

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

Valci Vitor Coelho

**ESTUDO DA AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE
CORRENTE DE ALTA TENSÃO ATRAVÉS DA CURVA DE
EXCITAÇÃO**

Florianópolis

2011

Valci Vitor Coelho

**ESTUDO DA AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE
CORRENTE DE ALTA TENSÃO ATRAVÉS DA CURVA DE
EXCITAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela

Co-orientador:

Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis

2011

Catologação na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

C672e Coelho, Valci Vitor

Estudo da avaliação de transformadores de corrente de alta tensão através da curva de excitação [dissertação] / Valci Vitor Coelho; orientador Nelson Jhoe Batistela. – Florianópolis, SC, 2011. 221 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia elétrica. 2. Transformadores elétricos. 3. Correntes elétricas. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.3

Valci Vitor Coelho

**ESTUDO DA AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE
CORRENTE DE ALTA TENSÃO ATRAVÉS DA CURVA DE
EXCITAÇÃO**

“Esta Dissertação foi julgada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.”

Florianópolis, 15 de Dezembro de 2011.

.....
Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

.....
Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador
UFSC

.....
Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Co-orientador
UFSC

.....
Prof. Mauricio Valencia Ferreira
da Luz, Dr.
UFSC

.....
Prof. Jean Viane Leite,
Dr.
UFSC

.....
Prof. Sérgio Henrique Lopes
Cabral, Dr.
Fundação Universidade Regional
de Blumenau – FURB

.....
Prof^ª. Jacqueline Gisele Rolim,
Dr^ª.
UFSC

Dedico este trabalho aos meus colegas
de serviço na Eletrosul e à minha
família.

AGRADECIMENTOS

Esta obra alcançou seu objetivo final graças a várias pessoas que me estimularam e compartilharam comigo de uma maneira ou de outra nos momentos de reclusão de estudo, elaboração de ensaios e busca de documentos. No entanto, não posso deixar de expor meus agradecimentos ao Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela e ao Prof. Dr. Nelson Sadowski, que foram meus mentores, incentivadores e coordenadores nas conquistas ao longo dos estudos. Outros grandes colaboradores que merecem meu grande reconhecimento foram Paulo Roberto Bernardes, técnico do LALTE – Laboratório de Alta Tensão da Eletrosul, e Vinicius R. Niedzwiecki, bolsista de Engenharia Elétrica do GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos da UFSC, que muito ajudaram na execução dos ensaios, além, é claro, dos demais colaboradores do LALTE.

Agradeço aos meus familiares pela paciência e tolerância disponibilizando espaço de tempo do ambiente familiar para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Agradeço em especial à Prof^a. Dr^a. Lourdes Mattos Brasil que também foi uma grande incentivadora para que eu continuasse os estudos.

Importante lembrar que é graças a Eletrosul que me liberou no tempo necessário de trabalho para me dedicar nesta jornada, trazendo retorno de aperfeiçoamento ao Laboratório de Alta Tensão (LALTE).

A todos, meu Muito Obrigado!

Embora $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ seja válida para todos os materiais, inclusive os ferromagnéticos, a relação entre \vec{B} e \vec{H} depende da magnetização prévia do material ferromagnético, isto é, sua “história magnética”. Ao invés de termos uma relação linear entre \vec{B} e \vec{H} (isto é, $\vec{B} = \mu\vec{H}$), somente é possível representar essa relação pela curva de magnetização ou curva B-H.

A magnetização \vec{M} (em ampère/metro) é o momento do dipolo magnético por unidade de volume inerente ao material.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre transformadores de corrente (TCs) de alta tensão, especialmente daqueles utilizados no sistema de proteção. O estudo se baseia em uma abordagem experimental da curva de excitação e na obtenção de laços de fluxo magnético por corrente de magnetização. Desta maneira, determina-se experimentalmente o fator de remanência do TC de proteção. Sob este aspecto, normas são estudadas, analisadas e comparadas, bem como alguns procedimentos e métodos utilizados pelos fabricantes. Também sob este aspecto, alguns conhecimentos e suas aplicações por especialistas do sistema de proteção são abordados com o objetivo de ser uma referência de consulta no entendimento e análise de normas e, principalmente, do desempenho do TC sobre o enfoque eletromagnético na operação. Propõe-se um método de avaliação da qualidade do ensaio de levantamento da curva de excitação por meio da análise da forma de onda da tensão da fonte de alimentação do circuito elétrico de ensaio. Analisam-se os métodos, padronizados ou não, e se propõe maneiras de determinação de valores dos parâmetros tensão do ponto de joelho, tensão de saturação, fator de remanência e constante de tempo secundária. Faz-se uma análise breve dos valores obtidos pelas metodologias propostas por este trabalho.

Palavras-chave: Transformador de corrente. Fator de remanência magnética. Constante de tempo secundária. Ponto de joelho.

ABSTRACT

This work presents a study on high voltage current transformers (CTs), especially on those used in the protection system. The study is based on an experimental approach of the excitation curve and on the obtention of bonds of magnetic flux by magnetizing current, thus, providing the experimental dertermination of the remanence factor of the protection CT. Therefore, rules are studied, analyzed and compared, as well as some procedures and methods used by manufacturers of these devices. In addition, some knowledge and its application by experts from the protection system are discussed in order to provide additional reference of consultation on understanding and analysis of the rules, especially of the performance of CT focused on the electromagnetic operation. An assessment method of the quality of the excitation curve trial is proposed, by analyzing the waveform of the voltage power supply circuit test. It examines the methods, standardised or not, and proposes ways of determining the values of the following parameters: knee point voltage, saturation voltage, remanence factor and secondary time constant. It also provides a brief analysis of the values obtained by the methodologies proposed by this work.

Keywords: Current transformer. Magnetic remanence factor. Secondary time constant. Knee point.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Circuito de um transformador básico.....	40
Figura 2.2 -	Circuito com o TC ligado em série [4].....	40
Figura 2.3 -	TC com o núcleo em formato toroidal.....	41
Figura 2.4 -	Representação unifilar de um TC.....	41
Figura 2.5 -	Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de energia.....	42
Figura 2.6 -	TC na subestação fabricante AREVA, (a) TC 69 kV – modelo QDR – cabeça encapsulada em resina; (b) TC 750 kV – modelo CTH – cabeça encapsulada em alumínio [1].....	43
Figura 2.7 -	Circuito equivalente de um TC comum [1][4][10].	49
Figura 2.8 -	Circuito equivalente de transformador, (a) Transformador comum; (b) circuito equivalente e considerações simplificativas para TC tipo bucha [1]. ..	50
Figura 2.9 -	Circuito equivalente de TC tipo bucha, a) TC tipo bucha; (b) Circuito equivalente simplificado [2].	51
Figura 2.10 -	Determinação do ponto de joelho conforme norma ANSI, (Réplicas das Figuras C.11 e C.9 do Anexo C); a) Curva de excitação mostrando o ponto de joelho à tangente de 30° para TC com entreferro e à tangente de 45° para TC sem entreferro [22]; (b) Curva de excitação típica para TC classe C com múltiplas relações de transformação [2][13][17][18].	52
Figura 2.11 -	Curva de excitação mostrando a localização do ponto de joelho nominal conforme [15][19][20].....	53
Figura 2.12 -	Determinação gráfica $V_{SAT} = V_x$ [29].....	54
Figura 2.13 -	Ponto de joelho conforme IEEE/ANSI [2][13].	56
Figura 3.1 -	TC como transdutor de corrente.....	62
Figura 3.2 -	Circuito do ensaio de saturação [4].....	62
Figura 3.3 -	Circuito equivalente do TC [1][10].....	63
Figura 3.4 -	Curva de saturação típica de um TC.	63
Figura 3.5 -	Exemplo do efeito da carga secundária na curva de saturação [21].....	65

Figura 3.6 -	Curvas de Histerese, (a) Curva de histerese normal; (b) Curva de histerese com remanência [18].	68
Figura 3.7 -	Transitório de curto-circuito, (a) curto-circuito SIMÉTRICO; (b) curto-circuito ASSIMÉTRICO [10].	69
Figura 3.8 -	Aumento do fluxo no núcleo de um TC quando ocorre um transitório [2].	70
Figura 3.9 -	Comportamento do sinal com saturação, (a) Efeito da saturação no fluxo; (b) Efeito na corrente secundária [23].	70
Figura 3.10 -	Curva de saturação típica de um TC 10P20 - 100VA [1].	71
Figura 3.11 -	Ciclo de operação do disjuntor [1].	72
Figura 3.12 -	Regime transitório de dois ciclos de operação [1].	73
Figura 3.13 -	Circuito equivalente simplificado do TC [1].	75
Figura 3.14 -	Curva de excitação secundária de um TC [2].	78
Figura 3.15 -	Variação de K_s em função de T_2 com $T_1 = 0,04s$.	79
Figura 3.16 -	Tempo de resposta do TC no secundário [2].	81
Figura 3.17 -	Comportamento do erro de relação e fase de TCs com e sem entreferro, para relações de transformação muito baixas [22].	82
Figura 3.18 -	Circuito ensaio de saturação em TC, (a) Circuito básico; (b) Circuito equivalente simplificado adotado para análise [4][3].	85
Figura 3.19 -	Circuito da bancada de ensaio de saturação, (a) Diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio de saturação em TC; (b) Painel frontal do VI de ensaio de curva de magnetização [3].	85
Figura 3.20 -	Comportamento teórico da tensão e da indutância, (a) Tensão <i>versus</i> Corrente; (b) Indutância <i>versus</i> Corrente.	88
Figura 3.21 -	Comportamento teórico da Tensão e Indutância <i>versus</i> Corrente.	88
Figura 3.22 -	Comportamento teórico das constantes de tempo T_2 na seleção de TCs	89
Figura 3.23 -	Curvas de T_2 e L_0 ensaios em TCs sem carga.	94
Figura 3.24 -	Curvas de T_2 e L_0 ensaios em TC com carga.	96

Figura 3.25 -	Resultado de ensaios de T_2 para 8 TC3S.....	97
Figura 3.26 -	T_2 em TC sem e com entreferro.	98
Figura 3.27 -	Visualização da aplicação da regra de ouro na atuação do TC sob uma corrente máxima simétrica.....	100
Figura 3.28 -	Curvas de Excitação típicas de TCs [1].	102
Figura 3.29 -	Classificação do TC conforme ANSI [13][17].	104
Figura 3.30 -	Diferentes pontos de joelho para uma mesma especificação de classe C para TC	106
Figura 3.31 -	Determinação do ponto de joelho equivocada [33].....	107
Figura 3.32 -	Demonstração do equívoco da referência [33].....	108
Figura 3.33 -	Equívoco comum na interpretação da ANSI [29].	108
Figura 3.34 -	Limites de referência adotados pela IEC [34].	109
Figura 3.35 -	Método adotado pelo especialista Krüger [35].	111
Figura 3.36 -	Declinação pelo método gráfico [36].	112
Figura 3.37 -	Diagrama equivalente simplificado de um TC [37].	113
Figura 3.38 -	Pontos de funcionamento do TC em sua carga [37].	115
Figura 3.39 -	Influência da carga em ALF [34].	116
Figura 3.40 -	Determinação do ponto de joelho conforme IEC [14][15].	117
Figura 3.41 -	Método determinar V_k e V_x pela IEEE/ANSI [2][13]...	118
Figura 3.42 -	Determinação V_k e V_x pelo método Krüger [35].	118
Figura 3.43 -	Método proposto para determinação do ponto de joelho e de saturação.	119
Figura 3.44 -	Resultados de ensaios da primeira avaliação dos diferentes métodos estudados na determinação do ponto de joelho.....	120
Figura 3.45 -	Ensaio da segunda avaliação dos diferentes métodos..	121
Figura 3.46 -	Laço Fluxo <i>versus</i> Corrente para determinar K_r	126
Figura 4.1 -	Circuito de ensaio de como verificar a qualidade da tensão de ensaio de saturação com a fonte de alimentação a vazio, conforme a IEEE [22].....	132
Figura 4.2 -	Circuito de ensaio de como verificar a qualidade da tensão de ensaio de saturação com a fonte de alimentação com carga, conforme a IEEE [22].....	133
Figura 4.3 -	Ensaio da corrente de excitação.	135

Figura 4.4 -	Fator de forma FF na curva de magnetização.	136
Figura 4.5 -	Forma de onda de tensão distorcido no intervalo de tempo sob saturação.....	137
Figura 4.6 -	Formas de onda dos fluxos na saturação.	138
Figura 4.7 -	Fatores de forma em função da corrente de pico.	139
Figura 4.8 -	Relação I_{pico}/I_{eficaz} em função da tensão eficaz.	140
Figura 4.9 -	Laço de tensão por corrente – 220 V.	140
Figura 4.10 -	Laços de fluxo por corrente, em 220V.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Resultado de L_0 e T_2 obtidos pelos métodos proposto e IEC.....	92
Tabela 3.2 -	L_0 e T_2 em TCs sem e com entreferro sem carga	93
Tabela 3.3 -	L_0 e T_2 em TC sem e com entreferro com carga	95
Tabela 3.4 -	Valores do ponto de joelho do ensaio	121
Tabela 3.5 -	Valores da tensão e corrente para TC3S.....	122
Tabela 3.6 -	Valores da tensão e corrente para TC6200377.....	122
Tabela 3.7 -	Valores obtidos do K_r para o TC3S	126
Tabela 3.8 -	Valores obtidos do K_r para o TC6200377.....	126
Tabela 3.9 -	Comparação K_r ensaios e fabricantes, TC3S	129
Tabela 3.10 -	Comparação K_r ensaios e fabricantes, TC6200377..	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ac</i>	<i>alternate current</i>
<i>air-gap</i>	Entreferro
<i>ALF</i>	<i>Accuracy Limit Factor nominal</i>
<i>ALFr</i>	Fator limite de exatidão associado à carga real
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AS	<i>Australian Standards</i>
BS	<i>British Standards</i>
C-O-C-O	<i>Close-Open-Close-Open</i>
CT	<i>Current Transformer of High Voltage</i>
<i>dc</i>	<i>direct current</i> (corrente contínua)
<i>f</i>	Forma de onda simétrica
<i>f_{ef}</i>	Valor eficaz da forma de onda simétrica
<i>fem</i>	Força eletromotriz
<i>FF</i>	Fator de forma
<i>FFfluxo</i>	Fator de forma do fluxo
<i>FFfluxom</i>	Fator de forma do fluxo corrigido
<i>FFv</i>	Fator de forma da tensão
<i>FFvm</i>	Fator de forma da tensão corrigida
<i>f_{med}</i>	Valor médio da forma de onda simétrica
<i>fmm</i>	Força magnetomotriz
GO	Grão Orientado
IEC	<i>International Electrotechnical Comission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IPL</i>	<i>rated Instrument Limit Primary current</i>
IRAM	<i>Instituto Argentino de Racionalización de Materiales</i>
LabView	Plataforma de desenvolvimento da <i>National Instruments</i>
log-log	logaritmo-logaritmo
máx	máximo
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
<i>pu</i>	Sistema por unidade (<i>per unit</i>)
<i>rms</i>	Valor eficaz
TC	Transformador de Corrente de Alta Tensão
UNE	Normas Técnicas Espanholas
VDE	Associação de normas Alemãs
VI	<i>Virtual Instruments</i> (Instrumento Virtual)
<i>N</i>	Número de espira
<i>N_l</i>	Número de espira do enrolamento primário

N_2	Número de enrolamento secundário
A, A_1, A_2	Amperímetros
F_s	Fator de segurança, fator de sobrecorrente
P_1, P_2	Terminais primários
S_1, S_2	Terminais secundários
M, M_1 e M_{12}	Fatores de majoração
\ln	Função logarítmica natural
K_s	Fator de saturação
K_r	Fator de remanência
ΔK_s	Fator de correção de K_s devido ao fator de potência da carga causado por L_2
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do núcleo de um TC
P_M	Ponto de máxima permeabilidade
K_c	Relação de transformação nominal
K_{td}	Fator de dimensionamento à transiente nominal (envoltória)
K_{ssc}	Fator de curto-circuito nominal
F_A	Fator de assimetria
K_{tf}	Fator de transiente
P_{inf}	Ponto de inflexão
K_x	Fator de dimensionamento
K_{rem}	Constante de dimensionamento devido à remanência
R1	Região não saturada
R2	Região saturada
ΔU_{R1}	Varição da tensão de excitação na região não saturada
ΔU_{R2}	Varição da tensão de excitação na região saturada
ΔI_{R1}	Varição da corrente de excitação na região não saturada
ΔI_{R2}	Varição da corrente de excitação na região saturada
L_{OR1}	Indutância de magnetização na região não saturada
L_{SR2}	Indutância de magnetização na região saturada

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade SI
Z, Z_c	Impedância de carga	ohm [Ω]
i_1 ou I_1 , I_{1n} , I_n	Corrente primária, corrente primária nominal, corrente nominal	ampère [A]
I_2 ou i_2 , I_{2n}	Corrente secundária, corrente secundária nominal	ampère [A]
ℓ_m	Comprimento médio do caminho magnético do núcleo de um TC	metro [m]
S	Área da seção de cruzamento do núcleo magnético de um TC	[m ²]
E_2 ou $v_m(t)$, E_{2n} , E_{2r}	Força eletromotriz secundária, Força eletromotriz secundária nominal, Força eletromotriz secundária real	volt [V]
U_2	Tensão sobre a carga do secundário	volt [V]
I'_{1l}	Corrente primária referida ao secundário	ampère [A]
Z'_1	Impedância do primário referida ao secundário	ohm [Ω]
I_0 ou i_0 , I_{En} , I_{Er}	Corrente excitação/magnetização do TC, Corrente excitação nominal, Corrente excitação real	ampère [A]
I_μ	Corrente magnetização do núcleo do TC	ampère [A]
I_o	Corrente de perdas (Histerese e Joule)	ampère [A]
R_p	Resistência equivalente as perdas do TC	ohm [Ω]
U'_1	Tensão eficaz primária referida ao secundário	volt [V]
r'_1	Resistência do enrolamento primário referida ao secundário	ohm [Ω]
x'_1	Reatância de dispersão do enrolamento primário referida ao secundário	ohm [Ω]
r_2	Resistência ôhmica do enrolamento secundário	ohm [Ω]
ω	Frequência angular	[rad/s]
x_2	Reatância de dispersão do enrolamento secundário	ohm [Ω]
f	Frequência	hertz [Hz]

Símbolo	Descrição	Unidade SI
U_{joelho} ou V_{joelho} ou V_k	Tensão de Joelho	volt [V]
T_s	Tempo de Saturação	segundo [s]
Φ_{ac}	Componente alternada simétrica do Fluxo	weber [Wb]
Φ_{tc}	Componente transiente do Fluxo	weber [Wb]
I_{psc}	Corrente de curto-circuito	ampère [A]
T'_{al}	Tempo de atuação da proteção para o 1º ciclo (relé)	segundo [s]
t'	Tempo de comando de abertura de disjuntor no 1º ciclo	segundo [s]
t_m	Tempo morto - intervalo de tempo de interrupção da corrente de curto-circuito	segundo [s]
t''_{al}	Tempo de atuação da proteção para o 2º ciclo (relé)	segundo [s]
t''	Tempo de comando de abertura de disjuntor no 2º ciclo	segundo [s]
$T,$ $T_1,$ T_2	Constante de tempo, Constante de tempo primária, constante de tempo secundária	segundo [s]
L_{eq}	Indutância equivalente	henry [H]
R_{eq}	Resistência equivalente	ohm [Ω]
R ou R_I	Resistência da malha de curto circuito do sistema de potência	ohm [Ω]
L_I	Indutância da malha de curto circuito do sistema de potência	henry [H]
X ou X_I	Reatância da malha de curto circuito do sistema de potência	ohm [Ω]
R ou r_c	Resistência da carga ligada ao secundário do TC	ohm [Ω]
R_2	Resistência ôhmica do enrolamento secundário mais Resistência ôhmica da carga ($R_2 = r_2 + r_c$)	ohm [Ω]
L_c ou L_2	Indutância da carga	henry [H]
L_0	Indutância de magnetização do TC	henry [H]
V_x ou V_{sat}	Tensão de Saturação	volt [V]
V_e	Tensão de excitação	volt [V]
$\Phi(t)$	Fluxo obtido da integração de $v(t)$	weber [Wb]

