

**Márcio Lachman**

**Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação**

**Florianópolis-SC  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Márcio Lachman**

Florianópolis, Setembro de 2007.

# Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação

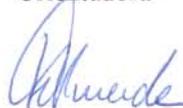
Márcio Lachman

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



---

Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.  
Orientadora



---

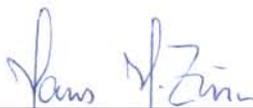
Kátia Campos de Almeida, Ph. D.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



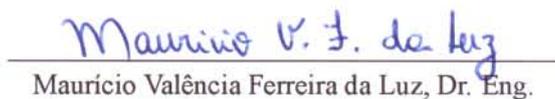
---

Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.  
Presidente



---

Hans Helmut Zürn, Ph. D.



---

Maurício Valência Ferreira da Luz, Dr. Eng.



---

Roberto de Souza Salgado, Ph. D.

*"Tudo tem um lado que reflete o bem, mas tem, inexorável e indubitavelmente, na sua razão inversa, o mal na mesma intensidade e proporção". Cacildo Silva*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Januário Lachman e Maria de Lourdes Lachman e meus irmãos, Januário Lachman Junior e Alessandro Lachman, por todo apoio e carinho oferecido durante esses anos;

A minha orientadora, Professora Jacqueline Gisèle Rolim, sempre acessível e disposta a esclarecer minhas dúvidas, por sua amizade e valiosa colaboração pelos conhecimentos compartilhados;

Ao Professor Hans Helmut Zürn e demais professores do LABSPOT - Laboratório de Sistemas de Potência, pelas sugestões e pelo permanente incentivo ao longo deste trabalho;

Aos amigos da ELETROSUL, Ernesto Takashi Futino, Giuliano Pereira e Egídio Luis Loch pelas valiosas informações técnicas para a realização desta pesquisa;

Aos meus professores de graduação da UDESC, em especial, Adalberto de Araújo Barreto Filho e Antônio Flávio Licarião Nogueira que me deram incentivo e apoio para fazer o mestrado;

Aos amigos de Iniciação Científica, Rafael Eduardo Ferreira, Vitor Varella Piazero, Wagner Avelino Folster e Annelise Anderson pela amizade e colaboração neste projeto de pesquisa;

A todos amigos e amigas do LABSPOT, em especial Miguel Moreto, Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva, Fábio Matsuo, Luciano Moreira Coelho, Diego Roberto Morais e David Guenji Takemura, pelo apoio e incentivo nesta jornada;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro;

E principalmente, a Deus por possibilitar a concretização de mais este objetivo.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação**

**Márcio Lachman**

Setembro de 2007

Orientadora: Jacqueline Gisele Rolim, Dr. Eng. - UFSC;

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs), Transformadores para Instrumentos, Monitoramento, Tensão de Sequência Zero.

Número de Páginas: xv + 110

**RESUMO:** Este trabalho propõe uma ferramenta de monitoramento remoto e avaliação do estado operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) instalados em subestações em operação. A metodologia empregada neste sistema é baseada no monitoramento das tensões de sequência zero resultantes de cada conjunto trifásico de TPCs instalados nos barramentos e baias das linhas de transmissão ou transformadores da subestação. A rotina computacional empregada utiliza um filtro de *Fourier* o qual permite a obtenção dos fasores de tensão de frequência fundamental a partir do processamento dos dados amostrados de tensão provenientes do secundário dos TPCs. Com os fasores obtidos, são calculadas as tensões de sequência zero com aplicação do teorema de *Fostescue*. Assim, as informações sobre o estado dos TPCs são obtidas através da comparação entre as componentes de tensão de sequência zero e limiares toleráveis pré-estabelecidos. Estes limiares foram obtidos através de cálculos e análises de arquivos de registradores digitais de perturbação durante operação normal de um sistema de transmissão. O objetivo da ferramenta é auxiliar as equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica na detecção de defeitos e anomalias nestes equipamentos para o correto funcionamento dos sistemas de proteção e medição que fazem parte do sistema de potência.

Estudos da modelagem do TPC foram realizados utilizando os *softwares ATP e PSCAD*, os quais possibilitaram analisar o comportamento do equipamento nos domínios da frequência e do tempo respectivamente. Para validação da ferramenta foram realizadas simulações digitais dos diferentes defeitos que podem ocorrer em TPCs, a partir dos modelos matemáticos equivalentes. Os resultados das simulações do sistema de monitoramento *on-line* empregando a metodologia proposta foram satisfatórios, demonstrando a eficiência na detecção e diagnóstico de anomalias que eventualmente podem surgir nestes equipamentos comprovando assim a viabilidade desta metodologia como uma ferramenta de manutenção preditiva.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Remote Monitoring System and Evaluation of the Operative State of Coupling Capacitor Voltage Transformer (CCVT) Installed in Substations in Operation**

**Márcio Lachman**

September - 2007

Advisor: Jacqueline Gisele Rolim, Dr. - UFSC;

Area of Concentration: Electrical Energy Systems

Key words: Coupling Capacitor Voltage Transformer (CCVT), Instrument Transformers, Monitoring, zero-sequence voltage.

Number of Pages: xv + 110

**ABSTRACT:** This work proposes a tool for remote monitoring and evaluation of the operative state of Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVTs) installed in substations in operation. The methodology used in this system is based on the monitoring of the zero-sequence voltage resulting from each three-phase set of CCVTs installed in the busbars and bays of transmission lines or transformers at the substation. The first module of the computational tool applies a Fourier filter which computes the phasors of the fundamental frequency voltage by processing the sampled data from the secondary of each CCVT. With the three phasors, the zero-sequence voltage is calculated through the application of the Fostescue theorem. Afterwards, the value of the zero sequence voltage is compared with a threshold. This threshold was established after studies based on data of digital recorders during the normal operation of a transmission system. The accuracy of the CCVT and monitoring system was also considered. The objective of the tool is to support the maintenance specialists in the task of detecting defects in CCVTs, in order to assure their correct operation and, consequently, the correct operation of the protection and measurement systems.

Studies based on the modeling of the CCVT have been carried out using ATP and PSCAD software. Several simulations were performed, aiming to analyze the behavior of the equipment in the frequency and time domains. The sensitivity of the method was evaluated through studies based on the simulation of several kinds and levels of defects in CCVTs, observing how they affect the zero sequence voltage. The results of these simulations, using data from real CCVTs, show that the methodology is efficient in the task of detecting and diagnosing anomalies in this kind of equipment, proving the viability of this methodology as a support tool for predictive maintenance.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Proteção e medição de energia em sistemas elétricos de potência . . . . .	1
1.2	Revisão Bibliográfica . . . . .	3
1.3	Organização da Dissertação . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Transformadores para Instrumentos</b>	<b>6</b>
2.1	Introdução . . . . .	6
2.2	Considerações e utilidades dos transformadores para instrumentos . . . . .	6
2.3	Transformadores de corrente . . . . .	7
2.3.1	Características construtivas . . . . .	10
2.3.2	Classificação de serviço para TCs . . . . .	11
2.3.3	Erros dos transformadores de corrente . . . . .	12
2.3.4	Classe de exatidão . . . . .	14
2.3.5	Especificação de TCs . . . . .	14
2.3.6	Ensaio de recepção . . . . .	16
2.4	Transformador de potencial . . . . .	16
2.4.1	Erros dos transformadores de potencial . . . . .	17
2.4.2	Classe de exatidão . . . . .	20
2.4.3	Especificação de TPs . . . . .	21
2.4.4	Ensaio de recepção para TPs . . . . .	23
2.5	Transformador de potencial capacitivo (TPC) . . . . .	23

2.5.1	Divisor de tensão capacitivo . . . . .	24
2.5.2	Reator de compensação e transformador de potencial indutivo . . . . .	24
2.5.3	Circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) . . . . .	26
2.5.4	Acessórios para conexão de equipamentos de onda portadora (CAR) . . . . .	28
2.5.5	Ensaio de recepção para TPCs . . . . .	28
2.6	Transformadores ópticos . . . . .	28
2.6.1	Transformadores de potencial ópticos . . . . .	30
2.6.2	Transformadores de corrente ópticos . . . . .	31
2.7	Considerações finais . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Modelagem dos Transformadores de Potencial Capacitivo</b>	<b>34</b>
3.1	Introdução . . . . .	34
3.2	Modelo geral do TPC . . . . .	34
3.3	Modelagem através de circuito equivalente para simulações digitais . . . . .	35
3.4	Estudos no domínio da frequência . . . . .	36
3.4.1	Modelagem por função de transferência . . . . .	38
3.4.2	Simulações através de circuito equivalente utilizando o <i>software</i> ATP no domínio da frequência . . . . .	40
3.5	Estudos no domínio do tempo . . . . .	46
3.5.1	Simulações através de circuito equivalente utilizando o <i>software</i> PSCAD no domínio do tempo . . . . .	47
3.6	Considerações finais . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Principais Defeitos e Manutenção em TPCs</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução . . . . .	55
4.2	Defeitos na coluna capacitiva . . . . .	55
4.2.1	Alterações no valor da capacitância . . . . .	56
4.2.2	Defeito na câmara de expansão . . . . .	58
4.3	Defeitos na unidade eletromagnética . . . . .	59

4.3.1	Chave de aterramento . . . . .	59
4.3.2	Problemas no isolamento dos enrolamentos do TPI . . . . .	59
4.3.3	Defeitos no reator de compensação . . . . .	60
4.3.4	Defeito no dispositivo supressor de ferro-ressonância . . . . .	61
4.3.5	Capacitores de surto . . . . .	61
4.3.6	Outros defeitos . . . . .	61
4.4	Sobrecarga, sobreaquecimento e cargas não lineares em TPCs . . . . .	61
4.4.1	Efeitos da sobrecarga e do sobreaquecimento . . . . .	62
4.4.2	Cargas não-lineares . . . . .	62
4.5	Conseqüências dos defeitos em TPCs . . . . .	63
4.5.1	Conseqüências nos sistemas de proteção . . . . .	63
4.5.2	Conseqüências em sistemas de medição e faturamento de energia . . . . .	64
4.6	Ensaio elétrico para medir a capacitância e o fator de dissipação em cada unidade capacitiva . . . . .	64
4.6.1	Testando com ponte de capacitância . . . . .	66
4.6.2	Medições de capacitância e fator de dissipação . . . . .	67
4.6.3	Precauções para testes de alta tensão . . . . .	67
4.6.4	Procedimentos dos testes em TPCs com 1 unidade capacitiva . . . . .	68
4.6.5	Procedimentos dos testes em TPCs com 2 unidades capacitivas . . . . .	69
4.7	Análise da freqüência de alguns defeitos em TPCs . . . . .	71
4.8	Conclusões . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Sistema para Monitoramento e Diagnóstico de TPCs</b>	<b>73</b>
5.1	Introdução . . . . .	73
5.2	Descrição do sistema de aquisição e tratamento dos sinais de saída dos TPCs . . . . .	74
5.3	Descrição da metodologia proposta . . . . .	75
5.3.1	Filtro de Fourier . . . . .	76
5.3.2	Limiares para detecção de defeitos . . . . .	79

5.3.3	Módulos de diagnóstico . . . . .	84
5.4	Simulações dos defeitos em TPCs . . . . .	85
5.4.1	Defeitos na coluna capacitiva . . . . .	86
5.4.2	Defeitos na unidade eletromagnética . . . . .	89
5.5	Conclusões . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>96</b>
6.1	Conclusões . . . . .	96
6.2	Sugestões para trabalhos Futuros . . . . .	97
<b>A</b>	<b>Simulações dos defeitos utilizando TPCs modelo TRENCH - TEMF 230 H</b>	<b>98</b>
A.1	Defeitos na coluna capacitiva . . . . .	98
A.1.1	Defeitos na unidade capacitiva superior $C_1$ . . . . .	98
A.1.2	Defeitos na unidade capacitiva inferior $C_2$ . . . . .	99
A.2	Defeitos nos enrolamentos do transformador intermediário . . . . .	101
A.2.1	Defeitos no enrolamento primário . . . . .	101
A.2.2	Defeitos no enrolamento secundário . . . . .	104
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>107</b>

# Lista de Figuras

1.1	Diagrama esquemático simplificado de um sistema de proteção (PHADKE; THORP, 1988) . . . . .	2
1.2	Método da soma das correntes . . . . .	4
2.1	Diagrama esquemático simplificado de um sistema de transmissão de energia elétrica e transformadores para instrumentos (ABB, 2004) . . . . .	7
2.2	Diagrama representativo de um transformador de corrente . . . . .	8
2.3	Transformadores de corrente . . . . .	9
2.4	Instalação de transformadores de corrente tipo barra fixa de alta tensão (AREVA, 2000)	10
2.5	Curva típica dos transformadores de corrente (CLARK, 1983) . . . . .	12
2.6	Paralelogramo da classe de exatidão 0.3 para TCs . . . . .	15
2.7	Transformadores de potencial . . . . .	18
2.8	Transformadores de potencial indutivo instalados em uma subestação (AREVA, 2000)	18
2.9	Transformadores de potencial . . . . .	20
2.10	Paralelogramo da classe de exatidão 0.3 para TPs . . . . .	21
2.11	Diagrama do TPC . . . . .	24
2.12	Detalhes da Coluna Capacitiva (TRENCH, 2000) . . . . .	25
2.13	Detalhes da Caixa Base e Componentes do TPC (TRENCH, 2000) . . . . .	27
2.14	Circuitos supressores de ferro-ressonância . . . . .	28
2.15	Transformador de potencial capacitivo instalado em uma subestação (AREVA, 2000)	29
2.16	Transdutor Eletro-óptico de tensão (ABB, 2004) . . . . .	31
2.17	Transdutor Magnético-óptico de corrente (ABB, 2004) . . . . .	32

2.18	Transformador óptico de tensão e corrente (ABB, 2004) . . . . .	32
3.1	Modelo geral do TPC. . . . .	35
3.2	Modelo do TPC para estimação de parâmetros e análise da resposta em frequência. . . . .	37
3.3	Medição de resposta em frequência conforme KEZUNOVIC et al. (1992). . . . .	37
3.4	Medição de resposta em frequência proposta por KOJOVIC et al (1994) . . . . .	38
3.5	Modelagem do CSF. . . . .	38
3.6	Circuito do TPC através de blocos de impedância para o desenvolvimento da expressão analítica da função de transferência, sendo $V_p$ a entrada e $V_s$ a saída do sistema . . . . .	39
3.7	Implementação do modelo do TPC utilizando o software ATPdraw . . . . .	41
3.8	Influência da capacitância parasita do reator de compensação ( $C_c$ ) na resposta em frequência do modelo do TPC. . . . .	42
3.9	Influência da capacitância parasita do enrolamento primário do transformador intermediário ( $C_p$ ) na resposta em frequência do TPC. . . . .	42
3.10	Influência do reator de compensação na resposta em frequência do TPC. . . . .	43
3.11	Influência da carga na resposta em frequência do TPC. . . . .	43
3.12	Influência dos parâmetros $C_c$ e $C_p$ na resposta em frequência do TPC. . . . .	44
3.13	Influência dos parâmetros $C_c$ e $C_p$ e do CSF na resposta em frequência do TPC. . . . .	44
3.14	Sensibilidade da curva de amplitude e fase da relação de tensão de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes . . . . .	45
3.15	Circuito equivalente do TPC após o reator de compensação proposto por LUCAS et al.(1992) . . . . .	48
3.16	Configuração do modelo de núcleo magnético proposto por LUCAS et al.(1992) . . . . .	48
3.17	Esquema utilizado para simulação de uma falta fase-terra no primário do TPC . . . . .	49
3.18	Transitório residual no secundário do TPC com carga puramente resistiva . . . . .	49
3.19	Transitório residual no secundário do TPC para carga puramente indutiva . . . . .	49
3.20	Comparação da tensão transitória no secundário do TPC com iniciação da falta em zero e no pico da tensão primária . . . . .	51
3.21	Tensão transitória no secundário do TPC desconsiderando o circuito supressor de ferro-ressonância . . . . .	52

3.22	Densidade de fluxo no núcleo eletromagnético do TPC desconsiderando o circuito supressor de ferro-ressonância . . . . .	52
3.23	Tensão transitória no secundário do TPC considerando o circuito supressor de ferro-ressonância . . . . .	53
3.24	Densidade de fluxo no núcleo eletromagnético do TPC considerando o circuito supressor de ferro-ressonância . . . . .	53
4.1	Detalhes da construção de elementos capacitivos (DOBLE, 2005) . . . . .	57
4.2	Comportamento da capacitância com a temperatura (ABB, 2005) . . . . .	57
4.3	Detalhe da Câmara de Expansão (DOBLE, 2005) . . . . .	59
4.4	Representação das correntes no dielétrico . . . . .	65
4.5	Circuito equivalente de um capacitor real . . . . .	65
4.6	Diagrama esquemático do TPC . . . . .	66
4.7	Teste 1 - Medição de $C_{1-1}$ (TPC com uma seção capacitiva) (TRENCH, 2000) . . . .	68
4.8	Teste 2 - Medição de $C_2$ (TPC com uma seção capacitiva) (TRENCH, 2000) . . . . .	69
4.9	Teste 1 - Medição de $C_{1-1}$ (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000) . . .	69
4.10	Teste 2 - Medição de $C_{1-2}$ (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000) . . .	70
4.11	Teste 3 - Medição de $C_2$ (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000) . . . .	70
4.12	freqüência dos sintomas das falhas em TPCs (ROLIM, 2004) . . . . .	71
5.1	Arquitetura do Sistema de Monitoramento . . . . .	74
5.2	Implementação do circuito no <i>software</i> PSCAD . . . . .	76
5.3	Varredura das janelas utilizando Filtro de <i>Fourier</i> de 1 ciclo (MORETO, 2005) . . . .	77
5.4	Subestação de Itajaí - SC (ELETROSUL) . . . . .	82
5.5	Níveis de tensão de sequência zero . . . . .	83
5.6	Fluxograma do sistema de monitoramento . . . . .	84
5.7	Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a porcentagem da capacitância $C_1$ danificada . . . . .	87
5.8	Tensões de fase no secundário dos TPCs . . . . .	88
5.9	Tensões no secundário dos TPCs e as componentes $V_0$ resultantes . . . . .	88

5.10	Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a porcentagem da capacitância $C_2$ danificada . . . . .	89
5.11	Tensões de fase no secundário dos TPCs . . . . .	90
5.12	Tensões no secundário dos TPCs e as componentes $V_0$ resultantes . . . . .	90
5.13	Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a redução percentual do enrolamento primário . . . . .	91
5.14	Tensões de fase no secundário dos TPCs . . . . .	92
5.15	Tensões no secundário dos TPCs e as componentes $V_0$ resultantes . . . . .	92
5.16	Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a a redução percentual do enrolamento secundário . . . . .	93
5.17	Tensões de fase no secundário dos TPCs . . . . .	94
5.18	Tensões no secundário dos TPCs . . . . .	94
A.1	Perfil de tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero resultante ( $V_0$ ), versus o número de elementos capacitivos danificados em $C_1$ . . . . .	99
A.2	Tensões no secundário dos TPCs . . . . .	100
A.3	Fasores das tensões no secundário dos TPCs . . . . .	100
A.4	Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus o número de elementos capacitivos danificados em $C_2$ . . . . .	101
A.5	Tensões no secundário dos TPCs . . . . .	102
A.6	Fasores das tensões no secundário dos TPCs . . . . .	102
A.7	Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus a redução percentual do enrolamento primário . . . . .	103
A.8	Tensões no secundário dos TPCs . . . . .	103
A.9	Fasores das tensões no secundário dos TPCs . . . . .	104
A.10	Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus a redução percentual do enrolamento secundário . . . . .	105
A.11	Tensões no secundário dos TPCs . . . . .	105
A.12	Fasores das tensões no secundário dos TPCs . . . . .	106

# Lista de Tabelas

2.1	Classes de exatidão conforme IEC 60044-1 . . . . .	15
2.2	Ensaio de recepção para Transformadores de Corrente . . . . .	16
2.3	Classes de exatidão conforme IEC 60044-2 . . . . .	21
2.4	Designações dos padrões de carga conforme IEEE C57.13 . . . . .	22
2.5	Ensaio de recepção para Transformadores de Potencial . . . . .	23
2.6	Ensaio de recepção para Transformadores de Potencial Capacitivo . . . . .	30

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Proteção e medição de energia em sistemas elétricos de potência

Sistemas elétricos de potência são conjuntos de equipamentos destinados a gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica. Nestes sistemas existem redes que interconectam as fontes de energia elétrica com os usuários, cobrindo grandes áreas. As principais funções em um sistema de potência são: transformar energia de diferentes fontes para a forma elétrica, transportar a energia elétrica para diferentes localizações e distribuir a energia para os usuários finais.

O sistema de potência é constituído de vários componentes a fim de realizar suas diferentes funções, entre eles destacam-se:

1. Geradores: Convertem energia para a forma elétrica;
2. Linhas de Transmissão: Transportam a energia elétrica em longas distâncias;
3. Transformadores de Potência: Reduzem ou elevam o nível de tensão, para ser transmitida ou reduzida, para os usuários finais;
4. Cargas: Convertem a energia para diferentes formas de trabalho conforme a necessidade.

Os sistemas de proteção têm como finalidade proteger os equipamentos que constituem o sistema elétrico de potência, tais como, transformadores, linhas de transmissão ou geradores, mantendo a continuidade do serviço de energia e evitando danos a estes equipamentos.

Se uma falta atingir algum dos componentes do sistema, e este não for isolado rapidamente através da proteção, isto pode ocasionar uma instabilidade ou desligamento de uma área maior do que a mínima necessária para isolar o defeito.

O sistema de proteção deve satisfazer os seguintes requisitos para o sistema de potência obter um correto desempenho (MASON, 1956):

1. **Seletividade:** Seletividade é a capacidade da proteção em distinguir aquelas condições para as quais uma imediata operação é requerida daquelas para as quais nenhuma operação ou um retardo de atuação é exigido. Esta exigência é importante para assegurar que somente se isole a parte defeituosa do sistema, mantendo em serviço as demais partes;
2. **Sensibilidade:** Sensibilidade é a capacidade da proteção responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetada;
3. **Velocidade:** As sobrecorrentes geradas pela falta devem ser extintas no menor tempo possível, de modo a evitar que o defeito interfira em outras partes do sistema. Esta exigência é importante para minimizar os impactos de uma falta nos equipamentos do sistema de potência;
4. **Confiabilidade:** A confiabilidade de um sistema de proteção é a probabilidade de um componente ou de um sistema satisfazer a função prevista, sob determinadas situações. Assim, a proteção não deve atuar de forma errônea em casos onde não houver falta e também não deixar de atuar na existência de uma falta.

Embora o sistema de proteção seja entendido como conjuntos de relés, na verdade este sistema consiste de vários subsistemas que contribuem para o processo de remoção de faltas (PHADKE; THORP, 1988). Os subsistemas podem ser identificados na Figura 1.1. Os disjuntores têm a função de isolar o circuito com problemas ou parte dele, pela interrupção da corrente e são comandados por sinais apropriados provenientes dos relés (*tripping*).

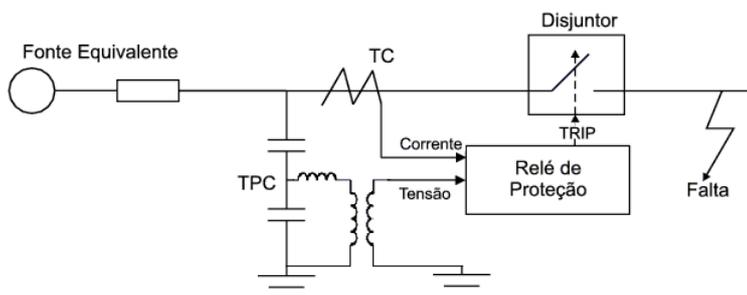


Figura 1.1: Diagrama esquemático simplificado de um sistema de proteção (PHADKE; THORP, 1988)

Os transformadores para instrumentos tais como: transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs) e os transformadores de potencial capacitivo (TPCs) constituem equipamentos fundamentais no sistema de proteção e medição. Estes equipamentos são utilizados para reduzir os altos níveis de correntes e tensões do sistema de transmissão para níveis adequados aos dispositivos de proteção e medição. Os relés de proteção respondem a partir das condições do sistema elétrico, através das entradas de tensões e correntes, fornecidas pelos transformadores para instrumentos (TIs).

Todavia, os equipamentos que compõem o sistema de proteção e medição não estão imunes a defeitos e falhas. Considerando a grande importância dos transformadores para instrumentos no sistema de proteção, é proposto neste trabalho um sistema de monitoramento *on-line* de transformadores

de potencial capacitivos a fim de detectar alterações nas suas características para o correto funcionamento dos sistemas de proteção e medição.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

O monitoramento de equipamentos em subestações tem por objetivo o conhecimento do estado físico destes dispositivos e o diagnóstico da evolução do envelhecimento e dos desgastes, de forma a se ter informações antecipadas de quando estes necessitarão de manutenção, ou informar defeitos gradativos que possam causar danos ainda maiores, resultando na sua indisponibilidade.

O monitoramento *on-line* de transformadores e de outros equipamentos instalados em subestações, é efetuado pelo acompanhamento de medições de determinados parâmetros ou em suas condições enquanto energizados. Os sistemas de monitoramento *on-line* possuem grande utilidade na operação e manutenção destes equipamentos. Uma das vantagens destes sistemas se deve ao fato do aumento da disponibilidade dos equipamentos e da possibilidade de gerenciar sua vida útil, evitando a evolução de defeitos que podem levar a falhas catastróficas.

O Fator de Potência (FP) do isolamento de sistemas elétricos tem sido reconhecido por um longo tempo como um bom indicador do estado de equipamentos e da qualidade da isolação elétrica destes. Qualquer material isolante em estado de degradação irá apresentar, cedo ou tarde, um acréscimo em seu fator de potência. Por vários anos os ensaios de fator de potência e de capacitância eram conduzidos somente com o equipamento desenergizado (CUMMINGS; BOYLE; ARP, 1988). Além do fator de potência, medidas de capacitância também são muito úteis e confiáveis como indicativo do diagnóstico de equipamentos.

Um método muito sensível para se obter as medidas de fator de potência e de capacitância *on-line* é o *método da soma das correntes* proposto por LACHMAN, WALTER e GUGGENBERG (2000) para monitoramento de buchas. O princípio básico deste método é que a soma dos fasores de tensão ou corrente é zero em um sistema trifásico equilibrado conforme ilustra a Figura 1.2. Portanto, a condição das buchas pode ser avaliada através da soma das correntes de forma vetorial que fluem nas capacitâncias de cada bucha. Se as buchas são idênticas e as tensões no sistema são perfeitamente balanceadas, a soma das correntes será teoricamente zero. Quando ocorre algum defeito ou deterioração nestes equipamentos, o valor dos parâmetros destes dispositivos tais como, capacitância e fator de potência sofrem alterações, resultando em uma corrente diferente de zero.

Na realidade, as buchas nunca são idênticas nem as tensões no sistema são totalmente balanceadas. Como resultado, mesmo as buchas estando em perfeito estado, a soma das correntes não é exatamente zero para cada conjunto trifásico. Para contornar este problema sistemas inteligentes são utilizados para determinar se a mudança na resultante da soma das correntes está relacionada realmente com a deterioração nas buchas ou com mudanças nas condições do sistema e do ambiente, tais como, flutuações de tensão na rede, mudanças de temperatura no ambiente, entre outros fatores (LACHMAN; WALTER; GUGGENBERG, 2000). Enfim, utilizando o *método da soma das corren-*

tes juntamente com técnicas de inteligência artificial, torna-se possível a detecção de defeitos nestes dispositivos.

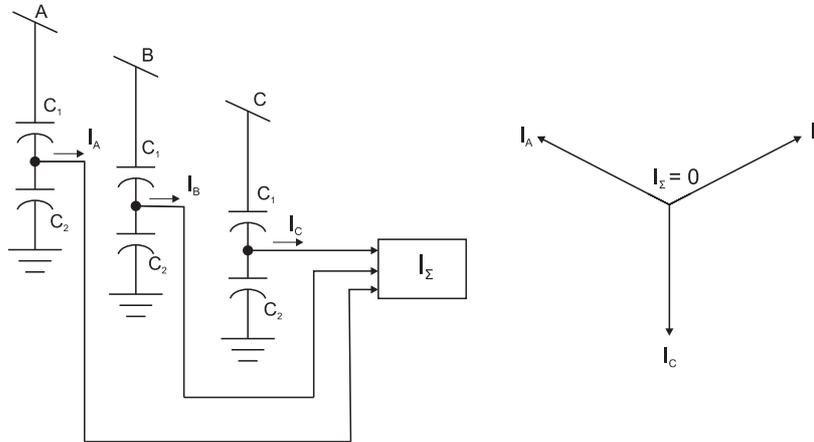


Figura 1.2: Método da soma das correntes

Uma força tarefa do IEEE apresentou no ano de 2000 (CHU; LUX, 2000), uma revisão das técnicas e dos principais parâmetros que podem ser monitorados em tempo real em transformadores de potência, buchas e transformadores para instrumentos. Neste trabalho são enumerados os principais processos que podem deteriorar estes equipamentos, tais como: umidade em óleo isolante, descargas parciais, sobreaquecimento ou sobrecarga, entre outros.

MICHAELIS (2003) apresenta dois métodos para realizar o monitoramento contínuo de TPCs, utilizando controladores lógicos programáveis (CLPs) e interfaces Homem-Máquina (IHM). Ambos os métodos são baseados na diferença entre as tensões das fases para detectar a deterioração dos elementos capacitivos ou avarias nestes equipamentos. No primeiro método o sistema faz a aquisição das tensões de cada fase do conjunto de TPCs, calcula as três diferenças e utiliza um algoritmo para avaliar estas diferenças e identificar alterações em alguma das unidades de TPCs. O segundo método utiliza as tensões de seqüência positiva e negativa para indicar desbalanços entre as fases nas quais os TPCs estão conectados, podendo assim, sinalizar problemas nestes equipamentos através de alarmes.

Em diversas áreas a técnica de manutenção baseada nas condições de operação (ou manutenção centrada em confiabilidade) dos equipamentos vem sendo aplicada na prática, onde de forma contínua o monitoramento e o diagnóstico são realizados para aquisição de parâmetros que possam estimar as condições do equipamento e identificar ações a fim de reduzir a probabilidade de falhas (NASA, 2000).

Em empresas de energia a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) permite aprimorar a qualidade do serviço prevenindo os equipamentos contra falhas funcionais. Em ROLIM et al. (2004a) é apresentada a análise de MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) para TPCs, sendo que esta análise foi baseada na experiência de equipes de manutenção da ELETROSUL, empresa brasileira de transmissão de energia. Inicialmente foi realizado um levantamento estatístico das falhas nestes equipamentos a fim de levar em conta um grande número de falhas possíveis. Deste trabalho obtiveram-se contribuições para estudos no desenvolvimento do sistema de monitoramento quanto ao processo de

detecção de anormalidades em TPCs.

### 1.3 Organização da Dissertação

Nesta dissertação de mestrado é apresentada uma ferramenta de monitoramento *on-line* de TPCs baseada no teorema de *Fostescue* ou componentes simétricas, onde cada conjunto trifásico de TPCs gera um vetor de tensão de seqüência zero ( $V_0$ ). O detalhamento desta ferramenta é descrito no decorrer deste trabalho.

A dissertação está organizada conforme a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais e características dos transformadores para instrumentos, em especial dos transformadores de potencial capacitivo, onde serão descritos os principais componentes que constituem o equipamento e seu funcionamento.
- No Capítulo 3 é feita uma revisão sobre alguns modelos de TPCs encontrados na literatura, tanto empregando a modelagem através de circuito equivalente para simulações digitais, quanto por função de transferência a partir de blocos de impedância. Algumas simulações utilizando estes modelos estudados foram realizadas para avaliar a resposta transitória e a resposta no domínio da frequência. Através destas simulações foi possível analisar o comportamento do TPC frente a fenômenos transitórios e também no domínio da frequência onde é feita a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo.
- No Capítulo 4 são listados (ou relacionados) os principais defeitos que podem ocorrer em TPCs e suas conseqüências nos sistemas de proteção e de medição. São destacados os problemas na coluna capacitiva e na unidade eletromagnética e as principais causas destes defeitos como descargas parciais, problemas de isolamento nos enrolamentos, cargas não lineares e os efeitos de sobrecarga e de sobreaquecimento. Alguns ensaios de medição de capacitância e de fator de dissipação são descritos juntamente com alguns procedimentos de manutenção para correção destes defeitos.
- A metodologia proposta para o sistema de monitoramento e diagnóstico de TPCs é apresentado no Capítulo 5, no qual também é descrito o módulo de aquisição e tratamento dos sinais no secundário dos TPCs e a arquitetura deste sistema. Os limiares de tensão de seqüência zero são definidos através de análises de arquivos oscilografia que registram as tensões de saída dos TPCs em um formato COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*) e análise das incertezas nos equipamentos envolvidos.

Os níveis de tensão de seqüência zero para cada tipo de defeito são obtidos através de simulações utilizando o *software* PSCAD (*Power Systems CAD*)(PSCAD/EMTDC, 2005). O fluxograma da rotina computacional a ser utilizada pelo sistema é apresentado bem como, o filtro de *Fourier*, utilizado para estimar os fasores de tensão provenientes das saídas dos TPCs.

- Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões referentes a este trabalho de dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Transformadores para Instrumentos

### 2.1 Introdução

Os transformadores para instrumentos (TIs) possuem grande importância para a operação dos sistemas de transmissão de energia. Estes equipamentos reduzem os sinais de tensão e de corrente para níveis economicamente viáveis a fim de alimentar relés de proteção, instrumentação e medição. Portanto, os TIs constituem o elo de ligação entre estes dispositivos e o sistema de transmissão.

Neste capítulo serão abordadas as características básicas dos diferentes tipos de TIs como: transformadores de corrente (TCs), transformadores ópticos, transformadores de potencial (TPs) e principalmente os transformadores de potencial capacitivos (TPCs) os quais são o objetivo deste trabalho.

### 2.2 Considerações e utilidades dos transformadores para instrumentos

Existem três utilidades básicas dos transformadores para instrumentos (CLARK, 1983):

1. Medição: Para finalidades de faturamento e transação de energia;
2. Controle e Proteção: Para proteção do sistema, fornecendo informações das condições do sistema para os relés de proteção;
3. Levantamento e monitoramento da carga: para gerenciamento econômico de cargas industriais;

Geralmente os TIs para propósitos de medição e faturamento, requerem elevada exatidão quando operam nas faixas de tensão e corrente em condições normais do sistema. Dependendo da necessidade destas aplicações, o projeto e a construção dos TIs podem ser bastante diferentes.

Como exemplo, pode-se citar a diferença entre os transformadores de corrente destinados à proteção com os TCs de medição. Os TCs para proteção devem se manter dentro de sua classe de exatidão até correntes de curto-circuito de 20 vezes o valor de corrente nominal do equipamento. Portanto o

núcleo magnético do TC de proteção possui seção transversal maior, para não saturar no instante do curto-circuito.

No caso dos TCs destinados à medição, os núcleos magnéticos são de seção menor que os de proteção. Isto é um benefício, porque a saturação limita o valor de sobretensões (CLARK, 1983). Durante perturbações, como sobretensões transitórias ou uma falta no sistema, a saída dos TIs é utilizada pelos relés de proteção para dar início a uma ação apropriada, (abertura ou fechamento de chaves/disjuntores, reconfiguração do sistema, etc.) a fim de limitar os efeitos de distúrbios e proteger o resto do sistema, por isso os TIs precisam fornecer informações confiáveis mesmo quando os níveis de tensão e corrente se afastam consideravelmente dos valores nominais.

Os níveis típicos de saída dos TIs são de 1-5 Ampères e 66,4-115 Volts para transformadores de corrente e de potencial respectivamente. A Figura 2.1 ilustra um diagrama esquemático simplificado de um sistema de transmissão de energia elétrica, onde mostra algumas utilidades dos TIs.

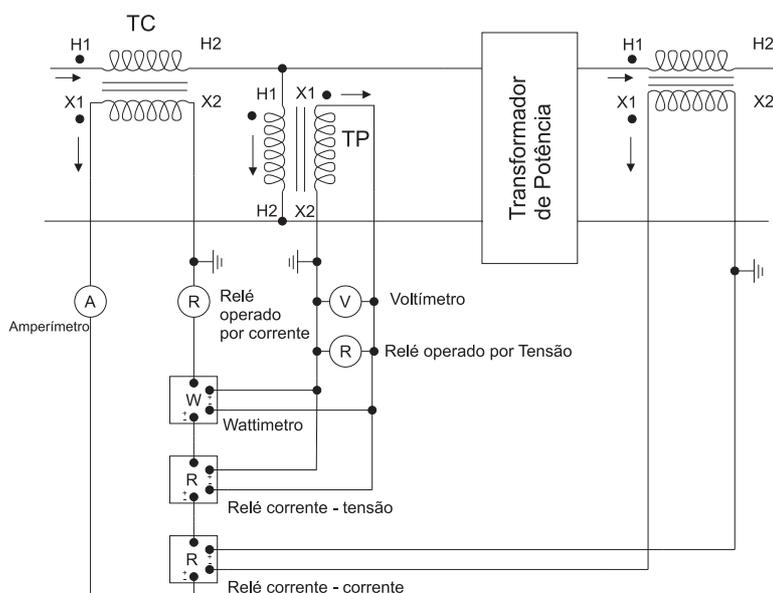


Figura 2.1: Diagrama esquemático simplificado de um sistema de transmissão de energia elétrica e transformadores para instrumentos (ABB, 2004)

### 2.3 Transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos que em condições normais fornecem uma corrente secundária proporcional à corrente primária, diferindo em fase por um pequeno ângulo que é aproximadamente zero para conexões apropriadas. Os transformadores de corrente são utilizados para suprir aparelhos que apresentam baixa resistência elétrica, como amperímetros, relés, medidores de energia e potência, etc. Este dispositivo transforma a corrente que circula no enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário (TOUS, 2000).

