

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



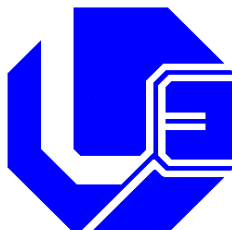
COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE SOB
CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
POTÊNCIA

Roger Garcia Almeida

AGOSTO

2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



**COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE SOB
CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, por Roger Garcia Almeida, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. - (UFU) - Orientador
Carlos Augusto Guimarães Medeiros. Dr - (LACTEC)
Antônio Carlos Delaiba, Dr. - (UFU)

Uberlândia, 23 de Agosto de 2006.



**COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE SOB
CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE
POTÊNCIA**

ROGER GARCIA ALMEIDA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, por Roger Garcia Almeida, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

**Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.
Orientador**

**Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D.
Coord. do curso de Pós-Graduação**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

A447c Almeida, Roger Garcia, 1978-
Comportamento de transformadores de corrente sob condições de energização de um transformador de potência / Roger Garcia Almeida. - 2006.
174f. : il.
Orientador: Marcelo Lynce Ribeiro Chaves.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Sistemas de energia elétrica - Proteção - Teses. 2. Transformadores de corrente para instrumentos - Teses. I. Chaves, Marcelo Lynce Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.316

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Rogério e Rogéria, a minha irmã Rafaela, aos meus familiares e amigos, pela paciência, incentivo, apoio e compreensão a mim dispensado, essencial para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, a minha profunda gratidão, pois, inestimavelmente, na sua infinita sabedoria e bondade sempre se fez presente em mais essa conquista.

Ao professor **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** meu sincero agradecimento, pela confiança depositada, amizade, paciência, compreensão às minhas limitações e orientação segura, que fez com que metas fossem atingidas e este trabalho realizado.

A namorada **Patrícia Antunes Gondin**, pela atenção, companheirismo e imenso carinho à mim dispensado durante a realização do trabalho, sendo sempre um porto seguro.

Aos professores membros da **Banca Examinadora** pela presença e as contribuições que muito enriqueceram esta dissertação.

Aos professores **José Carlos de Oliveira** e **Antônio Carlos Deleiba** pela sua atenção, amizade e incentivo.

Ao amigo **João Felício Vendramini** pela sua colaboração pelos ensaios realizados indispensável para as investigações.

Aos demais professores da FEELT da UFU pelos seus ensinamentos.

Aos companheiros da pós-graduação: **Adeon C. Pinto, André Roger, Elise Saraiva, Alexandre (Araguari)** e **Jordana Felício** pela amizade e as valiosas sugestões e contribuições dependidas.

A todos os colegas dos demais departamentos de pesquisas da UFU, pela amizade e convivência harmoniosa.

Aos técnicos **Rubens A. Assunção** e **Carlos H. Oliveira** pela presteza durante os ensaios.

Aos amigos da minha cidade **Vitória - ES**, pela força e compreensão nos momentos de minha ausência.

À **Joana Maria Proença, Marli Junqueira Buzzi** e **Valéria Barros** pelos documentos e encaminhamentos necessários junto à secretaria da pós-graduação.

A **CAPES**, pelo necessário apoio financeiro.

RESUMO

O objetivo desta dissertação consiste no estudo das correntes de neutro na conexão dos transformadores de corrente quando em seus secundários apresentam ou não um certo nível de desequilíbrio, durante o processo de energização de um transformador de potência. Tais correntes, de acordo com relatos e constatações através de ensaios realizados em laboratório, podem ocasionar o desligamento e interrupções, causando grandes prejuízos. Visando ilustrar esse trabalho, apresentam-se resultados de simulações utilizando a plataforma computacional ATP. Por fim, algumas alternativas para evitar que a proteção de corrente de neutro seja sensibilizada de maneira inadequada durante o processo de energização de um transformador de potência, são mostradas de forma conclusiva.

A metodologia proposta contempla as seguintes etapas:

- Considerações sobre transformadores de corrente, onde recorda-se de algumas regras simples que permitem definir melhor as características de um transformador de corrente “TC”;
- Análise e modelagem dos transformadores de corrente para serviço de proteção;
- Ensaios experimentais, onde contempla o estudo da corrente de neutro nos TC's, devido a desequilíbrios nas cargas dos secundários dos transformadores de corrente conectados em estrela aterrado;
- Ensaios computacionais, nessa etapa foi realizado os ensaios computacionais utilizando a ferramenta computacional ATP.

Palavras-Chave: correntes de *inrush*, *ground sensor*, transformador de corrente.

ABSTRACT

The objective of this dissertation consists in the study of the neutral current on the connection of current transformers when in secondary, shows or not an unbalanced level during the process of energization in a power transformer. These currents according to the test realized in the laboratory can cause disconnection and interruption, causing big damages. To illustrate this work the results are showing by the software ATP. By the end, some alternatives to avoid that the neutral current become sensitive in a wrong way during the process of energization of a power transformer are showing in a conclusive way.

The proposal methodology contemplates the following stages:

- Considerations about current transformer, which remember some simple rules that allow to define the characteristics of a current transformer “TC”;
- Analysis and modeling of current transformers for protection service;
- Experimental assays, which contemplates the study of the neutral current in TC's, caused by unbalanced loads of the secondary current transformers connected in grounding star;
- Computational assays, in this stage the computational assays were carried through using the computational tool ATP.

Keywords: inrush currents, ground sensor, current transformer.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	01
1.2 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	02
1.3 - ESTADO DA ARTE.....	03
1.4 - PROGRAMA ATP.....	05
1.5 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	06

CAPÍTULO II - CONSIDERAÇÕES SOBRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1 – INTRODUÇÃO	09
2.2 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE	10
2.2.1 - RELAÇÃO NOMINAL (K_c)	11
2.2.2 - RELAÇÃO DE ESPIRAS (n)	11
2.2.3 - RELAÇÃO EFETIVA OU RELAÇÃO VERDADEIRA (K_r)	12
2.3 - FATORES QUE DEVERÃO SER CONSIDERADOS NA SELEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE	16
2.3.1 - TIPO DE SERVIÇO	16
2.3.2 - TIPO DE INSTALAÇÃO.....	16
2.3.3 - TIPO DE ISOLAMENTO.....	16
2.3.4 - TIPOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTES DE ACORDO COM A CONSTRUÇÃO MECÂNICA	17
2.3.4.1 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO ENROLADO	17
2.3.4.2 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO BARRA	18

2.3.4.3 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO JANELA	18
2.3.4.4 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO BUCHA	19
2.3.4.5 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO NÚCLEO	20
DIVIDIDO	
2.3.4.6 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE VÁRIOS NÚCLEOS..	21
2.3.4.7 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE VÁRIAS RELAÇÕES	22
DE TRANSFORMAÇÃO	
2.4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS TC's	25
2.4.1 - CORRENTE(S) NOMINAL(IS) E RELAÇÃO(ÕES) NOMINAL(IS)	25
2.4.1.1 – REPRESENTAÇÃO	26
2.4.1.2 - MARCAÇÃO DOS TERMINAIS	28
2.4.2 - FREQUÊNCIA NOMINAL	28
2.4.3 - CLASSE DE TENSÃO DE ISOLAMENTO NOMINAL	29
2.4.4 - FATOR DE SOBRECORRENTE NOMINAL (F)	29
2.4.5 - FATOR TÉRMICO NOMINAL (F_t)	29
2.4.6 - LIMITE DE CORRENTE DE CURTA DURAÇÃO NOMINAL PARA EFEITO TÉRMICO	30
2.4.7 - LIMITE DE CORRENTE DE CURTA DURAÇÃO NOMINAL PARA EFEITO MECÂNICO	31
2.4.8 - CARGA NOMINAL (C)	31
2.4.9 - CLASSE DE EXATIDÃO	31
2.4.9.1 - CLASSE DE EXATIDÃO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇOS DE MEDIÇÃO	32
2.4.9.2 - CLASSE DE EXATIDÃO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇOS DE PROTEÇÃO	34
2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	39

CAPÍTULO III - ANÁLISE E MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE SERVIÇO DE PROTEÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
3.2 - CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DE TRANSITÓRIOS DE CORRENTE	41
3.2.1 - CORRENTE TRANSITÓRIA PRIMÁRIA	43
3.2.2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE SEM A SUA SATURAÇÃO (REGIÃO LINEAR)	44
3.2.3 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE SECUNDÁRIA i_2 DEVIDO A CORRENTE PRIMÁRIA ASSIMÉTRICA COM NÚCLEO SATURADO	49
3.2.4 - TENSÃO DE PONTO JOELHO (U_s)	53
3.2.6 - TEMPO DE SATURAÇÃO (t_s)	54
3.2.7 FATOR DE SOBREDIMENSIONAMENTO (K_s)	54
3.3 - INFLUÊNCIA DA CARGA SECUNDÁRIA NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS TC's	56
3.4 - CONSTRUÇÃO DO MODELO DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE UTILIZANDO O ATP	57
3.4.1 - TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	57
3.4.2 - LEVANTAMENTO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO TC	60
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	63

CAPÍTULO IV - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
4.2 – DESEQUILÍBRIO	66
4.2.1 - MÉTODOS DE CÁLCULO DE DESEQUILÍBRIO	67
4.2.1.1 - COMPONENTES SIMÉTRICAS	67
4.2.1.2 - NORMAS	68
4.2.1.3 - NEMA (<i>National Electrical Manufactures Associantion</i>).....	69
4.2.1.4 - IEEE (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)	69
4.3 - ENSAIO	72
4.3.1 - DESCRIÇÃO DOS TESTES	73
4.3.2 - CASOS	75
Caso Base	75
Caso A	80
Caso B	84
Caso C	89
Caso D	93
Caso E	97
4.3.3 - SÍNTESES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	102
4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	104

CAPÍTULO V - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	105
5.2 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	106
5.2.1 - ARRANJO SISTEMA	106
5.2.2 - METODOLOGIA UTILIZADA	107
5.2.3 - ESTRUTURA DAS SIMULAÇÕES	108
<i>Caso Base</i>	108
<i>Caso A</i>	112
<i>Caso B</i>	115
<i>Caso C</i>	119
<i>Caso D</i>	122
<i>Caso E</i>	126
5.3 - ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE NEUTRO NOS TC's	129
5.3.1 - DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DE DESEQUILÍBRIO NOS SECUNDÁRIOS DOS TC's	130
<i>Caso A</i>	130
<i>Caso B</i>	131
<i>Caso C</i>	132
<i>Caso D</i>	133
<i>Caso E</i>	134
5.3.2 - <i>GROUND SENSOR</i>	135

5.4 - SÍNTESES DOS RESULTADOS DO ENSAIO COMPUTACIONAL	137
5.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	140

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES GERAIS

CONCLUSÕES GERAIS.....	142
------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
---------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Conexão de um Transformador de Corrente	10
Figura 2.2 - Diagrama Fasorial de um TC	12
Figura 2.3 - Transformadores de Corrente do Tipo Enrolado	18
Figura 2.4 - Transformadores de Corrente do Tipo Barra	18
Figura 2.5 - Transformadores de Corrente do Tipo Janela	19
Figura 2.6 - Transformadores de Corrente do Tipo Bucha	19
Figura 2.7 - Transformadores de Corrente do Tipo Núcleo Dividido	20
Figura 2.8 - Transformadores de Corrente de Vários Núcleos	21
Figura 2.9 - Transformadores de Corrente de Várias Relações de Transformação	22
Figura 2.10 - Transformadores de Corrente com duas derivações no secundário	23
Figura 2.11 - Transformador de Corrente com vários enrolamentos no primário e varias derivações no secundário	24
Figura 2.12 - Transformador de Corrente com vários enrolamentos no secundário (ligação série/paralela no secundário)	24
Figura 2.13 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (0,3 com 100% e 10% da corrente nominal)	32
Figura 2.14 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (0,6 com 100% e 10% da corrente nominal)	33
Figura 2.15 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (1,2 com 100% e 10% da corrente nominal)	33
Figura 2.16 - Circuito Equivalente do Transformador de Corrente	35
Figura 2.17 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador de Corrente	36
Figura 2.18 - Circuito Equivalente Simplificado do Lado do Secundário do Transformador de Corrente	37

Figura 2.19 - Curva de Excitação Secundária do TC	37
---	----

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Circuito equivalente simplificado desprezando as perdas por foucault e histerese.	41
Figura 3.2 - Curva de Saturação Linearizada por Parte	42
Figura 3.3 - Modelo simplificado de um sistema unifilar	42
Figura 3.4 - Variação da forma de onda do fluxo transitório no núcleo do TC sem considerar saturação	47
Figura 3.5 - Característica de magnetização usada para o estudo da forma de onda de i_2 com núcleo saturado	49
Figura 3.6 - Correntes primárias, secundárias e fluxo, considerando saturação	50
Figura 3.7 - Curva de Excitação Secundária	53
Figura 3.8 - Gráfico da Família de Curvas (constante de tempo de 0,04s)	55
Figura 3.9 - Operação de um TC com o circuito secundário em aberto	57
Figura 3.10 - Monofásico com dois enrolamentos	58
Figura 3.11 - Esquema para obtenção da curva de magnetização do TC	61
Figura 3.12 - Curva de Excitação dos TC's e a legenda das curvas	62

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Comparação entre os fatores de desequilíbrio de tensão calculados pelos diferentes métodos	71
Figura 4.2 - Diagrama do sistema em estudo	73
Figura 4.3 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	76
Figura 4.3 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	76
Figura 4.3 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	77
Figura 4.4 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A ...	77
Figura 4.4 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B ...	78
Figura 4.4 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C ...	78
Figura 4.5 - Corrente transitória de magnetização - neutro	79
Figura 4.6 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).	79
Figura 4.7 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	80
Figura 4.7 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	81
Figura 4.7 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	81
Figura 4.8 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A ...	82
Figura 4.8 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B ...	82
Figura 4.8 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C ...	83
Figura 4.9 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	83
Figura 4.10 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).	84
Figura 4.11 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	85
Figura 4.11 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	85
Figura 4.11 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	86
Figura 4.12 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	86
Figura 4.12 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	87
Figura 4.12 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	87
Figura 4.13 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	88
Figura 4.14 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).	88
Figura 4.15 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	89

Figura 4.15 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	90
Figura 4.15 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	90
Figura 4.16 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	91
Figura 4.16 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	91
Figura 4.16 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	92
Figura 4.17 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	92
Figura 4.18 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A)	93
Figura 4.19 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	94
Figura 4.19 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	94
Figura 4.19 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	95
Figura 4.20 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	95
Figura 4.20 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	96
Figura 4.20 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	96
Figura 4.21 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	97
Figura 4.22 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A)	97
Figura 4.23 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	98
Figura 4.23 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	99
Figura 4.23 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	99
Figura 4.24 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	100
Figura 4.24 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	100
Figura 4.24 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	101
Figura 4.25 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	102
Figura 4.26 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de <i>inrush</i> . Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A)	102

CAPÍTULO V

Figura 5.1 - Diagrama de ligação dos TC's e os referidos pontos de medições	107
Figura 5.2 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	108

Figura 5.2 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	109
Figura 5.2 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	109
Figura 5.3 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A ...	110
Figura 5.3 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B ...	110
Figura 5.3 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C ...	111
Figura 5.4 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	111
Figura 5.5 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	112
Figura 5.5 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	112
Figura 5.5 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	113
Figura 5.6 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	113
Figura 5.6 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	114
Figura 5.6 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	114
Figura 5.7 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	115
Figura 5.8 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	115
Figura 5.8 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	116
Figura 5.8 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	116
Figura 5.9 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	117
Figura 5.9 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	117
Figura 5.9 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	118
Figura 5.10 - Corrente transitória de magnetização mA neutro	118
Figura 5.11 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	119
Figura 5.11 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	119
Figura 5.11 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	120
Figura 5.12 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	120
Figura 5.12 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	121
Figura 5.12 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	121
Figura 5.13 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	122
Figura 5.14 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A.	122
Figura 5.14 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	123
Figura 5.14 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	123
Figura 5.15 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	124
Figura 5.15 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	124
Figura 5.15 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	125

Figura 5.16 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	125
Figura 5.17 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase A	126
Figura 5.17 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase B	126
Figura 5.17 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento primário da fase C	127
Figura 5.17 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase A .	127
Figura 5.18 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase B .	128
Figura 5.18 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C .	128
Figura 5.19 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	129
Figura 5.20 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	131
Figura 5.21 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	132
Figura 5.22 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	133
Figura 5.23 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	134
Figura 5.24 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro	135
Figura 5.25 - Configuração diferente do relé de falta pra terra	135
Figura 5.26 - Somatório das Correntes na Fase de Alta medida	137

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Limites do Fator de Correção da Transformação	15
Tabela 2.2 - Correntes nominais e relações nominais simples segundo ABNT	25
Tabela 2.3 - Correntes nominais e relações nominais duplas segundo ABNT	25
Tabela 2.4 - Correntes nominais e relações nominais triplas segundo ABNT	26
Tabela 2.5 - Relações nominais múltiplas	26
Tabela 2.6 - Sinais pra representação de correntes nominais e relações nominais	27
Tabela 2.7 - Aplicações dos Transformadores de Corrente	34

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Valores do ensaio de excitação do TC, tensão, corrente e fluxo	61
Tabela 3.2 - Valores Atribuídos ao Transformador Saturável no ATP	63

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Expressões para o cálculo de desequilíbrio de tensão	70
Tabela 4.2 - Valores de níveis de desequilíbrio	71
Tabela 4.3 - Síntese dos resultados	102