Símbolo	Descrição	Unidade SI
$v(t)$	Tensão senoidal aplicada como fonte de alimentação no ensaio de saturação do TC	volt [V]
$\Phi_m(t)$	Fluxo obtido da integração de $v_m(t)$ Fluxo magnetizante	weber [Wb]
\vec{I}	Vetor corrente	ampère [A]
\vec{B}	Vetor indução magnética ou densidade de fluxo magnético	tesla [T]
B	Densidade de fluxo instantânea no núcleo de um TC	tesla [T]
B_{max}	Valor máximo de B quando B é alternante	tesla [T]
B_x	Valor de B_{max} quando a tensão induzida no núcleo de um TC é V_x	tesla [T]
λ	Fluxo concatenado	tesla [T]
μ_0	Permeabilidade magnética do ar	[H/m]
μ_{vacuo}	Permeabilidade magnética do vácuo	
Φ_S	Fluxo de saturação	weber [Wb]
L_{O_IEC}	Indutância de magnetização conforme IEC	henry [H]
$L_{O_Met.Proposto}$	Indutância de magnetização conforme método proposto	henry [H]
x_c	Reatância da carga conectada no secundário do TC	ohm [Ω]
H	Intensidade de campo magnético agindo sobre o núcleo de um TC	[A/m]
I_k	Corrente no ponto de joelho	ampère [A]
I_{2F}	Corrente secundária de falta	ampère [A]
I_{2T}	Corrente secundária total	ampère [A]
α	Ângulo de 45° ou 30° cuja tangente a curva de excitação serve como referência para determinar o ponto de joelho conforme IEEE/ANSI	grau [°]
Z_E	Impedância de magnetização	ohm [Ω]
Z_2	Impedância de do enrolamento secundário $Z_2 = r_2 + jx_2$	ohm [Ω]
I_{Eal}	Corrente de excitação na condição limite de exatidão da ANSI	ampère [A]

Símbolo	Descrição	Unidade SI
Z_{2T}	Impedância secundária total	ohm [Ω]
ε	Erro percentual de exatidão	[%]
I_{2al}	Corrente secundária para a condição de limite de exatidão da ANSI	ampère [A]
\hat{i}_ε	Amplitude da corrente do erro de medição	ampère [A]
$\hat{i}_{\varepsilon ac}$	Amplitude da componente ac do erro de medição	ampère [A]
$\hat{\varepsilon}_{ac}$	Erro instantâneo de crista máximo da componente ac	[%]
$\hat{\varepsilon}$	Erro instantâneo de crista máximo	[%]
Φ_r	Fluxo remanente	weber [Wb]
φ	Ângulo da tensão num instante de curto circuito	grau [$^\circ$]
θ	Ângulo de defasagem entre tensão e corrente do sistema	grau [$^\circ$]
δ	Ângulo da corrente primária no instante do curto circuito	grau [$^\circ$]
t_a	Tempo em que ocorre o maior valor de crista da corrente no instante do curto circuito	segundo [s]
$\Phi_{exp_{max}}$	Fluxo exponencial máximo da corrente de curto-circuito	weber [Wb]
$\Phi_{sen_{max}}$	Fluxo senoidal máximo da corrente de curto-circuito	weber [Wb]
β	Ângulo de carga secundária	grau [$^\circ$]
X_2	Reatância secundária $X_2 = x_2 + x_c$	ohm [Ω]
φ_ε	Ângulo de deslocamento de fase	minuto [']
L_{ct}	Indutância do enrolamento secundário	henry [H]
E_{al}	Tensão para o limite de exatidão na ANSI	volt [V]
\hat{i}_{al}	Valor de crista da corrente de excitação secundária	ampère [A]
U_{al}	Tensão secundária limite de excitação	volt [V]
I_{th}	Corrente térmica	ampère [A]
L_s	Indutância de saturação	henry [H]
D_1, D_2	Declinação	ohm [Ω]

Símbolo	Descrição	Unidade SI
R_N ou R_n	Resistência de carga nominal	ohm [Ω]
E_{2n}	Tensão de magnetização nominal	volt [V]
P_n ou P_N	Potência nominal	[VA]
R_r	Carga real instalada no secundário do TC	ohm [Ω]
P_r	Potência real da carga	[VA]
E_{2r}	Tensão de magnetização real do TC	volt [V]
P_i	Perdas internas do TC	[VA]
Kr_{IEC}	Fator de remanência conforme IEC	[%]
$Kr_{FluxMax}$	Fator de remanência conforme o último ponto de fluxo obtido na curva de excitação, quando for em 10A equivale ao ponto de 10% de erro da classe de exatidão ANSI	[%]
Kr_{IEEE_Vx}	Fator de remanência relacionado ao ponto de saturação V_x da norma IEEE/ANSI	[%]
$Kr_{InflexãoSup}$	Fator de remanência referente ao ponto de inflexão superior proposto por Valci	[%]
t	Tempo após a abertura definitiva do disjuntor	segundo [s]
λ_2	Fluxo de acoplamento devido ao fluxo mútuo	weber [Wb]
Φ	Fluxo magnético mútuo para o primário e o secundário	weber [Wb]
R_{fios}	Carga resistiva dos fios de conexão	ohm [Ω]
$R_{relé}$	Carga resistiva dos relés conectados	ohm [Ω]
L_{Sec}	Indutância secundária (soma da indutância de magnetização e de dispersão)	henry [H]
C_M	Coefficiente de majoração	
I_p	Corrente e pico	ampère [A]
I_{ef}	Corrente eficaz	ampère [A]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	33
1.1.	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA	33
1.2.	METODOLOGIA	34
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	35
2.	TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TCS) DE ALTA TENSÃO	39
2.1.	INFORMAÇÕES BÁSICAS	39
2.2.	PARADIGMA DO SETOR ELÉTRICO DIANTE DA ESPECIFICAÇÃO DE TC	44
2.3.	NORMAS TÉCNICAS PARA TC.....	45
2.4.	PONDERAÇÃO A RESPEITO DAS DEDUÇÕES OBTIDAS NO DOCUMENTO IEEE 76 CH 1130-4 PWR <i>TRANSIENT RESPONSE OF CURRENT TRANSFORMERS</i>	48
2.5.	DEFINIÇÕES CONFORME NORMAS	51
2.5.1.	Definições conforme o guia IEEE para aplicação de TCs para uso com relé de proteção.....	51
2.5.2.	Definições conforme o relatório de estudos do comitê de estudo de proteção para sistema de potência sobre “Resposta à Transiente de Transformadores de Corrente” da IEEE	54
2.5.3.	Definições conforme o relatório de estudos do comitê de estudo de proteção para sistema de potência sobre as “Características e Desempenho de Transformadores de Corrente com Entreferro no Núcleo” da IEEE	57
2.5.4.	Definições encontradas na nota técnica da empresa <i>General Electric (GE)</i> referente à utilização do “Guia IEEE para aplicação de transformadores de corrente para uso com relé de proteção” ao relé 489 <i>Generator Management Relay</i>	59
2.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 2.....	59
3.	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO NÚCLEO DO TC.....	61
3.1.	COMPORTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TC FRENTE A SUA UTILIZAÇÃO.....	61

3.2.	RESPOSTAS DOS TCS DE PROTEÇÃO PARA CORRENTES DE FALTAS ASSIMÉTRICAS	66
3.3.	COMPORTAMENTO DO TC DURANTE O REGIME TRANSITÓRIO.....	71
3.3.1.	Constantes de Tempo.....	74
3.4.	PROPOSTA PARA ESCOLHA DO TC DE MELHOR DESEMPENHO ATRAVÉS DO ENSAIO DE SATURAÇÃO PELA AVALIAÇÃO DE L_0 E T_2	83
3.4.1.	Determinação da Indutância de Magnetização L_0 e da Constante de Tempo Secundária T_2	84
3.4.2.	Resultados de ensaios em TC no laboratório de alta tensão quanto à determinação da indutância de magnetização L_0 e da constante de tempo T_2	90
3.5.	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE SATURAÇÃO V_x	98
3.5.1.	Dimensionamento do TC pela tensão de saturação (V_x)	99
3.5.2.	Avaliação da tensão de saturação na curva de excitação por diferentes normas e especialistas	100
3.5.2.1.	Avaliação da norma ANSI.....	103
3.5.2.2.	Avaliação da norma IEC.....	108
3.5.2.3.	Avaliação através do método adotado pelo especialista Krüger.....	109
3.5.3.	Influência da carga no fator limite de exatidão	113
3.5.4.	Síntese referente aos limites de tensão utilizados na curva de excitação para o dimensionamento do TC.....	116
3.5.4.1.	Método proposto para determinação do ponto de joelho e de saturação	119
3.5.4.2.	Resultados da avaliação dos diferentes métodos para determinar a tensão de joelho e de saturação através de ensaios de TC no laboratório de alta tensão.....	120
3.6.	AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE REMANÊNCIA MAGNÉTICA DE TC TPY.....	123
3.6.1.	Resultados da avaliação do fator de remanência K_r por diferentes métodos através de ensaios realizados em laboratório de alta tensão	125
3.6.1.1.	Resultados da avaliação dos dados obtidos em ensaios com métodos propostos por fabricantes.....	128

4.	MÉTODO DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA TENSÃO APLICADA NO TC QUANDO SE REALIZA O ENSAIO DO LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO	131
4.1.	NATUREZA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE EXCITAÇÃO PELO MÉTODO DE CORRENTE ALTERNADA	131
4.1.1.	Nova Proposta de avaliação da qualidade da forma de onda da tensão	134
4.1.1.1.	Resultados e análise da metodologia proposta de avaliação da qualidade do sinal de tensão aplicada no secundário do TC utilizando o fator de forma.....	135
4.1.1.2.	Considerações finais sobre a metodologia proposta de avaliação da qualidade do sinal de tensão utilizando o fator de forma	141
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
	REFERÊNCIAS	149
	ANEXO A - Densidade de fluxo instantânea em TC tipo bucha para corrente primária assimétrica	153
	ANEXO B - Sobre do fator de saturação	161
	ANEXO C - Classificação dos TC de proteção conforme Normas.....	163
	ANEXO D - Dimensionamento do TC conforme fabricante	193
	ANEXO E - Aspectos construtivos de TC de alta tensão.....	203
	ANEXO F - Dimensionamento do TC pela tensão de saturação (V_x), fator de assimetria, coeficiente de majoração e fator de majoração.....	211

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA

As empresas do setor de transmissão, distribuição e geração de energia elétrica se veem diante do paradigma de se adequarem ao crescente avanço tecnológico em diferentes áreas do conhecimento ligado à eletricidade. Com referência a esta evolução técnica estão os relés micro processados, responsáveis pela atuação da proteção do sistema elétrico frente a transitórios, curto circuitos e outros distúrbios que porventura venham causar falhas promovendo faltas no fornecimento da energia elétrica [1]. Consequentemente, isto implica que a resposta dinâmica dos transformadores de corrente de alta tensão [1] também seja melhorada para se usufruir da rápida resposta que estes novos relés oferecem aos eventos perturbadores no circuito de fornecimento de energia elétrica.

Esta exigência de transformadores de corrente de alta tensão, doravante denominado TCs, fez com que os fabricantes aperfeiçoassem seus modelos comerciais. Ao mesmo tempo forçou a elaboração de novas normas técnicas para avaliação destes equipamentos em relação à especificação e à avaliação de ensaios, que atestassem a eficácia destes TCs.

Os laboratórios das empresas do setor elétrico, instituições de metrologia ou de ensino, responsáveis por realizar os ensaios em TC, ficaram com o desafio de se adequarem para execução dos ensaios pertinentes à avaliação destes equipamentos de acordo com o especificado nas normas. Entretanto, às vezes não é fácil esta tarefa, pois as normas nem sempre são muito claras e, muitas vezes, utilizam de considerações com o intuito de simplificar os equacionamentos teóricos em prol da realização prática dos ensaios e de avaliações.

Partindo destas premissas, tem-se como objetivo neste estudo avaliar as normas vigentes, questionando algumas considerações assumidas frente a simplificações teóricas. Através de experimentos de medições e simulações, o comportamento destes equipamentos com relação a alguns parâmetros é apresentado, esclarecendo o entendimento referente aos ensaios de curva de excitação, valor nominal da tensão de saturação, constante de tempo da malha secundária e a remanência magnética, os quais são indicadores do funcionamento dinâmico do TC frente à resposta de sinais transitórios, isto é, da qualidade de desempenho do TC. Além das informações contidas no estudo destas

três características de avaliação do TC, apresentam-se também informações associadas difíceis de serem encontradas na literatura técnico-científica.

Por fim, este trabalho também tem como intuito de servir de referência aos engenheiros especialistas de proteção e equipamentos para o entendimento das normas de TCs e análise crítica das mesmas.

Apesar de este trabalho tratar mais sobre TCs de proteção, alguns conhecimentos podem ser aplicados aos TCs de medição.

1.2. METODOLOGIA

Na busca de se alcançar os objetivos propostos são apresentadas as normas que regem este assunto, que atendem as atuais exigências do sistema elétrico em face às respostas a transitórios elétricos.

São estudados os métodos propostos por diferentes literaturas com relação ao ensaio de curva de excitação, mais conhecida também como característica de saturação do TC. Assim como, também se propõe outros métodos para executar ensaios em TC a fim de auxiliar os laboratórios de alta tensão em suas avaliações das curvas de excitações, do valor da tensão de saturação, da constante de tempo da malha secundária e da remanência magnética. Estes métodos estudados e proposto são intercomparados com o objetivo de melhor entender os resultados, os fenômenos envolvidos em si, proporcionando incremento da massa crítica de material escrito sobre o assunto.

Para se observar se o tipo de classe do TC fornecido pelo fabricante está dentro do especificado em relação à remanência magnética em face aos requisitos de resposta a transitório solicitado pelo setor elétrico, se realiza o ensaio de resposta do núcleo, obtendo o laço de fluxo *versus* corrente e a curva de saturação conjuntamente. Normalmente os laboratórios do setor elétrico somente realizam o ensaio de curva de saturação. Através da plataforma LabView¹ e de instrumentos virtuais especificamente desenvolvidos em módulos de análises virtuais se transforma valores de tensão, obtidos no ensaio de saturação, em valores de fluxo magnético por procedimentos de integração e de proporcionalidade, possibilitando-se assim determinar o percentual relativo de fluxo remanente possível que possa ocorrer no núcleo do TC.

¹ LabView plataforma de programação gráfica da National Instruments <http://www.ni.com/labview/>

É apresentado um método de avaliar qualitativamente o quanto a forma de onda da tensão aplicada ao secundário do TC, quando se realiza o ensaio de saturação, pode estar distorcida. Isto é realizado através da observação do comportamento de desvio do valor do fator de forma (FF) desta tensão em relação ao fator de forma de um sinal senoidal puro.

Os estudos realizados e os resultados alcançados foram baseados em normas e em procedimentos de ensaios experimentais.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura de apresentação dos estudos realizados neste trabalho é feita com o objetivo de permitir que leitor possa compreender os assuntos de maneira clara e objetiva. Essa dissertação se divide basicamente em três principais partes: informações básicas de como é um TC, em relação à sua construção, utilização no sistema elétrico e a evolução das normas a respeito deste equipamento; estudo do comportamento do núcleo do TC através do levantamento de sua curva de excitação, avaliando as diferentes normas sobre o assunto, bem como propondo métodos de avaliação do TC através da constante de tempo do enrolamento secundário e a determinação do ponto referência de fluxo de saturação para a determinação do fator de remanência magnética; e uma proposta de método de avaliação qualitativa da tensão utilizada no ensaio de saturação do TC, para que os laboratoristas, engenheiros inspetores de fábricas e especialistas possam ter parâmetros que facilitem uma melhor avaliação do ensaio (teste) propriamente dito com a finalidade de se obter a curva de excitação.

No capítulo 2 são apresentadas as informações básicas sobre o circuito de um transformador, como este funciona, na transformação de corrente, como é ligado num circuito elétrico, e a sua representação num diagrama unifilar em um sistema elétrico de energia. Uma introdução aos aspectos construtivos gerais de um TC é apresentada também. Além disso, aborda-se como esses equipamentos são classificados conforme sua utilização. Faz-se uma abordagem sobre o paradigma de atualização, adequação e utilização do setor elétrico diante da especificação de TC, principalmente devido à evolução da tecnologia dos relés e das normas técnicas para TCs. Algumas ponderações são apresentadas a respeito das considerações adotadas como referências nas normas que usam como

base o documento IEEE 76 CH 1130-4 PWR *Transient Response of Current Transformers* [2].

No capítulo 3, inicia-se o desenvolvimento propriamente dito da dissertação avaliando o comportamento do núcleo do TC, apresentando o mesmo como um transdutor de informação de corrente, seu circuito básico de ensaio de saturação, seu circuito equivalente elétrico e a curva de excitação típica. Também é apresentado neste capítulo o comportamento dos TCs de proteção frente às correntes de faltas assimétricas, dando ênfase à constante de tempo de saturação, a qual é diretamente afetada pela constante de tempo da malha secundário do TC. Neste contexto, apresenta-se uma proposta para ser adotada nos laboratórios de ensaios com o objetivo de se escolher o TC de melhor desempenho desejado, dentro de um lote ou amostra de equipamentos fabricados, através do comportamento da indutância de magnetização e da constante de tempo secundária, obtidas do ensaio de saturação do TC. Além disso, avaliações são realizadas em relação às diferentes proposições das normas na determinação do valor da tensão de Joelho e de saturação nos testes de TC. Nesta aplicação propõe-se uma sugestão denominada “Método Proposto” para a determinação do ponto de Joelho e de saturação, cujos valores são comparados com os de normas por meio de mensurações em ensaios.

O fator de remanência magnética é avaliado nas diferentes proposições estudadas, assim como, uma demonstração experimental de que métodos são adotados por alguns fabricantes na determinação deste fator, os quais não estão de acordo com as normas, faltando também às vezes uma fundamentação teórica e experimental.

No capítulo 4 se realiza uma avaliação das normas com relação à natureza da fonte de alimentação para a determinação da característica de excitação pelo método de corrente alternada, onde é proposto um método de avaliação qualitativa da tensão de ensaio aplicada ao TC.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas nesta dissertação e também são propostas algumas perspectivas para trabalhos futuros.

Convém também situar o desenvolvimento deste trabalho de mestrado com trabalhos de pesquisa realizados em paralelo. Ele esteve em parte associado a um projeto de P&D “Desenvolvimento de uma Metodologia de Análise de Transformadores de Corrente – TC” entre UFSC e ELETROSUL [3]. Graças a este projeto, alguns desenvolvimentos aqui realizados puderam ser implementados. Por outro lado, com este trabalho de dissertação também se forneceu

análises e sugestões para que os objetivos e resultados do projeto P&D pudessem ser alcançados com um maior grau de qualidade.

Procurou-se também documentar e organizar informações técnicas, no texto principal e nos Anexos, para que técnicos e engenheiros de empresas do setor energético possam utilizar como referência, pois não há muitos trabalhos na literatura, principalmente na língua portuguesa. As referências [4], [5], [6] e [7] abordam sobre este tema, mas não sobre os aspectos aqui estudados.

2. TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TCs) DE ALTA TENSÃO

No desenvolvimento deste trabalho se considera que a pessoa que o lê já tenha um conhecimento técnico de eletricidade. Esta consideração faz-se necessária para que o mesmo não se torne extenso demais e que se possa abordar os assuntos pertinentes aos objetivos de uma maneira mais direta.

Neste capítulo 2, apresenta-se uma noção geral sobre TC de alta tensão em relação ao seu aspecto construtivo e a sua utilização, bem como, um breve histórico da evolução das normas que regem este equipamento.

2.1. INFORMAÇÕES BÁSICAS

Os TCs, em geral, são equipamentos transdutores de corrente elétrica que fazem parte do circuito de uma subestação de transformação de energia de um sistema elétrico, seja de distribuição ou transmissão de energia [1].

O TC, como transdutor, tem a função de transferir, através de acoplamento magnético, aos instrumentos de medição ou aos relés de proteção de uma subestação uma imagem da corrente elétrica que circula no outro lado do circuito em que o TC está conectado, que é o circuito de potência do sistema de energia.

Um TC, portanto, é um transformador cuja função principal é transferir a informação de corrente de um circuito para outro por meio de acoplamento magnético. A Figura 2.1 mostra o circuito de um transformador básico.

Os TCs aplicados em circuitos de alta tensão geralmente são construídos com seu núcleo magnético no formato toroidal por questões de melhor desempenho em relação à redução de perdas oriundas deste processo e por facilitar a sua fabricação [1].

V_1 : Tensão primária
 V_2 : Tensão secundária
 i_1 : Corrente primária
 i_2 : Corrente secundária
 N_1 : Número de espiras primárias
 N_2 : Número de espiras secundárias
 Z : Impedância da Carga

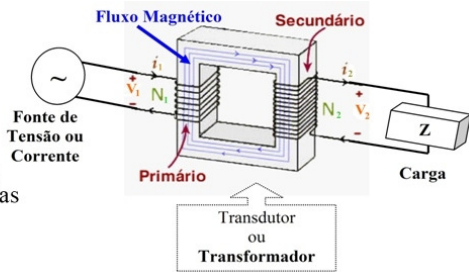


Figura 2.1 - Circuito de um transformador básico.

A Figura 2.2 representa, esquematicamente, o TC mostrando que o enrolamento primário é ligado em série no circuito elétrico principal por onde flui a maior quantidade de energia.