O número de espiras do enrolamento primário é denotado como  $N_1$  e o número de espiras do enrolamento secundário por  $N_2$ . O circuito equivalente de um TC está ilustrado na Figura 2.2, em que a resistência e a reatância primárias estão definidas como  $R_1$  e  $X_1$ , a resistência e a reatância secundárias estão definidas como  $R_2$  e  $X_2$  e o ramo magnetizante está caracterizado pelos seus dois parâmetros, isto é, a resistência  $R_\mu$ , que é responsável pelas perdas ôhmicas, através das correntes de histerese e de Foucault, desenvolvidas na massa do núcleo de ferro com a passagem das linhas de fluxo magnético, e  $X_\mu$  responsável pela corrente reativa devido à circulação das mesmas linhas de fluxo no circuito magnético (MAMEDE FILHO, 2005).

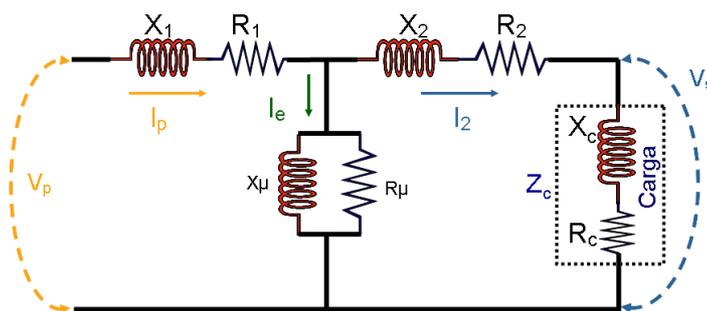


Figura 2.2: Diagrama representativo de um transformador de corrente

O princípio de funcionamento do TC é similar ao transformador de potencial e pode ser explicado pela lei de indução de *Faraday*, no entanto, a operação deste transformador é bastante diferente. O enrolamento primário é conectado em série com a corrente a ser medida conforme a Figura 2.3, onde a queda de tensão neste enrolamento é negligenciada pelo motivo da fonte da corrente no primário ser injetada pela rede. A corrente no primário  $i_1(t)$  induz uma densidade de fluxo magnético  $B(t)$  (Equação 2.1) que é guiada através do núcleo magnético de área transversal  $S$ .

O enrolamento primário (com indutância  $L_1$ ) tem geralmente poucas espiras, às vezes uma única espira; ao contrário do enrolamento secundário que tem um número maior de espiras onde são ligados os medidores e relés (HAYT JR.; BUCK, 2001). enrolamento possui uma indutância

$$\Phi_1(t) = B \cdot S = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot N_1}{L_1} \cdot S \quad (2.1)$$

A equação 2.1 é resolvida considerando a densidade de fluxo magnético induzida  $B(t)$  (campo magnético) com magnitude constante, com isto uma mudança na corrente irá produzir uma mudança no fluxo  $\Phi_1(t)$  induzindo uma tensão no enrolamento secundário do transformador de corrente (Equação 2.2).

$$u_2(t) = \frac{d\Phi_1(t)}{dt} = N_2 \cdot S \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (2.2)$$

A tensão no secundário ( $u_2$ ) gera uma corrente secundária  $i_2(t)$  que flui no circuito secundário correspondente à corrente no primário reduzida pela relação de transformação (TC ideal), onde esta,

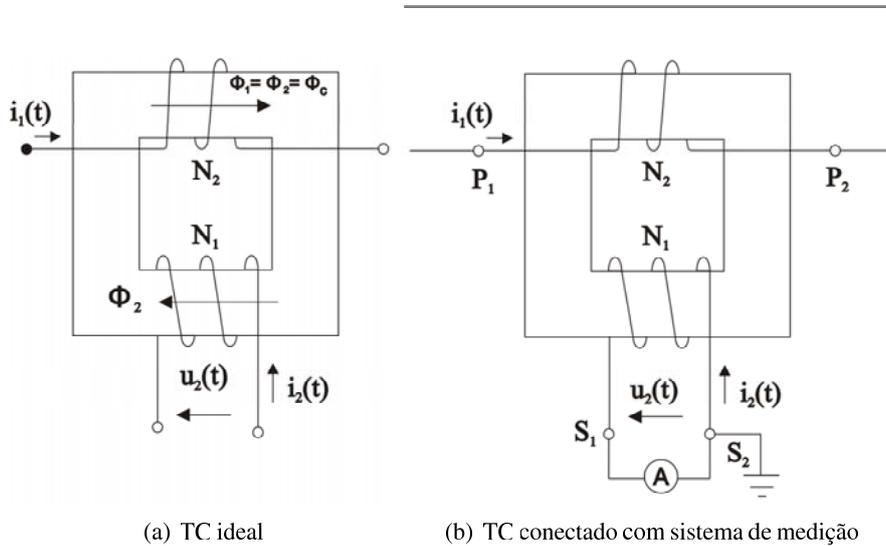


Figura 2.3: Transformadores de corrente

está dielectricamente isolada da corrente do circuito primário. A Equação 2.3 fornece o valor da corrente no secundário para o caso de uma carga resistiva  $R$ .

$$i_2(t) = \frac{u_2(t)}{R_2 + R} \quad (2.3)$$

Através da lei de *Ampère*, (Equação 2.4) a relação ampères-espiras gerada pela corrente primária,  $N_1 \cdot i_1(t)$ , é compensada pela relação de corrente  $N_2 \cdot i_2(t)$  gerada no secundário e pela relação  $N_1 \cdot i_0(t)$  necessária para gerar a indução do fluxo  $B(t)$  dentro do núcleo.

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \cdot \sum_{n=1}^{n=N} I_n \rightarrow N_1 \cdot i_1(t) + N_1 \cdot i_0(t) + N_2 \cdot i_2(t) = 0 \quad (2.4)$$

Desprezando a contribuição da corrente de magnetização  $i_0(t)$  (em geral 1% da corrente primária  $I_p$ ), a lei de *Ampère* pode ser simplificada conforme a Equação 2.5, que fornece a relação básica de um TC.

$$N_1 \cdot i_1(t) + N_2 \cdot i_2(t) = 0 \rightarrow I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_1 \quad (2.5)$$

Das equações 2.3, 2.4 e 2.5 obtém-se a Equação 2.6

$$u_2(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_1(t) \cdot (R_2 + R) \quad (2.6)$$

Uma observação importante deve ser considerada: o circuito secundário dos TCs em funcionamento

nunca deve ficar em aberto devido ao aumento do fluxo magnético no núcleo do equipamento que pode surgir, causando os seguintes efeitos (TOUS, 2000):

- excessivas perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo do TC, aquecendo-o rapidamente, e queimando o TC;
- produção de elevadas tensões no terminal secundário do TC, perfurando sua isolação e produzindo elevados riscos no sistema e para a segurança humana.

Os transformadores de corrente instalados em subestações ao tempo utilizam suporte de concreto ou estrutura metálica, de acordo com a Figura 2.4.

### 2.3.1 Características construtivas

Os TCs são classificados de acordo com a estrutura do enrolamento primário, sendo o enrolamento secundário constituído por uma bobina com derivações (taps) ou múltiplas bobinas ligadas em série e/ou paralelo, para se obter diferentes relações de transformação. Quanto aos tipos construtivos, os TCs mais comuns, são (MAMEDE FILHO, 2005):



Figura 2.4: Instalação de transformadores de corrente tipo barra fixa de alta tensão (AREVA, 2000)

- TC Tipo enrolado

Este tipo é usado quando são requeridas relações de transformações inferiores a 200/5. Possui isolamento limitada e portanto, se aplica em circuitos até 15kV. Ocorre quando o enrolamento primário, constituído de uma ou mais espiras, envolve mecanicamente o núcleo do transformador.

- TC Tipo barra

Transformador de corrente cujo enrolamento primário é constituído por uma barra, montada permanentemente através do núcleo do transformador.

- TC Tipo bucha

É aquele cujas características são semelhantes ao TC do tipo barra, porém sua instalação é feita na bucha dos equipamentos (transformadores, disjuntores, etc.), que funcionam como enrolamento primário. Este tipo de TC, é empregado em transformadores de potência para uso, em geral, na proteção diferencial, quando se deseja restringir ao próprio equipamento o campo de ação desse tipo de proteção (MAMEDE FILHO, 2005).

- TC Tipo janela

Tem construção similar ao tipo bucha, sendo que o meio isolante entre o primário e o secundário é o ar. O enrolamento primário é o próprio condutor do circuito, que passa por dentro da janela.

- TC Tipo Núcleo Dividido

Transformador de corrente tipo janela em que parte do núcleo é separável ou basculante, para facilitar o enlaçamento do condutor primário.

- TC com vários enrolamentos primários

Transformador de corrente com vários enrolamentos primários distintos e isolados separadamente.

- TC com vários núcleos

Transformador de corrente com vários enrolamentos secundários isolados separadamente e montados cada um em seu próprio núcleo, formando um conjunto com um único enrolamento primário, cujas espiras(ou espira) enlaçam todos os secundários.

### 2.3.2 Classificação de serviço para TCs

Os transformadores de corrente também são classificados em dois tipos de acordo com sua função:

- Transformadores de Corrente para serviços de medição

Os TCs empregados na medição são capazes de transformar as correntes do sistema em correntes no secundário com elevada exatidão para os instrumentos medidores, sem que estes estejam em ligação direta com o circuito primário da instalação.

- Transformadores de Corrente para serviços de proteção

Os transformadores de corrente destinados à proteção de sistemas elétricos são equipamentos capazes de transformar elevadas correntes de sobrecarga ou de curto-circuito em correntes compatíveis com os relés de proteção. Ao contrário dos transformadores de corrente para medição, os TCs para serviço de proteção não devem saturar para correntes de elevada magnitude como no caso de um curto-circuito no sistema. Este fator evita com que sinais de corrente recebidos pelos relés, estejam incorretos causando uma operação inadequada do sistema de proteção.

Assim, os transformadores de corrente para serviço de proteção apresentam um nível de saturação elevado, igual a 20 vezes a corrente nominal, considerando a carga padronizada conforme mostra a curva da Figura 2.5.

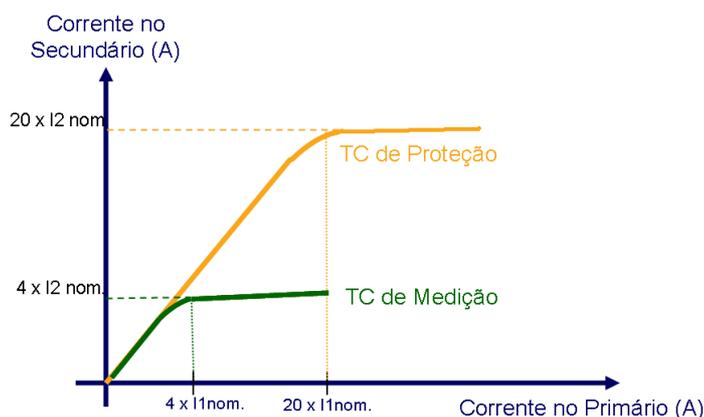


Figura 2.5: Curva típica dos transformadores de corrente (CLARK, 1983)

Alguns modelos de TCs são construídos com núcleos de diferentes espessuras, sendo alguns tipos destinados exclusivamente para medição de energia e outros destinados para o serviço de proteção como citado anteriormente (CLARK, 1983).

### 2.3.3 Erros dos transformadores de corrente

Para os transformadores de corrente se caracterizam, entre outros elementos essenciais, pela relação de transformação nominal e real. A primeira, exprime o valor da relação entre as correntes primária e secundária para a qual o equipamento foi projetado, sendo esta, indicada pelo fabricante. A segunda exprime a relação entre as correntes primária e secundária que se obtém realizando medidas precisas em laboratório. Essas dependendo do estado do equipamento são muito próximas dos valores nominais. Essa pequena diferença se deve à influência do material ferromagnético de que é construído o núcleo do TC. Portanto, este valor é de grande importância, quando se trata de transformadores de corrente destinados à medição (MAMEDE FILHO, 2005).

Os transformadores de corrente que se destinam à medição de corrente, é importante que se conheça as incertezas relacionadas à relação de transformação e o defasamento da corrente em relação à tensão para conhecer o erro do ângulo de fase ( $\beta$ ) que o TC vai introduzir nos valores medidos. Em geral, os erros de relação e de defasagem dependem do valor da corrente primária do TC, do tipo de carga ligada no seu secundário e da frequência do sistema, a qual é normalmente desprezada, devido a sua variação ser praticamente nula (CLARK, 1983).

**a) Erro de relação de transformação**

Este tipo de erro é registrado na medição de corrente com TC, onde a corrente primária não corresponde exatamente ao produto da corrente lida no secundário pela relação de transformação nominal (CLARK, 1983). Os erros nos TCs são ocasionados principalmente a corrente do ramo magnetizante. A impedância do enrolamento primário não exerce nenhum efeito sobre o erro do TC, representado apenas por uma impedância série no circuito do sistema em que está instalado este equipamento, cujo valor pode ser desprezado.

Entretanto, o erro de relação de transformação pode ser corrigido através do fator de correção de relação relativo ou *ratio correction factor (RCF)* dado pela Equação 2.7 (MAMEDE FILHO, 2005).

$$FCR_r = \frac{I_s + I_e}{I_s} \quad (2.7)$$

$I_s$  = corrente secundária de carga, em A;

$I_e$  = corrente de excitação referida ao secundário, em A.

O fator de correção de relação também pode ser definido como sendo aquele que deve ser multiplicado pela relação de transformação de corrente nominal,  $RTC$ , para se obter a verdadeira relação de transformação, ou seja, sem erro (MAMEDE FILHO, 2005):

$$FCR_r = \frac{RTC_r}{RTC} \quad (2.8)$$

$RTC_r$  = relação de transformação de corrente real;

$RTC$  = relação de transformação de corrente nominal.

O fator de correção de relação percentual ( $FCR_p$ ) é dado pela equação 2.9:

$$FCR_p = \frac{RTC_r}{RTC} \times 100\% \quad (2.9)$$

Finalmente o erro da relação pode ser calculado percentualmente através da Equação 2.10:

$$\varepsilon_p = (100 - FCR_p)(\%) \quad (2.10)$$

Os valores percentuais de  $FCR_p$  podem ser visualizados no gráfico da Figura 2.6, para um TC com classe de exatidão igual a 0,3.

#### b) Erro de ângulo de fase

Este erro é dado pelo ângulo ( $\beta$ ) que mede a defasagem entre a corrente vetorial primária e o inverso da corrente vetorial secundária de um transformador de corrente. Para qualquer fator de correção de relação ( $FCR_p$ ) conhecido de um TC, os valores limites positivos e negativos do ângulo de fase ( $\beta$ ) em minutos podem ser expressos pela Equação 2.11, em que o fator de correção de transformação ( $FCT_p$ ) do referido TC assume os valores máximos e mínimos:

$$\beta = 26 \times (FCR_p - FCT_p)(') \quad (2.11)$$

$FCT_p$  = fator de correção de transformação percentual do referido TC; (') = minutos.

Este fator é definido como sendo aquele que deve ser multiplicado pela leitura registrada por um aparelho de medição (wattímetro, varímetro, etc.) ligado aos terminais de um TC, para corrigir o efeito combinado do ângulo de fase  $\beta$  e do fator de correção de relação percentual ( $FCR_p$ ). Na norma NBR 6856 - Transformadores de Corrente - Especificação, são encontrados mais detalhes sobre estes parâmetros (ABNT, 1992a).

### 2.3.4 Classe de exatidão

A classe de exatidão exprime os limites de erro que o TC pode atingir levando em conta o erro de relação de transformação e o erro de defasamento entre as correntes primária e secundária. Considera-se que um TC está dentro de sua classe de exatidão nominal, quando os pontos determinados pelos fatores de correção de relação  $FCR_p$  e pelos ângulos de fase  $\beta$  estiverem dentro do paralelogramo de exatidão. Como exemplo, a tabela 2.3.4 apresenta as classes de exatidão para TCs de acordo com a norma IEC 60044-1 .

### 2.3.5 Especificação de TCs

Para especificar um TC é necessário saber se o emprego deste equipamento é destinado para serviço de medição ou de proteção. O conhecimento da carga acoplada ao circuito secundário e também as condições transitórias quando os transformadores são destinados para serviço de proteção, são de grande importância. De forma geral, a especificação de um TC deve constar os seguintes itens:

- destinação (medição ou proteção);
- uso (interior ou exterior);

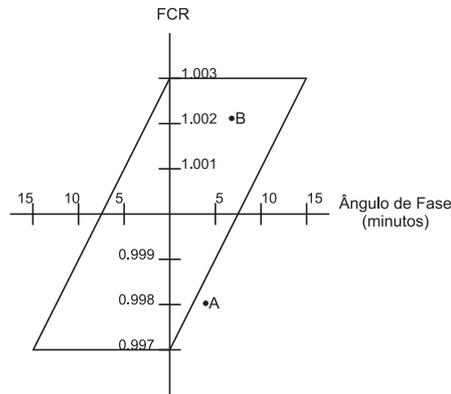


Figura 2.6: Paralelogramo da classe de exatidão 0.3 para TCs

Tabela 2.1: Classes de exatidão conforme IEC 60044-1

Classe de Exatidão	Carga[%]	Limites dos erros			Aplicação
		Corrente [%]	Erro de relação [%]	Desvio de fase [min.]	
0.1	25-100% da carga nominal	5	0.4	15	Laboratório
		20	0.2	8	
		100	0.1	5	
		120	0.1	5	
0.2	50-100% da carga nominal	5	0.75	30	Faturamento
		20	0.35	15	
		100	0.2	10	
		120	0.2	10	
0.5	50-100% da carga nominal	5	1.5	90	Faturamento
		20	0.75	45	
		100	0.5	30	
		120	0.5	30	
5P	100% da carga nominal	100	1.0	60	Proteção
10P	100% da carga nominal	100	3.0	-	Proteção

- classe de exatidão;
- classe de tensão;
- número de enrolamentos secundários;
- fator térmico;
- carga nominal;
- relação de transformação;
- nível de isolamento;
- tensões suportáveis à frequência industrial e a impulso atmosférico;
- tipo: encapsulado em epóxi ou imerso em líquido isolante.

### 2.3.6 Ensaios de recepção

Estes ensaios, normalmente realizados na fábrica, permitem verificar se as especificações do equipamento são atendidas podendo se dividir em dois tipos:

- Ensaios de rotina:

Destinam-se a verificar a qualidade e a uniformidade da mão-de-obra e também dos materiais empregados na fabricação de determinados tipos de transformadores para instrumentos (TIs);

- Ensaios de tipo:

Estes ensaios são efetuados para se determinar se um certo tipo ou modelo de transformador para instrumento é capaz de funcionar satisfatoriamente nas condições estabelecidas por norma.

Para TCs estes ensaios são citados na tabela 2.3.6 (MAMEDE FILHO, 2005):

Tabela 2.2: Ensaios de recepção para Transformadores de Corrente

Ensaios de rotina	Ensaios de tipo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão induzida</li> <li>• Tensão suportável à frequência industrial</li> <li>• Descargas parciais</li> <li>• Polaridade</li> <li>• Exatidão</li> <li>• Fator de potência do isolamento</li> <li>• Resistência mecânica à pressão interna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos os ensaios de rotina especificados</li> <li>• Resistência dos enrolamentos</li> <li>• Tensão suportável de impulso atmosférico</li> <li>• Tensão suportável de impulso de manobra</li> <li>• Elevação de temperatura</li> <li>• Corrente térmica nominal</li> </ul>

## 2.4 Transformador de potencial

O transformador de potencial geralmente consiste de dois enrolamentos elétricos (circuito primário e circuito secundário), ambos sobre um núcleo magnético. Transformadores de potencial (TPs), operam com o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores de força, baseado na indução eletromagnética que ocorre entre os dois circuitos por meio de um fluxo magnético mútuo. O número de espiras de cada enrolamento caracteriza os dois circuitos:  $N_1$  é o número de espiras do primário e  $N_2$  é o número de espiras do circuito secundário.

O princípio de operação de um transformador de potencial é baseado na lei de indução de *Faraday*. De acordo com esta lei, quando o enrolamento primário é conectado em paralelo com a alta tensão a ser medida, um fluxo magnético no núcleo ( $\Phi_c(t)$ ) é gerado surgindo no primário uma f.e.m auto-induzida conforme a equação 2.12 (HAYT JR.; BUCK, 2001):

$$u_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_c(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Este fluxo magnético é guiado através do núcleo magnético, interagindo o circuito primário com o circuito secundário, resultando na indução de uma tensão no secundário conforme a equação 2.13:

$$u_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_c(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Com isto é possível medir a alta tensão no primário  $u_1(t)$  por meio da tensão secundária,  $u_2(t)$ , que é proporcionalmente reduzida e galvanicamente isolada do lado da alta tensão. A relação entre a tensão primária e a tensão induzida no secundário (relação de transformação) é dada pela equação 2.14.

$$u_2(t) = u_1(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.14)$$

A tensão secundária cria uma corrente  $i_2(t)$  que flui no circuito secundário quando uma carga é conectada. A corrente  $i_2(t)$  é determinada pela impedância total do circuito secundário (idealmente pela carga). A corrente no primário é também dependente da carga e pode ser obtida considerando que a potência instantânea em ambos os lados é mantida constante (sem perdas) conforme as equações 2.15 e 2.16 (TOUS, 2000) :

$$p(t) = u_1(t) \cdot i_1(t) = u_2(t) \cdot i_2(t) \quad (2.15)$$

$$i_1(t) = i_2(t) \cdot \frac{u_2(t)}{u_1(t)} \quad (2.16)$$

Os transformadores de potencial são fabricados de acordo com o grupo de ligação requerido, com as tensões primárias e secundárias necessárias e com o tipo de instalação.

Dependendo das características construtivas do transformador de potencial (TP), a isolamento deste equipamento pode ser a seco ou em óleo mineral. Se o transformador for de construção em óleo, o núcleo com as respectivas bobinas são secos sob vácuo e calor. O transformador ao ser completamente montado, é tratado a vácuo para em seguida ser preenchido com óleo isolante (MAMEDE FILHO, 2005).

A foto 2.8 ilustra alguns TPs instalados em uma subestação.

### 2.4.1 Erros dos transformadores de potencial

Ao reproduzirem no secundário a tensão a que estão submetidos no primário, os transformadores de potencial podem gerar dois tipos de erros: erro de relação de transformação e erro de ângulo de fase entre as tensões no primário e secundário.

#### a) Erro de relação de transformação

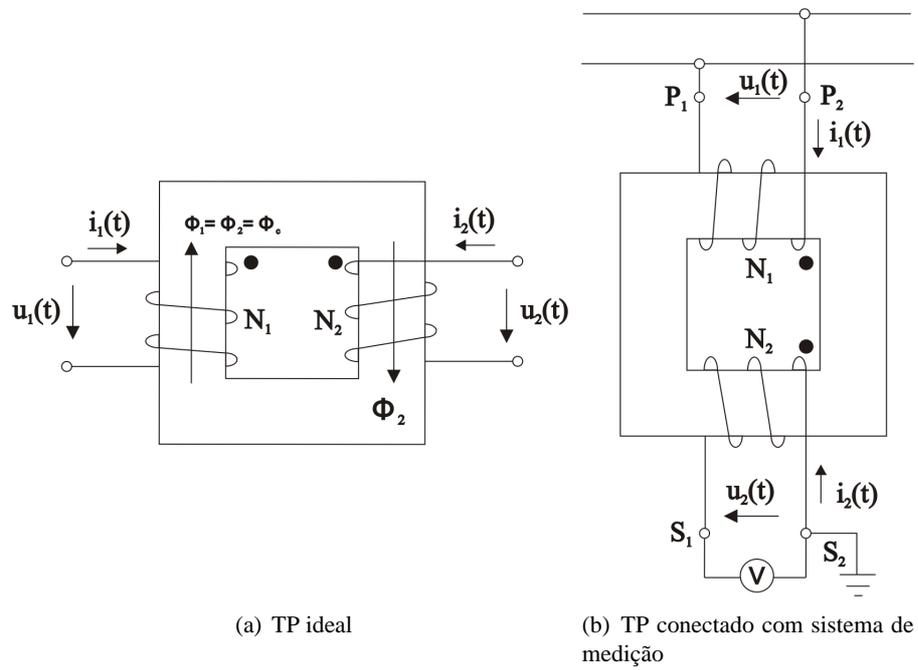


Figura 2.7: Transformadores de potencial



Figura 2.8: Transformadores de potencial indutivo instalados em uma subestação (AREVA, 2000)

Este tipo de erro ocorre na medição de tensão utilizando o TP, onde a tensão primária não corresponde exatamente ao produto da tensão obtida no secundário pela relação de transformação de potencial nominal. Este erro pode ser corrigido através do fator de correção de relação conforme a equação 2.17. O produto entre a relação de transformação de potencial nominal ( $RTP$ ) e o fator de correção de relação resulta na relação de transformação de potencial real ( $RTP_r$ ), assim:

$$FCR_r = \frac{RTP_r}{RTP} \quad (2.17)$$

Finalmente, o erro de relação pode ser calculado percentualmente através da Equação 2.18:

$$\varepsilon_p = \frac{(RTP \times V_s) - V_p}{V_p} \times 100\% \quad (2.18)$$

$V_p$  = tensão aplicada no primário do TP;

$V_s$  = tensão de saída do TP.

#### b) Erro de ângulo de fase

É o ângulo  $\gamma$  que mede a defasagem entre a tensão vetorial primária e a tensão vetorial secundária de um transformador de potencial. Este erro pode ser expresso através da Equação 2.19.

$$\gamma = 26 \times (FCT_p - FCR_p)(') \quad (2.19)$$

onde  $FCR_p$  é dado pela Equação 2.20:

$$FCR_p = \frac{RTP_r}{RTP} \times 100\% \quad (2.20)$$

O fator de correção de transformação ( $FCT_p$ ) pode ser extraído de ensaios de exatidão do equipamento (MAMEDE FILHO, 2005). Este fator considera tanto o erro de relação de transformação ( $FCR_p$ ), como o erro do ângulo de fase, em processos de medição de potência.

Uma das causas de erros de relação e ângulo de fase pode ser gerada pela distância da fiação entre o transformador de potencial e a carga. Ligações muito longas introduzem quedas de tensão e conseqüentemente os erros serão maiores. A queda de tensão nas ligações pode ser calculada através da corrente extraída do transformador e da impedância das ligações. Se a queda de tensão no secundário for considerável, a adição do erro de relação e de ângulo de fase pode ser calculada de acordo com o diagrama vetorial da Figura 2.9 e com as fórmulas 2.21 e 2.22 (ABB, 2005).

A porcentagem da relação será aumentada de acordo com a equação 2.21:

$$\frac{I_S(R_L \cos \theta + X_L \sin \theta)}{E_S} \cdot 100 \quad (2.21)$$

Adicionando esta porcentagem na relação do transformador, será atingida a relação real entre a tensão do primário e do secundário. O ângulo de fase também é modificado por uma diferença obtida através equação 2.22.

$$\frac{I_S(R_L \text{sen } \theta - X_L \text{cos } \theta)}{E_S} \cdot 3438 \text{Min.} \quad (2.22)$$

Adicionando esta quantidade ao ângulo de fase do transformador, este irá atingir a diferença real entre o ângulo de fase da tensão primária e a tensão de saída (carga).

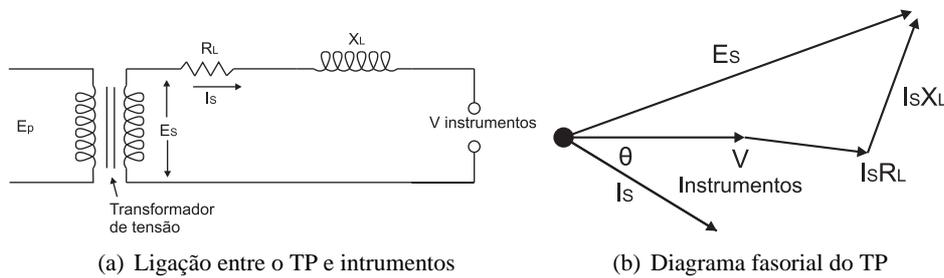


Figura 2.9: Transformadores de potencial

### 2.4.2 Classe de exatidão

A classe de exatidão exprime nominalmente o erro máximo que pode surgir na saída do transformador de potencial, levando em conta o erro de relação e o erro de defasamento angular entre as tensões primária e secundária. Este erro é determinado pelo fator de correção de transformação. Dessa forma conclui-se que o *FCT* é o número que deve ser multiplicado pelo valor da leitura de determinados aparelhos de medida, como medidores de energia elétrica e wattímetros, a fim de se obter a correção dos efeitos simultâneos dos fatores de correção de relação e de ângulo de defasagem entre a tensão primária e de saída (CLARK, 1983).

Considera-se que um TP está dentro de sua classe de exatidão, quando os pontos determinados pelos fatores de correção de relação (*FCR*) e pelos ângulos de fase  $\gamma$  estão dentro do paralelogramo de exatidão. Na Figura 2.10, mostra o exemplo de gráfico de classe de exatidão 0.3 para TPs.

Para se determinar a classe de exatidão de TPs, são realizados ensaios com o equipamento em carga e em vazio com valores determinados por norma. Cada ensaio correspondente a cada carga padronizada é efetuado para as seguintes condições:

- ensaio sob tensão nominal;
- ensaio a 90% da tensão nominal;
- ensaio a 110% da tensão nominal.

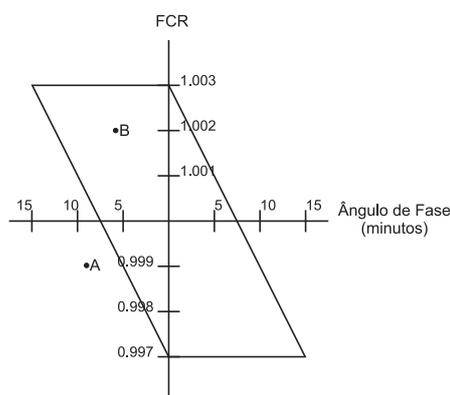


Figura 2.10: Paralelogramo da classe de exatidão 0.3 para TPs

A classe de exatidão dos transformadores de potencial especifica os limites máximos dos erros. A limitação dos erros, está relacionada com as perdas e a corrente de magnetização. De acordo com a norma IEC 60044-2, a classe da exatidão será cumprida quando a carga estiver dentro de 25% até 100% da carga nominal conforme a Tabela 2.4.2

Tabela 2.3: Classes de exatidão conforme IEC 60044-2

Classe de Exatidão	Limites		Limites dos erros		Aplicação
	Carga [%]	Tensão [%]	Relação [%]	Desvio de fase [min.]	
0.1	25-100	80-120	0.1	5	Laboratório
0.2	25-100	80-120	0.2	10	Medição
0.5	25-100	80-120	0.5	20	Medição
1.0	25-100	80-120	1.0	40	Industrial
3.0	25-100	80-120	3.0		Instrumentos
3P	25-100	5-Vf	3.0	120	Proteção
6P	25-100	5-Vf	6.0	240	Proteção

Onde  $V_f$  significa o fator multiplicativo da tensão nominal do sistema, onde seu valor depende da configuração de aterramento do sistema.

Alguns padrões de carga são descritos respectivamente conforme a tabela 2.4.2 baseadas na norma IEEE C57.13 (IEEE, 1993).

Os TPs construídos com classe de exatidão 0.1 são utilizados nas medições em laboratório onde é necessário uma elevada exatidão. Os TPs que se enquadram na classe de exatidão 0,3 são destinados à medição de energia elétrica com fins de faturamento, enquanto que os TPs das classes 0.6 e 1.2 são utilizados no suprimento de aparelhos de proteção e medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento.

### 2.4.3 Especificação de TPs

A determinação da escolha do TP exige o conhecimento prévio da finalidade do emprego deste equipamento, como serviço de medição de energia elétrica para faturamento, medição para monitoramento ou proteção. No caso de transformadores de potencial destinados a serviço de medição para

Tabela 2.4: Designações dos padrões de carga conforme IEEE C57.13

Padrões de Carga	Potência [VA]	FP
M	35	0.2
W	12.5	0.1
X	25	0.7
Y	75	0.85
Z	200	0.85
ZZ	400	0.85

faturamento, é muito importante que não seja ultrapassado o limite de carga ou potência nominal do equipamento para que a classe de exatidão seja válida. Abaixo seguem alguns parâmetros para a especificação correta de transformadores de potencial (ABB, 2004).

- uso: interior ou exterior;
- classe de exatidão;
- número de enrolamentos secundários ou derivações
- grupo de ligação: 1,2 ou 3;
- potência térmica;
- carga nominal;
- relação de transformação;
- nível de isolamento;
- tensão suportável à frequência industrial;
- tipo: encapsulado em epóxi ou imerso em líquido isolante.

A descrição de alguns destes conceitos conforme a norma NBR 6855 é apresentada abaixo :

- Classe de tensão de isolamento nominal

A seleção da classe de tensão de isolamento de um TP depende da máxima tensão de linha do circuito ao qual será ligado.

- Frequência nominal

Os TP são fabricados para 50 e/ou 60 Hz.

- Carga Nominal

É a potência aparente, expressa em VA, indicada nos dados de placa do equipamento. Este valor não deve ser ultrapassado a fim de manter a classe de exatidão nominal do equipamento.

- Potência térmica nominal

É a máxima potência que o TP pode fornecer em regime permanente, sob tensão e frequência nominais, sem exceder os limites de elevação de temperatura especificados. Em princípio, a potência térmica nominal não deve ser inferior a 1,33 vezes a carga mais alta referente à exatidão do TP.

#### 2.4.4 Ensaios de recepção para TPs

Os ensaios de rotina e de tipo (ensaios de recepção) para transformadores de potencial são citados conforme a tabela 2.4.4 (MAMEDE FILHO, 2005):

Tabela 2.5: Ensaios de recepção para Transformadores de Potencial

Ensaios de rotina	Ensaios de tipo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão induzida</li> <li>• Descargas parciais</li> <li>• Polaridade</li> <li>• Tensão aplicada ao dielétrico</li> <li>• Exatidão</li> <li>• Resistência à pressão interna</li> <li>• Fator de perdas do isolamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos ensaios de rotina especificados</li> <li>• Resistência dos enrolamentos</li> <li>• Corrente de excitação e perdas em vazio</li> <li>• Tensão de curto-circuito e perdas em carga</li> <li>• Tensão suportável a impulso atmosférico</li> <li>• Resistência de pressão interna a quente</li> <li>• Tensão suportável de impulso de manobra</li> <li>• Elevação de temperatura</li> <li>• Curto-circuito</li> </ul>

## 2.5 Transformador de potencial capacitivo (TPC)

O Transformador de Potencial Capacitivo é utilizado frequentemente em sistemas de energia elétrica como uma forma econômica e viável de transformar tensões de transmissão em tensões compatíveis com os equipamentos conectados em seu secundário. Neste estudo serão discutidas algumas características do Transformador de Potencial Capacitivo, tais como seu funcionamento e aspectos construtivos.

A Figura 2.11 mostra o diagrama esquemático do TPC. Neste diagrama são ilustrados os seguintes componentes que fazem parte do equipamento:

- Divisor de tensão capacitivo composto por  $C_1$  e  $C_2$ ;
- Reator de Compensação  $L_c$  ;
- Transformador de potencial indutivo;
- Circuito supressor de ferro-ressonância (CSF);
- Acessórios para conexão de equipamentos de onda portadora (CAR).

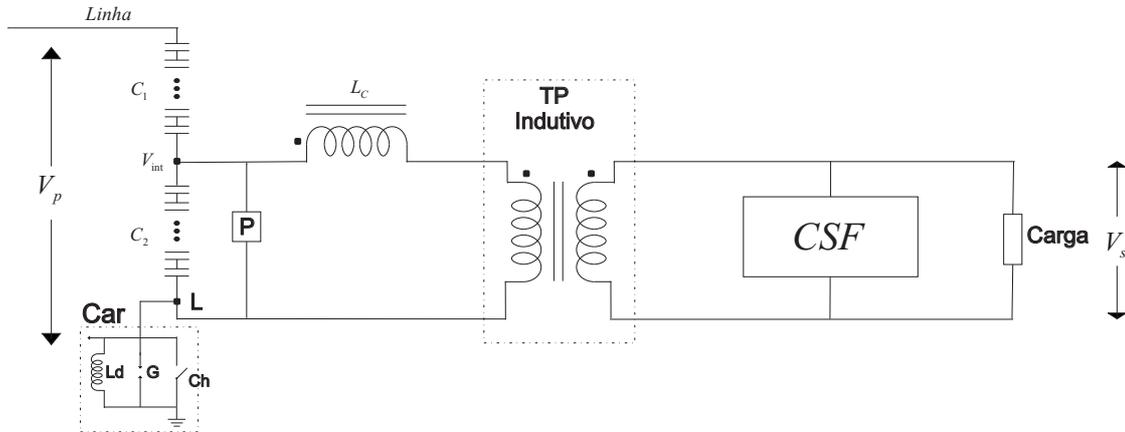


Figura 2.11: Diagrama do TPC

### 2.5.1 Divisor de tensão capacitivo

A função do divisor de tensão capacitivo é reduzir a tensão do sistema para uma tensão intermediária ( $V_{int}$ ) na faixa de 5 kV até 20 kV. O divisor capacitivo é representado por dois valores de capacitância: uma capacitância equivalente ( $C_1$ ) acima do ponto de tensão intermediária e outra capacitância equivalente ( $C_2$ ), abaixo do ponto de tensão intermediária. A tensão intermediária é obtida através da Equação 2.23.

$$V_{int} = \frac{V_p \times C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.23)$$

Cada capacitância é formada por elementos capacitivos conectados em série. O número de unidades capacitivas depende do nível de tensão primária. Estes elementos são isolados com fluido dielétrico. Em geral a coluna capacitiva é totalmente preenchida com óleo sintético sob uma leve sobrepressão pelo sistema de expansão térmica, montados dentro do corpo de porcelana. Antigamente os elementos capacitivos eram isolados somente com papel Kraft impregnados com óleo mineral. A maioria dos elementos capacitivos manufaturados atualmente são isolados com papel *kraft* de alta pureza impregnados com óleo juntamente com filme de polipropileno (RIBEIRO, 1996).

