OS ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL

Os algoritmos de estimação fasorial calculam os módulos e ângulos dos fasores com base em uma quantidade definida de amostras dentro de intervalo denominado de janela de amostragem. Quando uma nova amostra se torna disponível a mais antiga é descartada, gerando assim uma janela móvel de amostragem, também chamada de janela deslizante (MASCHER, 2010). Na Figura 4 é ilustrado o comportamento de uma janela móvel que contém três amostras de um sinal A , em função do tempo t .

Os algoritmos de estimação fasoriais só produzirão resultados corretos nas janelas que contêm amostras de pré ou pós falta exclusivamente. Logo, uma janela de comprimento mais curto faz com que o relé opere mais rapidamente, no entanto reduz a habilidade do algoritmo de estimação em rejeitar componentes de frequência não fundamental. Já uma janela de comprimento mais longo aumenta o tempo de processamento de dados do relé, e faz com que a janela leve mais tempo para passar sobre o ponto de falta do sinal.

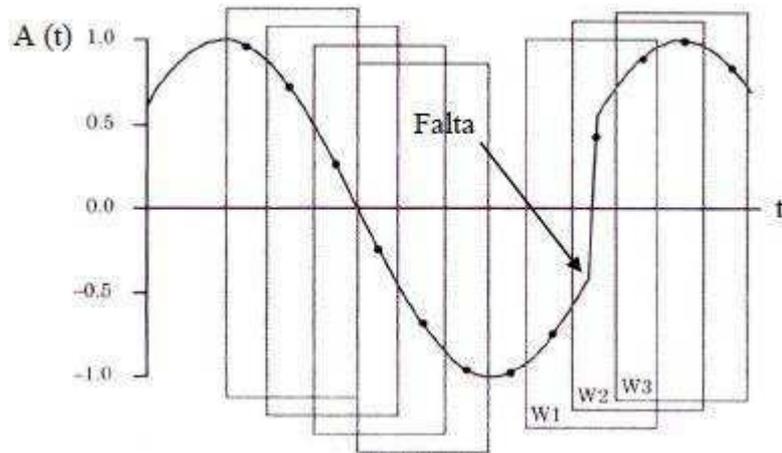


Figura 4. Janela móvel de amostras (ANDERSON, 1999).

3.3.2 FILTROS ANTI-ALIASING

O teorema da amostragem de Nyquist postula que para que um determinado componente de frequência do sinal f_{cs} possa ser completamente reconstituído, a taxa amostral do processo de digitalização deve ser no mínimo igual a $2 f_{cs}$, para que não ocorra a sobreposição de espectros, fenômeno denominado de *aliasing*.

Os sinais de corrente e tensão fornecidos, pelos TC e TPC durante manobras no sistema elétrico apresentam componentes de alta frequência, e como a taxa de amostragem utilizada em relés varia de 480 Hz a 6000 Hz (MASCHER, 2010), é necessário utilizar um filtro que impeça que o fenômeno de *aliasing* ocorra.

Filtros passa-baixa com frequência de corte no máximo igual à metade da taxa de amostragem são geralmente utilizados por relés como filtros *anti-aliasing*. Um filtro passa-baixa ideal não pode ser encontrado na prática, então são utilizados filtros passa-baixa que se aproximam da forma ideal, como os filtros tipo Butterworth e Chebyshev, cuja resposta em frequência é mostrada na Figura 5.

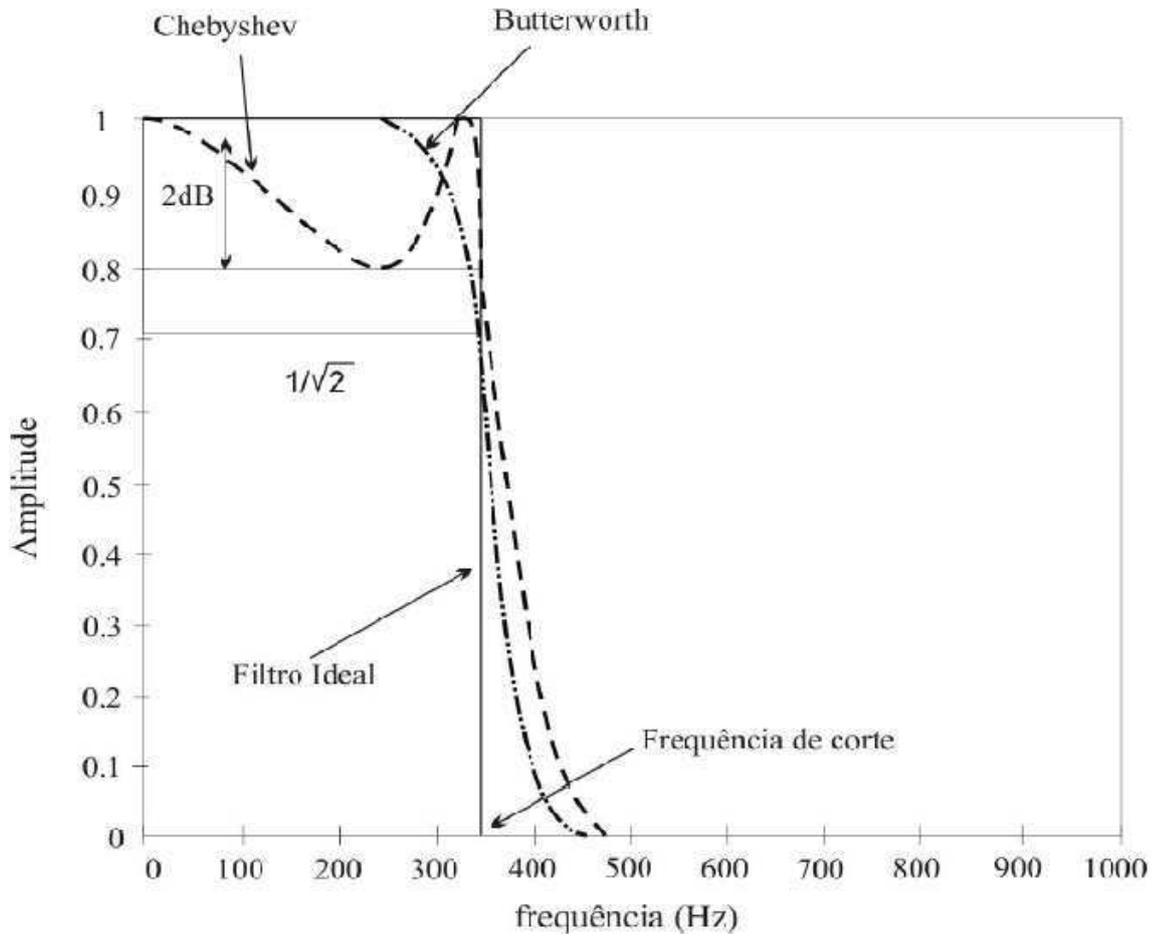


Figura 5. Resposta em frequência dos filtros ideal, Chebyshev e Butterworth.

3.3.3 ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO

Este algoritmo consiste em extrair a componente de frequência fundamental de um sinal $x(t)$, a partir do produto de um ciclo de amostras deste sinal com as funções seno e cosseno. Para tanto, recorre-se às equações (1), particularizadas para a frequência fundamental.

$$X_{rel} = \frac{2}{T_0} \int_{t_t}^{t_0+T_0} x(t) \cos(\omega_0 t) dt. \quad X_{im} = \frac{2}{T_0} \int_{t_t}^{t_0+T_0} x(t) \sin(\omega_0 t) dt. \quad (1)$$

Considerando-se N amostras em um ciclo da frequência fundamental de $x(t)$, as integrais que aparecem nas equações (1) podem ser calculadas como:

$$X_{resl} = \frac{2}{N\Delta t} [x_0 \cos(\omega_0 t_0) + x_1 \cos(\omega_0 t_1) + \dots + x_{N-1} \cos(\omega_0 t_{N-1})] \Delta t. \quad (2)$$

$$X_{im} = \frac{2}{N\Delta t} [x_0 \sen(\omega_0 t_0) + x_1 \sen(\omega_0 t_1) + \dots + x_{N-1} \sen(\omega_0 t_{N-1})] \Delta t. \quad (3)$$

Sendo Δt o passo de amostragem utilizado, $t_k = k\Delta t$ e $x_k = x(t_k)$. Rearranjando as equações (2) e (3), tem-se:

$$X_{resl} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos\left(\frac{2\pi}{N} m\right) = \sum_{m=0}^{N-1} x_m h_{res}. \quad (4)$$

$$X_{im} = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sen\left(\frac{2\pi}{N} m\right) = \sum_{m=0}^{N-1} x_m h_{im}. \quad (5)$$

As funções h_{re} e h_{im} são denominadas de filtros de Fourier de um ciclo, e podem ser escritas da seguinte forma:

$$h_{res} = \frac{2}{N} [\cos(\omega_0 t_0) \cos(\omega_0 t_1) \cos(\omega_0 t_2) \dots \cos(\omega_0 t_{N-1})]. \quad (6)$$

$$h_{im} = \frac{2}{N} [\sen(\omega_0 t_0) \sen(\omega_0 t_1) \sen(\omega_0 t_2) \dots \sen(\omega_0 t_{N-1})]. \quad (7)$$

O módulo e o ângulo do fasor de tensão são dados por:

$$A_1 = \sqrt{X_{resl}^2 + X_{im}^2}. \quad (8)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{X_{im}}{X_{resl}}\right). \quad (9)$$

Os módulos da resposta em frequência para os filtros de Fourier h_{re} e h_{im} são mostrados na Figura 6, onde pode-se observar que o módulo é unitário para a frequência fundamental, e é zero para todos os demais componentes harmônicos.

