

Damásio Fernandes Júnior

Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos
para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

Tese 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 Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Dezembro de 2003



F363m Fernandes Júnior, Damásio
2003 Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos
para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos / Damásio
Fernandes Júnior – Campina Grande: UFCEG, 2003.
107 p.
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) UFCEG/CCT.
Inclui bibliografia.
1. Transformadores de potencial capacitivos
2. Transitórios eletromagnéticos 3. Modelos computacionais
I. Título

CDU: 621.314.222

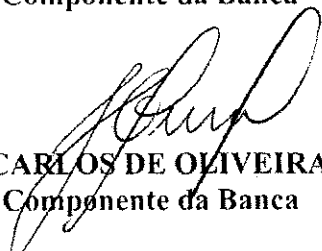
**MODELO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS PARA
ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS**

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR


Tese Aprovada em 16.12.2003


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


PROF. JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP
Componente da Banca


PROF. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, Ph.D., UFU
Componente da Banca


PROF. JOSÉ TAVARES DE OLIVEIRA, Dr., UFRN
Componente da Banca


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

**CAMPINA GRANDE – PB
DEZEMBRO - 2003**

Aos meus pais, Damásio e Zélia, e aos meus irmãos, Darlan e Denize, que souberam me compreender enquanto eu trabalhava à procura de um sonho.

Agradecimentos

A Deus pelo conforto que me proporcionou nos momentos mais difíceis, fazendo-me acreditar no futuro.

Ao CNPq pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

Ao professor Washington Luiz Araújo Neves que, além da amizade e dedicação, orientou este trabalho com bastante lucidez e cautela.

Ao professor Genoilton Almeida, pela valiosa colaboração nas medições em laboratório necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Edson Guedes pelas sugestões relevantes aos experimentos realizados no Laboratório de Alta Tensão.

À professora Núbia Brito pela amizade, apoio e incentivo.

Aos amigos Max Néri e Lourival Simões pela valiosa ajuda nos trabalhos em laboratório e na aquisição de dados.

Ao engenheiro da CHESF, José Carlos Rosa e Silva, pela presteza em ajudar e pelas discussões relevantes ao longo deste trabalho.

Aos amigos Franklin, Luciano, Josivan, Helvio, Alécio, Diana e Estácio pela colaboração e disposição de sempre ajudar.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão, Adalberto, Chico e Eduardo, pelo apoio técnico às montagens dos experimentos.

A Francinete Araújo que me cedeu muito do seu tempo para que eu pudesse me dedicar a este trabalho.

Aos meus pais e parentes que sempre acreditaram na minha dedicação aos trabalhos acadêmicos.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 Justificativa e Relevância da Tese.....	01
1.2 Limitações dos Modelos de TPC.....	03
1.3 Objetivo e Contribuições.....	04
1.4 Organização do Trabalho.....	05
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	07
2.1 O Transformador de Potencial Capacitivo.....	07
2.2 Representação Matricial de Transformadores Monofásicos no EMTP.....	11
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	15
3.1 Estudos no Domínio do Tempo.....	15
3.2 Estudos no Domínio da Frequência.....	20
3.3 Estudos nos Domínios do Tempo e da Frequência.....	26
3.4 Resumo.....	30

Capítulo 4 – Estimação de Parâmetros para o Modelo do TPC	32
4.1 Justificativa do Modelo.....	32
4.2 Estimação dos Parâmetros do Modelo.....	37
4.2.1 Minimização de Funções Não Lineares.....	38
4.2.2 Métodos de Ajuste Implementados.....	39
4.2.3 Considerações sobre os Métodos de Ajuste Implementados.....	41
4.2.4 Algoritmo Implementado.....	42
Capítulo 5 – Medições em Laboratório	44
5.1 Dados do Fabricante para o TPC de 230 kV.....	45
5.2 Medições de Resposta em Frequência.....	46
5.3 Determinação da Característica Não Linear do TP Indutivo.....	51
5.4 Determinação da Curva de Saturação do Reator de Compensação.....	54
5.5 Determinação da Curva de Saturação do Reator do CSF.....	56
5.6 Estimativa da Característica Não Linear do Pára-raios que Compõe o Circuito de Proteção.....	57
5.7 Resumo.....	59
Capítulo 6 – Validação do Modelo Proposto	60
6.1 Caso Teste: Parâmetros de um TPC de 138 kV.....	61
6.2 Parâmetros do TPC de 230 kV a Partir de Medições.....	64
6.3 Modelo Proposto do TPC.....	67
6.4 Manobra de Disjuntor no Lado da Tensão Intermediária do TPC.....	68
6.5 Ensaio de Ferroressonância.....	71
6.6 Simulações de Ferroressonância.....	74
6.7 Simulações de Atuação e Falha do Circuito de Proteção.....	79
6.8 Simulações de Curto-circuito no Primário do TPC.....	82

6.8.1 Instante de Ocorrência de uma Falta no Primário do TPC.....	82
6.8.2 Amplitude e Fator de Potência da Carga Conectada ao Secundário do TPC.....	85
6.9 Corte de Corrente Indutiva Próximo ao TPC.....	87
6.10 Conexão e Desconexão do TPC ao Barramento de 230 kV.....	89
6.11 Resumo.....	92
Capítulo 7 – Conclusões.....	93
Referências Bibliográficas.....	96
Apêndice A – Conversão da Curva $V_{rms} - I_{rms}$ para Valores de Pico da Curva $\lambda - i$.....	103
Apêndice B – Componentes do TPC de 230 kV.....	105
B.1 Coluna Capacitiva.....	105
B.2 Tanque Indutivo.....	106
B.3 Componentes Internos ao Tanque Indutivo.....	106
B.4 Pára-raios de SiC do Circuito de Proteção.....	107
B.5 Caixa de Terminais Secundários.....	107

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz	09
Figura 2.2 – Exemplos de circuitos supressores de ferroressonância passivos	10
Figura 2.3 – Modelos de CSF: (a) L_f como indutor de núcleo de ar. (b) L_f como transformador	11
Figura 2.4 – Exemplos de circuitos de proteção	11
Figura 2.5 – Representação de um transformador monofásico de 2 enrolamentos no EMTP	12
Figura 3.1 – Circuito equivalente do TPC utilizado no trabalho de SWEETANA & FLUGUM [1966]	16
Figura 3.2 – Montagem do TPC usado nos ensaios de SWEETANA [1971]	17
Figura 3.3 – Configuração do modelo de núcleo magnético desenvolvido por LUCAS et al [1992]	18
Figura 3.4 – Circuito equivalente do TPC utilizado no trabalho de LUCAS et al [1992]	19
Figura 3.5 – Circuito equivalente simplificado do TPC proposto por KEZUNOVIC et al [1992]	21

Figura 3.6 – (a) Modelo do circuito supressor de ferroressonância. (b) Circuito equivalente do circuito supressor de ferroressonância apresentado no trabalho de KOJOVIC et al [1994].....	22
Figura 3.7 – Circuito equivalente do TPC proposto no trabalho de VERMEULEN et al [1995].....	23
Figura 3.8 – Circuito equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos utilizado para representar o TP indutivo no trabalho de MARTI et al [1997].....	24
Figura 3.9 – Modelo de CHIMKLAI & MARTI [1995] para representar a impedância de curto-circuito do TP indutivo.....	24
Figura 3.10 – Representação aproximada da impedância de curto-circuito do TP indutivo proposta por MARTI et al [1997].....	25
Figura 3.11 – Diagrama esquemático, incluindo a representação do TPC apresentada no trabalho de IRAVANI et al [1998], para simulação de transitórios eletromagnéticos.....	27
Figura 3.12 – Diagrama utilizado por MORAES & VASCONCELOS [1999] para medir a curva de resposta em frequência do TPC.....	28
Figura 3.13 – Circuito de teste utilizado por MORAES & VASCONCELOS [1999] para medições da resposta transitória do TPC.....	29
Figura 4.1 – Modelo geral do TPC para frequências acima de 1 kilohertz.....	33
Figura 4.2 – Sensibilidade da curva de amplitude da relação de tensão de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes.....	34
Figura 4.3 – Sensibilidade da curva de fase da relação de tensão de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes.....	35

Figura 4.4 – Modelo do TPC adotado para estimação dos seus parâmetros lineares.....	36
Figura 4.5 – Modelo do CSF adotado para estimação de parâmetros	36
Figura 4.6 – Modelo do TPC com blocos de impedância para estimação de seus parâmetros lineares	37
Figura 5.1 – Configuração do TP indutivo do TPC de 230 kV.....	45
Figura 5.2 – Filtro passa-baixa de 3 ^a ordem para eliminação de ruídos de alta frequência nas medições de resposta em frequência do TPC.....	47
Figura 5.3 – Montagem para a medição de resposta em frequência do TPC de 230 kV.....	48
Figura 5.4 – Amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório	50
Figura 5.5 – Fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório	51
Figura 5.6 – Montagem para medição da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do TP indutivo do TPC de 230 kV	52
Figura 5.7 – Característica não linear do TP indutivo do TPC de 230 kV.....	53
Figura 5.8 – Montagem para medição da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator de compensação.....	54
Figura 5.9 – Curva de saturação do reator de compensação do TPC de 230 kV.....	55
Figura 5.10 – Curva de saturação do reator do CSF do TPC de 230 kV.....	57
Figura 5.11 – Montagem para a medição da tensão de disparo do pára-raios do TPC de 230 kV.....	58
Figura 6.1 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC de 138 kV obtidas a partir dos seus parâmetros originais e do método de ajuste implementado.....	62
Figura 6.2 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 138 kV obtidas a partir dos seus parâmetros originais e do método de ajuste implementado.....	63

Figura 6.3 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada pelo método implementado.....	65
Figura 6.4 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada pelo método implementado.....	65
Figura 6.5 – Sensibilidade da curva de amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV com relação às capacitâncias parasitas C_c e C_p	67
Figura 6.6 – Modelo do TPC para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.....	68
Figura 6.7 – Montagem para medição da tensão transitória do TPC devido a operação de fechamento seguida de abertura de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária.....	69
Figura 6.8 – Formas de onda medida e simulada da tensão secundária do TPC quando é realizada a manobra de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária.....	70
Figura 6.9 – Montagem para realização do ensaio de ferroressonância no TPC.....	72
Figura 6.10 – Formas de onda medida e simulada da tensão secundária do TPC quando este é submetido ao ensaio de ferroressonância.....	73
Figura 6.11 – Esquema utilizado para simulação do 1 ^o ensaio de ferroressonância no TPC de 230 kV.....	75
Figura 6.12 – Instabilidade numérica na forma de onda da tensão secundária do TPC.....	75
Figura 6.13 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC considerando os valores da indutância M do CSF iguais a 9,31 mH e 8,84 mH.....	77
Figura 6.14 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC considerando os valores da indutância M do CSF iguais a 9,31 mH e 8,84 mH.....	78

Figura 6.15 – Tensão secundária: modelo do TPC considerando a presença e a ausência do CSF nas simulações de ferroressonância.....	78
Figura 6.16 – Tensão transitória no secundário do TPC considerando a atuação e a falha do circuito de proteção.....	80
Figura 6.17 – Energia armazenada pelos pára-raios de SiC e ZnO quando eles atuam para proteger o TPC contra sobretensões.....	81
Figura 6.18 – Esquema utilizado para simulação de uma falta fase-terra no primário do TPC.....	83
Figura 6.19 – Tensão transitória no secundário do TPC com iniciação da falta no zero e no pico da tensão primária, considerando carga plena de 400 W.....	83
Figura 6.20 – Circuito equivalente simplificado do TPC para análise de curto-circuito no seu terminal primário.....	84
Figura 6.21 – Tensão transitória no secundário do TPC com variação de amplitude da carga: carga plena (400 VA), carga média (200 VA) e sem carga.....	86
Figura 6.22 – Tensão transitória no secundário do TPC com cargas de 400 VA, porém com variações no fator de potência de 1,0 (puramente resistiva), 0,8 (reativa) e 0,0 (puramente indutiva).....	86
Figura 6.23 – Configuração utilizada para simulações de corte de corrente indutiva próximo ao TPC.....	88
Figura 6.24 – Tensão secundária: modelo do TPC considerando a presença e a ausência do CSF nas simulações de corte de corrente indutiva.....	88
Figura 6.25 – Diagrama unifilar da subestação Bongí/CHESF de 230/69 kV para estudo de conexão e desconexão do TPC ao barramento de 230 kV.....	90

Figura 6.26 – Tensão secundária do TPC considerando a atuação do CSF quando ocorre conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongoi/CHESF.....	91
Figura 6.27 – Tensão secundária do TPC considerando a falha do CSF quando ocorre conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongoi/CHESF.....	91
Figura B.1 – Coluna capacitiva do TPC de 230 kV.....	105
Figura B.2 – Vista superior do tanque indutivo do TPC de 230 kV.....	106
Figura B.3 – (1) Núcleo do transformador de potencial indutivo. (2) Enrolamento primário. (3) Reator de compensação. (4), (5) e (6) Reator, capacitor e resistor, respectivamente, do circuito supressor de ferroressonância.....	106
Figura B.4 – Pára-raios de carboneto de silício (SiC) do circuito de proteção do TPC de 230 kV.....	107
Figura B.5 – Caixa de terminais secundários do TPC de 230 kV.....	107

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Quadro sinóptico com a revisão bibliográfica sobre modelos de TPC.....	30
Tabela 5.1 – Medições de resposta em frequência para a amplitude e a fase da relação de tensão do TPC de 230 kV.....	48
Tabela 5.2 – Valores de corrente e tensão rms medidos no TP indutivo do TPC de 230 kV e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].....	53
Tabela 5.3 – Valores de corrente e tensão rms medidos no reator de compensação e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].....	55
Tabela 5.4 – Valores de corrente e tensão rms medidos no reator do CSF e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].....	56
Tabela 5.5 – Característica não linear do pára-raios do TPC de 230 kV.....	59
Tabela 6.1 – Parâmetros originais do TPC de 138 kV reportado na literatura.....	61
Tabela 6.2 – Estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 138 kV.....	61
Tabela 6.3 – Parâmetros do TPC de 138 kV recalculados após o processo de ajuste.....	62

Tabela 6.4 – Erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 138 kV calculados com a estimativa inicial para os parâmetros e com os parâmetros ajustados.....	63
Tabela 6.5 – Estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 230 kV.....	64
Tabela 6.6 – Parâmetros ajustados do TPC de 230 kV.....	64
Tabela 6.7 – Erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 230 kV calculados com a estimativa inicial para os parâmetros e com os parâmetros ajustados.....	66
Tabela 6.8 – Característica não linear estimada para um pára-raios de ZnO de 39 kV....	80
Tabela 6.9 – Parâmetros R , L e C do sistema elétrico da Figura 6.23.....	88
Tabela 6.10 – Valores de seqüência para o equivalente de 230 kV da subestação Bongí/CHESF.....	90

Resumo

Empresas geradoras e transmissoras de energia elétrica vêm convivendo com problemas de sobretensões transitórias em transformadores de potencial capacitivos (TPC), que afetam a confiabilidade do sistema de potência e causam danos irreparáveis a esses equipamentos. Alguns trabalhos já foram realizados com o objetivo de desenvolver modelos de TPC. Entretanto, existem ainda muitos problemas para a obtenção de modelos adequados, especialmente devido à escassez de medições necessárias à validação dos modelos. Diante do estado da arte, a tese que se propõe tem como objetivo desenvolver um modelo de TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos que contemple simultaneamente os parâmetros lineares e os elementos não lineares. As seguintes contribuições são apresentadas: uma metodologia para estimação dos parâmetros lineares a partir de medições de resposta em frequência; um modelo computacional do TPC preciso em simulações no domínio do tempo, validado por medições em laboratório de sobretensões transitórias. O modelo pode ser utilizado em programas do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program), além de permitir a aplicação de tolerâncias para ajuste fino de alguns parâmetros de 60 Hz, durante o processo de estimação paramétrica. Os resultados obtidos podem ser utilizados como indicação para fazer previsões do comportamento do TPC quando submetido a sobretensões transitórias.

Abstract

Electric utilities have reported unexpected overvoltage protective device operations in several coupling capacitor voltage transformers (CCVT) leading to failures of some units. Many works have been carried out to study the performance of the CCVT. However, there are many problems to obtain correct models due to the small number of available data found in literature, which are very important for validation purposes. The current thesis presents a CCVT model for electromagnetic transient studies which comprises linear and nonlinear elements. The following contributions are presented: a methodology to estimate the linear parameters from frequency response data; an accurate CCVT model in time-domain digital simulations, validated from laboratory measurements of transient overvoltages. The proposed model may easily be used in connection with the EMTP (Electromagnetic Transients Program). In the fitting process, constraints are needed for a fine adjustment of some previously expected 60 Hz parameters. The results may be used to predict the CCVT performance when it is submitted to transient overvoltages.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa e Relevância da Tese

A simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência é essencial para estudos de coordenação de isolamentos e para o projecto de equipamentos elétricos e sua proteção.

Nos últimos anos, a maior parte desses estudos foi desenvolvida com a utilização de programas computacionais do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program), os quais apresentam modelos matemáticos para os vários componentes do sistema elétrico de potência, tais como elementos R , L e C concentrados, transformadores, linhas de transmissão, elementos não lineares, chaves, fontes de tensão e corrente, máquinas síncronas, etc. [DOMMEL, 1996].

O sistema de proteção, parte integrante de um sistema elétrico de potência, consiste de transformadores para instrumentos (transformadores de corrente, transformadores de potencial e transformadores de potencial capacitivos), relés e

disjuntores. Os sinais de saída dos transformadores para instrumentos alimentam os relés de proteção, que por sua vez, enviam sinais de comando para os disjuntores.

A representação adequada de transformadores para instrumentos é importante para se determinar de forma satisfatória a operação dos sistemas de proteção durante fenômenos transitórios. A necessidade de atuações operacionais mais corretas e mais rápidas dos relés de proteção em sistemas de potência exige uma precisão cada vez maior dos transformadores para instrumentos.

Dentre os tipos de transformadores para instrumentos, o transformador de potencial capacitivo (TPC) merece atenção especial por apresentar maior complexidade em seu circuito equivalente, devido a presença de capacitores de alta tensão, elementos não lineares, dispositivos de proteção e capacitâncias parasitas dos enrolamentos do seu transformador de potencial (TP) indutivo.

Dentre os principais problemas comumente encontrados em TPC, que comprometem a segurança do sistema de proteção, destaca-se o da ferroressonância [IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998; GRAOVAC et al, 2003]. A ferroressonância é uma oscilação não linear que pode ocorrer em circuitos elétricos contendo pelo menos um capacitor linear e um indutor de núcleo ferromagnético excitados por uma fonte de tensão senoidal. As sobretensões causadas por esse fenômeno apresentam formas de onda muito distorcidas e podem ter conseqüências bastante desastrosas, como por exemplo, danificação de equipamentos e problemas de falhas térmicas e dielétricas na estrutura interna dos dispositivos de proteção.

O surgimento de uma falta monofásica no primário do TPC é outro problema para o sistema de proteção, porque gera formas de onda transitórias nos terminais secundários do TPC, devido ao armazenamento de energia nos elementos indutivos e

capacitivos. As tensões transitórias oriundas do TPC podem afetar a velocidade de atuação dos relés, criando sérios riscos para a segurança do sistema de proteção.

Recentemente, a CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) reportou ocorrências com alguns TPC nos seus sistemas de 230 e 500 kV. Foi observado que, durante operações rotineiras de chaves seccionadoras, apareceram oscilações com níveis de tensão suficientes para provocar a atuação de proteções contra sobretensões [MORAES & VASCONCELOS, 1999; ALVES et al, 2001]. VALLE et al [1997] observaram o estabelecimento de sobretensões sustentadas de baixa frequência, típicas de ferroressonância, nos circuitos secundários de TPC, quando realizada a desenergização de reatores em subestações de 230 kV da ELETROSUL (Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil S.A.). Estes problemas, que na verdade são comuns a várias empresas nacionais e internacionais que trabalham com geração e transmissão de energia elétrica, provocaram grandes transtornos pela gravidade das conseqüências geradas, tais como saídas intempestivas de unidades geradoras e de linhas de transmissão, queima de equipamentos auxiliares de baixa tensão, além de danos irreparáveis em alguns TPC.

Ocorrências como estas no novo ambiente do setor elétrico podem levar a multas bastante onerosas. Portanto, faz-se necessário um modelo adequado de TPC a fim de se prever o seu desempenho frente a sobretensões transitórias.

1.2 Limitações dos Modelos de TPC

Vários modelos de TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos são encontrados na literatura. Entretanto, eles não são completamente adequados. Os estudos realizados até agora mostram a complexidade decorrente da dificuldade de obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em frequências elevadas, o que torna necessária a

realização de medições em laboratório de resposta em frequência e de sobretensões transitórias para a validação dos resultados.

Na fase de identificação de parâmetros, verificou-se que a presença de indutâncias negativas no modelo computacional do circuito supressor de ferroressonância composto por elementos R , L e C podem causar problemas de instabilidade numérica na forma de onda da tensão secundária do TPC [FERNANDES Jr. & NEVES, 2002; FERNANDES Jr. et al, 2003a; FERNANDES Jr. et al, 2003b].

Para tornar mais realistas as simulações de transitórios eletromagnéticos, os modelos de TPC precisam incluir representações adequadas dos seus elementos limitadores de tensão e de todos os seus elementos que contêm núcleo ferromagnético [IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998; TZIOUVARAS et al, 2000]. As simulações digitais são especialmente importantes para serem comparadas com as medições em laboratório, sobre as quais a literatura é escassa.

1.3 Objetivo e Contribuições

A tese que se propõe tem como objetivo desenvolver um modelo adequado de transformadores de potencial capacitivos para estudos de transitórios eletromagnéticos que contemple a estimação de seus parâmetros R , L e C lineares e que seja validado por medições de resposta em frequência e de sobretensões transitórias. O modelo leva em conta a presença de modelos realistas de elementos não lineares.

As contribuições desta tese para o estado da arte são:

- Implementação de um programa computacional para o cálculo dos parâmetros R , L e C lineares do TPC a partir de medições de resposta em frequência de amplitude e fase da relação de tensão do TPC, levando em conta a presença das capacitâncias parasitas do TPC.

- Desenvolvimento de um modelo computacional de TPC preciso em simulações no domínio do tempo, validado por medições em laboratório de sobretensões transitórias, como ensaio de ferroressonância e chaveamento no lado de tensão intermediária do TPC.

O modelo desenvolvido pode ser facilmente usado em programas do tipo EMTP, como o MICROTRAN[®] [MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION, 1999] ou o ATP [LEUVEN EMTP CENTER, 1987], além de permitir a aplicação de tolerâncias para ajuste fino de alguns parâmetros de 60 Hz, durante o processo de estimação paramétrica, tornando os resultados mais realistas.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- Conceitos fundamentais sobre transformadores de potencial capacitivos, bem como o embasamento teórico sobre modelos de transformadores monofásicos encontrados no EMTP são apresentados no capítulo 2.
- No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica, delineando-se o estado da arte concernente ao tema e observando oportunidades de melhorias para a representação de transformadores de potencial capacitivos.
- A formulação matemática do modelo computacional proposto, bem como a técnica de minimização de funções não lineares utilizada para a estimação dos parâmetros do TPC são apresentadas no capítulo 4.
- Os principais ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG com um TPC de 230 kV emprestado pela CHESF são apresentados no capítulo 5. Trata-se de medições de resposta em frequência, medições das curvas de saturação dos elementos

que contém núcleo ferromagnético e determinação da característica não linear do para-raios que compõe o circuito de proteção.

- A validação do modelo proposto do TPC nos domínios do tempo e da frequência, bem como exemplos típicos de simulações digitais de transitórios eletromagnéticos envolvendo o modelo do TPC são o foco do capítulo 6.
- No capítulo 7 são feitas as conclusões e são sugeridas propostas para trabalhos futuros.
- Após a seqüência dos capítulos encontram-se as referências bibliográficas.
- Os procedimentos de conversão dos valores rms da curva de tensão e corrente $V_{rms} - I_{rms}$ para valores de pico da curva de fluxo e corrente $\lambda - i$ são encontrados no Apêndice A.
- Ilustrações dos principais componentes do TPC de 230 kV são apresentadas no Apêndice B.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo destina-se a apresentação de conceitos fundamentais sobre as características dos transformadores de potencial capacitivos, bem como uma introdução teórica sobre modelos de transformadores monofásicos encontrados no EMTP e utilizados na modelagem do transformador de potencial indutivo do TPC.

2.1 O Transformador de Potencial Capacitivo

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

Embora a inclusão do transformador tenha permitido a elevação da tensão intermediária do divisor, existia restrição do equipamento para medição em virtude de o

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

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

Os TPC são usados em sistemas de potência com bastante sucesso, como uma forma conveniente e econômica de transformar tensões de transmissão em tensões suportáveis pelos instrumentos de medição e proteção. A Figura 2.1 mostra o esquema elétrico básico de um TPC típico a 60 Hz, no qual se vê que o primário é constituído por dois conjuntos C_1 e C_2 de elementos capacitivos ligados em série, havendo uma derivação intermediária B , correspondente a uma tensão V que alimenta o enrolamento primário de um TP indutivo, o qual fornecerá uma tensão secundária V_o aos instrumentos de medição e proteção ali inseridos.

Além de isolar o enrolamento secundário do enrolamento primário, os TPC devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão. Para isto, um reator de compensação L_c é projetado pelo fabricante para evitar diferenças de fase entre as tensões V_i e V_o na frequência do sistema. Entretanto, pequenos erros podem ainda existir devido à corrente de magnetização e à carga Z_b do TPC [SWEETANA, 1971; LUCAS et al, 1992].

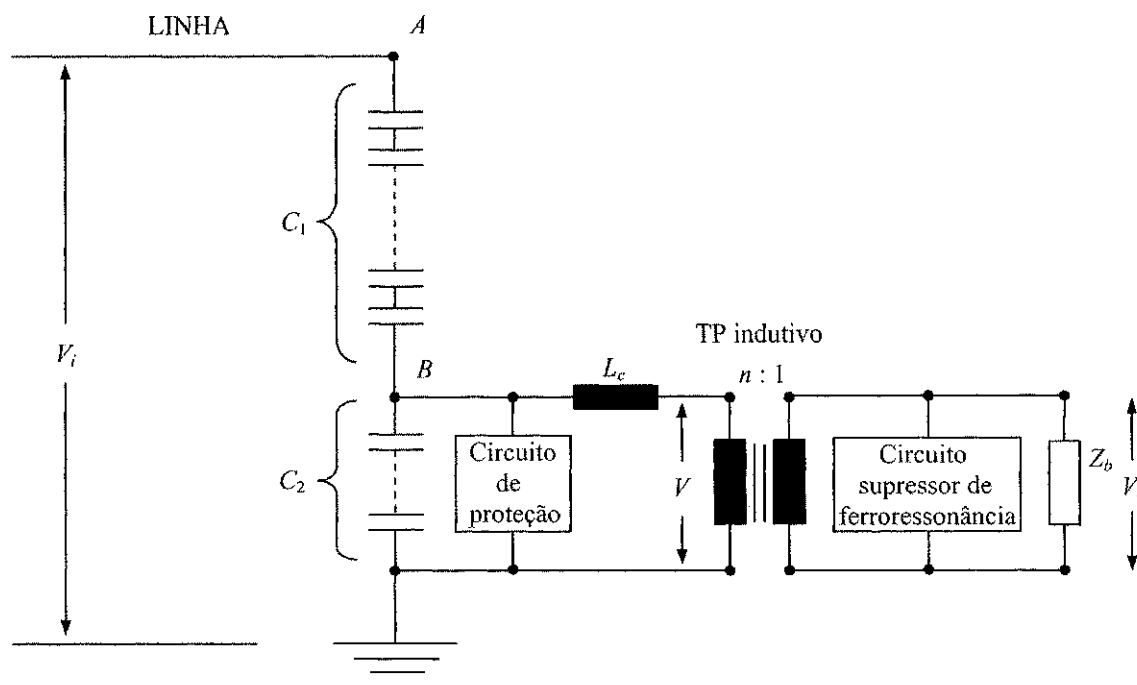


Figura 2.1 – Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz.

Oscilações originadas pelo fenômeno da ferroressonância podem aparecer na forma de onda da tensão secundária do TPC devido à possibilidade de as capacitâncias do circuito entrarem em ressonância com algum valor particular de indutância não linear dos elementos que contêm núcleo ferromagnético. Esse fenômeno transitório não pode ser tolerado em um TPC, uma vez que informações falsas poderiam ser transferidas aos instrumentos de medição e proteção, assim como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas. Para amenizar esse tipo de problema, normalmente é colocado um circuito supressor de ferroressonância (CSF) em um dos enrolamentos do transformador de potencial indutivo.

Os circuitos supressores de ferroressonância podem ser ativos ou passivos. Eles são ativos quando apresentarem dispositivos semicondutores e passivos quando compostos por resistores, indutores e/ou capacitores. A Figura 2.2 mostra dois exemplos de circuitos passivos mais comumente usados em TPC [VASCONCELOS, 2001].

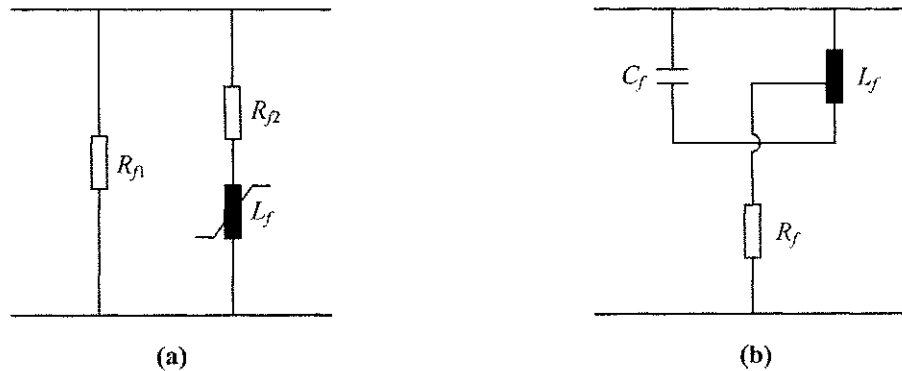


Figura 2.2 – Exemplos de circuitos supressores de ferroressonância passivos.

No circuito da Figura 2.2(a), L_f é um reator saturável projetado para que sua saturação ocorra antes da saturação do TP indutivo, inserindo assim um resistor R_{f2} ($R_{f2} < R_{f1}$) que deverá amortecer as oscilações subharmônicas em causa.

O circuito sintonizado na frequência fundamental do sistema com um alto fator Q (L_f em paralelo com C_f) e em série com um resistor R_f de amortecimento, como mostrado na Figura 2.2(b), normalmente é o dispositivo mais utilizado como circuito supressor de ferroressonância [KOJOVIC et al, 1992; KOJOVIC et al, 1994; TZIOUVARAS et al, 2000], pois consome pouca energia durante condições normais de operação e amortece as oscilações provocadas pelos fenômenos transitórios.

Esse circuito pode ser modelado usando duas representações diferentes para L_f : representação de L_f como indutor de núcleo de ar, mostrado na Figura 2.3(a) e como um transformador não saturável, conforme mostra a Figura 2.3(b). Resultados de simulação [KOJOVIC et al, 1992; TZIOUVARAS et al, 2000] mostram que o modelo da Figura 2.3(b) reproduz resultados mais precisos com relação à resposta em frequência medida nos terminais de um CSF semelhante ao da Figura 2.2(b). Por esse motivo, o modelo mostrado na Figura 2.3(b) foi adotado nesta tese para representar o CSF do TPC de 230 kV, embora não seja descartada a possibilidade de ser utilizado o modelo mostrado na Figura 2.3(a) em investigações futuras.

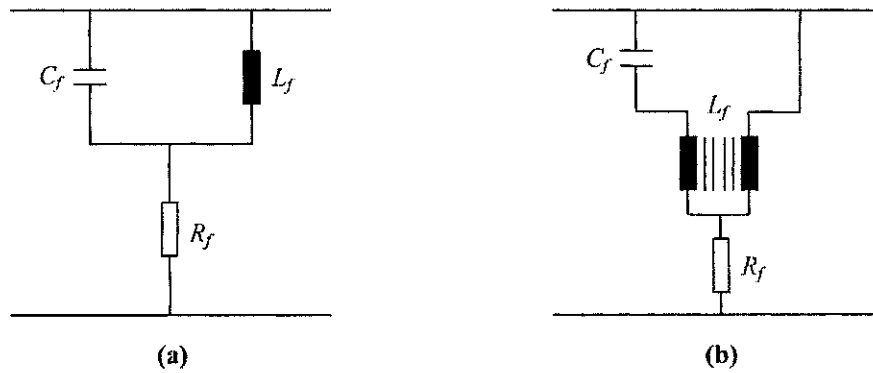


Figura 2.3 – Modelos de CSF: (a) L_f como indutor de núcleo de ar. (b) L_f como transformador.