CAPÍTULO V

Tabela 5.1 - Mostra os relés de sobrecorrente e os seus respectivos elementos e as nomenclaturas	136
Tabela 5.2 - Quadro comparativo dos valores máximos das correntes nos enrolamentos e diferença percentual entre as estratégias computacional e experimental em cada enrolamento	138
Tabela 5.3 - Comparação das correntes de neutro entre as estratégias experimental e computacional	138
Tabela 5.4 - Comparação do valor da corrente de neutro da a simulação computacional com a alternativa de diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's	139

LISTA DE SÍMBOLOS

β	ângulo de fase.
Ft_1	fator térmico da menor relação nominal.
Rn_1	menor relação nominal.
Rn_2	outra(s) relação(ões) nominal(is).
ϕ	fluxo magnético.
λ	fluxo concatenado.
φ	ângulo contado a partir de $u = 0$ até o instante $t = 0$.
μ	permeabilidade magnética [H/m].
γ	constante.
$\varepsilon\%$	erro de relação percentual.
θ_0	defasamento angular da corrente de excitação .
θ_2	defasamento angular da corrente I_2 .
$\Delta V_{\text{Máx}}$	maior desvio entre as tensões trifásicas e o valor médio (V_{Med}), expresso em Volt.
A	área da seção reta do núcleo [m^2].
B	densidade de campo magnético [T].
C	carga nominal.
E_1	tensão eficaz no enrolamento primário.
E_2	tensão eficaz no enrolamento secundário.
F	fator de sobrecorrente nominal.
$\text{FDV}\%$	fator de desequilíbrio de tensão, expresso em porcentagem da tensão média.
F_t	fator térmico nominal.
H	intensidade do campo magnético [A-espira/m].
I_ϕ	corrente magnetização.
I_0	corrente de excitação.
I_1	corrente no enrolamento primário.
i_1	corrente primária eficaz.

i_2	corrente secundária eficaz.
I_{1n}	corrente nominal primária.
I_2	corrente no enrolamento secundário.
I_{2n}	corrente nominal secundária.
I_p	corrente de perdas responsável pelas perdas no núcleo.
K	fator de desequilíbrio.
K_c	relação nominal.
n	relação de espiras.
K_r	relação efetiva ou relação verdadeira.
K_S	fator de sobredimensionamento.
l	comprimento médio da trajetória magnética [m].
L_1	indutância do enrolamento primário.
L_2	indutância do enrolamento secundário.
L_L	indutância da linha..
L_S	indutância do sistema.
n_1	número de espiras do enrolamento primário.
n_2	número de espiras do enrolamento secundário.
P	terminal do enrolamento primário.
P_0	perdas totais medidas durante o ensaio a vazio.
P_{fe}	perdas no ferro do TC obtidas do ensaio a vazio.
R_1	resistência no circuito primário.
R_2	resistência no circuito secundário.
R_{cc}	resistência do enrolamento.
R_L	resistência da linha.
R_{MAG}	resistência de magnetização.
R_S	resistência do sistema.
S	terminal do enrolamento secundário.
T_1	constante de tempo primária.
T_2	constante de tempo secundária.
t_s	tempo de saturação.
u	valor eficaz da tensão.
U	valor máximo da tensão induzida “valor de pico”.

U_S	tensão de ponto joelho.
V_-	módulo da tensão de seqüência negativa.
V_+	módulo da tensão de seqüência positiva.
V_1	tensão no enrolamento primário.
V_2	tensão no enrolamento secundário.
V_a, V_b e V_c	módulo das tensões trifásicas.
V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}	módulo das tensões fase-fase.
$V_{máx}$	maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas.
$V_{médio}$	tensão calculada pela média aritmética das tensões trifásicas expressa em Volt.
$V_{mín}$	menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas.
wt	ângulo de tempo e é expresso em radianos.
X_1	reatância no circuito primário.
X_2	reatância no circuito secundário.
X_{cc}	reatância do enrolamento.
Z'_1	impedância do enrolamento primário, referido ao secundário.
Z'_m	impedância de magnetização do transformador, referida ao secundário.
Z_1	impedância do enrolamento primário.
Z_2	impedância do enrolamento secundário.
Z_c	impedância de carga.

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização de transformadores de corrente com núcleo de ferro nos sistemas de proteção de usinas geradoras e subestações tem sido feito com sucesso. Neste meio tempo, tornou-se necessário efetuar-se sucessivas modificações no projeto desses dispositivos, devido à própria evolução do sistema elétrico de potência de alta e extra-alta tensão. Com isso, aumentou a necessidade de se transmitir grandes blocos de potência sem que houvesse qualquer alteração na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica para manter a Qualidade da Energia Elétrica, contudo, tornou-se necessário:

- Eliminação mais rápida das faltas;
- Confiabilidade e eficiência da atuação da proteção;
- Aumento das correntes de curto-circuito.

Isto exige que, durante uma falta, os relés devem ser corretamente sensibilizados, mesmo considerando as situações adversas.

As correntes de falta, geralmente, apresentam duas componentes, uma alternada e a outra contínua com decréscimo exponencial, a qual pode levar o núcleo do transformador de corrente a uma saturação cuja forma de onda da

corrente secundária do transformador fornecida ao relé seja distorcida durante os primeiros ciclos, podendo ocasionar alguns problemas tais como:

- a. Os relés são sensibilizados quando não deveriam ser;
- b. Os relés não são sensibilizados quando deveriam ser;
- c. Os relés não são sensibilizados com a rapidez suficiente desejada para evitarem certas anormalidades, como por exemplo, instabilidade do sistema de potência.

Essas ocorrências podem implicar numa maior extensão dos danos de natureza térmica e eletrodinâmica (**b** e **c**), perda de seletividade na proteção, ocasionando maiores prejuízos na continuidade de serviço (**a**, **b** e **c**) e perdas de estabilidade do sistema (**b** e **c**).

1.2 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desta dissertação consiste no estudo das correntes na conexão dos neutros dos transformadores de corrente durante o processo de energização de um transformador de potência. Tal corrente, de acordo com relatos e constatações através de ensaios realizados em laboratório, pode ocasionar o desligamento e interrupções, causando grandes prejuízos [32].

Dentre os objetivos a serem almejados nesta dissertação, destacam-se, sobretudo, em identificar a natureza e os motivos que podem ocorrer durante o processo de *irunsh* do transformador de potência.

1.3 - ESTADO DA ARTE

A primeira publicação relacionada ao estudo do desempenho dos TC's em regime transitório foi feita por MARSHALL e LANNGUTH (1929). Pouco mais de uma década foi a vez de WENTZ e SONNEMANN (1940) que estudaram os efeitos no desempenho dos TC's empregados nos esquemas de proteção diferencial. O trabalho da referência [1] realizou investigações acerca da influência do fluxo residual nos esquemas de proteção citados. A citação da referência [2] foi mais além, apresentando um desenvolvimento teórico baseado num modelo linearizado. Além disso, o autor deduziu uma expressão para o cálculo aproximado do tempo que o transformador de corrente leva para saturar a partir do instante de ocorrência de um defeito.

Os artigos [3] e [4] apresentaram sugestões para o projeto dos TC's com o objetivo de melhorar o desempenho dos mesmos em regime transitório em [5] e [35] estabeleceu-se uma análise comparativa acerca de três diferentes formas não convencionais de projeto de TC's, com o mesmo objetivo.

Em 1976 o "Institute of Electrical and Eletronics Engineers" - IEEE, através de um grupo de estudos, publicou um relatório no qual foram resumidos os principais aspectos relacionados ao comportamento transitório dos TC's, além de serem apresentadas importantes considerações acerca da influência desses transitórios em diferentes esquemas de proteção. A partir de um modelo linearizado, o artigo [14] define uma solução analítica que permitiu o estabelecimento de um conjunto de curvas destinadas à obtenção gráfica dos tempos de saturação.

No entanto, os trabalhos citados anteriormente, baseiam-se em modelos simplificados, nos quais a não-linearidade e os efeitos de histerese e das correntes parasitas no núcleo não são considerados.

A consideração da não-linearidade do núcleo somente tornou-se praticável a partir da utilização do computador. Com este recurso, as características de magnetização dos TC's puderam ser representadas com maior exatidão. Funções dos mais diferentes tipos e graus de precisão foram usadas para representar a curva, fluxo versus corrente de magnetização dos núcleos ferromagnéticos [6] e [7].

O estudo do comportamento transitório dos transformadores de corrente destinados à proteção de sistemas elétricos foi compreendido em [8], [9], [13], [33] e [34].

O efeito de histerese foi considerado por [10], [11], bem como [12]. Isto deu lugar a uma melhor avaliação teórica dos efeitos do fluxo residual no núcleo sobre o desempenho transitório dos TC's. Nos dois primeiros trabalhos, são propostos métodos relativamente simples e de boa precisão. No terceiro, a precisão superior do que os dois trabalhos anteriores, sendo a histerese representada através de um algoritmo, contudo, tanto os efeitos do fluxo residual no núcleo e a histerese, pouco interferem no comportamento dos TC's.

A contemplação do estudo referente à filosofia de proteção dos sistemas foi advindo das referências [15], [16], [17], [18] e [22].

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT [19], [20] e [21], prescreve regras que permitem definir os métodos para execução de ensaios e apresentam características e especificações gerais de transformadores de corrente.

As referências [23] e [24] mostram os princípios fundamentais e as aplicações dos relés de proteção em sistemas elétricos de potência.

O estudo de faltas causado por surtos é geralmente de extrema importância para que possa se evitar que um sistema de potência venha ser prejudicado, para um bom planejamento da operação, melhoria e expansão de um sistema de potência [25] e [26].

O artigo [27] estabelece uma análise do desempenho da proteção diferencial de um transformador trifásico de potência modelado na ferramenta computacional ATP.

Conforme as referências [28], [29] e [39] quando o transformador de potência é energizado, a sua corrente de magnetização sofre um alto surto causando atuação dos equipamentos de proteção contra sobrecorrentes devido à saturação desses transformadores.

O artigo [30] discute os problemas encontrados com a operação do relé quanto à saturação dos TC's devido a altas correntes de falta e a solução atribuída para esse caso, foi à utilização de um sensor de terra, conhecido como *ground sensor*.

As referências [36], [37] e [38] contemplam a apresentação das normas internacionais e nacionais no que tange as definições de desequilíbrios, formulações e índices de conformidade.

1.4 - PROGRAMA ATP

Nesta dissertação utilizou-se o ATP (*Alternative Transient Program*) é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos sobre transitórios em sistema de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente, onde a topologia da rede ou o problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitâncias de barras. A formulação matemática baseia-se no método das características (método de *Bergeron*) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a

solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O programa permite a representação de dispositivos com parâmetros concentrados ou distribuídos e componentes não lineares, tais como: transformadores, reatores, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade.

De um modo geral, as informações necessárias para o procedimento de casos no ATP envolvem o fornecimento de um arquivo de dados contendo informações gerais tais como, por exemplo: passo de integração, tempo máximo de simulação e informações específicas que descrevem a rede elétrica, como chaves, fontes de tensão ou corrente e ainda uma especificação de saída de resultados [31].

Além disso, o ATP possui diversas sub-rotinas auxiliares, dentre as quais se destaca a TACS (*Transient Analysis Control System*), onde nesta dissertação, foi utilizada uma TACS HYBRID, que por sinal tem a finalidade de efetuar o somatório das correntes nas fases da alta para sensibilizar a proteção ligada no enrolamento secundário dos TC's.

1.5 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho encontra-se assim estruturado:

Capítulo II - Considerações sobre Transformadores de Corrente

Neste capítulo são enfocados princípios básicos, referentes a teoria dos transformadores de corrente como as características construtivas, tipos, campos de aplicação, valores nominais especificado pela norma da ABNT.

Capítulo III - Análise e Modelagem dos Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção

É apresentada uma modelagem simplificada dos TC's, onde são desprezados os efeitos de histerese e de correntes parasitas no núcleo, sendo este representado apenas pela curva de saturação linearizada por partes (região não saturada e região saturada). A transformada de Laplace é empregada na resolução das equações diferenciais que descrevem o modelo.

Capítulo IV - Ensaios Experimentais

Neste capítulo são realizados os ensaios experimentais, com a preocupação do estudo da corrente de neutro nos TC's conectados em estrela aterrado devido a desequilíbrios nas cargas dos secundários dos transformadores de corrente.

Capítulo V - Ensaios Computacionais

Nesse capítulo consiste na validação do modelo e foi realizado os ensaios computacionais utilizando a ferramenta computacional ATP, retratando o estudo

das correntes de neutro dos transformadores de corrente, a propósito de implementar uma alternativa para que as proteções em si, não vêm ser sensibilizadas de maneira inadequadas durante uma simples processo de energização de um transformador de potência.

Capítulo VI - Conclusões Gerais

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais dos vários capítulos que formam o corpo desta dissertação. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CONSIDERAÇÕES SOBRE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1 - INTRODUÇÃO

O gerenciamento da energia elétrica requer a implementação de unidades de processamento da informação capazes de monitorar redes ou equipamentos e, conforme as necessidades, iniciar as ações apropriadas. Os dados provenientes dos sensores são processados por unidades de proteção e de comando, que enviam ordens de manobra à aparelhagem e/ou informações a uma unidade de supervisão ou a um centro de controle.

A tarefa que consiste em identificar e dimensionar os sensores de corrente e associá-los às unidades de proteção e/ou de medição, sempre apresentou dificuldades, tanto para engenheiros eletricitas (sobredimensionamento das características) como para os fabricantes (viabilidade incerta, tamanho excessivo e custos proibitivos).

Esse capítulo retoma demonstrações técnicas difundidas na literatura existente. Seu objetivo é recordar algumas regras simples que permitem definir melhor as características de um transformador de corrente “TC”.

2.2 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente são instrumentos monofásicos e empregados na medida da corrente que flui em um condutor em um circuito de corrente alternada ou para alimentar relés de proteção do mesmo circuito. Os TC's destinam-se a evitar a conexão direta de instrumentos de medição e proteção nos circuitos de corrente alternada de alta tensão. Permite, desta forma, isolar o circuito de alta tensão dos instrumentos de medição (amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros e etc.) e proteção (relés, por exemplo), bem como adaptar a grandeza a medir, no caso a corrente, em uma proporção conhecida e de modo a assegurar uma medição mais favorável e segura.

A conexão esquemática de ligação de um transformador de corrente a um circuito está representada na figura 2.1.

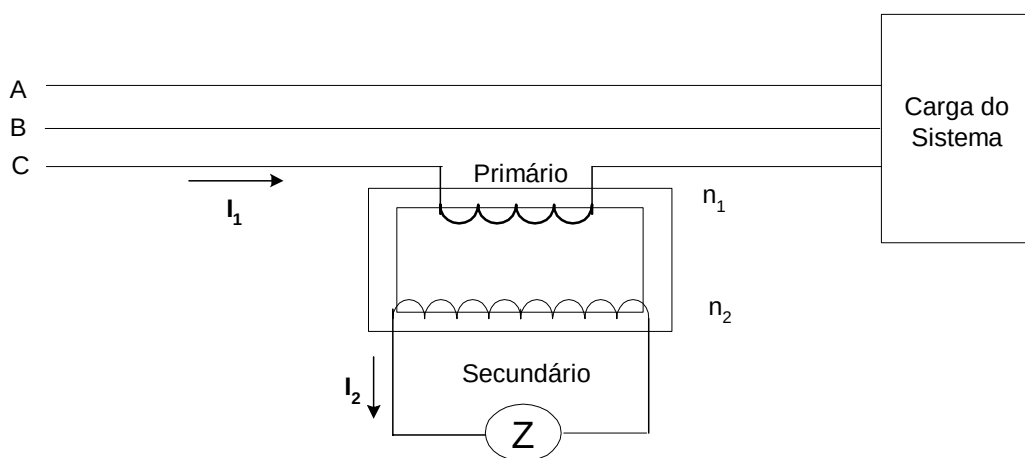


Figura 2.1 - Conexão de um Transformador de Corrente.

Os TC's tem geralmente poucas espiras no primário, e dependendo do valor da corrente primária, este pode ter apenas uma espira, normalmente os circuitos primários e secundários são enrolados do mesmo lado do núcleo de modo a reduzir o fluxo de dispersão entre enrolamentos a um valor baixo.

Uma primeira observação essencial é que a corrente I_1 (corrente no enrolamento primário) é definida pelo circuito externo, pela carga do sistema, e,

portanto não depende da carga Z do(s) instrumento(s) ligado(s) no secundário do TC. Como são empregados para alimentar instrumentos de baixa impedância (amperímetros, bobinas de corrente de wattímetro, de medidores de watt-hora e bobinas de corrente de diversos relés), diz-se que são transformadores que funcionam com o secundário quase em curto circuito permitindo a circulação de uma corrente secundária proporcional à primária em módulo e com a menor defasagem angular possível entre ambos.

2.2.1 - RELAÇÃO NOMINAL (K_c)

A relação de transformação nominal de um TC é a relação entre a corrente nominal primária e a corrente nominal secundária, esse dado é apresentado na placa do TC [20] e [21].

$$K_c = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad (2.1)$$

2.2.2 - RELAÇÃO DE ESPIRAS (n)

A relação de espiras é a relação entre o número de espiras do enrolamento secundário e o número de espiras do enrolamento primário [20] e [21].

$$n = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

2.2.3 - RELAÇÃO EFETIVA (K_r)

A relação efetiva como o próprio nome diz, é a relação entre a corrente primária e a corrente secundária, sendo ambas, medidas em termos de valores eficazes [20], [21] e [34].

$$K_r = \frac{I_1}{I_2} \quad (2.3)$$

De posse do significado dessas grandezas, pode-se definir o transformador de corrente ideal.