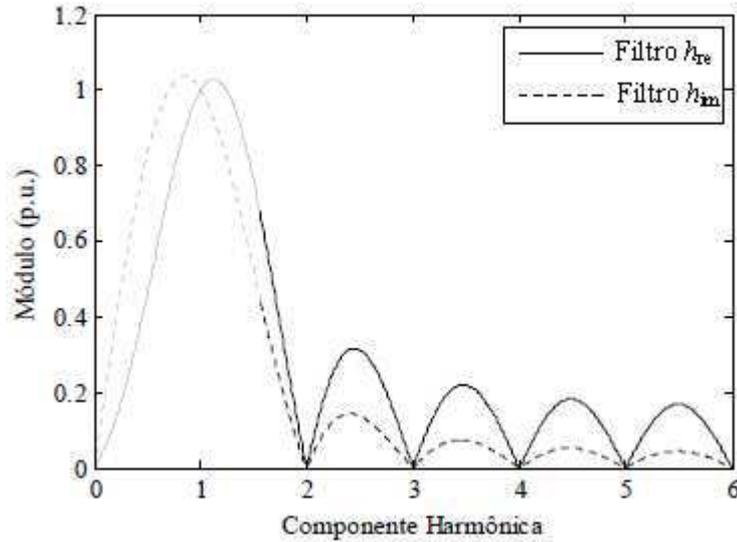


Figura 6. Módulo da resposta em frequência dos filtros de Fourier de um ciclo.

3.3.4 ALGORITMO DE FOURIER DE MEIO CICLO

Este algoritmo é semelhante ao de Fourier de um ciclo, mas como o próprio nome indica, ele utiliza apenas meio ciclo da frequência fundamental do sinal $x(t)$. Desta forma, pode-se verificar que as Equações (4) e (5) passam a ser escritas como:

$$X_{rel} = \frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_m \cos\left(\frac{2\pi}{N} m\right). \quad (10)$$

$$X_{rel} = -\frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_m \sin\left(\frac{2\pi}{N} m\right), \quad (11)$$

e os filtros h_{re} e h_{im} passam a ser:

$$h_{re} = \frac{4}{N} [\cos(\omega_0 t_0) \cos(\omega_0 t_1) \cos(\omega_0 t_2) \dots \cos(\omega_0 t_{N-1})]. \quad (12)$$

$$h_{im} = \frac{4}{N} [\sin(\omega_0 t_0) \sin(\omega_0 t_1) \sin(\omega_0 t_2) \dots \sin(\omega_0 t_{N-1})]. \quad (13)$$

Os módulos da resposta em frequência para os filtros de Fourier de meio ciclo não eliminam as harmônicas de ordem par.

4 MODELO DO COMPENSADOR

4.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO DO TPC

O compensador para correção da tensão secundária do TPC é projetado a partir da relação de transformação de tensão de um modelo de TPC e de seus parâmetros R, L e C calculados utilizando o *software* TPCalc

Para o projeto do filtro foi utilizada a função de transferência proposta por FERNANDES Jr. (2003). Com a relação de transformação do equipamento e os parâmetros do modelo calculados utilizando o *software* TPCalc, é projetado o compensador que irá corrigir a tensão secundária do TPC, sendo observados os domínios da frequência e do tempo.

O modelo do TPC utilizado é mostrado na Figura 7. Tal modelo, proposto por FERNANDES Jr. (2003), apresenta apenas os parâmetros relevantes na apresentação do TPC. Sendo estes: coluna capacitiva (C_1 e C_2), reator de compensação (R_c , L_c e C_c), transformador de potencial indutivo (R_p , L_p , C_p , R_m e L_m) e circuito supressor de ferroressonância (R_f , L_{f1} , L_{f2} , $-M$ e C_f).

A resposta em frequência usada na rotina de cálculo de parâmetros para um TPC de 230 kV foi obtida por FERNANDES Jr. (2003). As curvas de resposta em frequência para o módulo e para a fase são mostradas nas Figuras 8 e 9.

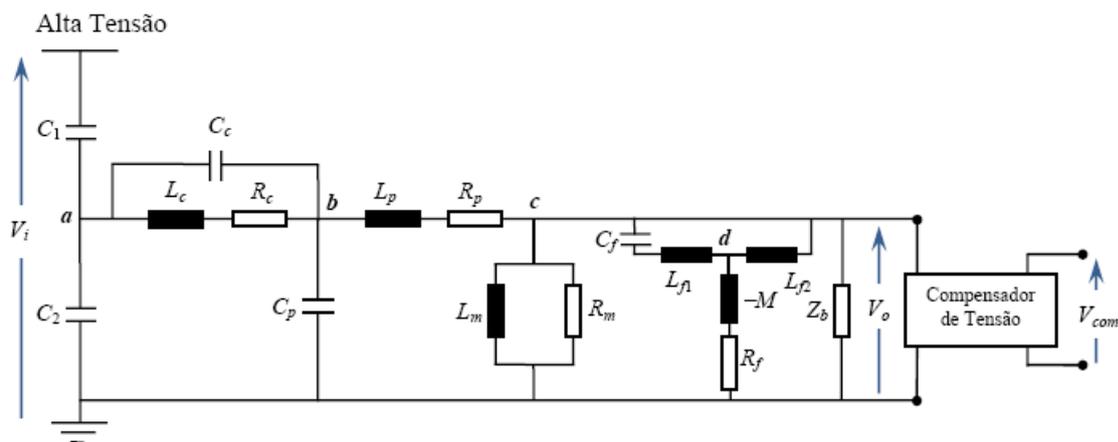


Figura 7. Modelo do TPC utilizado para o cálculo dos seus parâmetros.

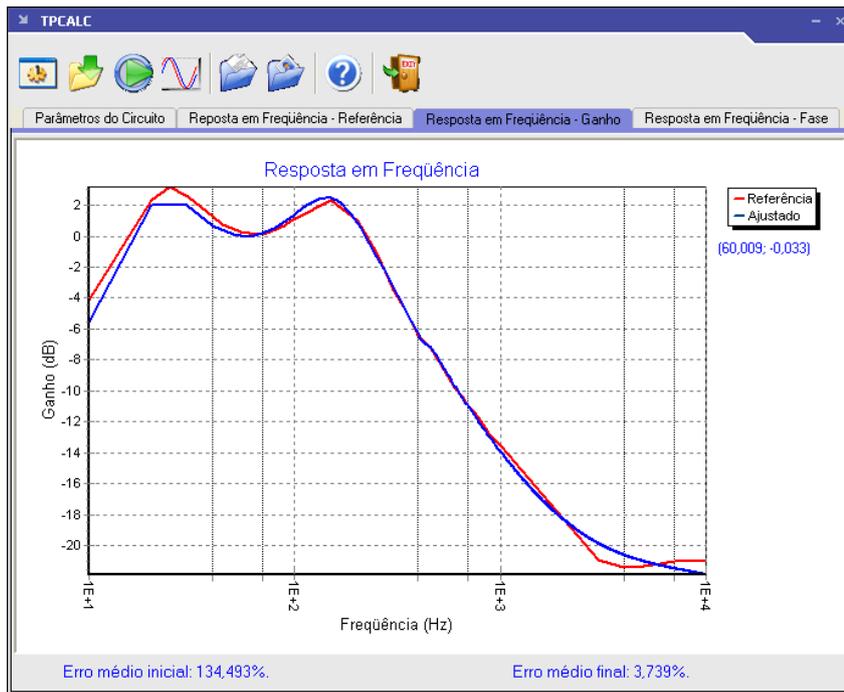


Figura 8. Curva de amplitude da relação de tensão de um TPC de 230 kV.



Figura 9. Curva de fase da relação de tensão de um TPC de 230 kV.