O filme de polipropileno proporciona um dielétrico com maior resistência de isolamento, enquanto o papel *Kraft* facilita a impregnação do capacitor com fluido isolante e a circulação do fluido dentro e fora de cada elemento capacitivo. Com esta nova tecnologia, a possibilidade de descargas parciais é minimizada. A Figura 2.12 ilustra detalhadamente um exemplo da coluna capacitiva.

### 2.5.2 Reator de compensação e transformador de potencial indutivo

O reator de compensação ( $L_c$ ) é uma reatância  $X_L$  ajustável, com o objetivo de manter a tensão no secundário ( $V_s$ ) em fase com a tensão do sistema. Geralmente, os TPCs apresentam no reator de

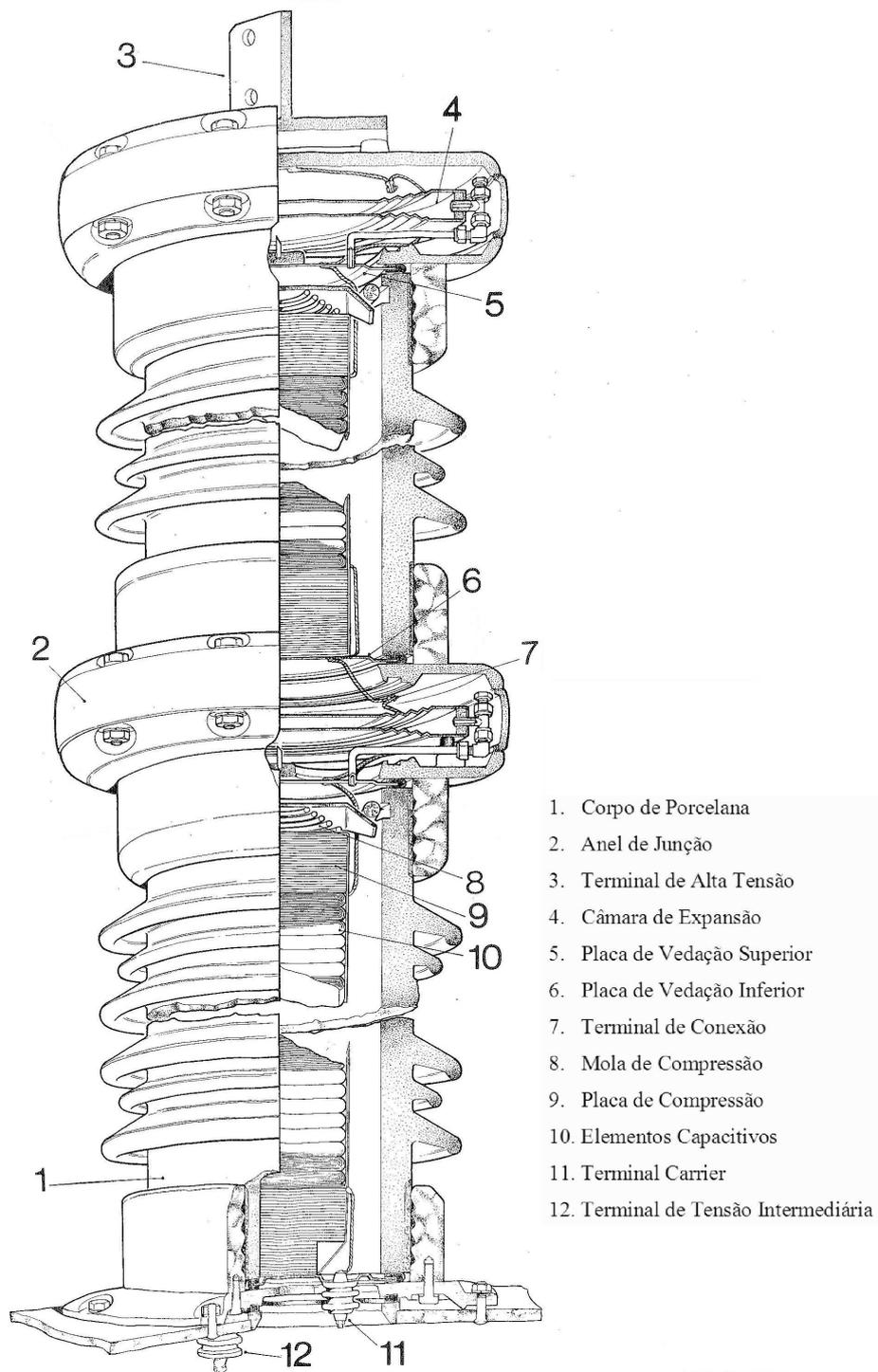


Figura 2.12: Detalhes da Coluna Capacitiva (TRENCH, 2000)

compensação e no transformador indutivo, derivações acessíveis para pequenos ajustes. Através do reator de compensação são realizados os ajustes de ângulo de fase e através dos taps do transformador indutivo são realizados os ajustes de amplitude.

O reator de compensação e o transformador intermediário possuem núcleo de ferro. Além de introduzirem perdas, estes dispositivos também podem produzir ferro-ressonância devido a não linearidade dos núcleos de ferro (indutância não linear). A Figura 2.13 ilustra a localização do reator de compensação, do transformador de potencial indutivo e os demais componentes que constituem o TPC, que serão descritos a seguir.

### 2.5.3 Circuito supressor de ferro-ressonância (CSF)

Todo TPC necessita incorporar algum tipo de amortecimento de ferro-ressonância. A capacitância do divisor de tensão está em série com a indutância do transformador indutivo e do reator de compensação, constituindo um circuito ressonante sintonizado em 60 Hz. Este circuito pode entrar em ressonância podendo saturar o núcleo de ferro do transformador indutivo por vários distúrbios na rede. Este circuito é necessário para evitar sobretensões perigosas que podem sobreaquecer a unidade eletromagnética, romper sua isolamento e até mesmo destruir o equipamento (TZIOUVARAS et al., 2000).

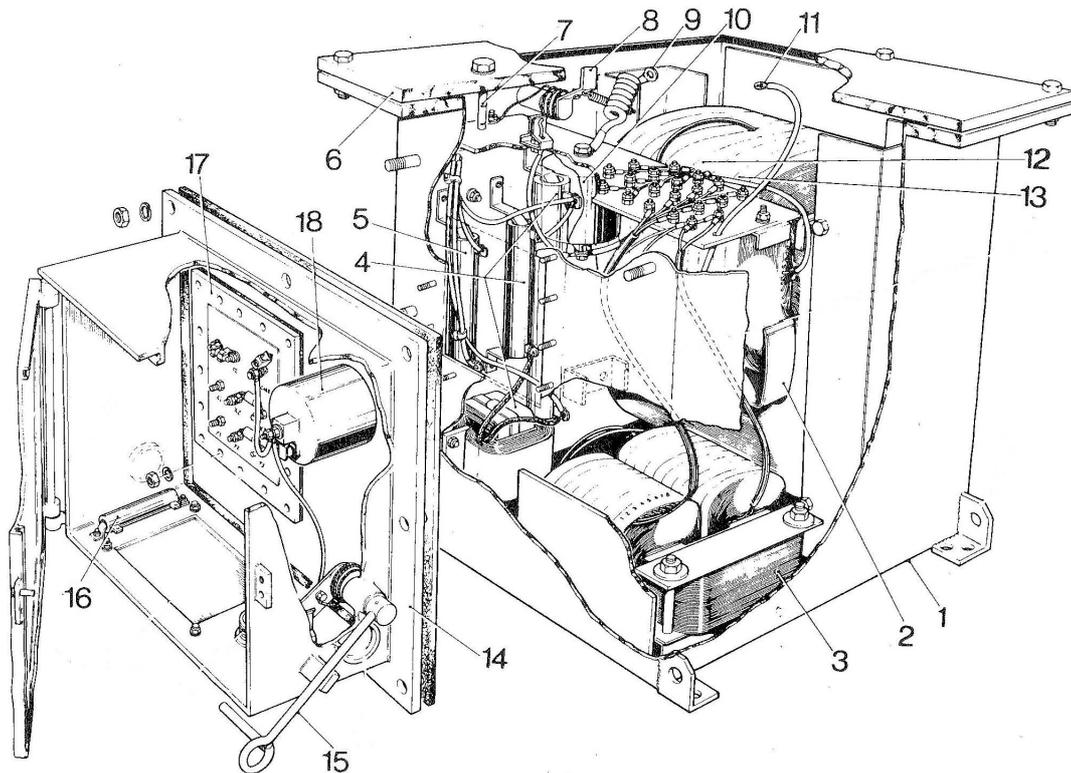
O circuito supressor de ferro-ressonância é conectado no secundário do transformador indutivo e possui dois modos de operação, ativo e passivo conforme ilustra a Figura 2.14 (TZIOUVARAS et al., 2000).

#### 2.5.3.1 CSF com modo de operação ativo

O CSF em modo de operação ativo consiste em um filtro composto por uma capacitância ( $C$ ) e por um indutor com núcleo de ferro ( $L$ ) conectados em paralelo e sintonizado na frequência fundamental. Na frequência fundamental, o filtro está em ressonância paralela apresentando uma alta impedância. Quando ocorre um transitório, este filtro apresenta uma baixa impedância amortecendo os sinais indesejáveis através da resistência conectada em série. Estes dispositivos são permanentemente conectados no lado secundário do TPC conforme ilustra a Figura 2.5.3 e, afetam a resposta transitória devido a energia armazenada em seus elementos capacitivos e indutivos (TZIOUVARAS et al., 2000).

#### 2.5.3.2 CSF com modo de operação passivo

Na Figura 2.14 é ilustrado também a configuração de um circuito supressor de ferro-ressonância com modo de operação passivo. Este dispositivo consiste em um resistor permanentemente conectado no lado secundário ( $R_f$ ), um reator saturável ( $L_f$ ) e uma resistência em série com um *gap* ou um dispositivo eletrônico, que é ativado quando uma sobretensão ocorre. Quando ocorre uma sobretensão advinda de oscilações ferro-ressonantes ou de outro fenômeno transitório, o circuito eletrônico ou o



- |  |  |
|--|--|
| 1. Caixa Preenchida de Óleo            | 13. TAPS do Reator Série               |
| 2. Transformador Intermediário (TPI)   | 14. Caixa de Terminais de Baixa Tensão |
| 3. Reator Série                        | 15. Chave de Aterramento do Carrier    |
| 4. Carga Estabilizadora (CSF)          | 16. Aquecedor                          |
| 5. Dispositivo de Proteção             | 17. Placa de Terminais de Baixa Tensão |
| 6. Tampa da Caixa Base                 | 18. Bobina de Drenagem                 |
| 7. Medidor do Nível de Óleo            |  |
| 8. Chave de Aterramento do TPI         |  |
| 9. Conexão do TAP do TPI               |  |
| 10. Dispositivo de Bloqueio do Carrier |  |
| 11. Conexão do Carrier                 |  |
| 12. TAPS do TPI                        |  |

Figura 2.13: Detalhes da Caixa Base e Componentes do TPC (TRENCH, 2000)

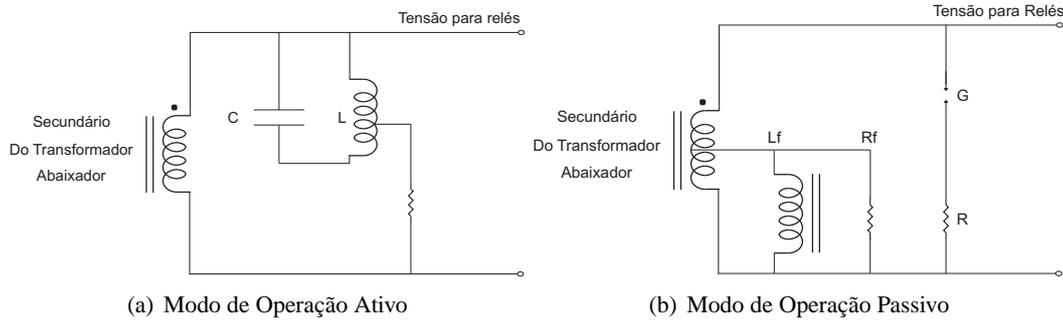


Figura 2.14: Circuitos supressores de ferro-ressonância

*gap* é disparado inserindo a resistência ( $R$ ) no secundário atenuando assim a energia de oscilação. Em paralelo ao resistor ( $R_f$ ) imerso em óleo refrigerante o reator com núcleo de ferro ( $L_f$ ) é projetado para saturar em aproximadamente 150% da tensão nominal com o objetivo de evitar ferro-ressonância sustentada (ABB, 2005).

#### 2.5.4 Acessórios para conexão de equipamentos de onda portadora (CAR)

As linhas de transmissão também são usadas para transmissão de sinais de onda portadora entre 30 kHz e 500 kHz, para telecontrole, telefonia, teleproteção, telemedição, etc., comumente chamado de sistema de onda portadora. A bobina de drenagem ( $L_d$ ), o centelhador ( $G$ ) e a chave de aterramento ( $Ch$ ) apresentados na Figura 2.11, são componentes auxiliares que permitem que o TPC opere ou não como capacitor de acoplamento para transmissão de sinais de onda portadora. A bobina de bloqueio  $L_d$  tem a função de permitir a passagem da corrente em 60 Hz e impedir que os sinais de alta frequência sejam aterrados. O centelhador ( $G$ ) é um dispositivo de proteção que atua caso uma sobretensão ocorra e a chave de aterramento ( $Ch$ ), é utilizada quando houver a necessidade de isolar a parte indutiva do TPC. A Figura 2.15 ilustra um TPC instalado em uma subestação.

#### 2.5.5 Ensaios de recepção para TPCs

Os ensaios de rotina e de tipo de acordo com a norma IEC - *Standard* 60044-5 (IEC, 1999) estão listados na tabela 2.5.5.

\* Ensaio de acordo com normas IEC-270, 358 e 44.4;

## 2.6 Transformadores ópticos

Nesta seção serão abordados os princípios básicos de operação dos transformadores ópticos de potencial e de corrente. O transdutor de corrente magnético-óptico (MOCT) e o transdutor de tensão



Figura 2.15: Transformador de potencial capacitivo instalado em uma subestação (AREVA, 2000)

Tabela 2.6: Ensaio de recepção para Transformadores de Potencial Capacitivo

Ensaio de rotina	Ensaio de tipo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacitância e fator de dissipação do isolamento</li> <li>• Ensaio dielétricos</li> <li>• Tensão suportável à frequência industrial a seco</li> <li>• Relação de transformação</li> <li>• Descargas parciais internas *</li> <li>• Exatidão</li> <li>• Verificação do(s) supressor(es) de surto</li> <li>• Estanqueidade</li> <li>• Medição da resistência do isolamento</li> <li>• Polaridade</li> <li>• Resistência ôhmica dos enrolamentos e da bobina de drenagem</li> <li>• Fator de potência do TPI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio de curto circuito</li> <li>• Ensaio de carga térmica</li> <li>• Ensaio de RIV (<i>Radio interference voltage</i>)</li> <li>• Ensaio de aderência e espessura da pintura</li> <li>• Tensão suportável de impulso de manobra</li> <li>• Elevação de temperatura</li> <li>• Corrente térmica nominal</li> <li>• Ensaio de ferro-ressonância</li> <li>• Ensaio de resposta a transitórios</li> <li>• Ensaio de perda de inserção na frequência portadora</li> <li>• Ensaio de capacitância e fator de dissipação na frequência da portadora</li> <li>• Ensaio da determinação do coeficiente de temperatura</li> <li>• Ensaio de medição da condutância e capacitância parasitas no terminal de baixa tensão</li> <li>• Ensaio de corona visual</li> <li>• Ensaio de exatidão</li> <li>• Ensaio de sobretensão de curta duração</li> <li>• Ensaio de medição da resistência série equivalente e capacitância na frequência portadora, na faixa da categoria de temperatura</li> <li>• Ensaio de níveis de isolamento e queda de tensão à frequência nominal, da bobina de drenagem do sistema de onda portadora</li> </ul>

eletro-óptico (EOVT) que serão apresentados nesta seção são capazes de apresentar medidas com alta exatidão (classe de exatidão 0.2) em sistemas de potência de alta e extra alta tensão. Estes dispositivos oferecem vantagens como uma larga escala de exatidão, isolamento óptico, peso reduzido, flexibilidade na instalação e segurança (ABB, 2004). O princípio de operação destes instrumentos é baseado na interação entre o campo eletromagnético e a radiação de luz polarizada, conforme descrito a seguir.

### 2.6.1 Transformadores de potencial ópticos

O transdutor de tensão eletro-óptico (EOVT) opera utilizando o efeito Pockels. O efeito Pockels é o nome do princípio físico que descreve como um campo elétrico pode modular o estado de polarização da luz quando esta passa por um material cristalino (AREVA, 2000). Quando a luz linearmente polarizada propaga-se em um cristal que se encontra paralelamente ao campo elétrico, esta sofre um retardo de fase pelo divisor de luz do sensor. O atraso da fase é devido à diferença na velocidade de propagação da luz, estando relacionado também aos diferentes índices de refração entre os dois eixos do divisor de luz.

O sensor EOVT consiste de um cristal localizado entre a alta tensão e o potencial terra. A luz emitida por uma fonte (LED) é transmitida através de uma fibra multimodo ao sensor. O feixe de luz é polarizado no momento em que entra no sensor, depois se propaga através do cristal no sentido do campo elétrico. O sensor é ilustrado na Figura 2.16 onde inclui um prisma reflexivo no lado de alta tensão do cristal. Este prisma reflete a luz em direção ao lado aterrado. Conseqüentemente, todas as

conexões estão no lado à terra. Depois de sair do sensor, a luz é dividida em duas componentes em quadratura, que são transmitidas de volta para o módulo eletrônico onde são convertidos em sinais elétricos. Estes dois sinais proporcionam informações suficientes para reconstruir a forma de onda e a magnitude da tensão por meio de um processador digital de sinais (ABB, 2004).

A tensão é obtida por interpolação das informações extraídas dos segmentos dos sinais através das franjas óticas. O sinal é então amplificado proporcionando uma saída base de 120 V proporcional à tensão aplicada.

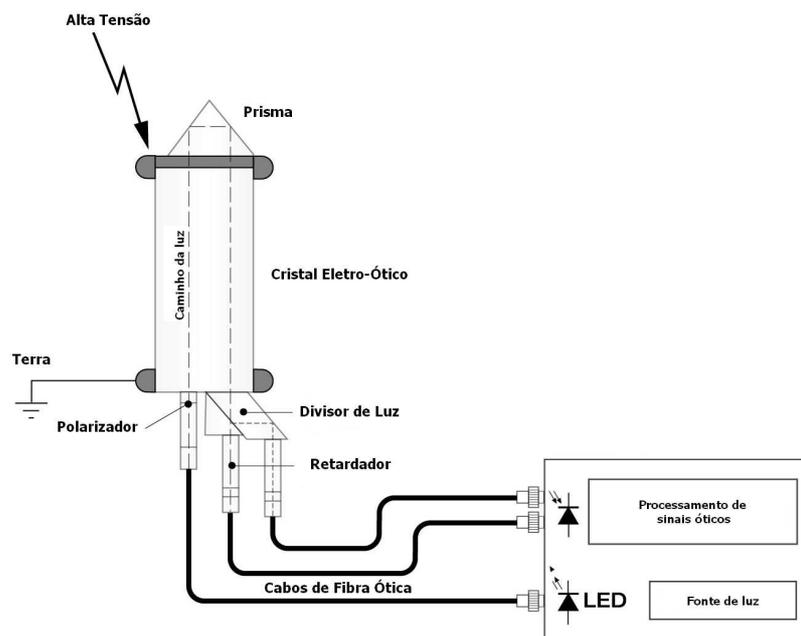


Figura 2.16: Transdutor Eletro-óptico de tensão (ABB, 2004)

## 2.6.2 Transformadores de corrente ópticos

O transdutor de corrente caracteriza-se pelos princípios magnéticos e ópticos e também pelo efeito de *Faraday*. O MOCT é um dispositivo de medição baseado no efeito magnético-óptico de *Faraday*. Este efeito explica a rotação do plano de polarização de raios de luz lineares em certos materiais que se tornam opticamente ativos na presença de um campo magnético. Se as direções do campo magnético e da propagação da luz coincidirem, o ângulo de rotação ( $\theta$ ) é proporcional à densidade de fluxo magnético ( $B$ ), ao comprimento do caminho ( $l$ ), e de uma constante chamada constante de Verdet ( $V$ ), que depende da propriedade do material. Na Equação 2.24,  $I$  é a corrente fluindo através do condutor e  $\mu$  é a permeabilidade do material (ABB, 2005).

$$\theta = V \int B_{dl} = \mu \cdot V \cdot I \quad (2.24)$$

A Figura 2.17 mostra o sistema óptico do sensor MOCT. A luz é emitida por um diodo emissor de luz (LED) e transmitida através de uma fibra multimodo até o sensor instalado no lado de alta

tensão. A luz é polarizada enquanto ela entra no sensor e depois viaja ao redor do condutor de luz de comprimento  $l$  existente no interior da janela do sensor, que em seguida, sai através de um analisador. Posteriormente, a luz é transmitida de volta através de outra fibra óptica até um módulo eletrônico onde é convertida em sinal elétrico por um fotodiodo e amplificado. O módulo de processamento do sinal e a precisão do circuito amplificador proporcionam uma saída analógica de 1A sendo esta, proporcional a corrente no primário que flui através do condutor.

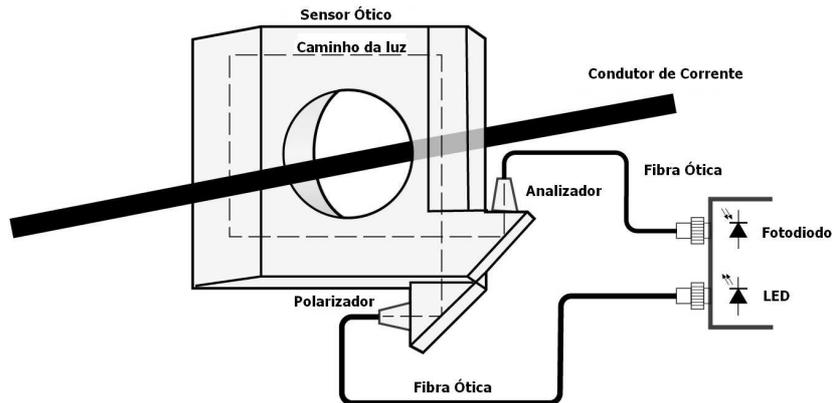


Figura 2.17: Transdutor Magnético-óptico de corrente (ABB, 2004)

A Figura 2.18 apresenta a imagem de um transformador óptico de tensão e corrente.

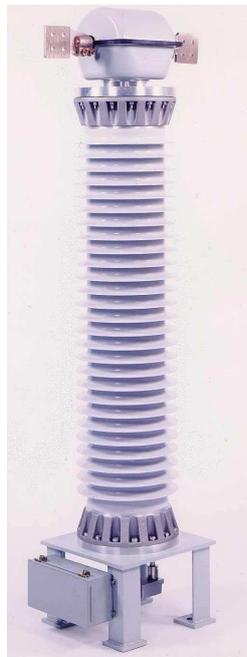


Figura 2.18: Transformador óptico de tensão e corrente (ABB, 2004)

## 2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas alguns conceitos referentes aos diferentes tipos e tecnologias dos transformadores para instrumentos (TIs), tais como princípios básicos de funcionamento, características e a importância destes equipamentos em sistemas elétricos de potência.

Também foram apresentadas as principais diferenças entre os TIs destinados para serviço de proteção e os TIs destinados a medição e faturamento de energia, como classe de exatidão e aspectos construtivos.

Em relação aos transformadores de potencial capacitivo (TPCs) foram apresentados os principais componentes que constituem o equipamento e suas respectivas funções. Este detalhamento é de grande importância para compreender o funcionamento deste dispositivo e investigar algumas falhas ocultas que podem ocorrer e levar este equipamento (TPC) a perder suas características de especificação em relação à classe de exatidão.

No capítulo seguinte serão apresentadas as técnicas de modelagem de TPCs as quais possibilitarão um estudo mais detalhado e que serão úteis para a implementação de uma ferramenta de monitoramento *on-line* de TPCs.

## Capítulo 3

# Modelagem dos Transformadores de Potencial Capacitivo

### 3.1 Introdução

Na literatura são propostos vários modelos de TPCs, tanto para análise no domínio da frequência como no domínio do tempo. Estes modelos podem ser implementados em programas para simulações de transitórios eletromagnéticos como: ATP (*Alternative Transients Program*) que é um programa do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e PSCAD (*Power Systems CAD*), do tipo EMTDC (*Electromagnetic Transients including DC*). Com estas simulações pode-se prever o comportamento do TPC frente aos distúrbios transitórios no sistema e também em regime permanente. Através da análise de algumas simulações é possível visualizar como um TPC defeituoso pode afetar o sistema de proteção do sistema elétrico e também analisar o comportamento da resposta do equipamento para diversos defeitos no próprio TPC.

Serão abordados duas formas de modelagem: uma baseada no circuito equivalente utilizada nos programas de transitórios eletromagnéticos citados anteriormente e outra baseada na função de transferência aplicando a Transformada de Laplace.

### 3.2 Modelo geral do TPC

Um modelo geral de TPC capaz de prever sua resposta em frequências mais elevadas (em torno de 10 kHz) pode ser visualizado na Figura 3.1 (KEZUNOVIC et al., 1992). Este modelo consiste dos seguintes elementos: divisor de tensão capacitivo ( $C_1$  e  $C_2$ ), reator de compensação ( $R_c$ ,  $L_c$ ,  $C_c$ ), transformador intermediário indutivo ( $R_p$ ,  $L_p$ ,  $C_p$ ,  $C_{ps}$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $C_s$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ), circuito de proteção (*gaps* e dispositivos não lineares), bobinas de drenagem ( $L_{d1}$ ,  $L_{d2}$ ) e circuito supressor de ferro-ressonância ( $R_f$ ,  $L_f$ ,  $C_f$ ).

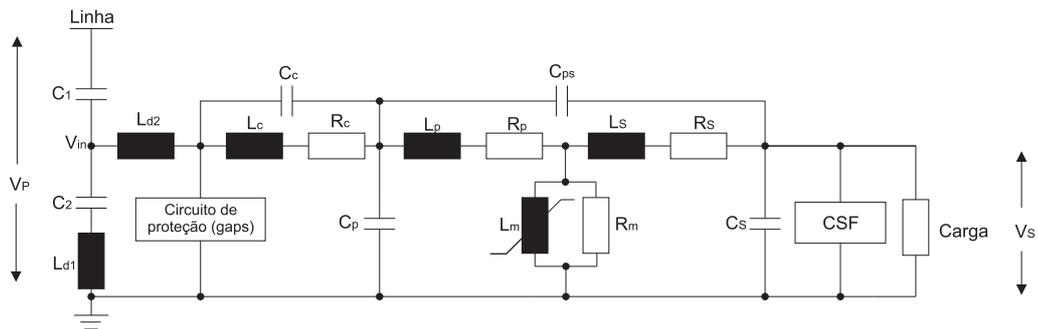


Figura 3.1: Modelo geral do TPC.

Os parâmetros de cada componente são descritos abaixo:

Elementos do transformador de potencial indutivo:

- Capacitâncias parasitas dos enrolamentos primário e secundário ( $C_p$  e  $C_s$ );
- Resistência dos enrolamentos primário e secundário ( $R_p$ ,  $R_s$ );
- Indutância dos enrolamentos primário e secundário ( $L_p$ ,  $L_s$ );
- Indutância e resistência do ramo de magnetização ( $L_m$ ,  $R_m$ );
- Capacitância parasita entre os enrolamentos primário e secundário ( $C_{ps}$ ).

Elementos do reator de compensação:

- Resistência e indutância do reator de compensação ( $R_c$ ,  $L_c$ )
- Capacitância parasita do reator de compensação ( $C_c$ )

Os elementos citados acima podem influenciar consideravelmente no sinal de saída do TPC e também em sua resposta transitória. Estudos e simulações realizadas no domínio da frequência são apresentados na seção 3.4.

### 3.3 Modelagem através de circuito equivalente para simulações digitais

Um dos meios de compreender e analisar o comportamento de sistemas complexos é através do estudo das respostas destes sistemas, quando sujeitos a distúrbios ou variações em seus parâmetros. A simulação computacional é um caminho para se obter estas respostas no domínio da frequência e no domínio do tempo, podendo ser analisadas, observando seus valores instantâneos, eficazes e componentes harmônicas. Programas computacionais tais como EMTP (*Electromagnetic Transients*

*Program*) e EMTDC (*Electromagnetic Transients Program Including DC Systems*) utilizam equações diferenciais no domínio do tempo para representar e solucionar as redes dos sistemas elétricos. As soluções destas equações utilizam passos de integração fixo. Esta estrutura permite representar e controlar sistemas eletromagnéticos e eletromecânicos. A seguir são apresentados os estudos no domínio da frequência e no domínio do tempo utilizando simulações digitais a partir do circuito equivalente do TPC.

### 3.4 Estudos no domínio da frequência

A representação detalhada do modelo geral do TPC torna-se complexa exigindo dados que não são facilmente fornecidos pelos fabricantes além de requerer um tempo computacional considerável (KEZUNOVIC et al., 1992). A fim de verificar a influência dos componentes do TPC na curva de resposta em frequência, KEZUNOVIC et al. (1992) e KOJOVIC et al. (1994) realizaram diversos estudos no domínio da frequência sobre o desempenho deste equipamento.

KEZUNOVIC et al. (1992) desenvolveram um modelo de TPC a partir de técnicas experimentais em laboratório para estimação dos parâmetros deste equipamento. Dessa forma, demonstraram através de estudos de sensibilidade a influência dos diversos parâmetros na curva de resposta em frequência do equipamento. Esses autores, ainda, utilizando o modelo geral proposto para o TPC, mostrado na Figura 3.1, realizaram medições de curto-circuito no TP indutivo a fim de determinar os valores das partes resistiva e reativa das impedâncias dos enrolamentos primário e secundário ( $C_p$  e  $C_s$ ). Estas capacitâncias foram estimadas a partir da frequência de ressonância observada nas medições de impedância de curto-circuito, utilizando a expressão  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ . De forma semelhante, foi calculada a capacitância parasita do reator de compensação ( $C_c$ ).

Com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo geral do TPC da Figura 3.1, KEZUNOVIC et al. (1992) realizaram estudos baseados na análise da sensibilidade da curva de resposta em frequência em relação aos vários parâmetros que compõem o modelo geral. Para isto, foram realizadas comparações de resposta em frequência obtidas através de medições em laboratório com simulações digitais em um programa do tipo EMTP. Assim, os resultados das análises de sensibilidade demonstraram que as capacitâncias parasitas do reator de compensação ( $C_c$ ) e do enrolamento primário ( $C_p$ ) têm grande influência na resposta do TPC para frequências mais elevadas (acima de 1000 Hz), ao passo que, a capacitância equivalente do divisor capacitivo ( $C_E = C_1 + C_2$ ) tem influência em frequências menores.

O circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) também revelou a importância de seus parâmetros em praticamente toda a faixa de frequências se comparado com as curvas do modelo completo do TPC. Através de outras análises de sensibilidade, KEZUNOVIC et al. (1992) concluíram que os parâmetros  $C_{ps}$ ,  $R_s$ ,  $L_s$  e  $C_s$  podem ser suprimidos do modelo geral sem comprometer os resultados para a faixa de frequência de 10 Hz a 10 kHz. O modelo resultante após estas análises corresponde ao circuito da Figura 3.2.

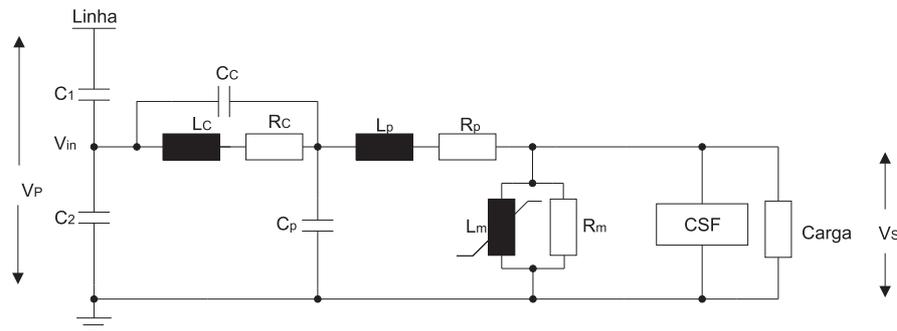


Figura 3.2: Modelo do TPC para estimação de parâmetros e análise da resposta em frequência.

Para realizar as medições de resposta em frequência em laboratório, estes pesquisadores utilizaram um gerador de sinal alimentando um amplificador de potência, o qual foi conectado entre os terminais de alta tensão e terra conforme a Figura 3.3. Os ensaios foram realizados aplicando um sinal de tensão de 100 V, variando a frequência de 10 Hz a 10 kHz, com uma carga resistiva de 100  $\Omega$  no secundário do TPC.

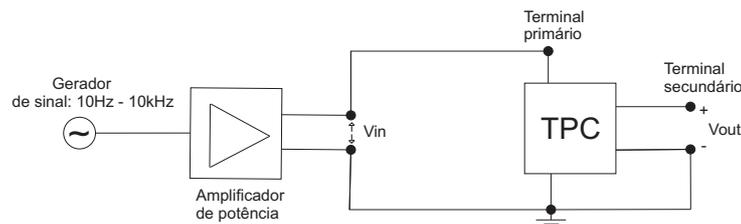


Figura 3.3: Medição de resposta em frequência conforme KEZUNOVIC et al. (1992).

Devido aos componentes internos dos TPCs serem de difícil acesso, KOJOVIC et al. (1994) desenvolveram um método de medição em campo para obter a resposta em frequência no lado secundário do TPC sem a necessidade de desmontá-los ou de acesso aos seus componentes internos. Na Figura 3.4 pode ser visualizada esta metodologia empregada onde os resistores  $R$  e  $R_b$  são elementos externos ao TPC utilizados para viabilizar as medições de resposta em frequência. Esse método consiste em aplicar um sinal senoidal de 115 V no secundário do TPC através de um gerador de sinal e um amplificador de tensão. Para monitorar a curva de resposta em frequência durante os ensaios, um osciloscópio digital mede as tensões do primário, do secundário e a frequência do sinal, transferindo os resultados para um computador. O ganho *versus* frequência é então calculado e plotado utilizando o *software* MATLAB.

O que garantiu a validação do método proposto para realizar as medições em campo de resposta em frequência no secundário do TPC foram as comparações com os resultados obtidos a partir das medições em laboratório obtidas no lado primário para o mesmo tipo de TPC, onde concluíram que os resultados apresentaram boas concordâncias.

KOJOVIC et al. (1994) utilizaram os resultados das medições de resposta em frequência para

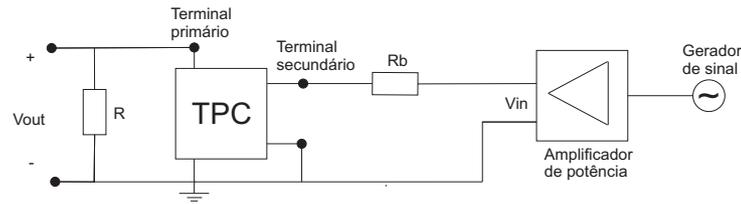


Figura 3.4: Medição de resposta em frequência proposta por KOJOVIC et al (1994)

estimar os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  do circuito equivalente simplificado do TPC conforme a Figura 3.2, através de um método de ajuste não linear de curva. A curva de resposta em frequência calculada, foi obtida a partir de uma expressão analítica do TPC considerando a amplitude da função de transferência deste equipamento. O método de ajuste de curva foi aplicado a um TPC de 138 kV e os resultados obtidos ficaram de acordo com as medições de resposta em frequência.

O circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) com modo de operação ativo visualizado na Figura 2.14 consiste em um reator com núcleo de ferro não saturável, representado por  $L_f$  em paralelo com um capacitor  $C_f$ . Este circuito é sintonizado com um alto fator de seletividade, a fim de atenuar oscilações ferro-ressonantes em qualquer frequência, exceto a fundamental (TZIOUVARAS et al., 2000). O modelo analítico equivalente deste circuito é representado na Figura 3.5, o qual pode ser implementado em programas do tipo EMTP por apresentar bons resultados de acordo com a real resposta em frequência deste filtro (KOJOVIC et al., 1994). Neste modelo analítico,  $M$  representa a indutância mútua de acoplamento do reator  $L_f$ . No trabalho de KOJOVIC, KEZUNOVIC e NILSSON (1992) é apresentado um estudo mais detalhado sobre o modelo matemático deste filtro.

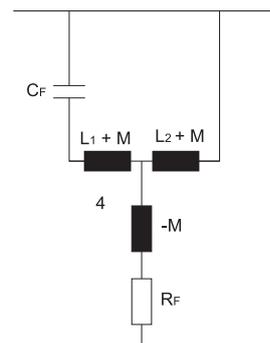


Figura 3.5: Modelagem do CSF.