A configuração de um TPC inclui ainda um circuito destinado a proteção da parte indutiva do equipamento contra sobretensões. Normalmente, este circuito é conectado em paralelo com o capacitor C_2 da coluna capacitiva, ou com o reator de compensação, ou ainda com o circuito supressor de ferroressonância [IRAVANI et al, 1998; TZIOUVARAS et al, 2000]. Este circuito de proteção pode ser constituído por um centelhador, conforme mostra a Figura 2.4(a), por um centelhador em série com um resistor não linear, como mostrado na Figura 2.4(b), ou por um pára-raios de óxido de zinco (ZnO), conforme mostra a Figura 2.4(c).

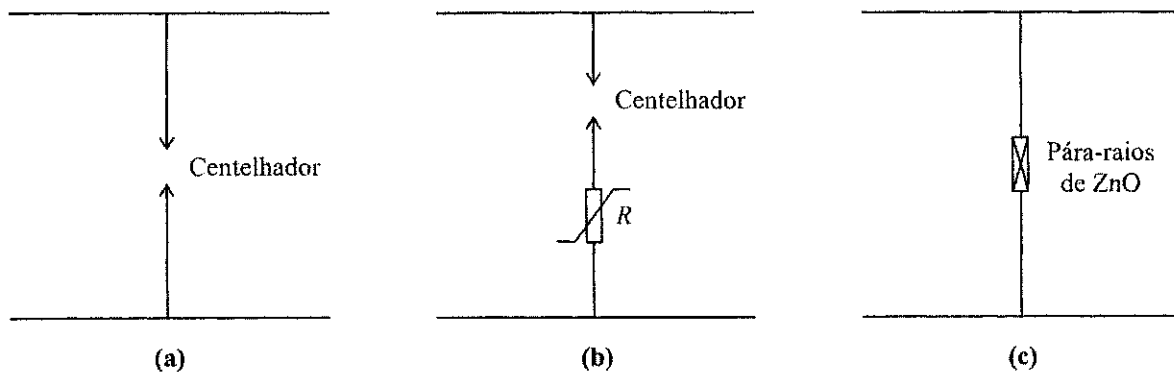


Figura 2.4 – Exemplos de circuitos de proteção.

2.2 Representação Matricial de Transformadores Monofásicos no EMTP

O embasamento teórico sobre modelos de transformadores monofásicos serve como referência para representar o transformador indutivo do TPC no EMTP. Este estudo contempla os modelos simplificados de transformadores monofásicos com 2

enrolamentos e múltiplos enrolamentos encontrados no EMTP, incluindo a possibilidade de se levar em conta os efeitos de saturação.

A representação de um transformador monofásico de 2 enrolamentos no EMTP, com suas grandezas em valores por unidade, é mostrada na Figura 2.5.

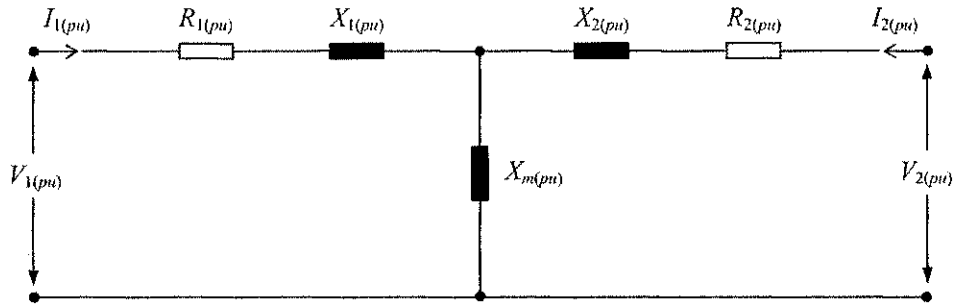


Figura 2.5 – Representação de um transformador monofásico de 2 enrolamentos no EMTP.

O comportamento linear do transformador monofásico de 2 enrolamentos pode ser representado através de suas matrizes resistência $[R]_{(pu)}$ e indutância inversa $[L]_{(pu)}^{-1}$. Ignorando a impedância de magnetização $X_{m(pu)}$ na Figura 2.5, estas duas matrizes podem ser escritas conforme as Equações (2.1) e (2.2) abaixo:

$$[R]_{(pu)} = \begin{bmatrix} R_{1(pu)} & 0 \\ 0 & R_{2(pu)} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$[L]_{(pu)}^{-1} = \omega \begin{bmatrix} \frac{1}{X_{(pu)}} & -\frac{1}{X_{(pu)}} \\ -\frac{1}{X_{(pu)}} & \frac{1}{X_{(pu)}} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

sendo $X_{(pu)} = X_{1(pu)} + X_{2(pu)}$ e ω a frequência angular. Os valores em p.u. dos elementos matriciais das Equações (2.1) e (2.2) são obtidos a partir dos ensaios padrões de curto-circuito realizados no transformador [DOMMEL, 1996].

De forma análoga, os transformadores monofásicos com enrolamentos múltiplos podem ser representados no EMTP através das seguintes equações matriciais em regime permanente:

$$[R]_{(pu)} = \begin{bmatrix} R_{1(pu)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{2(pu)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & R_{n(pu)} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[L]_{(pu)}^{-1} = j\omega \begin{bmatrix} Y_{11(pu)} & Y_{12(pu)} & \cdots & Y_{1n(pu)} \\ Y_{21(pu)} & Y_{22(pu)} & \cdots & Y_{2n(pu)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1(pu)} & Y_{n2(pu)} & \cdots & Y_{nn(pu)} \end{bmatrix}_{sem R} \quad (2.4)$$

As resistências dos enrolamentos formam a matriz diagonal $[R]_{(pu)}$, e a matriz indutância inversa $[L]_{(pu)}^{-1}$ é calculada a partir da matriz admitância $[Y]$ sem levar em consideração os elementos resistivos [DOMMEL, 1996]. Semelhante ao caso monofásico com dois enrolamentos, os elementos matriciais das Equações (2.3) e (2.4) são obtidos a partir dos ensaios de curto-circuito realizados no transformador.

As matrizes $[R]$ e $[L]^{-1}$ representam o comportamento linear do transformador com boa precisão. Essa representação é bastante utilizada devido às matrizes $[R]$ e $[L]^{-1}$ não serem singulares. Entretanto, para a análise de fenômenos transitórios como correntes de inrush e ferroressonância é necessário levar em conta os efeitos de saturação no modelo do transformador, que normalmente é feito adicionando-se um ramo de indutância não linear.

Idealmente, a indutância não linear deve ser conectada em um ponto do circuito equivalente em que praticamente todo o fluxo magnético esteja confinado ao ferro. A identificação deste ponto requer o conhecimento de detalhes de construção do transformador, o que não é normalmente acessível aos engenheiros eletricitistas. Para bobinas construídas de forma cilíndrica, pode-se assumir que o enrolamento mais próximo do núcleo é aquele que apresenta menor nível de isolamento. No caso dos TPC, o

enrolamento com menor nível de isolamento é o secundário, que corresponde, portanto, ao enrolamento mais adequado para conectar a indutância não linear.

Os dados do modelo da indutância não linear necessários aos programas do tipo EMTP podem ser obtidos a partir da conversão dos valores de tensão e corrente rms $V_{rms} - I_{rms}$ da curva de saturação do transformador em valores de pico de fluxo e corrente $\lambda - i$. No EMTP, essa conversão pode ser feita utilizando rotinas como SATURATE do MICROTRAN[®] [MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION, 1999], ou a rotina SATURATION do ATP [LEUVEN EMTP CENTER, 1987]. Entretanto, nesta tese, foi adotada a conversão desenvolvida no trabalho de NEVES & DOMMEL [1993] pela vantagem de a curva $\lambda - i$ ser computada utilizando-se as expressões analíticas do fluxo e da corrente, não apresentando portanto erros de aproximação, como acontecem nos programas do tipo EMTP. Os procedimentos da conversão são discutidos mais detalhadamente no Apêndice A.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

O comportamento em regime permanente dos transformadores de potencial capacitivos é bastante conhecido e reportado na literatura. Entretanto, o comportamento desses equipamentos quando submetidos a surtos de tensão necessita de maiores investigações. Por isso, alguns trabalhos, incluindo ensaios em laboratório, testes em campo e simulações digitais, vêm sendo conduzidos com o objetivo de desenvolver modelos de TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica sobre estudos e modelos de TPC nos domínios do tempo e da frequência, delineando-se o estado da arte.

3.1 Estudos no Domínio do Tempo

SWEETANA & FLUGUM [1966] apresentaram um circuito equivalente do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos. O circuito também foi utilizado no desenvolvimento das fórmulas de erro de relação e ângulo de fase para avaliar a precisão do TPC com e sem carga. O circuito equivalente é mostrado na Figura 3.1.

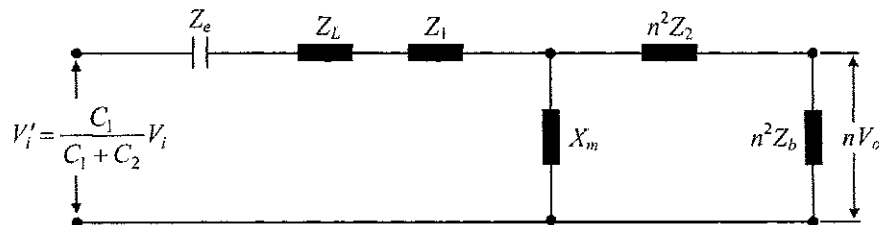


Figura 3.1 – Circuito equivalente do TPC utilizado no trabalho de SWEETANA & FLUGUM [1966].

Nesta figura, $Z_e = 1/\omega(C_1 + C_2)$ é a impedância equivalente da coluna capacitiva do TPC, Z_L é a impedância do reator de compensação, Z_1 e Z_2 são a impedância de curto-circuito do primário e do secundário, respectivamente, X_m é a reatância de magnetização do TP indutivo e Z_b é a impedância da carga.

A partir das fórmulas de erro desenvolvidas, são sugeridos alguns critérios que devem ser observados no projeto do TPC para garantir maior precisão:

- O reator de compensação juntamente com as reatâncias de curto-circuito do primário e do secundário devem estar em perfeita sintonia com a impedância equivalente da coluna capacitiva do TPC.
- A resistência total do TPC deve ser minimizada a fim de aumentar o fator de qualidade.
- O número de espiras deve ser aumentado, elevando a tensão intermediária, a fim de reduzir os erros de relação e ângulo de fase.

Com relação à resposta transitória, foi destacada a necessidade de projetar cuidadosamente o circuito supressor de ferroressonância para que ele atue efetivamente no amortecimento das oscilações transitórias e ao mesmo tempo garanta a precisão do equipamento em condições normais de operação. Entretanto, o referido trabalho de SWEETANA & FLUGUM [1966] não leva em conta os efeitos de saturação do núcleo do TP indutivo e a presença de capacitâncias parasitas dos enrolamentos.

SWEETANA [1971] mostrou em seu trabalho que, os ensaios realizados com a montagem do TPC que utiliza a tensão de derivação da linha como tensão primária,

concordam muito bem com os ensaios realizados no TPC utilizando a tensão nominal da linha. Para os casos de inicialização da falta no pico e no zero da forma de onda da tensão primária, os resultados foram bastante semelhantes. A montagem do TPC para a realização dos ensaios é mostrada na Figura 3.2.

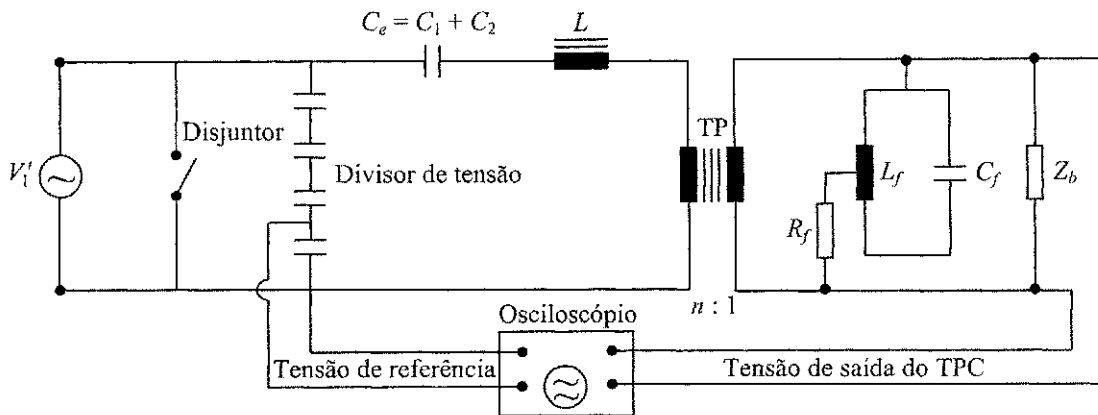


Figura 3.2 – Montagem do TPC usado nos ensaios de SWEETANA [1971].

Em virtude de os resultados das medições de curto-circuito no primário do TPC terem sido muito semelhantes com a tensão de derivação e com a tensão de linha, SWEETANA [1971] implementou um programa computacional que se baseia no circuito equivalente do TPC mostrado na Figura 3.2 para fazer previsões da resposta transitória do TPC. A análise das simulações de transitórios revelou a existência de oito fatores que afetam a resposta transitória do TPC. Os oito fatores são: instante na forma de onda da tensão primária no momento de ocorrência da falta; valor da capacitância equivalente C_e da coluna capacitiva; relação de espiras do TP indutivo; tipos de filtros supressores de ferroressonância; fator de potência da carga; composição e conexão da carga; resistência série do TPC e, finalmente, o valor da corrente de excitação do TP indutivo.

Alguns desses fatores serão discutidos mais detalhadamente no capítulo 6, utilizando o modelo de TPC apresentado neste trabalho de tese.

O Grupo de Trabalho do IEEE Committee Report [IEEE COMMITTEE REPORT, 1981] apresentou os resultados de um trabalho realizado com o objetivo de

padronizar os limites de erro permitidos na saída dos transformadores de potencial capacitivos, durante oscilações transitórias ocorridas no primário desses equipamentos.

Vários métodos de ensaios e especificações de circuitos de teste foram propostos numa tentativa de padronizar as medições de resposta transitória nos TPC. Entretanto, após analisar todas as propostas, o Grupo de Trabalho concluiu que nenhuma norma poderia ser escrita até aquele momento.

Enquanto os trabalhos de SWEETANA & FLUGUM [1966] e SWEETANA [1971] se concentraram na análise da resposta transitória do TPC sem levar em conta os efeitos de saturação, LUCAS et al [1992] propõem modelos de transformadores para instrumentos que incluem o comportamento não linear do núcleo magnético desses equipamentos, com o objetivo de determinar a operação adequada dos relés em estudos de transitórios eletromagnéticos.

O modelo do núcleo magnético tem como configuração básica uma fonte de corrente correspondente a soma das correntes na combinação paralela de indutâncias e resistências não lineares, como mostra a Figura 3.3.

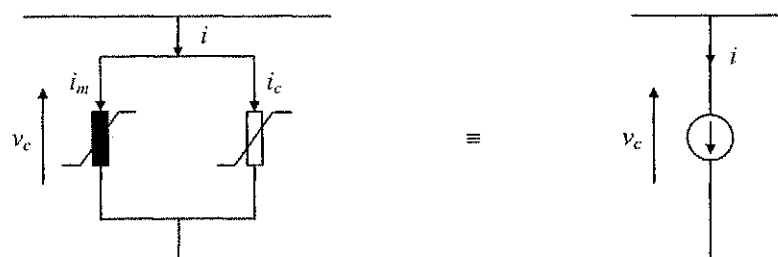


Figura 3.3 – Configuração do modelo de núcleo magnético desenvolvido por LUCAS et al [1992].

Na Figura 3.3, i é a corrente de excitação, i_m é a corrente de magnetização e i_c é a corrente de perdas no núcleo. Para o caso do TPC, o circuito equivalente após o reator de compensação utilizado na simulação de transitórios é mostrado na Figura 3.4, com todas as grandezas referidas ao primário. A carga utilizada é uma carga padrão ANSI

que consiste de uma resistência pura R_b em paralelo com uma impedância $R_s + jX_s$ e fator de potência 0,5 em atraso.

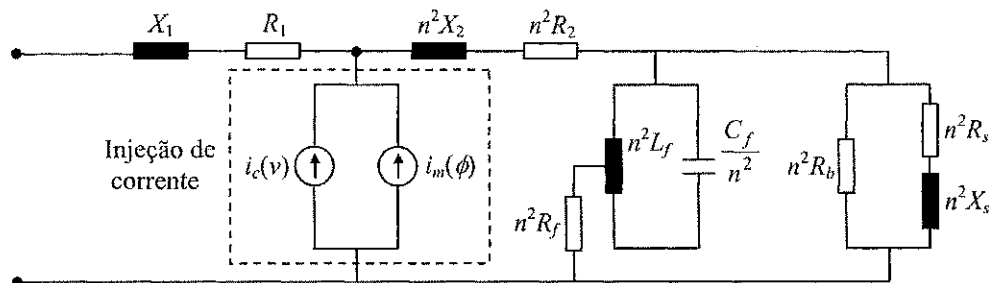


Figura 3.4 – Circuito equivalente do TPC utilizado no trabalho de LUCAS et al [1992].

LUCAS et al [1992] simularam oscilações subharmônicas devido a condições de curto-circuito e ferroressonância, incluindo sua supressão. Entretanto, o estudo não atribui igual importância aos demais componentes do conjunto completo do TPC quando comparado com o núcleo magnético do TP indutivo. Essa característica consiste numa limitação do trabalho de LUCAS et al [1992], uma vez que o fabricante do TPC tem a preocupação de projetar cada um dos seus componentes cuidadosamente a fim de não comprometer a análise da resposta transitória do equipamento.

GRAOVAC et al [2003] apresentaram um procedimento para eliminação de oscilações oriundas do fenômeno da ferroressonância em um TPC, em um curto período de tempo. Para isso, fizeram análise de sensibilidade utilizando um programa do tipo EMTP, e mostraram que os parâmetros do circuito de proteção (varistor de óxido metálico ou centelhador em série com um resistor) podem ser usados em conjunto com o circuito supressor de ferroressonância para aumentar o efeito de amortecimento das oscilações devido a ferroressonância.

Embora os resultados sejam expressivos, não é endereçada a forma como os parâmetros do TPC são obtidos, ou seja, não é apresentado um estudo de identificação paramétrica, o que se constitui numa limitação do trabalho de GRAOVAC et al [2003].

3.2 Estudos no Domínio da Freqüência

Nesta linha de pesquisa, os trabalhos vêm sendo conduzidos no sentido de modelar os transformadores de potencial capacitivos numa faixa de freqüência maior, baseando-se em medições de resposta em freqüência na região linear de operação. Com relação à identificação de parâmetros, alguns trabalhos indicam a necessidade de desmontar o TPC para efetuar as medições necessárias [KEZUNOVIC et al, 1992; VERMEULEN et al, 1995], enquanto outros apresentam métodos alternativos em que isto não é necessário [FERNANDES Jr., 1999; KOJOVIC et al, 1994; VASCONCELOS et al, 2003]. Entretanto, ainda existem muitos problemas na obtenção dos parâmetros do modelo do TPC e até mesmo nas medições em laboratório, necessárias para a validação dos resultados.

KEZUNOVIC et al [1992] desenvolveram um modelo de TPC a partir de técnicas experimentais para as medições dos parâmetros do TPC em laboratório e realizaram estudos de sensibilidade para identificar a influência dos vários parâmetros na curva de resposta em freqüência do equipamento.

O circuito equivalente proposto por KEZUNOVIC et al [1992], após a simplificação do modelo através de análise de sensibilidade da curva de resposta em freqüência aos parâmetros do TPC, é mostrado na Figura 3.5. Nesta figura pode-se perceber a coluna capacitiva (C_1 e C_2), o reator de compensação (R_c , L_c e C_c), o circuito de proteção, o transformador de potencial indutivo (R_p , L_p , C_p , R_s , L_s , L_m e R_m), e o circuito supressor de ferroressonância.

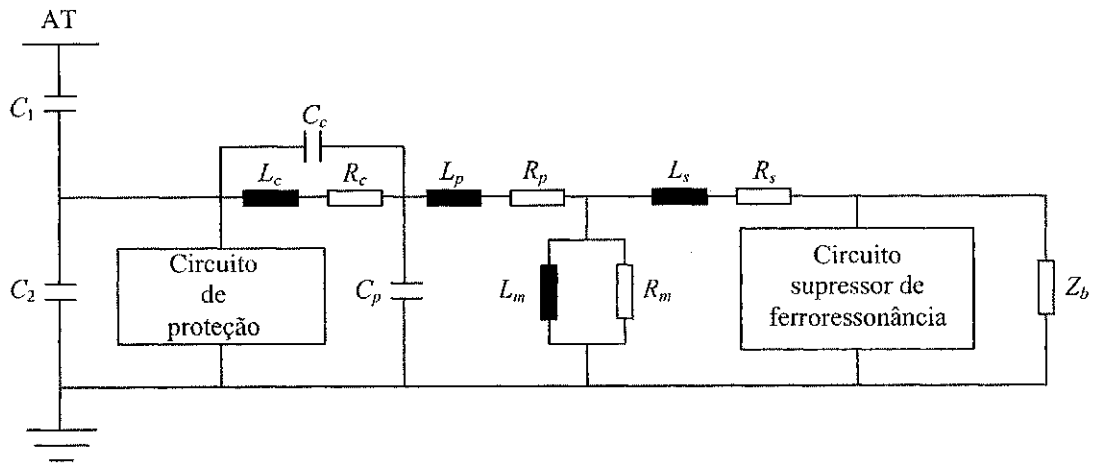


Figura 3.5 – Circuito equivalente simplificado do TPC proposto por KEZUNOVIC et al [1992].

KEZUNOVIC et al [1992] realizaram comparações de resposta em frequência obtidas através de medições em laboratório com simulações digitais em um programa do tipo EMTP, e os resultados concordaram muito bem até 1 kHz aproximadamente. A desvantagem dessa metodologia está na obtenção das capacitâncias parasitas. Elas precisam ser calculadas através de dados de medições de componentes internos do TPC, tendo que para isso, desmontar o equipamento. Além dessa desvantagem, no modelo do TPC não é levada em consideração a presença de elementos não lineares.

Devido aos componentes internos dos TPC serem de difícil acesso, KOJOVIC et al [1994] desenvolveram um método de medição para a resposta em frequência no lado secundário do TPC sem desmontá-lo. Os resultados das medições são usados para obter os parâmetros R , L e C do circuito equivalente do TPC, mostrado na Figura 3.5, através de um método de ajuste de curva, que considera a amplitude da função de transferência. Para representar o circuito supressor de ferroressonância do modelo do TPC, eles utilizaram o circuito equivalente mostrado na Figura 3.6(b), em que M representa o acoplamento mútuo do reator L_f da Figura 3.6(a).

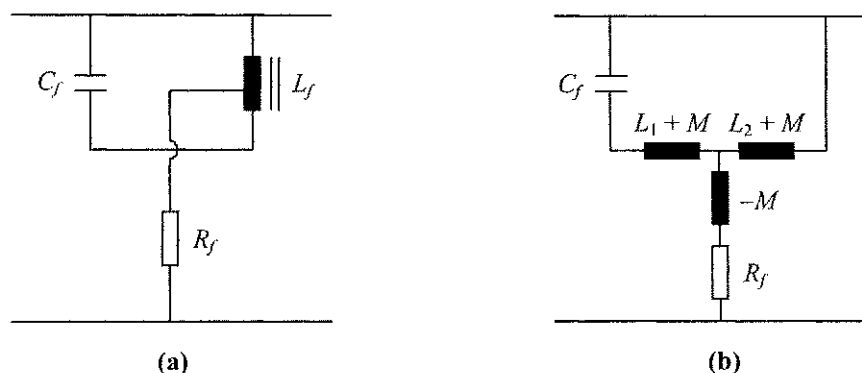


Figura 3.6 – (a) Modelo do circuito supressor de ferroressonância. (b) Circuito equivalente do circuito supressor de ferroressonância apresentado no trabalho de KOJOVIC et al [1994].

O método de ajuste de curva foi aplicado a um TPC de 138 kV e os resultados obtidos concordaram com as medições de resposta em frequência. Além disso, o método de medição para a resposta em frequência no lado secundário do TPC foi validado por medições em laboratório de resposta em frequência no lado primário para dois tipos de TPC, um de 138 kV e outro de 345 kV. O trabalho de KOJOVIC et al [1994] limita-se à validação no domínio da frequência. Para validação no domínio do tempo, seria necessário apresentar medições de sobretensões transitórias e compará-las com as simulações digitais de transitórios eletromagnéticos realizadas no trabalho de KOJOVIC et al [1992] utilizando o mesmo modelo de TPC.

Baseados na hipótese de que os trabalhos de KEZUNOVIC et al [1992] e KOJOVIC et al [1994] haviam dado atenção limitada aos modos ressonantes da curva de resposta em frequência do TPC, VERMEULEN et al [1995] apresentaram um modelo de TPC para a faixa de frequência correspondente aos harmônicos do sistema de potência. Os modos ressonantes observados nas respostas medidas e simuladas foram interpretados tomando como referência os próprios parâmetros do circuito equivalente do TPC.

O modelo do TPC a parâmetros concentrados é constituído por vários sub-circuitos, conforme mostra a Figura 3.7.

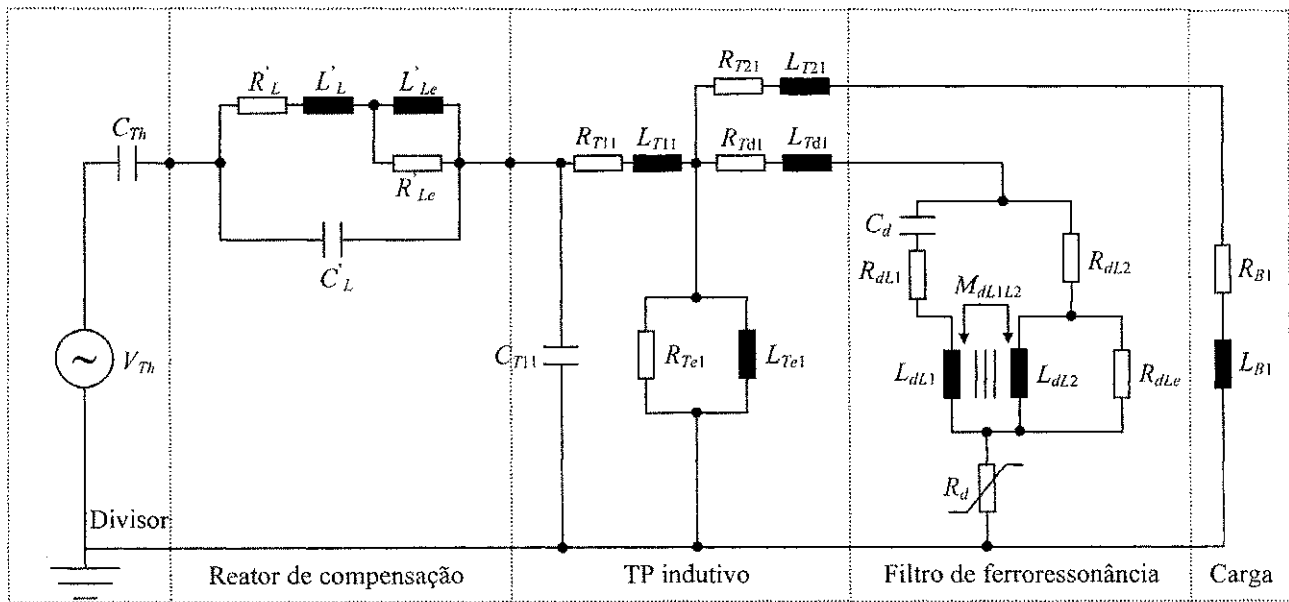


Figura 3.7 – Circuito equivalente do TPC proposto no trabalho de VERMEULEN et al [1995].

VERMEULEN et al [1995] observaram que o circuito supressor de ferroressonância amortece os fenômenos ressonantes e que a conexão de uma carga resistiva no secundário do TPC amortece os picos ressonantes séries que aparecem nas frequências mais baixas da curva de resposta em frequência.

Na metodologia apresentada no trabalho de VERMEULEN et al [1995] existe a necessidade de desmontar o TPC para medir os parâmetros de cada um dos sub-circuitos do modelo. Além disso, a metodologia foi validada somente para frequências até 2,5 kHz.

MARTI et al [1997] apresentaram um modelo de TPC para aplicação em simulações de transitórios eletromagnéticos em tempo real, utilizando técnicas de síntese de rede. O modelo detalha a representação do transformador de potencial indutivo, como mostrado na Figura 3.8.

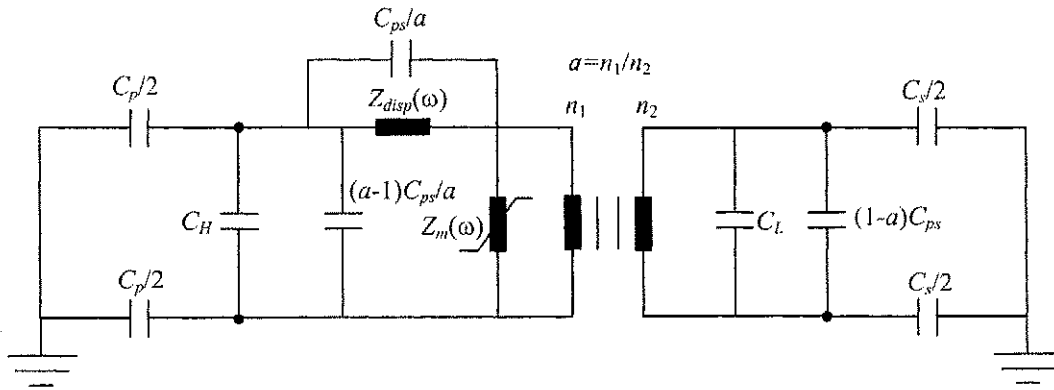


Figura 3.8 – Circuito equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos utilizado para representar o TP indutivo no trabalho de MARTI et al [1997].

As capacitâncias parasitas foram consideradas constantes na frequência. A impedância de curto-circuito, que é a impedância $Z_{disp}(\omega)$ em paralelo com C_{ps}/a , é considerada dependente da frequência e representada pelo modelo de CHIMKLAI & MARTI [1995], que consiste de um circuito contendo tantos blocos RLC quantos forem os picos de ressonância, conforme indicado na Figura 3.9.

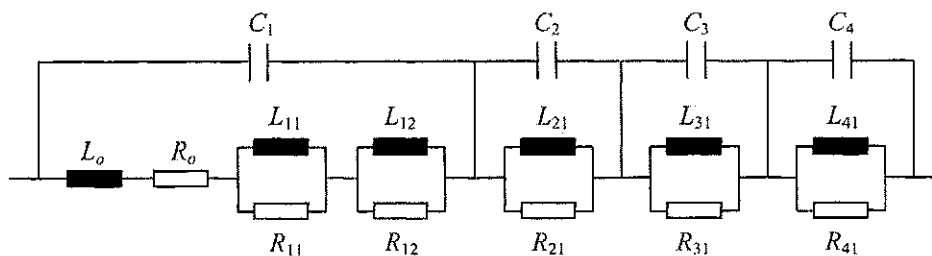


Figura 3.9 – Modelo de CHIMKLAI & MARTI [1995] para representar a impedância de curto-circuito do TP indutivo.

MARTI et al [1997] acreditam que, para transitórios acima de alguns kilohertz, é suficiente considerar somente a região do primeiro pico de ressonância da resposta em frequência da impedância de curto-circuito. Uma aproximação razoável para esta região pode ser representada por um único bloco RLC mostrado na Figura 3.10. Para esta aproximação mínima, os valores de R_o e L_o são calculados em 60 Hz e a capacitância C_1 é calculada para a frequência em que acontece o primeiro pico de ressonância.

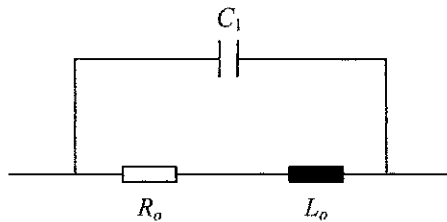


Figura 3.10 – Representação aproximada da impedância de curto-circuito do TP indutivo proposta por MARTI et al [1997].

A falta de detalhamento de outros componentes importantes do TPC, como os capacitores da coluna capacitiva e o reator de compensação que armazenam grande quantidade de energia, consiste numa limitação do trabalho de MARTI et al [1997].

Nos trabalhos de FERNANDES Jr. [1999], FERNANDES Jr. & NEVES [2000a] e FERNANDES Jr. & NEVES [2000b] foi apresentado um método para obtenção dos parâmetros lineares do TPC a partir da sua curva de resposta em frequência. Para isso, foram realizadas medições de resposta em frequência da relação de tensão de um TPC de 230 kV no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, abrangendo uma faixa de frequência de 10 Hz a 10 kHz, e desenvolvida uma rotina de ajuste não linear com o objetivo de aproximar a curva do modelo do TPC à curva obtida experimentalmente. O circuito equivalente utilizado para a estimação dos parâmetros foi o circuito proposto por KEZUNOVIC et al [1992].

FERNANDES Jr. [1999] validou os resultados a partir da comparação das respostas em frequência obtidas através das medições em laboratório com aquelas obtidas através de simulações digitais realizadas no MICROTRAN[®], utilizando os parâmetros estimados pela rotina de ajuste não linear implementada. Os erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC foram pequenos em toda a faixa de frequência.