O Software TPCalc 1.1 desenvolvido pelo GSE/UFCG é destinado ao cálculo de parâmetros de transformadores de potencial capacitivos, e tem como objetivo geral calcular

os parâmetros R, L e C lineares de um modelo de TPC, a partir de dados de resposta em frequência, de forma que tais parâmetros possam reproduzir satisfatoriamente as funções de módulo e fase da relação de tensão do TPC.

Através de um ajuste de curvas no TPCalc 1.1, utilizando como entrada os valores das curvas obtidas na Figuras 8 e 9 , obtém-se os parâmetros do TPC mostrados na Tabela 1. A tela principal do TPCalc 1.1 é mostrada na Figura 10.

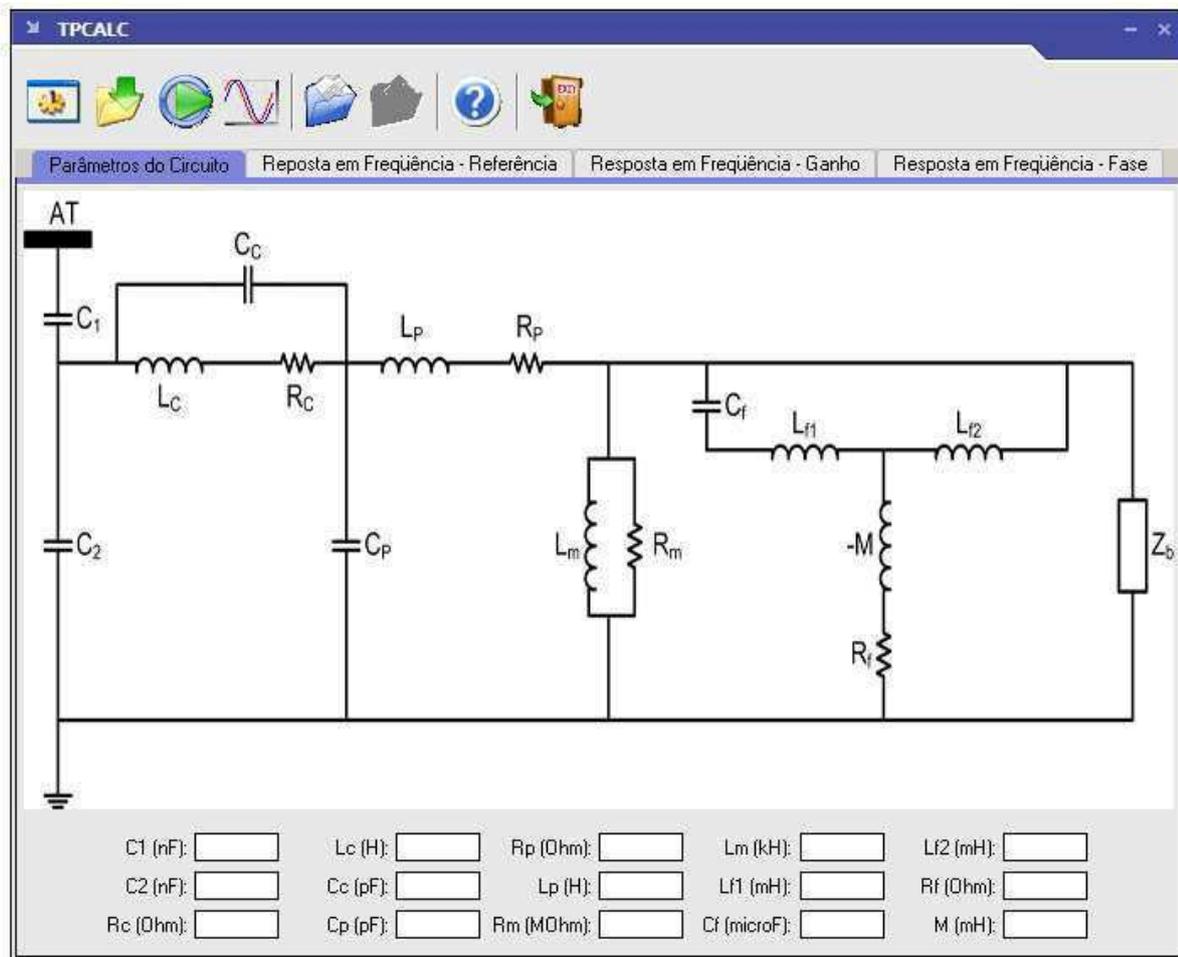


Figura 10. Tela principal do software TPCalc 1.1.

Tabela 1. Parâmetros externados pelo TPCalc para o TPC de 230 kV.

$C_1 = 10,0 \text{ nF}$	$L_c = 1,610 \text{ H}$	$R_p = 625,7 \Omega$	$L_m = 129,1 \text{ kH}$	$L_{f2} = 32,78 \text{ mH}$
$C_2 = 65,4 \text{ nF}$	$C_c = 31,54 \text{ nF}$	$L_p = 96,90 \text{ H}$	$L_{f1} = 4,58 \text{ mH}$	$R_f = 4,33 \Omega$
$R_c = 2,917 \text{ k}\Omega$	$C_p = 16,14 \text{ pF}$	$R_m = 579,3 \text{ M}\Omega$	$C_f = 220,2 \mu\text{F}$	$M = 4,34 \text{ mH}$

4.2 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DO FILTRO DIGITAL RECURSIVO

Utilizando os parâmetros obtidos no tópico anterior, pode-se agora calcular os coeficientes do filtro a ser projetado e desenvolver o projeto de um compensador para a tensão secundária do TPC. Este compensador é introduzido nos terminais secundários do TPC, conforme ilustrado na Figura 11. Nessa figura, $V_i(s)$, $V_o(s)$ e $V_{COM}(s)$ correspondem à tensão primária do TPC, a tensão secundária sem compensação e a tensão secundária compensada, respectivamente.

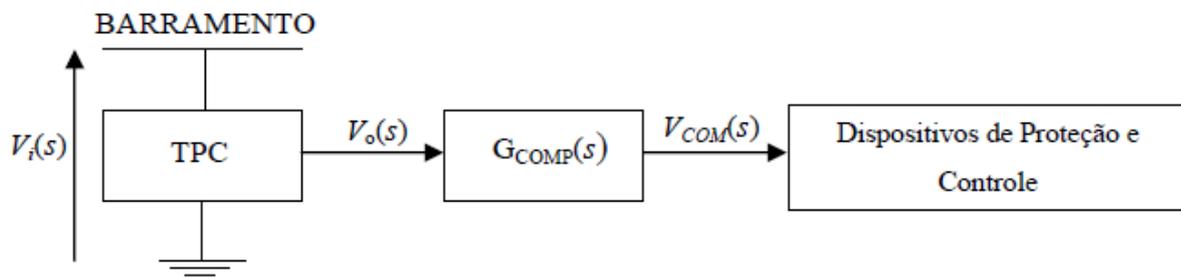


Figura 11. Representação gráfica do processo de correção da tensão secundária do TPC.

Segundo FERNANDES Jr. (2003), a relação de transformação de tensão do modelo de TPC é dada por:

$$G_{TPC}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_7s^7 + A_6s^6 + A_5s^5 + A_4s^4 + A_3s^3 + A_2s^2}{B_8s^8 + B_7s^7 + B_6s^6 + B_5s^5 + B_4s^4 + B_3s^3 + B_2s^2 + B_1s + B_0}. \quad (14)$$

Na qual, os coeficientes A_n e B_m , com $n = (2, \dots, 7)$ e $m = (0, \dots, 8)$ são funções não-lineares dos componentes R , L e C do modelo do TPC. Aproxima-se a resposta em frequência por uma função racional na forma de pólos e zeros para a implementação do filtro de ordem elevada.

Para um ganho unitário e um deslocamento mínimo de fase entre as tensões primária e secundária, a planta do compensador e do modelo do TPC deve possuir, no domínio da frequência, a seguinte relação:

$$G_{TPC}(s) * G_{COM}(s) = 1. \quad (15)$$

A obtenção de $G_{COM}(s)$ a partir da inversa da função do TPC, $G_{TPC}(s)$, resultaria em uma instabilidade, uma vez que o grau do numerador seria maior que o do denominador.

Portanto, propõe-se acrescentar a função racional imprópria $\varphi(s)$. Desta forma, a planta do compensador será dada por:

$$G_{COM}(s) = [G_{TPC}(s)\varphi(s)]^{-1}. \quad (16)$$

Sendo $\varphi(s)^{-1}$ a função racional própria que ditará a dinâmica do TPC compensado. Para cancelar os pólos indesejáveis e obter $\varphi(s)^{-1} \rightarrow 0$ quando $\omega \rightarrow \infty$, esta deve possuir ao menos um zero duplo na origem e três pólos. Logo:

$$\varphi(s)^{-1} = \frac{s^2}{D_3s^3 + D_2s^2 + D_1s + D_0}. \quad (17)$$

Na qual D_3 , D_2 , D_1 e D_0 são funções dos parâmetros do modelo simplificado e são apresentados na Tabela 2. Para seus cálculos, utilizou-se o método dos mínimos quadrados não-lineares.