Para o “transformador de corrente ideal”, conclui-se que as correntes primária e secundária são inversamente proporcionais ao respectivo número de espiras, isto é:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.4)$$

O diagrama fasorial do TC é ilustrado na figura 2.2

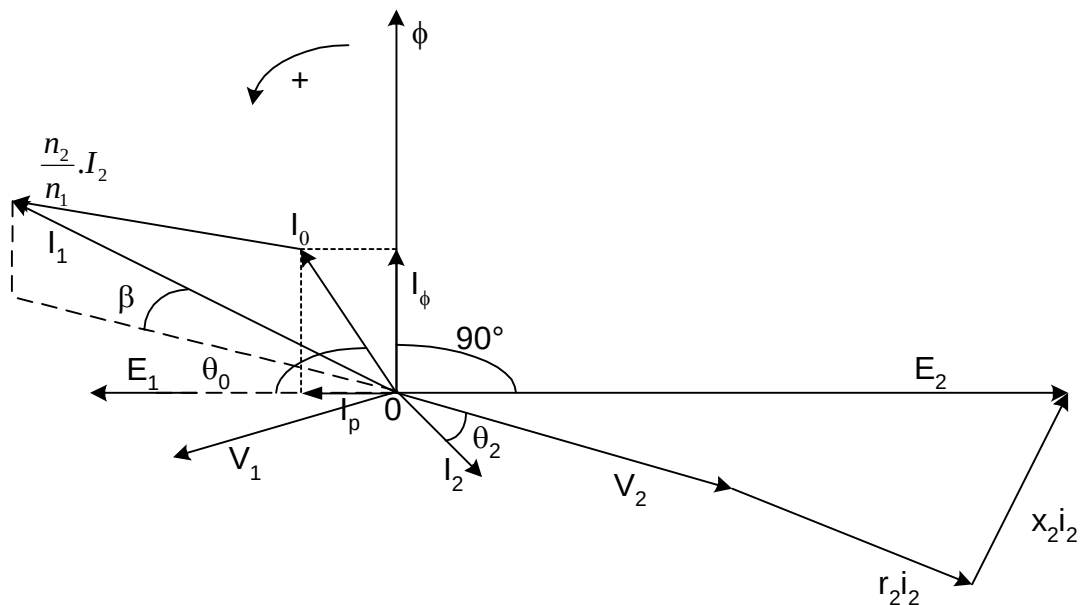


Figura 2.2 - Diagrama Fasorial de um TC.

onde,

I_ϕ - corrente magnetização

I_0 - corrente de excitação

I_p - corrente de perdas responsável pelas perdas no núcleo

β - ângulo de fase

ϕ - fluxo magnético

θ_0 - defasamento angular da corrente de excitação

θ_2 - defasamento angular da corrente I_2

V_1 - tensão no enrolamento primário

V_2 - tensão no enrolamento secundário

E_1 - tensão eficaz no enrolamento primário

E_2 - tensão eficaz no enrolamento secundário

I_1 - corrente no enrolamento primário

I_2 - corrente no enrolamento secundário

n_1 - número de espiras do enrolamento primário

n_2 - número de espiras do enrolamento secundário

r_2 - resistência no circuito secundário

x_2 - reatância no circuito secundário

A relação de transformação do transformador de corrente será fortemente influenciada pela corrente de excitação, o que provocará um “erro de relação” e, ao mesmo tempo, um “erro de fase”.

a. Erro de Relação

Como pode ser observado na figura 2.2, a corrente de excitação I_0 , composta da corrente magnetizante I_ϕ , responsável pela produção do fluxo ϕ , e da corrente associada às perdas no núcleo I_p (histerese e correntes de foucault), causa um pequeno erro que é definido como de relação.

Para a correção do erro de relação, deve-se definir o conceito de “fator de correção de relação”.

O Fator de Correção de Relação (FCR) é o fator pelo qual deve ser multiplicada a relação nominal de um transformador para instrumentos, para se obter a sua relação real em uma dada condição de funcionamento, o qual é dado por:

$$FCR = \frac{K_r}{K_c} \quad (2.5)$$

onde:

K_r – é a relação efetiva ou verdadeira

K_c – é a relação nominal

O erro de relação percentual ($\varepsilon\%$), é definido pela expressão:

$$\varepsilon\% = 100 (FCR - 1) \quad (2.6)$$

b. Erro de Fase

Como pode ser observado no diagrama fasorial da figura 2.2, a corrente primária I_1 é defasada da corrente secundária I_2 por um ângulo de $180^\circ \pm \beta$. O ângulo de 180° é compensado pela marcação correta da polaridade do TC, como mostra o diagrama fasorial da figura 2.2, e o ângulo $\pm \beta$, se constitui no erro de fase do transformador, devido a corrente de excitação I_0 .

O ângulo β será positivo quando a corrente secundária ($-I_2$) for adiantada da corrente primária I_1 , e será negativo quando a corrente secundária ($-I_2$) for atrasada da corrente primária I_1 .

Os erros de fase e de relação não são valores fixos em um dado TC, dependem da corrente primária, frequência, forma de onda da corrente primária e da carga secundária incluindo os cabos secundários. Sob condições normais, onde a frequência e a forma de onda da corrente primária são praticamente

constantes, tais erros dependem principalmente da magnitude da corrente primária e da carga secundária incluindo o efeito dos cabos secundários.

Para a correção do erro de fase, deve-se definir o conceito de “fator de correção da transformação”.

Fator de Correção da Transformação (FCT) é o fator pelo qual a leitura ou o registro de um instrumento de medição deve ser multiplicado, para corrigir o erro de relação e do ângulo de fase β do transformador de corrente.

A ABNT, transcreve-se as duas observações [20]:

Os limites do fator de correção da transformação (FCT) podem ser considerados os mesmos limites do fator de correção da relação (FCR), quando o fator de potência da carga é unitário, visto que, nestas condições, o ângulo de fase (β) do TC, por ser pequeno, não introduz erros significativos.

Assim, o cálculo do fator de correção dar-se-ia como:

$$\beta = 2600 \cdot (FCR - FCT) \quad (2.7)$$

Tabela 2.1 - Limites do Fator de Correção da Transformação.

Classe de Exatidão	Limite do Fator de Correção da Relação e Fator de Correção da Transformação				Limite de Fator de Potência (atrasado) da Carga Medida
	100% Corrente Nominal		10% Corrente Nominal		
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
1,2	0,988	1,012	0,976	1,024	0,6 - 1,0
0,6	0,994	1,006	0,988	1,012	0,6 - 1,0
0,3	0,997	1,003	0,994	1,006	0,6 - 1,0

O fator de correção da transformação (FCT) assume os valores máximos e mínimos, visto na tabela 2.1, e o fator de correção da relação (FCR) é o calculado para o transformador de corrente nas condições em que estiver sendo analisado.

2.3 - FATORES QUE DEVERÃO SER CONSIDERADOS NA SELEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.3.1 - TIPO DE SERVIÇO

Os transformadores de corrente classificam-se em dois tipos:

- Transformadores de corrente para serviço de medição;
- Transformadores de corrente para serviço de proteção.

2.3.2 - TIPO DE INSTALAÇÃO

Os transformadores de corrente são projetados normalmente para instalação em local com altitude não superior a 1000 metros, com temperatura ambiente máxima de 40°C, mínima de -10°C e média diária de 30°C.

Podem ser construídos para uso interior ou exterior. Por motivos de economia, geralmente as instalações até 15 kV inclusive, são do tipo interior e as demais são do tipo exterior.

2.3.3 - TIPO DE ISOLAMENTO

Normalmente os transformadores de corrente possuem isolamento de classe A (transformadores de corrente que possuem uma alta impedância secundária) ou classe B (transformadores de corrente que possuem uma baixa impedância secundária), conforme os materiais isolantes usados. Por motivos de economia, geralmente os transformadores de corrente construídos para uso

interior são secos e os construídos para uso exterior são envoltos em massa isolante ou imersos em líquido isolante.

2.3.4 - TIPOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTES DE ACORDO COM A CONSTRUÇÃO MECÂNICA

Os transformadores de corrente são classificados conforme a construção física em:

- a. Tipo enrolado;
- b. Tipo barra;
- c. Tipo janela;
- d. Tipo bucha;
- e. Núcleo dividido;
- f. Vários núcleos;
- g. Várias relações de transformação.

2.3.4.1 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO ENROLADO

O TC do tipo enrolado mostrado na figura 2.3 possui os enrolamentos primário e secundário completamente isolados e permanentemente montados no núcleo. O enrolamento primário é usualmente constituído de uma ou mais espiras [20].

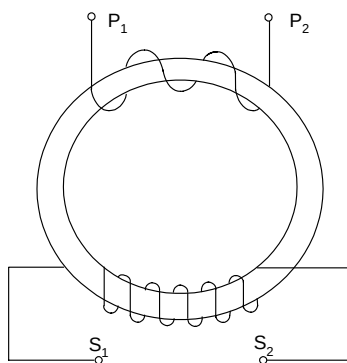


Figura 2.3 - Transformadores de Corrente do Tipo Enrolado.

2.3.4.2 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO BARRA

O TC do tipo barra, possui os enrolamentos primário e secundário completamente isolados e permanentemente montados no núcleo. O primário consiste de uma barra, montada permanentemente através do núcleo do transformador como mostra a figura 2.4 [20].

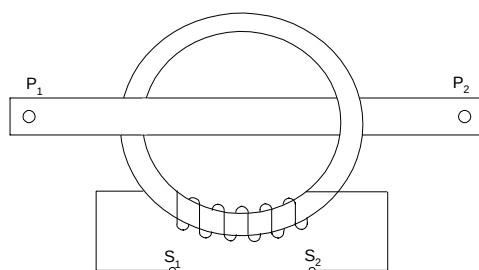


Figura 2.4 - Transformadores de Corrente do Tipo Barra.

2.3.4.3 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO JANELA

O TC do tipo janela mostrado pela figura 2.5, possui o enrolamento secundário completamente isolado e permanentemente montado no núcleo, mas não possui enrolamento primário.

Esse tipo de TC é construído com uma abertura através do núcleo, por onde passará um condutor do circuito primário, formando uma ou mais espiras. O enrolamento primário pode ser uma barra ou um outro condutor. Nesse caso o TC difere do caso anterior apenas pela utilização do próprio condutor [20].

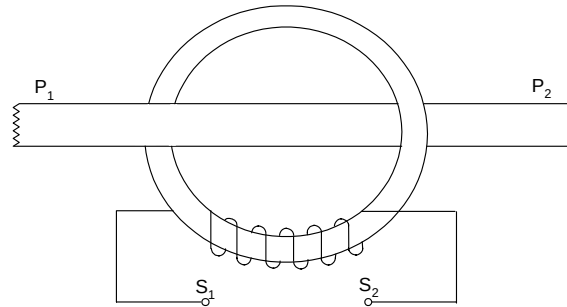


Figura 2.5 - Transformadores de Corrente do Tipo Janela.

2.3.4.4 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO BUCHA

Este tipo possui o enrolamento secundário completamente isolado e permanentemente montado no núcleo, mas não possui enrolamento primário ou isolação para o enrolamento primário, ver figura 2.6. O transformador é projetado para ser instalado sobre uma bucha de um equipamento elétrico, fazendo parte integrante deste [20].

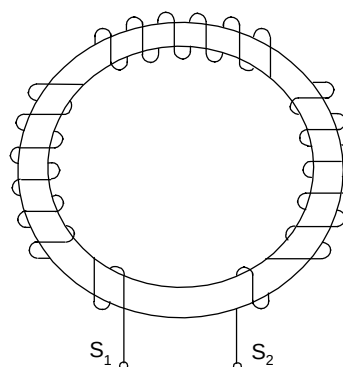


Figura 2.6 - Transformadores de Corrente do Tipo Bucha.

2.3.4.5 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DO TIPO NÚCLEO DIVIDIDO

Este tipo possui o enrolamento secundário completamente isolado e permanentemente montado no núcleo, mas não possui enrolamento primário, como mostrado pela figura 2.7. Pode ou não ter isolação para enrolamento primário. Parte do núcleo é separável ou articulada para permitir o abraçamento do condutor primário [34]. Um tipo muito difundido de instrumentos com núcleo dividido é o “alicate” amperimétrico.

A peça principal deste transformador é o núcleo seccionado, composto de chapas finas de ferro, sobre o qual se enrola o circuito secundário. As duas metades do núcleo são movimentadas mediante um mecanismo articulado, sendo que as mesmas se apertam uma contra a outra através de um sistema tipo mola. O primário neste caso é constituído pelo condutor abraçado pelo núcleo do TC.

No caso da grandeza medida ser insuficiente para a deflexão do ponteiro de modo a se obter uma boa leitura, o procedimento é enrolar o circuito primário, dando tantas voltas quantas necessárias, fazendo com que a grandeza do primário seja multiplicada pelo número de voltas. Utilizando este artifício, não se deve esquecer que a leitura no instrumento deve ser dividida pelo número de voltas dadas.

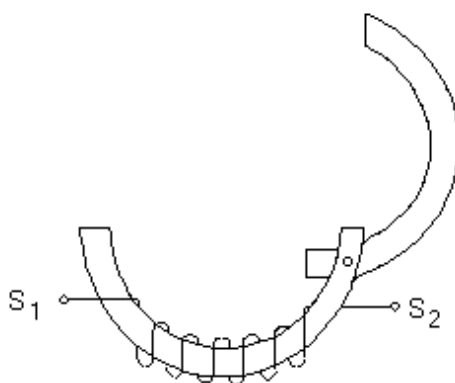


Figura 2.7 - Transformadores de Corrente do Tipo Núcleo Dividido

2.3.4.6 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE VÁRIOS NÚCLEOS

É encontrado freqüentemente em circuitos de alta tensão e extra alta tensão. Trata-se de um TC com vários enrolamentos secundários isolados separadamente e assim montados cada um em seu próprio núcleo, formando assim um conjunto com um único enrolamento primário, cuja espira ou até as mesmas espiras, envolvem todos os secundários, onde um dos enrolamentos secundários é destinado à medição e o outro ou os outros, são destinados à proteção, como mostra a figura 2.8. [34].

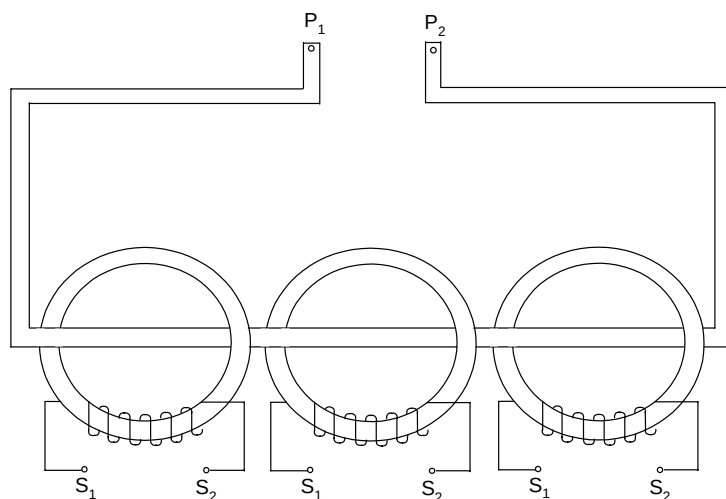


Figura 2.8 - Transformadores de Corrente de Vários Núcleos.

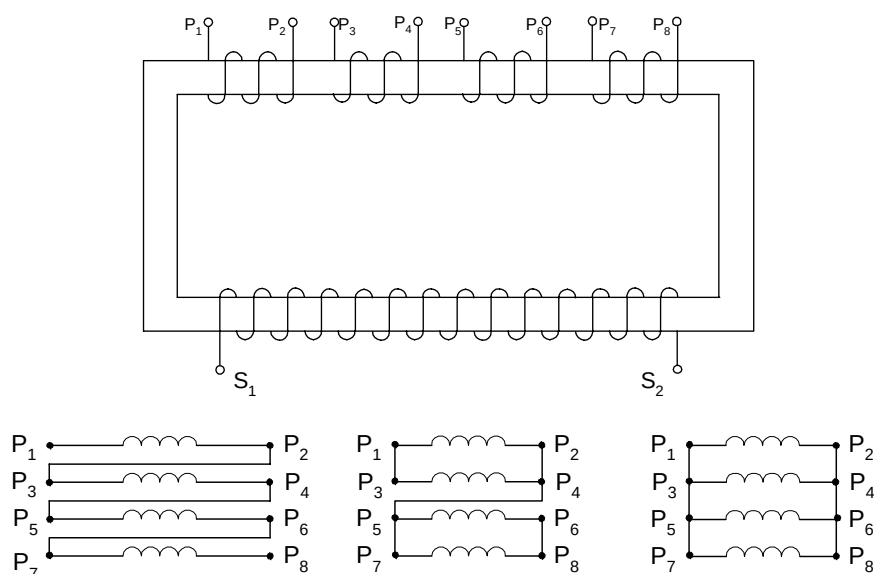
É importante observar que, assim como nos TC's em geral todos os secundários que não estiverem alimentando instrumentos elétricos deverão permanecer curto-circuitados. O primário é um elemento comum a todos os núcleos. Mas cada núcleo com o seu secundário próprio atua como um TC independente dos outros [34].