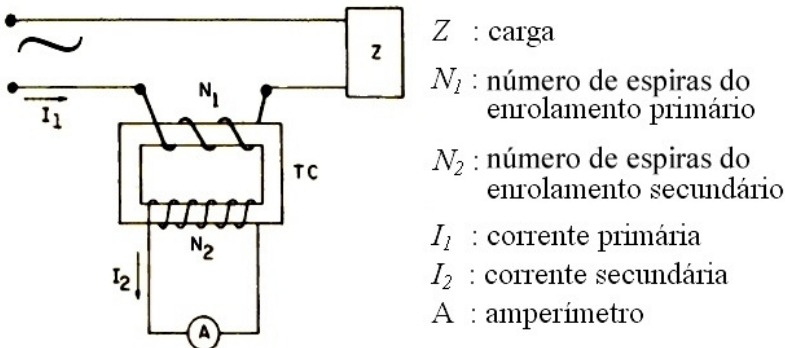


Figura 2.2 - Circuito com o TC ligado em série [4].

O TC geralmente é utilizado para reduzir a corrente primária, portanto possui a condição $N_1 < N_2$, dando assim uma corrente $I_2 < I_1$, pela relação $N_1 I_1 = N_2 I_2$, onde, N_1 e N_2 são respectivamente os números de espiras do enrolamento primário e do secundário, e I_1 e I_2 são respectivamente as correntes no enrolamento primário e secundário. Por isto é considerado na prática como um elemento “reductor de corrente”, pois uma corrente elevada I_1 é transformada para uma corrente de valor reduzido I_2 suportável pelos instrumentos elétricos usuais [4].

O enrolamento primário do TC é normalmente constituído de poucas espiras (uma ou duas ou três espiras, por exemplo) feitas de condutor de cobre ou de alumínio de relativa grande seção (por exemplo, 50 mm). Há TC em que o próprio condutor do circuito no qual

ele está inserido serve como primário, sendo neste caso considerado este enrolamento como tendo apenas uma espira, conforme apresenta a Figura 2.3. Esta condição é o que geralmente se encontra para TCs de grande porte usados em subestações de transmissão do sistema de energia elétrica. Sua representação em um diagrama unifilar de uma subestação é conforme mostra a Figura 2.4. A Figura 2.5 apresenta um exemplo da representação e posição no circuito elétrico dos TCs num diagrama unifilar completo de um sistema de geração e transmissão de energia elétrica. Nota: o termo secundário encontrado em algumas figuras é uma forma coloquial, sendo que se refere ao enrolamento secundário do transformador em estudo.

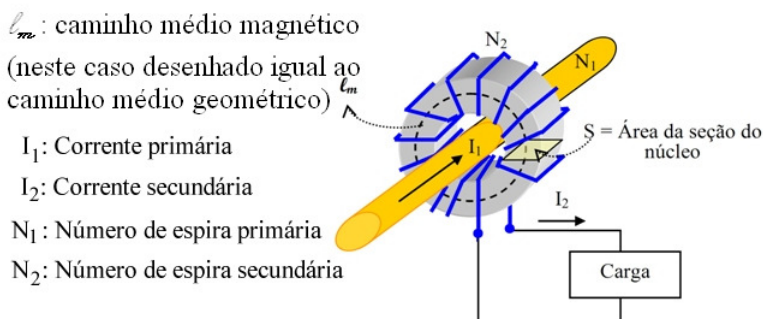


Figura 2.3 - TC com o núcleo em formato toroidal.

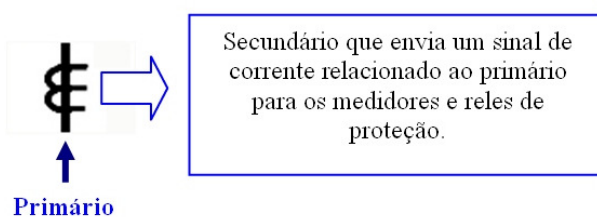


Figura 2.4 - Representação unifilar de um TC.

Os TCs são projetados e construídos geralmente para uma corrente secundária nominal padronizada em 5 ampère ou 1 ampère, sendo a corrente primária nominal estabelecida de acordo com a ordem de grandeza da corrente do circuito em que o TC será ligado. Assim, são encontrados no mercado TCs com relações padronizadas como: 200/5, 500/5, 1000/5, e outras, significando que [4]:

- quando o primário é percorrido pela corrente nominal para a qual o TC foi construído, no secundário se tem 5 A (por exemplo);
- quando o primário é percorrido por uma corrente menor do que a nominal, no secundário se tem uma corrente proporcional a este valor;
- quando o primário é percorrido por uma corrente maior do que a nominal, no secundário se tem também uma corrente proporcional a este valor, mas limitado pela não linearidade referente à resposta do núcleo magnético do TC.

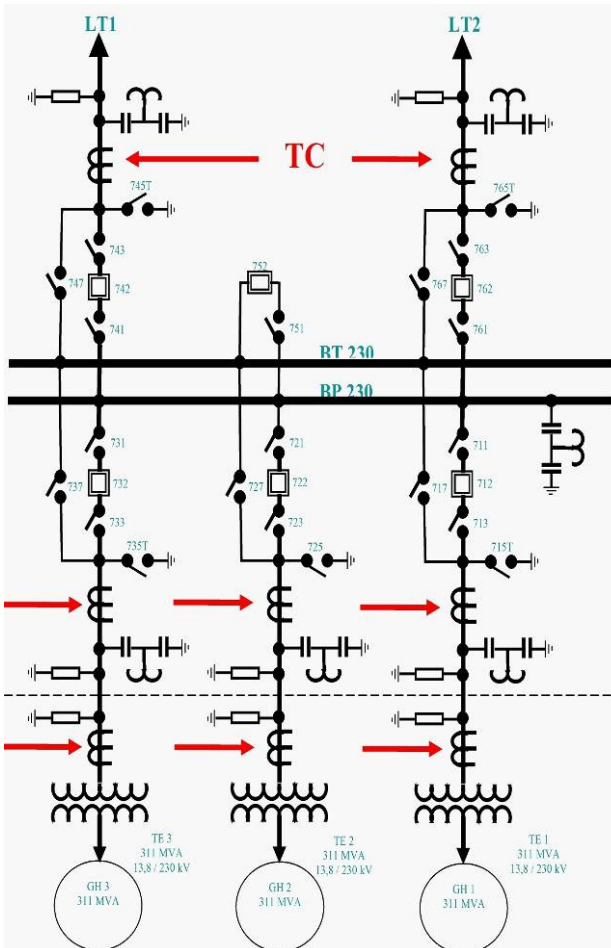


Figura 2.5 – Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de energia.

No TC a corrente I_1 da Figura 2.3 é obtida por solicitação da carga ligada em série ao enrolamento primário do TC, surgindo então a corrente I_2 como uma consequência de I_1 , independentemente do instrumento elétrico que estiver no seu secundário. Geralmente o TC é empregado para alimentar instrumentos elétricos de baixa impedância (amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros, bobinas de corrente de medidores de energia elétrica, relés de corrente, etc.) e, assim, diz-se que são transformadores de força que funcionam quase em curto-circuito [4].

Para os TCs trabalharem em circuitos de alta tensão se faz necessário que os mesmos sejam fabricados com capacidade de isolamento adequada em relação à suportabilidade à alta tensão [1]. Como exemplo, as Figuras 2.6 (a) e (b) mostram a imagem de TC numa subestação de transmissão de energia elétrica.



Figura 2.6 - TC na subestação fabricante AREVA, (a) TC 69 kV – modelo QDR – cabeça encapsulada em resina; (b) TC 750 kV – modelo CTH – cabeça encapsulada em alumínio [1].

2.2. PARADIGMA DO SETOR ELÉTRICO DIANTE DA ESPECIFICAÇÃO DE TC

Com o advento de modernas tecnologias da eletrônica, os instrumentos conectados no secundário de TCs têm se apresentado com melhor exatidão de medida, maior velocidade de processamento de sinal e baixa impedância de entrada. A aplicação na área de proteção, com os novos relés microprocessados é que exigiu uma reformulação grande na maneira de como especificar um TC de proteção, pois estes relés têm possibilitado um menor tempo de restabelecimento do sistema. Os TCs de proteção necessitam ser dimensionados adequadamente para fornecer a informação precisa para os relés.

Os relés eletrônicos de proteção de alta tecnologia contribuíram para que os fabricantes e as normas evoluíssem em relação aos TCs, relacionado com a análise de desempenho de transitório, ou transiente, frente às atuais necessidades das empresas de energia elétrica perante uma melhor resposta ao restabelecimento do sistema elétrico após uma falta de corrente causada por um surto de tensão transitória.

Antes as empresas do setor elétrico definiam em suas especificações técnicas a necessidade de atendimento aos requisitos transitórios, mas não eram definidos valores para tais condições transitórias (exemplo: remanência inferior a 10%, tempo morto para o religamento e a relação X/R , onde X é a reatância e R a resistência do sistema elétrico ao qual o TC está inserido). Os ajustes de proteção também não consideravam o tempo dos transitórios. Basicamente as definições nas especificações eram somente para carga secundária (C400 – C800), fator de sobrecorrente para corrente simétrica, erro máximo para a corrente de curto-circuito simétrica (10%) e que o erro da classe de exatidão devia ser mantido para todas as relações [13]. Entretanto, houve um período de transição para que as empresas do Setor Elétrico comesçassem a entender melhor todo este novo conhecimento para especificar melhor a aquisição de TC a ser instalado na rede do Sistema Elétrico.

Com o passar do tempo, as empresas no Brasil começaram a especificar pelo tempo de operação da proteção e pelo tempo de atuação dos disjuntores. Havia o entendimento que o atendimento ao transitório da corrente deveria ser mantido para a carga secundária definida para o regime permanente da corrente com o valor de curto-circuito, e que o fator de sobrecorrente considerado para corrente simétrica devia valer

para correntes assimétricas. Neste aspecto, durante a realização dos ensaios de aceitação em fábrica, as empresas conviviam com a falta de informação para análise do equipamento ofertado pelos fabricantes de TCs e também com a falta de ferramentas para avaliação do atendimento às questões transitórias. Também houve treinamentos nas empresas brasileiras que promoveram um melhor amadurecimento sobre o assunto, sendo que hoje as especificações definem: carga secundária transitória, fatores de remanência, erro máximo transitório, fator de assimetria da corrente primária de curto circuito e classificação TPY, conforme IEC 44-6 [14].

2.3. NORMAS TÉCNICAS PARA TC

Cada país (ou grupo de países) adota uma determinada norma. As normas mais aceitas internacionalmente e suas características principais, são apresentadas sumariamente a seguir:

a) IEC-*International Electrotechnical Commission*

Antigamente, a norma regente era a IEC-185/87 – “Especificação e Ensaio em TC” [16], que definia o erro composto para corrente simétrica, mas não indicava atendimento às correntes assimétricas. A IEC-185/87 é uma norma superada e foi substituída pela IEC 44-1 [15].

A norma IEC-60044.1/1996, “Especificação e Ensaio em TC”, é similar à IEC 185 [16] e define o erro composto para a corrente e a tensão, simétricas, assim como o limite de exatidão; como a IEC 185/87, também não indica atendimento às correntes assimétricas. A IEC-60044.1/1996 padroniza as cargas secundárias de 2,5-5,0-10-15-30 VA e a classe de exatidão de 5P(5%) ou 10P(10%), assim como apresenta o limite de erro para correntes nominais primárias.

A versão da norma IEC-60044.1 de 2003 [15] mantém os conceitos das normas IEC anteriores, mas introduz a visão inglesa da norma européia, criando as designações PR e PX para TC de proteção. O TC denominado PR especifica as condições de remanência magnética do núcleo do TC. Enquanto, que o TC denominado PX apresenta como dados importantes apenas as características de excitação, da relação de transformação (N_1/N_2), da carga secundária e da resistência do enrolamento.

A norma IEC-60044.6/1992-03, “Requisitos para TC de proteção para resposta a regimes transitórios” [14], fixa os requisitos para núcleos de proteção quanto ao desempenho a transitório, introduzindo as classes de TCs: TPS, TPX, TPY, TPZ. Introduz também a avaliação do desempenho de TCs através das variáveis: constante de tempo primária (T_1), constante de tempo secundária (T_2), fator de transiente (K_{tr}), fator de dimensionamento à transiente nominal (K_{td}), tempo de atuação da proteção para o 1º ciclo da corrente (t'_{al}), tempo morto (t_m), equivalente nominal limite da força eletromotriz secundária (E_{al}), ciclo de operação, fluxo remanente (Φ_r), e outros parâmetros que não cabe aqui enumerá-los na sua totalidade.

b) *IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers*

O comitê de relé de proteção para sistemas de potência da sociedade de engenharia de potência da IEEE elaborou o relatório IEEE 76 CH 1130-4 PWR “Resposta à Transiente de Transformadores de Corrente”, janeiro 1976 [2], que serviu e ainda serve como referência para os estudos e avaliações sobre transitório no sistema de potência. Algumas ponderações a respeito deste relatório serão abordadas mais a seguir.

Em 1996 foi apresentado um guia denominado IEEE Std. C37.110-1996, “Guia para aplicação de transformadores de corrente para uso com relé de proteção” [17], que tem como objetivo apresentar uma compreensão com relação ao tratamento teórico e à aplicação de TC para auxiliar os engenheiros de proteção na correta seleção e aplicação dos TCs no sistema de proteção.

c) *ANSI-American National Standards Institute*

A norma ANSI C 57.13/93, “Especificação e ensaios em TC e TP” [13], define cargas padronizadas com fator de potência de 0,5, equivalentes às cargas típicas de relés eletromecânicos. Define que a exatidão deve ser mantida para o fator de sobrecorrente de $20xI_n$ (para condição de curto-circuito simétrico) somente para a maior relação/derivação, sendo que, para as demais relações/derivações o fator de sobrecorrente é proporcional ao número de espiras. Padroniza, também, cargas típicas (elevadas) de relés eletromecânicos (com elevado fator de potência). Não indica atendimento às correntes assimétricas.

Na ANSI/IEEE C 57.13.1-1981, “Guia para teste de campo em TC de proteção” [18], são descritos os métodos de testes de campo, tais

como relação de transformação, polaridade e outros, que assegurarão a instalação do TC no sistema elétrico.

d) Normas Brasileiras

No Brasil a ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, adota as normas NBR-6856/92, “Especificação de TC” [11], e a NBR-6821/92, “Método de ensaio em TC” [12]. Estas normas definem o erro composto para o fator de sobrecorrente especificado para uma corrente de curto circuito simétrica, padroniza cargas típicas (elevadas) de relés eletromecânicos (com elevado fator de potência) e não indica atendimento às correntes assimétricas.

Praticamente, a norma brasileira é uma cópia da ANSI [13]. Entretanto, muitas empresas do setor elétrico aceitam a norma IEC como referência para avaliação do desempenho do TC nos ensaios de inspeções em fábrica. Sabe-se que atualmente há um projeto de norma na ABNT que se baseia na norma IEC-60044.6 [14].

Assim como o Brasil, outros países adotam suas próprias normas. Por exemplo: a norma Argentina IRAM 2275/76 do *Instituto Argentino de Racionalización de Materiales*, a norma Britânica BS 3938/73 [19], a norma Alemã VDE 0414, a norma Australiana *Australian Standards AS 60044.1/03* e a norma Espanhola UNE 21-088.

Um dos primeiros documentos que serviu como base para as análises do comportamento do TC diante de transitórios foi o IEEE 76 CH 1130-4 PWR *Transient Response of Current Transformers, January 1976* [2], que se destaca como um documento que oferece a compreensão para o atendimento à corrente assimétrica e seu efeitos nos relés. Este documento foi elaborado pelo grupo que trabalha com relés, apresentando a opção por determinar o tempo de saturação do TC *versus* tempo de atuação da proteção e propõe gráficos definidos para cálculos dos tempos de saturação.

2.4. PONDERAÇÃO A RESPEITO DAS DEDUÇÕES OBTIDAS NO DOCUMENTO IEEE 76 CH 1130-4 PWR *TRANSIENT RESPONSE OF CURRENT TRANSFORMERS.*

O documento IEEE 76 CH 1130-4 PWR *Transient response of current transformers* [2], que serve de referência para a compreensão e base de cálculo da resposta ao transitório em TC, assume algumas considerações que são aqui exploradas, para que futuros pesquisadores ou projetistas possam repensar alguns detalhes sobre o assunto em questão.

Uma primeira ponderação sobre o documento [2] é a respeito do caminho médio magnético (ℓ_m), que geralmente é adotado como sendo o caminho médio geométrico do núcleo (*vide* Figura 2.3). Esta consideração é usualmente aceita como verdadeira, não só neste documento referenciado, mas praticamente em quase toda literatura sobre TC. É mostrado através de um estudo de simulação, no relatório técnico final do projeto P&D (entre UFSC e ELETROSUL – contrato: 80580012) intitulado “Desenvolvimento de uma Metodologia de Análise de Transformadores de Corrente – TCs” [3], usando o método de cálculo de campos por elementos finitos, que o caminho médio magnético tem um comportamento no seu valor em função da indução no núcleo, de maneira não linear, não sendo exatamente igual ao caminho médio geométrico.

Uma segunda ponderação é sobre o valor da reatância de dispersão que frequentemente nos modelos usados nos cálculos de projetos e simulações é considerada desprezada por ter um valor baixo relativo aos outros parâmetros. Um informativo técnico da *General Electric* sobre transformadores de instrumentação [20] aborda este assunto mostrando que, em muitos casos, este valor não é tão desprezível assim na prática. Apesar deste detalhe não ser abordado neste trabalho de mestrado, isto serve de alerta para que os inspetores das empresas do setor elétrico, por ocasião de uma compra, solicitem a mensuração da reatância de dispersão secundária dos TCs quando realizarem as inspeções em fábrica. Deste modo se poderá constatar se realmente este parâmetro pode ser desprezado. Este tema merece um estudo futuro especial, analisando as diferentes metodologias para a verificação do valor da reatância de dispersão do TC, pois não há uma publicação relevante sobre o assunto ou, entre os usuários de TCs, um consenso sobre a questão.

Uma terceira ponderação é a respeito de como é considerado o ponto da tensão de saturação entre as normas ABNT/ANSI e IEC. Isto contribuirá como esclarecimento sobre o assunto aos engenheiros e técnicos que lidam com ensaios, projetos e análises do comportamento de TCs em circuitos de proteção do sistema elétrico.

A Figura 2.7 apresenta três representações (a), (b) e (c), do circuito elétrico para modelagem do TC, geralmente adotados para análise do comportamento elétrico. Estes três circuitos da Figura 2.7 são:

- TC alimentando uma carga C com a corrente primária I_1 e secundária I_2 , sendo monitoradas com os respectivos amperímetros A_1 e A_2 .
- Representação do circuito elétrico considerando a reatância de dispersão primária x_1 e secundária x_2 , assim como a resistência ôhmica do enrolamento primário r_1 e secundário r_2 .
- Circuito equivalente final considerando a indutância de magnetização L_0 e perdas no ferro R_p .

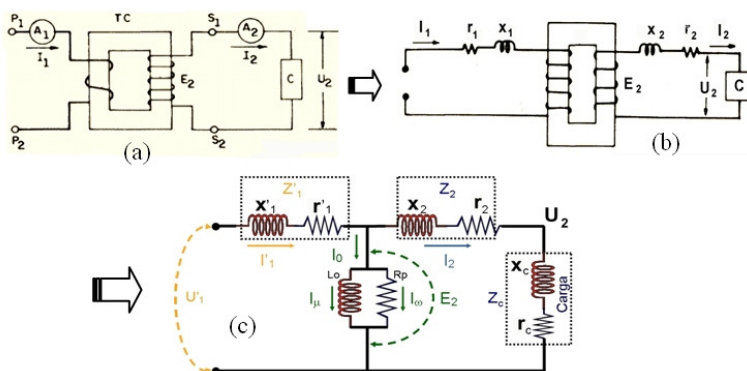


Figura 2.7 - Circuito equivalente de um TC comum [1][4][10].

O circuito equivalente da Figura 2.8 mostra as simplificações no circuito do TC adotadas para análise no documento IEEE 76 CH 1130-4 PWR *Transient Response of Current Transformers* [2]. No Anexo A está apresentada a evolução de considerações realizadas no apêndice II do documento IEEE 76 [2] sobre “Densidade de Fluxo Instantânea em Transformador de Corrente Tipo Bucha devido a uma Corrente Primária

Assimétrica” na dedução destes circuitos equivalentes do TC. A Figura 2.9 apresenta o circuito final adotado para análises.

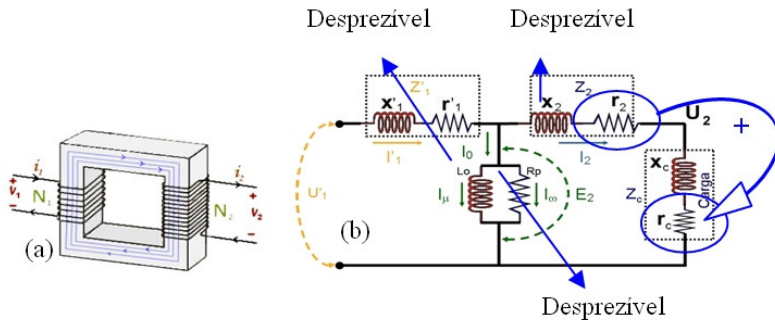


Figura 2.8 - Circuito equivalente de transformador, (a) Transformador comum; (b) circuito equivalente e considerações simplificadoras para TC tipo bucha [1].