Tabela 2. Coeficientes da função de transferência $\varphi(s)^{-1}$.

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 12 e 13, respectivamente.

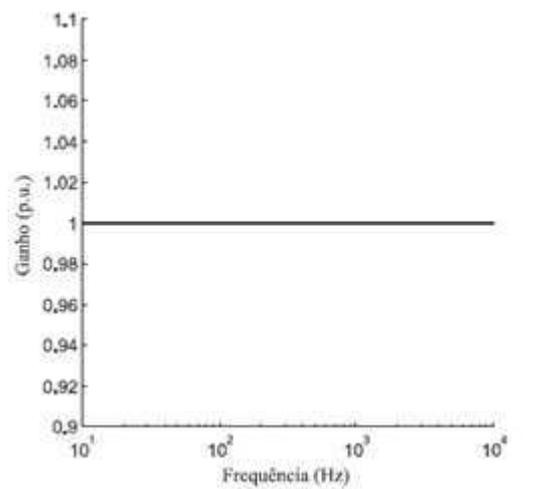


Figura 12. Ganho do TPC compensado.

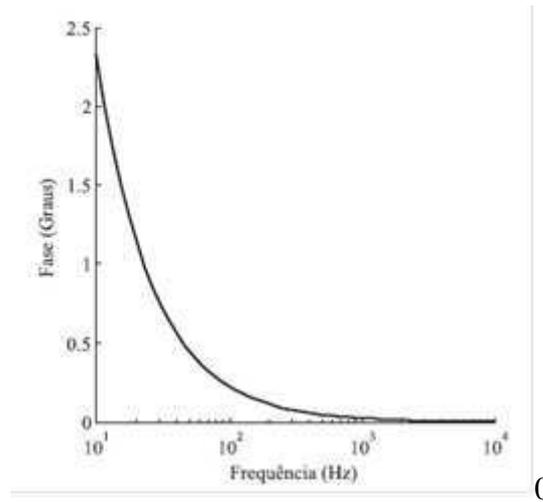


Figura 13. Fase do TPC compensado.

Estrategicamente, a função $\varphi(s)^{-1}$ foi projetada para ter zeros duplos na origem para cancelar os zeros duplos existentes na função de transferência do TPC, $G_{\text{TPC}}(s)$. Desta forma, a função de transferência do TPC compensado pode ser representada por:

$$G_{\text{COM}}(s) = \frac{(s+z_1')(s+z_2')(s+z_3')(s+z_4')(s+z_5')(s+z_6')(s+z_7')(s+z_8')}{(s+p_1')(s+p_2')(s+p_3')(s+p_4')(s+p_5')(s+p_6')(s+p_7')(s+p_8')} \quad (18)$$

Na qual z_n' e p_m' , com $n = (1, \dots, 8)$ e $m = (1, \dots, 8)$ são os pólos e zeros da função racional do compensador apresentados na Tabela 3, da qual conclui-se que o compensador é estável, pois os pólos e zeros estão localizados no semi-plano esquerdo do plano s .

Tabela 3. Pólos e Zeros do Compensador.

Coeficientes (i)	Zeros (z_i)	Pólos (p_i)
1	$-9,0792584 \times 10^{-1}$	$-1,0654706 \times 10^6$
2	$-2,5778226 \times 10^7$	$-2,0622911 \times 10^9$
3	$-9,6076636 \times 10^2 - j 4,5401484 \times 10^3$	$-6,1174841 \times 10^2$
4	$-9,6076636 \times 10^2 + j 4,5401484 \times 10^3$	$-1,9872212 \times 10^2$
5	$-4,6467886 \times 10^2 - j 8,3552911 \times 10^2$	$-9,6969696 \times 10^2 - j 4,5000688 \times 10^3$
6	$-4,6467886 \times 10^2 + j 8,3552911 \times 10^2$	$-9,6969696 \times 10^2 + j 4,5000688 \times 10^3$
7	$-6,0476265 \times 10^1 - j 1,1903186 \times 10^2$	$-1,2197169 - j 1,2200400$
8	$-6,0476265 \times 10^1 + j 1,1903186 \times 10^2$	$-1,2197169 + j 1,2200400$

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO DIGITAL RECURSIVO

Uma vez que o filtro digital recursivo é de ordem elevada, logo, de difícil implementação, devem-se conectar sub-filtros com seções de segunda ordem, conforme apresentado no trabalho de MACHADO (2009). Inicialmente, decompõe-se a função de transferência do filtro analógico na forma de pólos e zeros, em seguida, determinam-se os pólos (ou pares de pólos) próximos da origem. Determina-se também, o zero (ou par de zeros) próximo dos pólos encontrados anteriormente.

Estes pólos e zeros serão combinados em filtros de seções de segunda ordem, repetindo-se este passo para formar os demais filtros da cascata, a qual deverá obedecer a ordem crescente ou decrescente da distância dos pólos à origem do plano s . A compensação foi obtida através da aplicação da transformação bilinear, definida pela expressão seguinte:

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T_d(1 + z^{-1})} \quad (19)$$

Na qual $T_d = 50 \mu s$ corresponde ao tempo de amostragem. Desta forma, a função de transferência do compensador no domínio discreto será dada por:

$$G_{COM}(z) = \frac{V_{COM}(z)}{V_O(z)} = k_o \prod_{i=1}^4 \frac{k_{i1} + k_{i1}z^{-1} + k_{i1}z^{-2}}{1 + k_{i4}z^{-1} + k_{i5}z^{-2}} \quad (20)$$

Na qual k_o e k_{ij} , com $i = (1, \dots, 4)$ e $j = (1, \dots, 5)$, correspondem à constante de escalamento do filtro e aos coeficientes das quatro seções de segunda ordem do filtro digital recursivo, respectivamente. A constante de escalamento do filtro é definida a seguir:

$$k_o = \frac{V_o(n)}{V_{COM}(n)} \quad (21)$$

Na qual $V_o(n)$ é um valor da tensão secundária e $V_{COM}(n)$ é a tensão secundária compensada em um ponto n .

Para o TPC de 230 kV, foram encontrados os valores dos coeficientes do filtro de segunda ordem, apresentados na Tabela 4, sendo estes funções do tempo de amostragem (T_d) e dos pólos e zeros da planta do compensador.

Tabela 4. Coeficientes dos filtros de segunda ordem para o TPC de 230 kV.

Coeficientes	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4
k_{i1}	1,002485316214533	0,996727940822542	0,999994081490818	0,000036751081151
k_{i2}	-1,999860402933850	-1,979613790698346	-1,867670548784928	-0,000038666114349
k_{i3}	0,997410344888049	0,983887491684935	0,914472287249408	0,000001916335903
k_{i4}	-1,999878028298184	-1,979508509479303	-1,867792922093640	0,006369385010387

4.4 IMPLEMENTAÇÕES NO SIMULADOR RTDSTM (REAL TIME DIGITAL SIMULATOR)

O simulador digital em tempo real RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*), desenvolvido devido ao avanço da tecnologia computacional e de processadores digitais, é uma junção de *hardware* e *software*, com algoritmos e equações idênticas às utilizadas em programas do tipo EMTP, que permite a obtenção de soluções de sistemas elétricos em um intervalo de tempo menor que as constantes de tempo do sistema.

O RTDSTM torna-se uma ferramenta fundamental para testes de equipamentos de monitoramento e controle de um sistema por apresentar uma interface para entrada e saída de dados do sistema elétrico, possibilitando uma comunicação com equipamentos externos. Com este simulador, dispositivos podem ser facilmente testados para diversas condições de operação.

4.4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO COMPENSADOR NO RTDSTM

O RSCAD (*software* do RTDSTM) é dividido em módulos que se destinam a funcionalidades distintas. No módulo *Component Builder (CBuilder)*, por exemplo, é possível criar novos componentes para o *software* de acordo com a conveniência que o usuário do *software* necessitar. No módulo *Draft* é possível construir graficamente sistemas elétricos de potência e de controle, e introduzir os novos componentes criados por usuários no *CBuilder* para interagir com os já existentes. Após a compilação, utilizando o módulo *RunTime*, dar-se início à simulação em tempo real. Os resultados da simulação são visualizados na tela do *RunTime*.