O trabalho de FERNANDES Jr. [1999] limitou-se à obtenção dos parâmetros lineares do TPC. A influência de elementos não lineares na resposta transitória do TPC não foi verificada.

VASCONCELOS et al [2003] apresentaram uma metodologia baseada em um processo de ajuste vetorial para obter a função de transferência de TPC a partir de suas respostas em frequência medidas em laboratório. Para contemplar as não linearidades, foram realizadas medições das características dos elementos dos TPC que contêm núcleo de ferro.

A aplicação da metodologia de obtenção da função de transferência, considerando os valores medidos de amplitude e fase da relação de tensão de um TPC Trench de 230 kV e do TPC utilizado no trabalho de FERNANDES Jr. [1999], apresentaram resultados satisfatórios até a frequência de 10 kHz.

Com relação aos resultados das medições das curvas de saturação, os únicos componentes que saturam, a um nível de tensão de regime permanente inferior ao da proteção primária, são o transformador do TPC utilizado no trabalho de FERNANDES Jr. [1999] e o reator do circuito supressor de ferroressonância do TPC Trench de 230 kV, cuja configuração é a mesma do circuito mostrado na Figura 2.2(a).

Entretanto, o trabalho de VASCONCELOS et al [2003] não analisa a influência dos elementos não lineares na resposta transitória do TPC.

3.3 Estudos nos Domínios do Tempo e da Frequência

Devido às limitações de faixa de frequência em que os modelos de TPC são validados para estudos que levam em consideração somente a análise no domínio do tempo, bem como limitações para validação da resposta transitória do TPC nos estudos que contemplam somente a análise no domínio da frequência, alguns trabalhos se direcionaram no sentido de avaliar o comportamento do TPC nos domínios do tempo e da frequência, simultaneamente.

IRAVANI et al [1998] apresentaram resultados de simulações digitais para um TPC submetido a operações de chaveamento e ocorrência de falta. Os estudos foram conduzidos nos domínios do tempo e da frequência. A Figura 3.11 mostra o diagrama esquemático, que inclui a representação do TPC, para realizar as simulações de transitórios eletromagnéticos. As chaves $S1$, $S2$, $S3$ e $S4$ não fazem parte do circuito do TPC. Elas são utilizadas apenas para simular situações de transitórios.

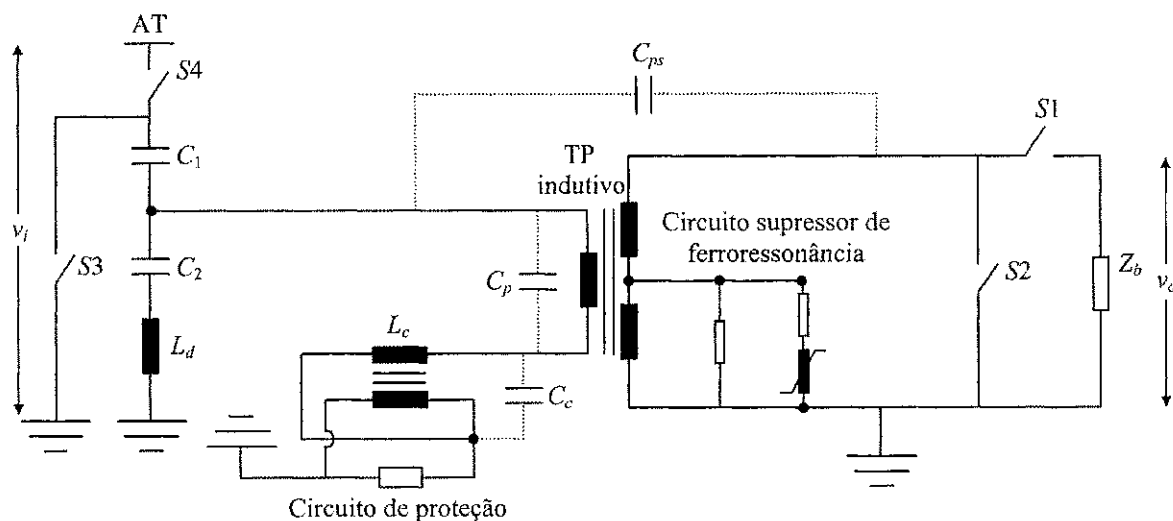


Figura 3.11 – Diagrama esquemático, incluindo a representação do TPC apresentada no trabalho de IRAVANI et al [1998], para simulação de transitórios eletromagnéticos.

Inicialmente, foram efetuados estudos no domínio da frequência para identificar a sensibilidade da curva de resposta em frequência aos parâmetros lineares do TPC. Após a análise dos componentes do TPC, foi utilizada a biblioteca de modelos do EMTP para detalhar a representação do TPC.

Simulações digitais de ferroressonância realizadas em um programa do tipo EMTP foram comparadas com ensaios de ferroressonância realizados em laboratório. Os resultados apresentaram boa concordância.

A sensibilidade da resposta transitória do TPC a alguns de seus parâmetros foi investigada através de simulações digitais. Entretanto, tais resultados não são comparados com medições em laboratório.

Uma outra limitação verificada no trabalho de IRAVANI et al [1998] é a ausência de uma metodologia para estimação dos parâmetros lineares do TPC. Essa fase se constitui numa etapa muito importante, uma vez que os parâmetros lineares podem ser obtidos levando-se em conta as interações magnéticas e capacitivas existentes no conjunto completo do TPC.

MORAES & VASCONCELOS [1999] apresentaram uma metodologia experimental utilizada para solucionar o problema de sobretensões observadas no secundário dos TPC do sistema de 500 kV da CHESF, quando submetidos a manobras de chaves seccionadoras.

A metodologia é desenvolvida em duas etapas. Na primeira delas é feita uma análise experimental da resposta em frequência do TPC até 100 kHz. Na segunda etapa, o TPC é submetido a algumas condições transitórias que induzam oscilações oriundas do fenômeno da ferroressonância.

Para medir a curva de resposta em frequência do TPC, foi utilizado o diagrama esquemático mostrado na Figura 3.12.

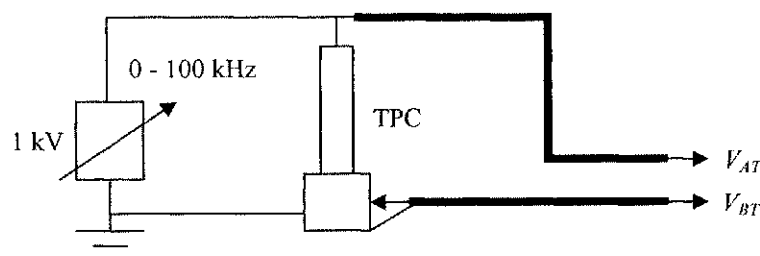


Figura 3.12 – Diagrama utilizado por MORAES & VASCONCELOS [1999] para medir a curva de resposta em frequência do TPC.

A partir da avaliação da resposta em frequência do TPC, foi desenvolvido um filtro, composto por um circuito RC paralelo para conexão ao secundário do TPC, com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de sobretensões.

Na avaliação da resposta transitória, foi utilizado o circuito de teste mostrado na Figura 3.13 para gerar oscilações de tensão devido à abertura de curto-circuito na parte indutiva do TPC.

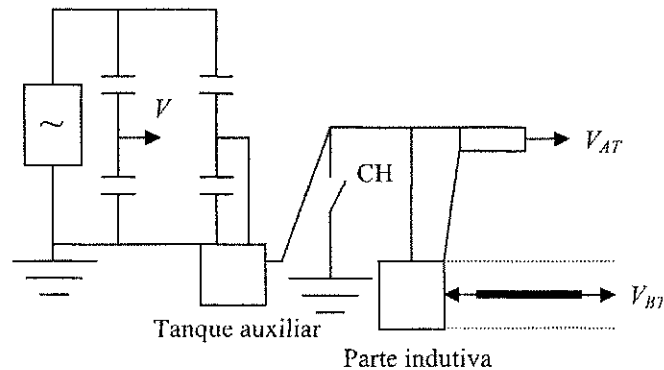


Figura 3.13 – Circuito de teste utilizado por MORAES & VASCONCELOS [1999] para medições da resposta transitória do TPC.

O trabalho de MORAES & VASCONCELOS [1999] não apresenta estudos de simulação digital com um modelo computacional do TPC. Essa é uma limitação, devido ao fato de que a existência de tal modelo, validado com os resultados experimentais realizados, poderia fornecer subsídios para fazer previsões da resposta transitória do TPC.

TZIOUVARAS et al [2000] apresentaram uma revisão sobre modelos matemáticos usados para representar o comportamento não linear do núcleo magnético. Os modelos matemáticos estudados foram usados na representação do núcleo de transformadores para instrumentos. Para o TPC, foram realizadas simulações digitais de abertura seguida de fechamento de uma chave no seu terminal primário e verificado que, oscilações típicas de ferroressonância podem aparecer no secundário do TPC quando o núcleo do TP indutivo estiver próximo a saturação e a carga no seu secundário for muito pequena.

Com relação aos estudos no domínio da frequência, foi feita uma análise de sensibilidade para mostrar a influência de alguns parâmetros do TPC na sua curva de

resposta em frequência e os resultados confirmaram a importância da inclusão de capacitâncias parasitas no modelo do TPC.

A falta de medições de tensões transitórias para uma avaliação mais precisa do modelo do TPC consiste numa limitação do trabalho de TZIOUVARAS et al [2000].

Tomando-se como base os trabalhos citados nesta revisão bibliográfica, pode-se perceber que, mesmo com todos os esforços no sentido de melhorar os modelos de TPC, existem ainda limitações para a validação dos mesmos.

3.4 Resumo

A Tabela 3.1 abaixo apresenta um quadro sinóptico com as três categorias de estudos que constituem a revisão bibliográfica sobre modelos de TPC.

Tabela 3.1 – Quadro sinóptico com a revisão bibliográfica sobre modelos de TPC.

Estudos	Características	Alguns Trabalhos	Limitações
Domínio do Tempo	<ul style="list-style-type: none"> • Circuito equivalente do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos • Fatores que afetam a resposta transitória do TPC • Efeitos de saturação 	<ul style="list-style-type: none"> • SWEETANA [1971] • LUCAS et al [1992] • GRAOVAC et al [2003] 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos não atribuem igual importância aos demais componentes do conjunto completo do TPC
Domínio da Frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos de sensibilidade • Metodologia para modelagem do TPC a partir de medições de resposta em frequência 	<ul style="list-style-type: none"> • KEZUNOVIC et al [1992] • KOJOVIC et al [1994] • FERNANDES Jr. [1999] • VASCONCELOS et al [2003] 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos não contemplam simulações de transitórios
Domínios do Tempo e da Frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos de sensibilidade • Simulações de transitórios 	<ul style="list-style-type: none"> • IRAVANI et al [1998] • MORAES & VASCONCELOS [1999] • TZIOUVARAS et al [2000] 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de metodologia para estimação de parâmetros • Modelos não são validados por medições de resposta em frequência e de sobretensões

Neste trabalho de tese, o caminho adotado para um modelo preciso de TPC em estudos de transitórios eletromagnéticos é o da análise do comportamento do equipamento nos domínios do tempo e da frequência, por se tratar de uma abordagem mais completa. No domínio da frequência, os parâmetros R , L e C lineares do TPC, incluindo as capacitâncias parasitas, são estimados a partir de medições de amplitude e fase da curva de resposta em frequência até 10 kHz. No domínio do tempo, os elementos não lineares do TPC, como o TP indutivo, o reator de compensação, o reator do CSF e o elemento limitador de tensão, são modelados, tomando-se como base medições de sua característica não linear, para tornar as simulações digitais de transitórios mais realistas. Para validação do modelo, são realizadas medições em laboratório de sobretensões transitórias, como ensaio de ferroressonância e chaveamento no lado da tensão intermediária de um TPC de 230 kV.

Nos capítulos seguintes é apresentado o desenvolvimento do referido trabalho de tese.

Capítulo 4

Estimação de Parâmetros para o Modelo do TPC

A fim de estimar os parâmetros R , L e C lineares do TPC é necessário inicialmente utilizar um modelo que o represente satisfatoriamente. A partir de um modelo geral do TPC, será feita uma análise de sensibilidade dos seus parâmetros às curvas de resposta em frequência com o objetivo de obter um modelo mais simplificado. Os parâmetros R , L e C desse modelo devem reproduzir as funções de amplitude e fase da relação de tensão do TPC. Para isso, será utilizada uma técnica de minimização de funções não lineares apresentada neste capítulo.

4.1 Justificativa do Modelo

Um modelo geral de TPC operando em frequências acima de 1 kilohertz pode ser representado conforme mostra a Figura 4.1. Ele consiste basicamente de 6 elementos principais que são: a coluna capacitiva (C_1 e C_2), o reator de compensação (R_c ,

L_c e C_c), o circuito de proteção contra sobretensões, o TP indutivo (R_p , L_p , C_p , C_{ps} , R_s , L_s , C_s , R_m e L_m), o circuito supressor de ferroressonância (CSF) (R_f , L_f e C_f) e a bobina de drenagem (L_d) [KEZUNOVIC et al, 1991; KEZUNOVIC et al, 1992].

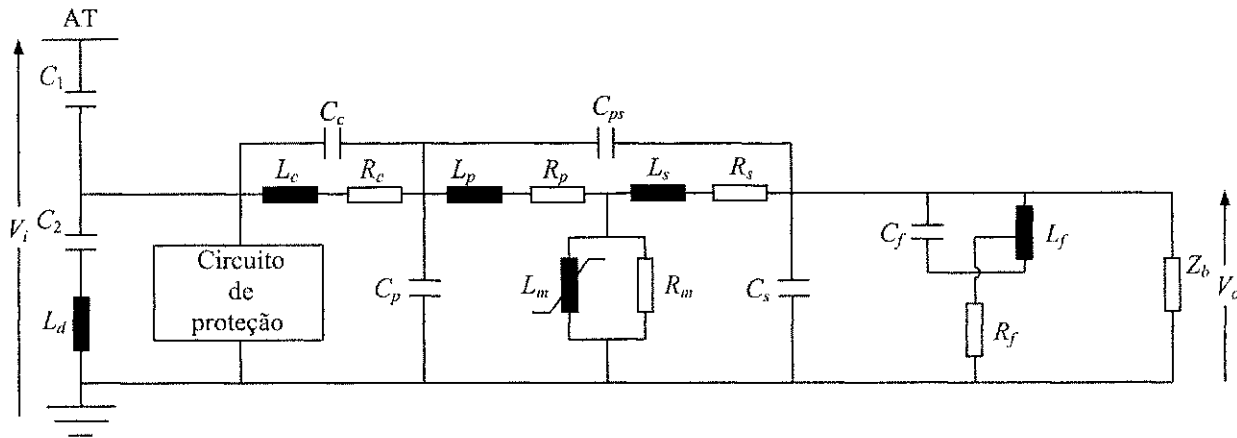


Figura 4.1 – Modelo geral do TPC para frequências acima de 1 kilohertz.

Uma representação detalhada do TPC pode exigir dados que não são facilmente fornecidos nem pelos fabricantes nem mesmo obtidos através de medições. Com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo do TPC, foi realizada uma análise de sensibilidade no domínio da frequência para detectar quais dos seus parâmetros apresentam maior relevância no modelo do TPC.

A análise de sensibilidade se constitui na determinação da influência que tem a variação de algum parâmetro do problema na solução obtida ou em alguma função de resposta. Nesta tese, a análise de sensibilidade foi realizada via simulação digital com o MICROTRAN[®] [MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION, 1999], variando os valores dos parâmetros previamente conhecidos do modelo do TPC mostrado na Figura 4.1 e observando as curvas de resposta em frequência de amplitude e fase da relação de tensão do TPC. A amplitude é dada na forma de ganho em decibéis e a fase é dada em graus.

Os referidos estudos estão restritos à análise do comportamento linear da resposta em frequência do TPC, uma vez que os ensaios de resposta em frequência são normalmente conduzidos em baixos níveis de tensão, insuficientes para levar a saturação do TP indutivo e a atuação do circuito de proteção. No entanto, os efeitos da não linearidade do TP indutivo e do circuito de proteção são incluídos nas simulações realizadas no domínio do tempo.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram a sensibilidade das curvas de amplitude e fase, respectivamente, da relação de tensão do TPC, à variação de alguns dos parâmetros mais importantes na sua representação, sendo $C_e = C_1 + C_2$ a capacitância equivalente da coluna capacitiva.

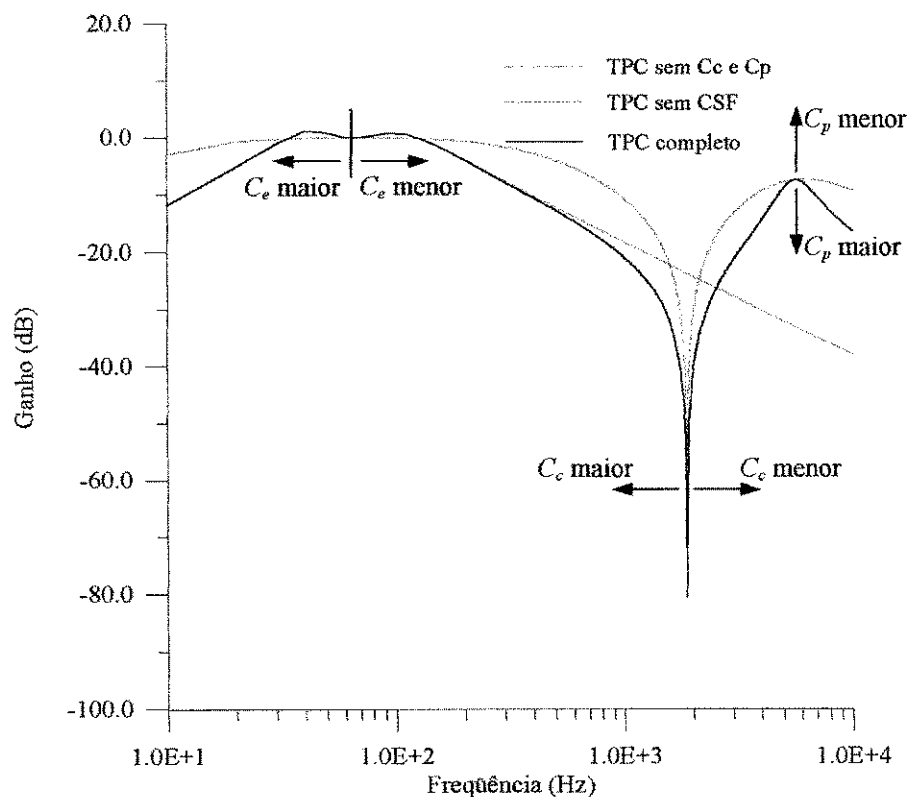


Figura 4.2 – Sensibilidade da curva de amplitude da relação de tensão de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes.

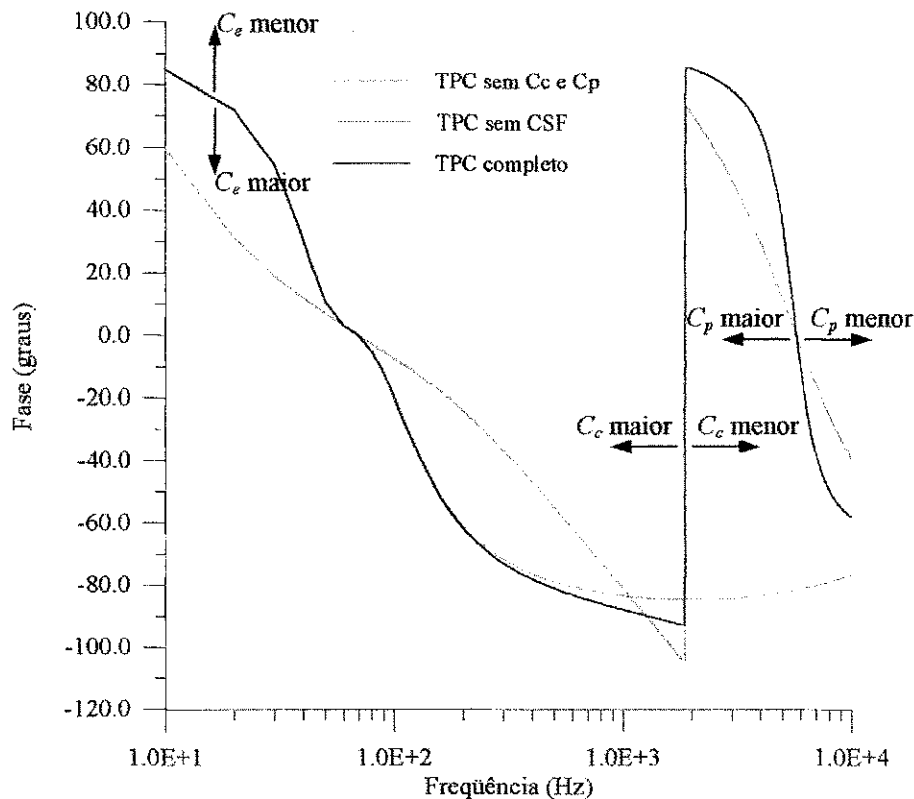


Figura 4.3 – Sensibilidade da curva de fase da relação de tensão

de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes.

As Figuras 4.2 e 4.3 revelam que as capacitâncias parasitas do reator de compensação (C_c) e do enrolamento primário (C_p) têm grande influência na resposta do TPC nas frequências mais elevadas, ao passo que a capacitância equivalente da coluna capacitiva (C_e) tem influência nas frequências menores.

A ausência do circuito supressor de ferroressonância no modelo do TPC leva às curvas de resposta em frequência mostradas em vermelho, que não coincidem praticamente em toda a faixa de frequência com as curvas do modelo completo do TPC, indicando a importância de se levar em conta a presença do CSF.

Foram feitas análises de sensibilidades com os demais parâmetros do TPC, a partir de valores típicos de R , L e C apresentados por KOJOVIC et al [1994] e IRAVANI et al [1998]. Os resultados indicam que a resposta em frequência do TPC é sensível a esses parâmetros, com exceção de L_d , C_{ps} , R_s , L_s e C_s que não provocam alterações significativas

nas curvas de resposta em frequência do TPC, dando a indicação de que podem ser suprimidos do modelo sem comprometer os resultados.

Após as análises de sensibilidade com os elementos do TPC, foi adotado o modelo mostrado na Figura 4.4 para estimação dos seus parâmetros lineares. Este modelo, que contempla os parâmetros mais relevantes na representação do TPC, consiste da coluna capacitiva (C_1 e C_2), do reator de compensação (R_c , L_c e C_c), do TP indutivo (R_p , L_p , C_p , R_m e L_m) e do circuito supressor de ferroressonância (R_f , L_f e C_f) [KOJOVIC et al, 1994].

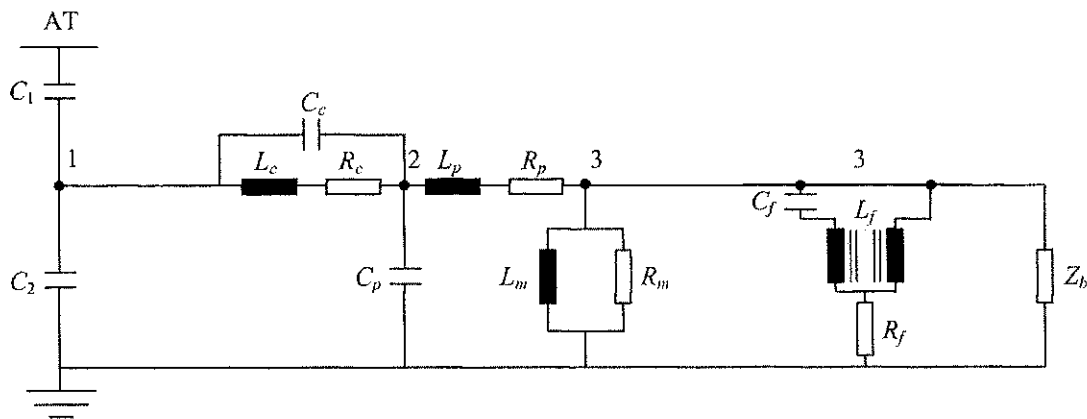


Figura 4.4 – Modelo do TPC adotado para estimação dos seus parâmetros lineares.

Na Figura 4.4, o circuito supressor de ferroressonância foi modelado considerando L_f como um transformador não saturável para que seja sintonizado na frequência do sistema com um fator Q elevado, que deve ser esperado para um circuito dessa natureza. Para o cálculo de parâmetros, o CSF é mostrado na Figura 4.5, em que M é a indutância mútua que representa o acoplamento magnético do transformador não saturável.

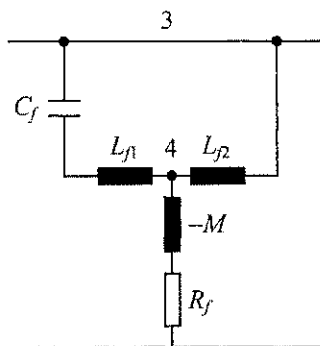


Figura 4.5 – Modelo do CSF adotado para estimação de parâmetros.

4.2 Estimação dos Parâmetros do Modelo

Para o desenvolvimento matemático do modelo do TPC, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 4.4. São considerados blocos de impedância Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 e Z_5 , conforme mostra a Figura 4.6. As impedâncias Z_4 , entre os nós 3 e 4, e Z_5 , entre o nó 4 e o nó de referência para o terra, foram consideradas tomando-se como base o modelo do CSF apresentado na Figura 4.5.

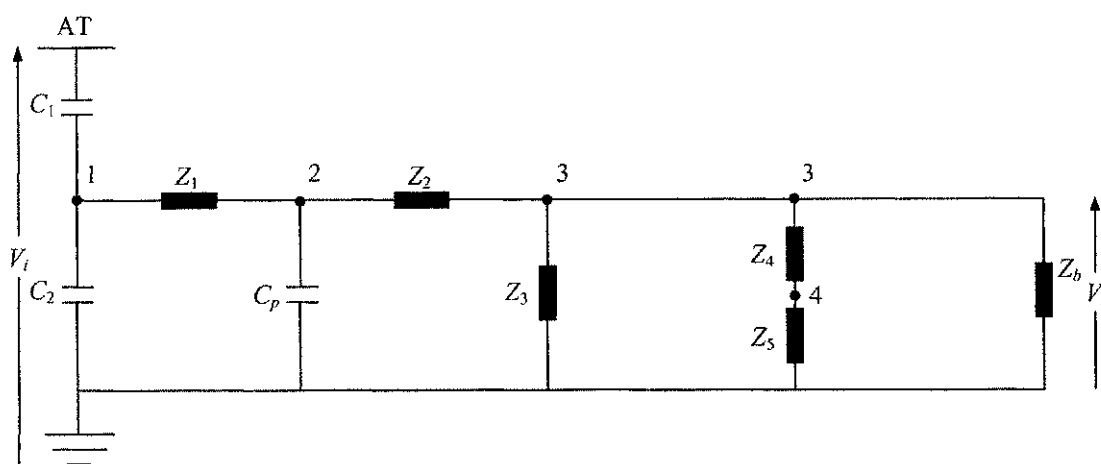


Figura 4.6 – Modelo do TPC com blocos de impedância para estimação de seus parâmetros lineares.

As expressões para as impedâncias no domínio s , com $s = j\omega$, são:

$$Z_1 = (R_c + sL_c) // (1/sC_c) \tag{4.1}$$

$$Z_2 = R_p + sL_p \tag{4.2}$$

$$Z_3 = R_m // sL_m \tag{4.3}$$

$$Z_4 = (sL_{f1} + 1/sC_f) // sL_{f2} \tag{4.4}$$

$$Z_5 = R_f - sM, \tag{4.5}$$

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

Os parâmetros R , L e C do modelo do TPC devem reproduzir as funções de transferência de amplitude e fase da relação de tensão representada por V_o/V_i . Eles são

calculados a partir de uma técnica de minimização de funções não lineares, uma vez que as funções do modelo dependem não linearmente dos seus parâmetros.

A metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros do modelo é apresentada detalhadamente nas próximas subsecções deste capítulo.

4.2.1 Minimização de Funções Não Lineares

Os métodos para minimização de funções não lineares geralmente são iterativos, ou seja, dada uma solução aproximada a_i , uma estimativa da solução a^* é obtida. Neste trabalho de tese, a técnica usada é baseada no método de Newton que usa uma aproximação quadrática para a função $F(a)$ derivada a partir da expansão da série de Taylor de segunda ordem em torno do ponto a_i . Em duas dimensões, a aproximação da série de Taylor de segunda ordem pode ser escrita na forma matricial/vetorial:

$$F(a_1 + p_1, a_2 + p_2) \approx F(a_1, a_2) + [p_1 \ p_2] \begin{bmatrix} \frac{\partial F(a_1, a_2)}{\partial a_1} \\ \frac{\partial F(a_1, a_2)}{\partial a_2} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} [p_1 \ p_2] \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(a_1, a_2)}{\partial a_1^2} & \frac{\partial^2 F(a_1, a_2)}{\partial a_1 \partial a_2} \\ \frac{\partial^2 F(a_1, a_2)}{\partial a_2 \partial a_1} & \frac{\partial^2 F(a_1, a_2)}{\partial a_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Para a dimensão n , a expressão acima pode ser escrita conforme a Equação (4.7):

$$F(\mathbf{a} + \mathbf{p}) \approx F(\mathbf{a}) + \mathbf{p}^T \nabla F(\mathbf{a}) + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \nabla^2 F(\mathbf{a}) \mathbf{p}, \quad (4.7)$$

sendo $\nabla F(\mathbf{a})$ e $\nabla^2 F(\mathbf{a})$ o vetor gradiente e a matriz Hessiana da função F , respectivamente, dados por:

$$\nabla F(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial a_n} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial a_1^2} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial a_1 \partial a_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial a_n \partial a_1} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial a_n^2} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Para obter o passo \mathbf{p} , a função F é minimizada fazendo o seu gradiente com respeito a \mathbf{p} igual a zero. Dessa forma, tem-se:

$$\nabla^2 F(\mathbf{a}) \mathbf{p} = -\nabla F(\mathbf{a}). \quad (4.10)$$

A solução aproximada \mathbf{a}_{k+1} é dada por:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \mathbf{p} = \mathbf{a}_k - [\nabla^2 F(\mathbf{a}_k)]^{-1} \nabla F(\mathbf{a}_k). \quad (4.11)$$

Algumas vezes, no entanto, o método de Newton pode não atingir a convergência [KAHANER et al, 1989]. Para que o método possa ter a garantia de convergência é necessário que a inversa da matriz Hessiana $[\nabla^2 F(\mathbf{a})]^{-1}$ seja positivo definida em cada passo iterativo, ou seja, $\mathbf{z}^T [\nabla^2 F(\mathbf{a})]^{-1} \mathbf{z} > 0$ para todo $\mathbf{z} \neq 0$.

Neste trabalho de tese foram implementados dois métodos que utilizam modificação do método de Newton visando superar problemas de convergência. São eles: o método de Levenberg-Marquardt e o de Newton Completo, escolhidos por apresentarem bons desempenhos em problemas de mínimos quadrados não lineares [PRESS et al, 1992].

4.2.2 Métodos de Ajuste Implementados

Quando se pretende ajustar n pontos (x_i, y_i) $i=1, \dots, n$, a um modelo que depende não linearmente do conjunto de m parâmetros, dado pela Equação (4.12)

$$y(x) = y(x; a_1, \dots, a_m), \quad (4.12)$$

a preocupação básica é determinar um vetor $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_m]$ de forma a minimizar uma determinada função de mérito (ou função objetivo) que quantifique a concordância entre os

dados e o modelo. Para ambos os métodos, a função de mérito utilizada é dada pela expressão abaixo:

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{y_i - y(x_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right]^2, \quad (4.13)$$

sendo σ_i o desvio padrão para cada valor de y_i . O vetor gradiente e a matriz Hessiana de χ^2 com relação aos parâmetros \mathbf{a} são dados pelas Equações (4.14) e (4.15), respectivamente.

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - y(x_i; \mathbf{a})]}{\sigma_i^2} \frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_j \partial a_l} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_j} \frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_l} - [y_i - y(x_i; \mathbf{a})] \frac{\partial^2 y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_l \partial a_j} \right]. \quad (4.15)$$

Em cada iteração, precisa-se calcular um vetor β_j e uma matriz α_{jl} , dados pelas Equações (4.16) e (4.17), respectivamente.

$$\beta_j = -\frac{1}{2} \frac{\partial \chi^2}{\partial a_j} \quad (4.16)$$

$$\alpha_{jl} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_j \partial a_l}. \quad (4.17)$$

A única diferença entre o método de Newton Completo e o método de Levenberg-Marquardt é que neste último, o termo que contém a derivada de segunda ordem da função do modelo $y(x_i; \mathbf{a})$ na Equação (4.15) é desprezado. Ao se considerar o referido termo de derivada de segunda ordem, o método torna-se mais robusto, embora seja mais lento para atingir a convergência.