### 3.4.1 Modelagem por função de transferência

Em FERNANDES JUNIOR (2003), a modelagem do TPC por função de transferência foi obtida através do circuito simplificado da Figura 3.2 e do modelo matemático do CSF da Figura 3.5. Estes foram substituídos por um circuito composto por blocos específicos de impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,

$Z_3$ ,  $Z_4$ ,  $Z_5$  com os parâmetros referidos ao lado secundário do TP indutivo através de sua relação de transformação  $n$ , conforme a configuração mostrada na Figura 3.6.

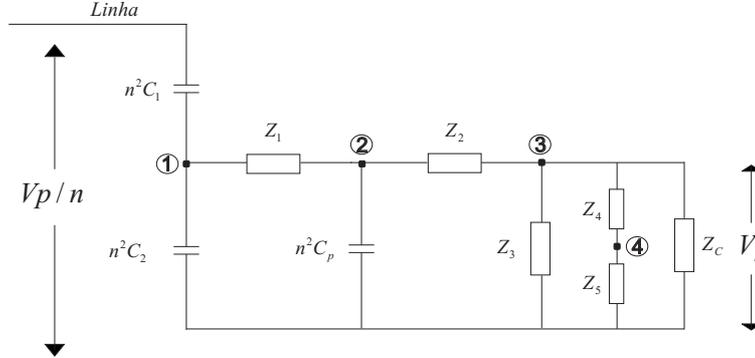


Figura 3.6: Circuito do TPC através de blocos de impedância para o desenvolvimento da expressão analítica da função de transferência, sendo  $V_p$  a entrada e  $V_s$  a saída do sistema

Considerando-se que o símbolo // significa que os parâmetros estão conectados em paralelo, e após aplicar-se a transformada de Laplace aos elementos que constituem os blocos de impedância do circuito da Figura 3.6, obtêm-se as seguintes expressões:

$$Z_1 = [(R_c + sL_c)/n^2] // [1/(n^2sC_c)] \quad (3.1)$$

$$Z_2 = (R_p + sL_p)/n^2 \quad (3.2)$$

$$Z_3 = (R_m/n^2) // (sL_m/n^2) \quad (3.3)$$

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

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

A sequência adotada para o desenvolvimento da função de transferência do módulo da relação de tensão conforme FERNANDES JUNIOR (2003) é a seguinte: os elementos  $Z_3$ ,  $Z_4 + Z_5$  e  $Z_c$  conectados ao nó 3 são colocados em paralelo, com a finalidade de descrever analiticamente a relação entre as tensões  $V_s$  e  $V_2$  aplicando o conceito de divisor de tensão:

$$\frac{V_s}{V_2} = \frac{Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3}{Z_2 + Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3} \quad (3.6)$$

De forma análoga, a relação entre as tensões no nós 2 e 1 pode ser descrita da forma abaixo:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(1/n^2 s C_p) // [Z_2 + Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3]}{Z_1 + (1/n^2 s C_p) // [Z_2 + Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3]} \quad (3.7)$$

A relação entre as tensões  $V_1$  e  $V_p$ , obtida a partir do mesmo procedimento acima, é apresentada na equação 3.8.

$$\frac{V_1}{V_p} = \frac{(1/n^2 s C_2) // \{Z_1 + (1/n^2 s C_p) // [Z_2 + Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3]\}}{(1/n^2 s C_1) + (1/n^2 s C_2) // \{Z_1 + (1/n^2 s C_p) // [Z_2 + Z_c // (Z_4 + Z_5) // Z_3]\}} \quad (3.8)$$

Finalmente, a relação entre as tensões de saída ( $V_s$ ) e de entrada ( $V_p$ ) é obtida através da fórmula 3.9.

$$\frac{V_s}{V_p} = \left(\frac{V_s}{V_2}\right) \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(\frac{V_1}{V_p}\right) \quad (3.9)$$

Algumas simulações demonstrando a sensibilidade na resposta em frequência aos parâmetros de um modelo de TPC são apresentadas na seção 3.4.2.

### 3.4.2 Simulações através de circuito equivalente utilizando o *software* ATP no domínio da frequência

A resposta em frequência dos TPCs foi estudada utilizando o *software* ATP (*Alternative Transients Program*). Um dos benefícios da implementação do modelo com *software* ATP é a interface gráfica disponível (*ATPDraw*), que possibilita avaliar a influência na resposta em frequência dos diferentes parâmetros no TPC.

A Figura 3.7 mostra a implementação do modelo simplificado da Figura 3.2 utilizando este programa onde  $C_e = C_1 + C_2$ . Na figura aparecem os nomes dos nós, os componentes utilizados como: resistores, capacitores, indutores, fonte CA e o TP intermediário, que formam o circuito equivalente do TPC.

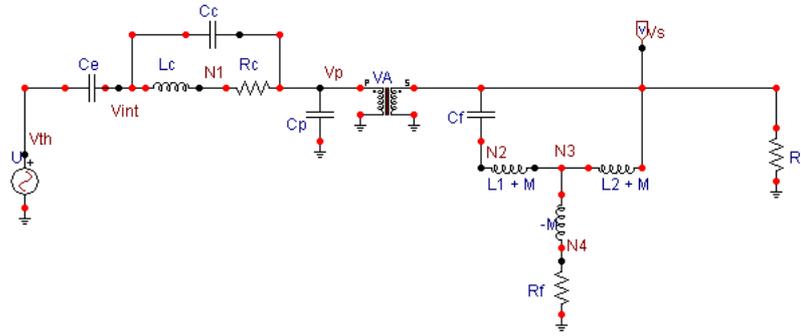


Figura 3.7: Implementação do modelo do TPC utilizando o software ATPdraw

Os valores dos parâmetros do TPC modelo PCA-8 de acordo com KOJOVIC et al. (1994) são:

$C_1 = 5.65 \text{ nF}$	$L_p = 2.85 \text{ H}$	$n = 41.7$
$C_2 = 81.1 \text{ nF}$	$R_p = 400 \text{ } \Omega$	$M = 0.163$
$L_c = 56.5 \text{ H}$	$C_p = 154 \text{ pF}$	$L_1 = 0.318 \text{ H}$
$R_c = 228 \text{ } \Omega$	$R_m = 1e6 \text{ } \Omega$	$L_2 = 0.084 \text{ H}$
$C_c = 127 \text{ pF}$	$L_m = 1e4 \text{ H}$	$C_f = 9.6 \text{ } \mu\text{H}$
$R_f = 37.5 \text{ } \Omega$		

A resposta em frequência consiste em dois gráficos: a) amplitude do ganho e, b) ângulo de fase. A unidade usada para o ganho conforme a equação 3.10 é o *Decibel* (dB). A magnitude do ganho em zero dB e desvio de fase igual a zero graus em regime permanente (60 Hz), é considerada como resposta ideal no domínio da frequência.

$$Ganho = 20 \log \left( \frac{V_s}{V_p} \right) \quad (3.10)$$

Com a implementação deste modelo no ATP, algumas simulações foram realizadas na faixa de frequência de 10 Hz até 10 kHz. O uso da subrotina TRANSFORMER disponível no *software* ATP para representar o transformador intermediário requer a entrada dos parâmetros  $R_s$  e  $L_s$ , mesmo que estes não influenciem na resposta em frequência (KEZUNOVIC et al., 1992).

Os gráficos da Figura 3.8 mostram o efeito da capacitância parasita do reator de compensação ( $C_c$ ) na resposta em frequência, demonstrando sua importância no modelo do TPC.

Na faixa de 1 kHz, nota-se que ocorre uma queda do ganho. Esta queda é devido a uma ressonância paralela que ocorre entre a indutância do reator compensação e suas capacitâncias parasitas. A tensão sobre o reator de compensação nesta faixa de frequência, pode ser de 7 a 8 vezes maior que o valor de tensão sobre este, em 60 Hz (TZIOUVARAS et al., 2000). Em determinados casos, como energização de bancos de capacitores, frequências na faixa de kHz podem surgir entre os terminais do

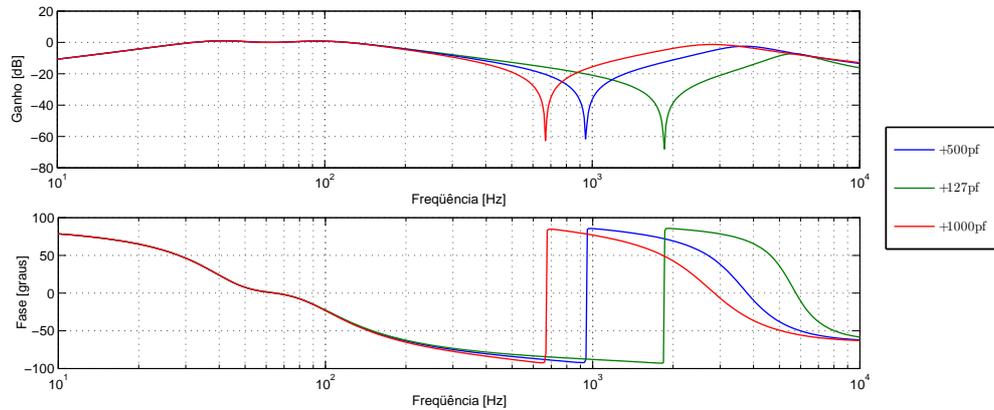


Figura 3.8: Influência da capacitância parasita do reator de compensação ( $C_c$ ) na resposta em frequência do modelo do TPC.

reator de compensação, demonstrando a importância da modelagem dos centelhadores (*spark gaps*) que podem disparar e alterar a resposta em frequência sob determinadas condições no sistema.

Resultados de simulações apresentados na Figura 3.9 indicam que para frequências acima de 1000 Hz o efeito da capacitância parasita do enrolamento primário do transformador intermediário ( $C_p$ ) na resposta em frequência não pode ser ignorado.

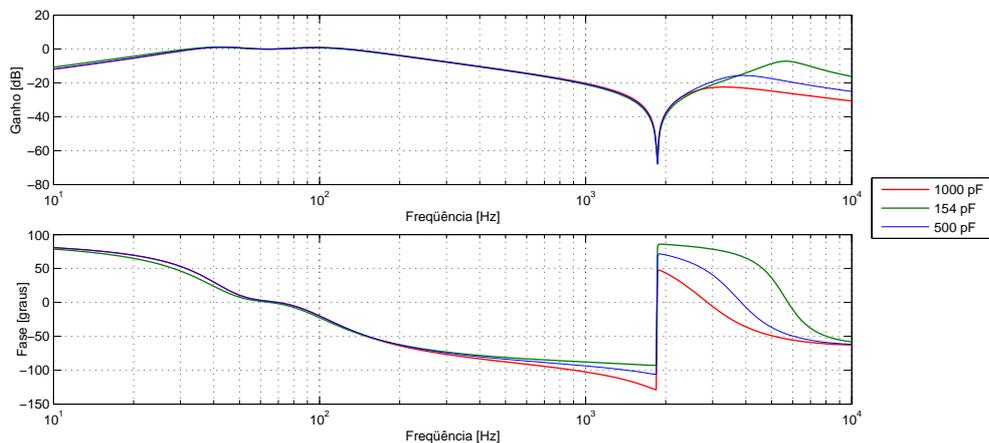


Figura 3.9: Influência da capacitância parasita do enrolamento primário do transformador intermediário ( $C_p$ ) na resposta em frequência do TPC.

A Figura 3.10 mostra uma comparação entre a curva de resposta em frequência do TPC com o reator de compensação queimado e a curva do TPC com suas características originais.

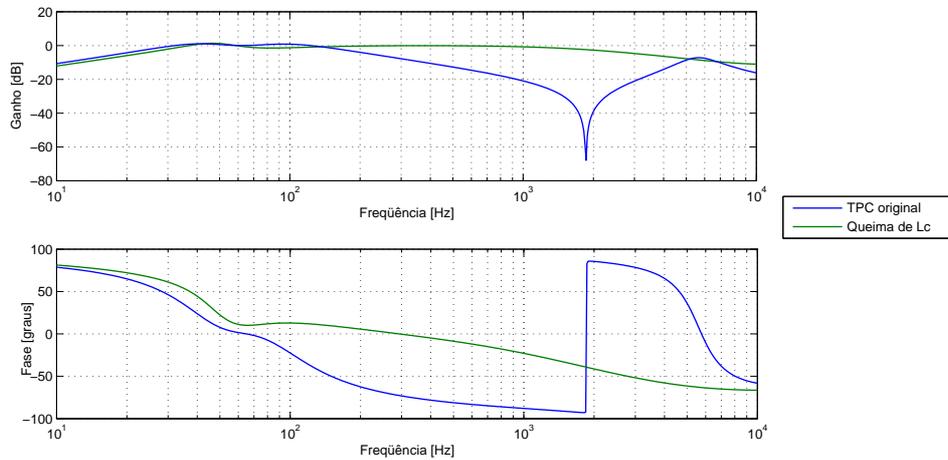


Figura 3.10: Influência do reator de compensação na resposta em frequência do TPC.

A Figura 3.11, mostra o resultado da simulação para três diferentes valores de carga puramente resistiva. Como pode ser analisado, o valor da carga altera de forma significativa a amplitude das curvas de ganho e fase do TPC mas não altera a forma destas.

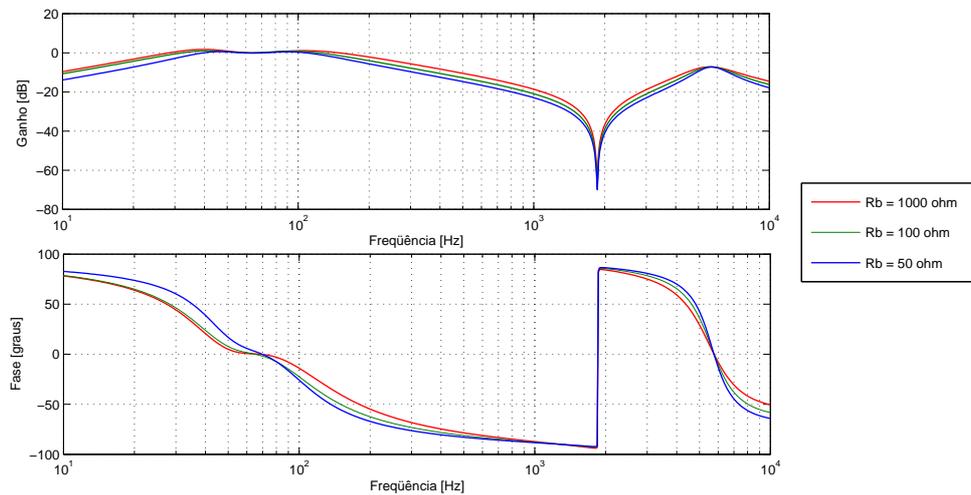


Figura 3.11: Influência da carga na resposta em frequência do TPC.

Com o objetivo de uma análise adicional, foi avaliada a importância das capacitâncias parasitas  $C_c$  e  $C_p$ , e do circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) no modelo matemático do TPC. Os resultados das simulações quando  $C_c$  e  $C_p$  são excluídos do modelo, estão apresentados na Figura 3.12.

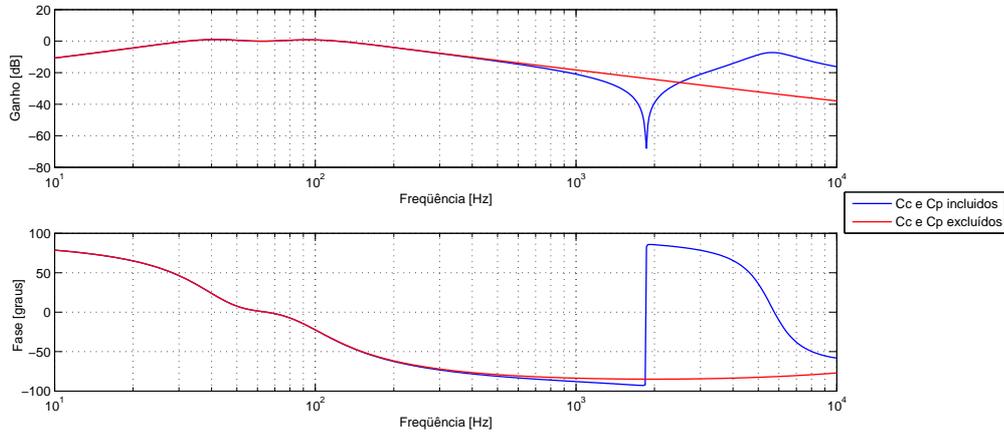


Figura 3.12: Influência dos parâmetros  $C_c$  e  $C_p$  na resposta em frequência do TPC.

A Figura 3.13 mostra a diferença entre o modelo completo do TPC e o modelo com a ausência do CSF e dos parâmetros ( $C_c$ ,  $C_p$ ). Os resultados das simulações demonstram que as capacitâncias parasitas ( $C_c$ ,  $C_p$ ) e o circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) devem ser levados em consideração ao se estudar o comportamento transitório do TPC.

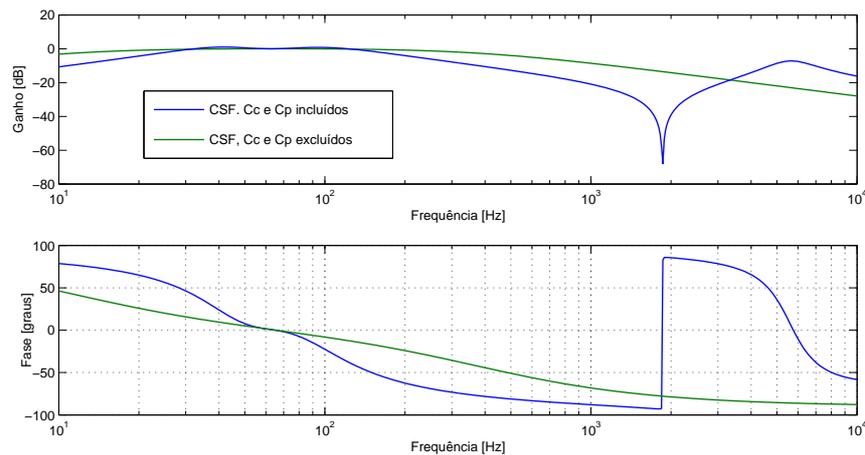


Figura 3.13: Influência dos parâmetros  $C_c$  e  $C_p$  e do CSF na resposta em frequência do TPC.

Os estudos de resposta no domínio da frequência são válidos apenas para sistemas lineares com comportamento linear. Em geral, os transformadores para instrumentos são dispositivos não lineares projetados para operar na região linear. Isto significa que, na maioria do tempo, os transformadores para instrumentos podem ser considerados como dispositivos lineares.

A Figura 3.14 mostra a sensibilidade da curva de amplitude e de fase da relação de tensão TPC à variação dos principais parâmetros na sua representação, sendo  $C_E = C_1 + C_2$  a capacitância equivalente da coluna capacitiva. Esta resposta foi obtida através da implementação da função de transferência no software *MATLAB*<sup>®</sup> (*The Mathworks Inc., 1992*) desenvolvida na seção 3.4.1. As conclusões em relação ao estudo da sensibilidade realizado através deste método, concordaram com o trabalho de TZIOUVARAS et al. (2000). A curva de ganho e de fase revelam que as principais 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.

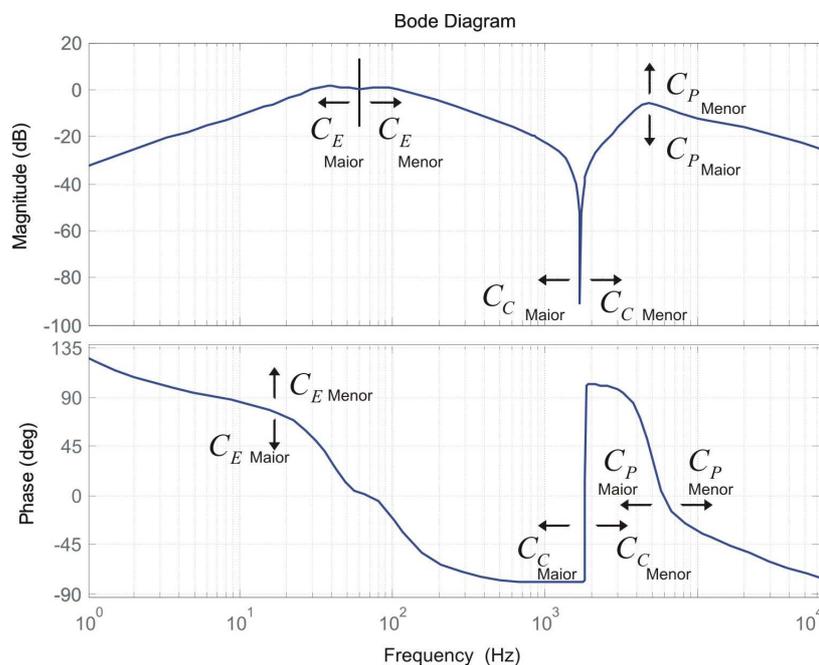


Figura 3.14: Sensibilidade da curva de amplitude e fase da relação de tensão de um modelo geral de TPC a alguns de seus parâmetros mais importantes

Nota-se através dos gráficos da Figura 3.14 que a magnitude da resposta do TPC varia com a frequência e o ganho não é sempre unitário, como seria desejável. Isto não é um problema quando o equipamento opera em regime permanente, porém na resposta transitória o sinal apresenta componentes em várias frequências. Em períodos transitórios isto pode resultar em diferenças nas formas de onda do sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

Entre os principais fatores que influenciam na resposta em frequência dos TPCs, pode-se citar (HOU; ROBERTS, 2000):

1. a configuração do circuito supressor de ferro-ressonância (CSF);
2. parâmetros do TPC adotados em projeto;
3. configuração e valor da carga adotada.

O fator mais significativo é o modo de operação do circuito supressor de ferro-ressonância (CSF). Como foi citado na seção 2.5.3, dois modos de operação do CSF são conhecidos: ativo e passivo.

O modo de operação do circuito supressor de ferro-ressonância que possui maior influência na resposta em frequência deste equipamento é o modo ativo. O CSF que utiliza o modo de operação passivo produz uma resposta perto da ideal devido ao seu circuito ficar de forma inativa, ou seja, como se o dispositivo CSF ficasse desligado do TPC, até que uma condição de ferro-ressonância com a presença de sobretensões, ative o circuito. Já os fatores de projeto do TPC que influenciam a resposta são basicamente a combinação do divisor capacitivo e a indutância série.

A carga conectada ao TPC é também outro fator importante que afeta a exatidão da resposta. Algumas observações do impacto da carga na resposta do TPC podem ser feitas (COMMITTEE, 1981):

1. fator de potência elevado, ou uma carga puramente resistiva, causa grande atenuação em altas frequências;
2. fator de potência baixo, como exemplo, uma carga puramente indutiva, causa amplificação em frequências abaixo da fundamental;
3. em condições sem carga, o resultado é a amplificação acima ou abaixo da frequência fundamental.

Apesar da análise de resposta em frequência (ARF) não ser uma ferramenta aplicada em monitoramento *on-line* em equipamentos como o sistema de monitoramento de TPCs proposto, foram realizadas algumas simulações com o software ATP utilizando o modelo equivalente de TPCs para alta frequência. Esta técnica é utilizada com o equipamento fora de operação e fornece informações importantes sobre o estado do equipamento, permitindo compor com maior clareza o diagnóstico, enriquecendo o trabalho para estudos futuros.

### 3.5 Estudos no domínio do tempo

Em sistemas elétricos de potência podem ocorrer vários tipos de eventos que resultam em transitórios elétricos, tais como: descargas atmosféricas, faltas, energização e desenergização de linhas de transmissão, chaveamentos, entre outros. Quando ocorre uma mudança repentina na tensão, como

uma falta no sistema, uma redistribuição da energia elétrica e magnética armazenada nos elementos capacitivos e indutivos resulta da dinâmica do sistema de potência. Entretanto, esta redistribuição de energia não ocorre instantaneamente e o sistema deve passar por um regime transitório antes de atingir um novo estado (TZIOUVARAS et al., 2000).

Durante o período transitório de um evento os sinais de tensão e corrente são constituídos de exponenciais decrescentes com determinados níveis DC, bem como de componentes senoidais abaixo e acima da frequência fundamental do sistema de potência. O desempenho dinâmico dos relés de alta velocidade do sistema de proteção possui uma grande dependência com relação aos sinais fornecidos pelos transformadores para instrumentos e, estes sinais dependem da resposta transitória destes transformadores e dos tipos de transitórios gerados no sistema de potência.

Existem duas condições importantes no sistema de potência que podem causar problemas na resposta transitória dos transformadores de potencial (TZIOUVARAS et al., 2000). As condições são:

1. repentinas quedas de tensão nos terminais do transformador;
2. sobretensões nas linhas de transmissão.

A primeira condição pode ser gerada por faltas próximas ao TPC. Estas faltas podem fazer com que a energia armazenada nos elementos capacitivos e indutivos deste equipamento gere transitórios de baixa frequência com característica não periódica que podem durar até 100 ms.

Na segunda condição, o rápido aumento da tensão nos terminais primários do TPC pode ter como origem faltas em qualquer localização do sistema de transmissão. Estas sobretensões podem causar a saturação do núcleo magnético do transformador intermediário (TPI) do TPC. Quando isso ocorre, resultam informações inadequadas na saída do equipamento e também danos irreversíveis por problemas térmicos.

As oscilações mencionadas acima são descritas com maiores detalhes nas pesquisas do *Working Group of the Relay* (COMMITTEE, 1981). Estas oscilações geram erros que podem ter grande impacto na confiabilidade e segurança dos relés de proteção, causando operações indevidas, operações com atraso ou falhas de operação.

### **3.5.1 Simulações através de circuito equivalente utilizando o *software* PSCAD no domínio do tempo**

O modelo de TPC adotado para as simulações no domínio do tempo foi o modelo proposto por LUCAS et al. (1992), que considera as características de magnetização do transformador indutivo e inclui os efeitos de saturação (comportamento não linear do núcleo magnético) descrito em LUCAS (1988).

Este modelo foi implementado no *software* PSCAD (*Power Systems CAD*) e pode ser usado para simular defeitos no TPC, os efeitos neste equipamento após distúrbios na rede e também determinar a operação adequada dos relés em estudos de transitórios eletromagnéticos.

A Figura 3.15 ilustra o circuito equivalente do modelo do TPC após o reator de compensação.

O modelo do núcleo magnético do TPC da Figura 3.16 inclui perdas por histerese e perdas suplementares (correntes parasitas). A base do modelo do núcleo é uma injeção de corrente correspondente à soma das correntes da combinação paralela de resistência e indutância não-lineares (LUCAS et al., 1992).

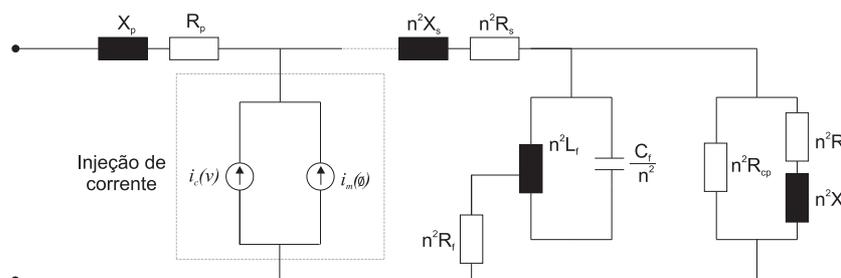


Figura 3.15: Circuito equivalente do TPC após o reator de compensação proposto por LUCAS et al.(1992)

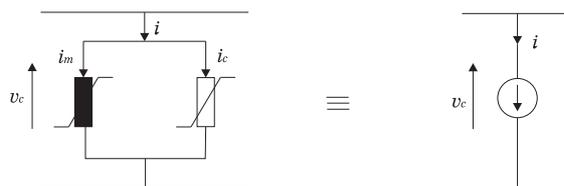


Figura 3.16: Configuração do modelo de núcleo magnético proposto por LUCAS et al.(1992)

### 3.5.1.1 Transitórios Residuais

Transitório residual é definido como um erro de tensão que aparece nos terminais de saída do TPC que surge após uma repentina e significativa queda de tensão no primário (WORKING GROUP OF THE RELAY, 1981). Quando ocorre esse tipo de transitório, o TPC pode perder a fidelidade do sinal em seu secundário devido aos elementos não lineares, indutivos e capacitivos que constituem o seu projeto. Para simular alguns exemplos de transitórios residuais que podem ocorrer no secundário do TPC, simulações de falta fase-terra no primário do TPC de 230 kV foram realizadas. A falta fase-terra foi realizada considerando a operação de fechamento da chave *CH*, conectada entre a coluna capacitiva completa do TPC e um ponto de referência para a terra, conforme a Figura 3.17.

Foram analisadas as respostas transitórias do TPC em duas situações: quando é conectada em seu secundário uma carga puramente resistiva no valor de  $Z_{b1} = 100\Omega$  e em outra situação uma carga puramente indutiva de  $Z_{b2} = 100\Omega$ .

Os resultados das simulações visualizados nas figuras 3.18 e 3.19 mostram a diferença entre os transitórios residuais para os dois tipos de carga. A falta foi aplicada no instante 200 ms permanecendo durante aproximadamente 200 ms.

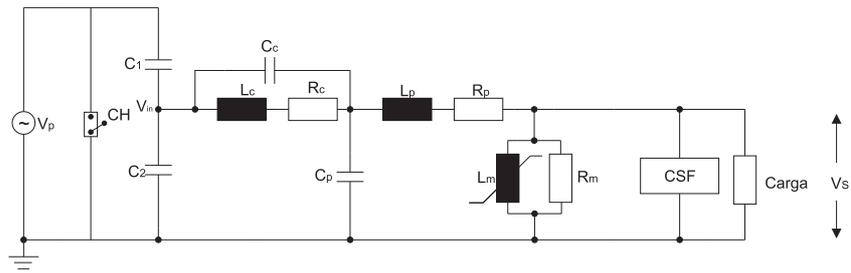


Figura 3.17: Esquema utilizado para simulação de uma falta fase-terra no primário do TPC

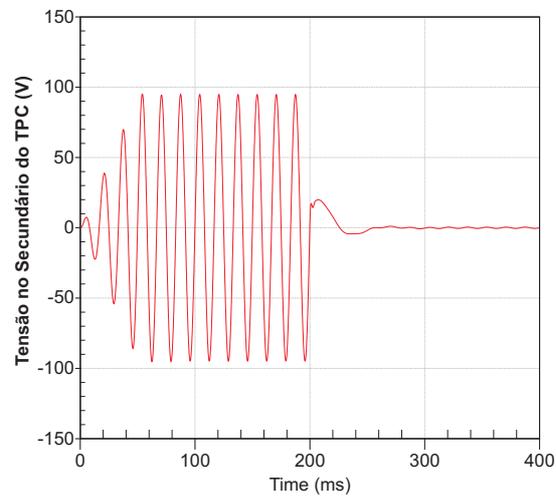


Figura 3.18: Transitório residual no secundário do TPC com carga puramente resistiva

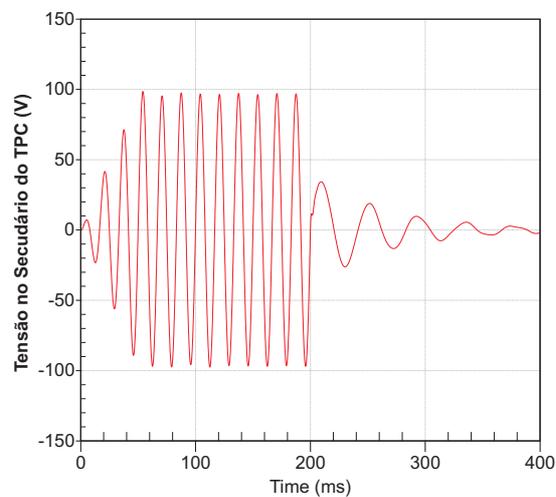


Figura 3.19: Transitório residual no secundário do TPC para carga puramente indutiva

Avaliações experimentais mostram que os seguintes itens em relação a carga do TPC podem ter influência em relação ao transitório residual (COMMITTEE, 1981):

1. Magnitude da carga. A maioria dos TPCs possuem um melhor desempenho transitório para cargas inferiores à carga nominal;
2. Fator de potência da carga. Em geral a resposta transitória se torna pior, quanto menor o fator de potência gerando oscilações de baixa frequência;
3. Composição e conexão da carga. Se existem elementos indutivos presentes na carga, com um alto fator de seletividade  $Q$  do filtro supressor de ferro-ressonância, o transitório residual se torna maior. Cargas RL série com a mesma potência e mesmo fator de potência, resultam em um melhor transitório residual do que cargas RL em paralelo.

Entre outros fatores que podem influenciar no transitório residual destacam-se a configuração do circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) e detalhes de projeto do TPC.

### 3.5.1.2 Instante de Ocorrência da Falta no Primário do TPC

Na ocorrência de uma falta no primário, a resposta transitória do TPC pode ser de duas formas em geral. A primeira é uma oscilação com um amortecimento rápido (na faixa de 200 a 2000 Hz), que ocorre predominantemente quando a falta acontece perto do pico de tensão. A segunda forma é uma oscilação que possui um amortecimento mais lento e geralmente ocorre quando a falta acontece no momento em que a tensão primária está perto de zero (COMMITTEE, 1981).

Com o mesmo circuito da Figura 3.17, foi avaliada a influência do instante de ocorrência da falta no primário na resposta transitória. Duas situações foram avaliadas: quando a falta fase-terra é iniciada no instante da passagem pelo zero da tensão primária em aproximadamente 200 ms e quando a falta é iniciada no pico da tensão da tensão primária em aproximadamente 196 ms. Nos dois casos, a carga utilizada no secundário do TPC foi  $Z_b = 10 + j34\Omega$ . A Figura 3.20 mostra as formas de onda da tensão transitória no secundário do TPC.

Analisando a Figura 3.20 pode-se perceber que a amplitude da tensão transitória no início do curto-circuito é maior quando a falta é iniciada no zero da tensão primária. Em geral a pior resposta é obtida quando a falta ocorre no zero da tensão primária devido à capacitância do TPC possuir a máxima energia armazenada neste instante e uma constante de tempo maior que a indutância. A indutância armazena a mesma quantidade de energia quando a falta ocorre no pico da tensão primária, porém sua constante de tempo é muito menor (SWEETANA, 1971).

### 3.5.1.3 Influência do circuito supressor de ferro-ressonância do TPC

Como citado anteriormente na seção 2.5.3, o dispositivo supressor de ferro-ressonância (CSF) possui grande importância nos TPCs devido sua influência em períodos transitórios. Com o objetivo

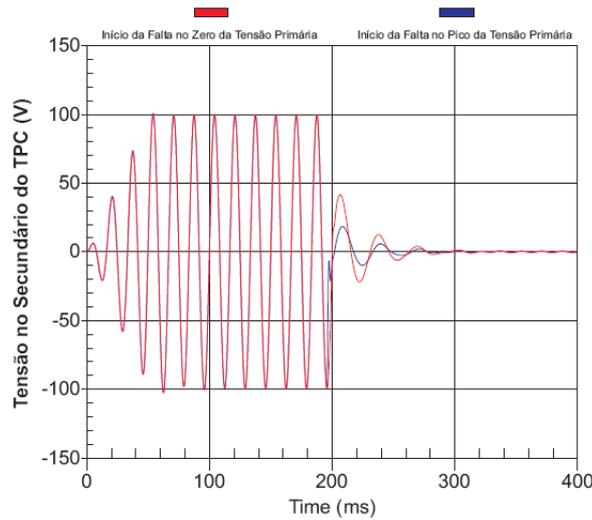


Figura 3.20: Comparação da tensão transitória no secundário do TPC com iniciação da falta em zero e no pico da tensão primária

de avaliar a eficiência deste circuito em períodos transitórios, foram realizadas simulações em condições favoráveis ao surgimento de ferro-ressonância. Para isto, foi considerada uma carga leve no secundário do TPC (20 VA para um TPC de 200 VA) efetuando a simulação de uma falta no primário. A falta inicia no instante de 200 ms, com duração de aproximadamente 50 ms, através do fechamento da chave *CH* conforme a Figura 3.17.

Primeiramente, as simulações foram realizadas desconsiderando o circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) do modelo. Os resultados das simulações com a ausência do CSF são apresentados nas figuras 3.21 e 3.22. Nestas figuras observa-se claramente as oscilações transitórias de tensão e de densidade de fluxo no secundário do TPC demonstrando a ocorrência de ferro-ressonância resultante da falta aplicada no primário do TPC.

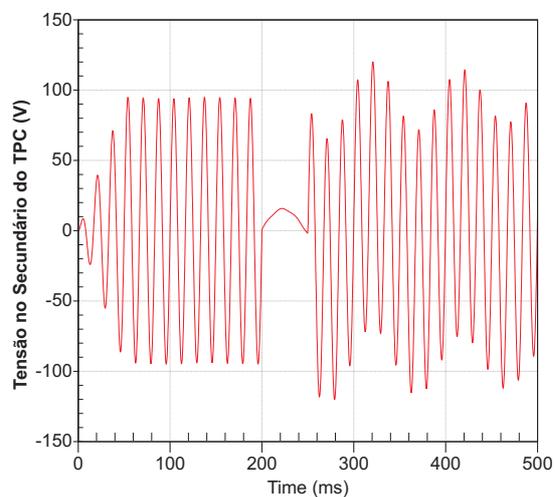


Figura 3.21: Tensão transitória no secundário do TPC desconsiderando o circuito supressor de ferro-ressonância

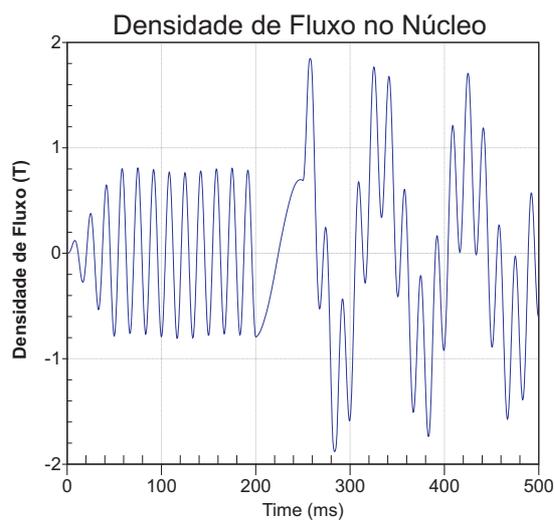


Figura 3.22: Densidade de fluxo no núcleo eletromagnético do TPC desconsiderando o circuito supressor de ferro-ressonância

Ao incluir-se o circuito supressor de ferro-ressonância no modelo do TPC, novas simulações foram realizadas. Os resultados destas simulações são apresentados nas Figuras 3.23 e 3.24. Pode ser visualizado na Figura 3.23 que as oscilações de tensão são amortecidas em um período de aproximadamente 50 ms após cessar a falta no primário evitando, assim, o fenômeno de ferro-ressonância. O transitório pode ser analisado também através da forma de onda da densidade de fluxo, conforme a Figura 3.24. Com base nestas simulações mostra-se a eficiência do circuito supressor de ferro-ressonância (CSF) no amortecimento de tensões transitórias e no fenômeno de ferro-ressonância.