2.3.4.7 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE VÁRIAS RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO

Os transformadores de corrente podem ser construídos para uma única relação de transformação ou para múltipla relação de transformação, sendo que esse último caso será analisado a seguir [20] e [34].

a. TC com vários enrolamentos no primário

A figura 2.9 mostra um TC cujo secundário tem um número fixo de espiras e o seu primário é constituído de várias bobinas idênticas entre si, cada uma tendo n espiras, as quais podem ser associadas tanto em série ou em paralelo, possibilitando assim uma ampla relação de transformação. Para exemplificar, a figura 2.9 ilustra um TC que tem em seu enrolamento primário três correntes primárias nominais: 150A, 300A e 600A. As figuras 2.9a, 2.9b e 2.9c mostram as combinações que devem ser feitas no primário para a obtenção das três relações de transformação nominais. Diz-se na prática que estes TC's são de relações nominais múltiplas com ligação série / paralela no enrolamento primário.



a - ligação 150 / 5A

b - ligação 300 / 5A

c - ligação 600 / 5A

Figura 2.9 - Transformadores de Corrente de Várias Relações de Transformação.

b. Transformadores de Corrente com várias derivações no secundário

A figura 2.10 mostra um TC com várias derivações no secundário, cujo primário possui agora um número fixo n de espiras e o secundário tem duas derivações que permitem utilizar o TC como por exemplo, 50/5A ou como 100/5A. A seção do condutor do enrolamento primário é dimensionada em relação a maior das correntes para as quais o TC é projetado.

Normalmente, a classe de exatidão especificada pelo comprador para TC's com derivações no secundário é garantida pelo fabricante apenas no funcionamento com o maior número de espiras. Os TC's destinados ao serviço de proteção podem ser aceitos, pois a classe de exatidão desses TC's é de 10%, isto é, o erro de relação pode ser de até 10%, não havendo limite para o ângulo de fase [34].

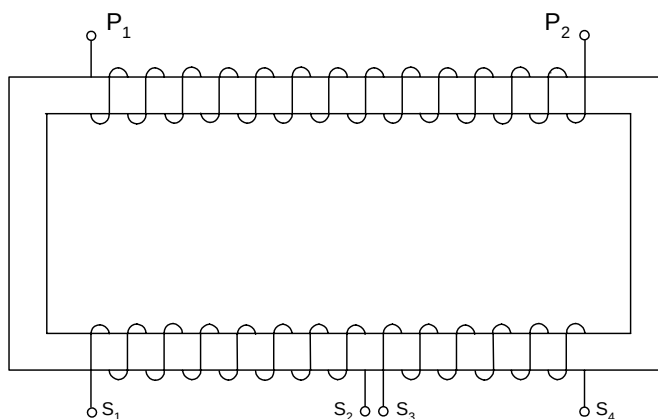


Figura 2.10 - Transformadores de Corrente com duas derivações no secundário

c. Transformador de Corrente com vários enrolamentos no primário e varias derivações no secundário

Esse terceiro tipo pode englobar os dois tipos de TC's citados anteriormente, permitindo assim a utilização de um TC com muitas variedades quanto às relações de transformação. A figura 2.11 mostra esquematicamente, a disposição dos enrolamentos de acordo com os TC's existentes na prática. Nos TC's com várias derivações no secundário, não podem ser utilizadas, ao mesmo tempo, duas ou mais derivações para alimentarem instrumentos elétricos. Apesar

de que, pode-se apenas utilizar uma das derivações, permanecendo as outras abertas (não curto-circuitadas) a fim de estas não interferiram nos resultados [34].

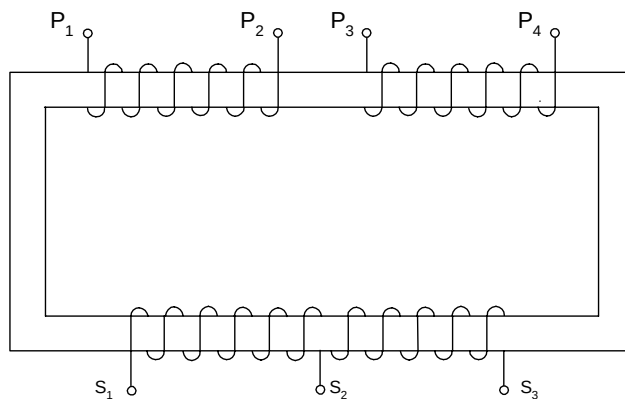


Figura 2.11 - Transformador de Corrente com vários enrolamentos no primário e varias derivações no secundário.

d. Transformador de Corrente com vários enrolamentos no secundário (ligação série/paralela no secundário)

Consiste em um TC para fins de proteção, e este construído somente sob encomenda específica do comprador interessado o qual o aplicará em circuitos bem definidos da sua instalação. A figura 2.12 mostra um TC deste tipo em que o secundário tem dois enrolamentos com n espiras, podendo isto permitir três relações de transformações nominais.

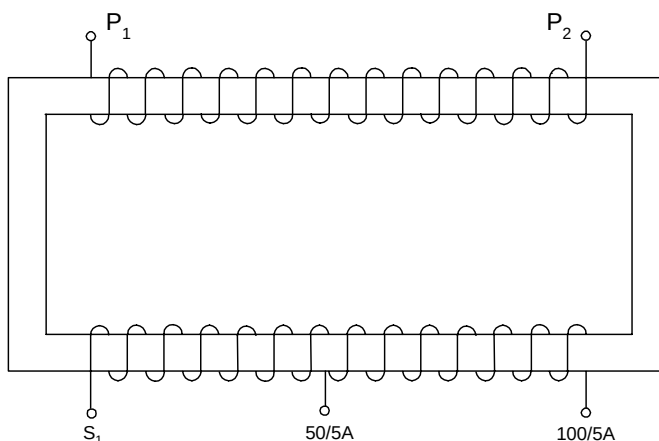


Figura 2.12 - Transformador de Corrente com vários enrolamentos no secundário (ligação série/paralela no secundário).

2.4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS TC's

Conforme a norma da ABNT/NBR 6856, os valores nominais que caracterizam um transformador de corrente são os seguintes [20]:

- a. Corrente(s) nominal (is) e relação (ões) nominal (is);
- b. Frequência nominal;
- c. Classe de tensão de isolamento nominal;
- d. Fator de sobrecorrente nominal;
- e. Fator térmico nominal;
- f. Limite de corrente de curta duração nominal para efeito térmico;
- g. Limite de corrente de curta duração nominal para efeito mecânico;
- h. Carga nominal;
- i. Classe de exatidão.

2.4.1 - CORRENTE(S) NOMINAL(IS) E RELAÇÃO(ÕES) NOMINAL(IS)

As correntes primárias nominais e relações nominais de transformação segundo a ABNT/NBR 6856 são exemplificadas nas tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 a seguir. A corrente secundária nominal está fixada em 5A.

Tabela 2.2 - Correntes nominais e relações nominais simples segundo a ABNT.

Corrente primária nominal (A)	5	10	20	25	30	40	50	60	75
Relação nominal	1:1	2:1	4:1	5:1	6:1	8:1	10:1	12:1	15:1

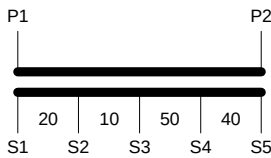
Tabela 2.3 - Correntes nominais e relações nominais duplas segundo a ABNT

Corrente primária nominal (A)	5 x 10	10 x 20	15 x 30	20 x 40	25 x 50
Relação nominal	1 x 2:1	2 x 4:1	3 x 6:1	4 x 8:1	5 x 10:1

Tabela 2.4 - Correntes nominais e relações nominais triplas segundo ABNT

Corrente primária nominal (A)	25 x 50 x 100	50 x 100 x 200	75 x 150 x 300
Relação nominal	5 x 10 x 20:1	10 x 20 x 40:1	15 x 30 x 60:1

Tabela 2.5 - Relações nominais múltiplas

Designação Genérica	Derivações Principais	Esquema	Corrente primária nominal (A)	Relação Nominal	Derivações secundárias
RM 600 – 5A	100/150/400 /600 - 5A		50	10:1	S2 – S3
			100	20:1	S1 – S2
			150	30:1	S1 – S3
			200	40:1	S4 – S5
			250	50:1	S3 – S4
			300	60:1	S2 – S4
			400	80:1	S1 – S4
			450	90:1	S3 – S5
			500	100:1	S2 – S5
			600	120:1	S1 – S5

Nota: Podem ser utilizadas, também, correntes secundárias nominais de 1A e 2A. Neste caso, os valores das tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 devem ser recalculados [21].

2.4.1.1 - REPRESENTAÇÃO

Em virtude da diversificação na representação dos transformadores de corrente, é transcrita neste item a representação adotada pela norma ABNT [20].

Todo transformador de corrente deve possuir indicações tais como:

- Correntes primárias nominais em ampére e correntes secundárias nominais em ampére;
- Relações nominais.

As correntes primárias nominais e as relações nominais devem ser representadas em ordem crescente, conforme a representação mostrada na tabela 2.6 e seus respectivos exemplos abaixo.

Tabela 2.6 - Sinais para representação de correntes nominais e relações nominais.

Sinal	Função
:	Representar relações nominais.
-	Separar correntes nominais e relações nominais de enrolamentos diferentes.
X	Separar correntes nominais e relações nominais obtidas de um enrolamento cujas bobinas podem ser ligadas em série ou em paralelo.
/	Separar correntes nominais e relações nominais obtidas por derivações, sejam estas no enrolamento primário ou secundário.

- a. TC com um enrolamento primário e um enrolamento secundário:

20:1

100 - 5A

- b. TC de dois núcleos, com um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários:

20:1-1

100 - 5 - 5A

- c. TC de um núcleo, com um enrolamento primário para ligação série e paralelo e um enrolamento secundário:

20 x 40:1

100 x 200 - 5 A

- d. TC de um núcleo, com uma derivação no enrolamento primário ou no enrolamento secundário:

20/40:1

100/200 - 5 A

- e. TC de dois núcleos com um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários como no exemplo **b**, porém com relações nominais diferentes entre o enrolamento primário e cada enrolamento secundário:

20:1 e 60:1

100 - 5 A e 300 - 5 A

2.4.1.2 - MARCAÇÃO DOS TERMINAIS

Os terminais dos transformadores de corrente devem ser adequadamente identificados para facilitar sua ligação correta, quer usando apenas as marcas de polaridade nos transformadores de dois enrolamentos sem derivações, quer usando além destas uma letra e algarismos em cada um dos terminais dos transformadores, de mais de dois enrolamentos ou com derivações.

Quando for usada marcação individual nos terminais a letra distinguirá o enrolamento a que pertence o terminal como:

- P - terminal do enrolamento primário;
- S - terminal do enrolamento secundário.

2.4.2 - FREQUÊNCIA NOMINAL

São normais as frequências 50 e/ou 60 Hz. No Brasil, naturalmente usa-se 60 Hz.

2.4.3 - CLASSE DE TENSÃO DE ISOLAMENTO NOMINAL

A classe de isolamento nominal é definida pela máxima tensão do circuito ao qual o transformador de corrente vai ser conectado. Os níveis de tensão de isolamento são também padronizados por norma. Pela ABNT poderão ser encontrados nas tabelas 8 e 9 do Anexo A da norma NBR 6856 [21].

2.4.4 - FATOR DE SOBRECORRENTE NOMINAL (F)

É o fator empregado em transformadores de corrente para serviço de proteção, que expressa a relação entre a máxima corrente com a qual o transformador mantém a sua classe de precisão nominal e a corrente nominal.

No caso de transformadores de correntes fabricados sob as normas da ABNT, este fator pode ser 5, 10, 15 ou 20.

2.4.5 - FATOR TÉRMICO NOMINAL (F_t)

O fator térmico nominal é fator pelo qual deve ser multiplicada a corrente primária nominal, para se obter a corrente primária máxima que um transformador de corrente é capaz de conduzir em regime permanente, sob frequência nominal e com a maior carga especificada, sem exceder os limites de elevação de temperatura especificados. Pela ABNT [20] os fatores térmicos nominais iguais ou superiores a 1,0 e iguais ou inferiores a 2,0, são normalizados pelos seguintes valores: 1,0; 1,2; 1,3; 1,5 e 2,0.

No caso de TC com dois ou mais núcleos, sem derivações, com relações diferentes entre si e mesma corrente secundária nominal, o fator térmico da

menor relação é um dos fatores térmicos indicados acima, e o(s) fator(es) térmico(s) da(s) outra(s) relação(ões) é (são) obtido(s) pela fórmula abaixo, podendo resultar em valores menores que um “1,0”:

$$F_t = F_{t_1} \times \frac{R_{n_1}}{R_{n_2}} \quad (2.8)$$

F_t - fator térmico da(s) outra(s) relação(ões) nominal(is)

F_{t_1} - fator térmico da menor relação nominal;

R_{n_1} - menor relação nominal;

R_{n_2} - outra(s) relação(ões) nominal(is).

Tem-se como exemplo, um TC cujas relações são 100-5A (medição) e 800-5A (proteção), com fator térmico 1,2 para o núcleo de medição. Assim tem-se:

$$F_{t_1} = 1,2$$

$$R_{n_1} = 20:1(100 - 5A) \quad e \quad R_{n_2} = 160:1(800 - 5A)$$

$$F_{t_2} = 1,2 \times \frac{100}{160} \therefore F_{t_2} = 0,75$$

Em TC providos de derivações, as relações R_{n1} e R_{n2} não devem ser obtidas das derivações, mas sim dos enrolamentos totais. Além disso, o fator térmico das relações especificadas, obtidas por derivações, menores ou iguais a R_{n1} , deve ser no mínimo igual a F_{t1} .

2.4.6 - LIMITE DE CORRENTE DE CURTA DURAÇÃO NOMINAL PARA EFEITO TÉRMICO

É definido pela ABNT como sendo o valor eficaz da corrente primária simétrica que o TC pode suportar por um determinado tempo (1 segundo) com o enrolamento secundário curto-circuitado, sem exercer os limites de temperatura especificados para a sua classe de isolamento [34].

2.4.7 - LIMITE DE CORRENTE DE CURTA DURAÇÃO NOMINAL PARA EFEITO MECÂNICO

É definida como sendo a maior corrente primária (valor eficaz) que o TC deve suportar durante um determinado tempo (0,1 segundo), com o enrolamento secundário curto-circuitado, sem se danificar mecanicamente, devido às forças eletromagnéticas resultantes [34].

2.4.8 - CARGA NOMINAL (C)

As cargas nominais são designadas, segundo a ABNT, por um símbolo formado pela letra C seguida do número de volt-ampére correspondentes à corrente secundária nominal. Variam de C2,5 a C200, correspondendo, respectivamente, a 2,5 VA (0,1 ohm) e 200 VA (8 ohm).

2.4.9 - CLASSE DE EXATIDÃO

Especial atenção deve ser dada a esse item. É de primordial importância para a correta especificação do TC.

Os transformadores de corrente são divididos em duas classes distintas:

- TC's para serviço de medição;
- TC's para serviço de proteção.

2.4.9.1 - CLASSE DE EXATIDÃO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇOS DE MEDIÇÃO

Estes TC's são enquadrados segundo a ABNT, em uma das seguintes classes de exatidão: 0,3; 0,6; 1,2; 3,0. Considera-se que um TC para serviço de medição está dentro de sua classe de exatidão em condições especificadas quando, nestas condições, o ponto determinado pelo erro de relação ($\varepsilon\%$) ou pelo fator de correção de relação (FCR) e pelo ângulo de fase (β) estiver dentro dos “paralelogramos de exatidão” especificados nas figuras 2.13, 2.14 e 2.15 da norma NBR 6856 correspondentes à sua classe de exatidão, sendo o paralelogramo interno (menor) refere-se a 100% da corrente nominal, e o paralelogramo externo (maior) refere-se a 10% da corrente nominal.

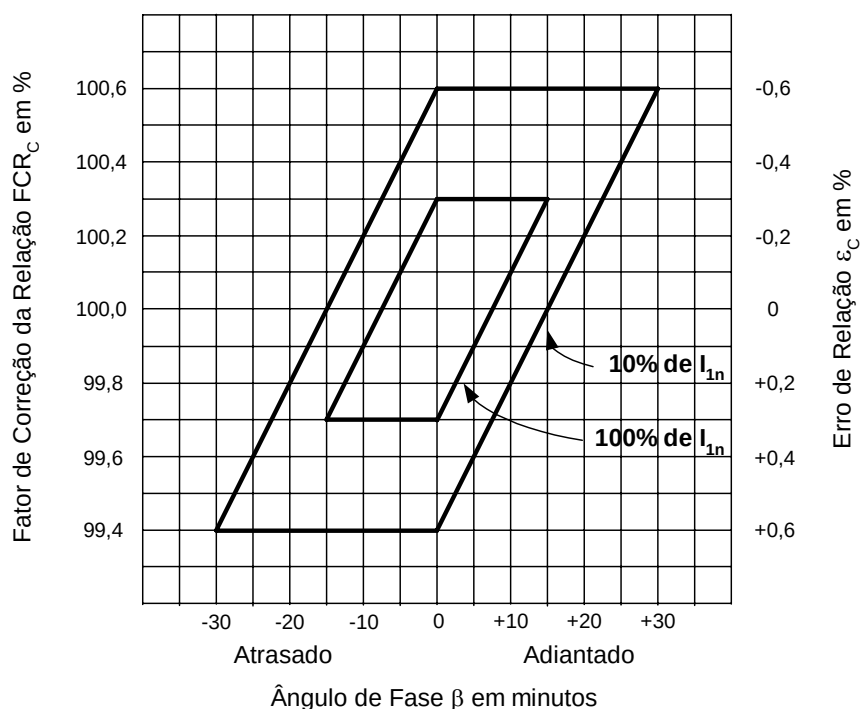


Figura 2.13 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (0,3 com 100% e 10% da corrente nominal).