Nos métodos implementados, se o processo de otimização está na direção do mínimo de χ^2 , ou seja, $\chi^2(\mathbf{a}_k) < \chi^2(\mathbf{a}_{k-1})$, na iteração k , o vetor seguinte \mathbf{a}_{k+1} é determinado pela Equação (4.11), como no método de Newton. Se o processo está

divergindo, ou seja, $\chi^2(\mathbf{a}_k) > \chi^2(\mathbf{a}_{k-1})$, o vetor seguinte \mathbf{a}_{k+1} é determinado pela seguinte expressão:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k - c \cdot \nabla \chi^2(\mathbf{a}_k), \quad (4.18)$$

sendo, $c = \frac{1}{\lambda \alpha_{jj}}$ uma constante que depende do inverso dos elementos da diagonal principal da matriz α_{jl} e de um fator de escala adimensional λ que pode ser definido pelo usuário.

Além dessa consideração, é definida uma nova matriz α' que apresenta as seguintes características:

$$\begin{aligned} \alpha'_{jj} &= \alpha_{jj} (1 + \lambda) \\ \alpha'_{jl} &= \alpha_{jl}, \quad (j \neq l) \end{aligned} \quad (4.19)$$

O objetivo é tornar a nova matriz diagonalmente dominante, para λ suficientemente grande, evitando problemas com singularidades. Essas modificações aumentam as chances de convergência dos métodos de Levenberg-Marquardt e de Newton Completo nos casos em que o método de Newton falha.

4.2.3 Considerações sobre os Métodos de Ajuste Implementados

No método de Newton Completo, o esforço para levar em consideração a derivada de segunda ordem da função do modelo $y(x_i; \mathbf{a})$ na Equação (4.15) parece não ter compensado os resultados obtidos, uma vez que, comparando-se os ajustes de funções racionais de circuitos passivos RLC, utilizando ambos os métodos apresentados neste trabalho de tese, observou-se que os resultados foram praticamente os mesmos.

Sabe-se que o método de Newton Completo é mais robusto que o método de Levenberg-Marquardt. Entretanto, os resultados revelaram que normalmente a solução final do processo de otimização não é afetada. A explicação pode estar relacionada com o

fato de que o termo que envolve a derivada de segunda ordem de $y(x_i; \mathbf{a})$ é muito pequeno comparado com o termo que envolve a derivada de primeira ordem.

Devido à conveniência de não precisar computar a derivada de segunda ordem da função do modelo, sem comprometer o resultado final do processo de otimização, foi dada preferência ao método de Levenberg-Marquardt para a obtenção dos parâmetros do modelo do TPC. O algoritmo é apresentado na próxima subseção.

4.2.4 Algoritmo Implementado

Uma rotina em FORTRAN foi desenvolvida para minimizar a função de mérito $\chi^2(\mathbf{a})$, dada pela Equação (4.13). O algoritmo é descrito a seguir:

1. Entra-se com a estimativa inicial para os parâmetros R , L e C (vetor \mathbf{a}) e com os valores de resposta em frequência y_i da relação de tensão do TPC para cada frequência x_i .
2. Determina-se $\chi^2(\mathbf{a})$ para os valores iniciais dos parâmetros R , L e C . Neste momento, avalia-se a função do modelo $y(x_i; \mathbf{a})$ e as suas derivadas com respeito a cada um dos m parâmetros.
3. Inicia-se o processo iterativo e determinam-se os valores atualizados de $\chi^2(\mathbf{a})$, de seu vetor gradiente e de sua matriz Hessiana através do método de Levenberg-Marquardt, descrito na subseção 4.2.2.
4. Armazena-se a cada iteração o valor de $\chi^2(\mathbf{a})$, e para um determinado número de iterações t fornecido pelo usuário, compara-se o valor da função de mérito na iteração atual k , $\chi^2(\mathbf{a}_k)$, com o seu valor antigo a t iterações atrás, $\chi^2(\mathbf{a}_{k-t})$, aplicando-se o seguinte critério de convergência:
5. Se $|\chi^2(\mathbf{a}_k) - \chi^2(\mathbf{a}_{k-t})| \geq$ tolerância definida pelo usuário, retorna-se ao item 3.
6. Se $|\chi^2(\mathbf{a}_k) - \chi^2(\mathbf{a}_{k-t})| <$ tolerância definida pelo usuário, finaliza-se o processo iterativo, obtendo-se assim o vetor paramétrico \mathbf{a} ajustado.

A experiência mostra que o método de Levenberg-Marquardt é pouco sensível à estimativa inicial. Mesmo assim, para aumentar as chances de convergência do método, a estimativa inicial para os parâmetros do modelo é feita utilizando-se conjuntos de soluções fisicamente possíveis para um circuito que contenha resistores, indutores e capacitores, como é o caso do modelo do TPC. Na maioria das vezes, após o processo de ajuste, o parâmetro calculado apresenta uma diferença de uma a duas ordens de grandeza quando comparado com o seu valor inicial.

A forma como a rotina está implementada tem a vantagem de permitir ao usuário colocar algumas restrições aos parâmetros ajustáveis R , L e C na tentativa de tornar os resultados mais realistas.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados das medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão da UFCG com um TPC de 230 kV emprestado pela CHESF. Em seguida, no capítulo 6, a metodologia aqui desenvolvida para estimação paramétrica será utilizada no cálculo dos parâmetros de dois TPC: um de 138 kV reportado na literatura e o TPC de 230 kV ensaiado em laboratório.

Capítulo 5

Medições em Laboratório

Neste capítulo são apresentadas as características de um TPC com tensão nominal de 230 kV, bem como os resultados dos ensaios realizados com este equipamento no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. São feitas medições de resposta em frequência da relação de tensão do TPC considerando todo o seu conjunto, bem como medições de curvas de saturação dos componentes do TPC que contêm núcleo de ferro, como o núcleo magnético do TP indutivo, o reator de compensação e o reator do circuito supressor de ferroressonância. É feita uma estimativa da característica não linear do pára-raios que compõe o circuito de proteção do TPC, a partir de medições da tensão de disparo do seu centelhador à frequência industrial.

A importância da curva de resposta em frequência do TPC reside no fato de que os valores medidos servem como dados de entrada para a rotina de estimação de parâmetros que utiliza o método de ajuste apresentado no capítulo 4. A inclusão das não linearidades no modelo do TPC é importante para tornar mais realista as simulações digitais no domínio do tempo.

5.1 Dados do Fabricante para o TPC de 230 kV

- Tipo: CVT 245/8M.
- Tensão superior: 245 kV.
- NBI: 1050 kV.
- Carga térmica: 1500 VA
- Tensão primária: $230 / \sqrt{3}$ kV.
- Tensão intermediária: $30 / \sqrt{3}$ kV.
- Tensão secundária: 115 V e $115 / \sqrt{3}$ V.
- Relação: 2000 – 1154,7 : 1 para X_1, X_2 e X_3 ; 2000 – 1154,7 : 1 para Y_1, Y_2 e Y_3 .
- Máxima potência nominal: 400 VA.
- Capacitâncias da coluna capacitiva: $C_1 = 9660$ pF e $C_2 = 64400$ pF.
- Frequência: 60 Hz.
- Peso: 850 kg.

A configuração do transformador de potencial indutivo do TPC pode ser vista na Figura 5.1.

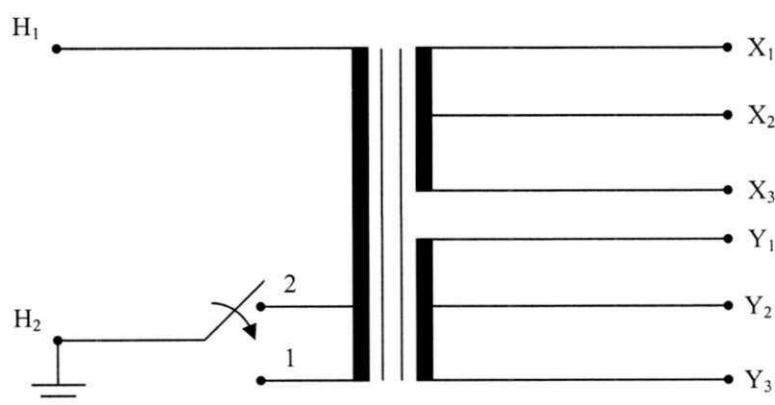


Figura 5.1 – Configuração do TP indutivo do TPC de 230 kV.

Nessa configuração, H_1 é o terminal primário de tensão intermediária do TP indutivo, H_2 é o terminal de referência para a terra e X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2 e Y_3 são os

terminais secundários de baixa tensão. Os terminais 1 e 2 são derivações do enrolamento primário para a terra [PASSONI & VILLA, 1979].

Os principais componentes do TPC de 230 kV podem ser vistos no Apêndice B.

5.2 Medições de Resposta em Frequência

Os ensaios de resposta em frequência foram realizados com o TPC de 230 kV completo, desde a sua coluna capacitiva até os terminais secundários.

A experiência com os vários ensaios de resposta em frequência no TPC demonstrou a necessidade de se projetar um filtro passa-baixa, a fim de eliminar ruídos de alta frequência. Utilizando um programa desenvolvido pela MICROSIM [MICROSIM CORPORATION, 1996] foi projetado um filtro RC de 3ª ordem com uma frequência de corte de 15 kHz para sanar tal problema. Para implementação do filtro, foram necessários os seguintes componentes e equipamentos:

- 1 CI TL084.
- 2 resistores de 1,5 k Ω .
- 2 resistores de 27 k Ω .
- 1 resistor de 2,2 k Ω .
- 2 capacitores de 10 nF.
- 1 capacitor de 330 pF.
- 2 fontes CC de 9 V.
- Gerador de sinal 100 MHz.
- Osciloscópio digital [TEKTRONIX, 1997].

A configuração do filtro passa-baixa é mostrada na Figura 5.2.

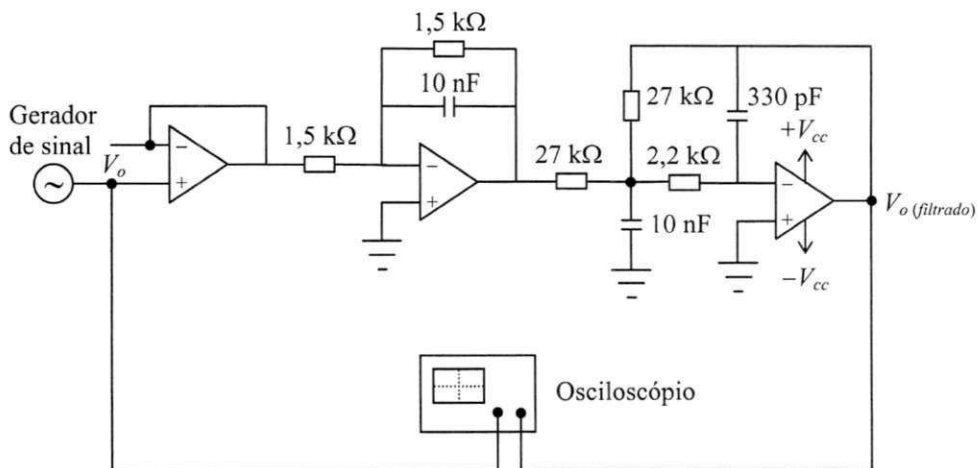


Figura 5.2 – Filtro passa-baixa de 3ª ordem para eliminação de ruídos de alta frequência nas medições de resposta em frequência do TPC.

Antes de ser conectado aos terminais secundários do TPC, o filtro foi submetido a um ensaio de resposta em frequência isoladamente. Os resultados das medições estavam em conformidade com as especificações de projeto do filtro.

Após a especificação do filtro, foram realizados os ensaios de resposta em frequência no TPC. Os seguintes instrumentos e componentes foram necessários:

- Gerador de sinal 100 MHz.
- Amplificador de potência [FLUKE CORPORATION, 1976].
- Osciloscópio digital.
- Voltímetro digital 750 V_{CA} [MINIPA, 1996].
- Fitas de cobre com 2,6 cm de largura.
- Pontas de prova para osciloscópio.
- Cabo para aterramento.

A tensão fornecida pelo gerador de sinal e amplificada em até 100 vezes pelo amplificador de potência, cujo valor máximo de tensão pico a pico é de 2000 V, foi aplicada entre a coluna capacitiva do TPC e um ponto referencial para a terra, como mostrado na Figura 5.3.

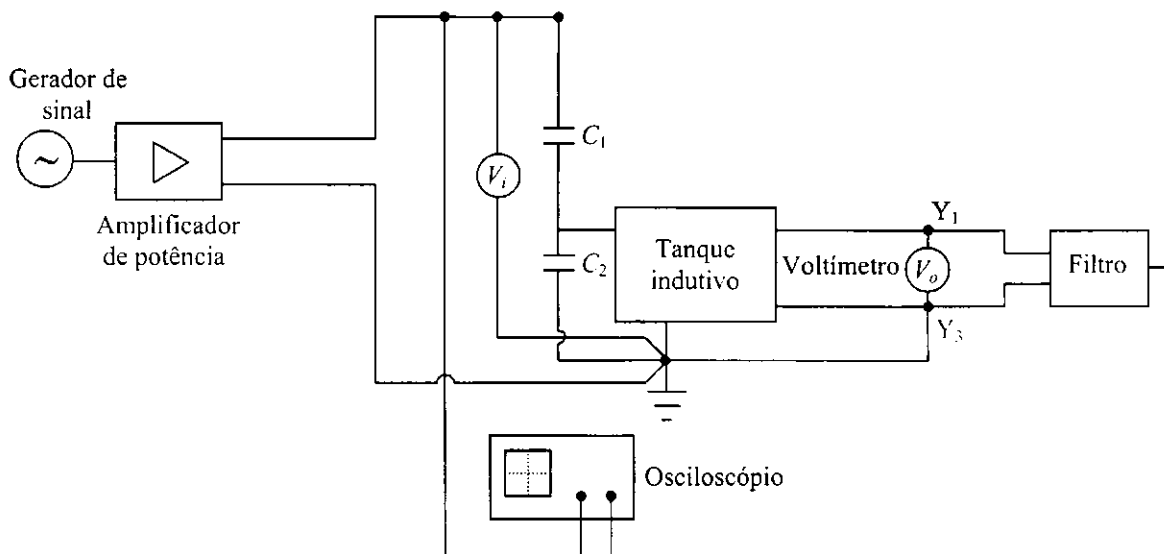


Figura 5.3 – Montagem para a medição de resposta em frequência do TPC de 230 kV.

A tensão no secundário (V_o) foi lida através de um voltímetro digital entre os terminais $Y_1 - Y_3$. Os resultados teriam sido praticamente os mesmos se a tensão fosse lida entre os terminais $X_1 - X_3$. Para a leitura das frequências e das diferenças de fase entre o sinal aplicado e o sinal de tensão no secundário após o filtro, foi utilizado um osciloscópio digital. A tensão aplicada (V_i) também foi lida através de um voltímetro digital, conectado entre o terminal superior da coluna capacitiva e a terra.

Os resultados do ensaio de resposta em frequência para a amplitude e a fase da relação de tensão do TPC são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Medições de resposta em frequência para a amplitude e a fase da relação de tensão do TPC de 230 kV.

Frequência (Hz)	V_i (V)	V_o (mV)	Ganho (dB)	Fase (graus)
10,06	284	154,0	-4,12771	54,32
15,04	307	261,0	-0,22172	59,56
19,96	325	372,0	2,36143	35,93
24,57	336	423,0	3,18826	17,69
30,08	346	407,0	2,59860	4,33
34,77	339	368,0	1,90120	0,00
39,75	338	342,0	1,29043	0,00
44,56	334	319,0	0,78912	0,00

49,70	343	317,0	0,50354	0,00
54,64	336	304,0	0,31892	0,00
60,10	344	307,0	0,19984	0,00
65,45	330	293,0	0,15531	0,00
70,03	338	300,0	0,15233	0,00
75,30	333	299,0	0,25278	0,00
80,91	322	295,0	0,42756	0,00
85,47	327	305,0	0,58328	-6,15
89,29	334	316,0	0,70705	-12,86
95,79	329	321,0	0,97442	-6,89
100,6	323	320,0	1,10719	-7,24
150,4	331	376,0	2,29544	-32,49
201,6	325	317,0	0,97176	-58,06
253,8	319	243,7	-1,15046	-73,09
299,8	329	192,5	-3,46706	-79,87
350,1	324	161,0	-4,88614	-83,18
396,8	327	137,1	-6,36197	-91,42
457,0	315	119,9	-7,20159	-88,84
502,0	313	108,5	-8,01405	-86,75
553,1	316	97,7	-9,00761	-87,61
601,0	317	89,8	-9,76742	-95,20
656,2	315	82,8	-10,41737	-94,49
704,2	316	77,3	-11,04191	-96,33
756,4	311	72,8	-11,42434	-98,03
805,2	314	68,7	-12,01122	-98,56
853,2	314	65,3	-12,45209	-98,29
892,9	315	62,7	-12,83262	-96,43
947,0	314	59,8	-13,21633	-102,28
1002,0	315	57,7	-13,55446	-101,00
3030,0	305	23,35	-21,13202	-163,62
3994,0	301	22,25	-21,43649	-155,29
5040,0	300	22,5	-21,31054	-159,67
5995,0	300	22,85	-21,17646	-159,71
7003,0	299	23,15	-21,03417	-163,87
8013,0	296	22,95	-21,02194	-170,20
8985,0	295	22,8	-21,04950	-177,90
9950,0	294	22,78	-21,02763	-179,10

O filtro passa-baixa projetado amenizou bastante os ruídos gerados por frequências elevadas, facilitando assim a leitura de sinais de tensão com pequena amplitude no secundário do TPC.

A amplitude da relação de tensão do TPC é calculada na forma de ganho em dB pela expressão:

$$Ganho = 20 \log(V_o/V_i'), \tag{5.1}$$

sendo,

$$V_i' = \frac{C_1}{n(C_1 + C_2)} V_i. \tag{5.2}$$

Na Equação (5.2), $n = 152,6$, $C_1 = 10,04$ nF e $C_2 = 65,4$ nF, medidos em laboratório.

As formas de onda da curva de resposta em frequência para a amplitude e a fase da relação de tensão do TPC são mostradas nas Figuras 5.4 e 5.5, respectivamente.

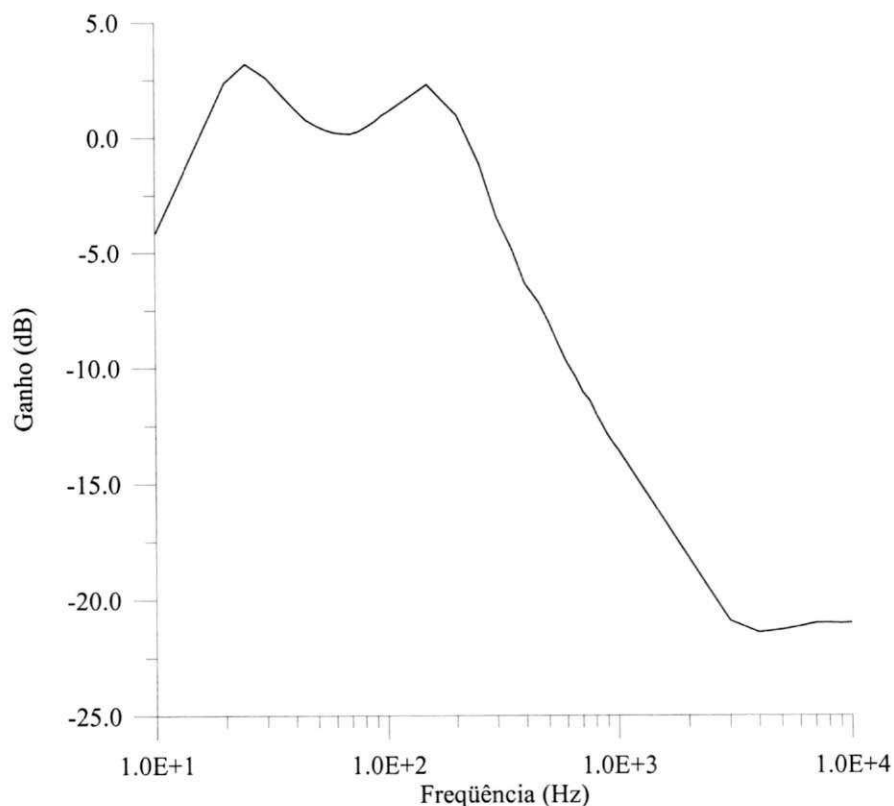


Figura 5.4 – Amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório.

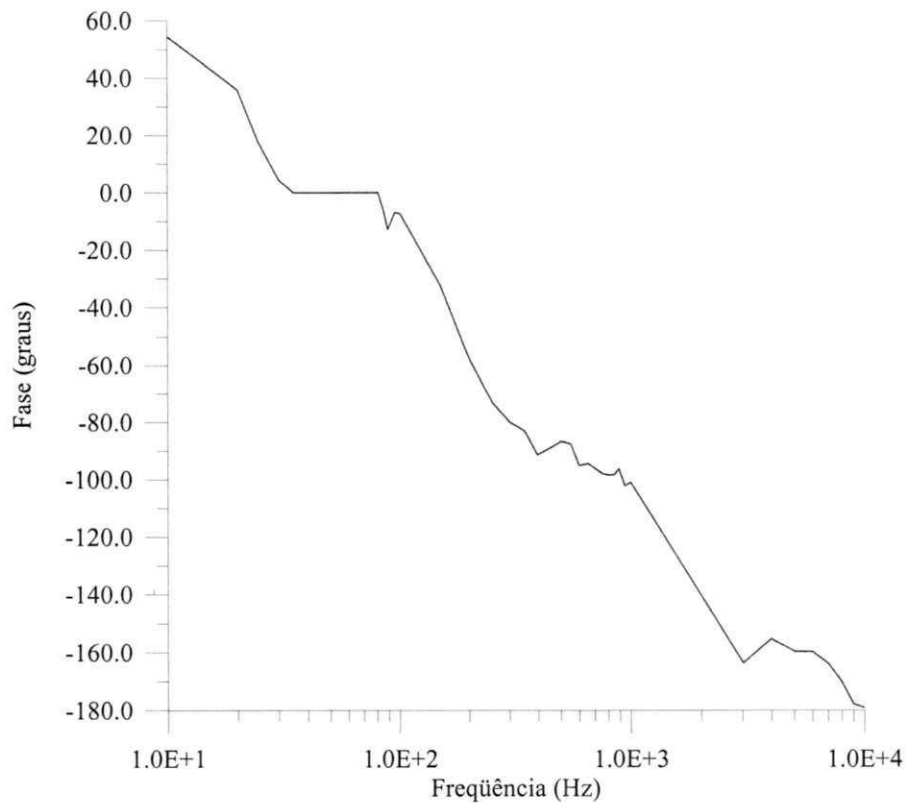


Figura 5.5 – Fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida em laboratório.

5.3 Determinação da Característica Não Linear do TP Indutivo

A tensão senoidal fornecida por um autotransformador variável (400 V e 10 kVA) foi aplicada entre os terminais secundários $X_1 - X_3$ e gradualmente aumentada até 251,3 V (2,2 p.u.), conforme mostra a Figura 5.6. A Tabela 5.2 apresenta os valores de corrente e tensão rms medidos no secundário do TPC, bem como os valores de pico de fluxo e corrente convertidos a partir da rotina desenvolvida no trabalho de NEVES & DOMMEL [1993], cujos procedimentos são descritos no Apêndice A.

Para estimar a saturação do núcleo magnético do TP indutivo, a indutância de núcleo de ar foi calculada de forma aproximada pela expressão apresentada na Equação (5.3):

$$L_{sat} = \frac{N^2 \mu_o A}{l} \tag{5.3}$$

Nesta equação, $N = 81$ é o número de espiras do enrolamento secundário, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética do vácuo, $A = 91,5 \text{ cm}^2$ é área da seção transversal do núcleo magnético e $l = 71,28 \text{ m}$ é o comprimento estimado do enrolamento secundário.

Para um elemento que contém núcleo de ferro, como o núcleo magnético do TP indutivo, considera-se que a saturação ocorra com uma densidade de fluxo aproximadamente igual a 2,1 T, que corresponde ao fluxo $\lambda_{joelho} = 1,556415 \text{ V.s}$. O valor correspondente de i_{joelho} foi calculado a partir da rotina de NEVES & DOMMEL [1993] depois de uma extrapolação logarítmica dos pontos originais da curva de tensão e corrente $V_{rms} - I_{rms}$. Este cálculo corresponde ao penúltimo ponto dos dados da curva de pico de fluxo e corrente $\lambda - i$, mostrada na Tabela 5.2. A inclinação do último segmento da curva de fluxo e corrente é a indutância de núcleo de ar L_{sat} .

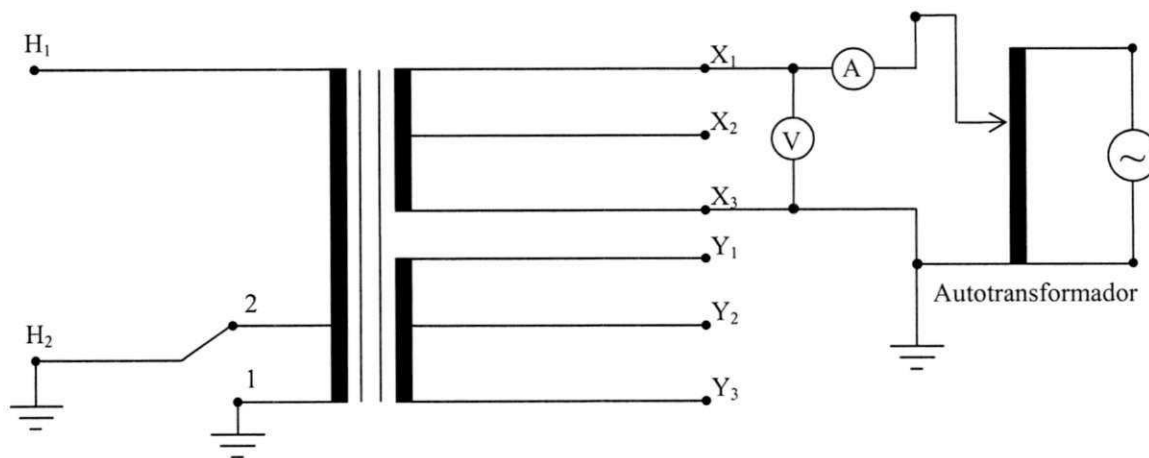


Figura 5.6 – Montagem para medição da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do TP indutivo do TPC de 230 kV.

Tabela 5.2 – Valores de corrente e tensão rms medidos no TP indutivo do TPC de 230 kV e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].

Valores rms Medidos		Valores de Pico Calculados	
Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Fluxo (V.s)
0,054	6,87	0,076368	0,025772
0,505	50,40	0,720881	0,189066
1,022	105,80	1,429369	0,396889
1,555	170,10	2,147414	0,638099
1,802	199,50	2,511675	0,748388
2,000	215,00	2,989304	0,806533
2,290	230,20	3,662012	0,863553
2,624	240,80	4,587227	0,903317
3,090	251,30	5,712037	0,942706
		55,527018	1,556415
		5552,7018	1,562242

A característica não linear do TP indutivo do TPC de 230 kV, até o ponto de joelho, é mostrada na Figura 5.7 abaixo.

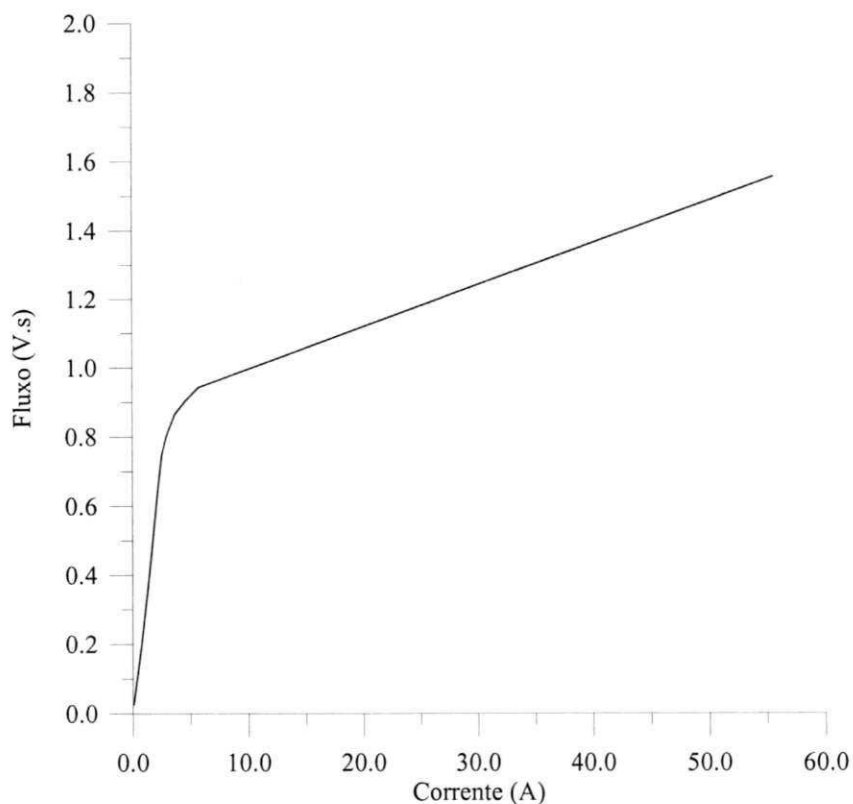


Figura 5.7 – Característica não linear do TP indutivo do TPC de 230 kV.

5.4 Determinação da Curva de Saturação do Reator de Compensação

Para a medição da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator de compensação foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Autotransformador variável (240 V e 1,5 kVA).
- Transformador elevador monofásico (230/1910 V e 1,15 kVA).
- Voltímetro digital.
- Amperímetro digital.

A Figura 5.8 apresenta o arranjo experimental utilizado para levantar a curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator de compensação.

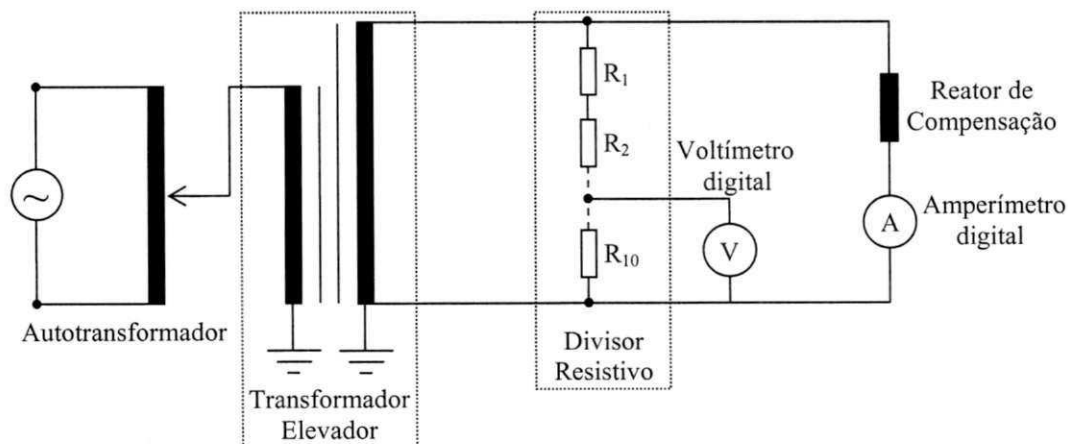


Figura 5.8 – Montagem para medição da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator de compensação.

O transformador elevador foi utilizado com o objetivo de fornecer níveis de tensões que pudessem levar à saturação do núcleo de ferro do reator de compensação. O divisor resistivo com redução para $\frac{1}{10}$ foi necessário devido ao nível de tensão aplicada ser superior ao limite de 750 V estabelecido pelo voltímetro. A Tabela 5.3 mostra os valores de corrente e tensão rms medidos no reator de compensação, bem como os valores calculados para o pico de corrente e fluxo.

Tabela 5.3 – Valores de corrente e tensão rms medidos no reator de compensação e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].

Valores rms Medidos		Valores de Pico Calculados	
Corrente (mA)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Fluxo (V.s)
0,68	18,34	0,962	0,068799
5,78	156,60	8,173	0,587456
10,80	292,80	15,271	1,098386
15,98	432,10	22,632	1,620945
22,69	615,10	32,031	2,307436
38,17	1027,90	54,142	3,855980
45,90	1213,90	66,255	4,553725
55,10	1430,50	79,417	5,366260
59,30	1529,10	85,444	5,736140
66,80	1704,00	96,215	6,392246

A Figura 5.9 mostra a curva de saturação do reator de compensação do TPC de 230 kV.