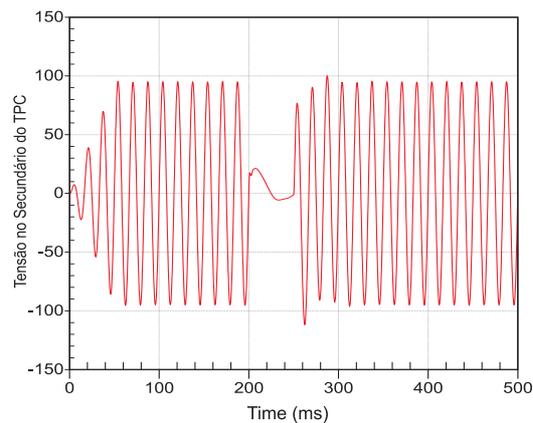


Figura 3.23: Tensão transitória no secundário do TPC considerando o circuito supressor de ferro-ressonância

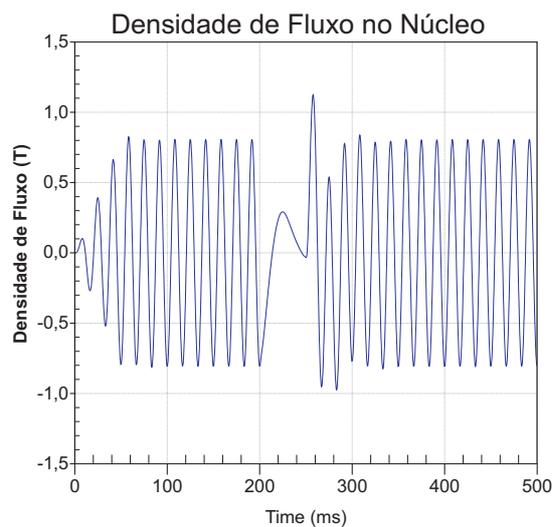


Figura 3.24: Densidade de fluxo no núcleo eletromagnético do TPC considerando o circuito supressor de ferro-ressonância

### 3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram abordadas as técnicas de modelagem para representar o TPC através de circuitos equivalentes para implementação em *softwares* do tipo EMTP, bem como as técnicas por implementação através de função de transferência. Em síntese, foram refeitos estudos de análise de sensibilidade da curva de resposta em frequência com a implementação do modelo geral utilizando o programa ATP e parâmetros obtidos na literatura.

Através das simulações realizadas foi possível comprovar quais os parâmetros do modelo geral são relevantes para representar o circuito equivalente do TPC até uma faixa de frequência de 10 kHz, obtendo-se assim, um modelo simplificado.

Observou-se também, que as capacitâncias parasitas do modelo simplificado obtido podem ser desconsideradas quando o TPC opera em torno da frequência fundamental (60 Hz), pois não influenciam no desempenho do equipamento. Desta forma, obteve-se um modelo básico que foi utilizado para simular os defeitos no TPC. Este modelo é uma ferramenta útil no desenvolvimento e na implementação do sistema de monitoramento *on-line* conforme será apresentado no capítulo 5.

## Capítulo 4

# Principais Defeitos e Manutenção em TPCs

### 4.1 Introdução

A exatidão dos TPCs está relacionada com as características de projeto do equipamento. A relação de tensão dos transformadores de potencial capacitivos é composta pela combinação da relação do divisor capacitivo e da relação do transformador intermediário que fazem parte deste equipamento.

A exatidão da unidade eletromagnética é influenciada pelos mesmos fatores que influenciam a exatidão dos transformadores de potencial indutivos. A especificação apropriada dos parâmetros da unidade eletromagnética é importante para o desempenho do TPC, porém para que o TPC mantenha a exatidão é fundamental também um bom projeto dos elementos capacitivos.

Nesta seção são abordados os principais defeitos do TPC que prejudicam seu funcionamento adequado e algumas técnicas de manutenção. Os defeitos foram divididos em dois grupos, na unidade eletromagnética e no divisor capacitivo.

### 4.2 Defeitos na coluna capacitiva

Cada unidade capacitiva ou seção capacitiva é formada por elementos capacitivos conectados em série. O número de unidades capacitivas depende do nível de tensão primária. Estes elementos são isolados com fluido dielétrico, ou seja, a coluna capacitiva é totalmente preenchida com óleo isolante sob uma leve sobrepressão pelo sistema de expansão térmica, montados dentro do corpo de porcelana.

A maioria dos elementos capacitivos manufaturados atualmente são isolados com papel kraft de alta pureza impregnados com óleo juntamente com filme de polipropileno (RIBEIRO, 1996).

O filme de polipropileno proporciona um dielétrico com maior resistência de isolamento, enquanto o papel Kraft facilita a impregnação do capacitor com fluido isolante e a circulação do fluido dentro

e fora de cada elemento capacitivo. Com esta combinação, a possibilidade de descargas parciais é minimizada.

#### 4.2.1 Alterações no valor da capacitância

Mudanças na capacitância têm influência direta na relação de transformação da tensão e na sintonia entre a unidade eletromagnética e a coluna capacitiva. Uma das possíveis conseqüências da mudança no valor da capacitância é a alteração do nível de tensão de saída do TPC, que pode ser para mais ou para menos dependendo da localização dos elementos capacitivos danificados, ou seja, se estão na porção  $C_1$  ou  $C_2$ . Mudanças na capacitância podem ser causadas pelos seguintes fatores (RIBEIRO, 1996):

- Envelhecimento;
- Temperatura do ambiente em condições severas (neve, calor muito elevado);
- Capacitâncias parasitas;
- Forças mecânicas atuando sobre os elementos capacitivos;
- Falhas dielétricas ou nos elementos capacitivos.

A capacitância de cada elemento capacitivo é determinada basicamente pelos seguintes parâmetros (RIBEIRO, 1996):

- Constante dielétrica de cada isolante;
- Área do eletrodo;
- Distância entre os eletrodos.

Destes itens, a variação da constante dielétrica e a distância entre os eletrodos ou placas são as causas mais comuns do desvio da capacitância. Variações na área do eletrodo devido a mudanças de temperatura possuem efeitos desprezíveis sobre a capacitância total.

A distância entre placas dos elementos capacitivos dependem do dielétrico empregado e também de técnicas de compressão. O filme de polipropileno é menos compressível do que o papel *kraft* quando utilizado isoladamente e uma vez processado, ele adquire uma memória mecânica. A Figura 4.1 ilustra a fabricação destes elementos capacitivos. Alguns fabricantes incorporam molas, para manter uma força constante de compressão na coluna capacitiva, possibilitando também a expansão térmica.

A constante dielétrica pode variar com a temperatura e também variar com a idade do material isolante, especialmente se ele é submetido a altas temperaturas. O polipropileno possui um baixo

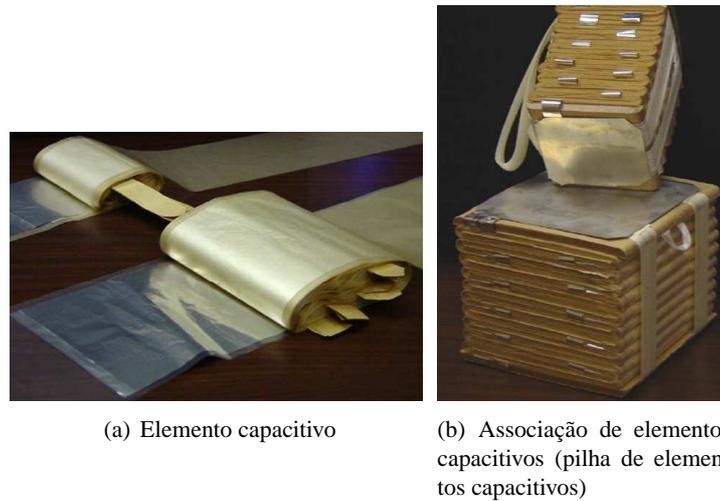


Figura 4.1: Detalhes da construção de elementos capacitivos (DOBLE, 2005)

fator de dissipação, com isto os capacitores que utilizam esta matéria prima como dielétrico possuem um baixo aumento de temperatura (ABB, 2005). O polipropileno também exibe uma pequena variação em sua constante dielétrica com mudanças de temperatura. Como resultado, estas unidades apresentam maior estabilidade durante um maior período de tempo e em grandes variações de temperatura, conforme a Figura 4.2.

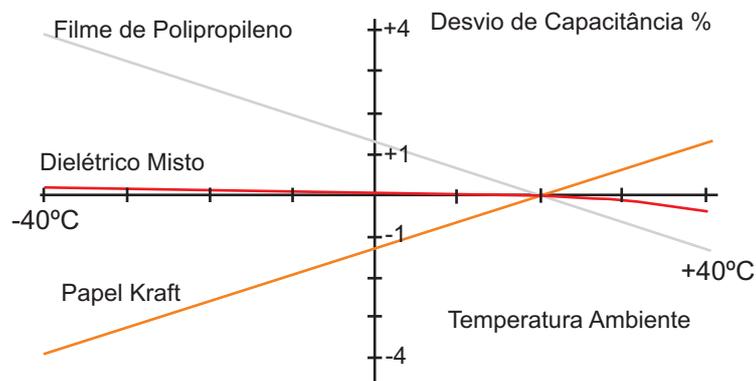


Figura 4.2: Comportamento da capacitância com a temperatura (ABB, 2005)

Outros fatores que podem afetar a exatidão de TPCs são as correntes de fuga, ocasionadas pela contaminação dos isoladores em ambientes poluídos e capacitâncias parasitas geradas a partir da aproximação de outros objetos (ABB, 2005). O primeiro pode ser eliminado pela limpeza periódica dos isoladores do transformador. O segundo efeito é minimizado em TPCs com alta capacitância e pelo projeto do equipamento. Outro fenômeno que pode comprometer o valor da capacitância são as descargas parciais descritas a seguir na seção 4.2.1.1.

#### 4.2.1.1 Descargas parciais

As descargas parciais (DP) são descargas elétricas resultantes pela presença do campo elétrico atuando no sistema de isolamento. As descargas parciais não causam um rompimento completo da isolação e seus efeitos a curto prazo não são catastróficos. Caso a atuação do campo elétrico sobre o dielétrico seja forte durante um longo período, essas descargas podem deteriorar lentamente a qualidade da isolação (ABB, 2004).

Nos transformadores para instrumentos, as DP podem ocorrer onde existem bolhas de ar ou descontinuidades no dielétrico. Devido à modificação das características do dielétrico nos espaços com ar ou gás, o *stress* elétrico localizado nestes locais pode ser suficiente para causar descargas nestes lugares. Este vácuo localizado nas falhas, resulta em impulsos de corrente de alta frequência que podem ser detectados utilizando instrumentação sensível (ABB, 2004).

As descargas parciais são medidas em picocoulombs ( $pC$ ), unidade de carga elétrica. O ensaio deve ser realizado antes e depois do ensaio de tensão no dielétrico. Deve ser aplicada uma tensão, na frequência industrial, com valor de 120% da tensão máxima e operação e não deve ultrapassar os valores estabelecidos por normas como a NBR 8017/83. Fabricantes de transformadores para instrumentos utilizam diferentes maneiras para minimizar ou de controlar o nível de descargas parciais (ABB, 2004):

- Controle dos processos de fabricação (vácuo, viscosidades, etc.) para minimizar a introdução de imperfeições no dielétrico;
- Desenvolvimento de novos materiais e técnicas para minimizar o *stress* do campo elétrico;
- Preencher com gás dielétrico as possíveis falhas a fim de reduzir o risco de rompimento do isolamento;
- Utilização de materiais com constantes dielétricas similares.

Também podem alterar a exatidão dos TPCs e inclusive podendo danificar o equipamento, a seleção inadequada de cargas não-lineares, descritas no item 4.4.2.

#### 4.2.2 Defeito na câmara de expansão

Defeitos originados nos elementos capacitivos podem ocasionar perfuração da câmara de expansão, originando vazamentos de óleo nas porcelanas (TRENCH, 2000). Caso sejam detectados vestígios de óleo na porcelana ou pela bucha do *carrier*, é necessário inspecionar a câmara de expansão (Figura 4.3) e existindo perfuração na mesma a unidade deve ser retirada de serviço e levada para manutenção. Caso ocorra ruptura do isolador pode haver perda total do óleo do capacitor.

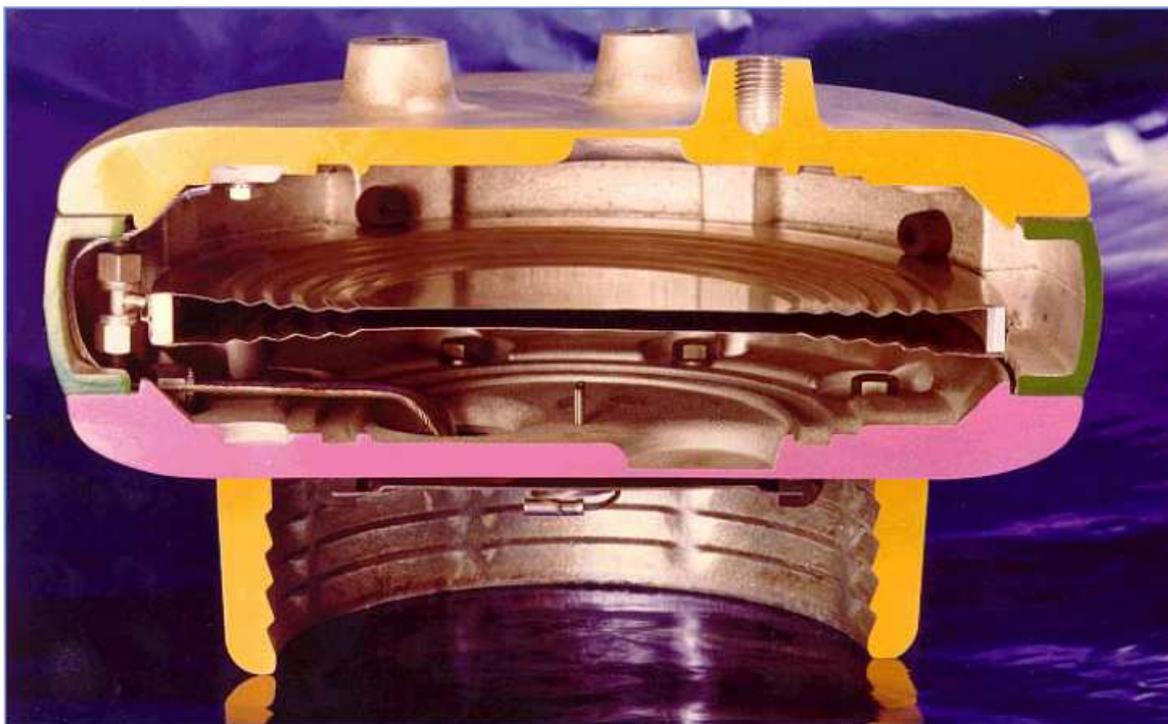


Figura 4.3: Detalhe da Câmara de Expansão (DOBLE, 2005)

### 4.3 Defeitos na unidade eletromagnética

Nesta seção são descritos alguns dos principais defeitos encontrados na unidade eletromagnética do TPC. Os defeitos encontrados foram divididos em cada dispositivo que constitui a unidade.

#### 4.3.1 Chave de aterramento

A chave de aterramento visualizada no item 7 da Figura 4.6 tem por objetivo anular a tensão de entrada do TPI, quando é necessário atuar no interior da caixa de secundários. Para isto ela é posicionada na posição de aterramento. Esta chave deve ser operada periodicamente dependendo do grau de poluição e umidade do local (no mínimo uma vez por ano) para se verificar o seu funcionamento e evitar o bloqueio da mesma por falta de operação. É importante também a verificação de sinais de umidade ou condensação na caixa CARRIER.

#### 4.3.2 Problemas no isolamento dos enrolamentos do TPI

A relação de transformação do TPI é determinada pelo número de espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário. A relação pode ser comprometida caso ocorra algum problema na isolação em algum dos enrolamentos. Os problemas nos enrolamentos do TPI podem ser diagnosticados através de ensaios realizados com o TPC fora de operação. Abaixo seguem alguns dos ensaios realizados para este propósito (IEC 60044-5, 1999) :

- Relação de transformação;
- Resistência do isolamento;
- Fator de potência de isolamento;
- Polaridade;
- Resistência ôhmica dos enrolamentos.

O problema da ferro-ressonância de longa duração na baixa tensão é uma das causas da queima do TP auxiliar, devido à sobrecorrente e de outras avarias (SOARES et al., 2005). O resultado deste tipo de defeito poderá alterar a relação de transformação do TPI além de outros danos no equipamento causados por sobreaquecimento.

### 4.3.3 Defeitos no reator de compensação

O reator de compensação possui uma bobina auxiliar que está em série com uma resistência e um *gap*. Na ocorrência de um curto-circuito no secundário, a corrente que percorre o reator aumenta, resultando em um aumento da tensão nos terminais da bobina principal, que induz na bobina auxiliar. Esta tensão pode ser suficiente para atuar o *gap* de proteção. Com a atuação deste dispositivo de proteção o circuito sai da frequência de ressonância entre  $X_L$  e  $X_{CE}$ , reduzindo a tensão aplicada na unidade eletromagnética devido ao grande valor de  $X_{CE}$  o qual limita a corrente de curto-circuito (MASON, 1956). Caso o defeito persista no equipamento, o dispositivo de proteção (*gap*) pode perder sua funcionalidade ou se fundir (permanecer em curto) alterando o valor da indutância do reator.

É recomendável verificar anualmente o *gap* protetor sendo sua vida útil dependente da frequência e da duração de operação de chaveamentos no sistema. Torna-se importante certificar-se de que os terminais metálicos façam um bom contato no suporte.

Outra situação que pode ocorrer é um curto-circuito parcial ou total tanto nos terminais quanto no enrolamento do reator (TRENCH, 2000). Uma pequena alteração no valor da indutância do reator pode causar mudanças significantes no fator de correção de relação ( $FCR$ ) e no ângulo de fase, comprometendo sua exatidão. Alguns dos sintomas destes defeitos são (TRENCH, 2000):

- Tensão secundária baixa;
- Erro de ângulo de fase.

Devido à unidade eletromagnética estar imersa em óleo mineral tratado, a substituição de qualquer componente defeituoso implica em esvaziar a caixa. Caso o defeito encontrado esteja no reator de compensação ou no transformador intermediário (TPI), recomenda-se enviá-lo para fábrica para substituição, pois estes equipamentos requerem uma impregnação especial.

#### 4.3.4 Defeito no dispositivo supressor de ferro-ressonância

O filtro de supressão de harmônicas previne a sustentação de oscilações originadas pelo efeito da ferro-ressonância como foi citado no capítulo 3. Como exemplo citamos o reator com modo de operação passivo, este dispositivo consiste de um resistor em série com um reator saturável e um resistor em paralelo. O reator deste dispositivo satura em aproximadamente 150% da tensão nominal afim de amortecer as oscilações indesejáveis.

Neste equipamento podem ocorrer sobretensões de até quase 3 *pu* em 60 Hz, e a efetividade do circuito amortecedor pode ficar comprometida caso o reator não atenda às características de projeto, principalmente na região saturada. Outro tipo de amortecedor, que não envolve a saturação é o circuito *RLC* sintonizado.

Defeitos nos filtros de supressão de harmônicas ou funcionamento inadequado podem ocasionar os seguintes problemas (TRENCH, 2000):

- Distorção na forma de onda da tensão de saída;
- Tensão de saída baixa ou apresentando erro no ângulo de fase.

#### 4.3.5 Capacitores de surto

Os capacitores de surto (*surge fence capacitors*) conectados em paralelo na saída de cada enrolamento secundário foram desconsiderados na Figura 4.6. Estes dispositivos podem se deteriorar na ocorrência de sobretensões de alta frequência originadas por manobras de chaves seccionadoras ou de reatores. Tais sobretensões podem ocorrer devido a manobras no sistema de potência (SOARES et al., 2005).

#### 4.3.6 Outros defeitos

Entre outros defeitos que podem ocorrer, destacam-se problemas em um dos dispositivos do conjunto *carrier*, ou seja, a bobina de drenagem e dispositivo de proteção ou a chave de aterramento. Dependendo da duração de sobretensões originadas no sistema, estes dispositivos podem se fundir, perdendo sua funcionalidade. Ligações danificadas como curtos-circuitos nas ligações, circuito aberto no transformador intermediário ou rompimento de fusíveis no secundário são também causas de problemas na unidade eletromagnética.

### 4.4 Sobrecarga, sobreaquecimento e cargas não lineares em TPCs

Nesta seção são abordados os efeitos da sobrecarga e do sobreaquecimento em TPCs. As consequências destes problemas, tais como a redução da tensão de saída e a perda de exatidão destas

unidades serão analisadas. São descritos também os cuidados que devem ser tomados quando se utilizam cargas não lineares ou saturáveis nestes equipamentos e os problemas que estas cargas podem ocasionar no sistema de proteção.

#### 4.4.1 Efeitos da sobrecarga e do sobreaquecimento

Quando a carga nominal do equipamento é ultrapassada, os erros estabelecidos pela classe de exatidão sofrem alterações além dos limites estabelecidos. Isto é inaceitável para TPCs destinados a serviços de medição, porém não é tão grave para serviços de proteção.

A possibilidade de sobreaquecimento devido a um curto-circuito nos terminais secundários do dispositivo poderá exceder a carga térmica nominal do equipamento. Caso isto ocorra o *gap* acionará e permanecendo fechado até que cesse curto-circuito. Isto pode não danificar o equipamento, mas eventualmente este dispositivo (*gap*) perderá sua função de proteção (TRENCH, 2000). Este dispositivo de proteção mesmo estando corretamente ajustado, poderá atuar por chaveamentos no sistema ou descargas atmosféricas, porém a duração é tão curta que não terá interferência no sistema de proteção.

Os materiais da isolação são deteriorados pela combinação do sobreaquecimento com a exposição à umidade, ao oxigênio no ar e à radiação ultra-violeta em circunstâncias ao ar livre (ABB, 2004). Outro fator que pode danificar os transformadores para instrumentos são os efeitos das harmônicas. As harmônicas são eventos indesejados em sistemas de distribuição e transmissão de energia, podendo causar aquecimento excessivo e danos às conexões e cabos, além de poder saturar os transformadores para instrumentos (ABB, 2005). As harmônicas podem também causar falsos disparos no sistema de proteção ou mau funcionamento nos equipamentos, além de falsas leituras pelos CTs e de VTs que alimentam relés sensíveis.

#### 4.4.2 Cargas não-lineares

Uma carga não-linear é uma carga cuja impedância decresce devido à saturação magnética quando a tensão é aumentada (MASON, 1956). Deve-se evitar a utilização de cargas não-lineares (magnéticas) em TPCs, pois estas produzem harmônicas na tensão e corrente de saída do equipamento alterando a fase e amplitude destes sinais. Nestes casos pode ocorrer aumento da tensão nos terminais dos *gaps* de proteção. Durante condições de sobretensão momentânea, uma carga não-linear pode causar *flashover* no *gap*, interferindo na operação dos relés de proteção.

As cargas com circuito magnético de laços fechados, como transformadores de potencial auxiliar, podem não ter características lineares dentro de sua faixa de tensão nominal de operação. Caso estes dispositivos sejam conectados nos secundários, estes devem operar em valor não superior à metade da densidade de fluxo necessária para atingir o ponto de joelho da curva de magnetização (TRENCH, 2000). Por exemplo, é desejável utilizar um transformador de potencial auxiliar de 230 volts em um circuito de 115 volts ao invés de um com tensão nominal de 115 volts. Esta mesma precaução deve ser tomada quanto às bobinas dos relés.

## 4.5 Conseqüências dos defeitos em TPCs

Os defeitos em transformadores de potencial capacitivos podem afetar o desempenho do sistema de proteção e também fornecer informações incorretas para os equipamentos de faturamento de energia elétrica.

### 4.5.1 Conseqüências nos sistemas de proteção

Em sistemas de proteção uma das causas de problemas ocorridos em TPCs, é devido a manobras de chaves seccionadoras, que ao energizar ou desenergizar barramentos, causam sobretensões nos circuitos secundários do TPC.

Entre os problemas ocasionados por manobras em subestações associadas às não-linearidades do sistema, destaca-se a ferro-ressonância (descrita no capítulo 3), iniciada na fase de transitórios eletromagnéticos envolvendo transformadores para instrumentos e de potência. Entre as conseqüências mais graves ocasionadas pelo fenômeno da ferro-ressonância em TPCs destacam-se (SOARES et al., 2005):

- Atuação indevida de proteção de sobretensão desligando linhas de transmissão e outros equipamentos de alta tensão ou inserindo reatores, por indicações indevidas do TPC. Um exemplo desta situação que sensibiliza os relés 59 (sobretensão) é a ferro-ressonância originada no circuito secundário do TPC por transitórios associados à manobra de chave seccionadora de alta tensão;
- Variação súbita na impedância equivalente da carga do TPC, ou curto-circuito secundário, pode excitar ferro-ressonância provocando atuação do relé conectado no enrolamento secundário de proteção;
- Dispositivos protetores danificados em TPCs tais como capacitores de surto e supressores de ferro-ressonância, podem ocasionar durante chaveamentos rotineiros na rede, sobretensões ferro-ressonantes e sobrecorrentes que podem levar à ruptura de fusíveis, e também sobretensões de alta frequência nos secundários dos TPCs. As conseqüências são desligamentos indevidos, por relé de sobretensão (59) ou pela sensibilização do relé de distância da linha de transmissão (21) por falta de potencial no caso de ruptura de fusível e danos por efeitos dielétricos e térmicos em relés e transdutores.

Tais problemas ocorrem com maior frequência após muitos anos de serviço do equipamento, principalmente onde a frequência de manobras é alta (MORAES; SILVA, 1999).

Em alguns casos a tensão ferro-ressonante apresenta modulação sub-harmônica sustentada, levando a danos provocados principalmente por aquecimento. Entre os danos encontrados destacam-se: queima de TPs auxiliares, relés, voltímetros, rompimento de fusíveis, queima de cartões em painéis anunciadores, ruídos CC (corrente contínua), sinalizações falsas e danos no equipamento de supressão de ferro-ressonância (SOARES et al., 2005).

### 4.5.2 Conseqüências em sistemas de medição e faturamento de energia

Os TPCs destinados à medição de faturamento necessitam manter a classe de exatidão ao longo de sua vida útil para garantir não só o controle dos processos de contabilização de energia no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, como também a apuração das demandas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

Mudanças no valor da capacitância do TPC ou defeitos em sua unidade eletromagnética como alterações no reator de compensação devido à atuação em seu dispositivo de proteção (*gap*) podem alterar a exatidão do equipamento comprometendo a medição para faturamento de energia elétrica.

Alguns esforços foram realizados a fim de analisar o comportamento do TPC ao longo do tempo. Na Suécia por exemplo, foi realizado um programa de calibração em campo iniciado em 1989 conforme BERGMAN (1996), envolvendo 549 transformadores de potencial capacitivos. O transformador de referência utilizado foi do tipo indutivo multi-relação de alta exatidão, com isolamento apropriado para linhas de 400 kV. Este transformador indutivo foi utilizado para estudos da exatidão de TPCs, tendo sido transportado cuidadosamente antes de ser conectado ao barramento de alta tensão. O estudo do comportamento deste equipamento ao longo do tempo permitiu concluir que TPCs com classe de exatidão 0,5 e 0,6 deveriam ser calibrados em intervalos de 7 anos e os equipamentos com classe de exatidão 0,2 em intervalos de 20 anos.

## 4.6 Ensaios elétricos para medir a capacitância e o fator de dissipação em cada unidade capacitiva

As perdas ocorridas em materiais dielétricos corresponde à energia dissipada pelo sistema de isolamento quando uma tensão alternada é aplicada (CHU; LUX, 2000). Um dielétrico em boas condições possui baixas perdas. O envelhecimento ou anomalias no equipamento podem aumentar o fator de dissipação (FD) ou tangente  $\delta$ . Estes conceitos podem ser interpretados a partir da Figura 4.4. Quando uma tensão alternada é aplicada sobre o sistema de isolamento, a corrente de dispersão que flui através do isolamento possui duas componentes, uma resistiva ( $I_R$ ) e outra capacitiva ( $I_C$ ) resultando em uma corrente total ( $I_T$ ) fluindo através do isolamento. O fator de potência é dado pela equação 4.1, e o fator de dissipação ( $FD$ ), também conhecido por tangente  $\delta$  é obtido pela equação 4.2.

$$\cos(\theta) = \frac{I_R}{I_T} \quad (4.1)$$

$$\tan(\delta) = \frac{I_R}{I_C} \quad (4.2)$$

Contaminações no isolamento ou danos físicos causados pelo ação do campo elétrico ou danos externos podem afetar o nível de perdas (CHU; LUX, 2000).

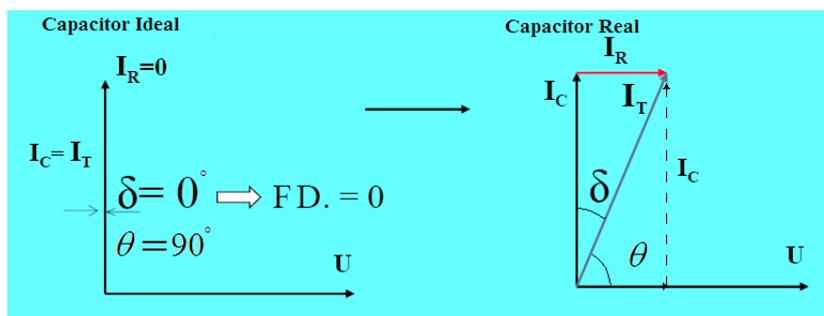


Figura 4.4: Representação das correntes no dielétrico

A Figura 4.5 ilustra o circuito equivalente de um capacitor real, que pode ser modelado como um capacitor ideal em paralelo com um resistor. Em um capacitor ideal não existe corrente fluindo através do mesmo ao contrário de um capacitor real onde existe uma pequena corrente fluindo entre seus terminais. A corrente  $I_R$  ilustrada nesta figura, é responsável por gerar aquecimento ou perdas no dielétrico (  $\text{Perdas} = I_R \times U$  [W] ).

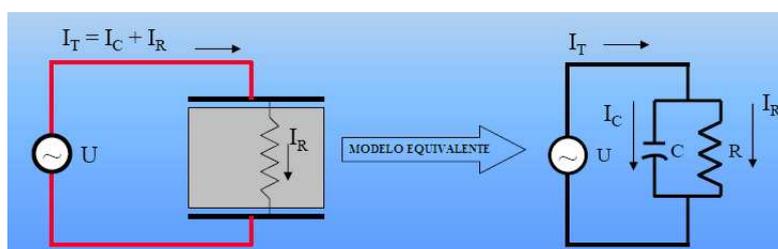


Figura 4.5: Circuito equivalente de um capacitor real

Outro fator, já citado na seção 4.2.1.1, são as descargas parciais que também contribuem para alterações no isolamento, liberando gases que aumentam a pressão dentro da coluna capacitiva saturando o óleo e até mesmo causando explosões no equipamento.

Entre os ensaios de tipo e de rotina aplicados em TPCs enumerados no Capítulo 2, a medição do valor de capacitância e de perdas (tangente delta) em cada módulo, são os testes mais confiáveis para se verificar o estado do dielétrico do capacitor.

Se os valores medidos são maiores que os informados na placa de características técnicas do TPC, é sinal de umidade ou contaminação do óleo por descargas no dielétrico. Um aumento no valor de tangente delta (fator de dissipação) durante duas ou três inspeções periódicas consecutivas, indica claramente que o capacitor está se deteriorando (AREVA, 2003).

Para uma análise mais precisa é necessário a utilização de equipamentos com erro de medição de capacitância inferior a 0,5%, a fim de detectar possíveis falhas em elementos capacitivos. Isto pode ser alcançado por meio do uso de uma Ponte de Capacitância de Baixa Tensão que será descrita no item 4.6.1. É importante também que todas as medições de capacitância sejam corrigidas para

uma temperatura de referência e que antes de realizar os ensaios em Alta Tensão sejam seguidos os procedimentos descritos no item 4.6.3.

#### 4.6.1 Testando com ponte de capacitância

As medições são realizadas à tensão normal de operação (TRENCH, 2000). As unidades superiores são medidas conectando-se a fiação de teste diretamente aos anéis de interligação. A presença do transformador intermediário conectado ao ponto de *tap* na unidade inferior, requer especial consideração. Referindo-se ao diagrama de conexão da Figura 4.6 e a caixa de terminal de baixa tensão, o seguinte procedimento deve ser adotado (TRENCH, 2000):

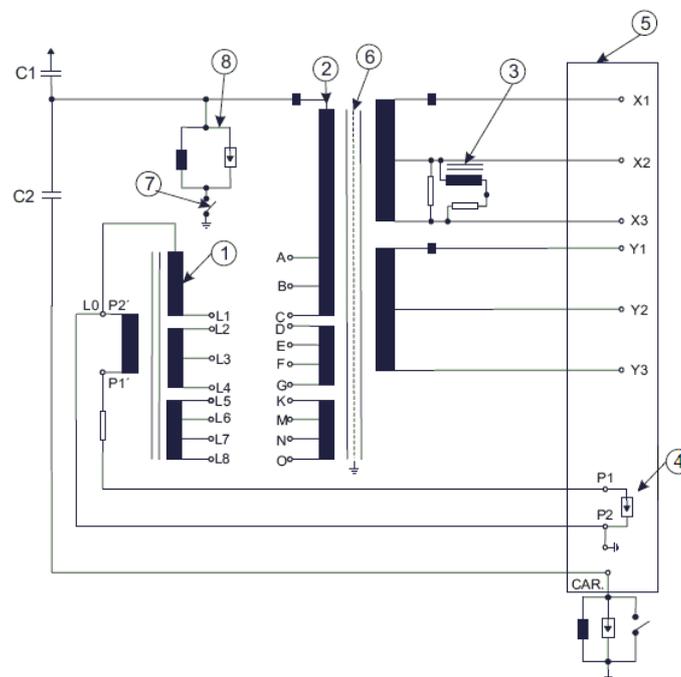


Figura 4.6: Diagrama esquemático do TPC

- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 1. Reator de Compensação                  | 5. Régua Terminal Secundária         |
| 2. Transformador de Tensão Intermediária  | 6. Campo de Faraday                  |
| 3. Filtro de Supressão de Harmônicas      | 7. Chave de Aterramento de Potencial |
| 4. $P_1$ - $P_2$ , Gap de Proteção Selado | 8. Bobina de Choque e Conjunto Gap   |

1. Fechar a chave de aterramento de *tap* de tensão e medir o valor da capacitância  $C_1$ , (Terminal de A.T. para a caixa de base com a chave de aterramento fechada). Comparar o valor medido com o registrado na placa de identificação principal ou com os dados obtidos em testes anteriores.
2. Com a chave de aterramento permanecendo fechada, medir o valor da capacitância  $C_2$ . Remover a conexão de terra no terminal *CAR* e medir  $C_2$  entre este terminal e a caixa de base do TPI. Comparar o valor medido com o valor de  $C_2$  registrado na placa de identificação principal ou com dados anteriores.

3. Medir a capacitância total  $C$ , a partir do terminal de A.T. para o terminal  $CAR$  com a chave de terra aberta e os elos de aterramento removidos dos terminais  $P_2$  e  $CAR$ . Dependendo do tipo de ponte utilizada, pode haver dificuldades na obtenção de equilíbrio para  $FD$ , uma vez que as correntes de fuga através do isolamento dos enrolamentos do transformador podem ocasionar leituras aparentes de  $FD$  abaixo do valor verdadeiro, ou mesmo valores negativos. Embora o valor de capacitância esteja correto, a alteração na medição de  $C$  total de um teste de rotina para outro, será um indicador para que investigações adicionais sejam conduzidas.

#### 4.6.2 Medições de capacitância e fator de dissipação

O ensaio de  $\tan(\delta)$  é geralmente realizado em fábrica de forma a verificar o fator de perdas da coluna capacitiva (AREVA, 2003).

Os procedimentos para medições de capacitância e fator de dissipação descritos a seguir, são instruções de operação de acordo com o fabricante de TPCs TRENCH utilizando equipamentos *Doble* e *Tektronic*. Antes da realização destes testes devem ser tomadas as precauções conforme indica o item 4.6.3.