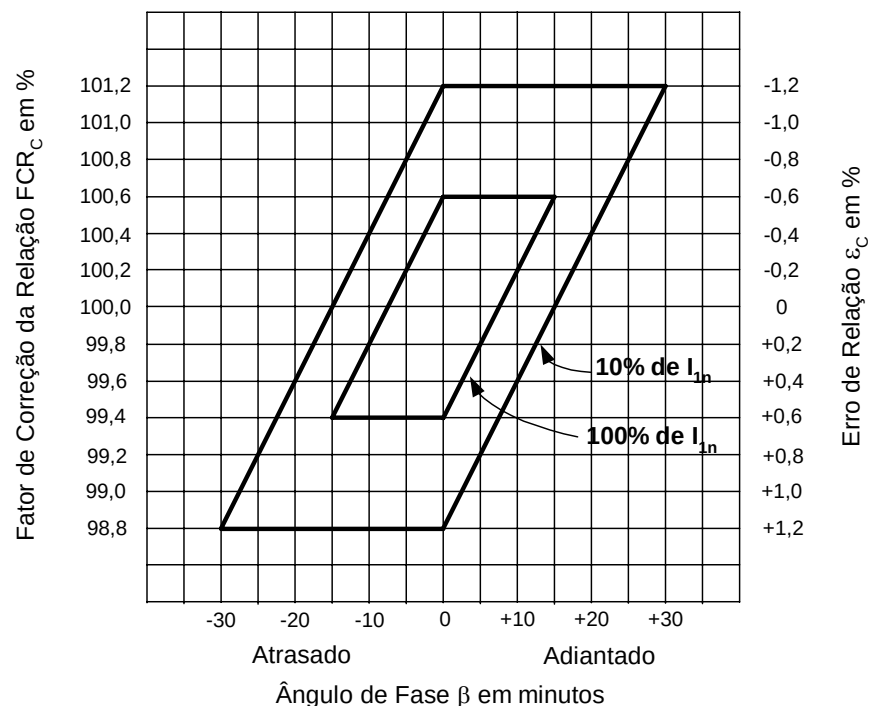


Figura 2.14 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (0,6 com 100% e 10% da corrente nominal).

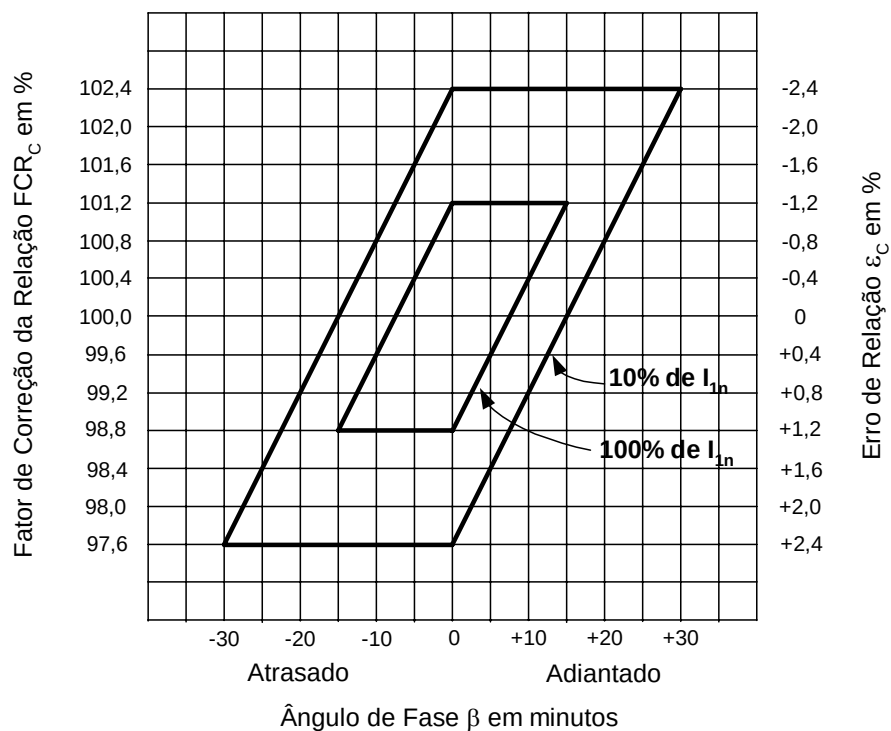


Figura 2.15 - Limites da classe de exatidão dos Transformadores de Corrente (1,2 com 100% e 10% da corrente nominal).

Quando o transformador de corrente for usado apenas na medição de corrente somente o erro de relação necessita ser considerado. Entretanto, quando são feitas medições em que a relação de fase entre a tensão e a corrente estiver envolvida, o erro de ângulo de fase (β) da transformação da corrente é necessário também ser considerado. Isto porque um erro no ângulo de fase da corrente constitui uma defasagem entre a corrente primária e a corrente secundária. Este erro acarreta uma mudança da relação de fase entre a corrente e a tensão do circuito primário. Este fato, naturalmente, estará introduzindo um erro na medição que está efetuando.

Na tabela 2.7 pode ser visualizada alguma das aplicações típicas dos transformadores de corrente quanto a sua classe de exatidão.

Tabela 2.7 - Aplicações dos Transformadores de Corrente.

Classe de Precisão	Aplicação
Menor que 0,3	▪ TC padrão ▪ Medições em Laboratório ▪ Medições Especiais
0,3	▪ Medição de Energia Elétrica
0,6 ou 1,2	▪ Amperímetros ▪ Wattímetros ▪ Fasímetros

2.4.9.2 - CLASSE DE EXATIDÃO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇOS DE PROTEÇÃO

Os TC's para serviços de proteção devem retratar com fidelidade as correntes de defeito ou curto-circuito, sendo importante que os núcleos dos mesmos não sofram os efeitos da saturação. A influência do erro de ângulo de fase na aplicação é desprezível, visto que, na maioria das aplicações, às quais

esses TC's se destina, a corrente secundária normalmente se apresenta com um baixo fator de potência e, conseqüentemente, em fase com a corrente de excitação.

Segundo a ABNT os TC's para serviço de relés são enquadrados em uma das seguintes classes de exatidão:

- 2,5 (erro percentual até 2,5%);
- 10 (erro percentual até 10%).

Considera-se que um TC para serviço de relés está dentro de sua classe de exatidão em condições especificadas, quando nestas condições, o seu erro percentual não for superior a 2,5% no caso da classe de exatidão 2,5 ou a 10% no caso da classe de exatidão 10, desde a corrente nominal até uma corrente cujo valor é dado pelo produto da corrente nominal pelo fator de sobrecorrente nominal.

Uma análise de um transformador de corrente no tocante ao desempenho é apresentada pela figura 2.16, onde:

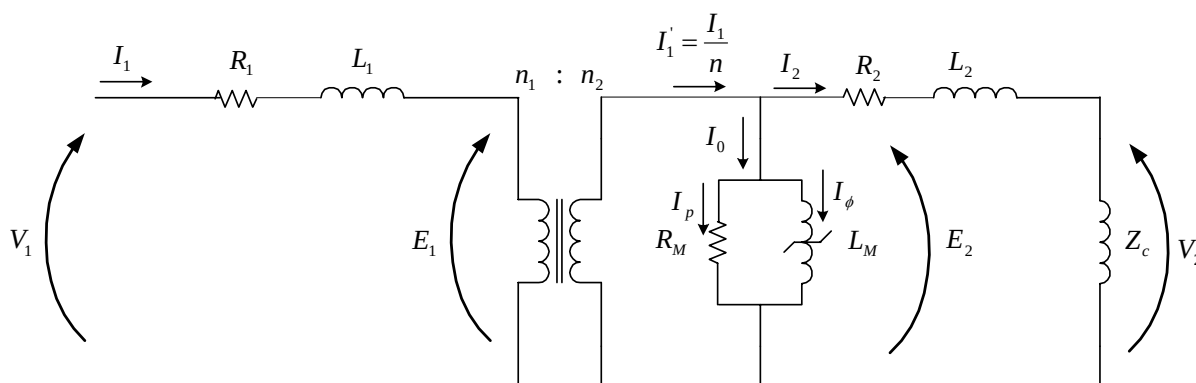


Figura 2.16 - Circuito Equivalente do Transformador de Corrente.

V_1 - Queda de tensão no enrolamento primário;

E_1 - F.e.m. induzida no enrolamento primário;

I_1 - Corrente no enrolamento primário;

I'_1 - Componente de I_1 que fornece a corrente no enrolamento secundário;

n_1 - Número de espiras enrolamento primário;

- n_2 - Número de espiras enrolamento secundário;
 I_0 - Corrente de excitação;
 I_ϕ - Componente da I_0 que magnetiza o núcleo;
 I_p - Componente da I_0 que vence as perdas;
 R_1 - Resistência do enrolamento primário;
 L_1 - Indutância do enrolamento primário;
 L_M - Impedância de magnetização do transformador, referida ao secundário;
 R_M - Resistência das perdas do núcleo, referida ao secundário;
 E_2 - Tensão de excitação secundária;
 R_2 - Resistência do enrolamento secundário;
 L_2 - Indutância do enrolamento secundário;
 V_2 - Queda de tensão na impedância Z_c ;
 I_2 - Corrente no enrolamento secundário;
 Z_c - Impedância ligada ao secundário (equipamento, por exemplo).

A tensão V_1 é desprezível, em relação a tensão do circuito ao qual o primeiro do TC é ligado, uma vez que os valores de R_2 e L_2 são pequenos.

Por outro lado, não existe a necessidade da representação dos parâmetros R_1 e L_1 , pois, I_1 é função somente das condições de carga do sistema.

Assim, o circuito equivalente será representado conforme a figura 2.17.

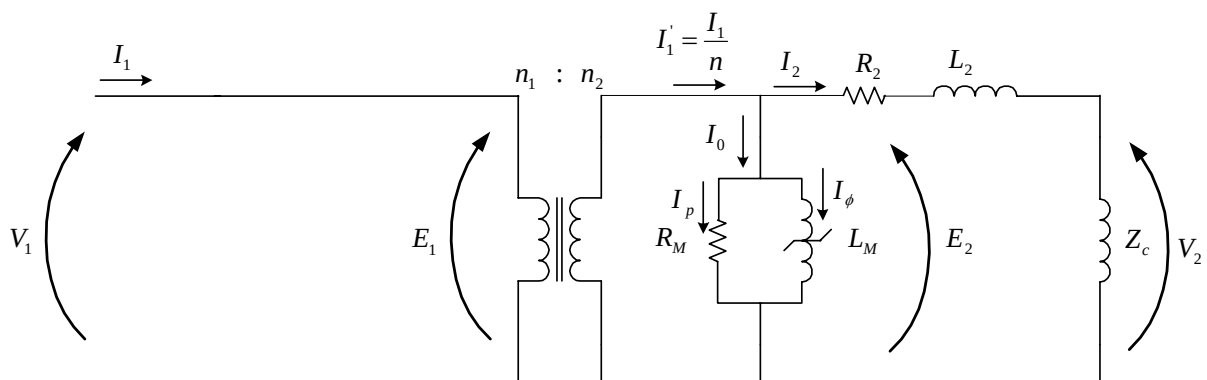


Figura 2.17 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador de Corrente.

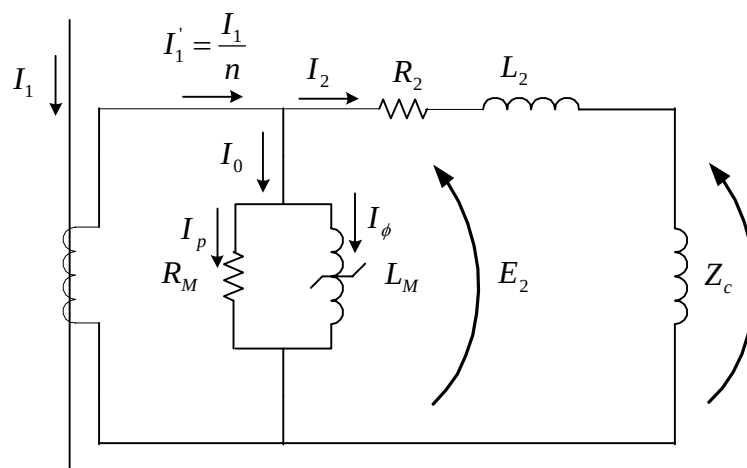


Figura 2.18 - Circuito Equivalente Simplificado do Lado do Secundário do Transformador de Corrente.

A figura 2.18 representa o circuito equivalente de um transformador de corrente, observa-se que parte da corrente primária I_1 circula para a excitação do núcleo $I'_1 = I_0 + I_2$, e que a f.e.m. secundária (E_2) é função da corrente de excitação (I_0), da resistência e indutância secundária (R_2 e L_2 respectivamente) e da própria carga (Z_c). A corrente I_2 é a parcela da corrente primária realmente transferida ao enrolamento secundário.

A curva que relaciona E_2 e I_0 é denominada curva de excitação secundária, a qual está ilustrada na figura 2.19. Ela permite determinar a tensão secundária a partir do qual o TC começa a saturar, sendo denominado de ponto-de-jelho.

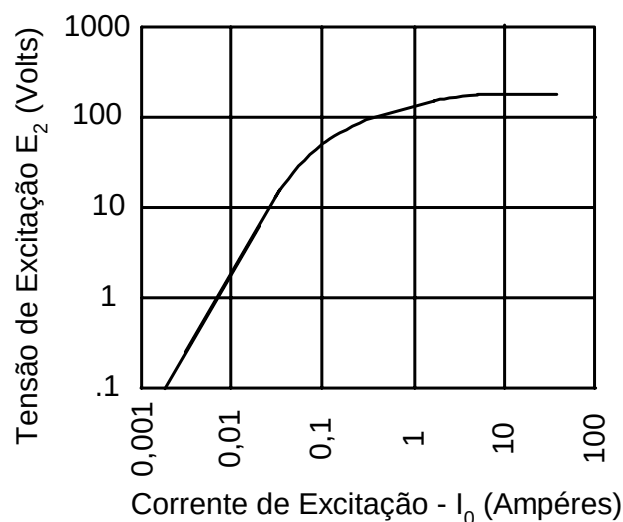


Figura 2.19 - Curva de Excitação Secundária do TC

Dependendo das características construtivas do transformador de corrente (se tipo bucha ou enrolado) a reatância de dispersão do enrolamento secundário será menor ou maior. Por exemplo, os transformadores tipo bucha possuem um enrolamento secundário distribuído e em conseqüência uma menor reatância de dispersão, devido ao seu menor fluxo de dispersão.

Por este motivo a classe de precisão do transformador de corrente para serviços de proteção pode ser designada por dois símbolos (classes A e B) segundo a norma da ABNT, que efetivamente descrevem a capacidade do transformador, como se segue.

- Classe A são aqueles cujo enrolamento secundário apresenta uma reatância que não pode ser desprezada. Nesta classe, estão enquadrados todos os TC's que não se enquadram na classe B;
- Classe B são aqueles cujo enrolamento secundário apresenta reatância que pode ser desprezada. Nesta classe, estão enquadrados os TC's com núcleo toroidal, ou simplesmente TC's de bucha.

A tensão nominal nos terminais do secundário fixa a tensão que o transformador irá entregar para uma carga nominal padronizada como pode ser visto na ABNT/NBR 6856/1992 (tabela 10 do Anexo A) a 20 vezes a corrente nominal secundária, sem exceder 10% de erro. Além do mais, o erro de relação deve ser limitado para 10% de qualquer corrente compreendida entre 1 a 20 vezes a corrente nominal para qualquer carga nominal inferior.

Por exemplo, um TC para serviço de proteção, com classe de precisão C100 indica que a relação de transformação pode ser calculada e que o erro de relação de transformação não excederá de 10% de qualquer corrente entre 1 e 20 vezes a corrente secundária nominal se a carga nominal não exceder $1,0 \Omega$, assim tem-se o seguinte exemplo:

$$V_2 = F_s \times Z_C \times I_2$$

onde

Queda de tensão na impedância Z_C ;

F_s - fator de sobrecorrente nominal, padronizado em 20.

Z_C - carga ligada ao secundário;

I_2 - corrente nominal secundária, normalmente igual a 5 A.

$$F_s = 20$$

$$Z_C = 1,0\Omega$$

$$I_2 = 5A$$

$$V_2 = 20 \times 1 \times 5 \therefore V_2 = 100,0V$$

2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo enfocou os princípios básicos referentes à teoria dos transformadores de corrente, abordando seus tipos, características construtivas, campo de aplicação e acima de tudo, atentou para os aspectos relacionados com a precisão da medição.

A importância desse capítulo é decisiva tanto para o ponto de vista informativo como de análise, uma vez que os assuntos a serem investigados neste trabalho, objetivam a análise do desempenho deste sensor.

As informações relatadas no decorrer desse capítulo não apenas permitiram esclarecer os tipos de transformadores de correntes mais usuais, mas também, forneceram subsídios necessários à construção de um modelo, conforme será abordado nos próximos capítulos.