O filtro digital recursivo foi implementado no módulo *CBuilder* do RTDSTM (Figura 14) e em seguida inserido no módulo *Draft*, para compor, juntamente com os demais elementos já fornecidos pelas bibliotecas do *software*, o sistema de potência no qual o TPC e este filtro estarão presentes. Para isso, o filtro foi desenhado utilizando as formas presentes no menu de formas (*Shapes Menu*), alocando neste suas variáveis de entrada e saída. Em seguida, os parâmetros do filtro são definidos dentro de janelas criadas através de seções, nas quais o usuário poderá posteriormente inserir os valores para os parâmetros.

O código em C para o filtro é escrito e o projeto deste compensador é compilado e salvo, podendo então ser acessado na biblioteca do módulo *Draft*, tendo como variável de entrada a tensão secundária do TPC e como variável de saída a tensão secundária compensada.

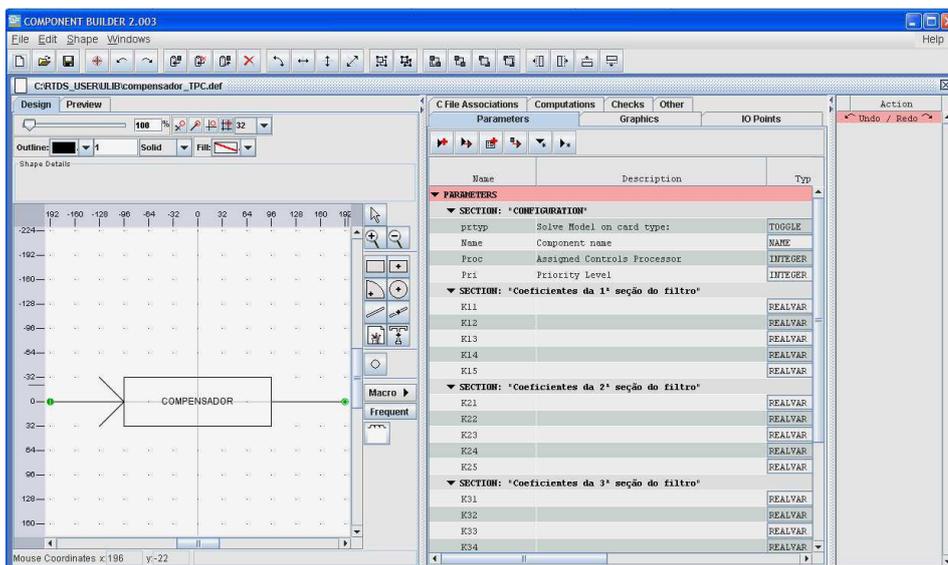


Figura 14. Implementação do compensador no módulo CBuilder do RTDSTM.

4.4.2 SISTEMA DE CONTROLE UTILIZADO NA ESTIMAÇÃO FASORIAL NO RTDSTM

O RSCAD (*software* do RTDSTM) além de possibilitar a construção gráfica de sistemas elétricos de potência, também possibilita a construção gráfica de sistemas elétricos de controle, através de blocos presentes em sua biblioteca padrão ou construídos por usuários.

O sistema de controle utilizado para realizar a estimação fasorial no RTDSTM foi construído a partir de blocos de controle da biblioteca padrão do módulo *Draft* do RSCAD,

conforme mostrado na Figura 15. Os blocos que compõem esse sistema são os seguintes: *Import/Export Component*, *Phase Locked Loop*, *Down Sampler*, *Butterworth Filter* e *Discrete Fourier Transform*.

O bloco *Phase Locked Loop* é um componente utilizado para sincronizar a frequência instantânea do sinal de saída com a frequência instantânea do sinal de entrada, ele retorna um sinal de referência *PHI* em que está definido o ângulo de fase e a frequência fundamental do sinal de entrada *VA*.

O bloco *Import/Export Component* tem a função de importação e exportação dos sinais de tensão representados pelas variáveis *VA*, *VB* e *VC* entre os sistemas de potência e controle e entre os subsistemas de controle. O bloco *Butterworth Filter* implementa o filtro de Butterworth. A configuração atribuída para o caso da Figura 15 foi de um filtro passa-baixa Butterworth, de segunda ordem e com frequência de corte de 180 Hz.

O bloco *Down Sampler* é utilizado para realizar a amostragem do sinal de entrada, pode ser escolhida qualquer taxa de amostragem com valor menor do que $T_a = 20$ kHz, pois o passo de tempo de cálculo do RTDSTM é de 50 μ s. Para o sistema da Figura 15, este bloco realiza a amostragem do sinal a 32 amostras por ciclo, que corresponde a uma taxa de amostragem de 1,920 kHz (base de 60 Hz). O bloco *Discrete Fourier Transform* é a implementação da transformada discreta de Fourier de um ciclo.

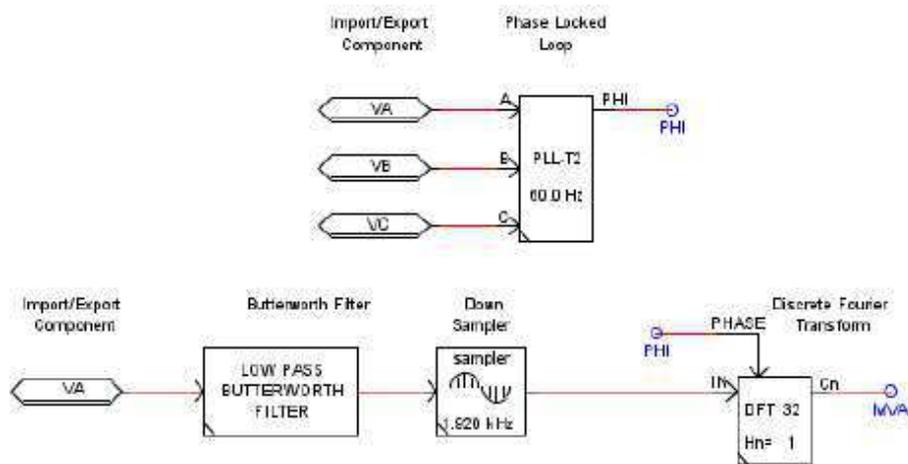


Figura 15. Sistema utilizado para obtenção de fasores de tensão.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 COMPENSAÇÃO DE UM TPC DE 230 kV

Com o objetivo de validar o modelo do compensador obtido foram realizadas simulações de duas faltas fase-terra na fase A de um barramento de um sistema elétrico de potência de 230 kV, sendo uma falta inicializada no zero e outra no pico da tensão primária.

Na Figura 16 é mostrado o sistema elétrico de potência utilizado nas simulações. As faltas foram aplicadas no barramento 2, em que está conectado um TPC de 230 kV. As faltas ocorrem nos instantes $t = 27,1$ ms (falta no zero) e 28,2 ms (falta no pico), e ambas têm a duração de 3 ciclos.

Os dados das linhas de transmissão de 230 kV são mostrados na Tabela 5. Os dados das fontes e equivalentes do sistema da Figura 16 são apresentados na Tabela 6.

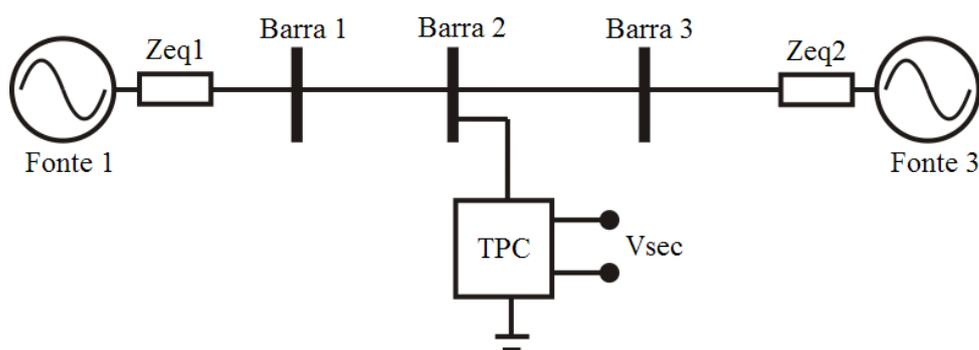


Figura 16. Representação gráfica de um sistema de 230 kV.

Tabela 5. Dados da linha de transmissão de 230 kV.

	R (Ω /km)	X (Ω /km)	ωC ($\mu\Omega^{-1}$ /km)
Sequência positiva	0,0888	0,5249	3,1210
Sequência zero	0,4309	1,5659	2,3301

Tabela 6. Tensões e impedâncias do sistema de 230 kV.

Fonte	Tensão (kV)	R ₀ (Ω)	X ₀ (Ω)	R ₁ (Ω)	X ₁ (Ω)
1	187,8/0°	0,2856	5,5610	2,0205	7,2720
2	187,8/-10°	0,8644	12,2484	12,8150	31,7268

Na Figura 17 são apresentadas as formas de onda da tensão primária (em preto), secundária sem compensação (em azul) e com compensação (em vermelho) para a falta inicializada no zero da tensão primária. Observa-se que a tensão secundária compensada é uma cópia da tensão primária. Nesta figura, é apresentado um detalhe das proximidades do instante de extinção do curto-circuito, para possibilitar a visualização com mais nitidez das formas de onda obtidas nas simulações.