Para um TC tipo bucha, comumente usado em alta tensão, o enrolamento primário é somente uma barra de passagem, formando uma única espira, com o núcleo no formato toroidal. Assim, para um TC tipo Bucha se tem:

- $(Z_1' \approx 0)$ - Devido ao TC ter uma só espira no primário a impedância primária refletida no secundário Z_1' é desprezível;
- $(R_p \approx 0)$ - As perdas por corrente de Foucault R_p são desprezíveis;
- $(x_2 \approx 0)$ - A reatância de dispersão secundária x_2 é desprezada.

Considera-se também que:

$$(R_2 = r_2 + r_c)$$

onde, R_2 passa a ser a resistência ôhmica do circuito secundário, sendo r_2 é a resistência ôhmica do enrolamento secundário e r_c é a resistência ôhmica da carga.

$$(L_2 = L_c)$$

A indutância da carga L_c passa a ser representada pela indutância do circuito secundário L_2 .

$$L_0 = \text{Indutância de magnetização (vide Figura 2.9)}$$

Como exposto acima, obtém-se então o seguinte circuito equivalente simplificado representado na Figura 2.9 (b):

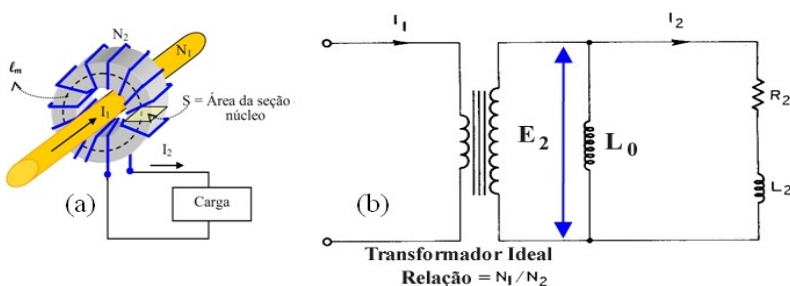


Figura 2.9 - Circuito equivalente de TC tipo bucha, a) TC tipo bucha; (b) Circuito equivalente simplificado [2].

2.5. DEFINIÇÕES CONFORME NORMAS

Nesta Seção, apresentar-se-ão as definições encontradas em normas sobre TC de proteção.

2.5.1. Definições conforme o guia IEEE para aplicação de TCs para uso com relé de proteção

Este Guia é conhecido pela nomenclatura IEEE Std C37.110-1996 [17]. Dentro deste documento encontram-se definições que foram obtidas da IEEE Std 100-1992, *The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms* (ANSI) [28]. O símbolo ^(a) indica que na época em que a norma foi aprovada não havia correspondente definição na IEEE Std 100-1992. O símbolo ^(b) indica que a definição foi obtida da *British Standard B.S.3938, Specification for Current Transformers* [19].

a) Primeira definição para o valor da **tensão no ponto de Joelho**²

Para TC de classe C, o valor da tensão do ponto de Joelho é definido pelo ponto sobre a curva de excitação onde a tangente possui um ângulo de

² Para transformadores classificados como “classe C” da norma [13].

45° em relação à abscissa. A curva de excitação deve ser está grafada em papel log-log com década quadrática. Esta definição é para TC sem entreferros. Quando o TC tem um núcleo com entreferro, o valor da tensão do ponto de joelho é o ponto onde a tangente à curva faz um ângulo de 30° com a abscissa.⁴

A Figura 2.10 mostra este procedimento de definição do valor da tensão de joelho.

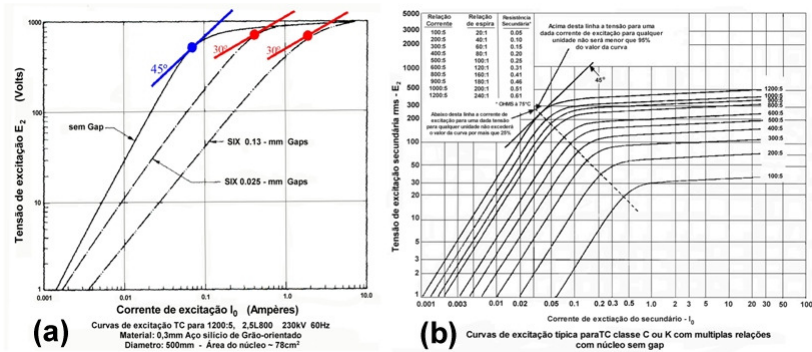


Figura 2.10 – Determinação do ponto de joelho conforme norma ANSI, (Réplicas das Figuras C.11 e C.9 do Anexo C); a) Curva de excitação mostrando o ponto de joelho à tangente de 30° para TC com entreferro e à tangente de 45° para TC sem entreferro [22]; (b) Curva de excitação típica para TC classe C com múltiplas relações de transformação [2][13][17][18].

b) Segunda definição de **tensão no ponto de joelho**:

O valor da tensão no ponto de joelho é definido como aquela tensão senoidal da frequência nominal, aplicada aos terminais do secundário do transformador, com todos os outros enrolamentos estando em circuito aberto, que, quando aumentada em 10% causa um aumento na corrente de excitação de 50%.^b

A Figura 2.11 mostra esquematicamente esta segunda definição.

Nota:

Na norma IEC60044-1 [15] em 2.3.12 “*rated knee point e.m.f. (E_k)*”, encontra-se a definição como força eletromotriz (f.e.m) nominal no ponto de joelho (E_k), aquela f.e.m eficaz (*rms*) mínima na frequência nominal quando aplicada aos terminais secundário do transformador, com todos os outros terminais estando em circuito aberto, que, quando aumentada por 10% causa um aumento na corrente de excitação eficaz (*rms*) não mais que 50%. A norma também alerta, que a tensão do ponto de joelho real será maior ou igual à tensão do ponto de joelho nominal.

A norma IEC60044-1 [15] menciona uma tensão do ponto de joelho real diferente da tensão de ponto de joelho nominal porque ela adota o ponto de joelho nominal como ponto de saturação. Portanto, com este alerta ela reconhece que o ponto de saturação real pode ser maior. Este assunto ainda será abordado na sequência do trabalho.

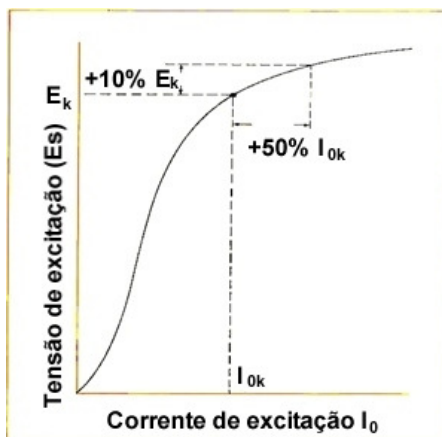


Figura 2.11 – Curva de excitação mostrando a localização do ponto de joelho nominal conforme [15][19][20].

c) Definição do valor da **tensão de saturação (V_x)**:

Tensão de saturação V_x é a tensão simétrica sobre o enrolamento secundário do TC para a qual o pico da indução apenas excede a densidade de fluxo de saturação. O valor do ponto da tensão de saturação é encontrado graficamente pela localização da intersecção das porções de reta da curva de excitação sobre os eixos log-log. Este

valor não é o mesmo valor da tensão do ponto de joelho do ponto sobre a curva onde a tangente à curva faz um ângulo de 45° com a abscissa.^a

A Figura 2.12 expressa graficamente esta definição do encontro do valor para a tensão de saturação.

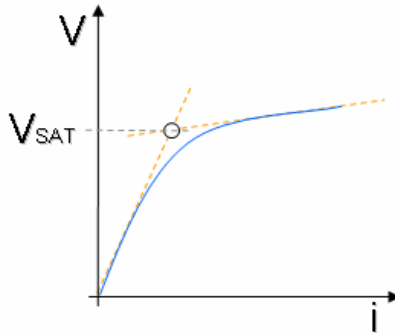


Figura 2.12 - Determinação gráfica $V_{SAT} = V_x$ [29].

2.5.2. Definições conforme o relatório de estudos do comitê de estudo de proteção para sistema de potência sobre “Resposta à Transiente de Transformadores de Corrente” da IEEE

Este relatório de estudos é conhecido pela nomenclatura IEEE 76 CH 1130-4 PWR, 1976, *Transient Response of Current Transformers* [2]. Dentro deste documento encontram-se as definições descritas a seguir.

- a) Definição de **saturação** (*IEC Publication 50(05)-1956, Fundamental Definitions, 05-25-130*):

O estado de uma substância ferromagnética colocada em um campo tão forte que a intensidade da magnetização torna-se independente do campo; a substância é então dita estar saturada.

Num sentido mais amplo, uma substância ferromagnética é dita estar mais ou menos

saturada segundo sua magnetização está mais ou menos próximo da saturação.

Esta definição também se encontra na referência [22], mas acrescentando que saturação é aquele valor do fluxo abaixo o qual a correspondente corrente de excitação pode ser considerada insignificante. A saturação efetiva ou a máxima densidade de fluxo em liga de ferro silício é por volta de 2 tesla (20.000 Gauss) [22]. É considerado o máximo valor intrínseco da indução possível num material. Este termo de máximo valor intrínseco é frequentemente usado para o valor máximo da indução para um estado de alto valor do campo de força onde quanto maior a magnetização intrínseca o campo de força aumenta desprezivelmente.

b) Definição de **região de saturação**:

Região de saturação é a faixa do estado magnético de uma substância ferromagnética que está mais ou menos saturada. O estado menos saturado pode ser especificado em termos da densidade de fluxo de saturação da substância.

c) Definição de **densidade de fluxo de saturação**:

A densidade de fluxo (de uma substância ferromagnética) é definida em termos da geometria da curva de magnetização.

Nota: A densidade de fluxo de saturação está acima da densidade de fluxo para o ponto de máxima permeabilidade.

A norma IEC60044-1 [15] define fluxo de saturação (Φ_s) como aquele valor de pico do fluxo que existiria num núcleo na condição de transição de não saturado para totalmente saturado e é considerado ser o ponto sobre a característica $B-H$ para o núcleo concernente a um acréscimo de 10% em B que cause um acréscimo de 50% em H . Enquanto que na referência [22] se encontra a definição de fluxo de saturação como aquele valor de fluxo no núcleo que é arbitrariamente determinado como 10 % maior que o fluxo no ponto de joelho da curva de excitação. Nesta referência [22] encontra-se que o argumento para se utilizar este valor de 10 % maior que o fluxo no ponto de joelho como ponto de saturação é o fato de estar de acordo com o dicionário IEEE, onde uma nota

permite para um “declarado alto valor” de fluxo ser definido como um prático valor do fluxo de saturação.

d) Definição de **tensão de saturação**:

Tensão de saturação é a tensão alternante sinusoidal, na frequência do sistema de potência, induzida no enrolamento secundário de um TC quando o núcleo está em uma condição ciclicamente e simetricamente magnetizado, enquanto que o pico de indução está na densidade de fluxo de saturação.

Nota: O valor da tensão de saturação pode ser graficamente determinado da curva de excitação padrão do TC conforme Figura 2.12.

A Figura 2.13 mostra a mesma Figura 2.12 com mais detalhes sobre o ponto de permeabilidade máxima, ou seja, ponto de joelho conforme [2]. O ponto de permeabilidade máxima P_M é ponto da curva tangente a reta que forma um ângulo $\alpha = 45^\circ$ com a abscissa [2].

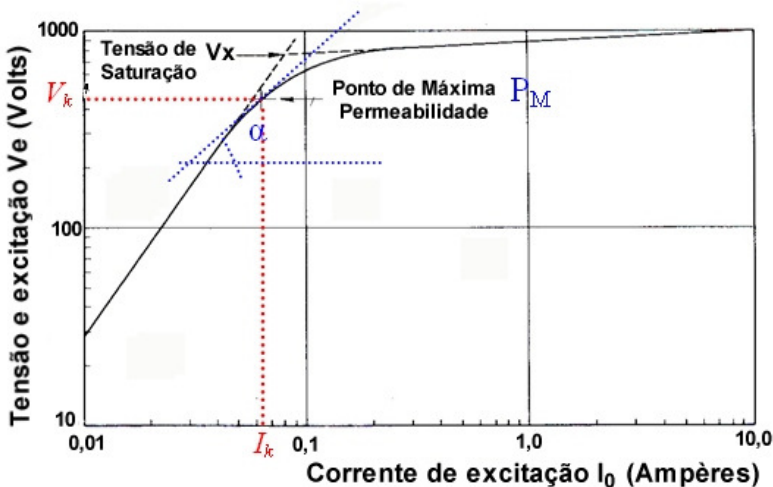


Figura 2.13 - Ponto de joelho conforme IEEE/ANSI [2][13].

- e) Definição de **tempo de saturação** de um TC:

Tempo de saturação é o intervalo de tempo que inicia com o início da corrente primária de falta e termina quando a primeira indução do núcleo alcança a densidade de fluxo de saturação.

- f) Definição de **fator de saturação** do TC:

Fator de saturação é a relação da densidade de fluxo de saturação do núcleo para a densidade de fluxo de pico quando o TC está operando sob uma específica condição de regime permanente com a corrente na frequência industrial nos enrolamentos primário e secundário.

2.5.3. **Definições conforme o relatório de estudos do comitê de estudo de proteção para sistema de potência sobre as “Características e Desempenho de Transformadores de Corrente com Entreferro no Núcleo” da IEEE**

Este relatório de estudos foi apresentado na revista IEEE *Transactions on Power Delivery*, volume 5, número 4, de Novembro de 1990, com o título: “*Gapped Core Current Transformer Characteristics and Performance*” [22]. Apesar de não ser uma norma, este documento é utilizado como referência e apresenta as definições a seguir.

- a) Definição da **determinação das características de excitação**:

Uma curva de excitação deve se estender pelo menos até o ponto na qual um aumento de 10% na tensão resulte num aumento de 100% na corrente. A tensão será medida por meio de um voltímetro lendo o a tensão média e por um outro lendo a tensão eficaz (*rms*) Quando a alimentação é medida sem carga, o valor medido sobre o voltímetro médio não deverá desviar daquela medida sobre o voltímetro *rms* por mais que 2% do valor medido sobre a pretendida faixa de medição. A fonte de alimentação deverá ser considerada adequada se o erro entre as leituras

dos instrumentos não exceder 10% dos valores medidos sobre a faixa de tensão aplicada.

No capítulo 4 é abordado mais sobre a qualidade da fonte de alimentação do ensaio de levantamento das características de excitação do TC (*vide* Figuras 4.1 e 4.2).

- b) Este relatório [22] na definição da **máxima densidade de fluxo** apresenta a seguinte informação:

A norma ANSI C57.13 [13] especifica de fato uma densidade de fluxo máxima na qual o TC é usável. Esta é a densidade de fluxo alcançada quando uma corrente de excitação de 10 ampère circula no enrolamento secundário, uma densidade tipicamente por volta de 1,8 T, uma densidade que não é grandemente afetada pelas mudanças um tanto grandes na corrente de excitação, e uma densidade na qual a excursão do fluxo da remanência até o máximo valor é significativa.

- c) Definição da **percentagem do fluxo remanente**:

A percentagem do fluxo de pico retido no núcleo quando a corrente primária retorna para zero.

- d) Definição da **densidade de fluxo residual, indução residual**:

A densidade de fluxo residual é a densidade de fluxo magnético, (indução) na qual a força magnetizante é zero quando o material está na condição simétrica e ciclicamente magnetizado. Esta é distinguida da remanência pelo requisito do ciclo simétrico.

2.5.4. **Definições encontradas na nota técnica da empresa *General Electric (GE)* referente à utilização do “Guia IEEE para aplicação de transformadores de corrente para uso com relé de proteção” ao relé 489 *Generator Management Relay***

Esta nota técnica encontra-se na publicação número GET-8402 da GE, de 2002, com o título de “*CT Application Guide for the 489 Generator Management Relay*” [23]. Dentro deste documento encontram-se as definições descritas a seguir.

a) Definição de **ponto de saturação**:

O ponto de saturação está em uma tensão de 10 à 20% maior que o verdadeiro ponto de joelho da curva.

No parágrafo referente a este assunto este documento comenta que o ponto de joelho é definido diferentemente pela norma ANSI e pela norma IEC, e em nenhuma delas o ponto de joelho é tão facilmente definível como a tensão de saturação.

Este documento afirma que estes valores de 10 a 20% foram usados nos exemplos apresentados em todas as análises de desempenho de TC da IEEE Std C37.110-1996 [17] e por isto adota esta referência também.

Observação: Durante o estudo do documento IEEE Std C37.110-1996 [17] não foi encontrado nada que justificasse esta afirmativa do documento do GET-8402 da GE.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo abordou-se de maneira geral os conceitos básicos sobre TC de alta tensão em uma abordagem rápida, assim como, as normas referentes a este equipamento utilizado no sistema elétrico e suas definições que são relacionadas ao assunto deste trabalho de dissertação. No Anexo E são mostrado alguns aspectos construtivos e os tipos de TCs conforme sua aplicação.

3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO NÚCLEO DO TC

Objetivando o entendimento do comportamento dinâmico do TC, para melhor compreensão das avaliações realizadas em ensaios nos laboratórios de alta tensão, neste capítulo se estuda alguns temas de grande importância, os quais poderão auxiliar os novos engenheiros especialistas em sistema de proteção e de manutenção em transformadores de corrente, que estão atualmente entrando no mercado brasileiro, ampliando seus conhecimentos na aplicação deste equipamento no sistema de proteção do setor elétrico.

Neste capítulo, o estudo do comportamento dinâmico de TC não é realizado por uma modelagem rigorosa do TC. O estudo é baseado principalmente nos modelos elétricos e estudos apresentados na literatura. Sabe-se que os modelos elétricos de TC são deficientes em termos de uma representação com maior grau de acuidade para contemplar os fenômenos físicos que ocorrem em um TC sob transitório, principalmente sob o aspecto não linear do núcleo magnético.

3.1. COMPORTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TC FRENTE A SUA UTILIZAÇÃO

O comportamento da curva de excitação do TC é avaliado de maneira diferente quanto a sua utilização para medição ou proteção em relação aos limites admissíveis de operação. Embora, nesta seção se aborde um pouco sobre TC de medição, o foco da dissertação na avaliação da curva de excitação é para TC de proteção.

A Figura 3.1 mostra um circuito representando o TC como uma “caixa preta”, que transfere uma informação de um lado para o outro do dispositivo, através de acoplamento magnético com uma determinada relação de transformação.

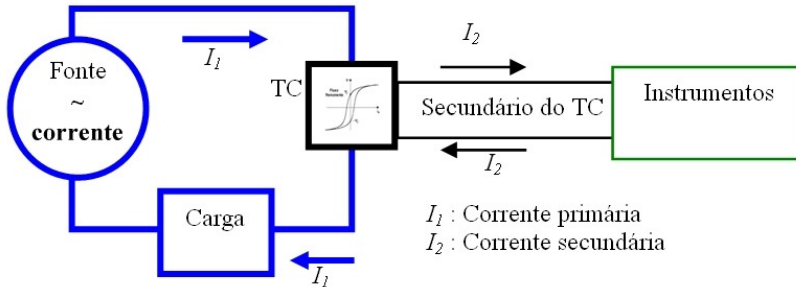


Figura 3.1 - TC como transdutor de corrente.

Através de um circuito de ensaio semelhante ao da Figura 3.2, denominado ensaio de saturação, obtêm-se os parâmetros relacionados ao comportamento do TC. Usando-se de ferramentas de *softwares*, como, o LabView, e com as formas de onda das grandezas envolvidas consegue-se levantar o laço de magnetização de fluxo magnético *versus* corrente secundária, mostrando características associadas ao núcleo do TC.

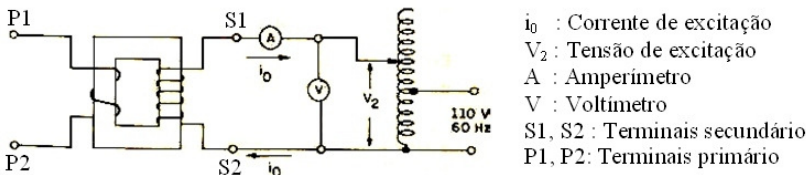


Figura 3.2 - Circuito do ensaio de saturação [4].

No ensaio do levantamento da curva de magnetização, o primário do TC fica em aberto e se aplica no secundário uma tensão V_2 (muitas vezes se supõe que o módulo de V_2 seja igual ao de E_2 do circuito da Figura 3.3), e mede-se a corrente de excitação i_0 correspondente por meio do amperímetro “A”. A tensão V_2 é medida pelo voltímetro “V” e recebe o nome de “tensão de excitação secundária” [1].