ANÁLISE E MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como principal objetivo descrever, de forma prática, a análise e modelagem de transformadores de corrente para serviço de proteção. São apresentadas diversas simplificações, sendo uma delas a suposição de linearidade das propriedades magnéticas do núcleo, o que permite o emprego da Transformada de Laplace na resolução das equações diferenciais associadas ao modelo. Através das soluções encontradas, descreve-se a forma usual de cálculo do tempo que o núcleo leva para entrar para no estado de saturação.

Será mostrada também, a modelagem do transformador de corrente por um modelo de transformador saturável utilizado pelo programa ATP empregando-se um reator saturável (tipo 98) para representar a saturação do ramo magnetização, associado a um transformador ideal. Por fim foi realizado um ensaio de excitação do TC para levantar a curva de magnetização a ser implementada no reator não linear “satura” do transformador de corrente durante a sua modelagem no programa ATP.

3.2 - CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DE TRANSITÓRIOS DE CORRENTE

O estudo dos conceitos fundamentais dos transitórios será feito considerando-se os parâmetros do TC levando em conta as seguintes premissas [2], [3], [4] e [9].

- São desprezadas as impedâncias primárias, pois, I_1 é função somente das condições de carga do sistema de potência, como demonstrado na figura 2.17 do capítulo anterior;
- São desprezadas as perdas foucault e por histerese, assim sendo, o circuito equivalente simplificado da figura 2.18, passará ser representado sem o R_M , como mostra a figura 3.1[11];

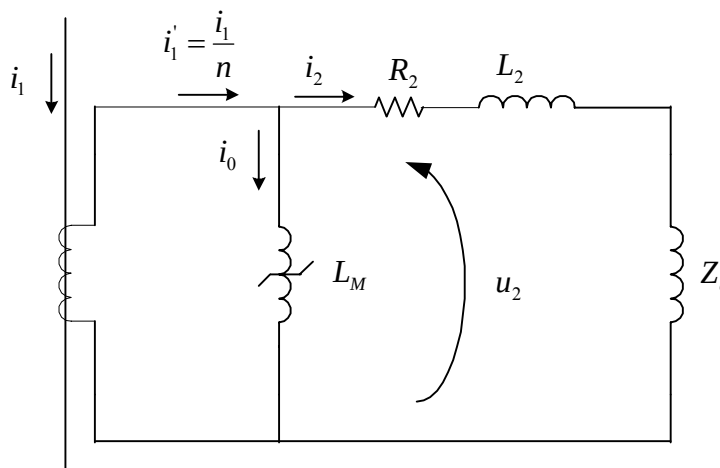


Figura 3.1 - Circuito equivalente simplificado desprezando as perdas por foucault e histerese.

- São desprezadas as capacitâncias dos enrolamentos;
- São desprezados os fluxos remanescentes no núcleo do transformador de corrente;
- Será considerada a curva “fluxo concatenado x corrente de magnetização” linearizada por partes, como mostra a figura 3.2. A indutância saturada é suposta nula [5].

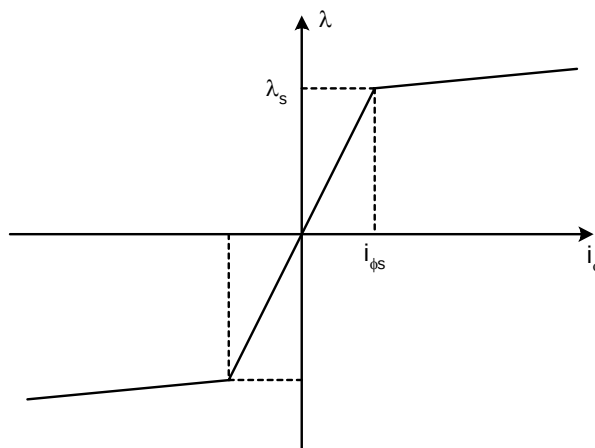


Figura 3.2 - Curva de Saturação Linearizada por Parte

Os transitórios de corrente serão obtidos através do diagrama unifilar do sistema mostrado na figura 3.3, o qual é composto por uma fonte de alimentação, pela impedância do sistema e da linha, al qual aplica-se um curto-circuito para a realização dos estudos [7].

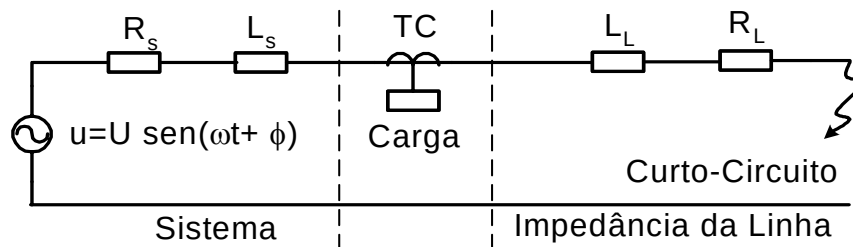


Figura 3.3 - Modelo simplificado de um sistema unifilar.

R_s - resistência do sistema;

L_s - indutância do sistema;

L_L - indutância da linha;

R_L - resistência da linha;

3.2.1 - CORRENTE TRANSITÓRIA PRIMÁRIA

Analisando o circuito apresentado na figura 3.3, tem-se que a tensão instantânea aplicada ao sistema é:

$$u = U \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad (3.1)$$

u - valor instantâneo da tensão

U - valor máximo da tensão induzida ou valor de pico;

ω - frequência angular em rad/s;

φ - ângulo de fase.

Adota-se que a impedância primária total é:

$$\hat{Z} = |\hat{Z}_1| \angle \alpha$$

onde:

$$|\hat{Z}_1| = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

$$R_1 = R_s + R_L$$

$$L_1 = L_s + L_L$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\omega L_1}{R_1} \right)$$

A constante de tempo primária, T_1 , é definida por:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}$$

Aplicou-se um curto-circuito conforme indicado na figura 3.3, atribuindo que o curto ocorra em $t = 0$ e que o valor instantâneo da corrente de pré-falta é $i_1(0) = I_0$. Assim tem-se de acordo com a referência [13] a seguinte equação:

$$i_1 = \frac{U}{|\hat{Z}_1|} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi - \alpha) + \left[I_0 - \frac{U}{|\hat{Z}_1|} \operatorname{sen}(\varphi - \alpha) \right] e^{-t/T_1} \quad (3.2)$$

Como se pode analisar, a corrente i_1 é composta de duas componentes, uma alternada e a outra contínua, sendo que a componente contínua possui

decréscimo exponencial. Para simplificar esta expressão será suposto que $i_1(0) = I_0 = 0$ e que $\varphi - \alpha = -\pi/2$, assim:

$$i_1 = \frac{U}{|\hat{Z}_1|} \left(e^{-t/T_1} - \cos \omega t \right) \quad (3.3)$$

Onde:

i_1 - é a corrente eficaz;

A suposição de que $\varphi - \alpha = -\pi/2$ representa a situação pessimista, uma vez que a componente contínua de i_1 sofre deslocamento máximo. Assim, a expressão (3.3) será utilizada nos desenvolvimentos a seguir.

3.2.2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE SEM A SUA SATURAÇÃO (REGIÃO LINEAR)

A análise matemática a seguir consiste em encontrar a expressão do fluxo de enlace total no núcleo do TC [5]. Assim sendo, baseando-se no circuito da figura 3.1 pode-se descrever:

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_2 = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.5)$$

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = Hl \quad (3.6)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu} n_2 A \quad (3.7)$$

onde,

H - Intensidade do campo magnético [A-espira/m]

l - Comprimento médio da trajetória magnética [m]

B - Densidade de campo magnético [T]

μ - Permeabilidade magnética do núcleo [H/m]

A - Área da seção reta do núcleo [m²]

Utilizando relação de espiras $n = n_2/n_1$ e substituindo nas equações (3.7) e (3.6) levando em consideração a premissa [9] tem-se:

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - \left(\frac{l}{\mu m_2^2 A} \right) \lambda \quad (3.8)$$

Aplicando-se a derivada na equação (3.8) e fazendo, $L_M = \frac{\mu m_2^2 A}{l}$:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{n} \frac{di_1}{dt} - \frac{1}{L_M} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.9)$$

Substituindo as equações (3.5), (3.8) e (3.9) na equação (3.4) tem-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2}{n} i_1 - \frac{R_2}{L_M} \lambda + \frac{L_2}{n} \frac{di_1}{dt} - \frac{L_2}{L_M} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.10)$$

Neste caso, aplica-se a Transformada de Laplace na equação (3.10), e considerando que $i_1(0) = 0$, $\lambda(0) = 0$, tem-se:

$$\lambda(s) = \left[\frac{R_2}{L_M} + s \left(\frac{L_M + L_2}{L_M} \right) \right] i_1(s) = \frac{1}{n} [R_2 + sL_2] i_1(s) \quad (3.11)$$

Aplicando a Transformada de Laplace na equação (3.3) obtém-se:

$$i_1(s) = \frac{U}{|Z_1|} \left[\frac{1}{s + \frac{1}{T_1}} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (3.12)$$

Substituindo a equação (3.12) em (3.11) e efetuando algumas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\lambda(s) = \frac{L_2 L_M}{n(L_2 + L_M)} \frac{U}{|Z_1|} \left[\frac{s + \frac{R_2}{L_2}}{\left(s + \frac{R_2}{L_M + L_2} \right) \left(s + \frac{1}{T_1} \right)} - \frac{s \left(s + \frac{R_2}{L_2} \right)}{\left(s + \frac{R_2}{L_M + L_2} \right) (s^2 + \omega^2)} \right] \quad (3.13)$$

Recorrendo a algumas simplificações matemáticas como:

$$k = \frac{U}{n |Z_1|} \quad a = \frac{R_2}{L_2} \quad b = \frac{R_2}{(L_2 + L_M)} \quad c = \frac{1}{T_1}$$

Reescreve-se a equação (3.13) assim:

$$\lambda(s) = k \frac{L_2 L_M}{L_2 + L_M} \left[\frac{s + a}{(s + b)(s + c)} - \frac{s(s + a)}{(s + b)(s^2 + \omega^2)} \right] \quad (3.14)$$

No domínio do tempo, fica:

$$\lambda(t) = k \frac{L_2 L_M}{L_2 + L_M} \left[\frac{(a + b)e^{-bt}}{(c - b)} + \frac{b(a - b)e^{-bt}}{b^2 + \omega^2} - \frac{\left(\frac{Z_b}{L_2} \right)}{\frac{Z_c}{(L_2 + L_M)}} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right] \quad (3.15)$$

onde,

$$|\hat{Z}_b| = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

$$|\hat{Z}_c| = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 (L_2 + L_M)^2}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{\omega(L_2 + L_M)}{R_2} \right]$$

$$\cos \theta = \left(\frac{R_2}{|\hat{Z}_b|} \right) \therefore \theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_2}{|\hat{Z}_b|} \right)$$

Simplificando a equação (3.15), pode-se reescrever como:

$$\lambda(t) = k L_M \left[\frac{R_2}{L_2 + L_M} \frac{e^{-bt} - e^{-ct}}{c - b} + \frac{L_2}{L_2 + L_M} \frac{ce^{-ct} - be^{-bt}}{c - b} + \frac{L_2 b(a - b)e^{-bt}}{(L_2 + L_M)(b^2 + \omega^2)} - \frac{Z_b}{Z_c} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right] \quad (3.16)$$

Feito isso, supõe-se que o TC opere inicialmente na região não-saturada, com uma indutância L_M constante, tal que:

$$L_M \gg L_2$$

$$\omega L_M \gg R_2$$

Desta forma, observando a equação (3.16), pode-se desconsiderar o segundo e o terceiro termo desta equação, conforme a referência [35] então:

$$\lambda(t) = k \left[R_2 \frac{e^{-bt} - e^{-ct}}{(c - b)} - L_M \frac{Z_b}{Z_c} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (3.17)$$

Considerando que:

$$k = \frac{U}{n |\hat{Z}_1|} \Rightarrow k = \frac{I_1 \sqrt{2}}{n} \quad b = \frac{R_2}{(L_2 + L_M)} \cong \frac{R_2}{L_M} \Rightarrow b = \frac{1}{T_2} \quad c = \frac{1}{T_1} \Rightarrow c = \frac{R_1}{L_1}$$

assim, a equação (3.17), é reescrita para:

$$\lambda(t) = \frac{I_1 R_2 \sqrt{2}}{\omega n} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos \theta} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (3.18)$$

Observa-se que sob condições transitórias, λ apresenta uma componente contínua e outra alternada, como mostra a figura 3.4. O máximo valor da componente contínua ocorrerá quando:

$$\frac{d}{dt} [e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}] = 0 \text{ ou seja}$$

$$\frac{1}{T_2} e^{-t/T_2} = \frac{1}{T_1} e^{-t/T_1} \quad (3.19)$$

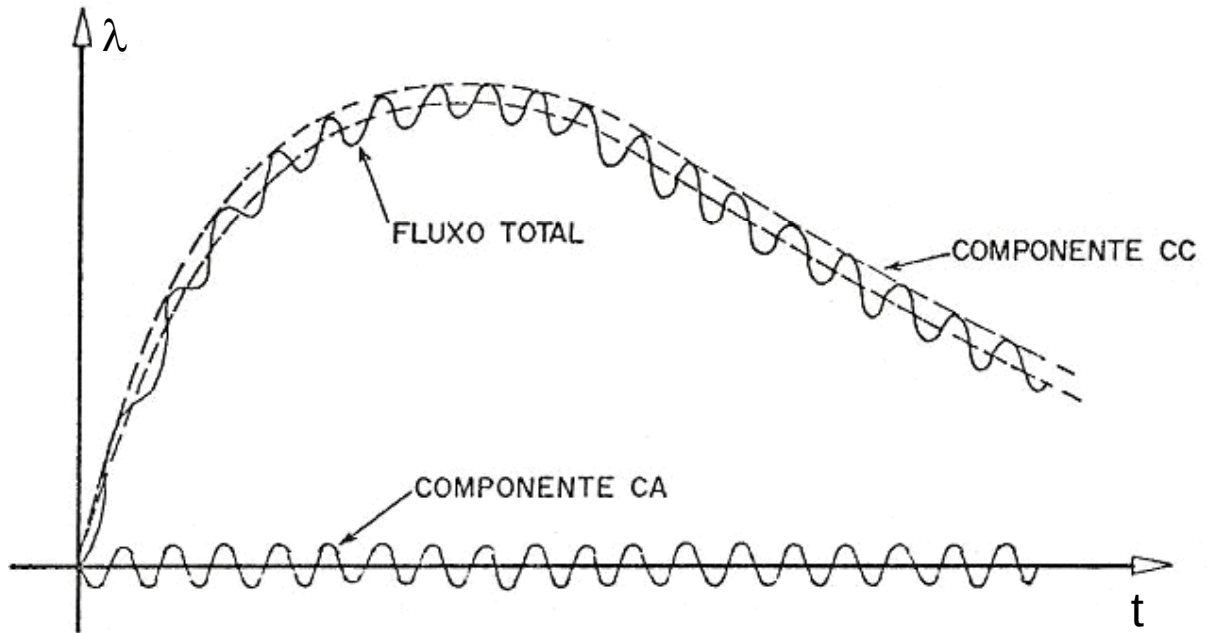


Figura 3.4 - Variação do fluxo total sem considerar saturação.

Fazendo neste instante $t = t_m$, resulta em:

$$t_m = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (3.20)$$

t_m - instante de tempo em que ocorre o fluxo máximo.

A constante de tempo primária em sistemas reais é muito menor que a constante de tempo secundária e secundária, ou seja, $T_1 \ll T_2$, segundo as

referências [9], [13] e [14]. Desta forma, permite substituir a equação (3.19), resultando em: $e^{-t/T_2} \cong 1 \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} \cong e^{-t/T_1}$

Depois de realizadas as devidas simplificações, com as substituições destes valores no primeiro termo da equação (3.18), tem-se então, o valor máximo da componente CC:

$$\lambda_{MAX,CC} = \frac{I_1 R_2 \sqrt{2}}{n} T_1 \quad (3.21)$$

O valor máximo da componente CA do fluxo λ é:

$$\lambda_{MAX,CA} = \frac{I_1 R_2 \sqrt{2}}{\omega n \cos \theta} \quad (3.22)$$

Se o valor máximo da componente contínua coincidir com o valor máximo da componente alternada, tem-se o maior valor possível para o fluxo λ , ou seja:

$$\lambda_{MAX} = \frac{I_1 R_2 \sqrt{2}}{\omega n} \left(\omega T_1 + \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3.23)$$

Portanto, a expressão para a corrente de magnetização, i_ϕ , é obtida dividindo-se a expressão (3.18) correspondente de λ pela indutância não-saturada, L_M , assim:

$$i_\phi(t) = \frac{I_1 \sqrt{2}}{\omega n} \left[\frac{\omega T_1}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos \theta} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (3.24)$$

$$i_{\phi,max,CC} = \frac{I_1 T_1 \sqrt{2}}{n T_2} \quad (3.25)$$

$$i_{\phi,max,CA} = \frac{I_1 \sqrt{2}}{\omega n T_2 \cos \theta} \quad (3.26)$$

$$i_{\phi,max} = \frac{I_1 \sqrt{2}}{\omega n T_2} \left(\omega T_1 + \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3.27)$$

Com isso, conclui-se que a corrente secundária i_2 pode ser calculada para cada instante, após substituir as equações (3.3) e (3.24) em:

$$i_2 = \frac{i_1 - i_\phi}{n} \quad (3.28)$$

3.2.3 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE SECUNDÁRIA DEVIDO A CORRENTE PRIMÁRIA ASSIMÉTRICA COM NÚCLEO SATURADO

Para a determinação da forma de onda da corrente são feitas as seguintes considerações [8] e [12]:

- A corrente primária terá a forma da por: $i_1 = \frac{U}{Z_1} \left[e^{-t/T_1} - \cos \omega t \right]$ (3.3)
- O circuito equivalente do TC será considerado o mesmo da figura 3.1, e com a finalidade de simplificar o raciocínio será utilizada relação de transformação unitária.
- A característica de magnetização do núcleo do transformador de corrente será a da figura 3.5, onde nota-se que a corrente de magnetização I_ϕ será nula até o instante da saturação, e uma vez atingida a saturação, fluxo magnético se manterá constante e a corrente de excitação assumirá valores mais elevados;

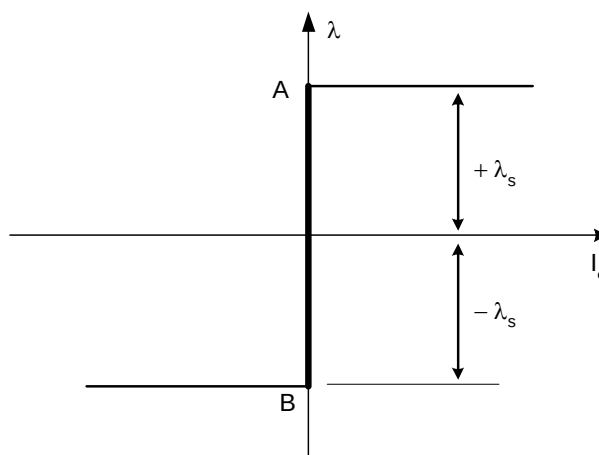


Figura 3.5 - Característica de magnetização usada para o estudo da forma de onda de i_2 com núcleo saturado.