Para o caso da falta inicializada no pico da tensão primária mostrado na Figura 18, observa-se que o compensador da tensão secundária do TPC cumpre sua função de forma bastante satisfatória, ou seja, a forma de onda da tensão secundária compensada (em vermelho) é uma reprodução correta da forma de onda da tensão primária (em preto) em p.u., enquanto que a forma de onda da tensão secundária (em azul) não é condizente com a tensão primária.

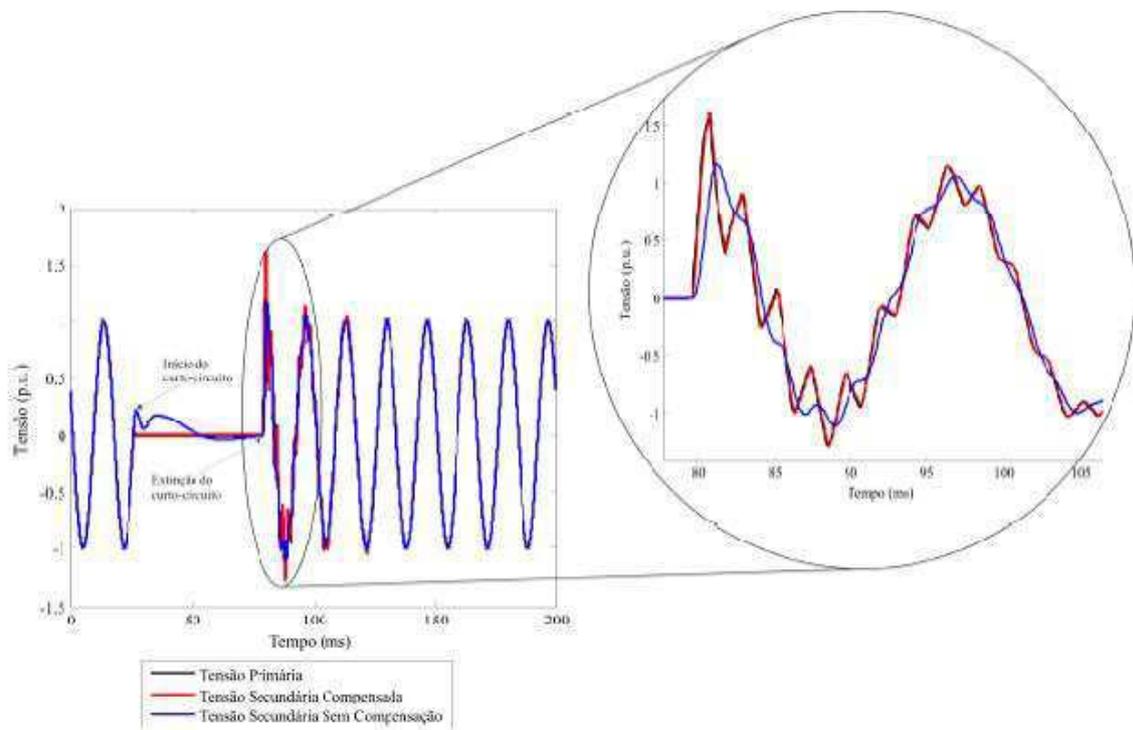


Figura 17. Formas de onda da tensão obtidas para uma falta inicializada no zero da tensão primária.

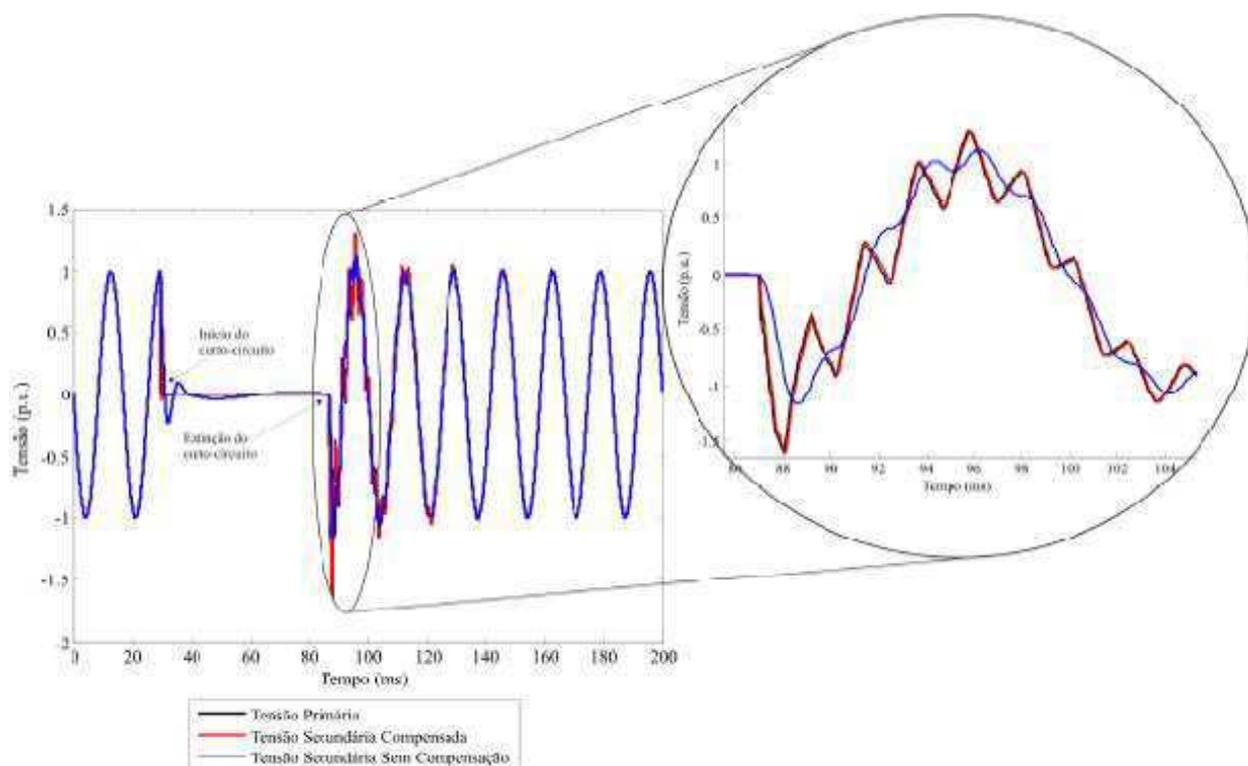


Figura 18. Formas de onda da tensão obtidas para uma falta inicializada no pico da tensão primária.

5.2 AVALIAÇÃO DO COMPENSADOR NA ESTIMAÇÃO FASORIAL DA TENSÃO

O sistema elétrico de potência e o sistema de controle foram reunidos no módulo *Draft* do RSCAD em uma única simulação. Estes sistemas foram interligados com o objetivo de realizar a estimação fasorial da tensão para os casos de falta no zero e no pico mostrado nas Figuras 17 e 18.

Para o caso de falta fase-terra na fase A do sistema da Figura 16, inicializada no zero da tensão primária, foram obtidos os fasores para a tensão secundária sem compensação, para a tensão primária e para a tensão secundária compensada.

Os módulos destes fasores são mostrados na Figura 19, em que o módulo do fasor de referência corresponde ao módulo da tensão primária dividida pela relação de transformação do TPC, de forma que o módulo da tensão primária em regime permanente (antes da falta) seja 115 V rms. Fazendo isso, é possível comparar as formas de onda obtidas para o fasor da tensão de referência (em preto), secundária compensada (em vermelho) e secundária sem compensação (em azul).