Com o ensaio do levantamento da curva de excitação, tipicamente se obtém a curva de saturação do TC, pela qual os procedimentos das normas fazem o levantamento do comportamento do núcleo do TC. A Figura 3.4 mostra uma curva típica de saturação de um TC.

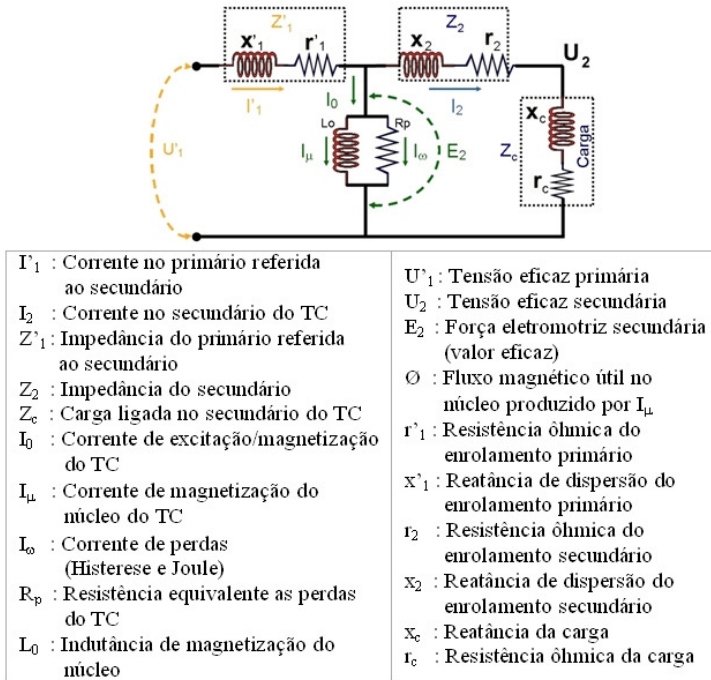


Figura 3.3 - Circuito equivalente do TC [1][10].

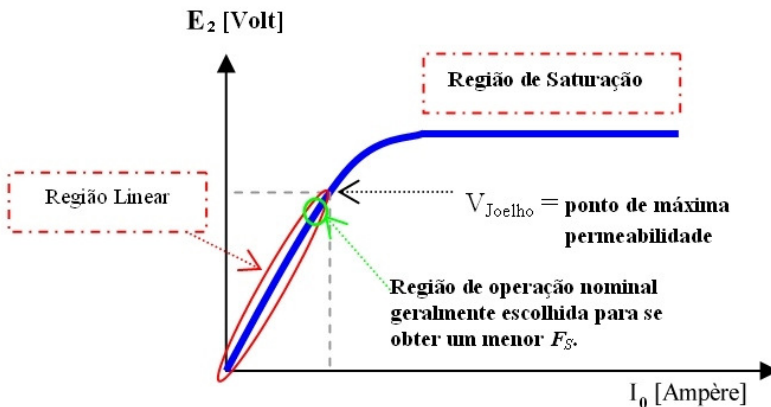


Figura 3.4 - Curva de saturação típica de um TC.

Quando o TC está operando seu comportamento é influenciado pela carga que está conectada no secundário. Tratando-se de um TC de medição, este é um dos motivos pelo qual se adota um fator de segurança (F_s), dado pela Equação (3.1), com o intuito de proteger a instrumentação conectada no secundário (veja Figura 3.5). Quando se trata de TC de proteção, este fator é também conhecido como fator de sobrecorrente, mas com o foco voltado aos ajustes dos relés de proteção referente ao limite de suportabilidade dos equipamentos do sistema elétrico. A norma IEC 60044-1/2003 [15] define:

O fator de segurança (para instrumentos de medição) (F_s) é a relação entre o limite de corrente primária nominal aceitável (IPL) e a corrente primária nominal (I_{1n}).

Nota 1: Atenção deve ser dada ao fato de que o fator de segurança real é afetado pela carga.

Nota 2: Durante a circulação de altas correntes no enrolamento primário de um TC, devido a uma falta no sistema, a segurança dos instrumentos alimentados por este TC é maior quando o valor do fator de segurança da medida é menor.

$$F_s = \frac{IPL}{I_{1n}} \quad (3.1)$$

As normas não estabelecem limites para o fator de segurança. Estes estão sujeitos aos acordos entre fabricantes e compradores. Na prática, têm-se as seguintes considerações sobre o fator de segurança:

- a) O F_s indica o grau de proteção que o TC fornece aos instrumentos ligados ao secundário de medição.
- b) O F_s será tanto menor quanto mais rapidamente ocorrer a saturação do núcleo de medição sob a ocorrência de um curto-circuito, o que implica em se projetar um núcleo de medição trabalhando com uma indução mais elevada possível no regime nominal (ver Figura 3.4).
- c) O F_s define a máxima corrente secundária que deverá fluir no TC sob um curto-circuito na rede primária.
- d) O F_s é baseado na carga nominal.
- e) Os TCs de medição trabalhando com cargas abaixo da nominal podem danificar os instrumentos conectados a eles durante um curto-circuito ou sobrecarga do circuito primário (ver efeito da carga na curva de saturação mostrado na Figura 3.5).

A Figura 3.5 mostra que a curva de excitação de um TC varia conforme a carga, sendo que o F_s indica o percentual tolerável admissível da variação da carga para o TC de medição para operar dentro de sua classe de exatidão. No lado esquerdo desta figura consta uma breve explicação da nomenclatura do TC conforme a norma IEC [15].

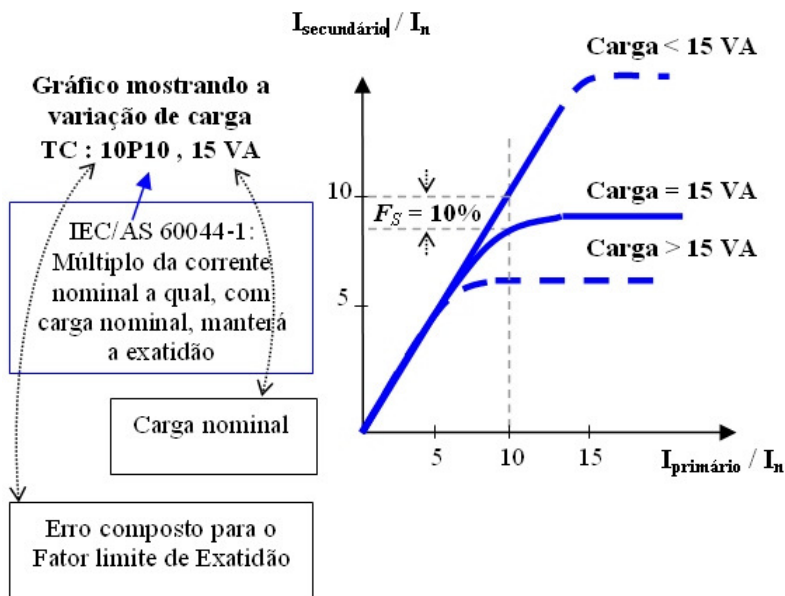


Figura 3.5 – Exemplo do efeito da carga secundária na curva de saturação [21].

A importância de se avaliar o TC através da curva de saturação para os engenheiros de proteção do sistema elétrico é quanto a análise de resposta ao transitório de corrente. A componente assimétrica da corrente de falta num sistema de potência proporciona um aumento súbito do fluxo magnético dentro do núcleo, que pode levar o TC à saturação, conforme mostra a Figura 3.8 apresentada mais adiante. Na saturação ocorrem imprecisões quanto a informação transmitida ao secundário do TC, e que chega aos relés do circuito de proteção. Isto é, caso ocorra a saturação, a corrente de saída do TC mostrará evidências de distorção e o desempenho do circuito de proteção pode se afetado, conforme mostra a Figura 3.9. É importante que os especialistas em proteção do sistema elétrico conheçam o instante de tempo em que o TC

começa a saturar. Define-se o tempo de saturação (T_s), durante a ocorrência de uma falta, como tempo em que a corrente de saída do TC ainda é uma réplica da corrente primária (ver Figura 3.9 (a)). O T_s pode ser determinado através da avaliação geral do sistema de potência e dos parâmetros do TC pelo uso de curvas predeterminadas, conforme procedimentos apresentados pela referência [2].

O valor do tempo de saturação pode ser diminuído pela remanência do núcleo, e pode ser aumentado pelo uso de entreferros, *air-gaps* (espaçamento de ar entre o núcleo) [2]. Em geral o uso de entreferro ajuda a diminuir os valores de remanência magnética de TC, contribuindo no aumento do tempo de saturação.

Depois de que a corrente de falta primária cessar, quando ocorre a abertura do circuito primário, o TC possui uma corrente de saída (no enrolamento secundário) com decaimento exponencial em função da constante de tempo secundária. Normalmente, a corrente de saída será unidirecional se o efeito capacitivo do circuito secundário for desprezível.

3.2. RESPOSTAS DOS TCS DE PROTEÇÃO PARA CORRENTES DE FALTAS ASSIMÉTRICAS

Nos modernos sistemas de alta tensão e extra-alta tensão cada vez mais é dada ênfase à fidelidade dos transformadores de corrente aplicados nos sistemas de proteção. Isto é devido principalmente [2]:

- a) ao aumento na magnitude das correntes de falta;
- b) ao aumento na constante de tempo da componente assimétrica da corrente de falta;
- c) à necessidade da rápida eliminação da falta;
- d) ao aumento da velocidade dos modernos relés de proteção em suas respostas, que é importante para a localização de faltas em linhas de transmissão.

Estes fatos têm contribuído para tomadas de ações na intenção de reduzir o tempo permitido para a operação dos relés de proteção do sistema, buscando assim que os relés tomem decisões enquanto a componente transiente da corrente de falta ainda está presente. Para responder a estes requisitos, têm-se buscado relés de proteção apresentando alta velocidade sensorial e baixa carga que, com as características de TC adequados, geralmente mantêm uma operação do

sistema aceitável. Para isso, a componente da corrente de operação fornecida aos relés não deve ser distorcida para não causar um erro na resposta, fornecendo um alarme falso, ou a não atuação do sistema de proteção. A questão mais crítica se refere ao decaimento exponencial da componente contínua (*dc*) da corrente de falta primária. Esta componente influencia o aumento gradual do fluxo no núcleo e é comumente a causa de erros provenientes dos TC (*vide* Figuras 3.8, 3.9 e 3.16). A resposta ao transiente da componente *dc* deve ser conhecida na medida do possível e avaliada adequadamente.

Conforme a referência [17], no item “3 - Definições”, tem-se as seguintes definições (*vide* Figuras 3.6 (a) e (b)):

Densidade de Fluxo residual: A densidade de fluxo magnético na qual a força magnetizante (*H*) é zero quando o material está em uma condição simétrica e ciclicamente magnetizado.

Remanência: A densidade de fluxo magnético que fica em um circuito magnético depois da remoção de uma força magnetomotiva³ aplicada.
Nota: Esta não deve ser confundida com a densidade de fluxo residual. Se o circuito magnético tem um entreferro, a remanência será menor que a densidade de fluxo residual.

A referência IEEE *Guide for Field Testing of Relaying Current Transformers* – ANSI/IEEE Std C57.13.1-1981 [18] em “4.3 – Consideration of Remanence”, apresenta as seguintes afirmações:

Os materiais de núcleo disponíveis são todos sujeitos à histerese. Este fenômeno é mostrado pelo traçado da curva da densidade de fluxo magnético como uma função da força magnetizante como mostrado na Figura 3.6 (a). Quando a corrente é interrompida, as curvas mostram que a densidade de fluxo não retorna a zero quando a corrente retorna a zero.

Quando a corrente contém uma componente *dc*, a força magnetizante em uma direção é maior que

³ Observação: o termo “força magnetomotiva” deve estar equivocada nesta definição, sendo o correto: força eletromotriz.

em outra direção. As curvas resultantes são ambas deslocadas da origem e em formato distorcido, com uma grande extensão para a direita ou esquerda na direção da componente dc como notada na Figura 3.6 (b). Se a corrente que é interrompida é alta, ou se esta contém uma grande componente dc e é interrompida quando o fluxo total é alto, a remanência será substancial, talvez estando acima do fluxo equivalente ao do ponto de joelho mostrado na curva de excitação da Figura 3.28.

Os severos *offsets* (correspondentes a impulsos) das correntes de faltas, as componentes e/ou correntes contínuas geomagneticamente induzidas no sistema de potência, o uso impróprio de métodos de testes de continuidade (dc) no circuito secundário do TC, são exemplos que contribuem na possibilidade de manutenção de remanência magnética no núcleo de TC.

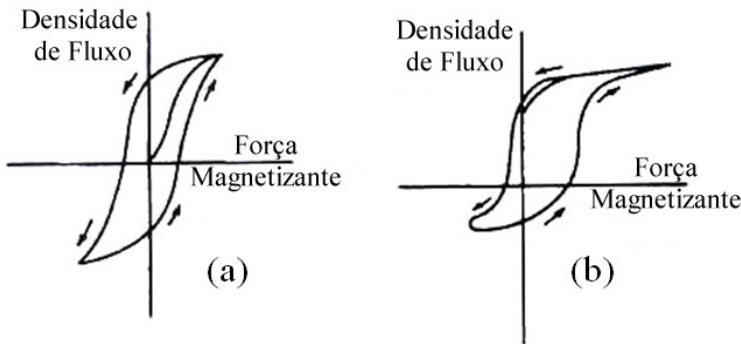


Figura 3.6 – Curvas de Histerese, (a) Curva de histerese normal; (b) Curva de histerese com remanência [18].

O fluxo remanente melhorará ou piorará a resposta ao transiente do TC porque este pode estar se opondo ou somando ao aumento gradual do fluxo no núcleo causado pelo *offset* dc da corrente de falta.

A distorção da corrente de saída começa quando as condições são tais que a densidade de fluxo no núcleo entra na região de saturação. Os fatores que influenciam a densidade de fluxo no núcleo de TC são os parâmetros físicos do TC, a magnitude, a duração, a forma de onda da corrente primária e a natureza da carga secundária. A saturação do

núcleo pode ser produzida por uma excessiva corrente de falta simétrica assim como, devido à componente contínua, em uma corrente de falta assimétrica de relativa baixa magnitude.

A Figura 3.7 (a) mostra a forma de onda de um curto-circuito SIMÉTRICO, onde não há presença de descontinuidade da corrente $i(t)$ que está defasada da tensão $E(t)$ de 90 grau. E a Figura 3.7 (b) mostra a forma de onda de um curto-circuito ASSIMÉTRICO, onde se percebe a presença de uma componente dc marcando a descontinuidade da corrente.

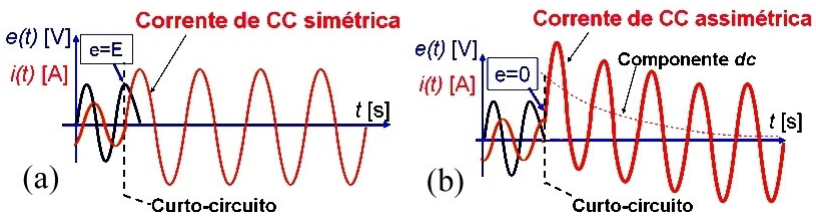


Figura 3.7 - Transitório de curto-circuito, (a) curto-circuito SIMÉTRICO; (b) curto-circuito ASSIMÉTRICO [10].

Quando um *offset* pleno de corrente de falta está presente no primário de um TC, este em geral irá causar um aumento do fluxo dentro do núcleo, várias vezes maior que o requisitado para transformar a componente de 60 Hz da corrente. A Figura 3.8 mostra o aumento no fluxo dentro do núcleo de um TC quando uma corrente plena de *offset* é aplicada ao TC com uma carga resistiva, considerando que o TC está dimensionado para responder ao transitório em sua região linear da curva de excitação. Neste diagrama a quantidade de Φ_{ac} grafada sob a abscissa representa o fluxo requerido para reproduzir a componente da corrente de falta de 60 Hz, enquanto a quantidade Φ_{ic} representa o fluxo requerido para reproduzir o componente transiente (dc) da corrente. A envoltória F_A é o fator da assimetria que serve como referência para a majoração do tamanho do núcleo a qual o TC deve ser construído para responder ao transitório sem saturar.

A variação na componente transiente do fluxo será uma função da constante de tempo do circuito primário dc e a constante de tempo do circuito secundário do TC.

A grande importância para um projeto de um sistema de proteção envolvendo TC é a determinação do tempo de saturação (T_s) que este equipamento oferece como resposta para se ter um sinal fiel no secundário quando um transitório se apresenta no primário. As Figuras

3.9 (a) e (b) apresentam o comportamento do efeito do transitório no fluxo magnético sob o efeito da saturação, assim como o comportamento da corrente secundária sob a saturação, mostrando a distorção do sinal. Quando ocorre a saturação, a amplitude do sinal secundário tende a ser nulo no intervalo de tempo em que o núcleo está saturado.

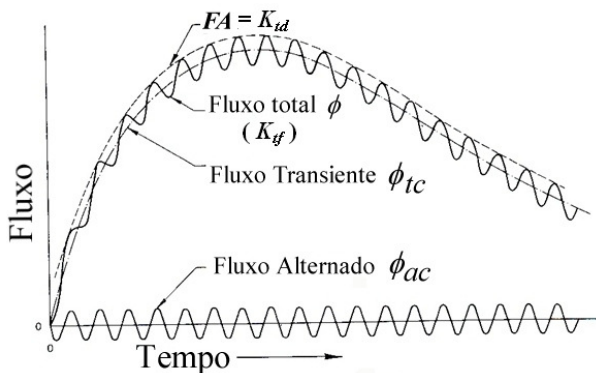


Figura 3.8 - Aumento do fluxo no núcleo de um TC quando ocorre um transitório [2].

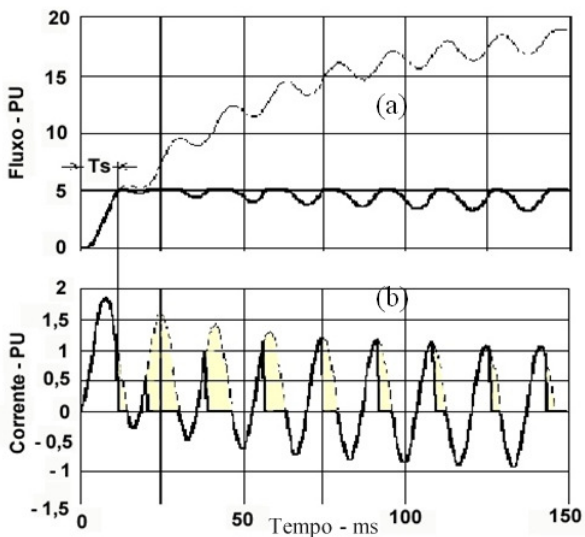


Figura 3.9 - Comportamento do sinal com saturação, (a) Efeito da saturação no fluxo; (b) Efeito na corrente secundária [23].

3.3. COMPORTAMENTO DO TC DURANTE O REGIME TRANSITÓRIO

No momento de um curto-circuito em um sistema elétrico, a impedância equivalente do sistema é reduzida drasticamente, e conseqüentemente, a corrente elétrica atinge níveis muitas vezes maiores que a corrente nominal. Para tanto, os transformadores de corrente de proteção são projetados para detectarem esta alta corrente sem operar na região de saturação e com um erro dentro de limites definidos pelo cliente. Para exemplificar, imagina-se a seguinte situação:

Um cliente precisa instalar um TC num sistema cuja corrente nominal I_n é de 100 A. Ele tem conhecimento que, no momento de um curto-circuito, a corrente elétrica atinge um nível de 2000 A (corrente de curto-circuito I_{psc}). E sabe também que a carga equivalente do relé mais cablagem⁴ até o transformador é de 100 VA. Para que o TC proteja o sistema elétrico deste nível de curto-circuito, há a necessidade de se projetar um núcleo para o TC de proteção que não sature até 20 vezes a corrente nominal. Supondo que o cliente deseje que a resposta tenha um erro menor que 10 %, a especificação será de núcleo de proteção 10P20 – 100VA (10B400), nomenclaturas conforme as normas IEC 60044-1 [15] e entre parênteses conforme NBR 6856 [11], para atender uma carga de relé de 100 VA e não saturar até uma tensão entre os terminais secundários de 400 volt (para uma corrente secundária de 5 A).

A curva de saturação deste núcleo será conforme mostra a Figura 3.10:

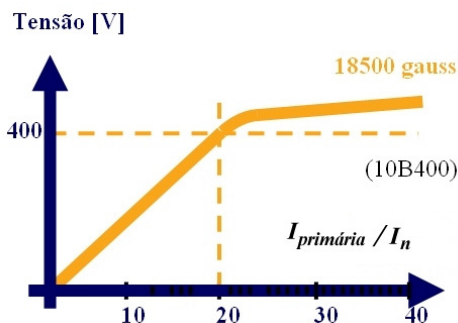


Figura 3.10 - Curva de saturação típica de um TC 10P20 - 100VA [1].

⁴ Cablagem são os fios de conexão do secundário do TC até aos relés.