- Devido as duas últimas considerações anteriores tem-se que, até o início da saturação, $i_1 = i_2$.

Pode-se observar que na figura 3.6 que quando ocorre um transitório, as correntes instantâneas i_1 e i_2 ao passarem pelo primeiro valor de pico ponto (1) da curva assimétrica, como pode ser visto na figura 3.6 (a) e (b), pode acarretar a saturação do núcleo (ponto C_3 e equivalente ao ponto A da figura 3.6).

O efeito da saturação no núcleo do TC pode ser avaliado através da figura 3.7, para uma carga resistiva e $n_1 = n_2$. Como foi estabelecida anteriormente, a indutância L_M é considerada nula durante o instante em que o TC se encontra em regime de saturação, o que implica que toda a corrente secundária circula através do ramo magnetizante. Nesta situação, o fluxo não consegue ultrapassar o nível de saturação.

Assim, o TC oscilará e sairá de saturação durante certos períodos em cada ciclo, causando distorções na forma de onda da corrente em seu secundário i_2 .

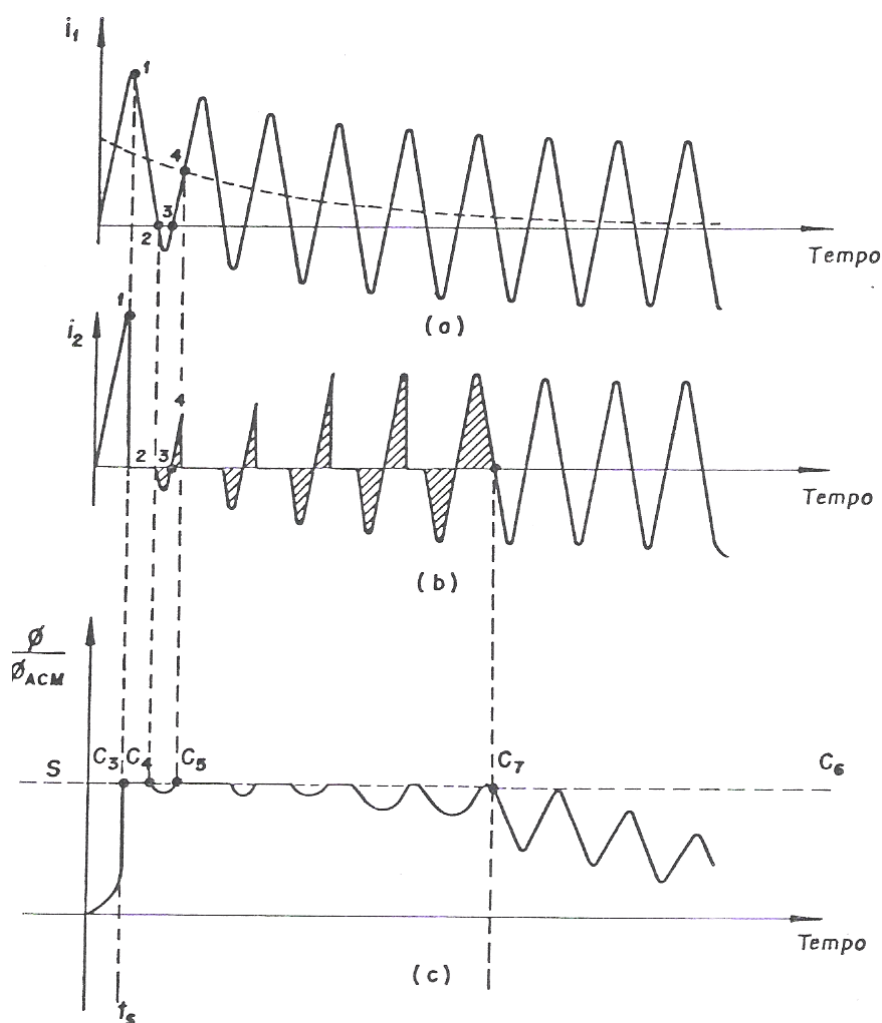


Figura 3.6 - Correntes primárias, secundárias e fluxo, considerando saturação.

Observa-se que a forma de onda de i_2 é do tipo cortada, e é nula em determinados intervalos de tempo.

Devido à característica suposta da figura 3.5, a partir do ponto C_3 , da figura 3.6(c), o fluxo torna-se constante e deixa de existir a sua variação em relação ao tempo. Assim sendo, a f.e.m. induzida ao secundário também deixa de existir e conseqüentemente a tensão u_2 nos terminais da resistência secundária R_2 cairá bruscamente para zero. Se a tensão u_2 cai para zero, a corrente i_2 também o faz bruscamente conforme pode ser visto na figura 3.6(b).

A corrente i_1 imposta pelo sistema, continua a sua variação normal. Por outro lado, durante a saturação, sendo $i_2 = 0$, pode-se facilmente concluir, pela aplicação da lei de Kirchhoff no nó (1) do modelo simplificado da figura 3.4. com $L_2 = 0$ que a corrente i_1 circulará pela indutância L_M sendo responsável pela magnetização do núcleo, ou seja, $i_1 = i_0$. Logo, o núcleo sairá da saturação, quando i_1 for igual a zero, no ponto (2) da figura 3.6(a), estando o fluxo no ponto C_4 da figura 3.6(c). Uma vez estando o fluxo fora da saturação temos que $i_0 \cong 0$ e $i_1 = i_2$.

Assim, para determinar o ponto em que o fluxo irá novamente entrar em saturação deve-se aplicar o critério da igualdade das áreas que pode ser entendido do seguinte modo:

A corrente i_2 variando negativamente, entre os pontos (2) e (3) da figura 3.6(b), circulando em Z_2 , onde $Z_2 = R_2$ e $L=0$ produzem uma variação de fluxo que é responsável pela redução do fluxo para um valor abaixo do seu valor de saturação.

Esta variação é dada por:

$$\Delta\lambda_{2-3} = R_2 \int_{(2)}^{(3)} i_2 dt \quad (3.29)$$

No ponto (3) a corrente i_2 passa a variar positivamente, e circulando em R_2 deve produzir uma variação de fluxo igual, e oposta a anterior, para que o fluxo atinja novamente o seu valor de saturação.

Sejam os pontos (4) para i_2 e C_5 para o fluxo quando a saturação for novamente atingida. Portanto, entre (3) e (4) tem-se a variação de fluxo.

$$\Delta\lambda_{3-4} = R_2 \int_{(3)}^{(4)} i_2 dt \quad (3.30)$$

Mas, como no ponto (2) tem-se o fluxo saturado do ponto C_4 , e no ponto (4) deve-se atingir o mesmo fluxo saturado do ponto C_5 , a variação de fluxo entre os pontos (2) e (4) é:

$$\Delta\lambda_{2-4} = \Delta\lambda_{2-3} - \Delta\lambda_{3-4} = 0 \quad \text{ou seja} \quad \Delta\lambda_{2-3} = \Delta\lambda_{3-4} \quad (3.31)$$

Portanto

$$R_2 \int_{(2)}^{(3)} i_2 dt = R_2 \int_{(3)}^{(4)} i_2 dt \quad \text{logo} \quad \int_{(2)}^{(3)} i_2 dt = \int_{(3)}^{(4)} i_2 dt \quad (3.32)$$

Estas expressões representam as áreas acima e abaixo do eixo dos tempos e delimitadas pela curva de i_2 entre os pontos (2) e (3), (3) e (4) e como pode-se ver, elas devem ser iguais para que o núcleo novamente fique saturado.

Resumindo, o que foi explicado sobre o critério da igualdade das áreas, aliás muito útil para a determinação das formas de ondas das correntes secundárias devido a saturação, assim pode-se dizer que:

Se o TC está num estado de saturação positiva, a corrente negativa i_2 reduz o fluxo de uma certa quantidade dada por $R_2 \int i_2 dt$ e retira o TC da saturação.

Uma quantidade de fluxo, em direção oposta a anterior, é necessária para colocar novamente o TC no seu estado de saturação positiva, ou seja, a corrente positiva i_2 aumenta o fluxo da mesma quantidade anterior e a saturação é atingida.

A partir do ponto (4) o processo se repete até o final da saturação no ponto C₇, da figura 3.6(c).

3.2.4 - TENSÃO DE PONTO DE JOELHO

Esta tensão estabelece o ponto de transição entre os regimes não saturado e saturado. Considerando a curva de excitação secundária mostrada na figura 3.7, a tensão no ponto de joelho, U_s , é definida como sendo o valor acima do qual 10% de acréscimo na tensão de excitação secundária, U_2 , provoca 50% de acréscimo na corrente de magnetização i_ϕ , conforme as referências [15] - [16].

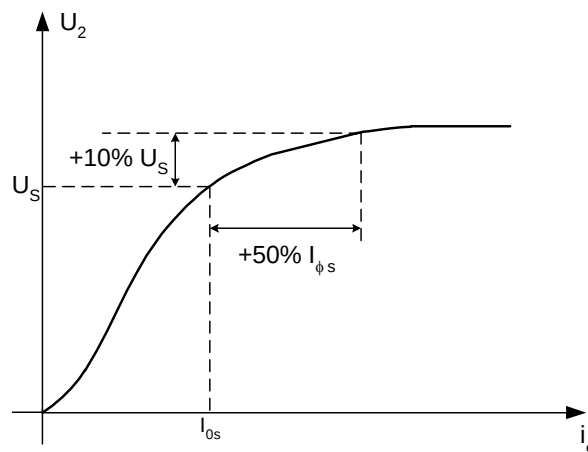


Figura 3.7 - Curva de Excitação Secundária.

A partir desta definição, pode-se afirmar que o TC vem a saturar, quando alcança o valor de pico do fluxo:

$$\lambda_s = \frac{U_s \sqrt{2}}{\omega} \quad (3.33)$$

onde:

U_s - valor de tensão no secundário do TC equivalente ao ponto do joelho da curva de saturação.

3.2.6 - TEMPO DE SATURAÇÃO

É o intervalo de tempo compreendido entre o instante de ocorrência de um distúrbio e o instante em que o fluxo atinge pela primeira vez o valor de saturação, λ_s , correspondente à tensão do ponto no joelho, U_s . Para a determinação deste tempo, considera-se a equação (3.18) com as seguintes simplificações:

- A componente alternada possui valor máximo, ou seja, $\sin(\omega t + \theta) = -1$;
- Nos sistemas reais, como $T_2 \gg T_1$, tem-se que, $e^{-t/T_2} \cong 1$.

Assim, altera-se a equação (3.18) de modo que fique:

$$\lambda = \frac{I_1 R_2 \sqrt{2}}{\omega n} \left[\omega \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} (1 - e^{-t/T_1}) + \frac{1}{\cos \theta} \right] \quad (3.34)$$

O tempo de saturação do TC, será dado pela expressão (3.34), fazendo $t = t_s$ e $\lambda = \lambda_s$, deste modo, obtém-se conforme a referência [10] :

$$t_s = -T_1 \ln \left[1 - \frac{T_1 - T_2}{\omega T_1 T_2} \left(\frac{\omega N \lambda_s}{I_1 R_2 \sqrt{2}} - \frac{1}{\cos \theta} \right) \right] \quad (3.35)$$

3.2.7 - FATOR DE SOBREDIMENSIONAMENTO

O fator de sobredimensionamento para transitórios, K_s , é estabelecido a partir da expressão conforme a “International Electrotechnical Commission” IEC [14] - [22] sendo:

$$K_s = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left[\omega \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) + 1 \right] \quad (3.36)$$

Considerando que na equação (3.18) o $\theta = 0^\circ$ e que o $\sin(\omega t + \theta) = -1$, pode-se escrever:

$$K_s = \frac{\omega n}{I_1 R_2 \sqrt{2}} \lambda \quad (3.37)$$

Entende-se que no ponto de saturação, $\lambda = \lambda_s$, substituindo a equação (3.33) em (3.37), tem-se que:

$$K_s = \frac{U_s n}{R_2 I_1} \quad (3.38)$$

Observa-se que a equação (3.38), sugere um significado físico para K_s . O mesmo representa a relação entre a tensão no ponto de joelho e a queda de tensão associada à componente CA da corrente de defeito referida ao secundário (I_1/n), quando esta, circula por um resistor R_2 ligado no secundário.

Deste modo, utilizando os parâmetros contidos na equação (3.33), para vários valores de constantes de tempo primárias, é traçada uma família de curvas que permite obter a partir de um gráfico o tempo de saturação. O gráfico da família de curvas é mostrado na figura 3.8, a uma constante de tempo de 0,04 s. como exemplo.

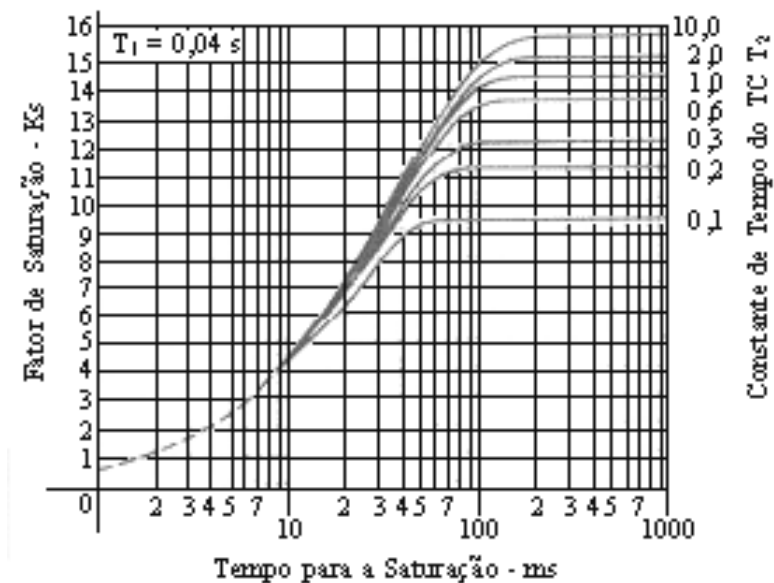


Figura 3.8 - Gráfico da Família de Curvas (constante de tempo de 0,04 s).

Bom, o procedimento para a determinação do tempo de saturação consiste no seguinte método:

- Calcula-se o fator de saturação (K_s) pela expressão (3.38);
- Depois de determinado K_s , determina-se as constantes de tempo primária e secundária respectivamente T_1 e T_2 ;
- Definidos os termos K_s , T_1 e T_2 , determina-se T_s a partir da curva apresentada na figura 3.9.

3.3 - INFLUÊNCIA DA CARGA SECUNDÁRIA NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS TC's

Observa-se que a equação (3.18), indica que o fator de potência da carga não exerce influência na componente contínua do fluxo. Entretanto, a componente alternada aumenta à medida que o $\cos\theta$ decresce, ou seja, as cargas indutivas contribuem para a redução do tempo de saturação do TC.

Já o módulo da carga nominal secundária do TC influi drasticamente na saturação dos TC's. No caso de transformadores de potência e de potencial, a força magnetomotriz primária ($n_1 i_1$) depende predominantemente da carga secundária. A ausência desta implica num valor de $n_1 i_1$ apenas suficiente para magnetizar o núcleo, mantendo-se a tensão secundária dentro dos limites normais. No caso dos transformadores de corrente, os mesmos têm o enrolamento primário ligado em série na linha, sendo projetados para operar em regime normal com densidade de fluxo muito baixa (em torno de 0,1 Tesla). Um aumento da carga secundária faz com que haja um aumento da corrente através do ramo magnetizante, uma vez que a força magnetomotriz primária independe

da carga secundária, sendo imposta pela linha. Desta forma, o transformador de corrente é levado cada vez mais próximo ao ponto de joelho.