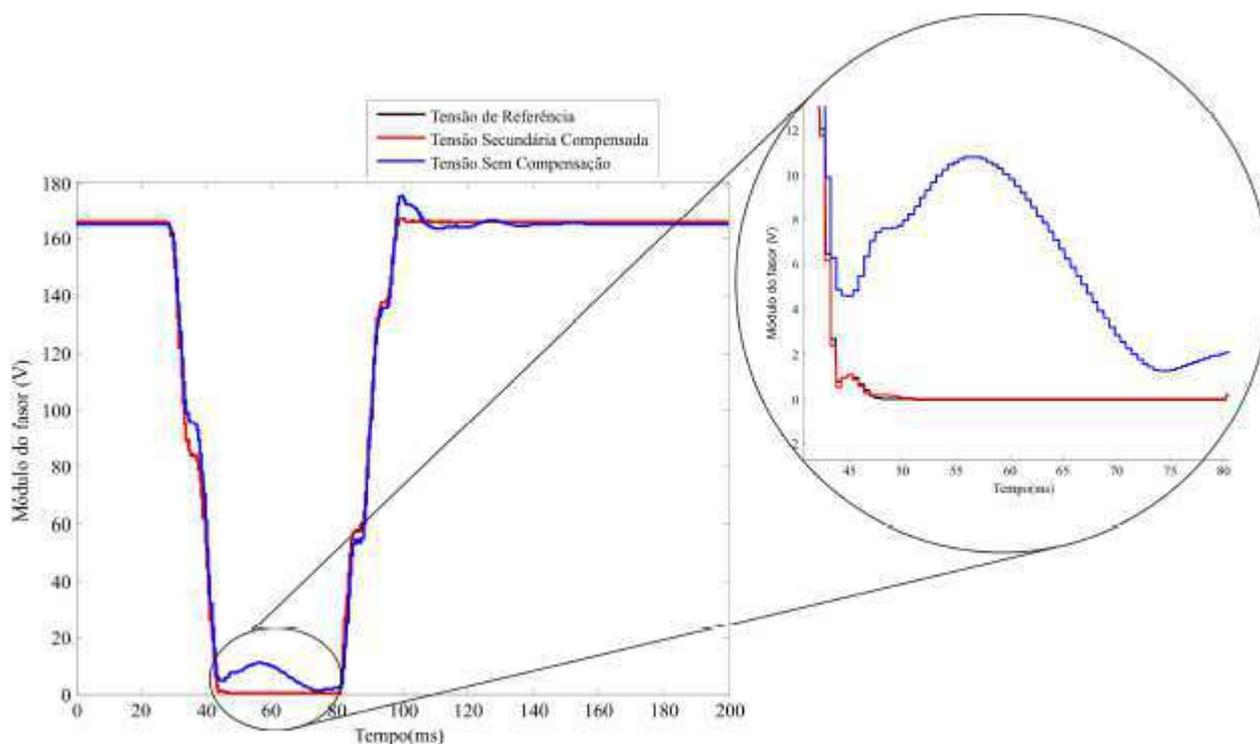


Figura 19. Módulo do fasor tensão para uma falta inicializada no zero da tensão primária.

Na Figura 19 é possível observar que o módulo do fasor da tensão secundária compensada é uma réplica fidedigna do módulo da tensão de referência, enquanto que o módulo da tensão secundária sem correções é distorcido em relação ao módulo do fasor de referência após o curto-circuito ocorrido no instante $t = 27,1$ ms, e só volta a acompanhar a forma de onda da tensão primária após o instante $t = 140$ ms.

Se um relé digital estivesse alimentado pela tensão secundária do TPC durante a falta, no intervalo entre $t = 27,1$ ms e $t = 140$ ms, ele estaria recebendo uma informação errada da tensão do sistema. É justamente dentro deste intervalo de tempo que o relé processa as formas de onda de tensão e corrente, e depois aciona os algoritmos de proteção.

As distorções do módulo do fasor tensão podem levar o relé de distância a operar inadequadamente, podendo até acarretar que ele opere fora da zona real onde a falta ocorreu (KASZTENNY, 2000).

Para o caso de falta fase-terra na fase A do sistema da Figura 16, inicializada no pico da tensão primária, foram obtidos os fasores para a tensão secundária sem compensação, para a tensão de referência (tensão primária dividida pelo fator de transformação) e para a tensão secundária compensada.

Na Figura 20 são mostrados os módulos dos fasores da tensão de referência (em preto), secundária compensada (em vermelho) e secundária sem compensação (em azul), para o caso da falta inicializada no pico da tensão primária. Para este caso, o módulo do fasor da tensão secundária compensada também é uma cópia fidedigna do módulo da tensão de referência, enquanto que o módulo do fasor da tensão secundária sem compensação é distorcido comparado com o módulo do fasor da tensão de referência.

Pode-se observar na Figura 20 que o módulo da tensão secundária sem compensação também apresenta diferenças de amplitude em relação à tensão de referência, chegando até a aproximadamente 8 V. Portanto, para o caso de falta no pico da tensão primária, o módulo do fasor tensão também é fornecido erroneamente quando não se utiliza a compensação, podendo causar problemas na proteção do sistema elétrico.

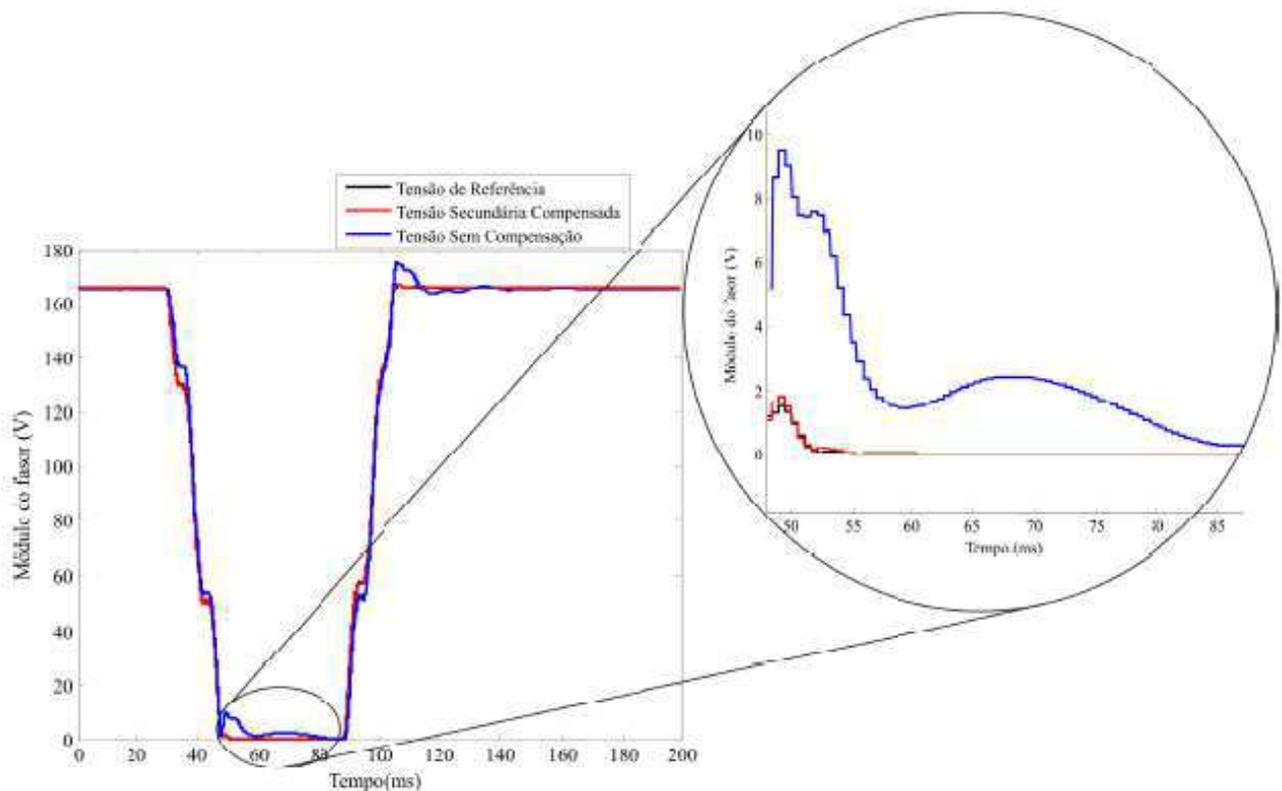


Figura 20. Módulo do fasor tensão para uma falta inicializada no pico da tensão primária.

5.3 AVALIAÇÃO DO COMPENSADOR NA PRESENÇA DE DISTÚRBIOS PROVOCADOS POR HARMÔNICOS

Para observar o comportamento da tensão secundária compensada e sem compensação em meio a distorções harmônicas, provocadas por fontes de harmônicos em

um sistema elétrico de potência fictício, foi montado o circuito da Figura 21 no módulo *Draft* do RSCAD. Este circuito é formado por três fontes de harmônicos e duas linhas de transmissão.

O desempenho do compensador é avaliado por meio de simulações computacionais no RTDSTM. A constante de escalamento do compensador foi calculada durante o processo de sintonia do filtro, e o seu valor foi de $k_0 = 78,264 \cdot 10^3$. A simulação foi realizada apenas com componentes harmônicas ímpares por serem predominantes nos sistemas elétricos reais.