Os núcleos de característica 10P20 são classificados para uma proteção do tipo convencional ou também chamada de clássica. São núcleos projetados para atuarem frente a um curto-circuito simétrico único [1]. Porém, no sistema elétrico, há diversos pontos ao longo da rede em que os TCs devem ser projetados para atuarem de acordo com os ciclos de operação de disjuntores, que na maioria das vezes são de atuação com intervalos de tempo relativamente reduzidos, na ordem de 400 ms. Neste contexto, para se ter uma ideia da preocupação com a atuação do sistema de proteção, a norma IEC 60044-1 [15] diz que:

O fluxo remanente é aquele valor do fluxo que ficaria no núcleo 3 minutos após a interrupção de uma corrente de excitação de suficiente magnitude para induzir o fluxo de saturação. Sendo que fluxo de saturação é o valor de pico do fluxo que existiria em um núcleo na transição de não saturado para a condição de totalmente saturado e considerado ser aquele ponto sobre a característica B-H para o núcleo em questão na qual um aumento de 10% em B cause H ser aumentado em 50%.

Atualmente, os disjuntores mais simples trabalham com o ciclo de operação conforme Figura 3.11. Esta figura mostra um ciclo típico de toda a operação de um disjuntor. Assim, toda a lógica de funcionamento do disjuntor ocorre em menos de 1 minuto.

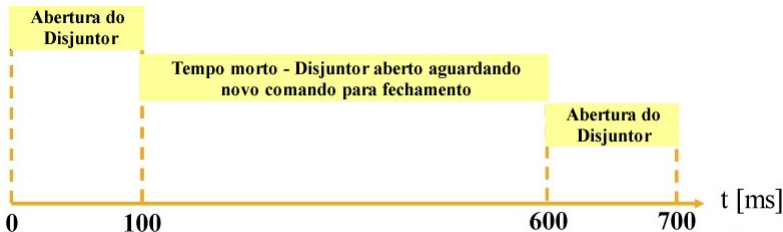


Figura 3.11 - Ciclo de operação do disjuntor [1].

Se um TC com núcleo de proteção convencional fosse usado para atuar com este disjuntor (Figura 3.11), ele poderia estar operando ainda muito próximo à região de saturação quando houvesse a necessidade do segundo religamento e, portanto não atuaria devidamente os relés de

proteção. É, por isso, que os TCs para resposta a transitório necessitam respeitar os tempos de atuação conforme apresentado na Figura 3.12.

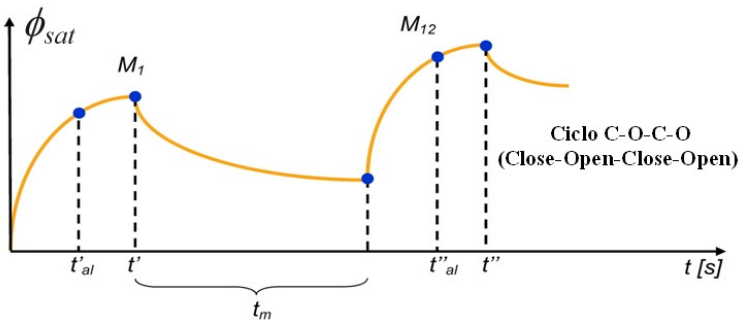


Figura 3.12 - Regime transitório de dois ciclos de operação [1].

Os parâmetros apresentados na Figura 3.12 são definidos como:

t'_{al} tempo de atuação da proteção para o 1º ciclo (relé)

t' tempo de comando de abertura de disjuntor no 1º ciclo

t_m tempo morto - intervalo de tempo de interrupção da corrente de curto-circuito

t''_{al} tempo de atuação da proteção para o 2º ciclo (relé)

t'' tempo de comando de abertura de disjuntor no 2º ciclo

Os pontos M_1 e M_{12} são conhecidos como fatores de majoração, que são utilizados para o dimensionamento do núcleo do TC com referência ao transitório. Na Seção 3.5.2, isto será novamente abordado.

Outro problema grave dos núcleos convencionais é o fato de não estarem aptos para serem sensibilizados atuando adequadamente na presença de curtos-circuitos não simétricos.

Analisando o instante do curto-circuito mais detalhadamente podem ocorrer dois casos críticos: quando a onda senoidal da tensão estiver passando pelo seu valor máximo; e quando estiver passando pelo valor nulo, conforme as formas de onda mostradas nas Figuras 3.7 (a) e (b).

No primeiro caso, da Figura 3.7 (a) com curto-circuito SIMÉTRICO, supõe-se que o curto-circuito ocorre no instante em que a tensão passa pelo seu valor senoidal máximo. Considerando o circuito elétrico do transformador puramente indutivo, compreende-se que a corrente primária I_1 estará passando pelo seu valor nulo ($I_1 = 0$). No instante logo após a ocorrência do curto-circuito, a corrente tenderá a assumir valores bem maiores do que os valores nominais, porém

também estará partindo do valor nulo. Portanto, não haverá descontinuidade do sinal de corrente.

No segundo caso, da Figura 3.7 (b) curto-circuito ASSIMÉTRICO, supõe-se que o curto-circuito agora ocorra no instante em que a tensão passa pelo seu valor senoidal nulo. Também, considerando o circuito elétrico do transformador puramente indutivo, compreende-se que a corrente primária estará passando pelo seu valor máximo ($I_1 = \text{valor máximo}$). No instante logo após o curto-circuito, a corrente tenderá a assumir valores bem maiores do que os valores nominais, mas agora não mais saindo do valor nulo. Neste momento, há uma descontinuidade da corrente primária do equipamento.

Com o surgimento da componente exponencial no segundo caso, o valor máximo da corrente de curto-circuito chega a valores muito maiores do que os valores típicos para curto-circuito simétricos, como ocorre no primeiro caso. Portanto, o núcleo projetado inicialmente irá saturar muito antes da corrente primária alcançar seu valor máximo, e não será capaz de atuar adequadamente os relés de proteção. Assim, pode-se inferir as limitações de um TC com núcleo de proteção convencional frente a casos específicos de curto-circuito:

O núcleo convencional não desmagnetiza em tempo hábil para poder “enxergar” o segundo ciclo de operação do disjuntor; e satura com valores da corrente primária antes deles alcançarem seu nível máximo de curto-circuito [1].

Antes de se começar a abordar a questão da saturação, há a necessidade de se definir alguns conceitos básicos que ajudarão a compreender melhor os efeitos envolvidos, contribuindo para o entendimento do funcionamento dinâmico do TC. Para isto, inicia-se o estudo das constantes de tempo envolvidas.

3.3.1. Constantes de Tempo

A constante de tempo (T) de um circuito de linha de transmissão elétrica é definida pela razão entre a indutância equivalente (L_{eq}) do circuito sobre a resistência equivalente (R_{eq}) do mesmo [1]. A constante de tempo é expressa pela Equação (3.2).

$$T = \frac{L_{eq}}{R_{eq}} \quad (3.2)$$

Nos cálculos, referentes ao TC se estarão sempre tratando com duas constantes de tempo: a constante de tempo primária e a secundária.

A constante de tempo primária T_1 reflete os valores do circuito primário do transformador, isto é, os parâmetros do próprio sistema elétrico, conforme as Equações (3.3) e (3.4), pois, no caso de um TC, o enrolamento primário é somente um condutor de passagem, conforme mostra a Figura 2.18 (a). O valor da constante de tempo primária necessariamente deve ser fornecido pelo cliente ao fabricante para que o projeto do transformador seja fácil e adequadamente concebido.

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} [s] \quad (3.3)$$

ou,

$$T_1 = \frac{X_1}{R_1 \cdot \omega} \quad (3.4)$$

$$X_1 = L_1 \omega \quad (3.5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.6)$$

Para o cálculo da constante de tempo secundária T_2 do transformador, baseia-se no circuito elétrico simplificado equivalente de um TC, como mostra a Figura 3.13.

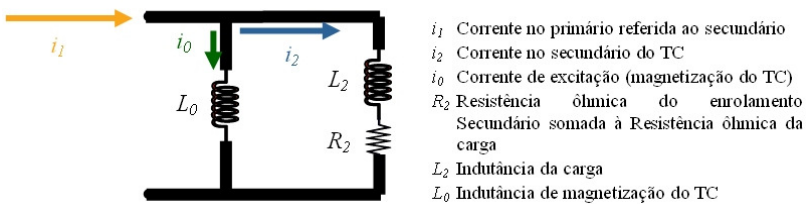


Figura 3.13 - Circuito equivalente simplificado do TC [1].

Do circuito apresentado na Figura 3.13, observa-se que:

$$i_1 = i_2 + i_0 \quad (3.7)$$

E através do equacionamento das tensões na malha, tem-se:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = L_2 \frac{d(i_1 - i_0)}{dt} + R_2(i_1 - i_0) \quad (3.8)$$

Reescrevendo a Equação (3.7) como (3.9) e a substituindo na (3.8), tem-se a Equação (3.10).

$$i_2 = i_1 - i_0 \quad (3.9)$$

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = L_2 \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_0}{dt} + R_2 i_1 - R_2 i_0 = (L_0 + L_2) \frac{di_0}{dt} + R_2 i_0 = L_2 \frac{di_1}{dt} + R_2 i_1 \quad (3.10)$$

Dividindo a Equação (3.10) por $(L_0 + L_2)$, tem-se:

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{R_2}{L_0 + L_2} i_0 = \frac{L_2}{L_0 + L_2} \frac{di_1}{dt} + \frac{R_2}{L_0 + L_2} i_1 \quad (3.11)$$

Pode-se simplificar a Equação (3.11) para a seguinte equação diferencial:

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{1}{T_2} i_0 = p \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{T_2} i_1 \quad (3.12)$$

onde:

$$p = \frac{L_2}{L_0 + L_2} \quad (3.13)$$

$$T_2 = \frac{L_0 + L_2}{R_2} \quad (3.14)$$

Assim, a constante de tempo secundária T_2 de um TC é a razão entre a soma da indutância de magnetização L_0 com a indutância da carga L_2 e a resistência do circuito secundário R_2 (resistência ôhmica do enrolamento secundário mais resistência ôhmica da carga).

O documento IEEE Report. 76 CH 1130-4 PWR, 1976 [2], em referência ao comportamento do TC, considera em suas análises as seguintes condições no seu funcionamento:

1. A reatância de dispersão secundária do TC é desprezada. Esta é uma suposição razoável e comumente aceita para um TC com cada enrolamento secundário uniformemente distribuído, apresentando a seção cheia, ou seja, a camada do enrolamento secundário ao longo do núcleo preenche totalmente a seção até o início de uma nova camada de enrolamento.
2. Para um TC com um enrolamento primário de uma só espira os efeitos do condutor de retorno são desprezados.

3. *Offset* pleno da corrente primária, que é quando a corrente de curto-circuito apresenta uma assimetria total F_A (vide Anexo F), sendo este o pior caso e raro de ocorrer, quando $F_A = 2,72$ [1].
4. A carga do TC é somente resistiva.

Conforme a publicação IEEE 76 [2] o tempo de saturação (T_s) é calculado pela Equação (3.15):

$$T_s = -T_1 \ln \left(1 - \frac{\frac{K_s - 1}{X_1}}{R_1} \right) \quad (3.15)$$

onde, T_s é o tempo de saturação, T_1 a constante de tempo primária do sistema, K_s o fator de saturação, X_1 a reatância do sistema primário para o ponto de falta e R_1 a resistência do sistema primário para o ponto de falta.

O documento IEEE 76 [2] apresenta uma série de curvas, semelhantes as da Figura 3.15, utilizando-se da Equação (3.16) [2] para obtenção do tempo de saturação T_s .

$$K_s = \frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) + 1 \quad (3.16)$$

O documento IEEE 76 [2] também apresenta a Equação (3.17), como outra maneira de calcular o fator de saturação K_s .

$$K_s = \frac{V_x N_2}{I_1 R_2} \quad (3.17)$$

onde, V_x é a tensão de saturação, cujo valor é determinado graficamente pela curva de excitação padrão do TC (ANSI Standard C57.13-1993, [13]), usando escala log-log. A tensão de saturação é encontrada pela intersecção da projeção de duas semi-retas da curva de excitação, como mostrado na Figura 3.14. Este método é usado para encontrar V_x em vez do ponto encontrado onde o declive da curva padrão de excitação é 45° , considerado como ponto de máxima permeabilidade para TC com núcleo sem entreferro [13], porque se considera que no ponto de máxima permeabilidade ainda não se está na região de saturação do núcleo.

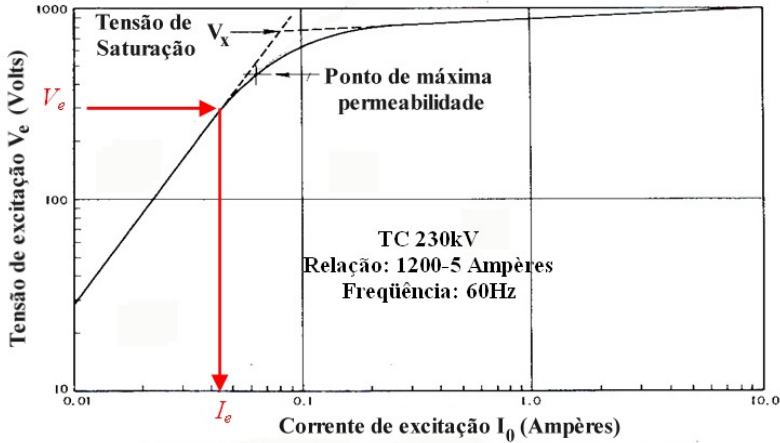


Figura 3.14 - Curva de excitação secundária de um TC [2].

Para valores específicos de V_x , N_2 , I_1 , R_2 , determina-se o fator de saturação K_s , que possibilita determinar o tempo que a densidade de fluxo alcança a saturação (T_s) em função da constante do tempo do sistema T_1 e constante de tempo secundária T_2 . A Figura 3.15 exemplifica o uso de K_s graficamente. Inversamente, para um desejado valor do tempo de saturação T_s , e para um dado valor de T_1 e I_1 , as curvas da Figura 3.15 possibilitarão determinar os referidos parâmetros do TC: $\frac{V_x N_2}{R_2}$ e T_2 .

A constante de tempo secundária T_2 do TC é aproximadamente o valor da indutância de magnetização L_0 dividida pela resistência total do circuito secundário R_2 (vide Anexo A – Apêndice II da IEEE 76 [2]) L_0 possui um valor muito maior que o da indutância L_2 da carga. Então, a Equação (3.14) passa a ser simplificada por (3.18).

$$T_2 = \frac{L_0}{R_2} \quad (3.18)$$

Para TC convencionais, com núcleo de aço sem entreferro, operando numa relação nominal de 1000:5 ou maior, a constante de tempo do TC é geralmente de dois (2) segundo ou maior [2].

Conforme referência [2] a constante de tempo T_2 também pode ser calculada pela Equação (3.19).

$$T_2 = \frac{V_e}{I_0 R_2 \omega} \quad (3.19)$$

onde, V_e e I_0 representam a tensão e a corrente respectivamente para um ponto adequado na curva de excitação do TC, ou seja, correspondem à tensão e corrente de magnetização (*vide* Figura 3.14). Um ponto da curva de magnetização conveniente para usar no cálculo em (3.19) é aquele adotado como ponto de máxima permeabilidade [2], que é onde a tangente possui 45° na curva de excitação, fornecendo a ordenada e a abscissa sobre a escala log-log. A determinação de T_2 por este método deve ser refeito quando o núcleo de aço incorpora entreferros, uma vez que eles podem abaixar significativamente a constante de tempo secundária do TC.

Os TCs com entreferro apresentam a tensão de saturação V_x maior que os TCs sem entreferro. Assim, pela equação (3.17) o fator de saturação K_s será maior e, pela equação (3.15), levará a um T_s maior.

Utilizando-se a Equação (3.16), como exemplo, mantendo $T_1 = 0,04$ s e variando T_2 , obtém-se a Figura 3.15 que mostra como varia K_s em função de T_2 . Observa-se que quanto maior T_2 , maior será o valor de K_s . Portanto, para se ter um T_s maior, deve-se buscar um TC com T_2 maior possível.

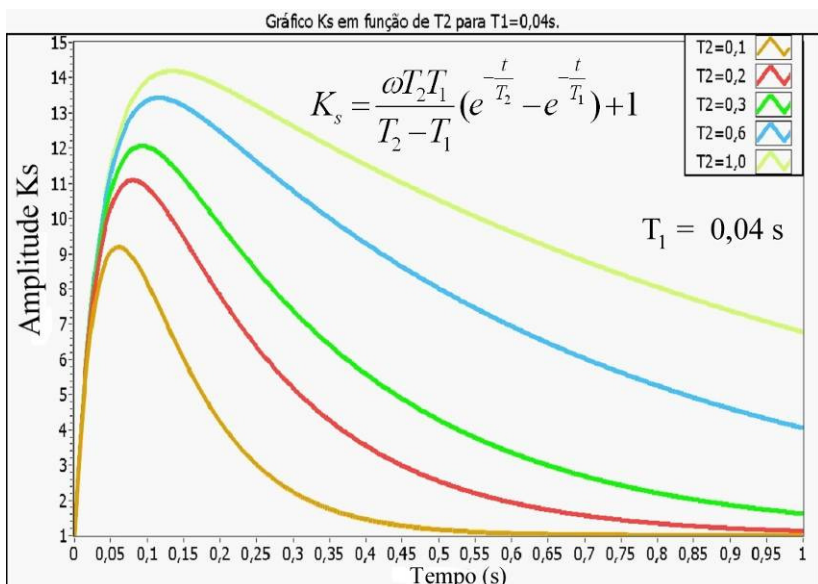


Figura 3.15 - Variação de K_s em função de T_2 com $T_1 = 0,04$ s.

O nível da remanência no núcleo pode ser convenientemente expressado como uma percentagem do nível da densidade de fluxo de saturação no núcleo. Conforme [2], o efeito da remanência sobre o tempo de saturação T_s pode ser aproximadamente levado em conta pela multiplicação do fator de saturação K_s , antes de usar as curvas do tempo de saturação, pelo fator F_r , conforme Equação (3.20).

$$F_r = \frac{100 - \% \text{ Remanência}}{100} \quad (3.20)$$

Como exemplo, se %Remanência é igual a 75%, com polaridade desfavorável, o K_s resultante (K_{sfinal}), será a multiplicação de K_s por F_r , conforme Equação (3.21).

$$K_{sfinal} = K_s F_r = K_s \frac{100 - 75}{100} = 0,25 K_s = \frac{1}{4} K_s \quad (3.21)$$

Ou seja, em casos severos do efeito de remanência magnética, o fator de saturação K_s pode ser um quarto (1/4) daquela calculada pela equação (3.17), baseado sobre 75% da remanência com polaridade desfavorável [2].

No Anexo C, encontra-se mais explicações sobre o fator de remanência K_r (%Remanência). É importante não confundir o conceito da influência de remanência, aqui denominada F_r , utilizada em [2], que contribui para a redução do K_s (o qual fornece o tempo que a densidade de fluxo alcança a saturação em função da constante do tempo do sistema), com o fator de remanência K_r definido em [14][15] e expresso no Anexo C. Também deve ser evitado confundir F_r e K_r com K_{rem} , que é uma constante de remanência utilizada para definir o dimensionamento do núcleo pelo fabricante. K_{rem} [24] que é apresentada no Anexo D, D6 - Classe TPY.

Na prática, os TCs com entreferro apresentam uma corrente de excitação maior que os TCs sem entreferro. Sendo assim, observa-se pela Equação (3.19) que isto leva a uma constante de tempo secundária T_2 menor. Por sua vez um T_2 menor contribuirá para se ter um K_s menor, o que pode ser deduzido da Equação (3.16) com a ajuda da Figura 3.15, contribuindo em se ter um T_s menor.

O TC como elemento transdutor apresenta uma constante de tempo menor no secundário quando comparada com a contante de tempo primária, que basicamente depende dos parâmetros da linha de transmissão. A Figura 3.16, apresenta este fato graficamente, sendo que

sempre considera-se a resposta à curva de excitação do núcleo na região linear.

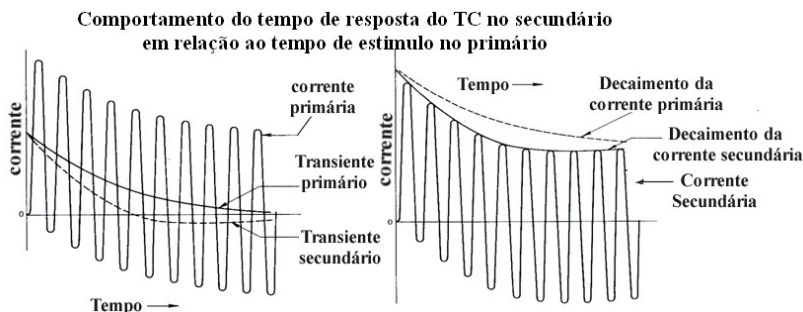


Figura 3.16 - Tempo de resposta do TC no secundário [2].