O caso extremo ocorre quando o transformador de corrente opera em circuito aberto, por exemplo, figura 3.10 (d). Nesta situação, a fonte de corrente independente ligada ao primário gera uma força magnetomotriz $n_1 i_1$, que é totalmente destinada a magnetizar o núcleo, pois não existe o efeito desmagnetizante induzido no secundário ($n_2 i_2 = 0$). Com isso, o núcleo é levado a um estado de saturação intensa a cada semiciclo, gerando sobretensões muito elevadas que certamente destruirão o isolamento como pode ser visto na figura 3.10 (b). Na figura 3.9 também é ilustradas a curva da corrente de magnetização (a) e a forma de onda sobre o indutor não linear durante a operação do transformador de corrente com o seu circuito secundário em aberto (c).

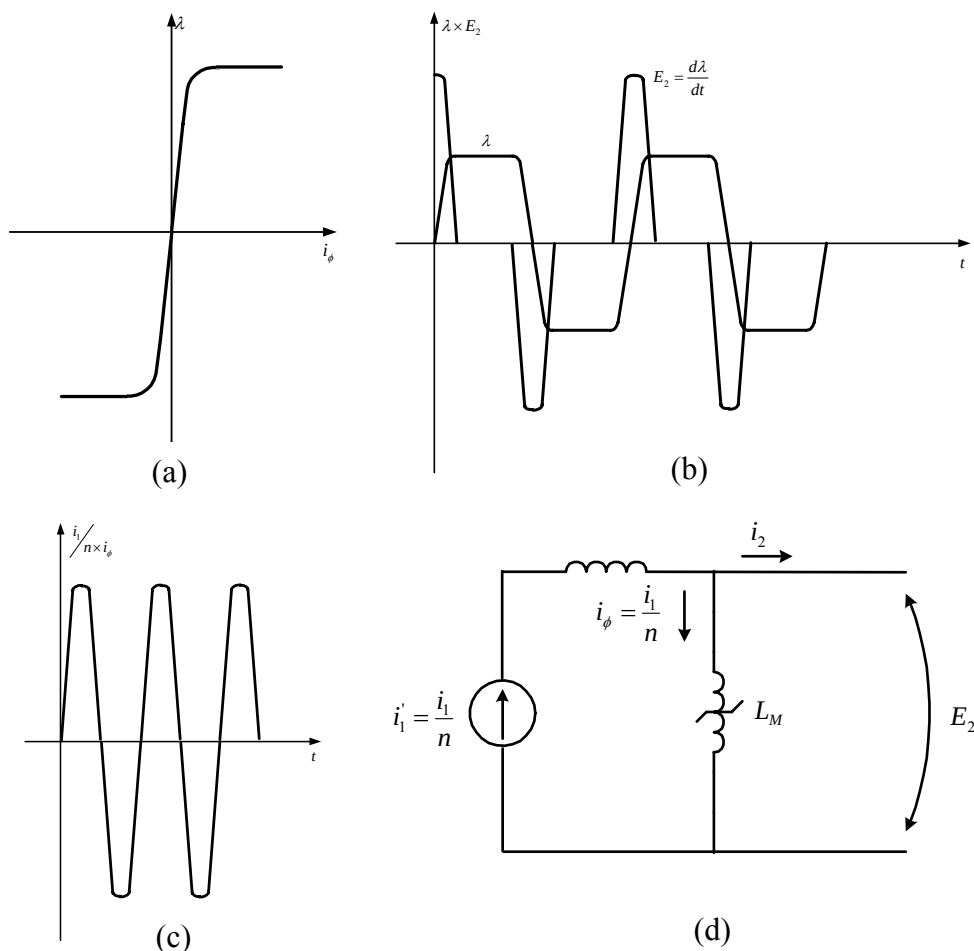


Figura 3.9 - Operação de um TC com o circuito secundário em aberto.

3.4 - CONSTRUÇÃO DO MODELO DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE UTILIZANDO O ATP

O modelo do transformador de corrente é implementado no simulador ATP - *Alternative Transients Program* [31]. A modelagem do TC é feita com base na classe de exatidão, relação de espiras, resistência no enrolamento secundário e a curva de excitação.

Como o estudo proposto nessa dissertação está baseado no comportamento transitório de um grupo de três TC's de características de magnetização e impedâncias secundárias diferentes, sua modelagem foi feita empregando um transformador saturável utilizado pelo ATP, o qual emprega um reator saturável (tipo 98), para representar a saturação do ramo de magnetização, o qual foi obtido de um ensaio no laboratório onde foi traçada a curva de magnetização dos TC's [31]. A seguir é apresentado o modelo para transformador de corrente.

3.4.1 - TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Um transformador monofásico com dois enrolamentos pode ser representado pelo circuito da figura 3.10.

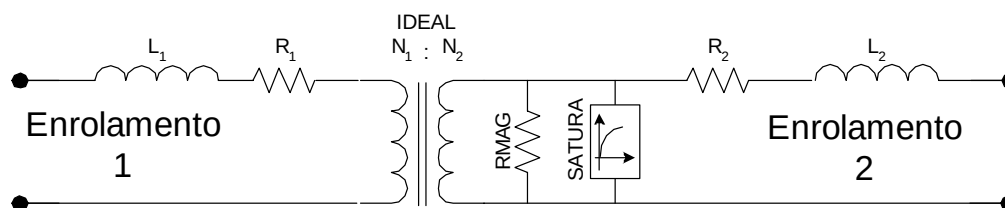


Figura 3.10 - Transformador monofásico com dois enrolamentos.

O modelo da figura 3.11 apresenta um transformador monofásico ideal de forma a garantir uma relação de transformação correta do enrolamento um (1) para o enrolamento dois (2).

Ambos os enrolamentos (1) e (2) possuem uma impedância de dispersão associada aos mesmos, caracterizadas pelas resistências R_1 e R_2 e as indutâncias L_1 e L_2 . Nota-se que estes valores podem ser obtidos pela impedância do ensaio de curto-circuito. A indutância de dispersão L_2 do secundário enrolamento (2) tem de ser um valor não nulo, enquanto que a indutância L_1 do primário pode ser nula [31].

O efeito da saturação do ramo de magnetização está confinado a um reator não linear “SATURA” no circuito do enrolamento (2).

No caso de saturação o modelo de reator pseudo não linear (tipo 98) é utilizado interinamente. Com o intuito de obter dados necessários para a representação do reator saturável, pode-se aplicar tensão variável ao transformador e medir as correntes correspondentes criando-se assim uma característica (V_{rms} , I_{rms}). A seguir, pode-se utilizar a rotina suporte “SATURA”, seção XIX-G do *Role Book* para criar a característica de valor de pico (*fluxo x corrente*).

No caso de não se considerar a saturação do transformador, caso linear, somente um valor de pico da característica *fluxo x corrente* deve ser obtido pelo ensaio de excitação do TC.

Se a característica de *fluxo x corrente* não é especificada, a reatância de magnetização é considerada inexistente e a corrente de magnetização desprezada.

As perdas obtidas no ensaio a vazio determinam a resistência do ramo de magnetização R_{MAG} a qual está em paralelo com o reator saturável. A resistência do ramo de magnetização pode ser calculada por:

$$R_{MAG} = \frac{E_2^2}{P_{fe}} \quad (3.39)$$

onde:

E_2 - Tensão aplicada no enrolamento de baixa tensão do TC durante o ensaio a vazio;

P_{fe} - Perdas no ferro do TC obtidas do ensaio a vazio;

$$P_{fe} = P_0 - R_1 i_{\kappa}^2 \quad (3.40)$$

P_0 - Perdas totais medidas durante o ensaio a vazio;

I_{κ} - Corrente no enrolamento de baixa tensão medida durante o ensaio a vazio.

3.4.2 - LEVANTAMENTO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO TC

Para determinar a curva de magnetização do TC, foi utilizado um TC de relação 10:1A. Para o cálculo dos pontos da curva de magnetização é necessária a característica B-H do núcleo do transformador de corrente e da geometria do núcleo [19].

A curva de magnetização do TC foi traçada a partir do ensaio laboratorial, os terminais do enrolamento primário são deixados em aberto, os terminais do enrolamento secundário é conectado uma fonte de tensão alternada senoidal, são utilizados dois instrumentos de medição um amperímetro e um voltímetro. Assim, variou-se a amplitude da corrente de zero a oito ampère e com o voltímetro obteve-se os valores da tensão de acordo com a variação da corrente da fonte de tensão. Sabe-se, que o fluxo é determinado a partir da tensão, número de espiras e frequência, como mostra a equação 3.42.

$$\lambda = \frac{E_2}{4.44 f} [Wb] \quad (3.41)$$

onde:

f - frequência nominal

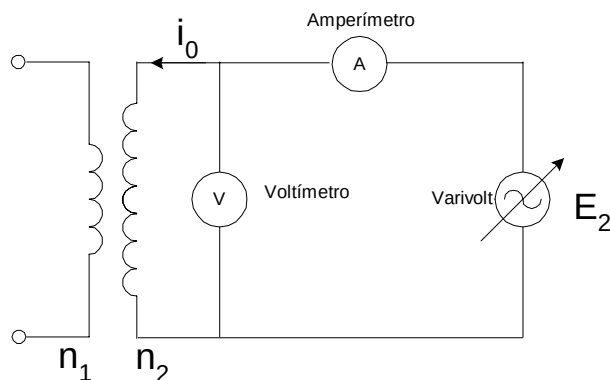


Figura 3.11 - Esquema para obtenção da curva de magnetização do TC.

Assim, os dados característicos dos três TC's foi construída a partir do ensaio de excitação, que é mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores do ensaio de excitação do TC, tensão, corrente e fluxo.

Transformador de Corrente_A			Transformador de Corrente_B			Transformador de Corrente_C		
Tensão [V]	Corrente [A]	Fluxo [Wb]	Tensão [V]	Corrente [A]	Fluxo [Wb]	Tensão [V]	Corrente [A]	Fluxo [Wb]
72,30	0,05	0,2714	72,41	0,05	0,2718	68,71	0,05	0,2579
80,70	0,10	0,3029	80,61	0,10	0,3026	78,82	0,10	0,2958
82,60	0,15	0,3100	82,60	0,15	0,3100	80,80	0,15	0,3033
83,91	0,20	0,3149	83,69	0,20	0,3114	82,04	0,20	0,3078
84,82	0,25	0,3183	84,61	0,25	0,3176	83,00	0,25	0,3116
85,23	0,27	0,3198	84,80	0,27	0,3183	83,22	0,27	0,3123
85,50	0,30	0,3209	84,97	0,30	0,3191	83,41	0,30	0,3131
86,40	0,40	0,3243	86,04	0,40	0,3228	84,30	0,40	0,3164
87,58	0,60	0,3288	87,20	0,60	0,3273	85,71	0,60	0,3217
88,30	0,80	0,3315	88,02	0,80	0,3303	86,53	0,80	0,3247
88,89	1,00	0,3337	88,61	1,00	0,3326	87,23	1,00	0,3273
90,20	1,50	0,3386	89,90	1,50	0,3337	88,51	1,50	0,3322
91,04	2,00	0,3416	90,73	2,00	0,3404	89,38	2,00	0,3356
91,63	2,50	0,3438	91,29	2,50	0,3427	90,10	2,50	0,3382
92,10	3,00	0,3457	91,80	3,00	0,3446	90,57	3,00	0,3401
92,40	3,50	0,3468	92,04	3,50	0,3453	90,98	3,50	0,3416
92,60	4,00	0,3476	92,31	4,00	0,3465	91,30	4,00	0,3427
93,14	5,00	0,3491	92,70	5,00	0,3479	91,72	5,00	0,3442
93,92	8,00	0,3525	93,58	8,00	0,3514	92,68	8,00	0,3449

A tabela 3.1 como pode ser observada, é composta da tensão de excitação, corrente de excitação e do fluxo nos três TC, cujos TC's, os quais foram utilizados nas simulações que serão apresentadas no próximo capítulo.

Depois de traçada a tabela do ensaio de excitação dos TC's, a figura 3.13, ilustra a curva de excitação dos TC's.

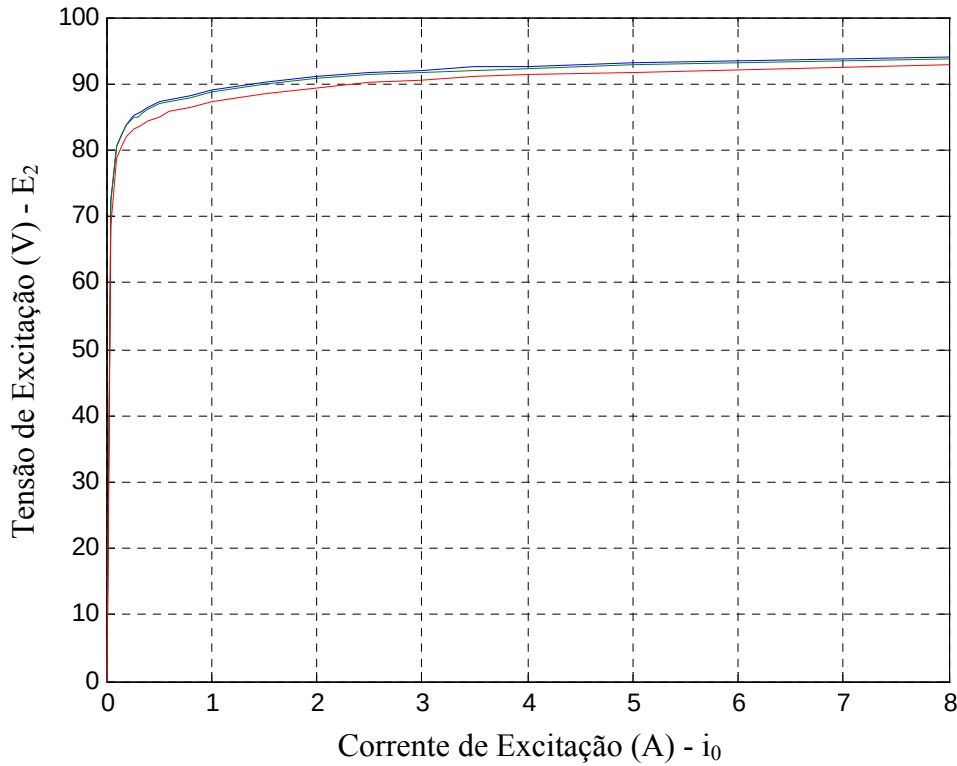


Figura 3.12 - Curva de Excitação dos TC's

A princípio como pode ser observado na figura 3.12, os TC's iniciam praticamente juntos, porém, ao atingirem o joelho da curva, eles começam a se comportarem de maneira diferente, o TC_A (vermelho), já sofre o efeito de saturação em quanto os outros TC_B (verde) e TC_C (azul), vão saturar um pouco depois, e ambos continuam praticamente juntos até o fim.

Os valores da impedância de dispersão dos enrolamentos podem ser determinados através dos dados do ensaio em curto circuito do TC, como a seguir:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (3.42)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (3.43)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (3.44)$$

onde:

P_{cc} , V_{cc} e I_{cc} são respectivamente, os valores de potência, tensão e corrente medidos no ensaio em curto-circuito e R_{cc} e X_{cc} são a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento.

Se E_2 é a tensão nominal do enrolamento 2 e E_1 é a tensão nominal do enrolamento 1, então:

$$R_2 = \frac{R_{cc}}{2} \times \frac{E_2^2}{E_1^2} \quad (3.45)$$

$$X_2 = \frac{X_{cc}}{2} \times \frac{E_2^2}{E_1^2} \quad (3.46)$$

Tabela 3.2 - Valores Atribuídos ao Transformador Saturável no ATP

Transformador de Corrente	R_{MAG} [Ω]	R_1 [Ω]	L_1 [H]	E_1	R_2 [Ω]	L_2 [H]	E_2
A	0,0	0,0008	0,0	50,0	0,0	0,008	5,0
B	0,0	0,0008	0,0	50,0	0,0	0,008	5,0
C	0,0	0,0008	0,0	50,0	0,0	0,008	5,0

A tabela ilustra os valores calculados a partir de ensaios laboratoriais nos transformadores de corrente. Esses valores são inseridos na modelagem dos TC's para a realização dos ensaios computacionais que será mostrado no capítulo V.

3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi utilizado um método simples para a análise do comportamento transitório dos transformadores de corrente de serviço de proteção. Apesar já ter sido focalizado em alguns trabalhos anteriores, é indispensável que ele proceda aos desenvolvimentos baseados em técnicas numéricas.

Também foi descrito neste capítulo um modelo de transformador de corrente, a partir de um transformador saturável utilizado pelo ATP, o qual emprega um reator saturável (tipo 98), para representar a saturação do ramo de magnetização. Foi realizado um ensaio de excitação do TC, para o levantamento da curva de magnetização, e depois foram demonstrados os equacionamentos para a determinação dos parâmetros do modelo dos enrolamentos primário e secundário do TC.

É fácil perceber que os métodos analíticos de resolução das equações diferenciais proporcionam uma visão mais “panorâmica” do problema a ser apresentado, permitindo que, ao se ter em mãos as expressões finais, tenha-se uma boa idéia da influência de determinados parâmetros no comportamento transitório dos transformadores de corrente de serviço de proteção mesmo levando em consideração a curva “Fluxo Concatenado x Corrente de Magnetização” e desprezando-se as impedâncias primárias, as perdas por Histerese e Foucault, as capacitâncias dos enrolamentos e seus fluxos remanescentes no núcleo do transformador de corrente.