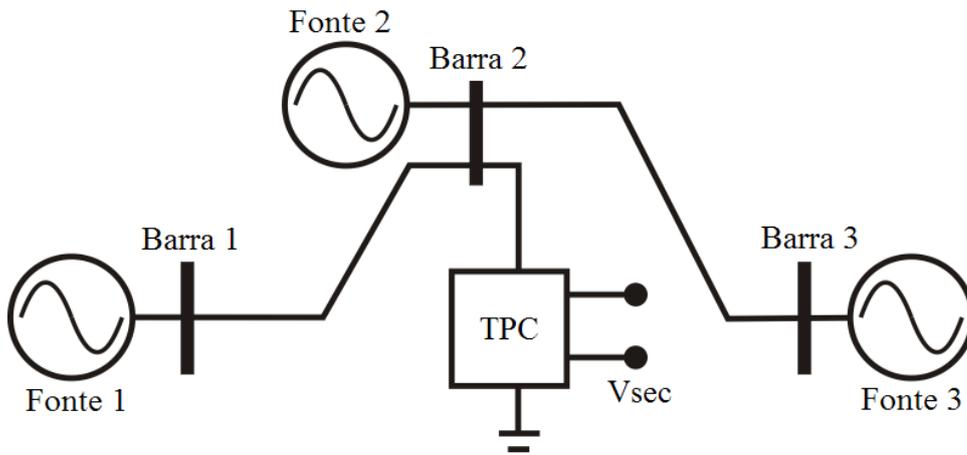


Figura 21. Sistema elétrico utilizado para observar os distúrbios harmônicos.

As equações das fontes representadas na Figura 21 são apresentadas a seguir.

$$V_{A_{Fonte1}} = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{sen}(\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \text{sen}(3\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{5\sqrt{3}} \text{sen}(5\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{7\sqrt{3}} \text{sen}(7\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{9\sqrt{3}} \text{sen}(9\omega t). \quad (22)$$

$$V_{A_{Fonte2}} = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{sen}(\omega t - 5^\circ) + \frac{230\sqrt{2}}{11\sqrt{3}} \text{sen}(11\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{13\sqrt{3}} \text{sen}(13\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{15\sqrt{3}} \text{sen}(15\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{17\sqrt{3}} \text{sen}(17\omega t). \quad (23)$$

$$V_{A_{Fonte3}} = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{sen}(\omega t - 10^\circ) + \frac{230\sqrt{2}}{19\sqrt{3}} \text{sen}(19\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{21\sqrt{3}} \text{sen}(21\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{23\sqrt{3}} \text{sen}(23\omega t) + \frac{230\sqrt{2}}{25\sqrt{3}} \text{sen}(25\omega t) \quad (24)$$

Os dados das linhas de transmissão utilizados são os da linha Recife II – Bongi I, mostrados na Tabela 5. Na Figura 22 são mostradas as curvas da tensão primária do TPC na fase A (em preto), da tensão secundária do TPC sem compensação (em azul) e da tensão secundária compensada (em vermelho).

A tensão secundária sem compensação não representa com fidelidade a forma de onda da tensão primária. Já a forma de onda da tensão secundária com compensação é quase idêntica à forma de onda da tensão primária. Dessa forma, o modelo de compensador

utilizado se apresenta como ferramenta para oferecer a instrumentos de medição uma réplica autêntica da tensão primária, mesmo na presença de distúrbios causados por componentes harmônicas.

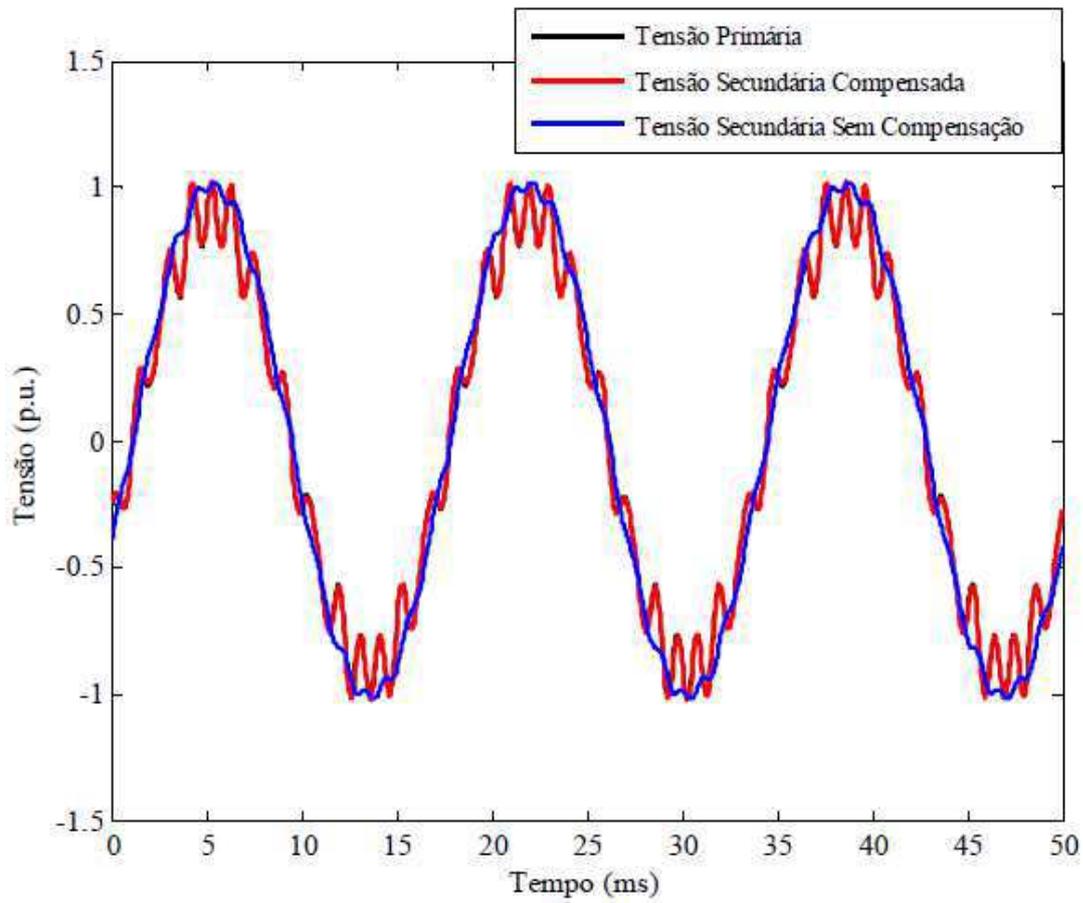


Figura 22. Formas de onda das tensões obtidas para a simulação de distúrbios harmônicos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi apresentado um filtro digital (compensador) para a tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos (TPC), implementado no RTDSTM, cujo modelo depende da relação de tensão do TPC e de um método para obter os seus parâmetros R , L e C .

Foi apresentado um estudo inicial sobre a influência da compensação na estimação fasorial da tensão, usando um algoritmo de estimação fasorial baseado nos filtros de Fourier de um ciclo. Neste caso, observou-se que o módulo do fasor da tensão secundária compensada reproduziu com exatidão o módulo do fasor da tensão de referência. Enquanto que o módulo do fasor da tensão secundária sem compensação forneceu uma informação errônea sobre a tensão primária, justamente no intervalo de tempo onde os algoritmos de proteção são postos em ação.

De uma forma geral, o desempenho do compensador foi testado e apresentou resultados satisfatórios. Os testes foram feitos a partir de simulações de faltas fase-terra e de sinais distorcidos provocados por fontes de harmônicos. A forma de onda da tensão secundária do TPC foi compensada e reproduziu com fidelidade a forma de onda da tensão primária, tanto nos casos de curtos-circuitos, como no caso de inserção de componentes harmônicas no sistema elétrico.

7 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, dezembro 2003.
- IZYKOWSKI, J., KASZTENNY, B., ROSOŁOWSKI, E., SAHA, M. M.; HILLSTROM, B. “Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, p. 116–122, January 1998.
- KASZTENNY, B., SHARPLES, D., ASARO, V., POZZUOLI, M. “Distance Relays and Capacitive Voltage Transformers-Balancing Speed and Transient Overreach”. *Annual Conference for Protective Relay Engineers*. Ontario, Canada: [s.n.], Vol. 53, 2000.
- KEZUNOVIC, M., KOJOVIC, Lj., SKENDZIC, V., FROMEN, C. W., SEVCIK, D. R. and NILSSON, S. L. “Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, pp. 1927-1935, October 1992.
- MACHADO, E. P., FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. “A Recursive Filter to Correct Disturbance in the Secondary Voltage of Coupling Capacitor Voltage Transformers”. *Proceedings of the International Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2009*, 2009.
- MASCHER, L. J. D. *Análise do Desempenho de Algoritmos de Proteção de Distância Frente à Falhas Monofásicas – Abordagem Tendo em Vista uma Proteção Adaptativa*. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, julho 2010.
- SILVA, C. A. *Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, UFCG, março 2010.
- 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.