#### 4.6.3 Precauções para testes de alta tensão

Os métodos de testes de A.T. empregados em TPCs deverão ser realizados tomando as seguintes precauções (TRENCH, 2000):

- Remover a conexão de terra do *carrier* durante o teste de fator de dissipação e capacitância;
- Aterrar solidamente a caixa de base do equipamento teste;
- Fechar a chave de aterramento do *tap* de tensão;
- Substituir a conexão do *carrier* imediatamente após o teste, antes da energização;
- Não energizar o terminal de A.T. acima da tensão nominal fase-terra da unidade. Os terminais  $P_2$  e  $P_1$  são conectados ao ponto de *tap* entre  $C_1$  e  $C_2$ , através do circuito intermediário e a tensão do ponto de *tap* nelas aparecerá quando o elo de aterramento for removido de  $P_2$ , a menos que a chave de aterramento de tensão (conforme o esquema do equipamento) esteja fechada;
- A tensão normal de operação no ponto de *tap* é de aproximadamente de 5 kV a 15 kV dependendo do modelo do TPC. Recomenda-se que medições de capacitância sejam tomadas às tensões abaixo da nominal da unidade, de tal forma que a tensão que aparece nos terminais  $P_1$  e  $P_2$  durante a medição, será proporcionalmente reduzida;
- Cuidado extremo deve ser tomado para assegurar que as conexões ao terminal  $CAR$  encontrem-se distantes o suficiente dos terminais  $P_1$  e  $P_2$ , considerando-se a alta tensão que lá aparecerá.

- As medições deverão ser tomadas somente por pessoa qualificada, que entenda plenamente o circuito em questão;
- A tensão máxima de teste nos terminais  $P_1$  e  $P_2$  e CAR com relação à terra não deverá exceder 2 kV.

Os métodos e esquemas de ligação dos ensaios para medições de capacitância e fator de dissipação para TPCs que possuem 1 ou 2 unidades capacitivas, encontram-se ilustrados nas figuras 4.7 a 4.11.

Antes de se realizar os ensaios, o terminal de A.T. deve ser desconectado do barramento de A.T. para se obterem medições mais exatas (TRENCH, 2000).

#### 4.6.4 Procedimentos dos testes em TPCs com 1 unidade capacitiva

Esquemas de ligação e procedimentos para medições de capacitância e fator de dissipação em TPCs com 1 unidade capacitiva:

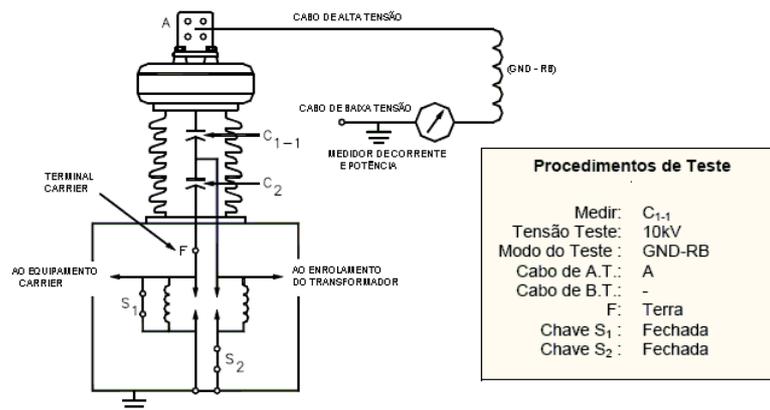


Figura 4.7: Teste 1 - Medição de  $C_{1-1}$  (TPC com uma seção capacitiva) (TRENCH, 2000)

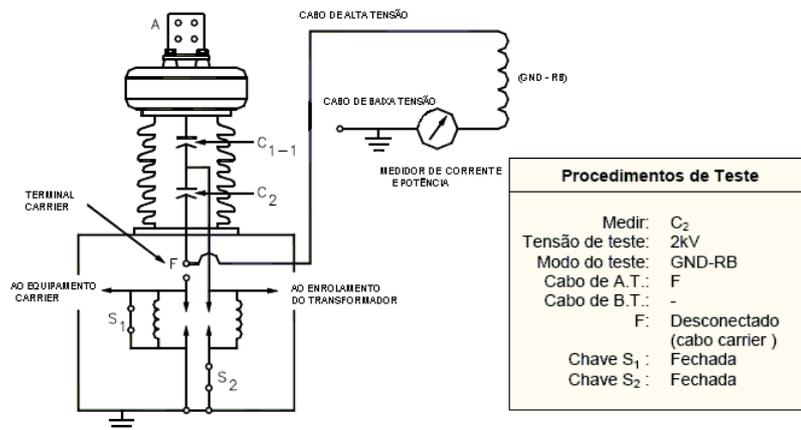


Figura 4.8: Teste 2 - Medição de C<sub>2</sub> (TPC com uma seção capacitiva) (TRENCH, 2000)

#### 4.6.5 Procedimentos dos testes em TPCs com 2 unidades capacitivas

Esquemas de ligação e procedimentos para medições de capacitância e fator de dissipação em TPCs com 2 unidades capacitivas:

O primeiro teste é realizado para a medição da capacitância C<sub>1-1</sub> conforme a Figura 4.9.

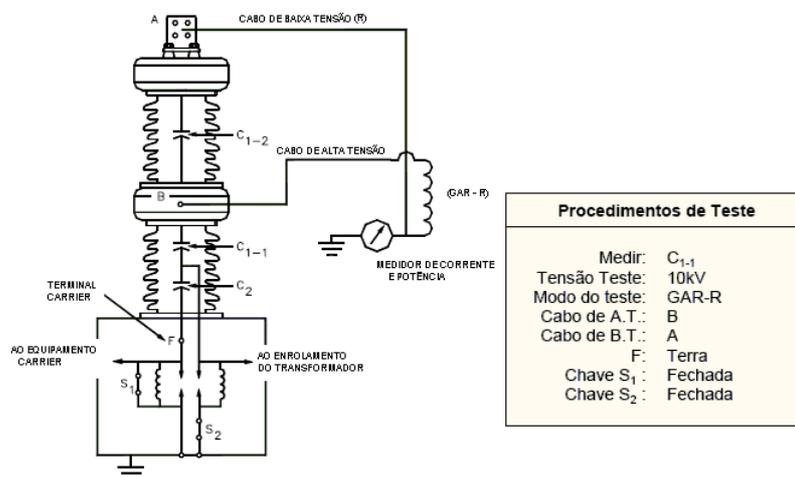


Figura 4.9: Teste 1 - Medição de C<sub>1-1</sub> (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000)

O segundo e último teste é realizado para a medição das capacitâncias C<sub>1-2</sub> e C<sub>2</sub> conforme ilustram as Figuras 4.10 e 4.11 respectivamente.

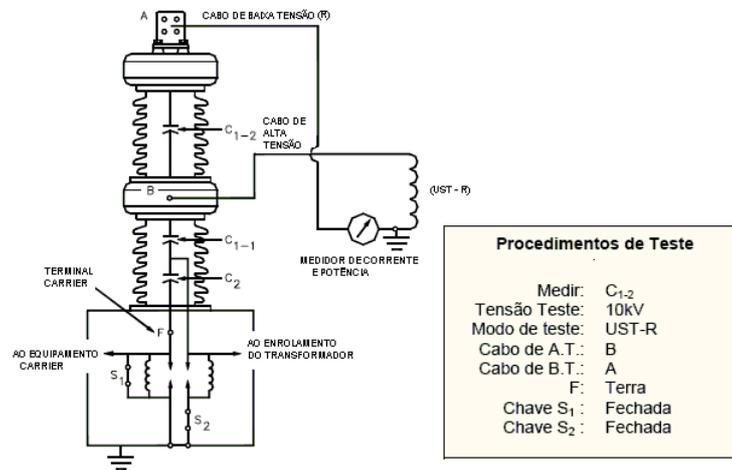


Figura 4.10: Teste 2 - Medição de C<sub>1-2</sub> (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000)

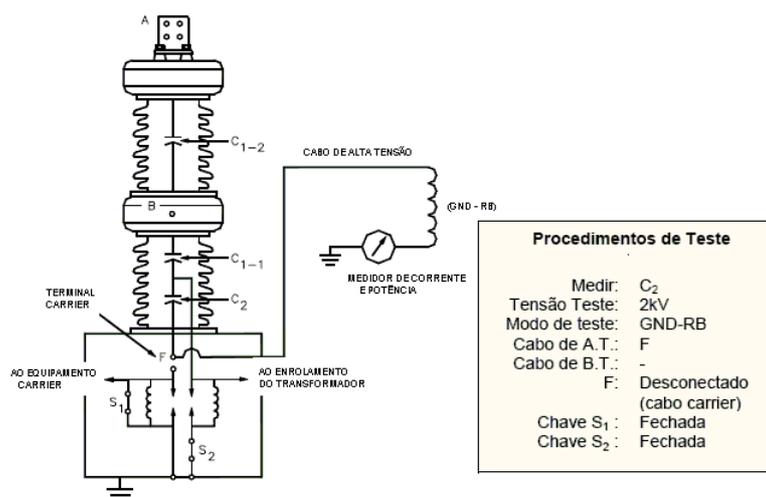


Figura 4.11: Teste 3 - Medição de C<sub>2</sub> (TPC com duas seções capacitivas) (TRENCH, 2000)

## 4.7 Análise da frequência de alguns defeitos em TPCs

Nesta seção são relacionados os defeitos mais comuns encontrados em TPCs. Os principais defeitos em TPCs foram obtidos através de entrevistas com especialistas da ELETROSUL durante o projeto de P&D da ELETROSUL intitulado: Sistema de Análise e Diagnóstico para a Central de Monitoramento de Equipamentos da ELETROSUL.

A análise de frequência destes defeitos foi feita através de levantamento de pedidos de serviços no banco de dados da ELETROSUL em um período de 10 anos (ROLIM et al., 2004b). O gráfico da Figura 4.12 mostra a frequência dos sintomas das falhas das principais ocorrências encontradas no banco de dados.

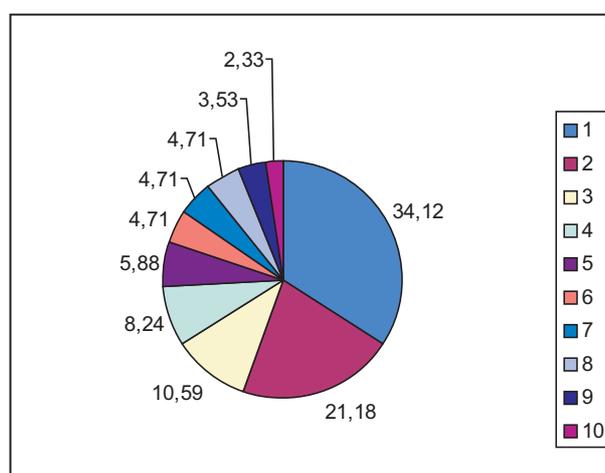


Figura 4.12: frequência dos sintomas das falhas em TPCs (ROLIM, 2004)

Onde:

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Vazamento do óleo isolante       | 6. Alto nível de perda no dielétrico |
| 2. Alto fator de potência           | 7. Indicação de óleo inadequada      |
| 3. Corrosão da estrutura            | 8. Explosão de equipamentos próximos |
| 4. Erro na relação de transformação | 9. Porcelana rachada ou quebrada     |
| 5. Baixa tensão de interface        | 10. Explosão do próprio equipamento  |

## 4.8 Conclusões

Neste capítulo foram descritos os principais defeitos encontrados em TPCs que foram divididos entre duas unidades: unidade eletromagnética e o divisor capacitivo. Alguns dos sintomas destes defeitos foram mencionados bem como os problemas que os erros na informação fornecida no secundário do TPC aos dispositivos de proteção e medição podem ocasionar, tais como desligamentos desnecessários, ou erros inaceitáveis na medição com fins de monitoramento ou de faturamento.

No próximo capítulo estes defeitos servirão de base para análise da técnica que será empregada para detecção dos mesmos. Serão estipulados através de simulações, os níveis de tensão de sequência zero gerados a partir de cada tipo de defeito onde estes serão utilizados na construção da ferramenta de monitoramento e diagnóstico de TPCs como um meio de detectar problemas no equipamento.

## Capítulo 5

# Sistema para Monitoramento e Diagnóstico de TPCs

### 5.1 Introdução

Neste capítulo é descrito um sistema que visa auxiliar as equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica, possibilitando a detecção de defeitos e anomalias em transformadores de potencial capacitivo instalados nas subestações.

O objetivo principal deste sistema é fornecer à equipe de manutenção informações sobre o estado dos TPCs. A detecção de possíveis defeitos é feita através da comparação entre as componentes de tensão de sequência zero secundárias de cada conjunto trifásico destes equipamentos com limiares que foram estabelecidos através de estudos.

Neste sistema de monitoramento os limiares de tensão de sequência zero devem ser determinados considerando a possibilidade de uma pequena componente de tensão de sequência zero resultante de erros provenientes das classes de exatidão dos equipamentos empregados e de outros fatores citados na seção 5.3.2.2. Assim, com estes limiares o sistema será capaz de discriminar situações de desbalanceamentos ou outras eventualidades na rede dos defeitos nestes equipamentos.

Serão descritas as etapas da metodologia utilizada pelo sistema de monitoramento proposto, começando pelo filtro de *Fourier*, responsável pelo cálculo dos fasores de tensão de frequência fundamental provenientes do secundário dos TPCs, os quais serão utilizados para o cálculo da componente de tensão de sequência zero.

Os módulos da rotina computacional da ferramenta de diagnóstico de TPCs são apresentados, assim como simulações dos principais defeitos encontrados em TPCs. Estas simulações foram realizadas utilizando o *software* PSCAD (PSCAD/EMTDC, 2005), observando como a evolução de cada defeito afeta a tensão de sequência zero. As etapas do sistema de monitoramento como aquisição, tratamento e processamento dos sinais de saída de cada unidade também são descritas.

## 5.2 Descrição do sistema de aquisição e tratamento dos sinais de saída dos TPCs

Os TPCs que serão monitorados pela ferramenta proposta possuem classe de exatidão 0,3% nos enrolamentos de medição. O nível de tensão nominal destes enrolamentos é de 115 V com um tap intermediário de 66,4 V que será utilizado para aquisição dos sinais de tensão.

A Figura 5.1 mostra a arquitetura do sistema de monitoramento proposto, identificando os blocos das etapas envolvidas.

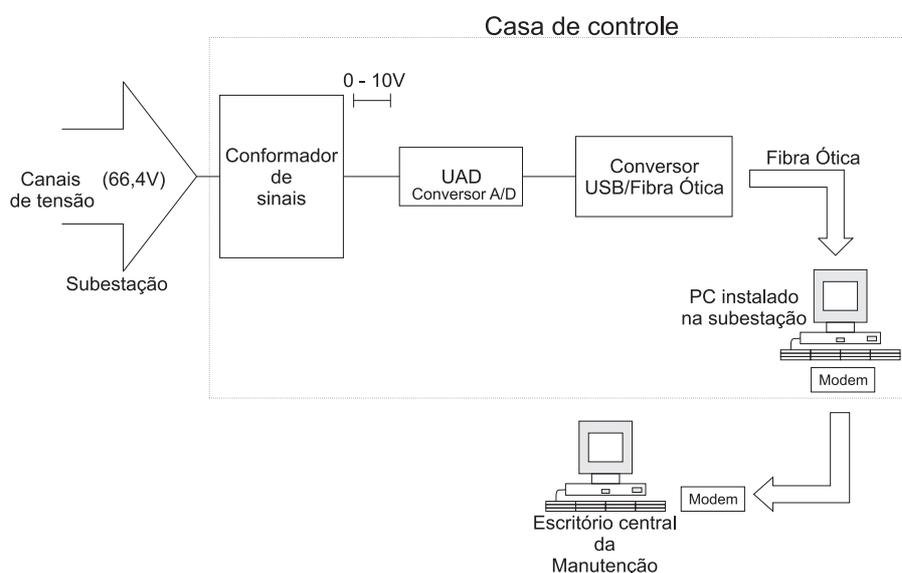


Figura 5.1: Arquitetura do Sistema de Monitoramento

Descrição dos blocos da Figura 5.1 é apresentada a seguir:

- **Conformador de sinais:**

O conformador de sinais tem por finalidade adequar os níveis de tensão da saída dos TPCs que são da ordem de 66,4 V para níveis compatíveis com as entradas da unidade de aquisição de dados ( $\pm 10$  V). Os conformadores de sinais são constituídos de pequenos transformadores de potencial que além de reduzir os níveis de tensão de entrada, isolam galvanicamente a unidade de aquisição de dados dos sinais vindos da subestação.

- **Unidade de aquisição de dados (UAD):**

As grandezas são medidas continuamente, aquisitadas e digitalizadas pela unidade de aquisição de dados (UAD) instalada na sala de controle da subestação. Posteriormente os dados são enviados via USB (*Universal Serial Bus*) para o conversor USB-fibra óptica.

- **Conversor USB-Fibra Ótica:**

Após os sinais serem digitalizados pela UAD, a etapa seguinte consiste em utilizar um conversor que transforma os sinais da porta de saída *USB* em sinais ópticos. O conversor terá uma saída com conector *SC* multi-modo para fibra óptica que interligará a UAD até a estação de análise da subestação (PC instalado na subestação). O objetivo deste equipamento é garantir que os sinais fiquem imunes a ruídos e também, proteger o restante dos equipamentos envolvidos contra transitórios prejudiciais.

Os dados adquiridos são memorizados temporariamente pela UAD por um período de aproximadamente 3 segundos, em seguida são transferidos para o sistema de supervisão e análise instalado no PC da subestação conforme a Figura 5.1.

Os dados são processados em tempo real pelo sistema de supervisão de maneira sistemática em um banco de dados. Caso a estação local (PC instalado na subestação) detecte que os limiares de tensão de seqüência zero estabelecidos sejam ultrapassados, os valores amostrados de todas as tensões provenientes da UAD serão salvos e posteriormente transferidos para estação remota. Na estação remota será realizada uma análise complementar de forma *off-line* onde será feita a comparação entre as tensões de seqüência zero resultantes dos conjuntos trifásicos de TPCs com limiares estabelecidos. Caso seja detectado algum defeito nestes equipamentos o sistema identificará qual unidade possui problema(s) acionando os alarmes necessários. Se os limiares não forem atingidos, os dados serão descartados após atingir a capacidade de armazenamento da UAD (aproximadamente 3 segundos) para uma nova aquisição dos sinais.

As informações dos TPCs poderão ser acessadas remotamente fornecendo informações de tendências ou evoluções de falhas evitando assim maiores danos e falhas catastróficas nestes equipamentos. O sistema de monitoramento permitirá a visualização dos níveis de tensão fasoriais de cada TPC informando data e hora das ocorrências dos alarmes. Estas informações estarão disponíveis para serem utilizadas no diagnóstico dos TPCs e no planejamento da manutenção.

### 5.3 Descrição da metodologia proposta

A fim de avaliar as conseqüências dos diferentes defeitos que podem ocorrer em TPCs nos níveis de tensão de seqüência zero, foram realizadas simulações utilizando o *software* PSCAD (PSCAD/EMTDC, 2005). Através dos níveis de tensão de seqüência zero obtidos pelas simulações, é possível avaliar que tipo de defeito e a partir de qual intensidade esta ferramenta será capaz de detectar.

Com a obtenção das três tensões provenientes do secundário dos TPCs, o processamento das componentes de tensão de seqüência zero é realizado. O bloco utilizado neste *software* para obter os fasores das tensões na freqüência fundamental e que possibilitou o processamento das componentes simétricas de tensão foi o *On-Line Frequency Scanning - Fast Fourier Transformer*.

O processamento dos sinais de tensão é baseado na técnica de *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*, a fim de determinar a magnitude e a fase da tensão de harmônica fundamental. A Figura 5.2

mostra a implementação do circuito utilizado para realizar as simulações. Na seção 5.3.1 será apresentado o filtro de *Fourier*, utilizado no sistema de monitoramento proposto para estimar os fasores de tensão na frequência fundamental.

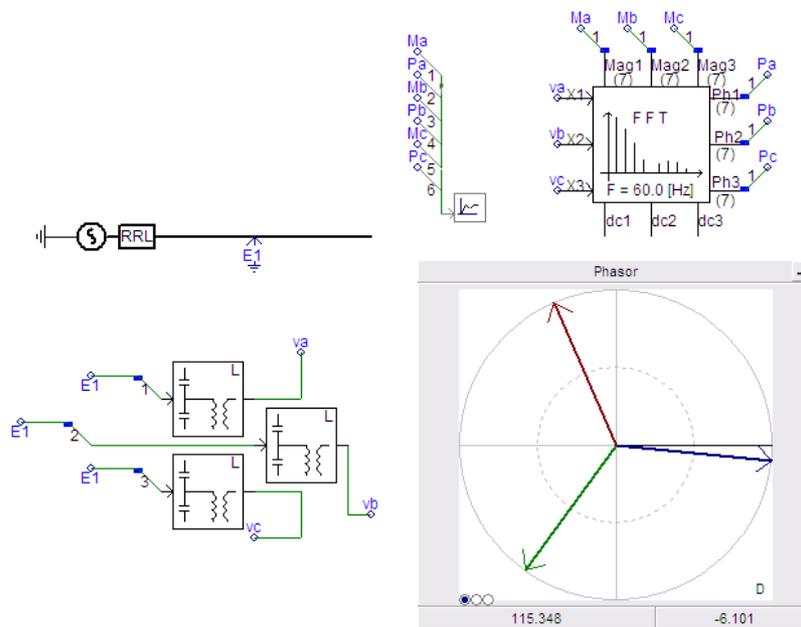


Figura 5.2: Implementação do circuito no *software* PSCAD

### 5.3.1 Filtro de Fourier

A Transformada de *Fourier* é um dos métodos mais utilizados para estimação espectral em sinais elétricos. Isso acontece devido à sua simplicidade e aos bons resultados apresentados (MIRANDA et al., 2005). Neste trabalho a Transformada de *Fourier* é utilizada para realizar os cálculos dos fasores de tensão a partir do filtro de *Fourier*.

Este filtro é baseado na Transformada Discreta de *Fourier* - *DFT*, a qual produz um espectro discreto em frequência, ou seja, uma representação consistindo de raias espectrais, cada uma indicando a intensidade do espectro contínuo do sinal original, em um conjunto discreto de frequências, onde devem estar incluídas a componente fundamental e suas harmônicas. Entretanto, isto somente acontece quando a quantidade de amostras ( $N$ ), utilizadas no cálculo, corresponde exatamente a um múltiplo inteiro do período da fundamental ( $N = i * f_s / 60$ , onde  $i$  é um número inteiro e  $f_s$  a frequência de amostragem). Quando isto não ocorre, a energia da componente fundamental se espalha pelo espectro, como se houvesse um vazamento da energia desse componente, o qual este fenômeno é chamado de *vazamento espectral* (MIRANDA, 2005).

Para reduzir o problema do vazamento espectral costuma-se multiplicar o sinal por funções no tempo (chamadas usualmente de janelas). O objetivo da utilização das janelas está relacionado com a interpretação no tempo do fenômeno de vazamento espectral (MIRANDA et al., 2005).

Abaixo são descritas as equações de algoritmos clássicos de filtro de *Fourier* que utilizam janela de um ciclo e meio ciclo (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996).

Filtro de *Fourier* de um ciclo:

$$V^k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(n) \cdot \left[ \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}\right) + j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}\right) \right] \quad (5.1)$$

Filtro de *Fourier* de meio ciclo:

$$V^k = \frac{4}{N} \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} v(n) \cdot \left[ \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}\right) + j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}\right) \right] \quad (5.2)$$

Onde:

$V^k$ : Fator estimado da harmônica de ordem  $k$ ;

$v$ : Sinal amostrado;

$N$ : Número de amostras por ciclo;

$n$ : Número da amostra;  $k$ : Ordem da harmônica considerada ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );

Para aplicação do sistema de monitoramento a componente harmônica de interesse é a fundamental (60 Hz), portanto, adota-se  $k=1$ . O cálculo dos valores de módulo e ângulo dos fasores é realizado a partir do deslocamento da janela contendo  $N$  amostras do sinal da rede.

A Figura 5.3 mostra o deslocamento das janelas retangulares ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) realizado pelo processo matemático do filtro de *Fourier* de um ciclo. O cálculo do primeiro fator é realizado utilizando a soma de todas as amostras da primeira janela, e do segundo fator, pela soma das amostras da segunda janela, e assim sucessivamente até que todas as amostras sejam computadas de acordo com as equações 5.1 e 5.2.

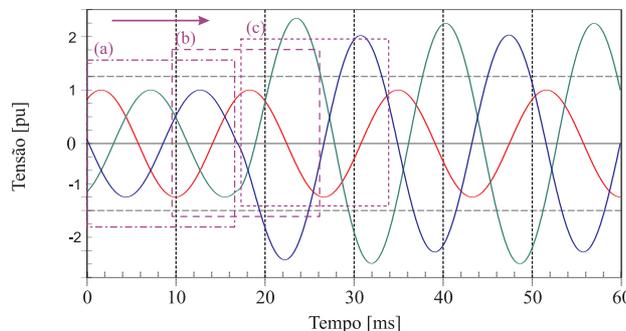


Figura 5.3: Varredura das janelas utilizando Filtro de *Fourier* de 1 ciclo (MORETO, 2005)

O filtro de *Fourier* com janela retangular de um ciclo é o normalmente utilizado para o cálculo dos fasores, devido ao bom compromisso entre o atraso do processamento e o resultado do cálculo fasorial.

O filtro de *Fourier* que utiliza janela de dois (ou mais) ciclos melhora o resultado do cálculo fasorial e são utilizados em aplicações que toleram um processamento mais lento do que o proporcionado pelo filtro de *Fourier* com janela de um ciclo.

O filtro de *Fourier* de meio ciclo é mais indicado quando é necessária uma resposta rápida, pois utiliza um número menor de amostras para realizar os cálculos dos fasores. Devido à aplicação de interesse ser para monitoramento em tempo real, os fasores de tensão serão obtidos utilizando o filtro de *Fourier* de meio ciclo, devido ao seu rápido processamento ( $N/2$  amostras do sinal da rede, resultando em 48 amostras por janela).

Após obter os fasores de tensão utilizando o filtro de *Fourier*, são realizados os cálculos da componente de tensão de seqüência zero ( $V_0$ ) com aplicação do teorema de *Fortescue* para cada conjunto de TPCs instalados nos barramentos principal (P) e de transferência (PT).

As componentes simétricas de tensão são calculadas com aplicação da equação de transformação 5.3, onde  $\mathbf{a} = 1 \angle 120^\circ$ .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} \\ \mathbf{V}_{a1} \\ \mathbf{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Desta equação conclui-se que a tensão de seqüência zero é dado pela equação 5.4:

$$\mathbf{V}_{a0} = \frac{1}{3} \cdot (\mathbf{V}_a + \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_c) \quad (5.4)$$

Os estudos e a avaliação das rotinas de cálculo dos fasores e das componentes simétricas utilizaram dados de registradores digitais de perturbações (RDP's) no formato COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*) devido ao sistema de monitoramento ainda não estar instalado na subestação onde será utilizado.

O programa implementado primeiramente lê as medidas de tensão dos TPCs em formato COMTRADE. Essas medidas ficam armazenados em vetores para facilitar os cálculos posteriores. Após os dados de interesse serem identificados, como os canais de tensão do barramento principal (BP) e de transferência (BT) da subestação, é realizado o armazenamento de todas as amostras que compõem estes sinais, a fim de analisar as curvas de oscilografia e efetuar o cálculo dos fasores das tensões de fase na freqüência fundamental.

Além desses dados, são obtidos os valores de freqüência da rede, freqüência de amostragem e número total de amostras de cada canal. Todos estes dados são importantes para o cálculo dos fasores utilizando o Filtro de *Fourier* o qual foi descrito na seção 5.3.1.

### 5.3.2 Limiares para detecção de defeitos

Os estudos adotados para estabelecer os limiares de tensão de seqüência zero também foram baseados em análises oscilográficas utilizando registros em formato COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*).

Estas análises possibilitam verificar os níveis considerados normais para a tensão de seqüência zero e avaliar os erros provenientes dos TPCs e do sistema de monitoramento para suas respectivas classes de exatidão. A seguir serão apresentados os conceitos básicos sobre o formato COMTRADE e de análise oscilográfica. Estes estudos serão úteis para determinação dos limiares desejados.

#### 5.3.2.1 Análise de oscilografias

A importância da oscilografia se aplica à medição de grandezas elétricas como tensão e corrente ao longo do tempo. Os tipos de oscilografias mais importantes em sistemas elétricos de potência são:

- Oscilografia de curta duração: é utilizada em análise de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão e em equipamentos elétricos. Geralmente este tipo de oscilografia utiliza um tempo de medição da ordem de alguns ciclos da freqüência fundamental do sistema até alguns segundos, com freqüências de amostragem na faixa de kHz. Os equipamentos mais utilizados são os RDPs (registradores digitais de perturbação), que armazenam os valores digitais. Outros equipamentos que utilizam este tipo de oscilografia são os relés digitais, bastante utilizados por empresas transmissoras de energia elétrica. Os registros possuem duração da ordem de dezenas de milisegundos até vários segundos, com período de amostragem na faixa de dezenas de microssegundos (MIRANDA, 2005).
- Oscilografia de longa duração: a oscilografia de longa duração é utilizada na análise de sistemas de grande porte, provocados por variações abruptas de geração ou de carga (MIRANDA, 2005). O tempo total de medição neste tipo de oscilografia pode ser de até vários minutos, com freqüências de amostragem de dezenas de milisegundos. Os equipamentos empregados são os medidores fasoriais e RDPs. Entre as principais grandezas medidas neste tipo de oscilografia estão a potência ativa e reativa e a variação na freqüência fundamental.

Neste trabalho foram utilizados dados de oscilografia de curta duração com objetivo de verificar os níveis das componentes de tensão de seqüência zero admissível no sistema de monitoramento de TPCs. As avaliações dos registros das grandezas de tensão foram realizadas através de arquivos de dados no formato COMTRADE (IEEE, 1999) padronizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*) para oscilografias digitais.

Este formato é utilizado em equipamentos de proteção como relés digitais e RDPs para armazenar as formas dos sinais como tensão e corrente, durante eventos no sistema. Sua aplicação em RDPs permite taxas de amostragem elevadas, geralmente 80, 96 e até 256 pontos por ciclo da freqüência

fundamental. Sua interpretação é realizada basicamente com a utilização de três arquivos distintos, são eles (IEEE, 1999):

- Arquivo de configuração (.CFG): O arquivo com extensão *.cfg*, trata da configuração necessária para o programa realizar a interpretação do arquivo de dados, fornecendo informações como taxas de amostragem, número de canais, frequência da linha e informações dos canais;
- Arquivo de dados (.DAT): O arquivo com extensão *.dat* é criado a partir de arquivos no formato ASCII ou Binário, utilizando programas conversores como o *EnerVista* da *General Electric Company* (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2007) e o *Análise* (REASON Tecnologia). Os arquivos no formato ASCII ou Binário contêm informações dos dados amostrados de cada canal separados em colunas, como número de amostras, tempo das amostras e os valores dos dados;
- Arquivo de informação (.INF): O arquivo com extensão *.inf* contém informações adicionais, sendo entretanto opcional.

Como os sinais armazenados pelos RDPs (formato COMTRADE) são fornecidos pelos transformadores de potencial capacitivo (TPCs), torna-se viável a determinação dos limiares de tensão de sequência zero desejados a partir dos registros oscilográficos disponíveis. Esta análise foi realizada apenas para períodos pré-falta devido ao sistema operar em regime permanente. As considerações relevantes para a determinação destes limiares são apresentados a seguir.

### 5.3.2.2 Determinação dos limiares de tensão de sequência zero

Um dos objetivos em se determinar os limiares de tensão de sequência zero, é devido a possibilidade de surgirem erros provenientes dos equipamentos de medição como os TPCs e RDPs e também pelo sistema não operar de maneira perfeitamente equilibrado. Na prática sempre existirá uma pequena componente de tensão de sequência zero no sistema de monitoramento das tensões secundárias dos TPCs, portanto o sistema deve possuir limiares para discriminar os defeitos nestes equipamentos dos erros de medição e variações de tensão normais no sistema de potência.

Em certos estudos, a exatidão dos sistemas de transformação de tensão, como é o caso dos TPCs, é baseada apenas nos erros clássicos do próprio equipamento em condições normais de operação. Contudo, para estabelecer os limiares para detecção de possíveis defeitos nos TPCs, deve-se considerar a influência de cada componente do conjunto (TPCs, circuitos primário e secundário, cabos, conexões, incompatibilidades eletromagnéticas e erros do RDP ou sistema de monitoramento).

Assim, a exatidão somente será efetiva se os componentes apresentarem fidelidade compatível com as especificações ou finalidades para as quais foram projetados. Na seção 5.3.2.3 é apresentada a análise dos erros mais comuns envolvidos com os equipamentos para medição das tensões de fase. Estes serão fundamentais para a determinação dos limiares de tensão de sequência zero que serão utilizados no sistema de monitoramento de TPCs ( $V_{0(limite)}$  e  $\Delta V_{0(limite)}$ ).

### 5.3.2.3 Análise dos erros

Os erros nos equipamentos de medição podem ocorrer tanto nos TPCs como também nos registradores digitais de perturbações (RDPs). Com relação a estes equipamentos podem ocorrer dois tipos de erros conforme citado na seção 2.4.1, são eles:

- Erro de Relação de Transformação:

Este tipo de erro pode ser inserido na medição de tensão através do TPC, onde a tensão secundária não corresponde exatamente a tensão no primário devido a relação de transformação do equipamento não ser ideal (perdas nos enrolamentos, no núcleo etc.), acrescentando um erro para mais ou para menos na tensão de saída (de  $\pm 0,3\%$  para classe de exatidão 0,3);

- Erro de Ângulo de Fase:

É o ângulo de defasagem que aparece entre a tensão vetorial primária e a tensão vetorial secundária do TPC. Em um TPC com classe de exatidão 0,3, o erro poderá variar de  $\pm 10$  minutos na fase entre as tensões secundária e primária.

Para determinar a incerteza na tensão secundária de sequência zero ( $V_{0(incerteza)}$ ), foram considerados os seguintes erros de relação e de fase dos TPCs e RDP (na frequência fundamental):

TPC:	RDP:
Erro de relação = 0,3%	Erro de relação $\leq 1\%$
Erro de fase = $\pm 10$ minutos	Erro de fase = $\pm 50 \mu$ segundos

Com estes dados, foram realizados cálculos através de combinações dos erros de relação e ângulo de fase dos TPCs e do RDP para se determinar o máximo valor de incerteza na tensão de sequência zero ( $V_{0(incerteza)}$ ). Constatou-se que o máximo valor calculado devido a estes erros ( $V_{0(incerteza)}$ ) foi de  $8,666 \times 10^{-3} pu$  no módulo de  $V_0$ .

Utilizando os arquivos dos registradores digitais de perturbações, foram avaliados os valores máximos de tensão de sequência zero ( $V_{0(max.medido)}$ ) e a máxima diferença destas tensões entre os conjuntos trifásicos de TPCs instalados no barramento principal (P) e de transferência (PT). Estas análises foram realizadas utilizando o *software Análise*, lembrando que os dois barramentos citados operam como um único nó elétrico no momento dos registros oscilográficos.

Na Figura 5.4 é apresentado o diagrama unifilar da subestação estudada com os respectivos barramentos: principal e de transferência do setor de 230 kV, onde os TPCs estão instalados.

Na Figura 5.5 são ilustrados alguns registros dos níveis de tensão de sequência zero ( $V_0$ ) nos barramentos de transferência (PT) e barramento principal (P), e a diferença de tensão ( $\Delta V_0$ ) entre estes utilizando o *software Análise*.

A equação 5.5 descreve a tensão de sequência zero máxima que pode ocorrer em cada conjunto trifásico de TPCs ( $V_{0(limite)}$ ) considerando os desvios nesta tensão ( $V_{0(incerteza)}$ ) devido aos erros nos



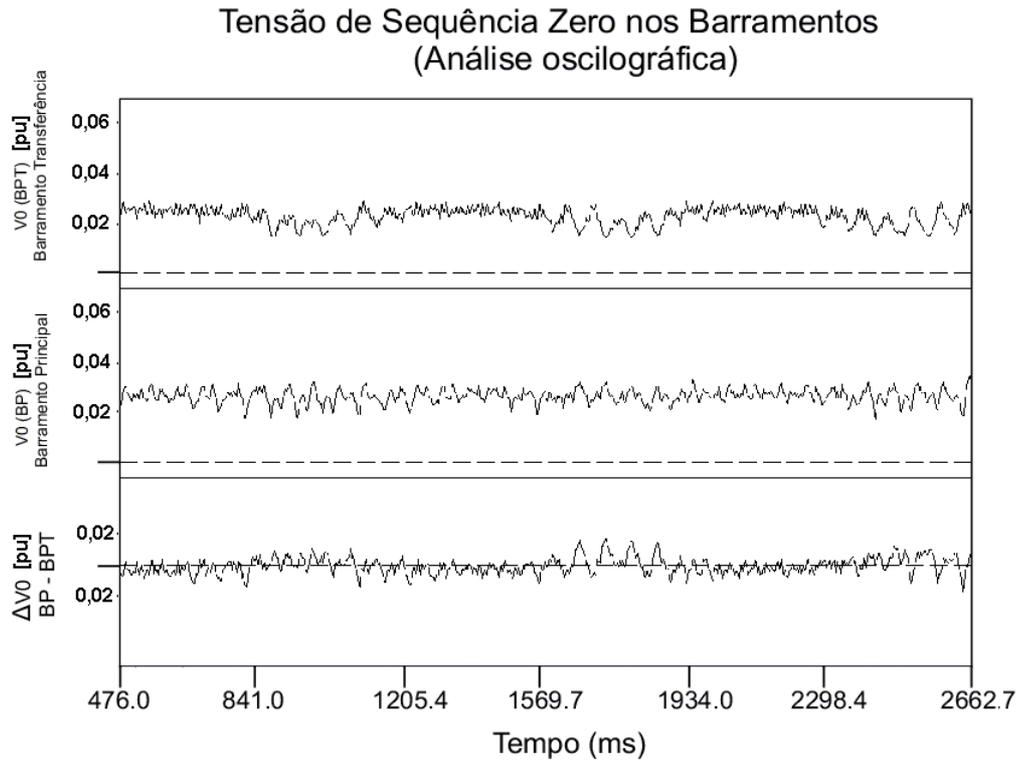


Figura 5.5: Níveis de tensão de sequência zero

equipamentos envolvidos na medição das tensões de fase. O valor limite da equação 5.5 é válido quando o sistema opera em regime permanente ou seja, na ausência de transitórios, e quando está operando de forma balanceada.