No final da Seção 3.1 já se havia comentado que em geral o uso de enterferros ajuda a diminuir os valores de remanência magnética de TC, contribuindo no aumento do tempo de saturação. Observa-se também através das Equações (3.15), (3.16), (3.17) e (3.19) uma interdependência entre os parâmetros T_1 , T_2 , X_l , R_l , V_x , N_2 , I_1 , R_2 , V_e , I_0 e ω na resposta do tempo de saturação T_s , o que leva ao fabricante ter que procurar um ponto de equilíbrio destes parâmetros na definição do projeto do TC.

Em termos práticos, o aumento dos erros de relação e de fase, causado por pequenos entreferros, é usualmente desprezível exceto para TCs com relações de transformação relativamente baixas [22]. A Figura 3.17 mostra a comparação de dois TCs, com e sem entreferro, com relações relativamente baixas e iguais, excitados até a região de saturação, onde se observa que o TC com entreferro apresenta um perceptível erro de fase e de relação comparado ao TC sem entreferro, próximo da zona de saturação [22].

A indutância de cargas com baixo fator de potência, tais como relés eletromecânicos, que são conectados no circuito secundário de um TC aumenta o fluxo alternante do núcleo, mas tem efeito desprezível sobre a componente assimétrica no transiente do fluxo. Esta declaração é validada pelas análises do Apêndice II da IEEE 76 [2], no Anexo A, partindo da Equação (A.9). O aumento do fluxo alternante no núcleo reduz o tempo de saturação T_s para determinados tipos de TCs e parâmetros do sistema de potência.

TC com entreferro de baixa relação de transformação apresentam um perceptível erro de relação e fase, próximo da zona de saturação, comparado com o TC sem entreferro

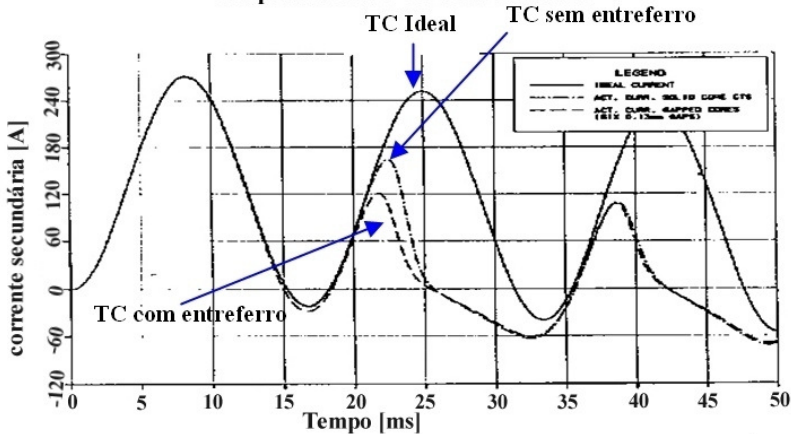


Figura 3.17 – Comportamento do erro de relação e fase de TCs com e sem entreferro, para relações de transformação muito baixas [22].

O tempo de saturação, quando as cargas contêm indutância, pode ser determinado das curvas do tempo de saturação T_s [2], se o fator de saturação do transformador de corrente K_s encontrado for subtraído o valor de ΔK_s conforme Equação (3.22), sendo $\cos\theta$ o fator de potência da carga [2].

$$\Delta K_s = \frac{1}{\cos\theta} - 1 \quad (3.22)$$

A resistência do enrolamento secundário do TC deve ser incluída no cálculo do $\cos\theta$. ΔK_s pode ser usado como uma correção somente quando ΔK_s e K_s são calculados usando o mesmo valor de R_2 . Se as Equações (3.17) e (3.22) juntas derem um K_s de valor negativo ou resultarem em um tempo de saturação menor que meio ciclo, pode ser admitido que o tempo de saturação verdadeiro seja meio ciclo ou menor [2].

De acordo com a IEEE 76 [2], uma vez que *offsets* plenos de correntes de falta são raros, o seguinte método simples é utilizado para determinação do tempo de saturação do TC para *offsets* mais prováveis de ocorrerem (tal como 50%). O procedimento é dividir o fator de saturação calculado pelo *offset* em *pu* e então usar as curvas do fator de

saturação como antes. Para isto, a equação (3.17) torna-se modificada como se apresenta na Equação (3.23).

$$K_s = \frac{V_x N_2}{(pu_offset) I_1 R_2} \quad (3.23)$$

O resultado será aproximado, mas provavelmente aceitável se o *offset* for 50 % ou mais. Quando o *offset* é menor que 50 % a Equação (3.23) deve ser revisada de acordo com o Apêndice II [2], no Anexo A, e novas equações podem ser desenvolvidas para o tempo de saturação. Definição de “*Offset pu da Corrente de Falta*” em IEEE 76 [2]:

O valor instantâneo da componente assimétrica da corrente de falta no tempo da iniciação da falta dividido pelo valor de pico da componente alternante simétrica da corrente de falta.

3.4. PROPOSTA PARA ESCOLHA DO TC DE MELHOR DESEMPENHO ATRAVÉS DO ENSAIO DE SATURAÇÃO PELA AVALIAÇÃO DE L_0 E T_2

Observa-se com as análises apresentadas pela publicação IEEE 76 [2] que uma prerrogativa para se obter o tempo de saturação T_s é a determinação dos seguintes parâmetros:

- V_x Tensão de saturação, que depende da curva do ensaio de saturação.
- L_0 Indutância de magnetização.
- R_2 Resistência secundária.

No processo de ensaios no laboratório da fábrica de TCs ou de uma empresa do setor elétrico, que ensaia vários TCs do mesmo modelo, muitas vezes é importante determinar qual dos TCs do lote ensaiado apresenta o melhor desempenho em termos de tempo de resposta ao transitório, ou quando se comparam TCs de mesma especificação manufaturados por fabricantes diferentes, no caso de ensaios em uma empresa do setor elétrico. O que se pretende, neste tipo de análise experimental, é determinar quais dos TCs apresentam uma constante de tempo do enrolamento secundário T_2 maior. No exemplo dado na Seção 3.3.1 utilizando-se da Equação (3.16) e da Figura 3.15, observa-se que para uma mesma constante de tempo primária do sistema

T_1 , uma T_2 maior proporcionará uma constante de tempo de saturação T_s maior, dependendo do fator de saturação K_s e da carga em si.

A avaliação analítica do valor de T_2 refere-se à região linear da curva de excitação, cujo objetivo é apontar para a predição de quando a saída do TC se torna distorcida, isto é, a determinação de T_s .

A proposta deste trabalho de dissertação é considerar somente r_2 no cálculo da constante de tempo T_2 . Portanto, de acordo com a Equação (3.24):

$$T_2 \cong \frac{L_0}{r_2} \quad (3.24)$$

O valor de r_2 é obtido através da medição da resistência ôhmica do enrolamento secundário com um instrumento de precisão. O valor da indutância de magnetização L_0 e da tensão de saturação V_x são obtidos dos valores de tensão e corrente da curva de magnetização no ensaio de saturação do TC. Neste trabalho de mestrado, utilizam-se ferramentas de *software* desenvolvidas como instrumentos virtuais na plataforma LabView para determinação destes valores.

3.4.1. Determinação da Indutância de Magnetização L_0 e da Constante de Tempo Secundária T_2

Idealmente, no ensaio do TC para levantar a curva de saturação (de magnetização) deveria ser excitado o enrolamento primário, controlando-se a forma de onda do fluxo pela tensão induzida no enrolamento secundário.

Na prática para se obter a curva de magnetização do TC, deixa-se o enrolamento primário em aberto e alimenta-se pelo enrolamento secundário, conforme Figura 3.18 (a). Isto é realizado desta maneira para que a corrente de ensaio seja relativamente baixa. O circuito de ensaio de saturação adotado para obtenção dos sinais de análises nesta dissertação é representado por um circuito equivalente simplificado, Figura 3.18 (b), alimentado por uma fonte de tensão $v(t)$ de sinal senoidal, sendo que a força eletromotriz induzida no secundário E_2 é representada por $v_m(t)$.

Através do circuito equivalente simplificado da Figura 3.18 obtêm-se as Equações (3.25) a (3.27).

$$v_m(t) = v(t) - i(t)r_2 \quad (3.25)$$

$$\Phi(t) = \frac{1}{N_2} \int v(t) dt \quad (3.26)$$

$$\Phi_m(t) = \frac{1}{N_2} \int v_m(t) dt \quad (3.27)$$

onde, $v_m(t) = E_2(t)$, $v(t) = V_2(t)$, $i(t) = i_0(t)$, e $\Phi_m(t)$ é o fluxo de magnetização.

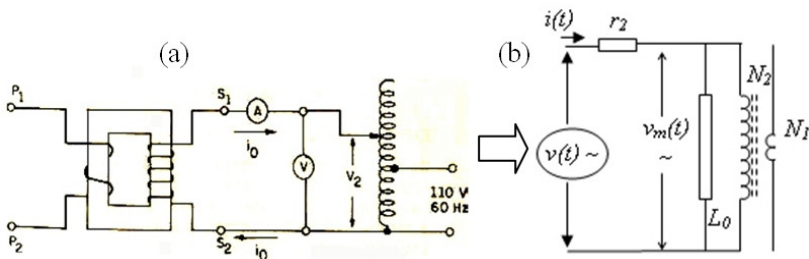


Figura 3.18 - Circuito ensaio de saturação em TC, (a) Circuito básico; (b) Circuito equivalente simplificado adotado para análise [4][3].

Neste trabalho, o ensaio é realizado automaticamente por uma bancada de ensaio (*vide* Figura 3.19) [3], onde em (a) é apresentado o diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio e em (b) apresenta-se uma das máscaras de *software* desenvolvido para o controle e análise do ensaio.

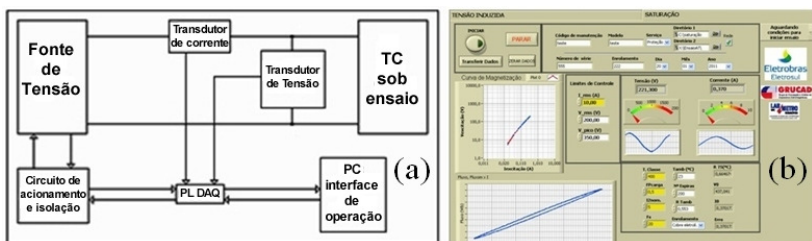


Figura 3.19 - Circuito da bancada de ensaio de saturação, (a) Diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio de saturação em TC; (b) Painel frontal do VI de ensaio de curva de magnetização [3].

Então, com o auxílio de um VI (Instrumento Virtual – *Virtual Instruments*) desenvolvido com *software* LabView e uma placa de aquisição analógica da *National Instruments*, obtém-se as formas de onda de $v(t)$ e $i(t)$, e então, calcula-se $v_m(t)$ através da Equação (3.25),

obtendo-se os valores de fluxos por meio da integração dos sinais de tensão (Equações (3.26) e (3.27)).

Quando o enrolamento secundário (*vide* circuito da Figura 3.18) é percorrido pela corrente $i(t)$, o material magnético é submetido a uma indução magnética \vec{B} que flui sob a área da seção do núcleo magnético de superfície S , representado por uma área de superfície diferencial $d\vec{S}$. Portanto, o fluxo magnético pode ser calculado pela Equação (3.28), que atravessa as espiras do enrolamento secundário do TC [25]. Se o circuito tiver N espiras atravessadas pelo mesmo fluxo, define-se o fluxo concatenado λ como é dado pela Equação (3.29).

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.28)$$

$$\lambda = N\Phi \quad (3.29)$$

Se o meio que circunda o circuito é linear, o fluxo concatenado λ é proporcional à corrente I que o gerou (Equações (3.30)). A proporcionalidade entre o fluxo magnético concatenado e a corrente é dada pela indutância L (Equação (3.31)).

$$\lambda \propto I \quad (3.30)$$

ou

$$\lambda = LI \quad (3.31)$$

Assim, por definição, a indutância L de um indutor é a razão entre o fluxo magnético concatenado λ e a corrente I através do indutor, dada pela Equação (3.32).

$$L = \frac{\lambda}{I} = N \frac{\Phi}{I} \quad (3.32)$$

Quando há saturação dos materiais magnéticos, a proporcionalidade entre λ e I deixará de existir, porém a definição acima continua válida, pois, a indutância L varia com o valor de I [26].

A indutância do enrolamento secundário pode ser considerada como a principal representante da indutância de um TC, pois o enrolamento primário basicamente é uma barra de passagem, produzindo um efeito de indutância mútua desprezível entre os enrolamentos primário e secundário. Portanto, a indutância do enrolamento secundário expressada pela indutância de magnetização L_o do TC (*vide* Figura 2.18 (b)), pode ser dada em função de características construtivas, conforme é dado pela Equação (3.33). A referência [26] apresenta a dedução da indutância sob este aspecto. A dedução para a

indutância de magnetização é apresentada no Apêndice II do documento IEEE 76 [2] sobre “Densidade de Fluxo Instantânea em Transformador de corrente Tipo Bucha devido a uma Corrente Primária Assimétrica”. Na Equação (3.33), S é a área da seção magnética do núcleo do TC, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, μ_r é permeabilidade relativa do material do núcleo em relação à do ar μ_0 , ℓ_m é o caminho médio magnético e N_2 o número de espiras do enrolamento secundário.

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r S N_2^2}{\ell_m} \quad (3.33)$$

Quando se realizam ensaios em laboratório comumente não se têm os parâmetros dimensionais construtivos do TC, e também as características magnéticas do núcleo. Por este motivo se adota o circuito de ensaio apresentado na Figura 3.18 para se obter o valor da indutância de magnetização. O comportamento de L_0 é semelhante ao da permeabilidade magnética do núcleo, μ_f . Além disso, a permeabilidade do núcleo (ferro) μ_f é muito maior que a permeabilidade do ar μ_0 , a qual é constante e de valor praticamente igual ao da permeabilidade do vácuo μ_{vacuo} . Deste modo ao se avaliar o comportamento de L_0 se está também avaliando o comportamento de μ_f , ou seja, quando L_0 chega ao máximo valor representa que a permeabilidade μ_f também chegou ao seu máximo. Então, no caso em questão, a indutância L da equação (3.32) pode ser igualada à indutância de magnetização L_0 , ou seja, $L = L_0$. Portanto, através do circuito apresentado na Figura 3.18, tem-se:

$$L_0 = N_2 \frac{\frac{d\Phi_m}{dt}}{\frac{di}{dt}} = N_2 \frac{d\Phi_m}{di} \quad (3.34)$$

As Figuras 3.20 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o comportamento teórico da curva de magnetização *versus* a corrente de excitação i , e o comportamento teórico da curva da variação da indutância de magnetização L_0 *versus* a corrente de excitação i , que tem o formato representativo do comportamento da permeabilidade magnética do material do núcleo. Os valores pontuais das curvas serão obtidos com os valores máximos de fluxo e de corrente para uma frequência fixa f , em ensaios apresentados na Seção 3.4.2, onde os gráficos são apresentados em escalas de valores. Como a Equação (3.27) considera $v_m(t)$ senoidal, dos valores de pico resultantes desta equação pode-se representar o valor de pico da tensão de excitação conforme a

Equação (3.35), sendo que, esta maneira de representar a tensão é encontrada no Anexo D.

$$v_{mpico} = \dot{\Phi}_{mpico} N_2 \omega \quad (3.35)$$

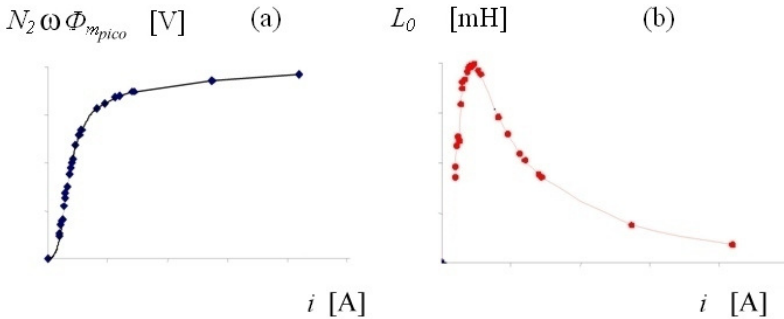


Figura 3.20 - Comportamento teórico da tensão e da indutância, (a) Tensão *versus* Corrente; (b) Indutância *versus* Corrente.

A Figura 3.21 apresenta as curvas teóricas das Figuras 3.20 (a) e (b) em função da corrente de magnetização em um único gráfico. Pode-se notar a expectativa da indutância de magnetização máxima ocorrer próximo do ponto de joelho (ponto de transição da zona linear para não linear da curva de tensão *versus* corrente de excitação). Conforme as referências [2][13][15] a indutância máxima ocorre próximo ao ponto de joelho é válido para TC com núcleo sem entreferro. Muitas vezes isto é esquecido quando se está tratando de TC com entreferro. Através dos resultados na Seção 3.4.2 esta questão da máxima permeabilidade estar próximo do joelho da curva de excitação será avaliada.

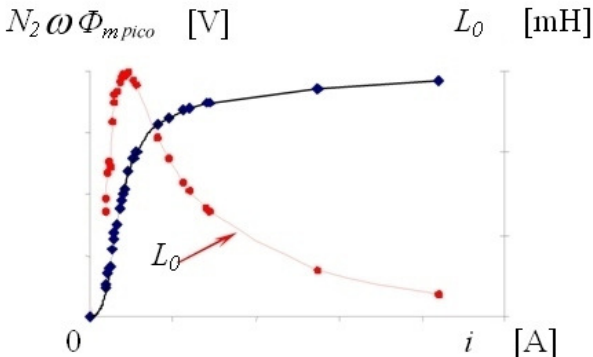


Figura 3.21 – Comportamento teórico da Tensão e Indutância *versus* Corrente.

Uma vez obtida a curva de resposta da indutância de magnetização L_0 dos vários TCs de uma mesma família, se calcula a constante de tempo secundária T_2 de cada um em função da corrente, com os respectivos valores da resistência do enrolamento secundário r_2 . Estas curvas são apresentadas em um único gráfico, mostrando os diferentes comportamentos de cada TC. Esta forma de apresentação facilita a avaliação da constante de tempo T_2 que proporcionará um maior tempo de saturação T_s . A Figura 3.22 mostra um exemplo teórico esperado de como as curvas de T_2 podem ser diferentes para um mesmo lote⁵ de TCs. Desta maneira o usuário pode selecionar o TC que apresenta a maior constante de tempo, bem com descartar os TCs que não atendem um pré-requisito em relação aos valores máximos da constante de tempo secundária desejada.

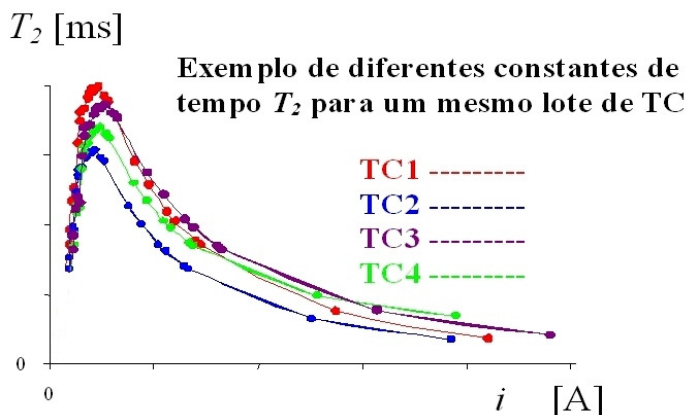


Figura 3.22 – Comportamento teórico das constantes de tempo T_2 na seleção de TCs

⁵ Lote: conjunto de equipamentos referente a uma demanda de produção, ou de ensaios. Também pode representar uma amostra de equipamentos de um linha de fabricação.

3.4.2. Resultados de ensaios em TC no laboratório de alta tensão quanto à determinação da indutância de magnetização L_0 e da constante de tempo T_2

Pela norma IEC 60044-1 [15], a constante de tempo secundária T_2 é obtida pela relação da Equação (3.18) através dos valores de indutância de magnetização L_0 e da resistência do secundário R_2 .

A norma IEC 60044-6 [14] considera o ponto de joelho da curva de excitação como ponto de referência de saturação e define o cálculo da indutância de magnetização L_0 através da relação entre o valor de pico do fluxo de saturação Φ_s e o correspondente valor de pico da corrente de magnetização I_0 , conforme a Equação (3.36). Ao propor a Equação (3.36) para o cálculo de L_0 parece gerar uma contradição com respeito ao se utilizar a parte linear da curva de magnetização (inclinação) para determinação de L_0 , pois a mesma norma contém a seguinte informação:

A indutância de magnetização é dada pela inclinação média em cima da curva estimada na faixa entre 20% e 90% do fluxo de saturação Φ_s .