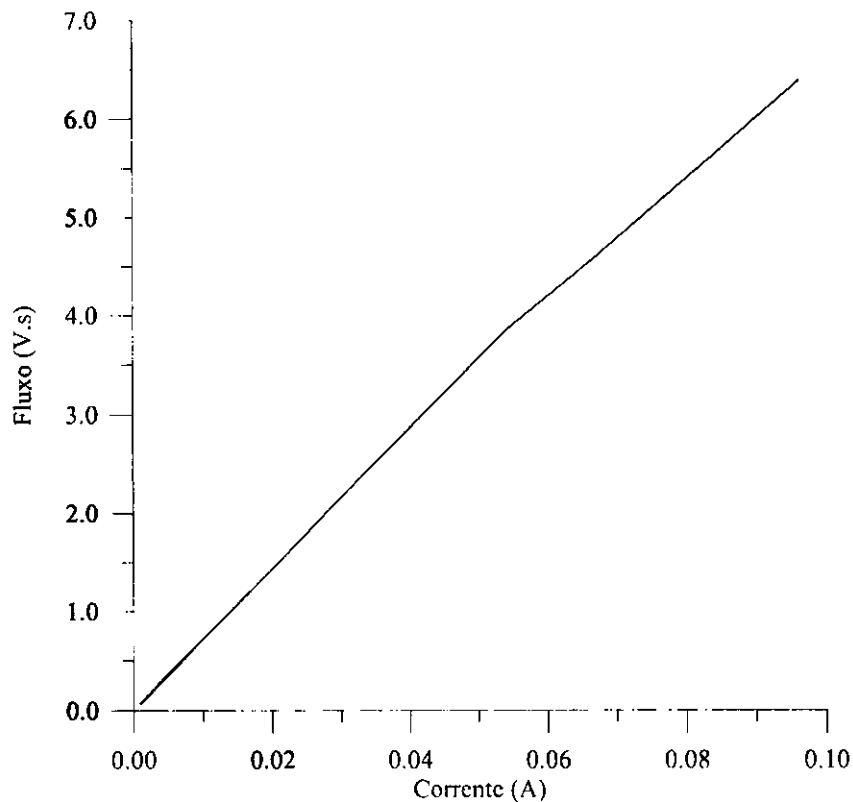


Figura 5.9 – Curva de saturação do reator de compensação do TPC de 230 kV.

Conforme mostra a Figura 5.9, o reator de compensação não saturou. Se o reator atingisse a saturação, deixara o TPC fora de sintonia.

5.5 Determinação da Curva de Saturação do Reator do CSF

Os equipamentos utilizados para a determinação da curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator do circuito supressor de ferroressonância foram os seguintes:

- Autotransformador variável (240 V e 1,5 kVA).
- Transformador elevador monofásico (230/1910 V e 1,15 kVA).
- Voltímetro digital.
- Amperímetro digital.

O arranjo experimental utilizado para levantar a curva $V_{rms} - I_{rms}$ do reator do circuito supressor de ferroressonância é bastante semelhante à montagem mostrada na Figura 5.8. A Tabela 5.4 mostra os valores de corrente e tensão rms medidos no reator do CSF, e os valores de pico de corrente e fluxo calculados.

Tabela 5.4 – Valores de corrente e tensão rms medidos no reator do CSF e valores de pico de corrente e fluxo calculados através da rotina de NEVES & DOMMEL [1993].

Valores rms Medidos		Valores de Pico Calculados	
Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Fluxo (V.s)
0,11	18,64	0,155563	0,069925
0,87	147,93	1,230196	0,554932
1,48	250,62	2,096421	0,940155
2,26	384,00	3,189890	1,440506
2,96	502,25	4,191832	1,884099
3,64	615,10	5,167437	2,307436
5,02	840,81	7,136783	3,154146
5,45	907,91	7,799772	3,405859
6,46	1049,23	9,419773	3,935995
7,57	1183,44	11,276484	4,439460

A curva de saturação do reator do circuito supressor de ferroressonância do TPC de 230 kV é mostrada na Figura 5.10 abaixo.

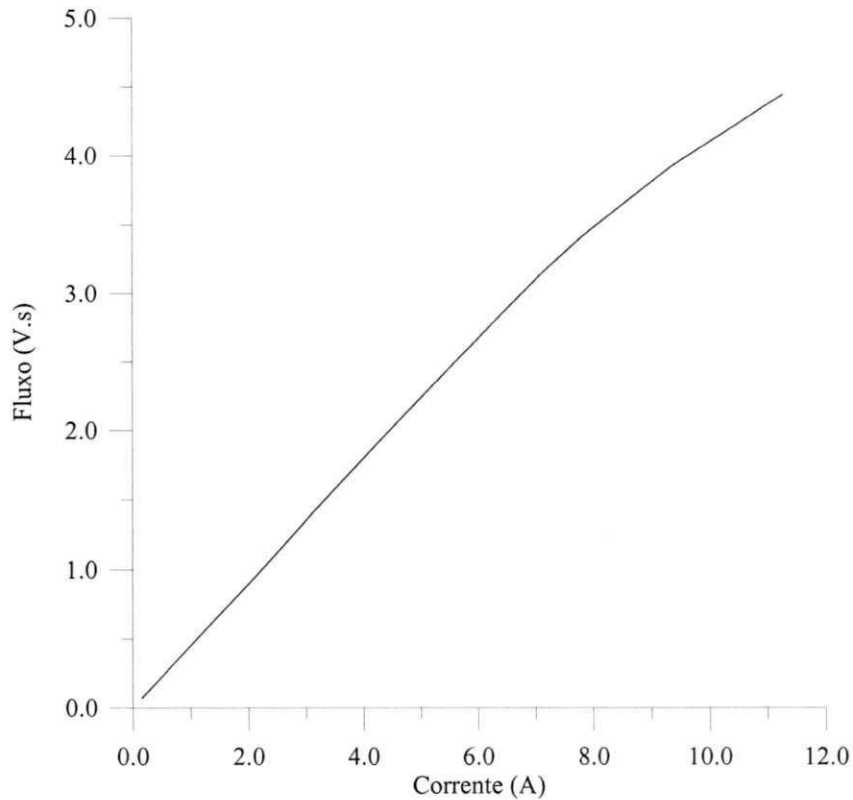


Figura 5.10 – Curva de saturação do reator do CSF do TPC de 230 kV.

Conforme esperado, para um CSF composto por um circuito ressonante paralelo, o reator não deve ser saturável.

5.6 Estimativa da Característica Não Linear do Pára-raios que Compõe o Circuito de Proteção

O circuito de proteção do TPC de 230 kV é composto por um pára-raios de carboneto de silício (SiC) conectado em paralelo com a capacitância C_2 da coluna capacitiva. Neste trabalho de tese, o pára-raios de SiC é representado por um centelhador em série com um resistor não linear com característica $v - i$, de acordo com a Figura 5.11.

Para estimar a característica $v - i$ do resistor não linear do pára-raios, foi medida inicialmente a tensão de disparo do centelhador a frequência industrial na sala do Kit de Alta Tensão da UFCG. A tensão fornecida por um transformador regulador (220 V e

10 kVA) e elevada por um transformador de alta tensão (100 kV e 10 kVA) foi aplicada gradativamente entre os terminais do pára-raios, conforme mostra a Figura 5.11, até o disparo do centelhador. As medições foram feitas a partir de um divisor capacitivo, utilizando um voltímetro de pico (módulo SM76 do Kit). Após 7 medições, o valor médio da tensão disruptiva a frequência industrial foi 58,5 kV rms.

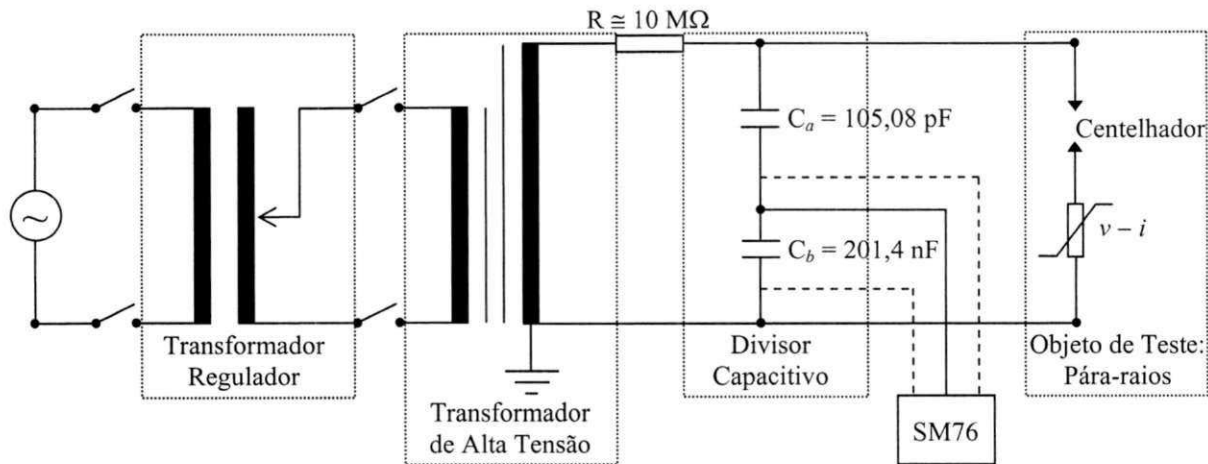


Figura 5.11 – Montagem para a medição da tensão de disparo do pára-raios do TPC de 230 kV.

De acordo com a Norma ANSI/IEEE C62.1-1989 [ANSI/IEEE STD C62.1-1989, 1989], para um pára-raio de carboneto de silício com centelhador, a tensão de disparo a frequência industrial não deve ser menor do que 1,5 vezes a sua tensão nominal. Neste trabalho de tese, a tensão nominal do pára-raios ensaiado foi considerada igual a 39 kV rms, visto que a sua tensão de disparo a frequência industrial foi de 58,5 kV rms.

Um pára-raios de SiC de 39 kV apresenta uma tensão residual V_{10} associada ao impulso de corrente de 10 kA e 8/20 μ s igual a 89,7 kV. Esse valor de V_{10} foi obtido da Norma ANSI/IEEE C62.2-1987 [ANSI/IEEE STD C62.2-1987, 1987].

A característica não linear $v - i$ é obtida como percentagem da tensão residual V_{10} . Esta característica depende também da forma de onda aplicada ao pára-raios. Neste trabalho de tese, foi considerada uma frente de onda de 2 ms, pois as medições da tensão de disparo do pára-raios foram feitas em 60 Hz. A estimativa da percentagem foi

baseada na característica típica de um pára-raios de SiC de 6 kV, fornecida pelo fabricante [IEEE SURGE PROTECTIVE DEVICES COMMITTEE, 1981]. A Tabela 5.5 mostra a característica não linear do pára-raios do TPC de 230 kV.

Tabela 5.5 – Característica não linear do pára-raios do TPC de 230 kV.

Corrente (A _{pico})	Tensão de descarga (kV _{pico})
100	20,8
200	27,9
500	39,0
1000	42,9
2000	45,5

5.7 Resumo

Neste capítulo foram feitas medições de resposta em frequência da relação de tensão do TPC de 230 kV, medições de curvas de saturação dos componentes do TPC que contêm núcleo de ferro e medições da característica não linear do pára-raios do circuito de proteção do TPC.

Os valores de resposta em frequência do TPC serão utilizados como dados de entrada na rotina de estimação de parâmetros que utiliza o método de ajuste apresentado no capítulo 4. As características não lineares do TP indutivo e do pára-raios do circuito de proteção serão incluídas no modelo do TPC, a fim de tornar mais realista as simulações digitais no domínio do tempo. Como será visto no próximo capítulo, a importância da representação do circuito de proteção, por exemplo, reside no fato de que a resposta transitória do TPC poderá se distanciar da realidade, caso o circuito de proteção não seja incluído no modelo do TPC.

Capítulo 6

Validação do Modelo Proposto

Este capítulo destina-se a validação do modelo proposto do TPC. No domínio da frequência, são apresentados os resultados obtidos com o método de ajuste não linear implementado para a estimação de parâmetros do TPC. No domínio do tempo, são realizadas medições de sobretensões transitórias, como ensaio de ferroressonância e chaveamento da tensão intermediária do TPC de 230 kV. A validação consiste na comparação entre os resultados de medições em laboratório e os resultados de simulações digitais.

Além disso, são apresentados estudos de transitórios eletromagnéticos que envolvem simulações de análise de sensibilidade no domínio do tempo para os circuitos destinados a supressão de ferroressonância e a proteção contra sobretensões, simulações dos principais fatores que afetam a resposta transitória do TPC, bem como simulações de corte de corrente indutiva e, por fim, simulações de sobretensões devido à manobra de chave seccionadora nas proximidades do TPC localizado em uma subestação.

6.1 Caso Teste: Parâmetros de um TPC de 138 kV

Com o objetivo de certificar-se de que a rotina desenvolvida em FORTRAN [PRESS et al, 1992] para o cálculo dos parâmetros do TPC estava funcionando adequadamente, foi utilizado o caso teste de um TPC com tensão nominal de 138 kV reportado na literatura [KOJOVIC et al, 1994], cujos valores dos parâmetros lineares R , L e C são apresentados na Tabela 6.1 abaixo.

**Tabela 6.1 – Parâmetros originais do TPC de 138 kV
reportado na literatura.**

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

A partir desses parâmetros, foram geradas 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 a rotina de ajuste não linear implementada, com o objetivo de recalculer os parâmetros do TPC. Um conjunto de estimativa inicial, construído a partir de valores fisicamente possíveis para os parâmetros de um circuito que contém resistores, indutores e capacitores, é mostrado na Tabela 6.2. Os parâmetros recalculados após o processo de ajuste são mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 – Estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 138 kV.

$R_c = 174 \Omega$	$L_p = 7 \text{ H}$	$L_{f2} = 270 \text{ mH}$
$L_c = 17 \text{ H}$	$R_m = 34 \text{ M}\Omega$	$R_f = 40 \Omega$
$C_c = 58 \text{ pF}$	$L_m = 9 \text{ kH}$	$M = 193 \text{ mH}$
$C_p = 5 \text{ pF}$	$L_{f1} = 650 \text{ mH}$	–
$R_p = 3 \text{ k}\Omega$	$C_f = 7 \mu\text{F}$	–

Tabela 6.3 – Parâmetros do TPC de 138 kV recalculados após o processo de ajuste.

$R_c = 3,25 \Omega$	$L_p = 2,88 \text{ H}$	$L_{f2} = 274,3 \text{ mH}$
$L_c = 56,5 \text{ H}$	$R_m = 1,47 \text{ M}\Omega$	$R_f = 36,8 \Omega$
$C_c = 126,9 \text{ pF}$	$L_m = 10,9 \text{ kH}$	$M = 192,7 \text{ mH}$
$C_p = 151,4 \text{ pF}$	$L_{f1} = 649,8 \text{ mH}$	–
$R_p = 833,5 \Omega$	$C_f = 7,5 \mu\text{F}$	–

Os parâmetros $C_1 = 5,65 \text{ nF}$ e $C_2 = 81,1 \text{ nF}$ não entraram no processo de ajuste por uma questão de opção dentro da rotina, pois normalmente esses valores são fornecidos pelo fabricante.

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram que as curvas analítica (obtida com os parâmetros originais do TPC) e ajustada de amplitude e fase, respectivamente, da relação de tensão do TPC de 138 kV são coincidentes.

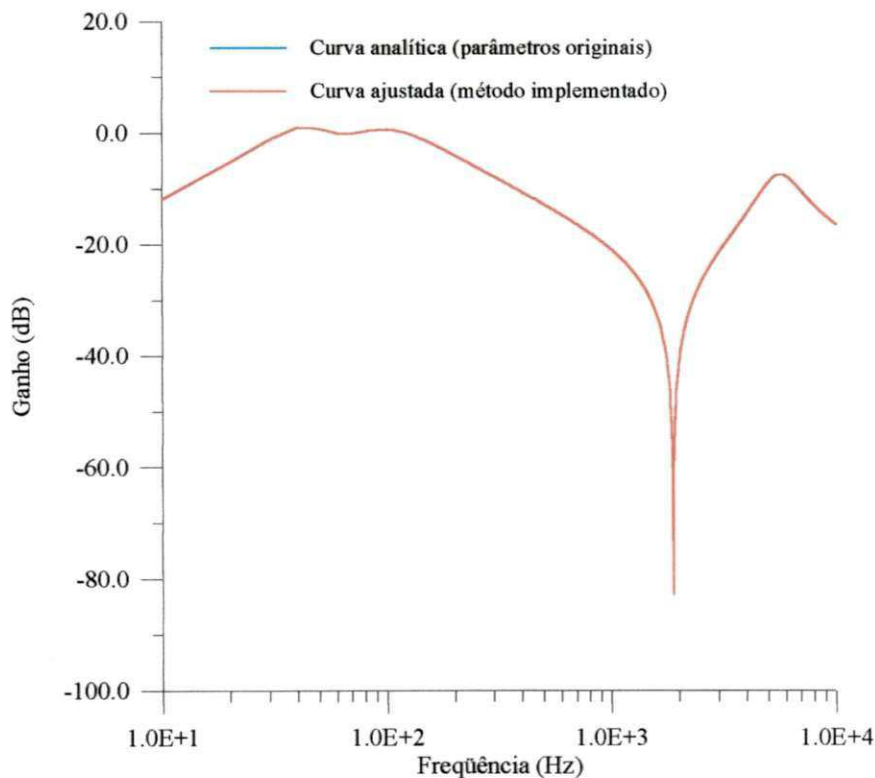


Figura 6.1 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC de 138 kV obtidas a partir dos seus parâmetros originais e do método de ajuste implementado.

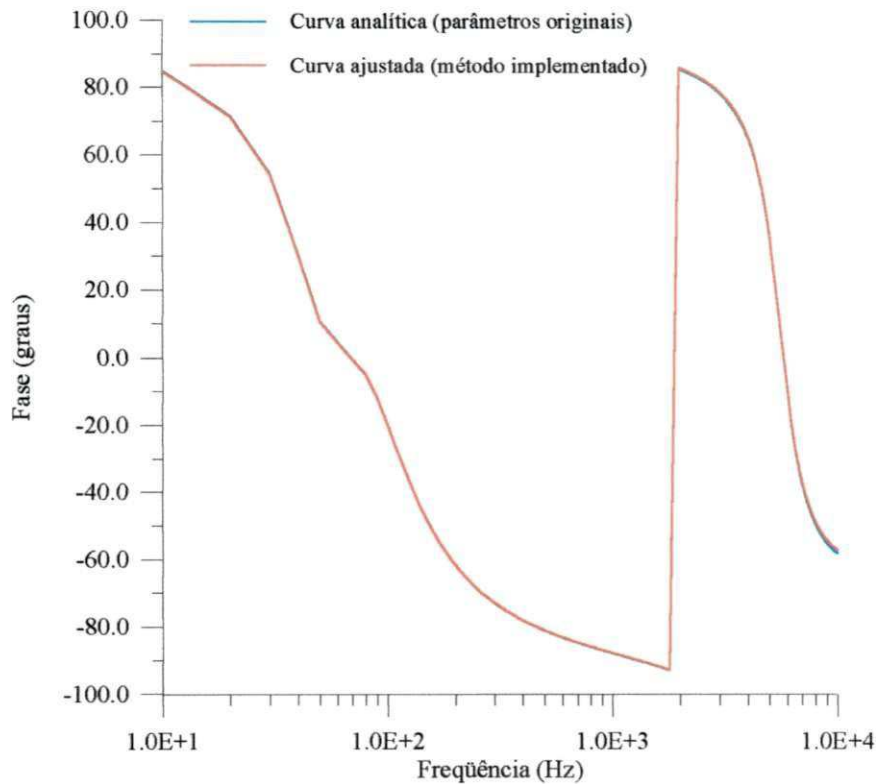


Figura 6.2 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 138 kV obtidas a partir dos seus parâmetros originais e do método de ajuste implementado.

Na Tabela 6.4 são mostrados os erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 138 kV calculados no início do processo iterativo e após os ajuste de parâmetros. Os resultados mostram um bom desempenho do método implementado.

Tabela 6.4 – Erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 138 kV calculados com a estimativa inicial para os parâmetros e com os parâmetros ajustados.

	Parâmetros iniciais	Parâmetros ajustados
	Erro médio	Erro médio
Amplitude	139,8 %	0,026 %
Fase	94,8°	0,39°

Para o conjunto de estimativas iniciais mostradas na Tabela 6.2, a rotina convergiu em 6 iterações. Esta é uma das mais importantes características do método de Levenberg-Marquardt: o rápido decrescimento da função de mérito nas primeiras iterações.

Mesmo para outros conjuntos de parâmetros iniciais que produzam erros bastante elevados de amplitude e fase, a rotina implementada ainda converge. Embora

alguns parâmetros recalculados possam diferir dos parâmetros originais, as curvas de resposta em frequência ajustadas são aproximadamente coincidentes com as curvas de resposta em frequência geradas a partir dos parâmetros originais do TPC de 138 kV. A explicação para isso, é que a curva de resposta em frequência do TPC apresenta baixa sensibilidade à variação desses parâmetros, embora eles não possam ser desprezados.

A partir dos resultados analisados, é possível afirmar que a rotina implementada pode ser usada para obter os parâmetros do TPC, tomando-se cuidados com alguns parâmetros que produzem baixa sensibilidade na curva de resposta em frequência.

6.2 Parâmetros do TPC de 230 kV a Partir de Medições

Os parâmetros do 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. Um conjunto de estimativa inicial para os parâmetros, bem como os parâmetros ajustados são mostrados nas Tabelas 6.5 e 6.6, respectivamente. As Figuras 6.3 e 6.4 mostram as curvas medida e ajustada de amplitude e fase, respectivamente, da relação de tensão do TPC.

Tabela 6.5 – Estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 230 kV.

$R_c = 23 \text{ k}\Omega$	$L_p = 70 \text{ H}$	$L_{f2} = 95 \text{ mH}$
$L_c = 47 \text{ H}$	$R_m = 90 \Omega$	$R_f = 4 \Omega$
$C_c = 47 \text{ nF}$	$L_m = 300 \text{ mH}$	$M = 10 \text{ mH}$
$C_p = 43 \text{ pF}$	$L_{f1} = 10 \text{ mH}$	–
$R_p = 70 \text{ k}\Omega$	$C_f = 140 \mu\text{F}$	–

Tabela 6.6 – Parâmetros ajustados do TPC de 230 kV.

$R_c = 9,1 \text{ k}\Omega$	$L_p = 114,7 \text{ H}$	$L_{f2} = 47,39 \text{ mH}$
$L_c = 86,3 \text{ H}$	$R_m = 50,6 \Omega$	$R_f = 4,99 \Omega$
$C_c = 493,2 \text{ nF}$	$L_m = 700 \text{ mH}$	$M = 9,31 \text{ mH}$
$C_p = 9,3 \text{ pF}$	$L_{f1} = 10,87 \text{ mH}$	–
$R_p = 920 \Omega$	$C_f = 166,39 \mu\text{F}$	–

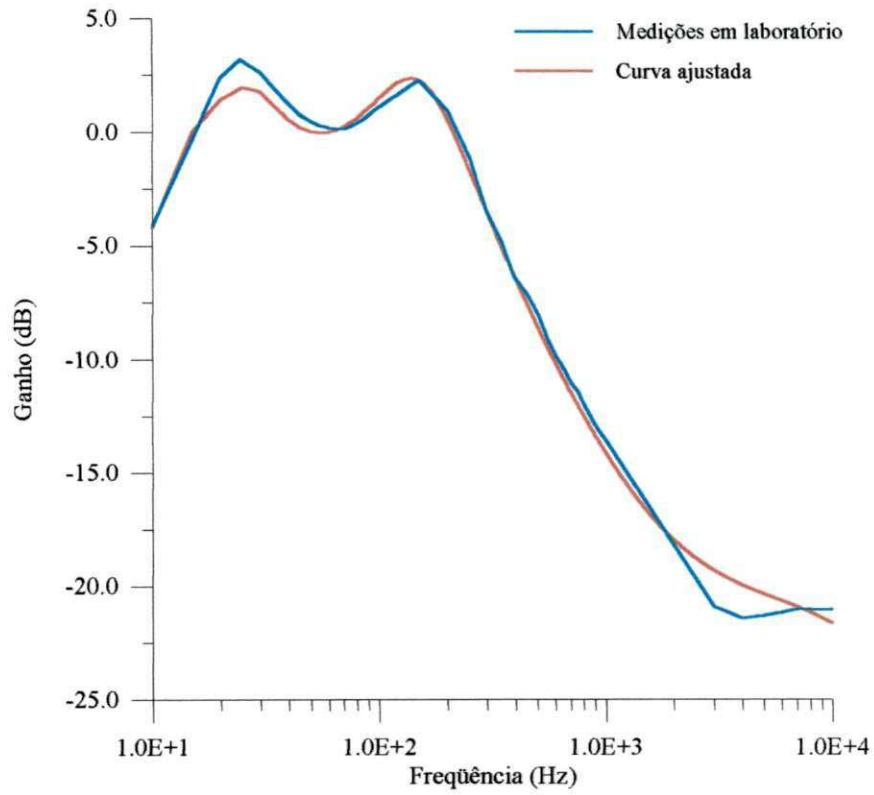


Figura 6.3 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada pelo método implementado.

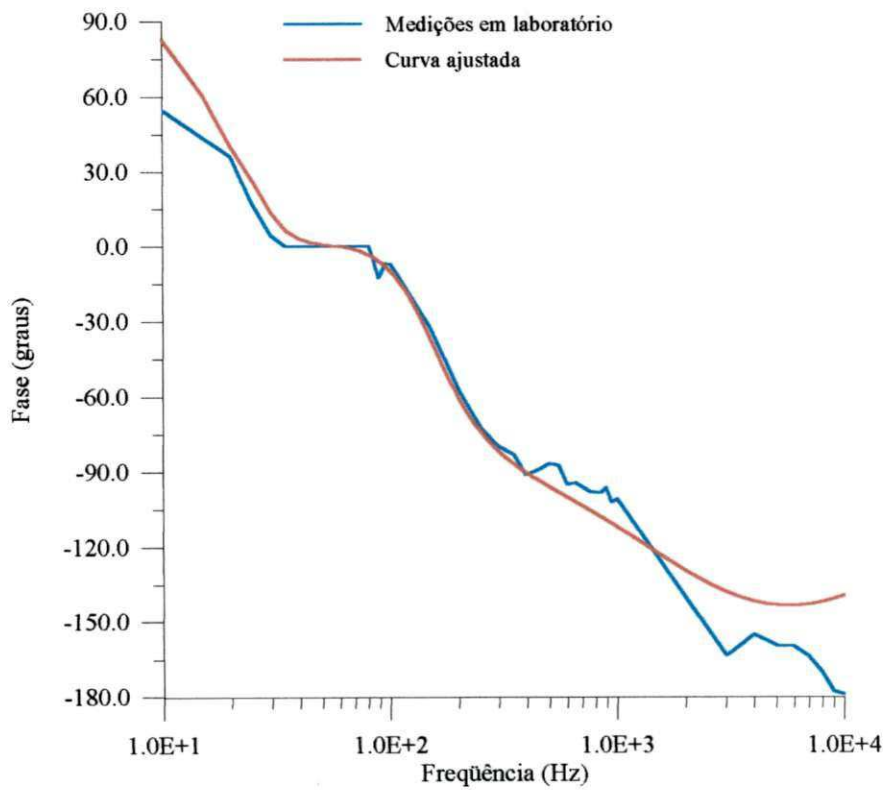


Figura 6.4 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC de 230 kV medida e ajustada pelo método implementado.

Os erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 230 kV calculados no início do processo iterativo e após o ajuste de parâmetros são mostrados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Erros de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 230 kV calculados com a estimativa inicial para os parâmetros e com os parâmetros ajustados.

	Parâmetros iniciais	Parâmetros ajustados
	Erro médio	Erro médio
Amplitude	102,4 %	5,2 %
Fase	13,9°	8,9°

Com base nas Figuras 6.3 e 6.4 e na Tabela 6.7, pode-se afirmar que os erros são relativamente pequenos para quase toda a faixa de frequência, especialmente entre 20 e 400 Hz, que é a faixa de frequência com maior probabilidade de ocorrência de fenômenos transitórios em TPC.

Um aspecto importante no processo de estimação paramétrica é que, muitas vezes, os parâmetros ajustados não coincidem com os parâmetros de projeto do TPC, pois estes normalmente são obtidos a 60 Hz e os parâmetros ajustados são obtidos de forma a reproduzirem a mesma resposta em frequência do TPC, obtida em ensaio de laboratório.

No entanto, em algumas situações, é possível aplicar restrições para realizar um ajuste fino dos parâmetros previamente conhecidos em 60 Hz com precisão razoável, que são os casos da resistência do enrolamento primário (R_p) e da indutância do reator de compensação (L_c). Na rotina de ajuste implementada, esses parâmetros podem ficar dentro de uma faixa de tolerância estabelecida pelo usuário que, no caso do TPC de 230 kV, foi de 20 %. Tal procedimento impõe limitações ao processo de ajuste, porém fornece resultados mais realistas.

Com o objetivo de analisar mais uma vez a importância das capacitâncias parasitas do reator de compensação (C_c) e do enrolamento primário (C_p) do modelo do

TPC, foi feita uma análise de sensibilidade da curva de amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV, considerando o modelo completo (parâmetros da Tabela 6.6) e o modelo usando os valores da Tabela 6.6 com C_c e C_p iguais a zero, conforme mostra a Figura 6.5. Nota-se uma grande diferença entre as curvas a partir de 100 Hz, implicando que a representação das referidas capacitâncias precisa ser levada em conta no modelo do TPC.

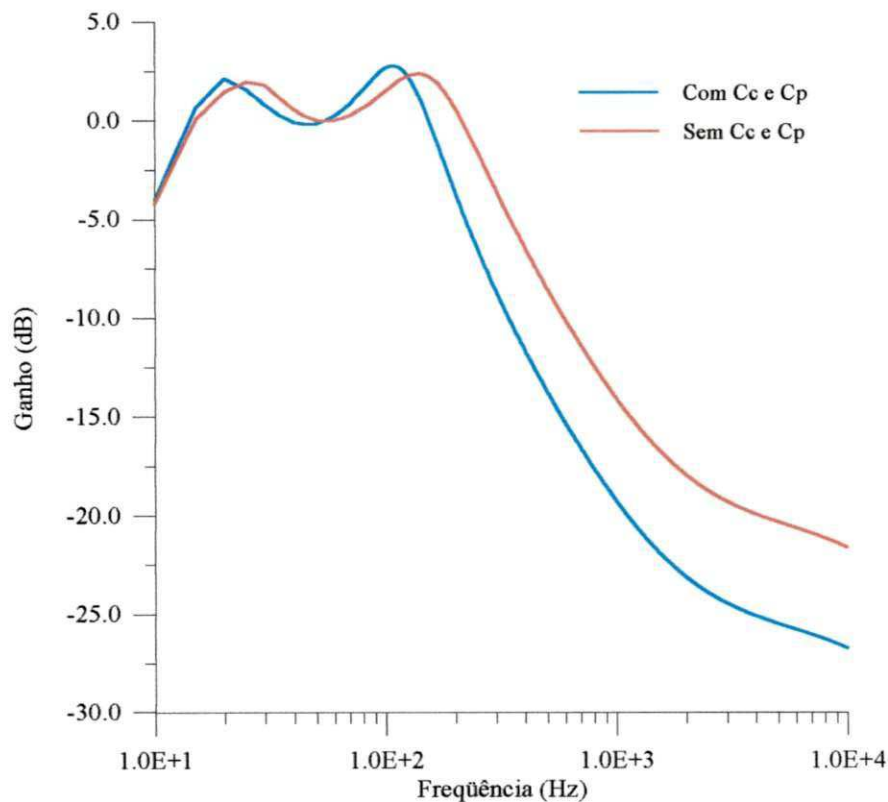


Figura 6.5 – Sensibilidade da curva de amplitude da relação de tensão do TPC de 230 kV com relação às capacitâncias parasitas C_c e C_p .

6.3 Modelo Proposto do TPC

Após a obtenção dos parâmetros lineares do TPC e das características dos seus elementos não lineares a partir de medições em laboratório, uma proposta de modelo do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos é mostrada na Figura 6.6. O TP indutivo é representado por um transformador monofásico de três enrolamentos. A indutância de magnetização L_m é substituída por uma indutância não linear, cuja

característica $\lambda - i$ é mostrada na Tabela 5.2, conectada a um dos terminais secundários do TPC. O valor linear de L_m praticamente não afeta os resultados de simulação de transitórios, embora sensibilidades elevadas sejam observadas na região de saturação.

A modelagem dos reatores de compensação e do CSF é feita considerando os seus valores lineares obtidos a partir do processo de estimação de parâmetros apresentado neste trabalho, uma vez que tais elementos não atingiram a saturação.

O circuito de proteção, composto pelo pára-raios de SiC, está incluído no modelo do TPC. Sua característica não linear $v - i$ é mostrada na Tabela 5.5. As cargas Z_{b1} e Z_{b2} representam as cargas impostas ao TPC pelos relés de proteção. Entre os pontos A e B o sistema é representado pelo seu equivalente de Thévenin.