Caso o limite estipulado pela equação 5.5 seja ultrapassado por algum conjunto de TPCs, o sistema de monitoramento irá comparar este valor de tensão de sequência zero ( $V_0$ ) com outros vetores resultantes de outros conjuntos. Para isto, a equação 5.6 descreve o desvio máximo que pode ocorrer entre dois conjuntos de TPCs ( $\Delta V_{0(limite)}$ ), que garante que os equipamentos estão operando normalmente até este valor limite.

$$V_{0(limite)} = V_{0(max.medido)} \pm V_{0(incerteza)} \quad (5.5)$$

$$\Delta V_{0(limite)} = \pm 2 \cdot V_{0(incerteza)} \quad (5.6)$$

Através da análise de todas as oscilografias disponíveis e do valor das incertezas calculadas foram definidos os seguintes limiares a serem utilizados para o sistema de diagnóstico de TPCs:

$$V_{0(limite)}(pu) = 0,030$$

$$\Delta V_{0(limite)}(pu) = 0,020$$

Estes valores poderão ser revistos após alguns meses de implementação do sistema em uma subestação em operação a partir da experiência no uso da ferramenta. Na seção 5.3 será apresentado o

fluxograma do sistema de monitoramento e diagnóstico de TPCs onde estes limiares serão empregados.

### 5.3.3 Módulos de diagnóstico

Na Figura 5.6 é ilustrado o fluxograma do sistema de monitoramento utilizado para a implementação do *software* de análise dos TPCs. o sistema compara os valores de tensão ( $V_0$ ) com os limiares pré-estabelecidos ( $V_{0(limite)}$  e  $\Delta V_{0(limite)}$ ). Caso os dois limiares sejam ultrapassados e permaneçam nesta condição, o sistema detectará a(s) unidade(s) defeituosa(s) enviando ao centro de manutenção um alarme notificando o evento, sinalizando a evolução de defeitos, evitando que falhas catastróficas ocorram.

Em seguida a função de cada bloco é descrita.

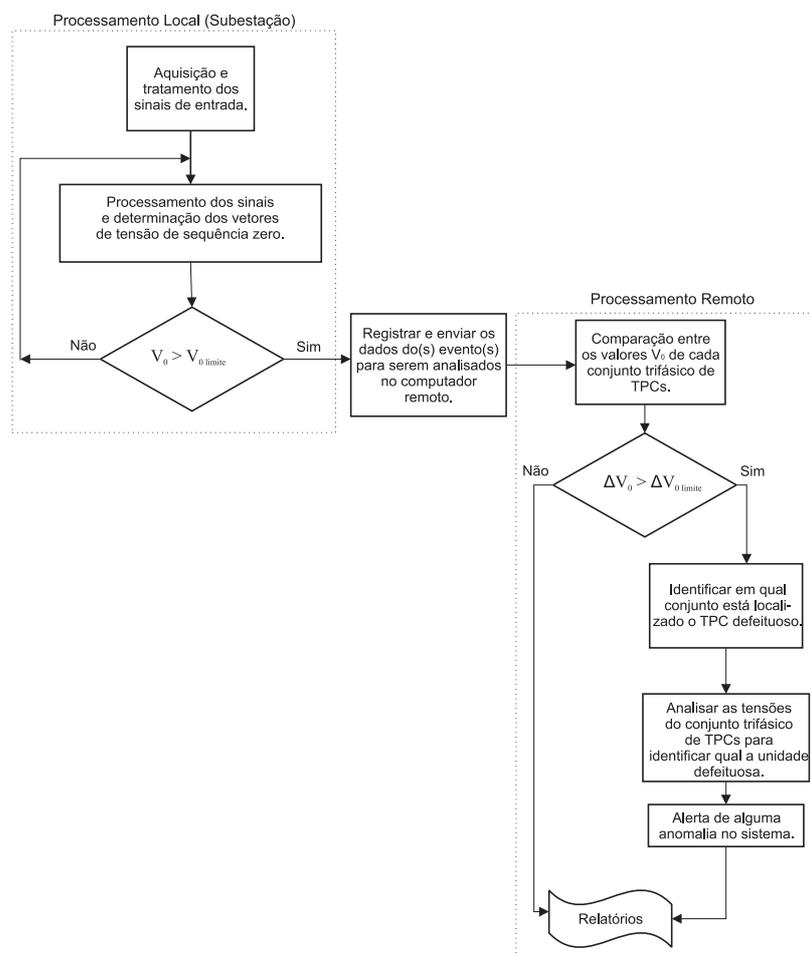


Figura 5.6: Fluxograma do sistema de monitoramento

Os módulos de diagnóstico utilizados pela ferramenta de monitoramento são apresentados pelo fluxograma na Figura 5.6. A partir deste fluxograma serão descritas as etapas de funcionamento das rotinas implementadas:

1. Primeiramente é realizada a aquisição e o tratamento dos sinais de tensão provenientes do circuito secundário dos TPCs instalados nas subestações;
2. Na segunda fase é realizado o processamento dos sinais. Nesta etapa é utilizado o filtro de *Fourier* para estimar os fasores de tensão dos canais dos TPCs. Através destes fasores são realizados os cálculos das componentes de tensão de seqüência zero ( $V_0$ ) resultantes em cada conjunto trifásico de TPCs;
3. Com o objetivo de obter redução no tempo de processamento dos sinais, é utilizado um primeiro bloco condicional. Em caso de alguma das tensões  $V_0$  ultrapassar o limiar de tensão  $V_{0limite}$  o processamento segue para o próxima etapa, em caso negativo ele retorna ao início.
4. Caso o primeiro bloco condicional detecte que alguma das tensões  $V_0$  ultrapasse o limiar  $V_{0limite}$ , o sistema irá então comparar a diferença de magnitude entre todos os vetores  $V_0$ . Caso alguma das diferenças entre estes vetores ultrapasse o limiar  $\Delta V_{0limite}$ , o sistema irá identificar em qual conjunto trifásico está localizado o TPC suspeito. Em seguida o sistema analisa as tensões de fase dos três TPCs e identifica qual é o TPC defeituoso, acionando o alarme. Esta etapa de processamento é realizada de forma *off-line*.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 5.6 algumas observações são descritas:

Caso o primeiro limiar ( $V_{0limite}$ ) não seja atingido, o primeiro bloco condicional evita que o sistema realize processamentos adicionais sem necessidade. Isto faz com que o sistema possua uma maior eficiência computacional deixando de armazenar dados desnecessários, economizando espaço de armazenamento no sistema.

Caso ocorra desbalanceamentos entre a geração e a carga, ou outros desbalanceamentos no sistema elétrico devido a faltas ou de outra natureza, o último bloco condicional (das diferenças das tensões  $V_0$ ,  $\Delta V_0$ ) garante uma maior confiabilidade do sistema, identificando e distinguindo se as tensões  $V_0$  que surgem são de origem de condições operacionais ou de defeitos no equipamento.

## 5.4 Simulações dos defeitos em TPCs

Como descrito anteriormente, as simulações dos defeitos que podem ocorrer em TPCs têm por objetivo avaliar o tipo e sua intensidade dos defeitos que a ferramenta de monitoramento proposta será capaz de detectar. Esta detecção é realizada através dos níveis de tensão de seqüência zero gerados pelos conjuntos trifásicos de TPCs. Na seção 3.6 é comentado o modelo utilizado (modelo básico) para realizar as simulações dos defeitos. O modelo básico desconsidera as capacitâncias parasitas do modelo simplificado quando este opera em torno da freqüência fundamental (60 Hz). As capacitâncias podem ser desprezadas do modelo pois não possuem influência no desempenho do equipamento nesta faixa de freqüência.

Foram simulados defeitos na coluna capacitiva e nos enrolamentos do transformador intermediário. Para realizar as simulações dos defeitos na coluna capacitiva, foram recalculados os valores de

capacitância  $C_1$  e de  $C_2$  para uma determinada porcentagem de capacitância danificada e também, para um número variado de elementos capacitivos danificados. Outras simulações foram realizadas para reproduzir situações de defeito nos enrolamentos primário e secundário do transformador intermediário. Todas as simulações demonstraram a influência dos defeitos na tensão secundária dos equipamentos e na tensão de sequência zero resultante de cada conjunto trifásico destes equipamentos. Com base no documento ARTECHE (2001), alguns parâmetros do TPC ARTECHE-DFK-245 são apresentados a seguir:

- Dados do TPC - DFK-245:

$$C_1(\text{pF}) = 9.350 \quad \text{Número de elementos de capacitivos em } C_1 = 140$$

$$C_2(\text{pF}) = 93.000 \quad \text{Número de elementos de capacitivos em } C_2 = 14$$

$$C_{total}(\text{pF}) = 8.500 \quad \text{Capacitância de cada elemento} = 1.300.000 \text{ pF}$$

$$\text{Resistência e indutância do enrolamento primário do TPI } (\Omega/\text{mH}) \leq 0,025$$

$$\text{Resistência e indutância do enrolamento secundário do TPI } (\Omega/\text{mH}) \leq 0,025$$

$$\text{Relação de transformação} = 1.200/2.000:1$$

$$\text{Indutância do reator de compensação} = 62\text{H}$$

$$\text{Tensão nominal do TPI no lado de alta tensão} = 22/\sqrt{3} \text{ kV}$$

#### 5.4.1 Defeitos na coluna capacitiva

Como citado na seção 4.2.1, mudanças na capacitância têm influência direta no divisor de tensão e conseqüentemente na tensão secundária e na sintonia entre a unidade eletromagnética e a coluna capacitiva (TRENCH, 2000).

Principais motivos que alteram a capacitância:

- Envelhecimento do dielétrico;
- Variações na temperatura;
- Capacitâncias parasitas;
- Forças mecânicas atuando sobre os elementos capacitivos;
- Falhas dielétricas nos elementos capacitivos.

##### 5.4.1.1 Defeitos na unidade capacitiva superior $C_1$

Nesta etapa, as simulações foram realizadas para diferentes valores da capacitância  $C_1$ . O cálculo dos novos valores da capacitância  $C_1$  foi realizado considerando o número de elementos capacitivos de  $C_1$  e do valor da capacitância de cada elemento. Foram simulados casos com 2, 5, 7 e 14 elementos

danificados de um total de 140 elementos capacitivos que constituem  $C_1$ . As tensões de saída foram obtidas através dos terminais  $X_1$ - $X_2$ , ou seja, no tap com saída nominal de 66,4 V. A Figura 5.7, mostra o aumento do perfil da tensão de saída e a tensão de sequência zero resultante, versus a redução percentual na capacitância  $C_1$  de 1,43%, 3,57%, 5,0% e de 10% equivalente ao número de elementos danificados (2, 5, 7 e 14, respectivamente). Nota-se um aumento da tensão do secundário de até 9,23% para 14 elementos capacitivos danificados, resultando em uma tensão  $V_0$  de 0,0923 pu para este caso. Defeitos em poucos elementos capacitivos em  $C_1$  não tem uma influência significativa na tensão  $V_0$ .

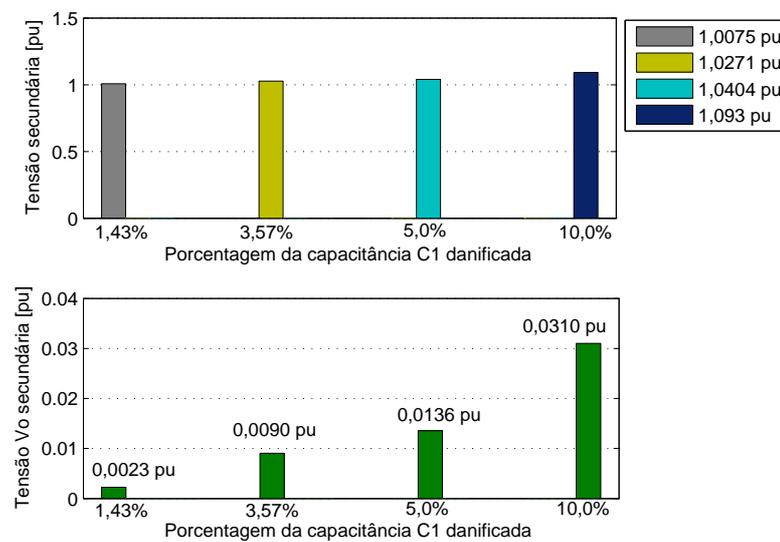


Figura 5.7: Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a porcentagem da capacitância  $C_1$  danificada

A Figura 5.8 mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade da Fase A apresenta defeitos em 5% (7 elementos) e 10% (14 elementos) da capacitância  $C_1$ . Observa-se um aumento da tensão da fase A onde o TPC com este defeito está instalado.

As figuras 5.9(a) e 5.9(b), ilustram os fasores das tensões de saída e de sequência zero  $V_0$ , resultantes de 5% e 10% da capacitância  $C_1$  danificada nas unidades instaladas na fase A, respectivamente.

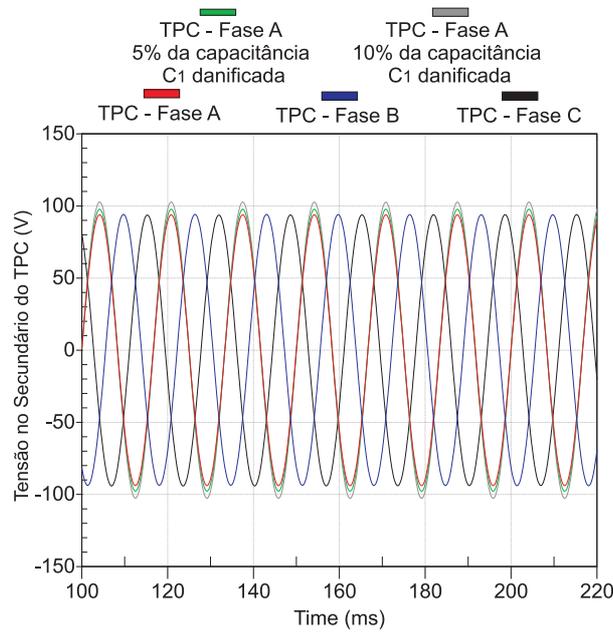
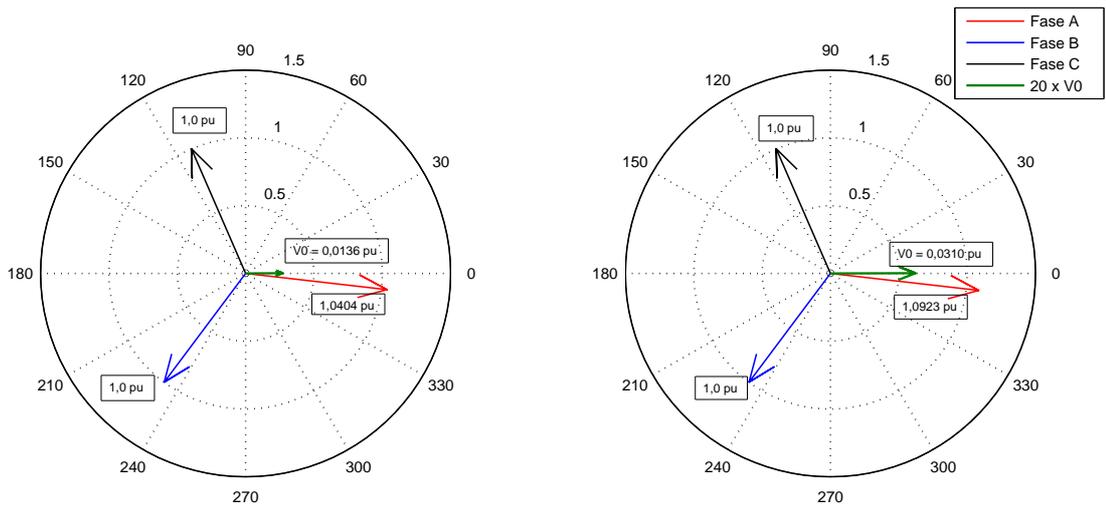


Figura 5.8: Tensões de fase no secundário dos TPCs



(a) Fasores de tensão - Defeito na unidade da fase A com 7 elementos capacitivos danificados em  $C_1$

(b) Fasores de tensão - Defeito na unidade da fase A com 14 elementos capacitivos danificados  $C_1$

Figura 5.9: Tensões no secundário dos TPCs e as componentes  $V_0$  resultantes

### 5.4.1.2 Defeitos na unidade capacitiva inferior $C_2$

Defeitos também foram simulados nos elementos da capacitância  $C_2$ . O modelo de TPC utilizado possui 14 elementos capacitivos que constituem  $C_2$ , assim, foram recalculados os valores desta capacitância para 1, 2, 3 e 5 elementos capacitivos danificados, significando uma queda percentual de 7,14%, 14,29%, 21,43% e 35,71% respectivamente nesta capacitância.

A figura 5.10 mostra uma queda significativa no perfil da tensão de saída e aumento da correspondente tensão de sequência zero resultante, versus a redução percentual na capacitância  $C_2$  danificada. Nota-se uma queda da tensão no secundário de até 34 %, para 5 elementos capacitivos danificados, resultando em uma tensão  $V_0$  de 0,112 pu. Nota-se a grande sensibilidade que os elementos em  $C_2$  possuem na tensão de saída e conseqüentemente na tensão de sequência zero.

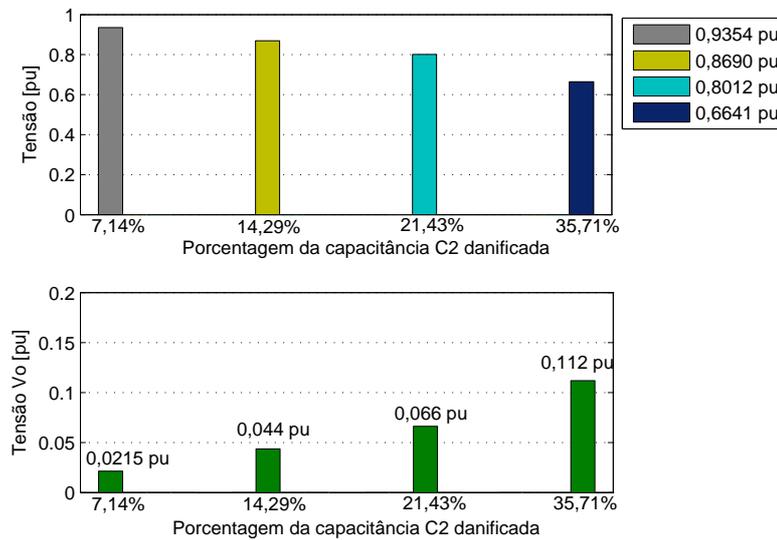


Figura 5.10: Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a porcentagem da capacitância  $C_2$  danificada

A Figura 5.11, mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade da Fase A apresenta defeitos em 7,14% (1 elemento) e 14,29% (2 elementos) na capacitância  $C_2$ . Observa-se uma considerável queda na tensão da fase em que o TPC com este tipo de defeito está instalado.

As figuras 5.12(a) e 5.12(b), ilustram os fasores das tensões das fases e de sequência zero  $V_0$ , resultantes de 7,14% (1 elemento) e 14,29% (2 elementos) da capacitância  $C_2$  danificada nas unidades instaladas na fase A, respectivamente.

## 5.4.2 Defeitos na unidade eletromagnética

Nesta seção foram simulados problemas de isolamento nos enrolamentos do transformador intermediário que podem alterar sua relação de transformação. Nas primeiras análises foram realizadas

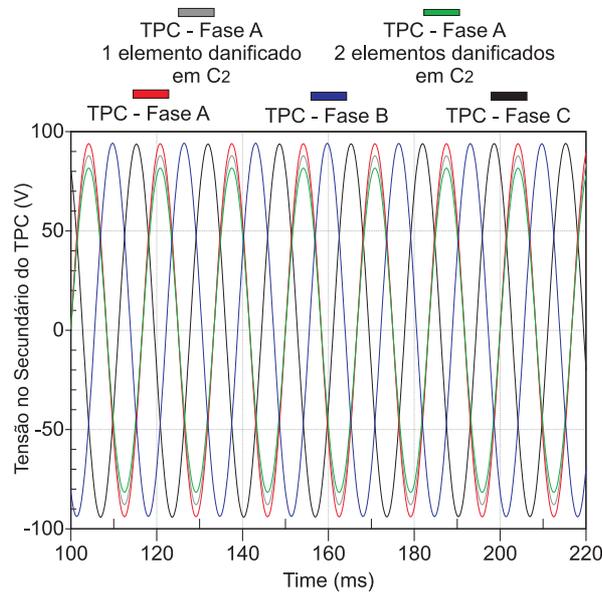
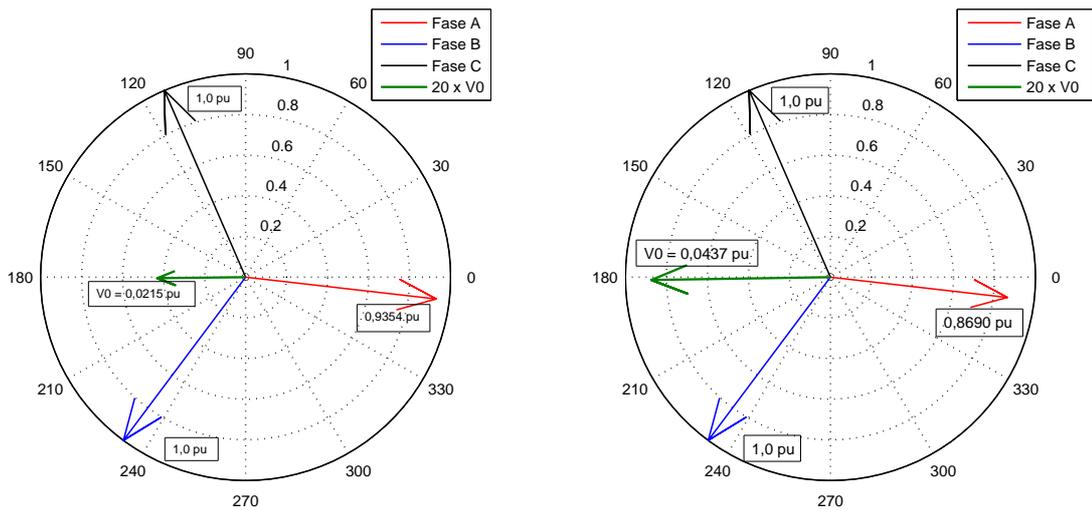


Figura 5.11: Tensões de fase no secundário dos TPCs



(a) Fasores de tensão - Defeito na unidade da fase A com 1 elemento capacitivo danificado em  $C_2$  (b) Fasores de tensão - Defeito na unidade da fase A com 2 elementos capacitivos danificados em  $C_2$

Figura 5.12: Tensões no secundário dos TPCs e as componentes  $V_0$  resultantes

simulações com a redução percentual no enrolamento primário e posteriormente, simulações com a redução percentual no enrolamento secundário, afetando diretamente a relação de transformação. A seguir seguem alguns resultados.

#### 5.4.2.1 Defeitos no enrolamento primário

Para simular problemas de isolamento no enrolamento primário do transformador intermediário, foram recalculadas as relações de transformação do transformador intermediário, que resultaram em três diferentes relações de transformação, cada uma representando uma redução percentual de 10 %, 20 % e 50 % do enrolamento primário, respectivamente. O resultado foi a redução das relações de transformação do transformador intermediário.

A Figura 5.13 mostra o gráfico do acréscimo percentual da tensão de saída do TPC da Fase A e o nível de  $V_0$ , para três diferentes relações de transformação.

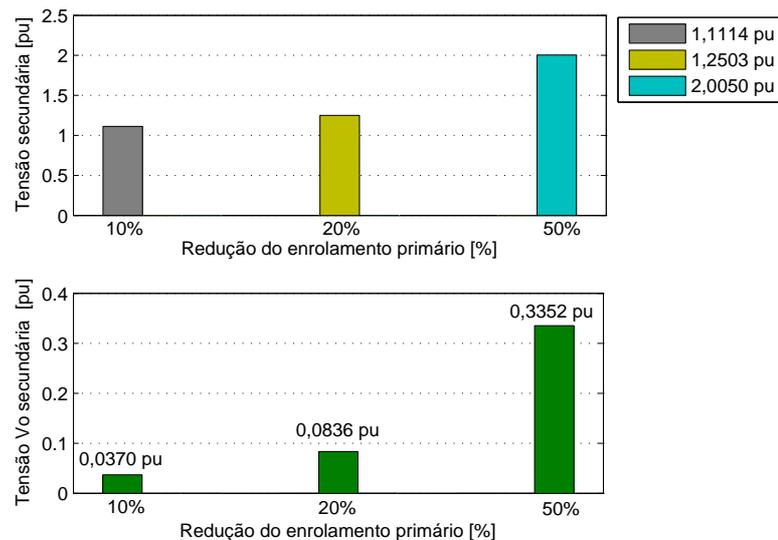


Figura 5.13: Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a redução percentual do enrolamento primário

A Figura 5.14 mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade da Fase A apresenta defeitos que comprometem 10% e 20% do enrolamento primário do TPI respectivamente. Observa-se claramente o aumento das tensões no secundário do TPC da Fase A, para este tipo de defeito.

As figuras 5.15(a) e 5.15(b) ilustram os fasores das tensões de saída e de sequência zero  $V_0$ , resultantes dos defeitos ocasionados por problemas de isolamento no enrolamento primário nas unidades instaladas na fase A.

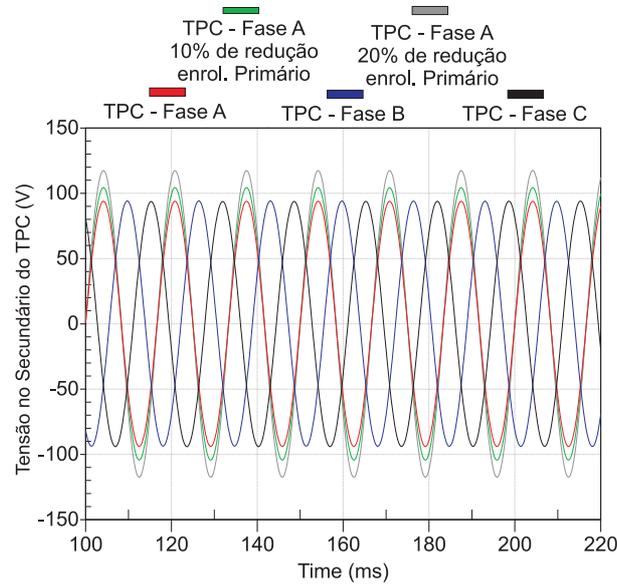
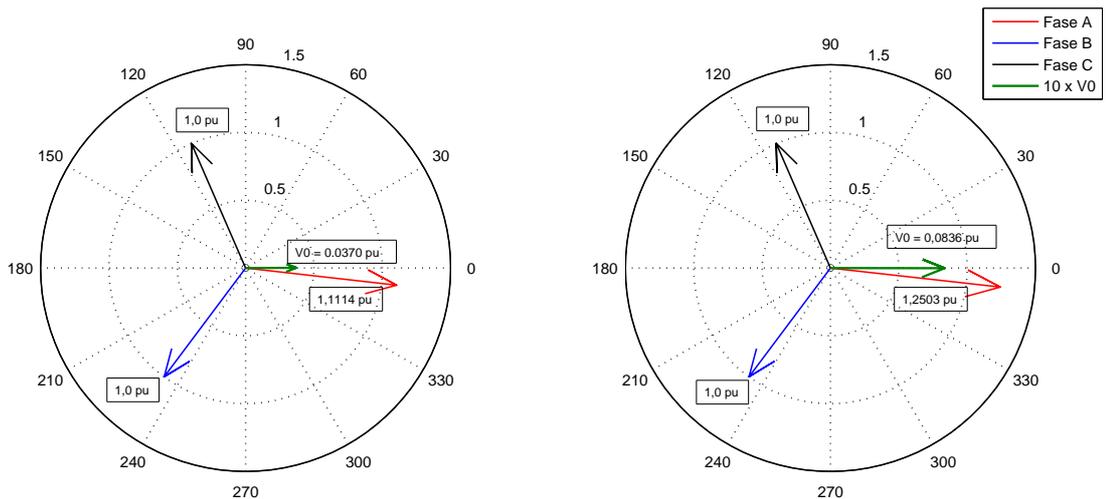


Figura 5.14: Tensões de fase no secundário dos TPCs



(a) Fasores de tensão - Defeito em 10% no enrolamento primário do TPC da fase A  
 (b) Fasores de tensão - Defeito em 20% no enrolamento primário do TPC da fase A

Figura 5.15: Tensões no secundário dos TPCs e as componentes  $V_0$  resultantes

### 5.4.2.2 Defeitos no enrolamento secundário

Para simular problemas de isolamento no enrolamento secundário do transformador intermediário do TPC, foram recalculadas as relações de transformação do mesmo, da mesma maneira como realizado no item anterior. Foram obtidas três diferentes relações de transformação, cada uma representando uma redução percentual de 10 %, 20 % e 50 % do enrolamento secundário, respectivamente.

A Figura 5.16, mostra o gráfico do decréscimo no perfil da tensão de saída do TPC da Fase A à medida que o percentual do enrolamento secundário do TPI se reduz. Os níveis de tensão de sequência zero ( $V_0$ ) resultantes das três diferentes relações de transformação, também é ilustrado.

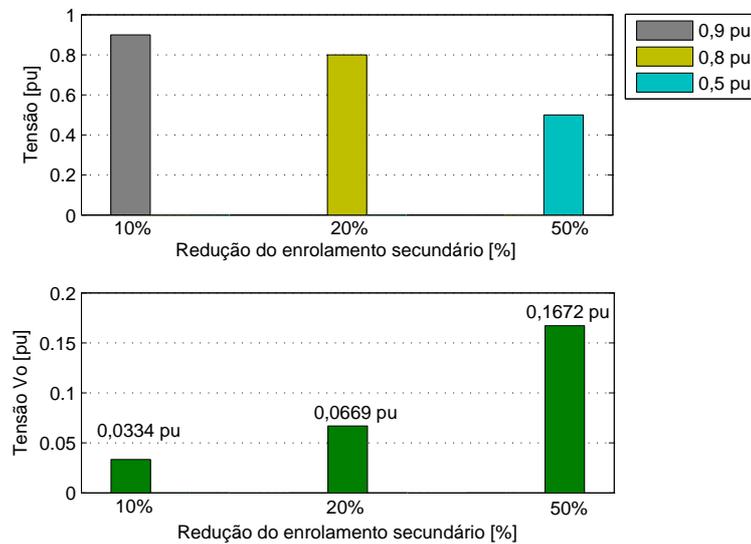


Figura 5.16: Perfil de tensão no secundário do TPC da Fase A e de tensão de sequência zero resultante, versus a a redução percentual do enrolamento secundário

A Figura 5.17, mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade da Fase A, apresenta defeitos que comprometem 10% e 20% do enrolamento secundário do TPI, respectivamente. Observa-se que para estes defeitos, ocorre a queda das tensões no secundário do TPC ao contrário dos defeitos localizados no enrolamento primário, onde ocorre um aumento do perfil de tensão de saída.

Finalmente, concluindo as simulações de alguns defeitos encontrados nestes equipamentos, as figuras 5.18(a) e 5.18(b), ilustram os fasores das tensões de saída e de sequência zero ( $V_0$ ), resultantes dos defeitos ocasionados por problemas de isolamento no enrolamento secundário nas unidades instaladas na fase A.

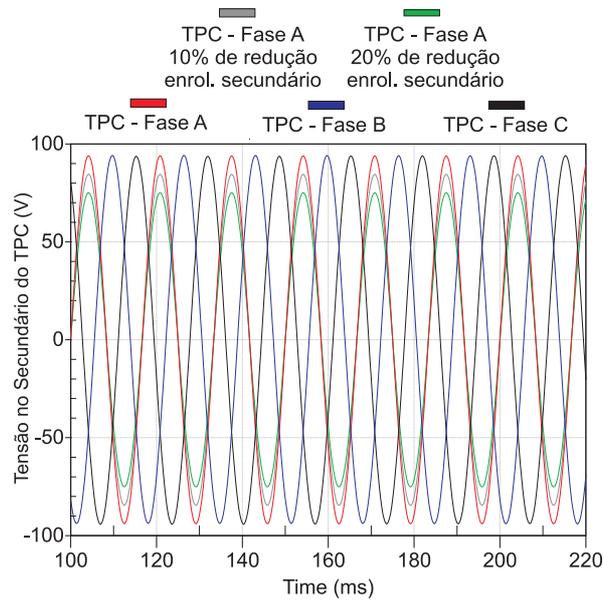
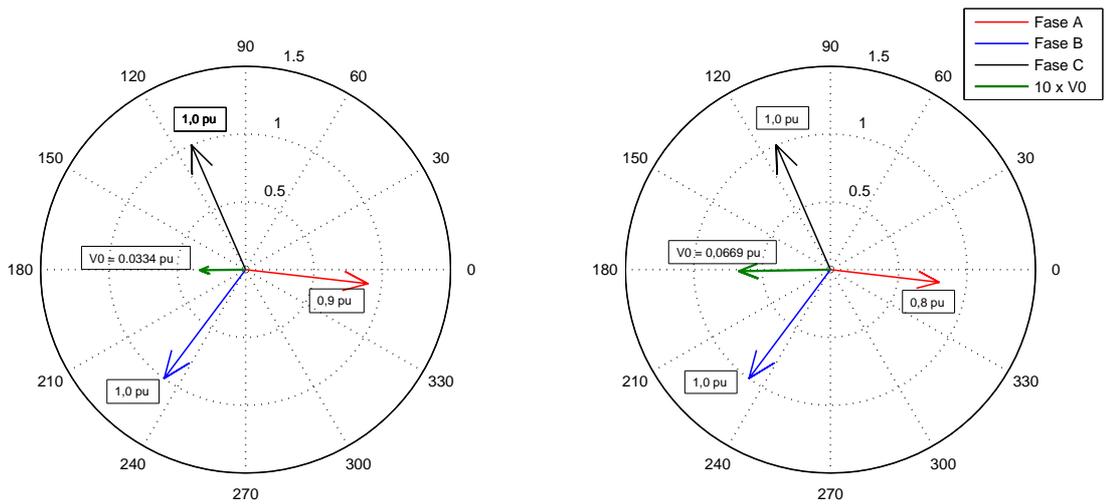


Figura 5.17: Tensões de fase no secundário dos TPCs



(a) Fasores de tensão - Defeito em 10% no enrolamento secundário do TPC da fase A

(b) Fasores de tensão - Defeito em 20% no enrolamento secundário do TPC da fase A

Figura 5.18: Tensões no secundário dos TPCs

## 5.5 Conclusões

Neste capítulo foram descritos a arquitetura e o fluxograma do sistema proposto para o monitoramento de TPCs. Esta ferramenta visa apoiar o uso da manutenção preditiva, baseada em análises dos dados fornecidos pelo monitoramento contínuo dos níveis de tensão de cada TPC para definir se uma manutenção é necessária ou não.

Foram apresentados os resultados de simulações dos principais defeitos que podem ocorrer em TPCs. As simulações dos defeitos nos elementos capacitivos na unidade capacitiva superior  $C_1$  resultaram em um aumento na tensão secundária do equipamento, ao contrário dos defeitos simulados na unidade capacitiva  $C_2$ , que resultaram em uma queda da tensão secundária e uma maior sensibilidade na tensão de seqüência zero resultante.

Os defeitos de isolamento na unidade eletromagnética também foram simulados. Defeitos de isolamento no enrolamento primário do TPI resultaram em uma diminuição da relação de transformação aumentando a tensão no secundário do equipamento. Defeitos de isolamento no enrolamento secundário resultaram em um aumento da relação de transformação e uma queda de tensão no secundário do TPC. Os resultados das simulações mostraram a sensibilidade da tensão de seqüência zero frente aos defeitos no equipamento, demonstrando a eficiência desta técnica de monitoramento.

Através das simulações dos defeitos com o TPC ARTECHE-DFK-245 utilizando os limiares de tensão de seqüência zero ( $V_{0(limite)}$  e  $\Delta V_{0(limite)}$ ) definidos conclui-se que o sistema de monitoramento acionará alarmes nas seguintes condições de defeito:

- Capacitância  $C_1$ : De um total de 140 elementos capacitivos, a partir de 14 elementos danificados o sistema acionará o alarme;
- Capacitância  $C_2$ : De um total de 14 elementos capacitivos, a partir de 2 elementos danificados o sistema acionará o alarme;
- Enrolamento primário do TPI: A partir da queima de 8,5 % do enrolamento primário o sistema acionará alarme;
- Enrolamento secundário do TPI: A partir da queima de 9,0 % do enrolamento secundário o sistema acionará alarme;

Esse sistema poderá intervir antes que o equipamento falhe, evitando a evolução do(s) defeito(s) o que poderia ocasionar até mesmo a explosão do TPC. Também evitará que os erros causados por estes defeitos causem atuações indevidas no sistema de proteção.

## Capítulo 6

# Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Este capítulo apresenta as principais conclusões referentes ao trabalho descrito nesta dissertação. Como já mencionado anteriormente, os sistemas de monitoramento vêm tornando-se uma opção cada vez mais atrativa para a avaliação das condições de operação e do envelhecimento dos equipamentos.