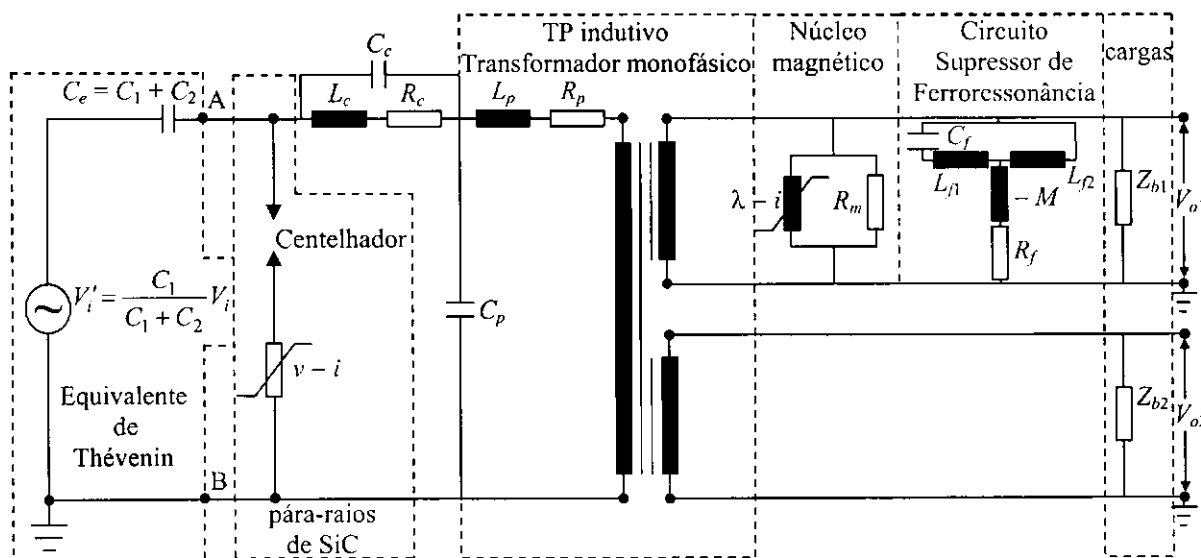


Figura 6.6 – Modelo do TPC para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.

O modelo proposto apresenta contribuições no cálculo dos parâmetros do TPC a partir de medições de resposta em frequência e leva em consideração os elementos não lineares, tornando assim, mais realistas as simulações de transitórios eletromagnéticos.

6.4 Manobra de Disjuntor no Lado da Tensão Intermediária do TPC

Para obter o sinal de tensão no secundário do TPC devido à manobra de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária, foram utilizados:

- Disjuntor (17,5 kV e 630 A).
- Resistor de alta tensão (288 MΩ).
- Décadas resistivas.
- Osciloscópio digital de 4 canais (100 MHz).
- Pontas de prova para osciloscópio.
- Microcomputador.

A tensão de 17,4 kV rms fornecida pela fonte de tensão do laboratório (dois transformadores em cascata) foi aplicada ao disjuntor. Este, por sua vez, foi conectado ao divisor resistivo e à ligação em paralelo dos capacitores C_1 e C_2 da coluna capacitiva do TPC, de forma a obter a tensão intermediária, conforme mostra a Figura 6.7. A resposta transitória no secundário do TPC foi medida durante a manobra de fechamento seguida de abertura do disjuntor. Duas décadas resistivas de 1 MΩ foram utilizadas como divisor de tensão no secundário do TPC e uma outra década foi usada no divisor de alta tensão. Ambas as tensões, intermediária e secundária, foram lidas com o osciloscópio digital.

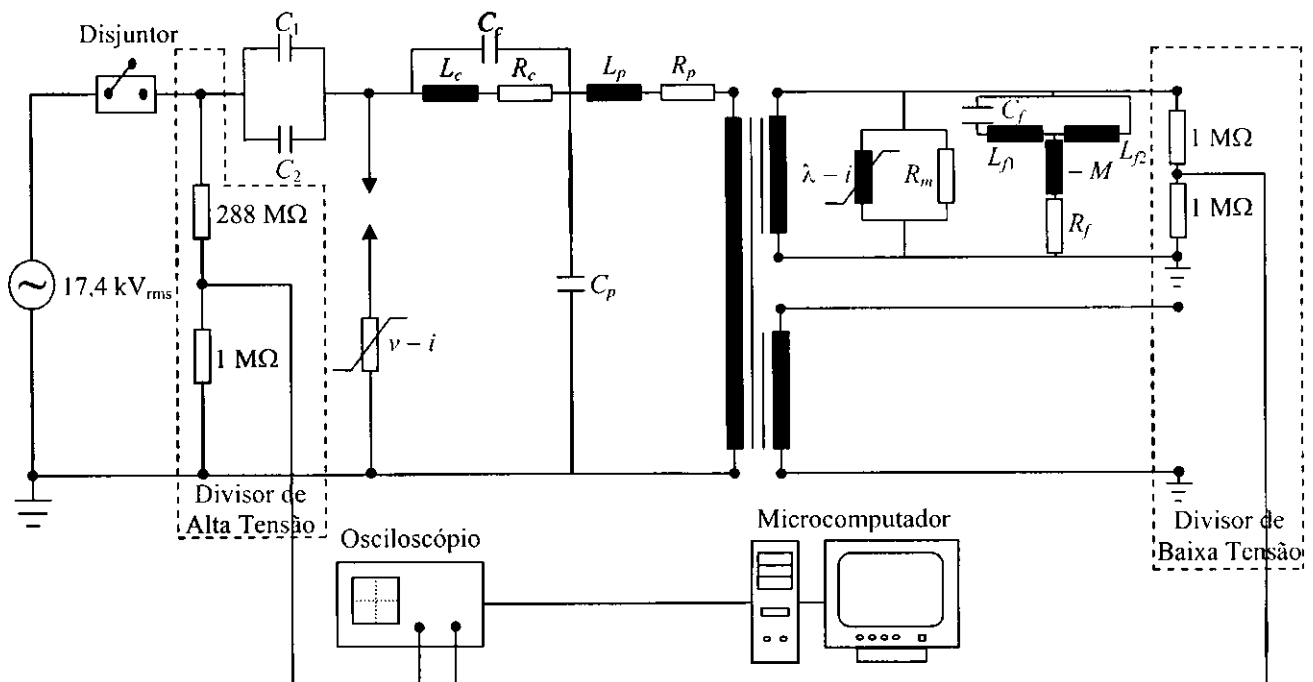


Figura 6.7 – Montagem para medição da tensão transitória do TPC devido a operação de fechamento seguida de abertura de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária.

O osciloscópio possui um módulo de comunicação RS-232 serial padrão de 8 bits que permite comunicação com o microcomputador para aquisição de dados. Para armazenar os dados de tensão foi utilizada uma rotina em MATLAB® [THE MATHWORKS INC., 1992]. A Figura 6.8 mostra o sinal da tensão transitória nos terminais secundários do TPC quando é feita a manobra do disjuntor. A curva em azul representa os resultados obtidos em laboratório e a curva em vermelho representa os resultados de simulação obtidos com o modelo proposto.

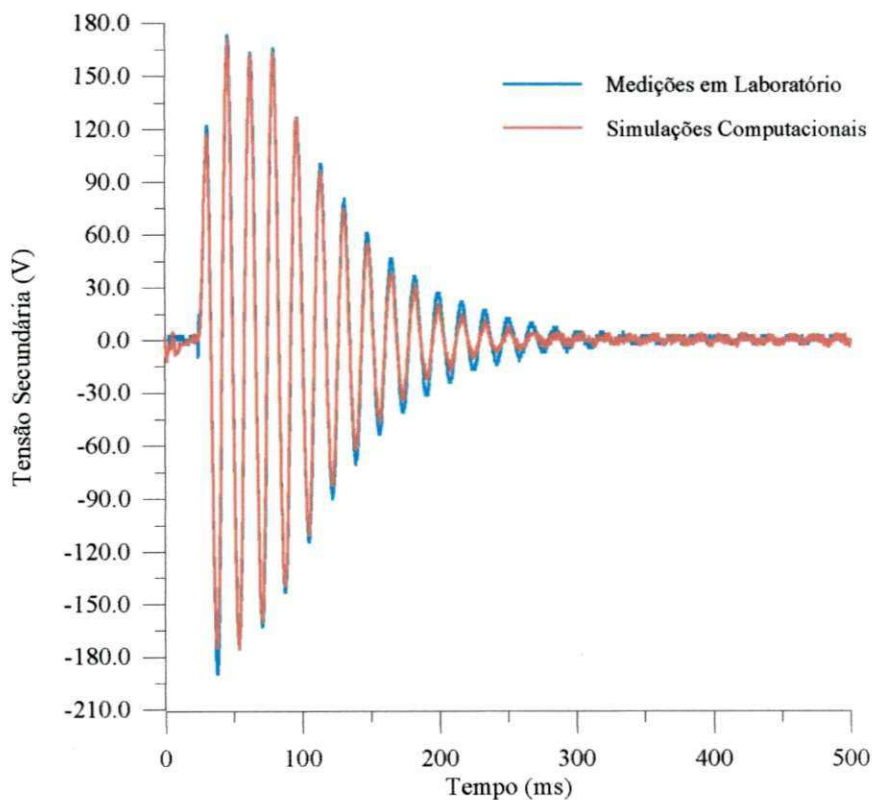


Figura 6.8 – Formas de onda medida e simulada da tensão secundária do TPC quando é realizada a manobra de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária.

Nas simulações, os pontos registrados da forma de onda da tensão intermediária do TPC foram usados como sinal da fonte. O ATP [LEUVEN EMTP CENTER, 1987] foi utilizado para realizar as simulações por apresentar um limite de linhas no arquivo de dados maior que o limite da versão adquirida do MICROTRAN® [MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION, 1999].

Nesta operação de manobra, o tempo em que o disjuntor permanece fechado é de aproximadamente 60 ms. Como era de se esperar, a tensão passa por um regime transitório quando os contatos do disjuntor são fechados no instante $t = 24$ ms e, após a abertura automática do disjuntor, a tensão tende a ser zero. Pode-se observar na Figura 6.8 que as formas de onda de tensão obtidas com as medições e com o modelo do TPC apresentam boa concordância, o que dá indicação de precisão do modelo.

Pode-se observar ainda na Figura 6.8 que a forma de onda simulada é um pouco mais amortecida que a forma de onda obtida em laboratório. A explicação para isso pode estar relacionada com a obtenção de algum parâmetro do modelo responsável por esta atenuação, uma vez que a curva de amplitude da resposta em frequência do TPC reproduzida com os parâmetros ajustados já apresenta um erro de 5,2 % comparado com a resposta em frequência obtida em laboratório.

6.5 Ensaio de Ferroressonância

O ensaio de ferroressonância no TPC foi realizado tomando-se como base a Norma IEC 186 [IEC 186, 1969]. Segundo a norma, o 1º ensaio de ferroressonância em transformadores de potencial capacitivos estabelece que o equipamento deve ser energizado a 120 % de sua tensão nominal em regime permanente, com carga nula no enrolamento secundário a ser curto-circuitado. O curto-circuito deve ser mantido por um tempo mínimo de 3 ciclos (base 60 Hz).

No ensaio de ferroressonância foram utilizados os mesmos equipamentos e instrumentos que o ensaio de manobra de disjuntor no lado da tensão intermediária do TPC. A tensão aplicada ao divisor capacitivo do Laboratório de Alta Tensão e à conexão paralela dos capacitores C_1 e C_2 da coluna capacitiva do TPC foi de 20,8 kV rms, conforme

mostra a Figura 6.9. O curto-circuito no terminal secundário do TPC foi feito com o disjuntor.

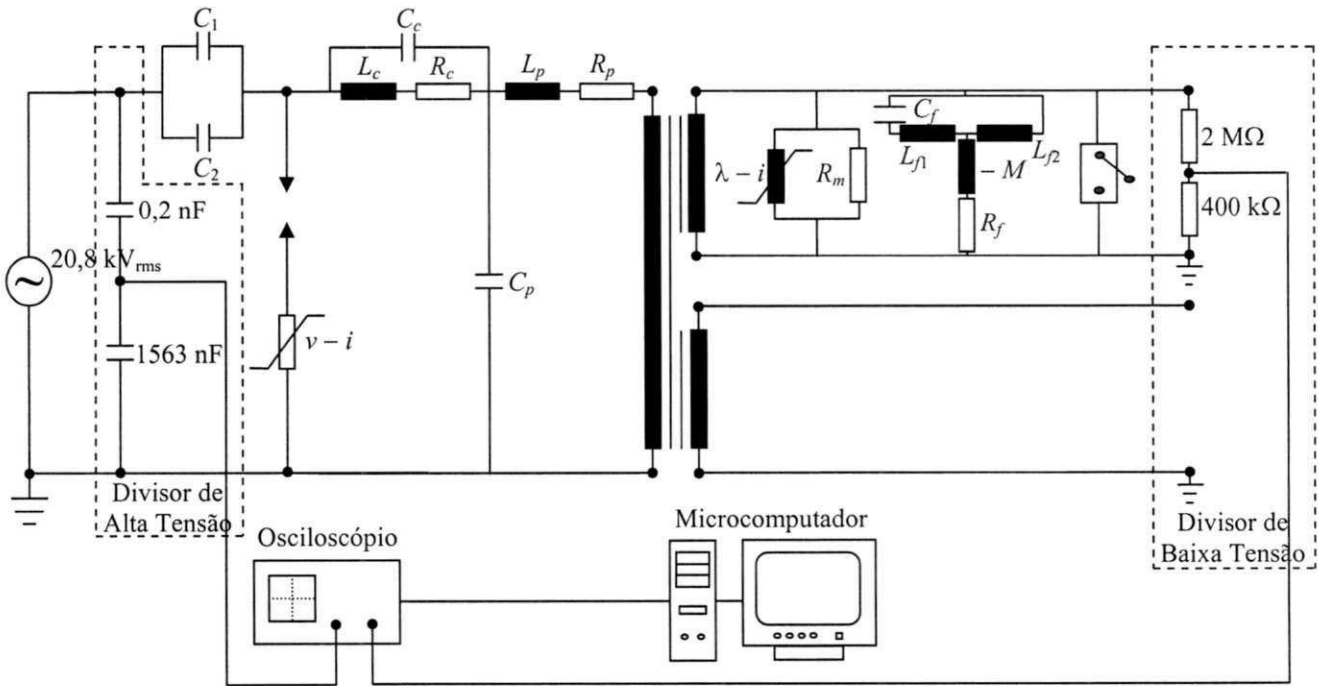


Figura 6.9 – Montagem para realização do ensaio de ferroressonância no TPC.

Os sinais das tensões intermediária e secundária foram lidos com o osciloscópio e os dados das referidas formas de onda foram armazenados no microcomputador. A Figura 6.10 mostra a forma de onda da tensão secundária do TPC quando este é submetido ao ensaio de ferroressonância. A curva em azul representa os resultados obtidos em laboratório e a curva em vermelho representa os resultados obtidos com o modelo proposto, considerando o curto-circuito realizado pelo modelo de chave controlada por tempo encontrado no ATP. A escolha pelo ATP deveu-se ao mesmo motivo apresentado na seção 6.4.

Neste ensaio, o curto-circuito no secundário do TPC foi iniciado no instante $t = 102$ ms e mantido por um período de aproximadamente 55 ms, quando então o disjuntor foi aberto para eliminar o curto.

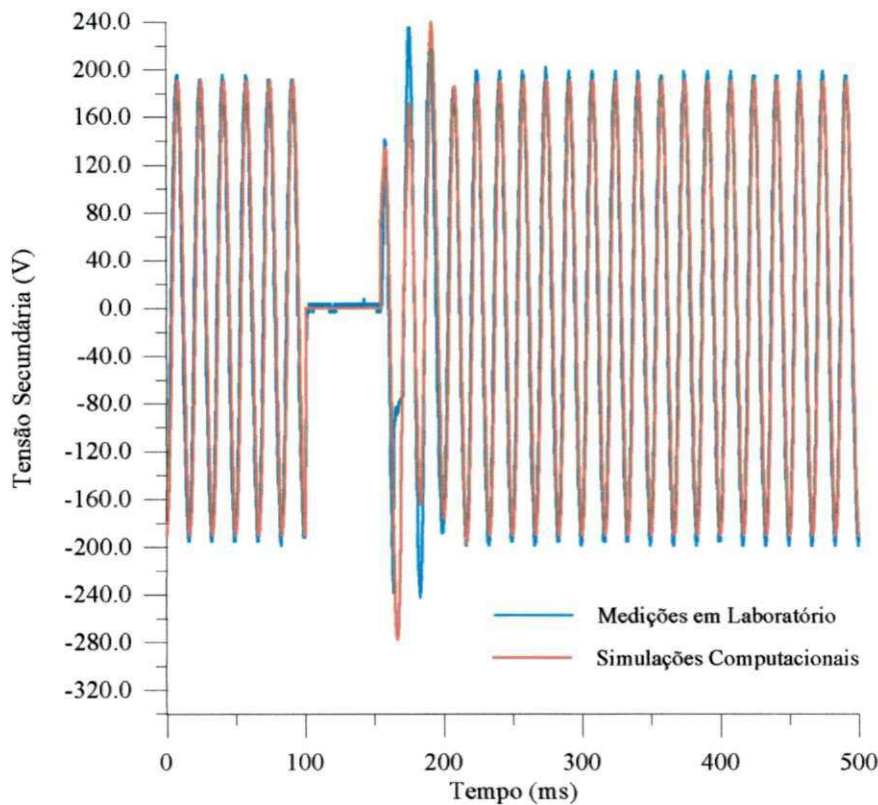


Figura 6.10 – Formas de onda medida e simulada da tensão secundária do TPC quando este é submetido ao ensaio de ferroressonância.

Após a abertura do disjuntor, a tensão passou por um breve período transitório e logo atingiu o regime permanente, devido à presença do circuito supressor de ferroressonância, cuja atuação será detalhada nas próximas seções deste trabalho.

Pode-se observar na Figura 6.10 que a forma de onda de tensão obtida com a simulação digital apresenta um comportamento bastante semelhante à forma de onda obtida com os dados medidos. Apenas os segundos picos positivo e negativo da forma de onda simulada não acompanharam a curva obtida com os dados medidos. A explicação para isso pode estar relacionada com o fato de que, na simulação digital não foi possível induzir uma tensão no secundário do TPC com pontos registrados da tensão intermediária, como no caso da seção anterior, uma vez que o curto-circuito já estava sendo realizado no terminal secundário. A simulação, portanto, apresenta a limitação de depender do modelo de chave do ATP para a realização do curto-circuito.

Com relação à condição de aprovação do TPC submetido ao ensaio de ferroressonância, a Norma IEC 186 estabelece que o pico da tensão secundária deverá retornar a um valor que não difira do seu valor normal por mais que 10 % após dez ciclos à frequência nominal. No caso do TPC ensaiado, após a eliminação do curto-circuito, o regime permanente foi atingido em aproximadamente quatro ciclos, conforme mostram os resultados medidos e simulados da Figura 6.10, estando o TPC, portanto, dentro do critério de aprovação estabelecido por norma.

Pela boa concordância entre resultados simulados e resultados medidos, tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo, pode-se considerar o modelo, aqui proposto, como validado para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Nas próximas seções serão apresentados exemplos típicos de simulações de transitórios eletromagnéticos com o modelo do TPC proposto.

6.6 Simulações de Ferroressonância

As simulações de ferroressonância no TPC foram baseadas em ensaios estabelecidos pela Norma IEC 186. O objetivo desse tipo de estudo é analisar a importância do circuito supressor de ferroressonância no amortecimento de tensões transitórias no TPC. Para isso, foram realizadas duas simulações: uma delas com o circuito supressor de ferroressonância incluído no modelo do TPC e a outra com o circuito removido. Em ambos os casos, as simulações consistem da operação de fechamento-abertura de uma chave CH conectada a um dos terminais secundários do TPC, conforme mostra a Figura 6.11. A chave fecha em $t = 125$ ms e permanece fechada durante 6 ciclos, quando o curto-circuito é eliminado. Não há cargas conectadas ao secundário do TPC.

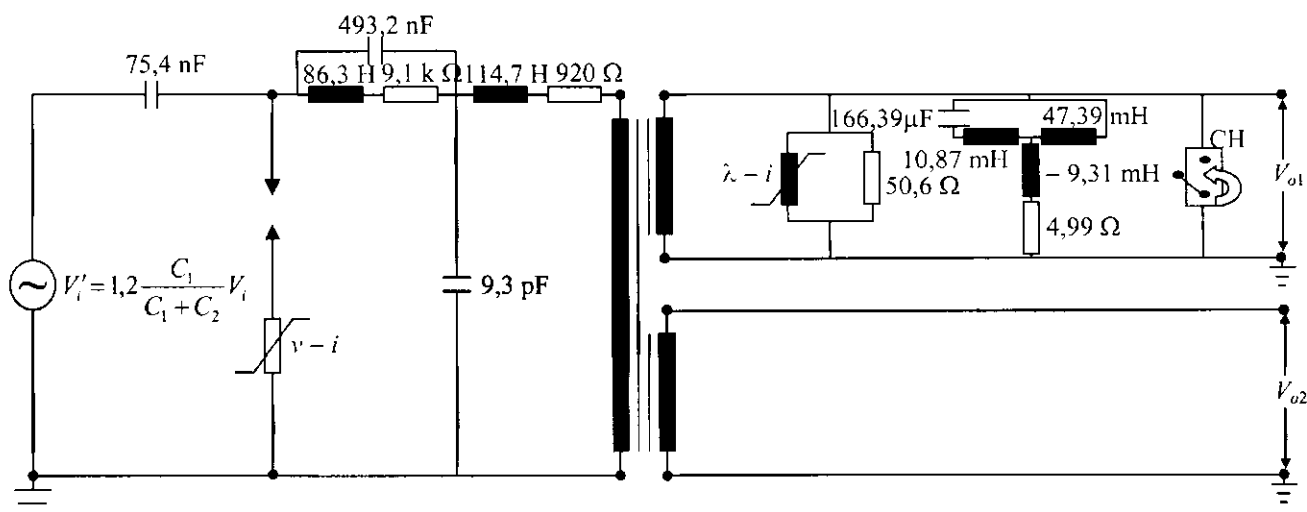


Figura 6.11 – Esquema utilizado para simulação do 1º ensaio de ferroressonância no TPC de 230 kV.

Nas simulações que levam em conta a presença do circuito supressor de ferroressonância, foram observados problemas de instabilidade numérica na forma de onda da tensão secundária do TPC, conforme mostra a Figura 6.12.

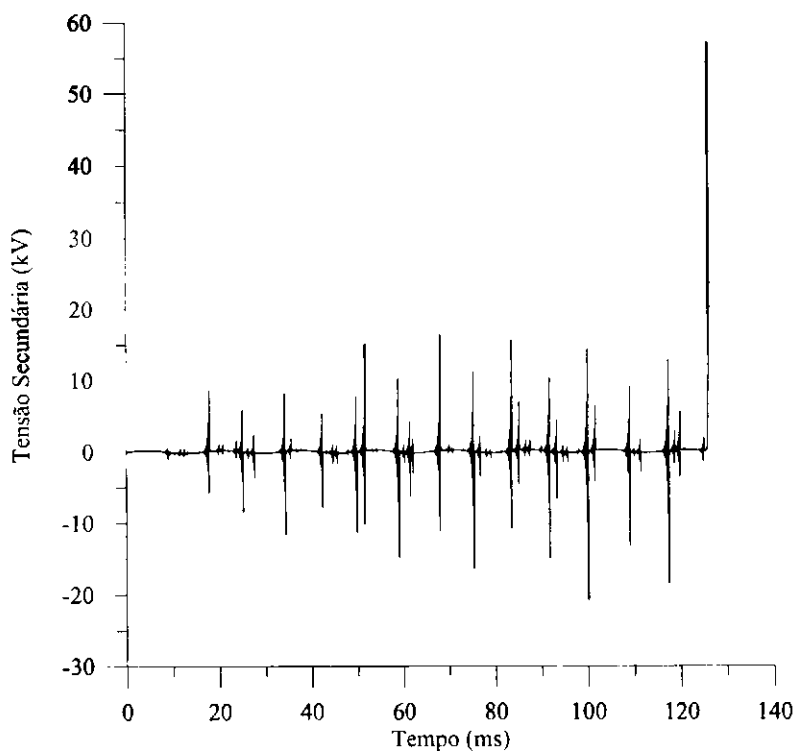


Figura 6.12 – Instabilidade numérica na forma de onda da tensão secundária do TPC.

A causa desses problemas pode ser explicada matematicamente analisando a expressão da admitância do circuito supressor de ferroressonância, $Y_f(s)$, escrita a partir do seu circuito equivalente (Figura 4.5) e apresentada na Equação (6.1).

$$Y_f(s) = \frac{[C_f(L_{f1} + L_{f2})]s^2 + 1}{[L_{f1}L_{f2}C_f - MC_f(L_{f1} + L_{f2})]s^3 + [R_fC_f(L_{f1} + L_{f2})]s^2 + (L_{f2} - M)s + R_f} \quad (6.1)$$

Substituindo os parâmetros C_f , L_{f1} , L_{f2} , $-M$ e R_f pelos seus respectivos valores obtidos a partir do processo de ajuste (Tabela 6.6), obtém-se dois zeros imaginários, $z_1 = j321,18$ e $z_2 = -j321,18$, e três pólos reais, $p_1 = 11404,0$, $p_2 = -577,0$ e $p_3 = -167,0$.

A instabilidade numérica se estabelece neste circuito devido à existência do pólo $p_1 = 11404,0$ localizado no semi-plano direito do plano s . Para eliminar essa instabilidade, é necessário que o coeficiente do termo em s^3 do denominador da Equação (6.1) seja igual a zero. Dessa forma, todos os coeficientes do polinômio do denominador seriam positivos, garantindo assim, que os pólos estariam localizados no semi-plano negativo do plano s . Essa condição é satisfeita para o valor de $M = (L_{f1}L_{f2})/(L_{f1} + L_{f2}) = 8,84$ mH, que foi, portanto, o valor utilizado.

Nota-se, portanto, que no processo de ajuste implementado houve um problema na obtenção de alguns parâmetros do modelo do circuito supressor de ferroressonância. Uma possível solução para esse problema é considerar o transformador não saturável L_f (Figura 2.3(b)) dividido em dois reatores, L_{f1} e L_{f2} , modelados como $L_1 + M$ e $L_2 + M$, respectivamente, sendo L_1 e L_2 as indutâncias de dispersão. A rotina de ajuste foi modificada para incluir essa consideração. O erro médio para a amplitude da relação de tensão do TPC foi aproximadamente o mesmo que o erro obtido para a curva ajustada da Figura 6.3. No entanto, para a curva de fase, o ajuste não ficou dentro dos padrões aceitáveis. Dessa forma, futuras investigações se fazem necessárias na tentativa de melhorar o ajuste para a curva de fase.

Entretanto, para análise de ferroressonância, a mudança no valor de M de 9,31 mH para 8,84 mH pode ser feita sem comprometer as simulações, pois a

ferroressonância acontece em frequências baixas, normalmente entre a subharmônica de 1/3 e a 3ª harmônica [GERMAY et al, 1974; SOUZA, 1995], e nesta faixa de frequência as curvas de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 230 kV são bastante coincidentes, conforme mostram as Figuras 6.13 e 6.14, para os valores de M iguais a 9,31 mH e 8,84 mH. Assim, todas as simulações de transitórios foram realizadas considerando o valor de M igual a 8,84 mH para evitar problemas de instabilidade numérica.

A Figura 6.15 mostra os resultados das tensões transitórias no secundário do TPC quando são realizadas as duas simulações de ferroressonância: com o circuito supressor de ferroressonância incluído no modelo (curva em azul) e quando ele é removido do modelo do TPC (curva em vermelho).

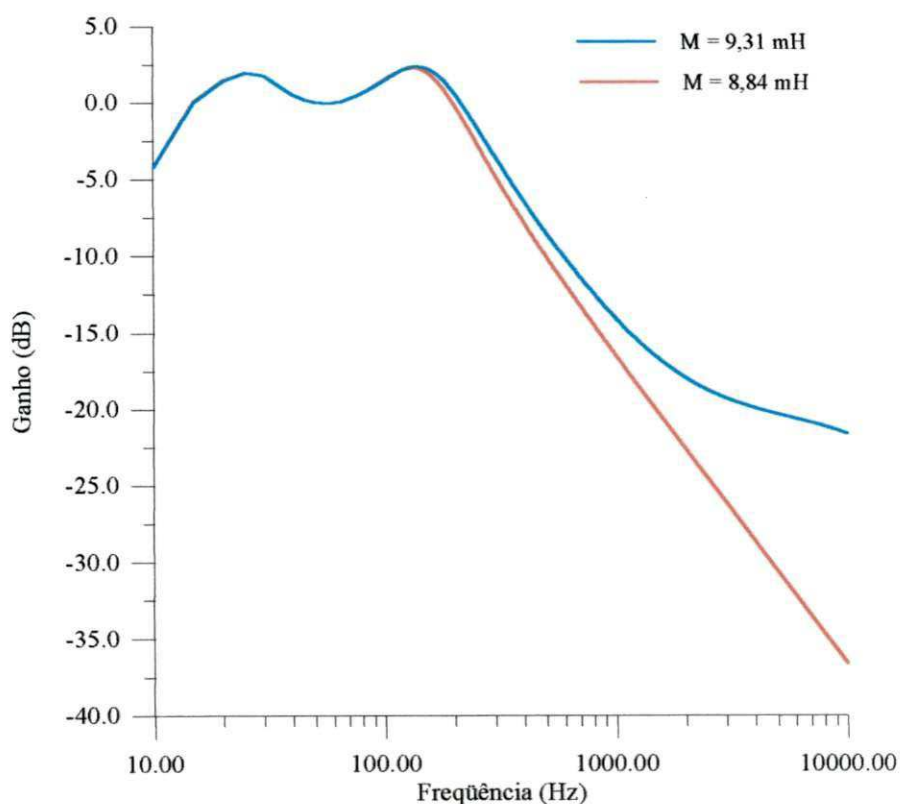


Figura 6.13 – Curvas de amplitude da relação de tensão do TPC considerando os valores da indutância M do CSF iguais a 9,31 mH e 8,84 mH.

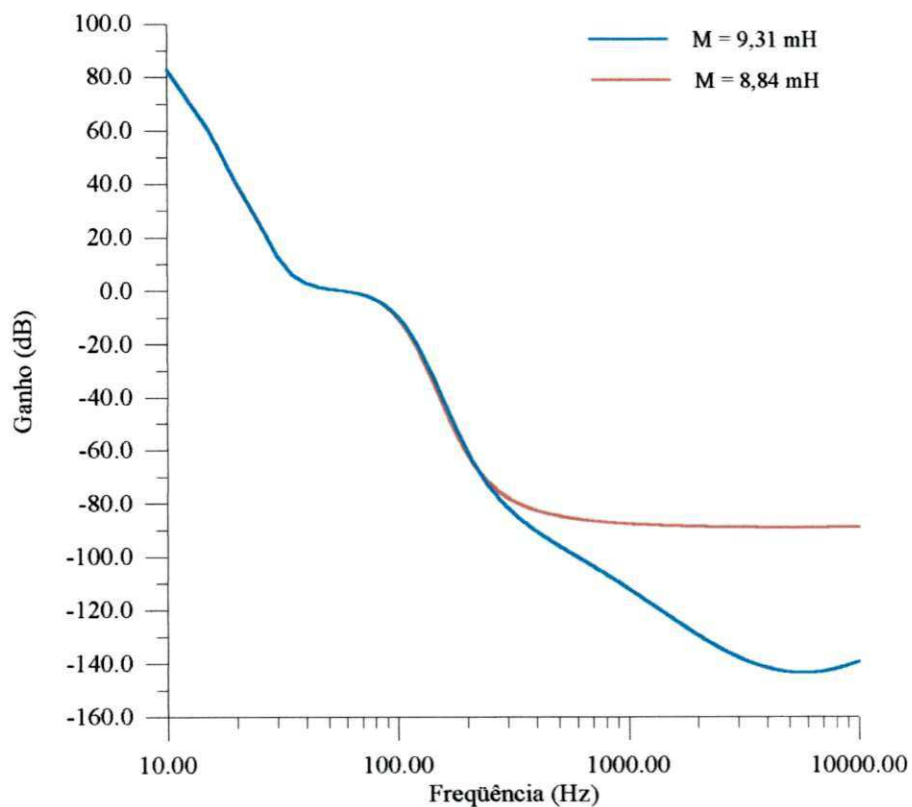


Figura 6.14 – Curvas de fase da relação de tensão do TPC considerando os valores da indutância M do CSF iguais a 9,31 mH e 8,84 mH.

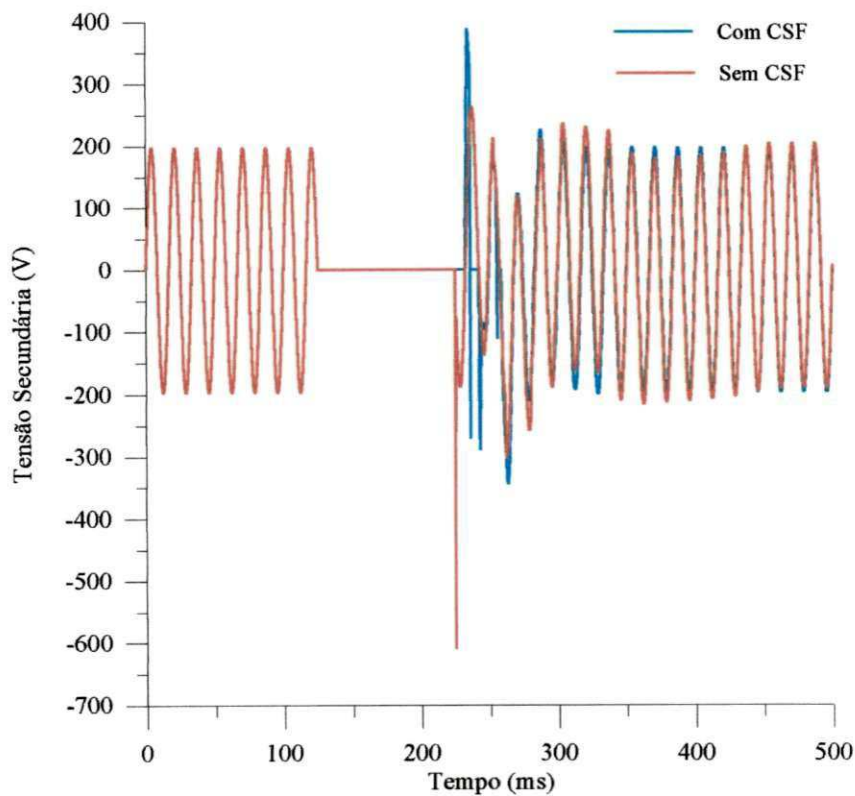


Figura 6.15 – Tensão secundária: modelo do TPC considerando a presença e a ausência do CSF nas simulações de ferroressonância.