Ao contrário dos programas de manutenção baseadas no tempo, em que ocorrem intervenções em intervalos regulares, o sistema de monitoramento é uma ferramenta de apoio para a manutenção preditiva ou manutenção baseada nas condições, uma vez que fornece informações sobre o estado do equipamento, indicando quando e como a manutenção é necessária. Caso exista algum problema, o TPC pode ser reparado ou substituído antes de sua falha. Do ponto de vista econômico-financeiro, os custos de implantação do sistema de monitoramento de TPCs podem ser amortizados em poucos anos, levando-se em conta os custos com desligamentos indevidos e custos adicionais com equipes de manutenção. Caso o sistema evite uma única falha ou explosão de algum TPC, irá evitar também danos a outros equipamentos ou acidentes com pessoas nas proximidades.

Para realizar as simulações dos diferentes defeitos encontrados em TPCs, foram fundamentais os estudos dos modelos de circuito equivalente destes equipamentos, bem como a análise oscilográfica foi importante para estabelecer os limiares de tensão  $V_{0(limite)}$  e  $\Delta V_{0(limite)}$  nos sistemas utilizados para acionar ou não os alarmes.

Através de variações nos principais parâmetros do circuito equivalente, foi possível analisar a influência dos defeitos na tensão de seqüência zero resultante ( $V_0$ ) de cada conjunto trifásico de TPCs. Os valores de capacitância do divisor capacitivo e da relação de transformação do TPI foram alguns dos principais parâmetros que foram modificados para representar os defeitos mais comuns encontrados em TPCs e que poderão ser detectados pelo sistema proposto a partir de certos níveis como os apresentados na seção 5.5.

O método baseado na análise de tensão de seqüência zero apresentou grande sensibilidade frente aos diferentes defeitos em TPCs, mostrando-se uma ferramenta eficiente e de simples implementação.

A análise da ferramenta adotada neste trabalho denota alguns aspectos importantes:

- Este sistema utilizado não necessita de sensores ou transdutores especiais, mas somente das tensões disponíveis no secundário dos TPCs, como fonte de informações necessárias;
- O tempo de processamento é reduzido com a utilização do limiar de tensão  $V_{0(limite)}$  (ligado aos erros de medição dos equipamentos envolvidos), pois só haverá necessidade de processamentos adicionais, tais como a comparação entre as tensões de seqüência zero resultantes de outros conjuntos quando ultrapassar este limite;
- Este método de monitoramento apresenta entre outras vantagens, a característica de que caso ocorra alguma variação do nível de tensão de linha no sistema de potência, resultante de desbalanceamentos entre a geração e a carga, ou de outros fatores como faltas, o último bloco condicional do sistema (das diferenças das tensões,  $\Delta V_{0(limite)}$ ) garante uma maior confiabilidade a esta ferramenta. Isto permite distinguir se as tensões  $V_0$  resultantes são originadas por condições anormais no sistema de potência, ou de defeitos no equipamento. Esta característica é possível porque o sistema tem como referência para detecção dos defeitos, outros vetores  $V_0$  resultantes de vários conjuntos instalados nos barramentos principal (P) e de transferência (PT), de linhas de transmissão as quais operam como um único nó elétrico.

## 6.2 Sugestões para trabalhos Futuros

Abaixo estão listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Complementar o sistema implementado incluindo análise de conteúdo harmônico;
- Aprofundar estudos de ferro-ressonância e propor uma ferramenta capaz de detectar esta situação.

## Apêndice A

# Simulações dos defeitos utilizando TPCs modelo TRENCH - TEMF 230 H

Com base no documento TRENCH (2000), alguns parâmetros do TPC ARTECHE-DFK-245 são apresentados a seguir:

- Dados do TPC - TEMF 230H:

$C_1$ (pF) = 8.000      Número de elementos de capacitivos em  $C_1$  = 150

$C_2$ (pF) = 120.000      Número de elementos de capacitivos em  $C_2$  = 10

$C_{total}$ (pF) = 7.500      Capacitância de cada elemento = 1.200.000 pF

Resistência e indutância do enrolamento primário do TPI ( $\Omega/H$ ) = 300 / 6

Resistência e indutância do enrolamento secundário do TPI ( $\Omega/mH$ ) 100 / 400

Relação de transformação = 1.200/2.000:1

Indutância do reator de compensação (H) = 60

Tensão nominal do TPI no lado de alta tensão =  $19/\sqrt{3}$  kV

### A.1 Defeitos na coluna capacitiva

#### A.1.1 Defeitos na unidade capacitiva superior $C_1$

As simulações foram realizadas para diferentes valores da capacitância  $C_1$ . O cálculo dos novos valores da capacitância  $C_1$  foram feitos considerando o número de elementos capacitivos de  $C_1$  e do valor da capacitância de cada elemento. Foram simulados os casos para 1, 4, 7, 10 e 13 elementos danificados de um total de 150 elementos capacitivos que constituem  $C_1$  do TPC da fase A..

A Figura A.1, mostra o aumento do perfil da tensão de saída e a respectiva tensão de sequência zero, versus o número de elementos danificados em  $C_1$ . Nota-se um aumento da tensão do secundário

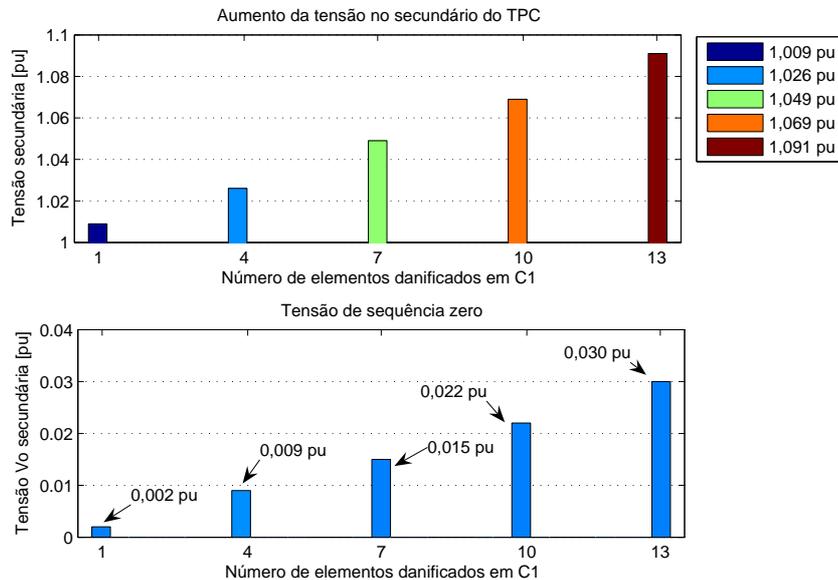


Figura A.1: Perfil de tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero resultante ( $V_0$ ), versus o número de elementos capacitivos danificados em  $C_1$

de até 9,17 %, para 13 elementos capacitivos danificados, resultando em uma pequena tensão de sequência zero.

A Figura A.2(a), mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade da fase C apresenta defeito em 4 elementos capacitivos. A Figura A.2(b), ilustra a simulação das tensões de saída dos TPCs, onde a unidade da fase B apresenta defeito em 10 elementos capacitivos.

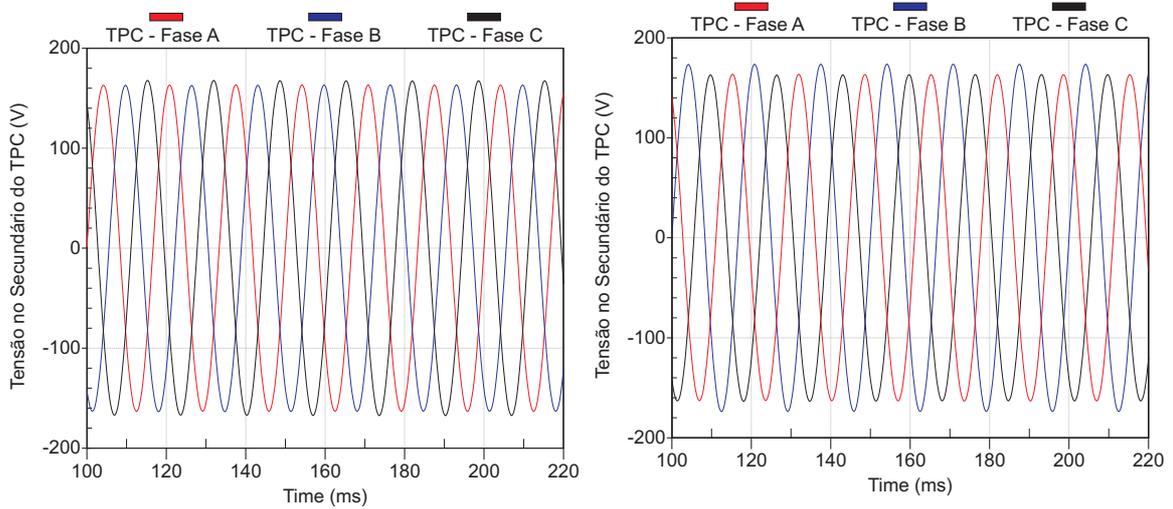
Nas Figuras A.3(a) e A.3(b), são apresentados os fasores das tensões de saída dos casos simulados anteriormente e das resultantes de tensão  $V_0$ . As figuras mostram a diferença de amplitude dos fasores nas fases C e B respectivamente.

### A.1.2 Defeitos na unidade capacitiva inferior $C_2$

Os defeitos foram simulados através dos valores alterados da capacitância  $C_2$ . Como o modelo de TPC utilizado possui 10 elementos capacitivos que constituem  $C_2$ , foram recalculados os valores desta capacitância para 1, 2, 3, 4 e 5 elementos capacitivos danificados.

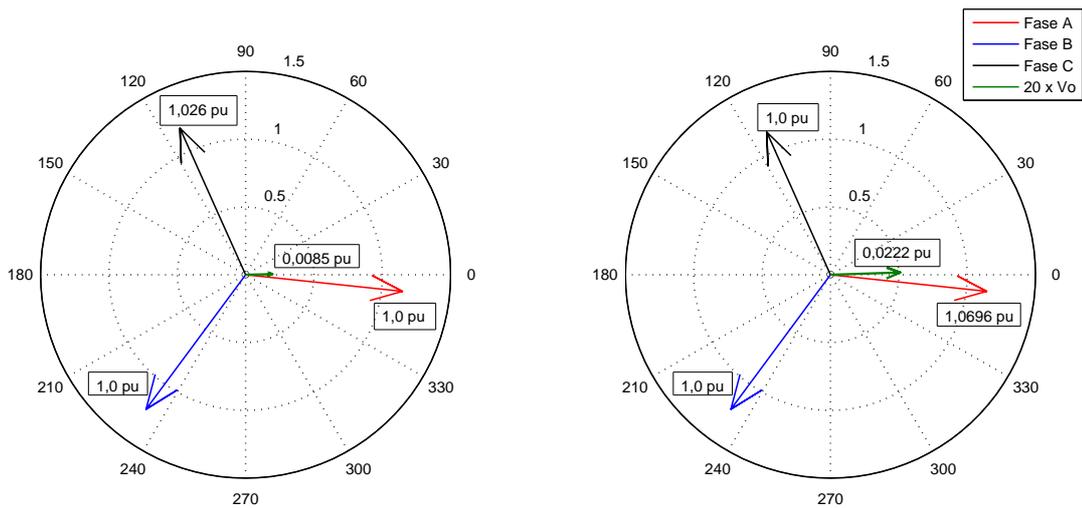
A figura A.4, mostra uma queda significativamente grande no perfil da tensão de saída e a respectiva tensão de sequência zero, *versus* o número de elementos danificados em  $C_2$ . Nota-se uma queda da tensão no secundário de até 49 %, para 5 elementos capacitivos danificados. Nota-se a grande influência que os elementos em  $C_2$  possuem na tensão de saída e conseqüentemente na tensão de sequência zero.

A Figura A.5(a), mostra as tensões de saída senoidais das três unidades de TPCs, onde a unidade



(a) Caso A - 4 elementos capacitivos danificados em  $C_1$  no TPC da fase C (b) Caso B - 10 elementos capacitivos danificados em  $C_1$  no TPC da fase B

Figura A.2: Tensões no secundário dos TPCs



(a) Caso A - 4 elementos capacitivos danificados em  $C_1$  no TPC da fase C (b) Caso B - 10 elementos capacitivos danificados em  $C_1$  no TPC da fase B

Figura A.3: Fasores das tensões no secundário dos TPCs

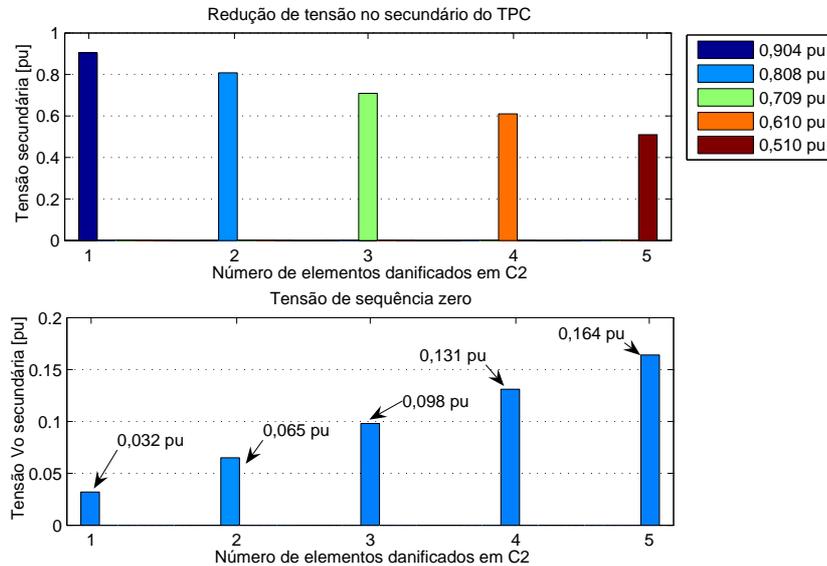


Figura A.4: Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus o número de elementos capacitivos danificados em C<sub>2</sub>

da fase A, apresenta defeito em 2 elementos capacitivos da unidade capacitiva inferior e a Figura A.6(b), ilustra a simulação das tensões de saída dos TPCs, onde a unidade da fase A apresenta defeito em 4 elementos capacitivos.

Nas Figuras A.6(a) e A.6(b), são apresentados os fasores das tensões de saída dos casos simulados e das resultantes de tensão  $V_0$ . As figuras mostram a diferença de amplitude dos fasores de tensão para os casos de falha de 2 e 4 elementos capacitivos em C<sub>2</sub> na unidade da fase A, respectivamente.

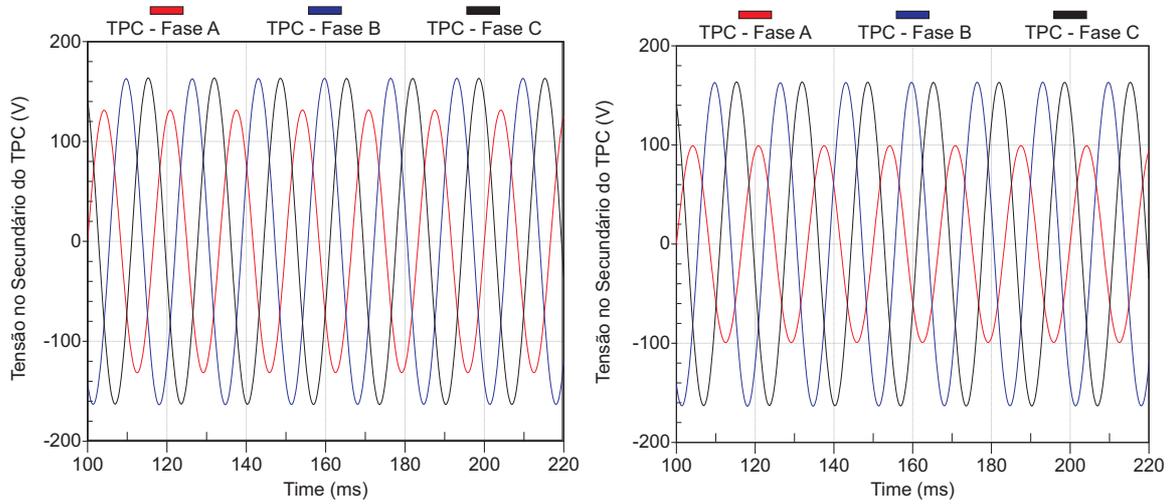
## A.2 Defeitos nos enrolamentos do transformador intermediário

### A.2.1 Defeitos no enrolamento primário

Para simular defeitos de isolamento no enrolamento primário do transformador intermediário, foram recalculadas as relações de transformação do transformador intermediário. Foram obtidas três diferentes relações de transformação, cada uma representando uma redução percentual de 10 % 30 % e 50 % do enrolamento primário, respectivamente.

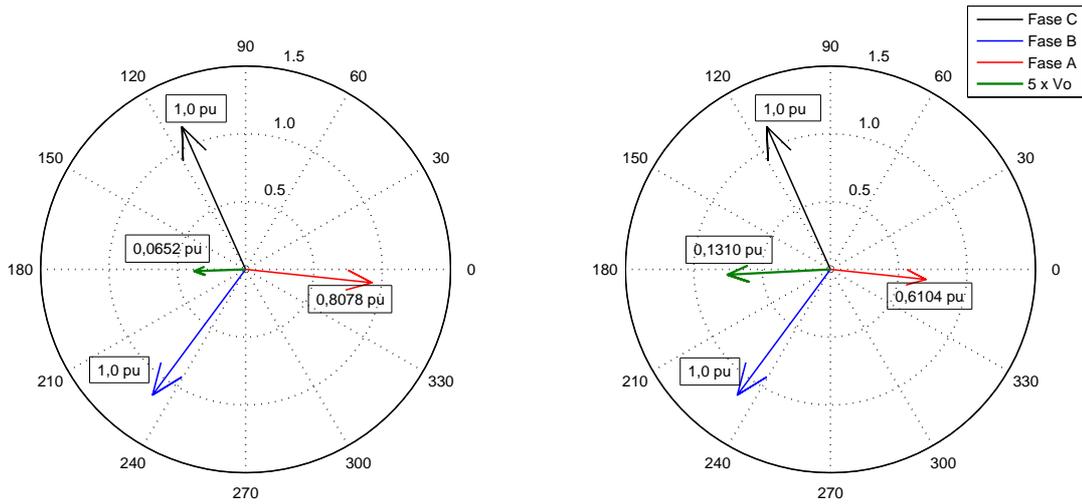
A Figura A.7 mostra o gráfico do acréscimo percentual da tensão de saída do TPC da fase A e o nível de  $V_0$ , para três diferentes relações de transformação.

Nas Figuras A.8(a) e A.8(b), nota-se claramente o aumento das tensões no secundário do TPC da fase A, devido a problemas de isolamento no enrolamento primário para duas relações de transformação, uma para 10 % de redução do enrolamento e outra, para 30 % de redução, respectivamente.



(a) Caso A - 2 elementos capacitivos danificados em  $C_2$  no TPC da fase A (b) Caso B - 4 elementos capacitivos danificados em  $C_2$  no TPC da fase A

Figura A.5: Tensões no secundário dos TPCs



(a) Caso A - 2 elementos capacitivos danificados em  $C_2$  no TPC da fase A (b) Caso B - 4 elementos capacitivos danificados em  $C_2$  no TPC da fase A

Figura A.6: Fasores das tensões no secundário dos TPCs

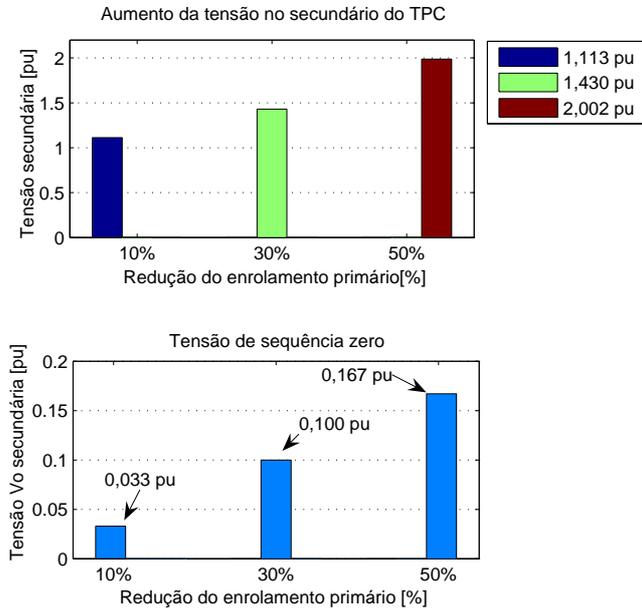
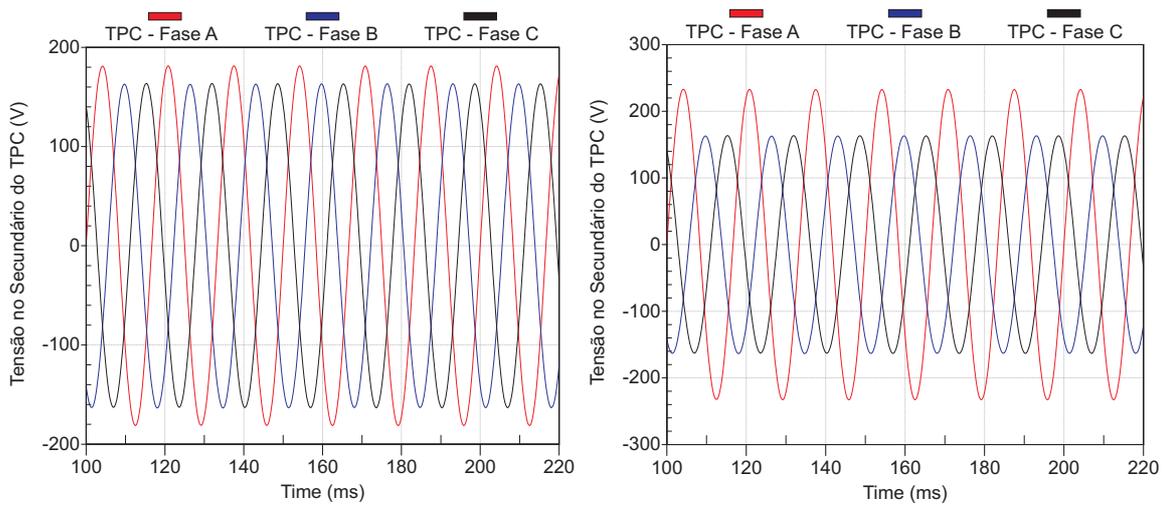


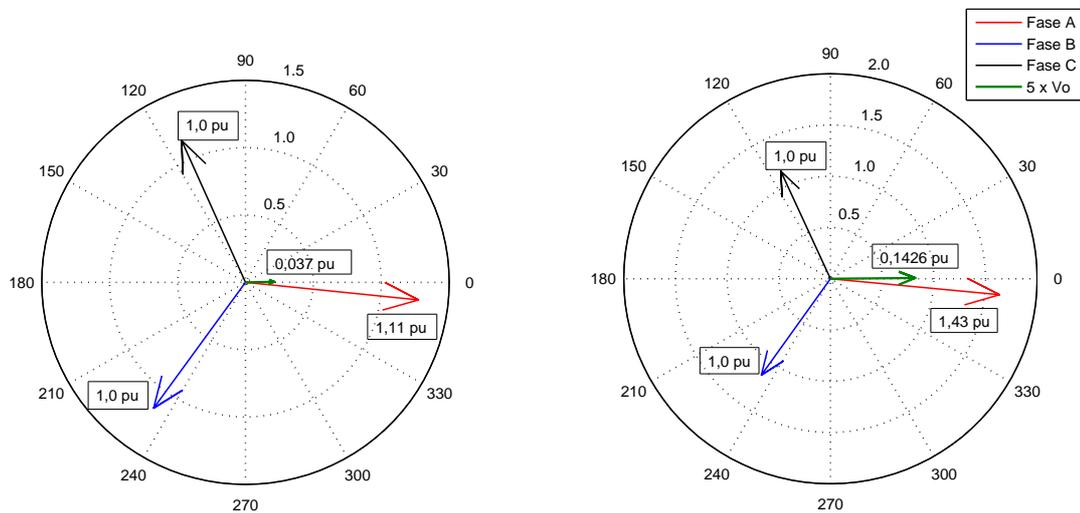
Figura A.7: Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus a redução percentual do enrolamento primário



(a) Caso A - 10 % do enrolamento primário, danificado no TPC da fase A (b) Caso B - 30 % do enrolamento primário, danificado no TPC da fase A

Figura A.8: Tensões no secundário dos TPCs

Nas Figuras A.9(a) e A.9(b) são apresentados os fasores das tensões de saída dos casos simulados anteriormente e das resultantes de tensão  $V_0$ . Os fasores mostram a diferença de amplitude de tensão da fase A, para as duas diferentes relações de transformação.



(a) Caso A - 10 % do enrolamento primário danificado, no TPC da fase A  
 (b) Caso B - 30 % do enrolamento primário danificado, no TPC da fase A

Figura A.9: Fasores das tensões no secundário dos TPCs

## A.2.2 Defeitos no enrolamento secundário

Para simular defeitos de isolamento no enrolamento secundário do transformador intermediário, foram recalculadas as suas relações de transformação do mesmo conforme realizado no item anterior. Foram obtidas três diferentes relações de transformação, cada uma representando uma redução percentual de 10 %, 30 % e 50 % do enrolamento secundário, respectivamente.

Na Figura A.10, o gráfico mostra o decréscimo percentual da tensão de saída do TPC da fase A e o nível de tensão de sequência zero, para três diferentes relações de transformação.

Nas Figuras A.11(a) e A.11(b) são ilustrados respectivamente, os resultados das simulações para reduções de 10 % no enrolamento secundário do TPC da fase A e de 30 % no enrolamento do TPC da fase B. Nota-se claramente uma redução da tensão de saída destes TPCs que apresentam este tipo de problema.

Nas Figuras A.12(a) e A.12(b) são apresentados os fasores das tensões de saída dos casos simulados anteriormente e das resultantes de tensão  $V_0$ . As figuras mostram a diferença de amplitude nos fasores de tensão das fases A e B, para duas diferentes relações de transformação, também, devido a problemas de isolamento.

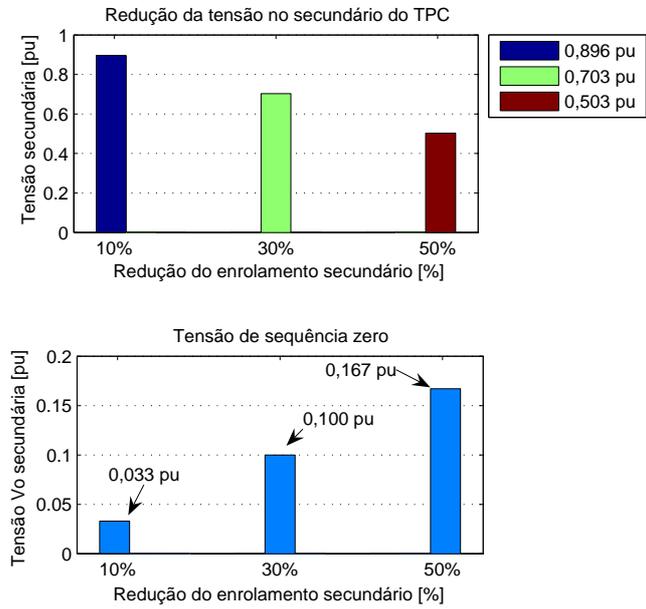
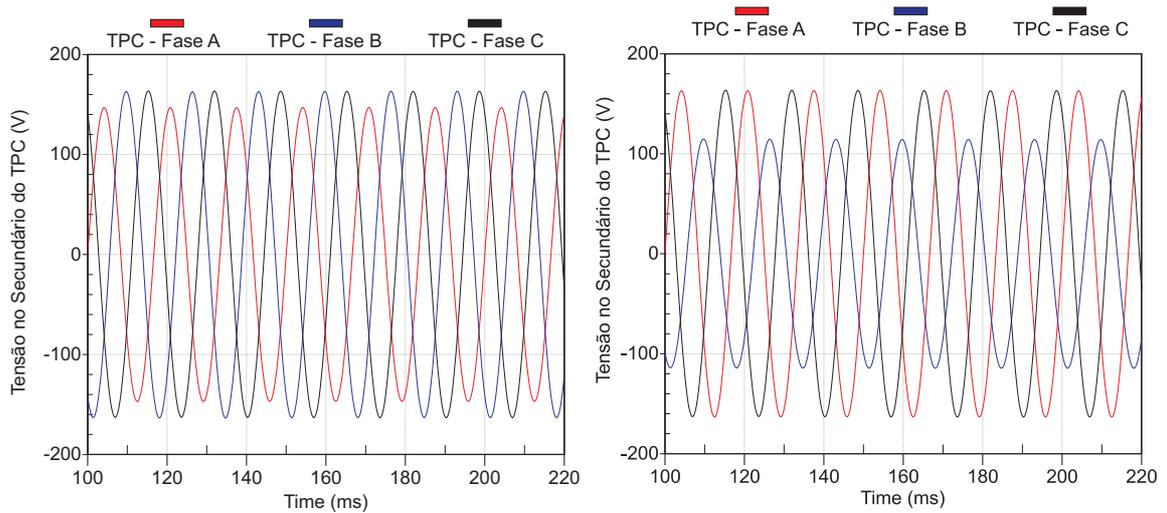
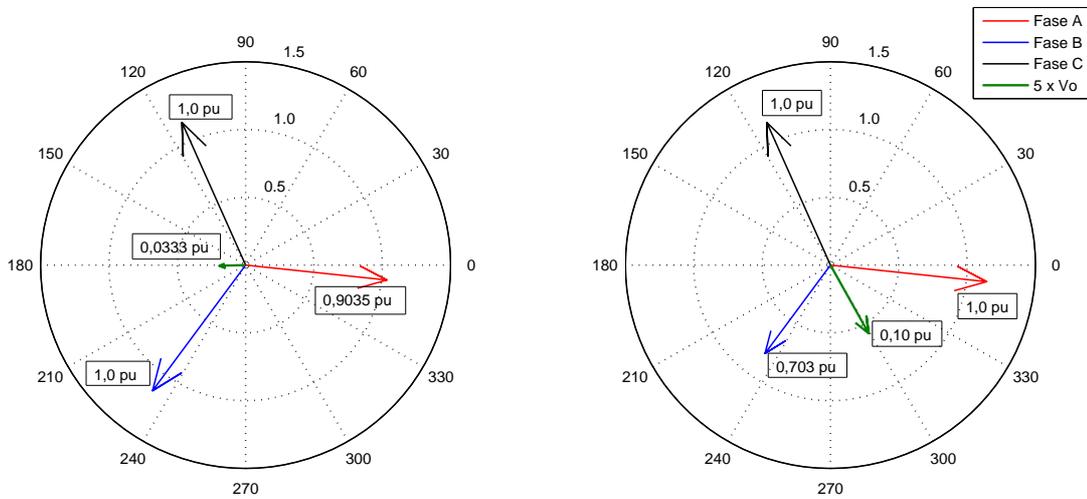


Figura A.10: Perfil da tensão no secundário do TPC da fase A e da tensão de sequência zero, versus a redução percentual do enrolamento secundário



(a) Caso A - 10 % do enrolamento secundário danificado no TPC da fase A (b) Caso B - 30 % do enrolamento secundário danificado, no TPC da fase B

Figura A.11: Tensões no secundário dos TPCs



(a) Caso A - 10 % do enrolamento secundário danificado, no TPC da fase A  
 (b) Caso B - 30 % do enrolamento secundário danificado, no TPC da fase B

Figura A.12: Fasores das tensões no secundário dos TPCs

Através das simulações dos defeitos com o TPC TRENCH - TEMF 230 H utilizando os limiares de tensão de seqüência zero ( $V_{0(limite)}$  e  $\Delta V_{0(limite)}$ ) definidos conclui-se que o sistema de monitoramento acionará alarmes nas seguintes condições de defeito:

- Capacitância  $C_1$ : De um total de 150 elementos capacitivos, a partir de 6 elementos danificados o sistema acionará o alarme;
- Capacitância  $C_2$ : De um total de 10 elementos capacitivos, a partir de 1 elemento danificado o sistema acionará o alarme;
- Enrolamento primário do TPI: A partir da queima de aproximadamente 6,0 % do enrolamento primário o sistema acionará alarme;
- Enrolamento secundário do TPI: A partir da queima de aproximadamente 6,0 % do enrolamento secundário o sistema acionará alarme;

# Referências Bibliográficas

- ABB. *Instrument transformers - Technical Information and Application Guide*. [S.l.], 2004.
- ABB. *Outdoor Instrument transformers - Application Guide*. 2.1. ed. [S.l.], 2005.
- AREVA. *Network Protection and Automation Guide*. [S.l.], 2000.
- AREVA. *Manual de instrução: Transformador de potencial capacitivo - CCV, 18457/001*. [S.l.], 2003.
- ARTECHE. *Características Técnicas Garantidas: Transformador de Potencial Capacitivo 230 kV - Artech Espanha, EV AT P/DIS-953.12/01, ELETROSUL - ITAJAÍ/BLUMENAU*. [S.l.], 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6856 - Transformador de corrente - Especificação*. [S.l.], 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformador de potencial indutivo - NBR 6855*. [S.l.], 1992.
- BERGMAN, A. In-situ calibration of voltage transformers on the swedish national grid. *8th International Conference on Metering and Tariffs for Energy Supply*, n. 426, p. 227–239, 1996.
- CHU, D.; LUX, A. On-line monitoring of power transformers and components: A review of key parameters. *IEEE Transformer On-Line Monitoring Task Force*, p. 669–675, 2000.
- CLARK, H. K. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. [S.l.]: Edições UFSM, 1983.
- COMMITTEE, W. G. of the Relay Input Sources Subcommittee of the P. S. R. Transient response of coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 12, p. 4811–4814, 1981.
- CUMMINGS, H. B.; BOYLE, J. R.; ARP, B. W. Continuous, online monitoring of freestanding, oil-filled current transformers to predict imminent failure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 03, n. 04, p. 1776–1783, 1988.
- FERNANDES JUNIOR, D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2003.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY. *EnerVista, Multilin GE*. [S.l.], 2007.

- HAYT JR., W. H.; BUCK, J. A. *Engineering Electromagnetics*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 2001.
- HOU, D.; ROBERTS, J. Capacitive voltage transformers: Transient overreach concerns and solutions for distance relaying - part 1. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA*, p. 1–20, 2000.
- IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Standard Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems - COMTRADE*. Std c37.111. [S.l.], 1999.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Instrument Transformers - Part 5: Capacitor Voltage Transformers*. 60044-5. ed. [S.l.], 1999.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Instrument transformers - Part 1: Current transformers*. 60044-1. ed. [S.l.], 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Instrument Transformers - Part 2: Inductive Voltage Transformers*. 60044-2. ed. [S.l.], 2003.
- KEZUNOVIC, M. et al. Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 4, p. 1927–1935, 1992.
- KOJOVIC, L.; KEZUNOVIC, M.; NILSSON, S. L. Computer simulation of a ferroresonance suppression circuit for digital modeling of coupling capacitor voltage transformers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. Orlando, Florida, 1992.
- KOJOVIC, L. et al. A new method for the CCVT performance analysis using field measurements, signal processing and emtp modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1907–1915, 1994.
- LACHMAN, M. F.; WALTER, W.; GUGGENBERG, P. A. von. On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 01, p. 155–162, 2000.
- LUCAS, J. Representation of magnetisation curves over wide region using a non-integer power series. *IJEEE*, v. 25, n. 4, p. 335–340, 1988.
- LUCAS, J. et al. Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 152–159, 1992.
- MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 3. ed. [S.l.]: LTC, 2005.
- MASON, C. R. *The Art And Science of protective Relaying*. [S.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 1956.
- MICHAELIS, J. CCVT monitoring with remote diagnostics. *Presented at the Western Power Delivery Automation Conference - Spokane, WA 99217 USA*, p. 1–6, 2003.

- MIRANDA, A. L. L. *Projetos de Filtros Digitais para Análise de Sinais do Sistema Elétrico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- MIRANDA, A. L. L. et al. Estudo de técnicas para cálculo de fasores. *XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Outubro 2005.
- MORAES, H. M. de; SILVA, J. C. R. e. Sobretensões em TPC durante manobra de chave seccionadora. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XV SNPTEE)*, Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil, Outubro 1999.
- MORETO, M. *Localização de Falhas de Alta Impedância de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. [S.l.], 2000.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Submódulo 11.6 - Oscilografia de Curta e Longa Duração*. [S.l.], 2002.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power System*. [S.l.]: Research Studies Press Ltd., 1988.
- PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Third. [S.l.]: Prentice-Hall. Inc., 1996.
- PSCAD/EMTDC. Electromagnetic transients program including dc systems. *Manitoba HVDC Research Centre*, 2005.
- RIBEIRO, J. Voltage transformers: Why modern cvts don't drift. *Electrical World*, 1996.
- ROLIM, J. G. et al. Reliability centered maintenance for capacitor voltage transformers. *Relatório de atividades - Projeto P&D, ciclo 2002/2003*, 2004.
- ROLIM, J. G. et al. Sistema de análise e diagnóstico para a central de monitoramento de equipamentos da eletrosul. *Relatório de atividades - Projeto P&D, ciclo 2002/2003*, 2004.
- SOARES, V. L. de C. et al. Aspectos do desempenho transitório de transformadores de potencial em subestações. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XVIII SNPTEE)*, Curitiba - Paraná - Brasil, 2005.
- SWEETANA, A. Transient response characteristics of capacitive potential devices. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 90, p. 1989–2001, 1971.
- THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. *Standard Requirements for Instrument Transformers*. C57.13. [S.l.], 1993.
- TOUS, R. B. Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements. Doctoral Thesis - Department of Electrical Engineering. Dezembro 2000.

---

TRENCH. *Manual de instruções para transformador de potencial capacitivo*. [S.l.], 2000.

TZIOUVARAS, D. A. et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 62–72, 2000.