A Figura 6.15 mostra que, sem o circuito supressor de ferroressonância, as oscilações transitórias da tensão nos terminais secundários do TPC permanecem até pelo menos 500 ms. Com o circuito supressor de ferroressonância incluído no modelo do TPC, as oscilações são amortecidas em um tempo menor que 100 ms, estando em conformidade com as condições de aprovação para o 1º ensaio de ferroressonância, estabelecidas pela Norma IEC 186.

Pode-se, portanto, afirmar que o circuito supressor de ferroressonância é eficiente no amortecimento de tensões transitórias quando um curto-circuito é removido nos terminais secundários do TPC.

6.7 Simulações de Atuação e Falha do Circuito de Proteção

Para analisar a atuação ou falha do circuito do TPC destinado a proteção contra sobretensões, é necessário realizar simulações de ferroressonância, tais como as simulações mostradas na seção 6.6. O esquema utilizado nessas simulações foi o mesmo apresentado na Figura 6.11 com $M = 8,84$ mH: curto-circuito e sua eliminação nos terminais secundários do TPC, com o equipamento energizado a 120 % de sua tensão nominal em regime permanente.

Para a atuação do circuito de proteção, foi analisado o desempenho do pára-raios de carboneto de silício (SiC) do TPC comparando-o a um suposto pára-raios de óxido de zinco (ZnO) de mesma tensão nominal, 39 kV, cuja característica não linear $v - i$ dos varistores foi estimada a partir do trabalho de COSTA [1999] e apresentada na Tabela 6.8. A Figura 6.16 mostra a comparação da tensão transitória nos terminais secundários do TPC considerando a atuação do circuito de proteção composto pelo pára-raios de SiC (curva em azul), pelo pára-raios de ZnO (curva em vermelho) e quando o pára-raios falha (curva em preto). A falha do pára-raios é simulada retirando-o do modelo do TPC.

Tabela 6.8 – Característica não linear estimada para um pára-raios de ZnO de 39 kV.

Corrente (A _{pico})	Tensão de descarga (kV _{pico})
0,0008	24,86
0,003	43,78
0,07	52,69
1,0	55,88
100,0	61,60
200,0	62,70
1000,0	70,40
5000,0	77,00
10000,0	82,50

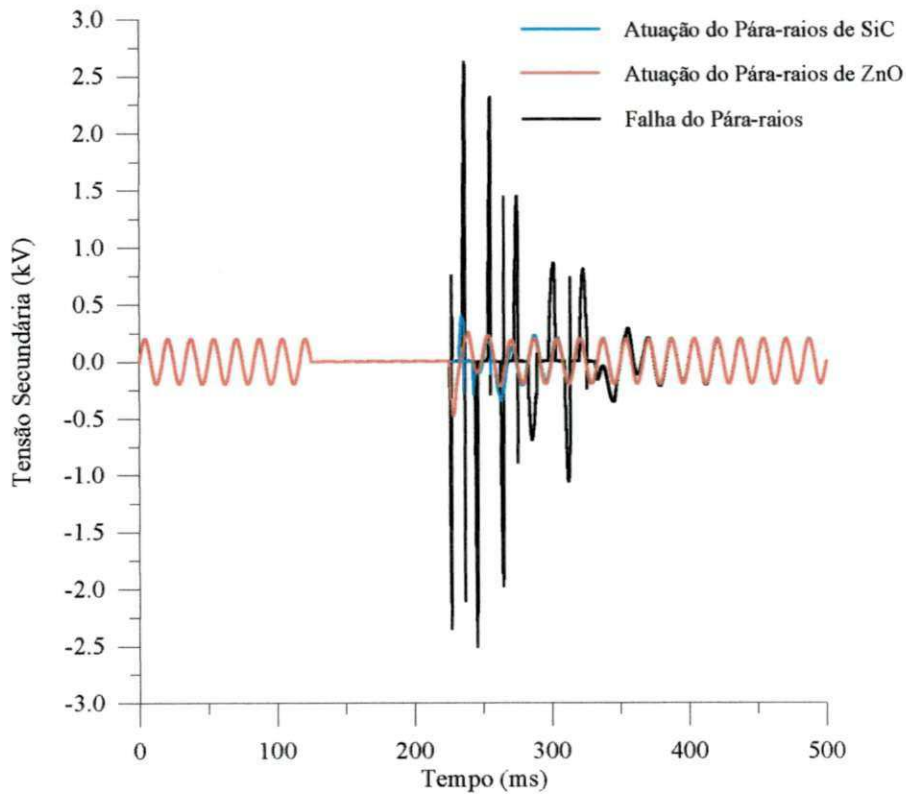


Figura 6.16 – Tensão transitória no secundário do TPC considerando a atuação e a falha do circuito de proteção.

Na Figura 6.17 é mostrada a energia armazenada em ambos os pára-raios, de SiC e de ZnO, quando eles atuam para proteger o TPC contra sobretensões. Nas simulações foi considerada a presença do circuito supressor de ferroressonância.

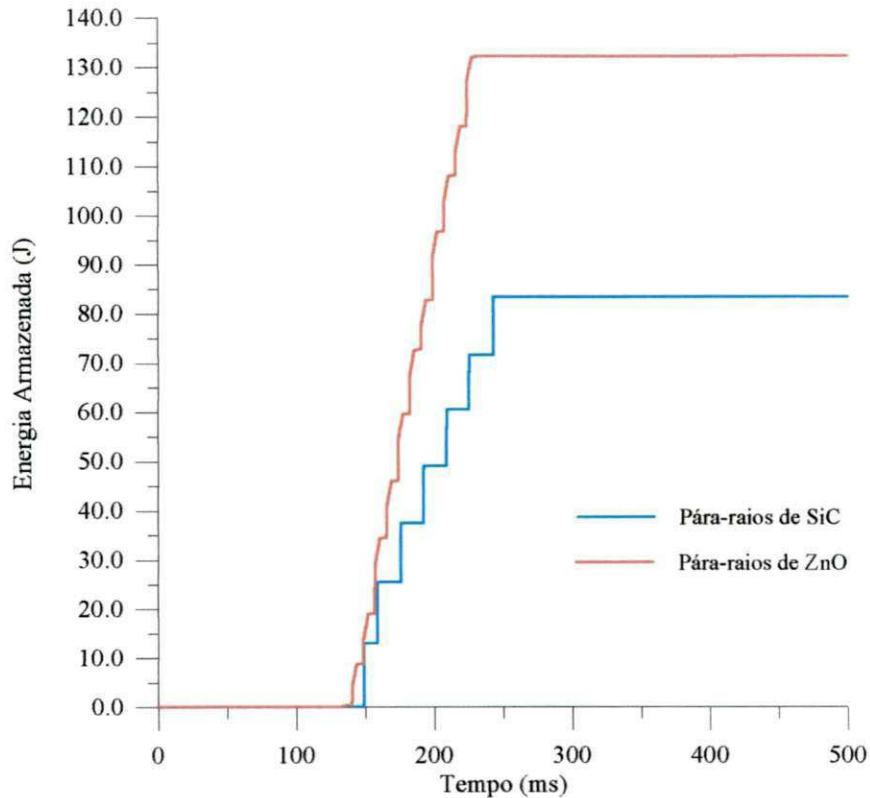


Figura 6.17 – Energia armazenada pelos pára-raios de SiC e ZnO quando eles atuam para proteger o TPC contra sobretensões.

Analisando a Figura 6.16, pode-se perceber claramente que a tensão transitória nos terminais secundários do TPC apresenta valores bastante elevados quando o pára-raios falha na eliminação do curto-circuito. A tensão chega a atingir valores superiores a 2,5 kV, que é capaz de danificar os instrumentos de proteção conectados ao secundário do TPC. Uma análise comparativa entre os pára-raios de SiC e ZnO mostra que o desempenho de ambos em termos de limitação de tensão é praticamente o mesmo, embora o amortecimento da tensão se dê mais rapidamente quando o circuito de proteção do modelo do TPC é composto pelo pára-raios de ZnO.

A Figura 6.17 mostra que a energia armazenada pelos pára-raios de carboneto de silício e de óxido de zinco, quando eles atuam para proteger o TPC, é pouco superior a 80 J e 130 J, respectivamente. Essas quantidades de energia são facilmente

absorvidas pelos referidos pára-raios, com tensão nominal de 39 kV, durante o mesmo período de tempo em que foi feita a simulação.

Portanto, pode-se afirmar que, o circuito de proteção é bastante eficiente na limitação de sobretensões transitórias que podem aparecer nos terminais secundários do TPC.

6.8 Simulações de Curto-circuito no Primário do TPC

Com este tipo de estudo pretende-se investigar alguns dos mais importantes fatores que afetam a resposta transitória do TPC em sistemas de proteção. Dentre esses fatores destacam-se:

- Instante de ocorrência de uma falta no primário do TPC.
- Amplitude e fator de potência da carga conectada ao secundário do TPC.

6.8.1 Instante de Ocorrência de uma Falta no Primário do TPC

A simulação computacional de uma falta fase-terra no primário do TPC de 230 kV foi realizada considerando a operação de fechamento da chave CH conectada agora entre a coluna capacitiva completa do TPC e um ponto de referência para a terra, conforme mostra a Figura 6.18. A resistência da carga imposta ao TPC é representada por R_b . Para este caso e para o próximo, o circuito supressor de ferroressonância foi retirado do modelo do TPC para tornar mais simples e mais nítida a análise dos resultados, embora as conclusões sejam exatamente as mesmas quando o circuito está inserido no modelo.

Foram analisadas as respostas transitórias do TPC em duas situações: quando a falta fase-terra é iniciada no instante da passagem pelo zero da tensão primária e quando a falta é iniciada no pico da tensão primária. Para ambas as situações, foi considerada carga plena de 400 W (que corresponde a um valor de $R_b = 33,06 \Omega$) no

secundário do TPC. A Figura 6.19 mostra as formas de onda da tensão transitória no secundário do TPC.

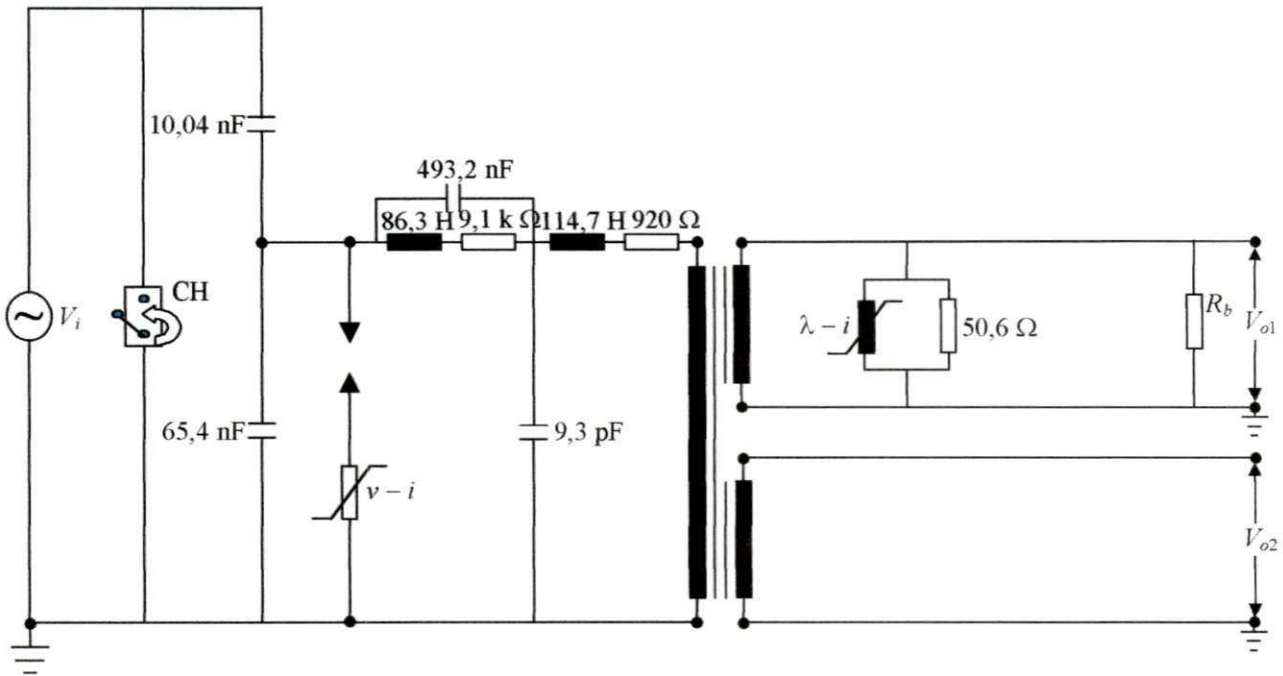


Figura 6.18 – Esquema utilizado para simulação de uma falta fase-terra no primário do TPC.

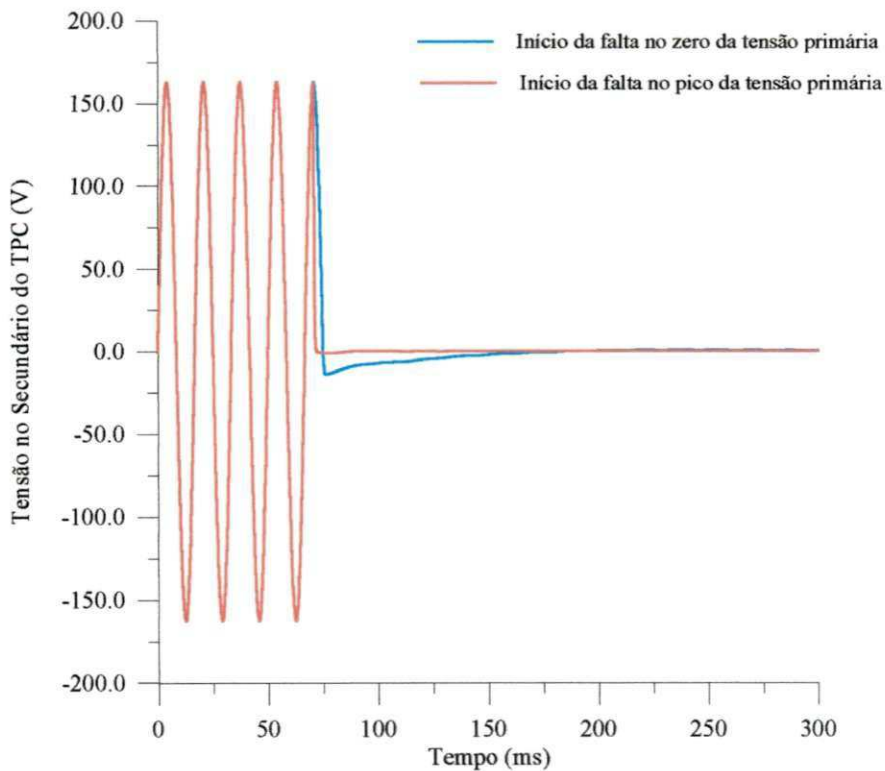


Figura 6.19 – Tensão transitória no secundário do TPC com iniciação da falta no zero e no pico da tensão primária, considerando carga plena de 400 W.

Observando a Figura 6.19, pode-se perceber que a amplitude da tensão transitória no início do curto-circuito é maior no caso em que a falta é iniciada no zero da tensão primária. Para justificar esse resultado, será usado o circuito equivalente simplificado do TPC para a análise de curto-circuito no seu terminal primário, como mostrado na Figura 6.20. Nessa figura, I é a corrente primária, C_e é o capacitor equivalente da coluna capacitiva do TPC, L_c é o reator de compensação, e R_b e V_o são, respectivamente, a resistência da carga e a tensão secundária referenciadas ao primário.

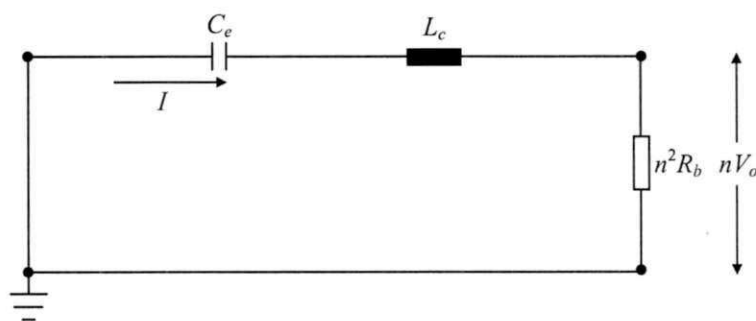


Figura 6.20 – Circuito equivalente simplificado do TPC para análise de curto-circuito no seu terminal primário.

A corrente I deve estar em fase com a tensão primária e com a tensão V_o porque a reatância indutiva de L_c é projetada para cancelar a reatância capacitiva de C_e na frequência do sistema. Dessa forma, quando o curto-circuito acontece no zero da tensão primária, a corrente I é nula e toda energia do circuito fica armazenada no capacitor equivalente C_e .

Por outro lado, quando o curto-circuito acontece no pico da tensão primária, a corrente I assume o seu valor de pico. Nesse instante, toda a energia do circuito fica armazenada no reator de compensação L_c .

Desde que a mesma quantidade de energia é armazenada no pico da tensão primária pelo reator de compensação e no zero da tensão primária pela capacitância equivalente, o pior caso de tensões transitórias no TPC será determinado pela constante de tempo de descarga. Para a energia máxima armazenada em C_e , a constante de tempo $t_{ce} =$

$(n^2 R_b)C_e = 58$ ms é mais de 500 vezes maior que a constante de tempo $t_{Lc} = L_c/n^2 R_b = 0,112$ ms para a energia máxima armazenada em L_c .

Dessa forma, pode-se afirmar que a resposta transitória do TPC torna-se mais severa quando a energia armazenada no capacitor C_e é máxima, o que corresponde ao instante da passagem pelo zero da tensão primária.

Essa é uma característica bastante genérica para o TPC, uma vez que os valores de R_b que tornam $t_{Lc} > t_{Ce}$ impõem cargas que ultrapassam o limite de potência estabelecido pelo TPC.

6.8.2 Amplitude e Fator de Potência da Carga Conectada ao Secundário do TPC

A análise de sensibilidade da resposta transitória do TPC quanto à amplitude e ao fator de potência da carga foi realizada da seguinte forma: para a variação da amplitude da carga, foram consideradas as tensões transitórias no secundário do TPC com carga plena (400 VA), carga média (200 VA) e sem carga, mostradas na Figura 6.21. Com respeito ao fator de potência, as tensões transitórias no TPC foram consideradas com cargas de mesma amplitude (400 VA), porém com variações no fator de potência de 1,0 (puramente resistiva), 0,8 (reativa) e 0,0 (puramente indutiva), conforme mostra a Figura 6.22.

A simulação de transitórios realizada foi a mesma do caso estudado anteriormente: uma falta fase-terra no terminal primário do TPC de 230 kV, conforme mostra a configuração utilizada na Figura 6.18, com o fechamento da chave CH no instante da passagem pelo zero da tensão primária e com as cargas conectadas como circuito RL paralelo, por serem as situações em que a tensão transitória apresenta-se mais severa [SWEETANA, 1971].

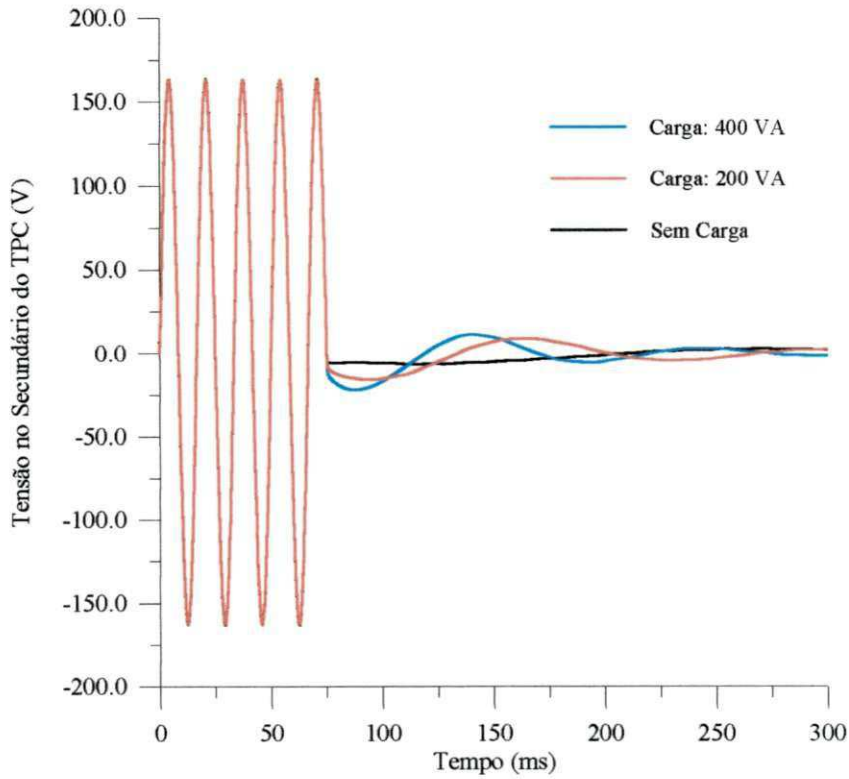


Figura 6.21 – Tensão transitória no secundário do TPC com variação de amplitude da carga: carga plena (400 VA), carga média (200 VA) e sem carga.

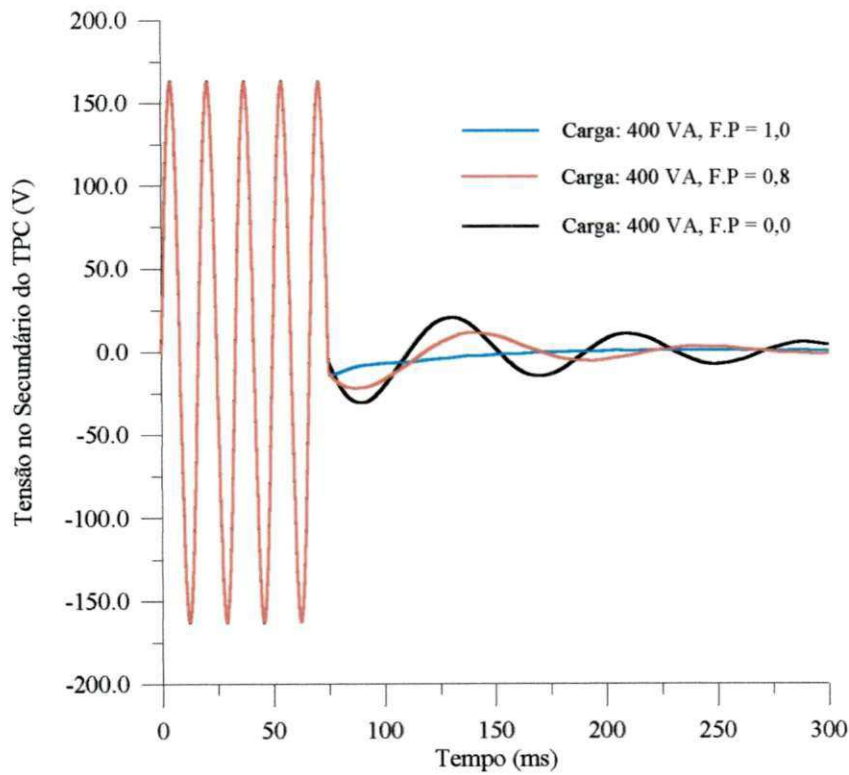


Figura 6.22 – Tensão transitória no secundário do TPC com cargas de 400 VA, porém com variações no fator de potência de 1,0 (puramente resistiva), 0,8 (reativa) e 0,0 (puramente indutiva).

Analisando a Figura 6.21, percebe-se que à medida que a amplitude da carga aumenta, a tensão transitória torna-se maior. Com o aumento da carga, será drenada uma corrente maior no primário do TPC, fazendo com que os elementos reativos (capacitores e indutores) armazenem mais energia, levando conseqüentemente a tensões transitórias com amplitude mais elevada.

Na Figura 6.22 pode-se perceber que à medida que o fator de potência da carga torna-se mais reativo, a tensão transitória no TPC apresenta maior amplitude. Isso se deve ao fato de que, quanto mais reativa for a carga, maior será a quantidade de energia armazenada por esta carga, provocando o aumento da tensão transitória que normalmente oscila em uma baixa frequência natural.

Pode-se afirmar, portanto que, quanto maior e mais reativa for a carga conectada ao TPC, maior será a amplitude da tensão transitória nos seus terminais secundários.

6.9 Corte de Corrente Indutiva Próximo ao TPC

Para exemplificar uma situação mais crítica que um curto-circuito no primário do TPC, foram analisadas simulações de corte de corrente indutiva nas proximidades do seu terminal primário. A Figura 6.23 mostra a configuração utilizada para realizar as referidas simulações. Trata-se do diagrama unifilar de um sistema de potência em que o barramento de 230 kV ao qual o TPC está conectado é desenergizado por meio da abertura da chave CH em um valor de corrente diferente de zero. Todos os disjuntores D estão com os contatos fechados. Os dados do sistema necessários às simulações são apresentados na Tabela 6.9.

Nesse estudo, será analisada mais uma vez a importância do circuito supressor de ferroressonância no amortecimento de tensões transitórias no TPC.

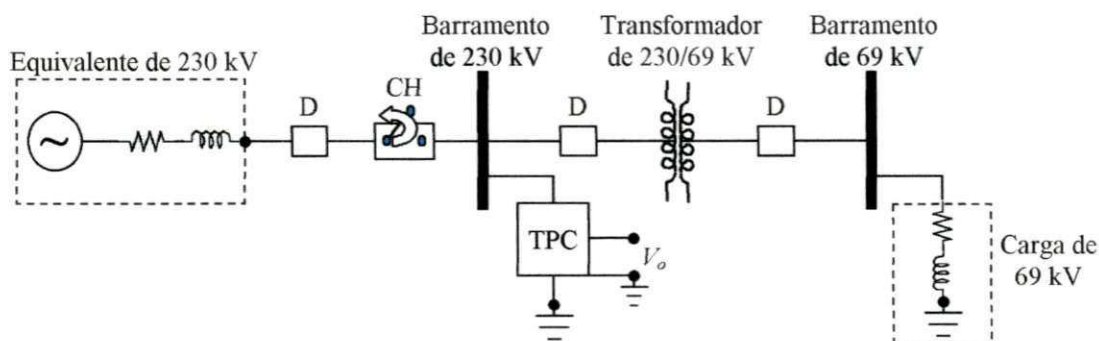


Figura 6.23 – Configuração utilizada para simulações de corte de corrente indutiva próximo ao TPC.

Tabela 6.9 – Parâmetros R , L e C do sistema elétrico da Figura 6.23.

	Resistência	Indutância	Capacitância
Equivalente de 230 kV	0,9681 Ω	28,513 mH	–
Disjuntores	–	–	1300 pF
Chave seccionadora	–	–	200 pF
Enrolamento de 230 kV do transformador	0,6519 Ω	13,125 mH	–
Enrolamento de 69 kV do transformador	0,0970 Ω	1,973 mH	–
Carga de 69 kV	80,0 Ω	137,0 mH	–

A Figura 6.24 mostra a tensão secundária do TPC com o CSF (curva em azul) e sem o CSF (curva em vermelho), quando acontece o corte de corrente indutiva.

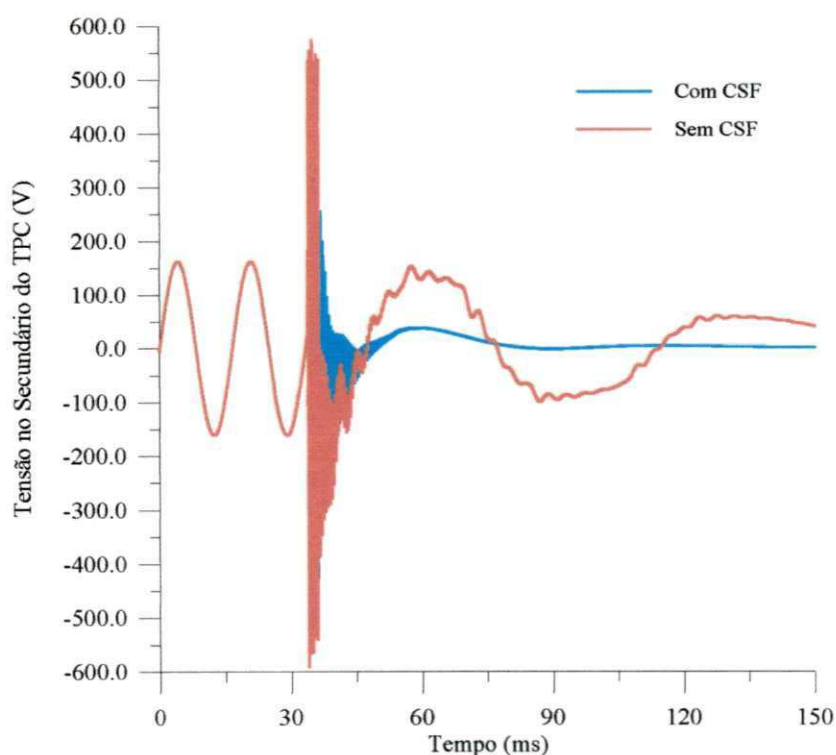


Figura 6.24 – Tensão secundária: modelo do TPC considerando a presença e a ausência do CSF nas simulações de corte de corrente indutiva.

Pode-se observar na Figura 6.24 que as tensões secundárias do TPC originadas pelo corte de corrente indutiva são realmente mais severas e apresentam frequências mais elevadas que as tensões produzidas por uma falta no primário do TPC. Esse resultado é justificado pelo aumento considerável da tensão nos elementos indutivos quando ocorre uma variação brusca de corrente.

Além disso, pôde-se comprovar mais uma vez que o CSF é efetivo no amortecimento de tensões transitórias no TPC, pois quando o referido circuito não está presente no modelo, a forma de onda da tensão oscila bastante até ser amortecida, além de apresentar amplitude mais elevada que a situação com o CSF incluso no modelo.

6.10 Conexão e Desconexão do TPC ao Barramento de 230 kV

A análise de resposta em frequência do TPC precisa ser feita com o equipamento isoladamente para que se possa validar o modelo para uma determinada faixa de frequência, conforme foi apresentado na seção 6.2. No entanto, quando o TPC está conectado à rede elétrica, a sua resposta transitória dependerá dos parâmetros, da configuração e da localização do TPC na rede. Para levar em conta esta realidade, foram analisadas simulações de conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de uma subestação de 230/69 kV. Esse tipo de estudo simula as manobras de chaves seccionadoras localizadas nas proximidades do terminal primário do TPC.

Neste estudo, foi considerado o diagrama unifilar da subestação Bongi/CHESF de 230/69 kV [CHESF/GRL, 1999] mostrado na Figura 6.25. Foram modelados os equipamentos elétricos (disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, pára-raios e banco de capacitores), os barramentos, as cargas e as linhas de transmissão dos lados de 69 e 230 kV da subestação.

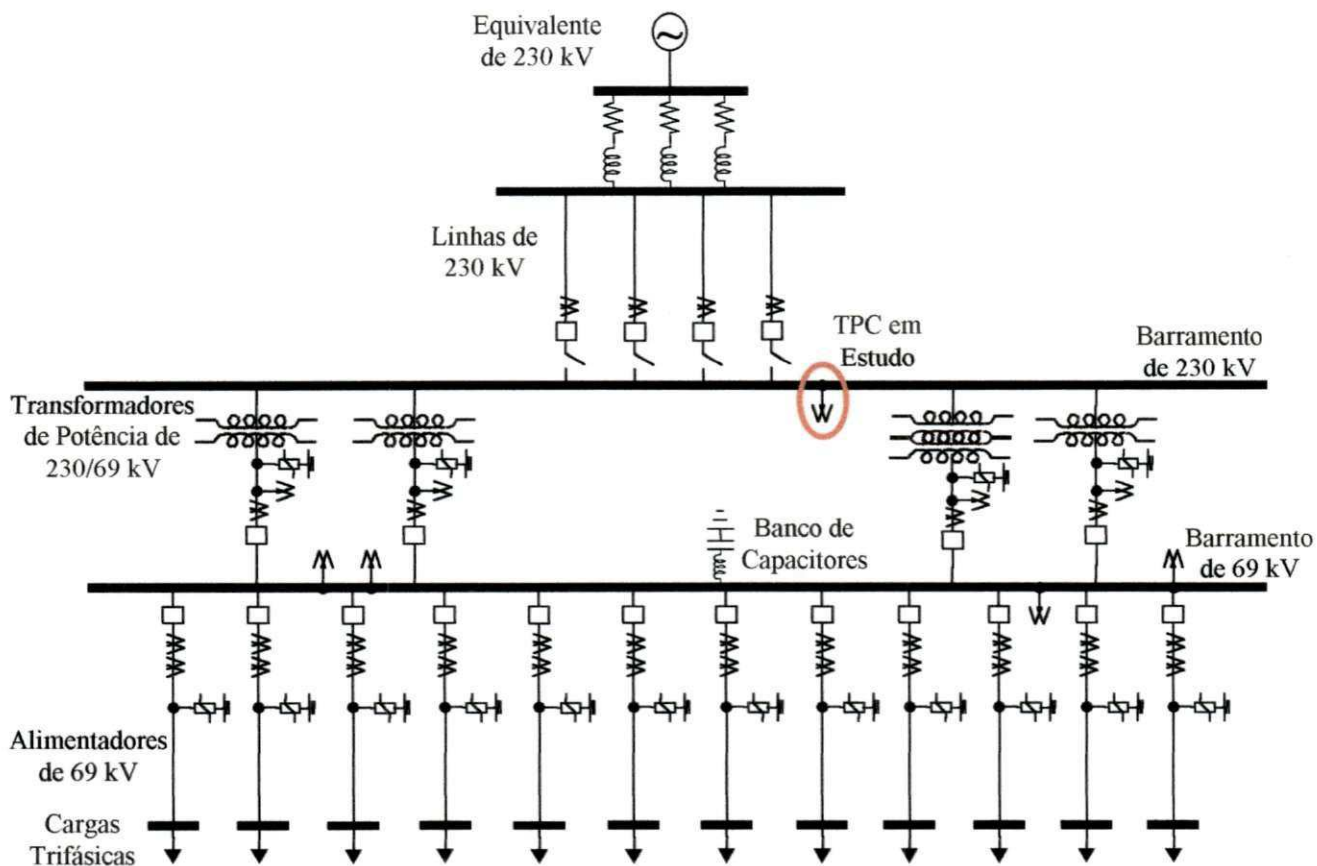


Figura 6.25 – Diagrama unifilar da subestação Bongí/CHESF de 230/69 kV para estudo de conexão e desconexão do TPC ao barramento de 230 kV.

O equivalente no barramento de 230 kV foi representado como modelo de elemento RL mutuamente acoplado do ATP. Para este tipo de estudo, o equivalente de Thévenin é adequado para verificar os resultados de simulação, pois normalmente os transitórios observados no TPC apresentam frequências próximas à fundamental. Os valores de seqüência do equivalente fornecidos pela CHESF são mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Valores de seqüência para o equivalente de 230 kV da subestação Bongí/CHESF.

Seqüência zero		Seqüência positiva	
Resistência	Indutância	Resistência	Indutância
1,1268 Ω	20,838 mH	0,9681 Ω	28,513 mH

O TPC destacado na Figura 6.25 é o alvo das atenções deste estudo. O objetivo é analisar o comportamento da tensão secundária do TPC considerando a atuação e a falha do CSF, quando o TPC é conectado e em seguida desconectado do barramento de

230 kV por chaves seccionadoras. As Figuras 6.26 e 6.27 mostram as tensões secundárias dos três TPC do barramento quando há atuação e falha, respectivamente, do CSF.

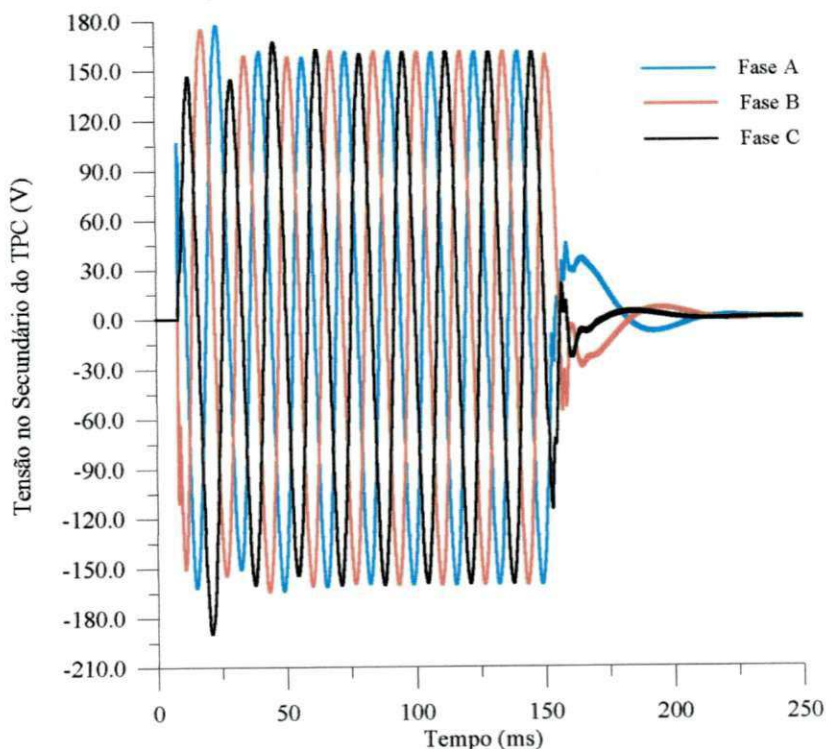


Figura 6.26 – Tensão secundária do TPC considerando a atuação do CSF quando ocorre conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongí/CHESF.

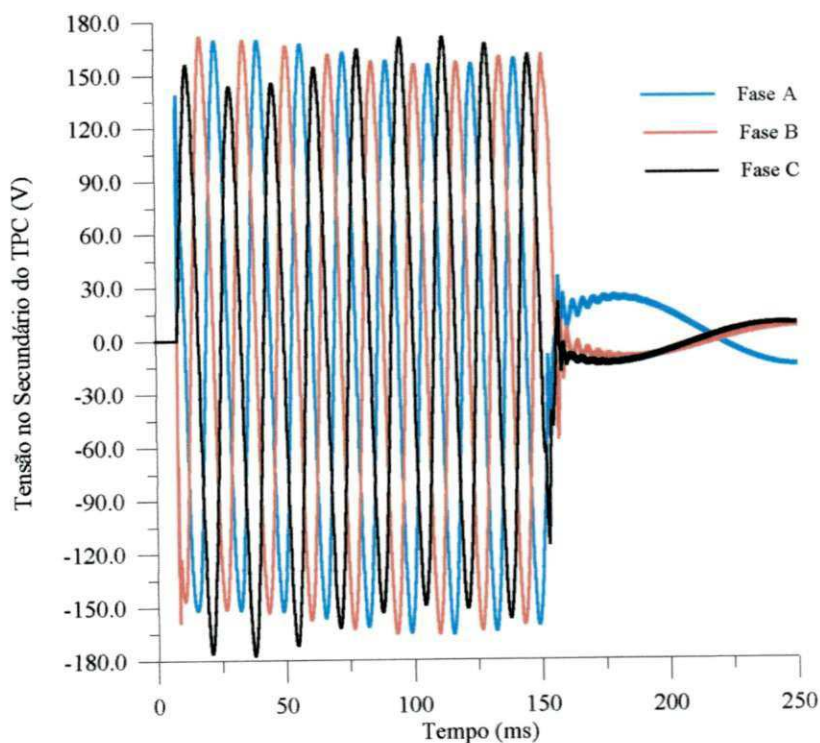


Figura 6.27 – Tensão secundária do TPC considerando a falha do CSF quando ocorre conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongí/CHESF.

Na Figura 6.26, pode-se observar que, após a energização do TPC, as tensões passam por um breve período transitório e chegam ao regime permanente em aproximadamente 65 ms. Além disso, quando o TPC é desenergizado, as tensões das três fases são rapidamente amortecidas pelo circuito supressor de ferroressonância. Na Figura 6.27, quando o TPC é energizado, observa-se que as oscilações transitórias na forma de onda das tensões permanecem até pelo menos 150 ms, pois o circuito supressor de ferroressonância não está atuando. Pode-se observar ainda que, após a desenergização do TPC, as tensões precisam de um período de tempo maior para serem amortecidas.

Os resultados confirmam, portanto que, mesmo com o TPC conectado à rede elétrica, as conclusões referentes a importância do circuito supressor de ferroressonância continuam sendo válidas, ou seja, o referido circuito amortece rapidamente as oscilações transitórias que aparecem nos terminais secundários do TPC, quando este é submetido à manobra de chave seccionadora [FERNANDES Jr. et al, 2001].

6.11 Resumo

Neste capítulo foi, portanto, validado o modelo proposto do TPC a partir de medições em laboratório de resposta em frequência e de sobretensões transitórias. Além disso, foram apresentados resultados de simulações digitais que podem ser utilizados para fazer previsões do comportamento das tensões do TPC quando submetido a uma determinada sobretensão.

Capítulo 7

Conclusões

Um modelo de transformadores de potencial capacitivos para estudos de transitórios eletromagnéticos foi proposto. O modelo contempla simultaneamente os parâmetros R , L e C lineares obtidos através de medições de resposta em frequência e os elementos não lineares, como os elementos que contêm núcleo de ferro e o pára-raios do circuito de proteção, cujas características foram estimadas a partir de medições.

Os estudos encontrados na literatura mostram a complexidade decorrente da dificuldade de obtenção dos parâmetros do modelo do TPC e ressaltam a escassez de medições necessárias à validação dos resultados. Diante do estado da arte, a contribuição do presente trabalho consiste na implementação de uma rotina baseada no método de Levenberg-Marquardt para o cálculo dos parâmetros lineares validados por medições de resposta em frequência de amplitude e fase da relação de tensão do TPC, além da validação do modelo por comparações entre os resultados das simulações digitais e de medições em laboratório de sobretensões transitórias, como ensaio de ferroressonância e chaveamento da tensão intermediária do TPC.

No processo de estimação paramétrica, muitas vezes, os parâmetros ajustados não coincidem com os parâmetros de projeto do TPC, pois estes normalmente são obtidos a 60 Hz e os parâmetros ajustados são obtidos de forma a reproduzirem a mesma resposta em frequência do TPC, obtida em ensaio de laboratório. A forma como a rotina está implementada permite ao usuário colocar restrições aos parâmetros ajustáveis R , L e C na tentativa de tornar os resultados mais realistas.

Para aplicação da metodologia proposta de identificação paramétrica e para realização das medições de sobretensões transitórias no Laboratório de Alta Tensão da UFCG foi utilizado um TPC de 230 kV emprestado pela CHESF.

Foram realizados estudos de transitórios eletromagnéticos com o modelo proposto, que envolveram simulações de análise de sensibilidade no domínio do tempo para os circuitos destinados a supressão de ferroressonância e a proteção contra sobretensões, simulações dos principais fatores que afetam a resposta transitória do TPC, simulações de corte de corrente indutiva, bem como simulações de sobretensões devido à manobra de chave seccionadora nas proximidades do TPC localizado em uma subestação. Os resultados das simulações revelaram que o circuito supressor de ferroressonância é eficiente no amortecimento de tensões transitórias que podem aparecer nos terminais secundários do TPC.

O modelo proposto mostrou-se preciso em estudos nos domínios do tempo e da frequência. Diante disto, os resultados das simulações digitais apresentados neste trabalho podem ser utilizados como indicação para fazer previsões do comportamento das tensões nos terminais do TPC frente a sobretensões transitórias, além de ser possível monitorar as tensões internas do TPC e diagnosticar falhas no equipamento, uma vez que foi validado um circuito equivalente que o representa.

Como continuação do estudo aqui realizado, são sugeridas as seguintes propostas de trabalho.

- Realizar outras medições de resposta em frequência diferentes da relação de tensão do TPC, como por exemplo, respostas de impedância ou admitância. Essas medições adicionais são importantes para tornar mais completo o banco de dados que será utilizado como informações de entrada para o programa de cálculo de parâmetros do TPC.
- Investigar mais detalhadamente as causas que levaram ao problema de ajuste da curva de fase do TPC quando o transformador não saturável do circuito supressor de ferroressonância é modelado como dependente da indutância negativa. Medições de resposta em frequência diferentes da relação de tensão do TPC podem fornecer dados de entrada mais adequados para o ajuste da referida curva.
- Comprovar experimentalmente os resultados obtidos de simulações digitais que consideram a falha de atuação dos circuitos destinados a supressão de ferroressonância e a proteção contra sobretensões, quando o TPC é submetido ao ensaio de ferroressonância.
- Utilizar o modelo proposto para verificar os possíveis motivos que causaram os problemas de sobretensões em TPC, devido à manobra de chaves seccionadoras.

Referências Bibliográficas

- ALVES, F. R., MORAES, H. M. e DACONTI, J. R. “Análise de Problemas Associados aos Transformadores de Potencial Capacitivo 550 kV da Usina de Xingó”. *Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XVI SNPTEE*, Campinas, São Paulo, 21 a 26 de outubro 2001.
- ANSI/IEEE STD C62.1-1989. *IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Power Circuits*, 1989.
- ANSI/IEEE STD C62.2-1987. *IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Systems*, 1987.
- CHESF/GRL. *SE Bongi 230/69 kV (BGI)*, DO-97.3.0005, outubro 1999.
- CHIMKLAI, S. and MARTI, J. R. “Simplified Three-Phase Transformer Model for Electromagnetic Transient Studies”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, pp. 1316-1325, July 1995.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco*, Tese de Doutorado, UFPB, abril 1999.
- D’AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O. e MORAIS, S. A.

Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão.

Rio de Janeiro, FURNAS 1985.

DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver B. C., Canada, May 1996.

FERNANDES Jr., D. *Estimação de Parâmetros para Transformadores de Potencial Capacitivo*, Dissertação de Mestrado, UFPB, setembro 1999.

FERNANDES Jr., D. e NEVES, W. L. A. “Cálculo de Parâmetros para Transformadores de Potencial Capacitivo”. *Anais do III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão – III ENEAT*, Campina Grande, Paraíba, 04 a 07 de junho 2000a.

FERNANDES Jr., D. e NEVES, W. L. A. “Identificação de Parâmetros para Transformadores de Potencial Capacitivos”. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2000*, pp. 2030-2035, Florianópolis, Santa Catarina, 11 a 14 de setembro 2000b.

FERNANDES Jr., D. e NEVES, W. L. A. “Representação de TPC no EMTP: Cálculo de Parâmetros e Cuidados Necessários às Simulações de Ferroressonância”. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2002*, pp. 795-800, Natal, Rio Grande do Norte, 2 a 5 de setembro 2002.

FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. and VASCONCELOS, J. C. A. “Identification of Parameters for Coupling Capacitor Voltage Transformers”. *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2001 – IPST'01*, pp. 463-468, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, June 24-28, 2001.

- FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A., VASCONCELOS, J. C. A e GODOY, M.V. “Um Modelo de Transformador de Potencial Capacitivo para Estudos de Sobretensões Transitórias”. *Anais do V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – V SBQEE*, Vol. 1, pp. 175-180, Aracaju, Sergipe, 17 a 20 de agosto de 2003a.
- FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. and VASCONCELOS, J. C. A. “A Coupling Capacitor Voltage Transformer Representation for Electromagnetic Transient Studies”. *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2003 – IPST’03*, Section 9: Transformers, Inrush Transients, and Ferroresonance, Paper 9c-4, New Orleans, LA, September 28 - October 2, 2003b.
- FLUKE CORPORATION. *5205A Precision Power Amplifier – Instruction Manual*, U.S.A, 1976.
- GERMAY, N., MASTERO, S. and VROMAN, J. “Review of Ferroresonance Phenomena in High Voltage Power System and Presentation of a Voltage Transformer Model for Predetermining Them”. *CIGRÉ*, Paris, paper 33-18, 1974.
- GRAOVAC, M., IRAVANI, M. R., WANG, X. and McTAGGART, R. D. “Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, pp. 158-163, January 2003.
- IEC 186 (1969). *Voltage Transformers, First Supplement (1970), Amendment No. 1*, 1978. *Apud* D’AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O. e MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro, FURNAS 1985.

IEEE COMMITTEE REPORT. "Transient Response of Coupling Capacitor Voltage Transformers". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 12, pp. 4811-4814, December 1981.

IEEE SURGE PROTECTIVE DEVICES COMMITTEE. "Modeling of Current-Limiting Surge Arresters". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 8, pp. 4033-4040, August 1981.

IEEE WORKING GROUP 15.08.09. "Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs". *IEEE Power Engineering Society*, Piscataway, NJ 08855-1331, USA, 1998.

IRAVANI, M. R., WANG, X., POLISHCHUK, I., RIBEIRO, J. and SARSHAR, A. "Digital Time-Domain Investigation of Transient Behaviour of Coupling Capacitor Voltage Transformer". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 622-629, April 1998.

KAHANER, D., MOLER, C. and NASH, S. *Numerical Methods and Software*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1989.

KEZUNOVIC, M., ABUR, A., KOJOVIC, Lj., SKENDZIC, V., SINGH, H., FROMEN, C. W., SEVCIK, D. R. "DYNA-TEST Simulator for Relay Testing – Part I: Design Characteristics". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, pp. 1423-1429, October 1991.

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.

KOJOVIC, Lj., KEZUNOVIC, M., and NILSSON, S. L. "Computer Simulation of a Ferroresonance Suppression Circuit for Digital Modeling of Coupling Capacitor Voltage Transformers". *Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Design, Simulation and Analysis – ISMM*, Orlando, Florida, March 1992.

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

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

LUCAS, J. R., MCLAREN, P. G., KEERTHIPALA, W. W. L. and JAYASINGHE, R. P. "Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 152-159, January 1992.

MARTI, J. R., LINARES, L. R. and DOMMEL, H. W. "Current Transformers and Coupling-Capacitor Voltage Transformers in Real-Time Simulations". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, pp. 164-168, January 1997.

MICROSIM CORPORATION. *Filter Designer – Version 6.3*, 20 Fairbanks, Irvine, CA 92718, U.S.A., 1996.

MICROTRAN POWER SYSTEM ANALYSIS CORPORATION. *Transients Analysis Program Reference Manual*. Vancouver, 1999.

MINIPA. *ET – 2500 / ET – 2600 Multimetro Digital – Manual de Operação*, 1996.

- MORAES, H. M. e VASCONCELOS, J. C. A. “Sobretensões em TPC Durante Manobra de Chave Seccionadora”. *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, 17 a 22 de outubro 1999.
- NEVES, W. L. A. and DOMMEL, H. W. “On Modeling Iron Core Nonlinearities”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 417-423, May 1993.
- PASSONI & VILLA. *Capacitive Voltage Transformers: Types CVT, CVTH, CVTM. Descriptions and Instructions*, Viale Suzzani, 229, Milano 20162, Italy, 1979.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T. and FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in Fortran - The Art of Scientific Computing*. Second Edition. New York: Cambridge University Press, 1992.
- SOUZA, B. A. *Métodos Computacionais da Resposta de Circuitos Não-Lineares com Excitação Periódica: Um Estudo Voltado para Análise de Ferroressonância*. Tese de Doutorado, UFPB, abril 1995.
- SWEETANA, A. “Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, pp. 1989-2001, September/October 1971.
- SWEETANA, A. and FLUGUM, R. W. “A New Metering Accuracy Capacitive Potential Device”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, No. 5, pp. 499-510, May 1966.
- TEKTRONIX. *TDS 210 & TDS 220 Digital Real-Time Oscilloscopes – User Manual*, U.S.A., 1997.
- THE MATHWORKS INC. *MATLAB – High-Performance Numeric Computation and Visualization Software – User’s Guide*, 1992.

- TZIOUVARAS, D. A., McLAREN, P., ALEXANDER, G., DAWSON, D., EZSTERGALYOS, J., FROMEN, C., GLINKOWSKI, M., HASENWINKLE, I., KEZUNOVIC, M., KOJOVIC, Lj., KOTHEIMER, B., KUFFEL, R., NORDSTROM, J. and ZOCHOLL, S. "Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 62-72, January 2000.
- VALLE, A. L. S., OLIVEIRA, A. C. X., VERONESE, A., SANTOS, C. M., RODRIGUES, J. B., SILVA, J. B., VERNEY, J. L. F., CESAR, J. S., SILVA, J. L., GONÇALVES, J. M. P., FERREIRA, R., JORGE, S. L. e SOARES, V. L. C. "Efeito de Sobretensões de Manobra no 230 kV Sobre Circuitos de Baixa Tensão CA e CC". *Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XIV SNPTEE*, Belém, Pará, 26 a 30 de outubro 1997.
- VASCONCELOS, J. C. A. *Determinação da Função de Transferência de Transformador de Potencial Capacitivo*, Dissertação de Mestrado, UFPB, janeiro 2001.
- VASCONCELOS, J. C. A., FREIRE, A. R., NEVES, W. L. A. e FERNANDES Jr., D. "Subsídios para Modelagem de Transformadores de Potencial Capacitivos em Função da Frequência". *Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XVII SNPTEE*, Uberlândia, Minas Gerais, 19 a 24 de outubro 2003.
- VERMEULEN, H. J., DANN, L. R. and van ROOIJEN, J. "Equivalent Circuit Modelling of a Capacitive Voltage Transformer for Power System Harmonic Frequencies". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, pp. 1743-1749, October 1995.

Apêndice A

Conversão da Curva $V_{rms} - I_{rms}$ para Valores de Pico da Curva $\lambda - i$

Os valores de pico da curva de fluxo e corrente ($\lambda - i$) são computados a partir dos valores rms da curva de saturação de tensão e corrente ($V_{rms} - I_{rms}$). Para cada segmento linear k da curva $\lambda - i$, o valor do pico de fluxo é dado pela expressão abaixo:

$$\lambda_k = \frac{\sqrt{2}V_{k-rms}}{\omega}, \quad (\text{A.1})$$

em que ω é a frequência angular.

Para o primeiro segmento da curva $\lambda - i$, o valor do pico de corrente é dado pela Equação (A.2):

$$i_1 = \sqrt{2}I_{1-rms}. \quad (\text{A.2})$$

Assumindo que o fluxo é uma função senoidal, do tipo $\lambda_k(\theta) = \lambda_k \text{sen } \theta$, pode-se obter o pico de corrente para os outros segmentos ($k \geq 2$), a partir da avaliação da

corrente I_{k-rms} para cada segmento k , usando a Equação (A.3) a seguir [NEVES & DOMMEL, 1993]:

$$I_{k-rms}^2 = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\lambda_k \text{sen}\theta}{L_1} \right)^2 d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(i_1 + \frac{\lambda_k \text{sen}\theta - \lambda_1}{L_2} \right)^2 d\theta + \dots + \int_{\theta_{k-1}}^{\pi/2} \left(i_{k-1} + \frac{\lambda_k \text{sen}\theta - \lambda_{k-1}}{L_k} \right)^2 d\theta \right]. \quad (\text{A.3})$$

Na Equação (A.3), a única variável desconhecida é a indutância L_k do último segmento, pois seu valor depende de i_k que ainda vai ser determinado. A Equação (A.3) pode ser reescrita da forma abaixo [NEVES & DOMMEL, 1993]:

$$a_k Y_k^2 + b_k Y_k + c_k = 0, \quad (\text{A.4})$$

com a_k , b_k e c_k conhecidos e $Y_k = \frac{1}{L_k}$ a ser determinado. Y_k pode ser obtido, encontrando a solução positiva da Equação (A.4). Dessa forma, o pico de corrente i_k é computado através da Equação (A.5):

$$i_k = i_{k-1} + Y_k (\lambda_k - \lambda_{k-1}). \quad (\text{A.5})$$

Apêndice B

Componentes do TPC de 230 kV

B.1 Coluna Capacitiva

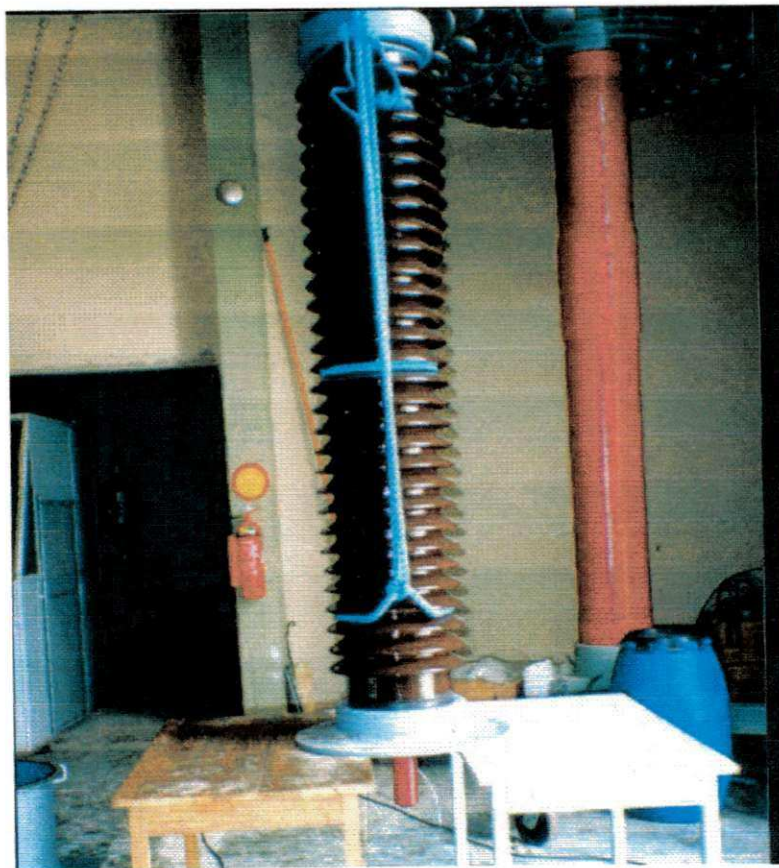


Figura B.1 – Coluna capacitativa do TPC de 230 kV.

B.2 Tanque Indutivo

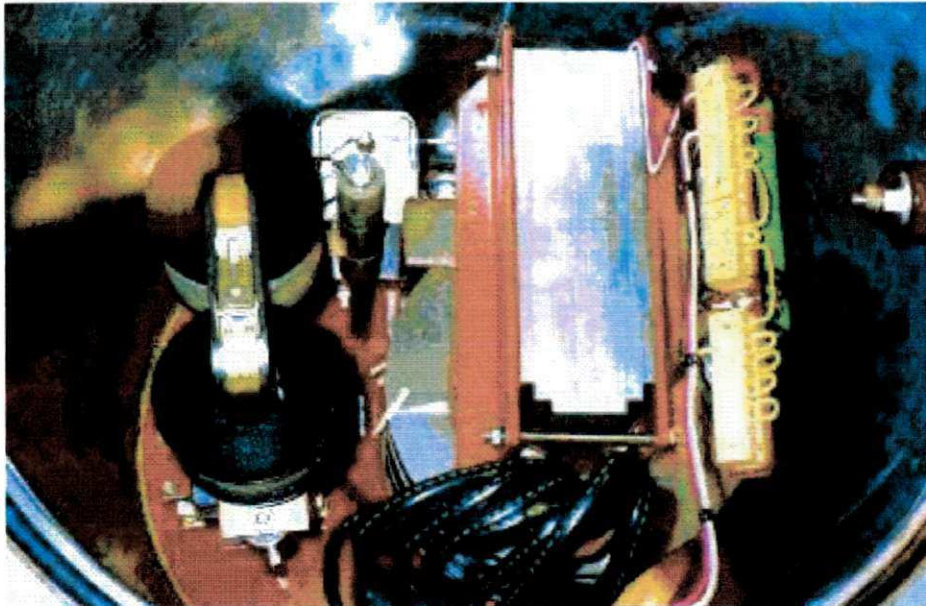


Figura B.2 – Vista superior do tanque indutivo do TPC de 230 kV.

B.3 Componentes Internos ao Tanque Indutivo

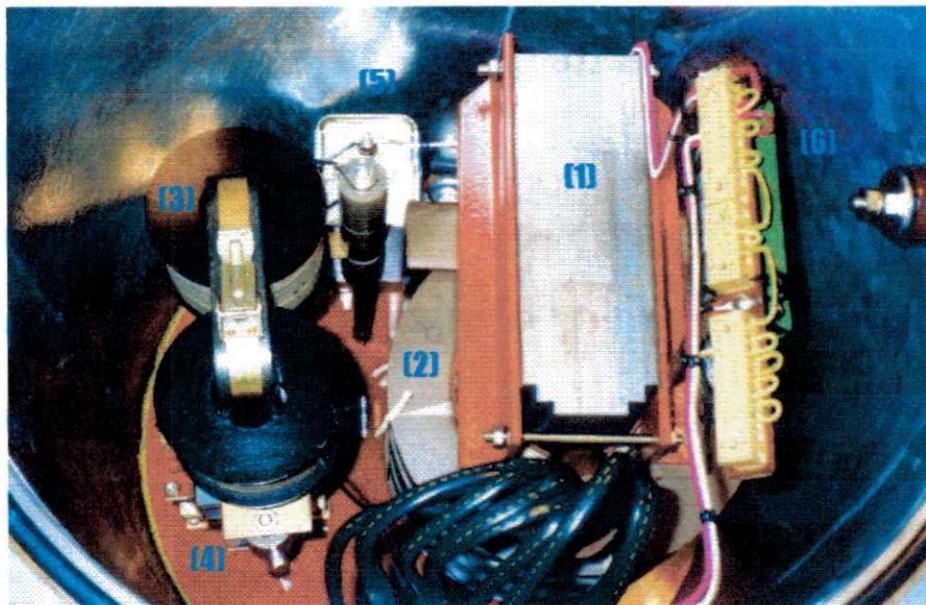


Figura B.3 – (1) Núcleo do transformador de potencial indutivo. (2) Enrolamento primário. (3) Reator de compensação. (4), (5) e (6) Reator, capacitor e resistor, respectivamente, do circuito supressor de ferroressonância.

B.4 Pára-raios de SiC do Circuito de Proteção

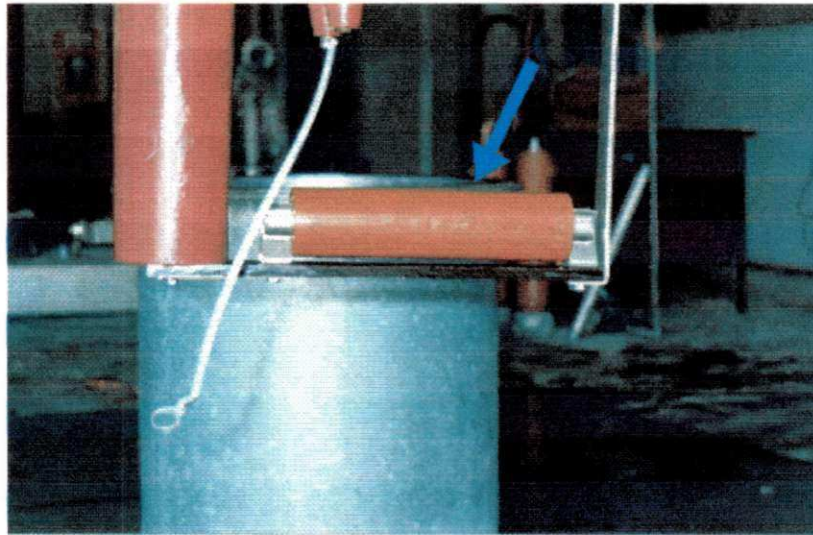


Figura B.4 – Pára-raios de carboneto de silício (SiC) do circuito de proteção do TPC de 230 kV.

B.5 Caixa de Terminais Secundários

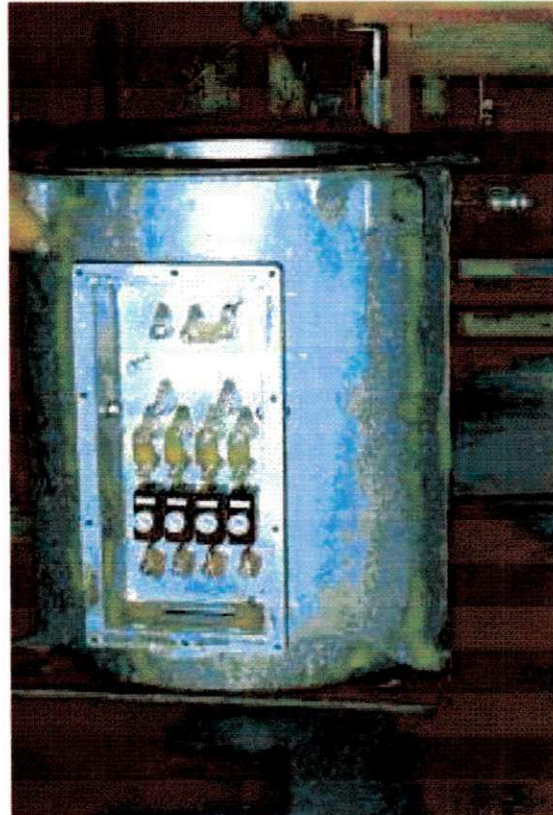


Figura B.5 – Caixa de terminais secundários do TPC de 230 kV.