Neste trabalho de dissertação, o cálculo da indutância de magnetização conforme a norma IEC 60044-6 [14] é realizado por um instrumento virtual (VI) de análise (que será apresentado a seguir) através da Equação (3.37), onde a indutância de magnetização é igual à relação da tensão de pico (no ponto em que um acréscimo de 10% no valor da tensão corresponde a um acréscimo de 50% no valor da corrente de excitação) e a corrente de pico de excitação correspondente multiplicada por $2\pi f$, onde f é a frequência nominal de excitação (neste caso de 60Hz).

$$L_0 = \frac{\Phi_s}{I_0} \quad (3.36)$$

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \frac{V_{\text{Pico_quando_a_tensão_acrescer_10\%_e_corrente_50\%}}}{2\pi f I_{\text{Pico_quando_a_corrente_acrescer_50\%_e_a_tensão_10\%}}} \\ L_0 &= \frac{\Phi_{\text{Pico_quando_B_acrescer_10\%_e_H_50\%}}}{I_{\text{Pico_quando_H_acrescer_50\%_e_B_10\%}}} \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

Para viabilizar os vários procedimentos de análise experimental de TC, desenvolveu-se um VI de análise, que trabalha com curvas e

valores obtidos experimentalmente após serem armazenados por meio eletrônico. Para se obter valores de ensaio, utilizou-se um TC de proteção de relação 1200/5, classe C400.

O VI de análise fornece dois valores de indutância: um calculado pela norma IEC (L_{0_IEC}) [14] e outro por um método proposto ($L_{0_Met.Proposto}$). O valor pelo método IEC é calculado pela inclinação da região linear, Equação (3.38), que é equivalente com a Equação (3.37), apresentando o valor no ponto que a mesma considera como ponto de saturação. O método proposto obtém o valor máximo da curva de indutância em função da corrente obtida, conforme Equação (3.39), utilizando valores eficazes. Ou melhor, a Equação (3.39) fornece uma curva de L_o em função da corrente de magnetização i_o . O valor máximo da curva de L_o é considerado como valor nominal da indutância de magnetização. (Observação: na realidade, considera-se a indutância de magnetização calculada como a indutância própria do TC por causa da dificuldade de determinar a indutância de dispersão. Posteriormente, poder-se-ia compensá-la com o conhecimento do valor da indutância de dispersão). O VI de análise pode calcular o L_{0_IEC} tanto para valores de pico como em valores eficazes. Observou-se que os valores calculados pelo método IEC, tanto para eficaz quanto de pico, não diferem significativamente (<0,3 %) em TCs de proteção ensaiados no Laboratório, como exemplo, a Tabela 3.1 mostra os resultados destes ensaios. Note que a diferença utilizando valores eficazes ou de pico é de aproximadamente de 0,27 %.

$$L_{0_IEC} = \frac{V}{2\pi f I} \quad (3.38)$$

$$L_{0_Met.Proposto}(i_o) = \frac{V(i_o)}{2\pi i_o} \quad (3.39)$$

A constante de tempo secundária T_2 (Equação (3.40)) depende da determinação do valor da indutância de magnetização L_o e dos valores das resistências do enrolamento secundário r_2 e da carga r_c . O VI de análise apresenta dois valores, um calculado conforme proposto neste trabalho, que só considera r_2 , e outro baseado na norma IEC, que considera r_2 e r_c . Os resultados obtidos para o TC de classe C400, cujos valores da impedância de carga nominal são $r_c = 2 \Omega$ e $x_c = 3,464 \Omega$, estão na Tabela 3.1. O valor da resistência do enrolamento secundário r_2 é de 0,35146 Ω .

$$T_2 = \frac{L_0}{r_2 + r_c} \quad (3.40)$$

Tabela 3.1 – Resultado de L_0 e T_2 obtidos pelos métodos proposto e IEC

Parâmetros	Método proposto Valor eficaz	IEC	
		Valor eficaz	Valor de pico
L_0 [H]	1,5901	1,462	1,458
I_{L0} [A]	0,387789		
V_{L0} [V]	232,76		
T_2 [s]	3,0755	2,8277	2,8199

O valor de L_0 pelo método proposto apresentou um valor maior que o da IEC, o que era esperado por estar considerando somente a resistência do enrolamento secundário r_2 no cálculo. A vantagem de se utilizar o método proposto é devido ao fato de não se ter que buscar o valor da resistência de carga nominal em catálogos e ou contratos de compra do equipamento, prolongando o tempo de ensaio. O parâmetro do valor de carga deve estar anotado na placa de dados que acompanha o TC, mas nem sempre está presente. O resultado da Tabela 3.1 também mostra que os valores obtidos tanto em valor eficaz ou de pico pelo método IEC não apresentam uma diferença significativa.

Sobre a tolerância admissível do valor da constante de tempo da malha secundária a norma IEC60044-1 [15], na Seção 13.4.2, define:

A constante de tempo (T_2) da malha secundária deve ser determinada. Esta não deve diferir do valor especificado por mais do que $\pm 30\%$.

A norma IEC60044-6 [14], complementar à norma IEC60044-1 [15], também apresenta:

Ela não deve diferir de mais do que $\pm 30\%$ para TC de classe TPY e de $\pm 10\%$ para os de classe TPZ.

Nota-se que a norma IEC apresenta um índice de tolerância relativamente elevado, até 30% para certos casos. Dos resultados

mostrados na Tabela 3.1, considerando-se os valores de pico e eficazes, verificou-se que a máxima diferença para L_0 e T_2 obtidos com o método IEC foi de 0,3 %. Assim, depreende-se que a avaliação de TCs utilizando-se valores eficazes fica bem aquém da tolerância de 30% aceita pela norma IEC, o que mostra sua viabilidade.

Também, realizou-se ensaios de dois TCs de classe C400, relação 1200/5, sendo um TC sem entreferro de 72 kV com $r_2 = 0,42779 \Omega$, denominado por TC3S, e um TC com entreferro de 145 kV com $r_2 = 0,51346 \Omega$, denominado por TC6200377. Dos resultados de cálculos com o VI de análise, correspondentes às curvas obtidas dos TCs sem entreferro e com entreferro apresentadas na Figura 3.23, obtém-se os valores (sem considerar a carga) apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - L_0 e T_2 em TCs sem e com entreferro sem carga

Valores eficazes	Método proposto		IEC	
	TC sem entreferro	TC com entreferro	TC sem entreferro	TC com entreferro
L_0 [H]	4,8598	1,6127	3,5795	1,5704
T_2 [s]	11,36	3,1408	8,3673	3,0585

A Figura 3.23 (painel frontal que mostra resultados de cálculos através do VI de análise) apresenta as curvas da indutância L_0 , da constante de tempo secundária T_2 e da tensão de excitação do TC3S e TC6200377 considerando a resistência do enrolamento r_2 , sem considerar a carga nominal para classe C400, ou seja, foram consideradas r_c e x_c nulas. Esta figura apresenta:

- Curvas em escala log-log de L_0 , T_2 e tensão de excitação *versus* corrente do TC3S – sem entreferro;
- Curvas em escala linear de L_0 , T_2 e tensão de excitação *versus* corrente do TC3S – sem entreferro;
- Curvas em escala log-log de L_0 , T_2 e tensão de excitação *versus* corrente do TC6200377 – com entreferro;
- Curvas em escala linear de L_0 , T_2 e tensão de excitação *versus* corrente do TC6200377 – com entreferro.

Comportamento de T_2 e L_0 em TC sem entreferro e com entreferro, sem carga secundária.

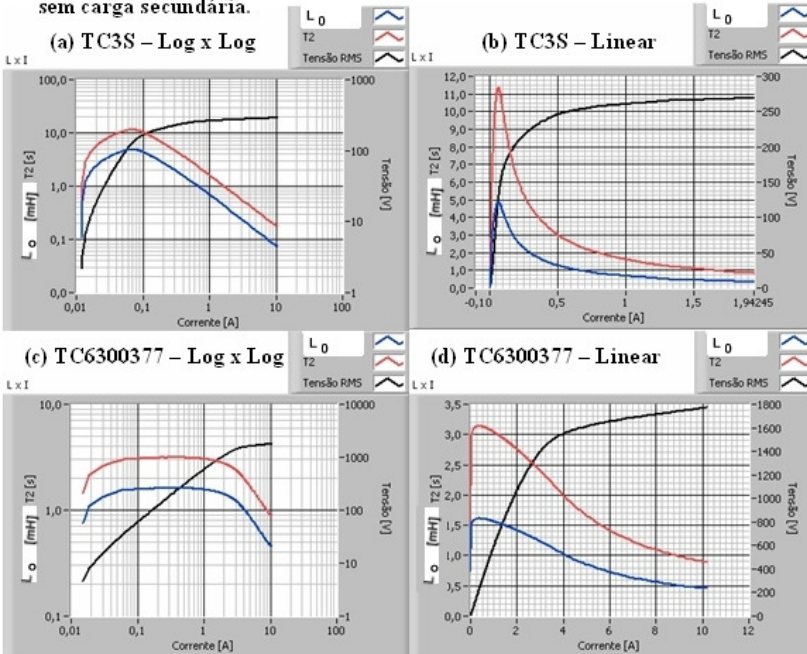


Figura 3.23 - Curvas de T_2 e L_0 ensaios em TCs sem carga.

Analisando os resultados apresentados pela Figura 3.23 e a Tabela 3.2, nota-se, então, que o TC sem entreferro TC3S apresenta valores maiores para T_2 e L_0 em relação ao TC com entreferro TC6200377. Além disso, os valores obtidos para L_0 pelo método IEC são menores do que o método proposto: aproximadamente 26,3 % menor para o TC sem entreferro e 2,6 % menor para o TC com entreferro. Para o TC sem entreferro o maior valor de L_0 obtido no ensaio está mais próximo do ponto de joelho da curva de excitação do que o TC com entreferro. Embora, a questão sobre a definição do ponto de joelho seja abordada mais adiante, cabe realçar aqui que as normas IEEE/ANSI [2][13] e IEC[15] sempre referenciam o ponto de joelho como ponto de máxima permeabilidade, ou seja, máxima indutância de magnetização. No entanto, o que se observa com os resultados dos ensaios é que isto é válido para TCs sem entreferro, sendo que para TC com entreferro o valor máximo de L_0 é alcançado bem antes do ponto de joelho. O mais correto de uma forma mais generalizada talvez fosse dizer que o valor

da permeabilidade magnética começa a decair próximo ao ponto de joelho

A Figura 3.24 mostra as curvas da indutância L_0 , da constante de tempo secundária T_2 e da tensão de excitação do TC3S e do TC6200377 considerando a carga nominal para classe C400, ou seja, $r_c = 2 \Omega$ e $x_c = 3,464 \Omega$. Esta Figura 3.24 apresenta:

- (a) Curvas em escala log-log de L_0 , T_2 e tensão de excitação versus corrente do TC3S – sem entreferro;
- (b) Curvas em escala linear de L_0 , T_2 e tensão de excitação versus corrente do TC3S – sem entreferro;
- (c) Curvas em escala log-log de L_0 , T_2 e tensão de excitação versus corrente do TC6200377 – com entreferro;
- (d) Curvas em escala linear de L_0 , T_2 e tensão de excitação versus corrente do TC6200377 – com entreferro.

Das curvas obtidas dos TCs sem entreferro e com entreferro apresentadas na Figura 3.24, considerando a carga, os valores calculados são apresentados na Tabela 3.3. Observa-se que os valores calculados de L_0 e T_2 para o método proposto são idênticos na Tabela 3.2 e 3.3, pois o método não considera a carga. No caso de se considerar a carga nominal o valor de T_2 diminui para ambos os TC sem e com entreferro, como mostram os gráficos, demonstrando a influência da carga no comportamento da constante de tempo secundária T_2 .

Tabela 3.3 - L_0 e T_2 em TC sem e com entreferro com carga

Valores eficazes	Método proposto		IEC	
	TC sem entreferro	TC com entreferro	TC sem entreferro	TC com entreferro
L_0 [H]	4,8598	1,6127	3,5795	1,5704
T_2 [s]	11,36	3,1408	1,4744	0,6248

Comportamento de T_2 e L_0 em TC sem entreferro e com entreferro,
com carga secundária.

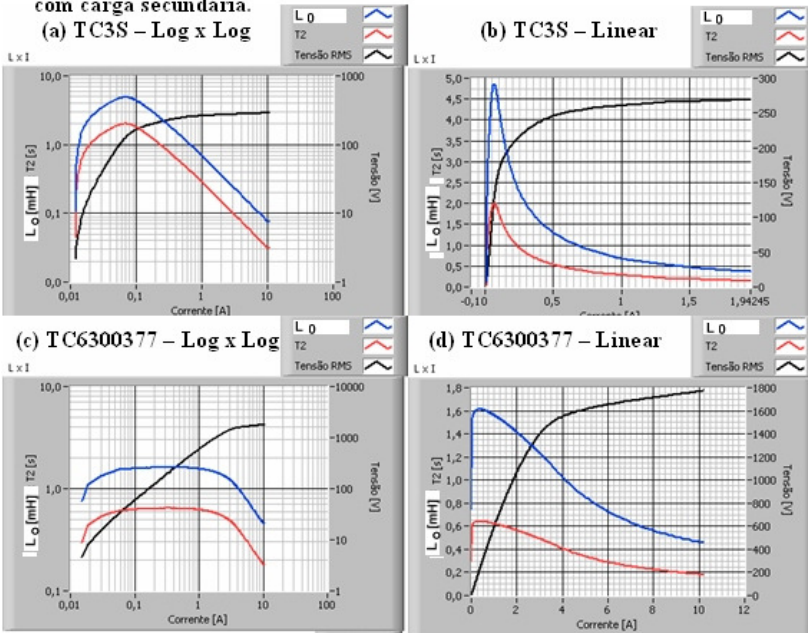


Figura 3.24 - Curvas de T_2 e L_0 ensaios em TC com carga.

A aplicação do método proposto se justifica na avaliação de lotes de TCs ou de TCs de fabricantes diferentes com a mesma especificação. Sob este enfoque, como demonstração do uso do método proposto neste trabalho avalia-se o comportamento de curvas de T_2 para verificar, dentro de um lote de equipamentos semelhantes, qual dos TCs apresenta um valor de T_2 que contribuirá para se obter um T_s maior. Para isto, realizou-se o ensaio de oito TCs de relação de 1200/5, C400, 72 kV, do mesmo fabricante, sem entreferro, denominados (TC1, TC2, TC3, TC4, TC5, TC6, TC7 e TC8), excitando-os pelo enrolamento 3S. As curvas de T_2 em função da corrente de magnetização são apresentadas na Figura 3.25.

Pelas curvas apresentadas na Figura 3.25, observa-se que o TC6 apresenta o maior T_2 , enquanto o TC3 possui o menor T_2 . Nota-se que a relação entre os valores máximos para estes dois TCs é de quase duas vezes. Com este tipo de análise, pode-se selecionar, de um mesmo lote de compra de TCs considerados iguais, quais deles contribuirão para um tempo de saturação T_s maior (ou menor) e também quais estão dentro da

tolerância admitida para o projeto de proteção a qual eles foram dimensionados.

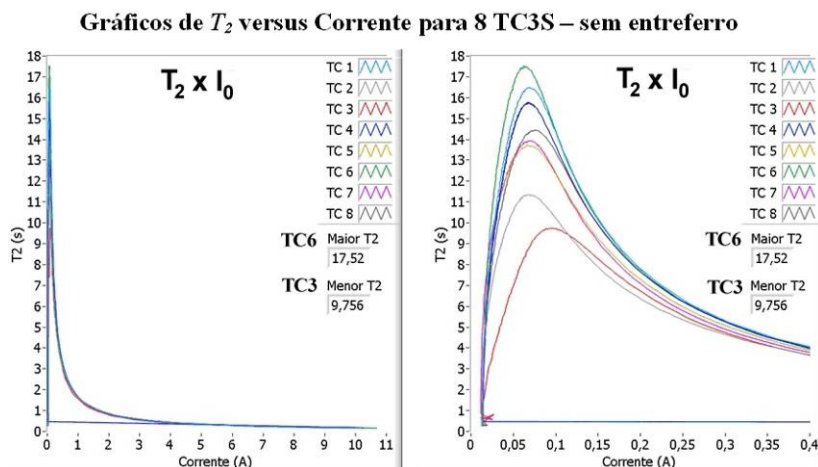


Figura 3.25 - Resultado de ensaios de T_2 para 8 TC3S.

Para se verificar a diferença da resposta de T_2 do TC sem entreferro com relação ao TC com entreferro, na Figura 3.26 são apresentadas as curvas do TC6 e TC3 (que apresentaram respectivamente valores de maior e menor T_2 – vide Figura 3.25), em conjunto com uma curva obtida de um TC com entreferro (TC6200377 de classe C400, relação 1200/5 e tensão de operação de 145 kV, denominado TCce). Observa-se que o TC com entreferro apresenta T_2 menor do que para TC sem entreferro (aproximadamente 69% menor do que o TC3 e 83% menor que o TC6), principalmente na zona de resposta linear. Entretanto, na zona de saturação o TC com entreferro apresenta um T_2 maior, reafirmando o que se encontra no documento [2], em específico na Seção 6.5 sobre transiente de corrente: “*Post-Fault Subsidence Transients*”. Assim, no tocante à curva do TC6200377 da Figura 3.26, parece ocorrer uma contradição à norma de que o entreferro reduz a constante de tempo secundária. No entanto, a constante de tempo T_2 é definida para quando o fluxo no núcleo está na região não saturada e está relacionada à determinação do tempo de saturação T_s .

Comparação do comportamento de T_2 em TC sem e com entreferro, obtidos nos ensaios dos TC3S e TC6200377, respectivamente.

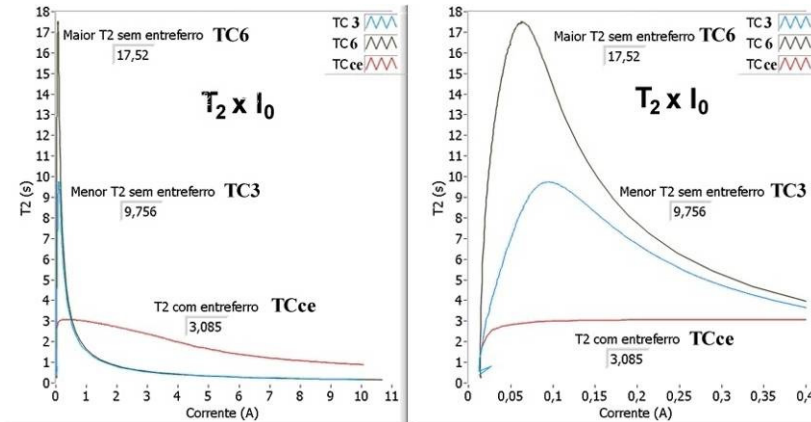


Figura 3.26 - T_2 em TC sem e com entreferro.

3.5. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE SATURAÇÃO V_x

Um dos parâmetros importantes na análise de TC é a tensão de saturação, pois o valor da tensão de saturação é utilizado pelos especialistas em proteção para definir os ajustes dos relés de proteção do sistema elétrico. É por meio da curva de saturação que se obtém o valor da tensão de saturação V_x . A determinação do valor de V_x varia com a norma a qual se adota. As definições apresentadas na Seção 2.5 e suas subseções descrevem como as normas mais comumente utilizadas internacionalmente, ANSI/IEEE [2][13][17][18] e IEC/BS [14][15][19], especificam a determinação deste valor, contribuindo para uma visão criteriosa do assunto.

Inicialmente, sabe-se que os principais fatores que afetam o desempenho do TC são [27]:

- Classe de exatidão;
- Ponto de joelho;
- Carga.

Estes fatores são inter-relacionados e podem ser obtidos das características do TC. No entanto, eles podem ter diferentes interpretações, dependendo da norma utilizada. Evidentemente, que

todas as definições, a classe de exatidão, o ponto de joelho e a carga de um TC, variam linearmente pela relação do TC. Deve-se notar também que para TC de multirrelações, estes fatores (ou parâmetros) devem ser considerados para cada *tap* (derivação) conectada. A seguir, estes fatores são apresentados. No Anexo C estes fatores/parâmetros também são apresentados com maior grau de profundidade.

3.5.1. Dimensionamento do TC pela tensão de saturação (V_x)

Os efeitos de saturação podem ser evitados dimensionando o TC para ter uma tensão no ponto de joelho V_k acima daquela tensão esperada quando a máxima corrente de falta simétrica I_{2F} circula sobre a carga secundária nominal Z_c , admitindo ainda o possível efeito de uma componente *dc* e da remanência magnética no núcleo [17]. Uma regra básica [30] adotada em aplicações de TC, principalmente de baixa relação e classe C da norma ANSI [13], é “a tensão no ponto de joelho V_k do TC como definida pela curva de excitação do TC, não deve ser menor que duas vezes o valor da tensão produzida pela máxima corrente simétrica I_{2F} que fluirá sobre a carga Z_c do relé”. Isto está expresso na Equação (3.41) e mostrado na Figura 3.27, sendo considerada uma regra de ouro.

$$V_k \geq 2Z_c I_{2F} (rms \text{ - } sim.) \quad (3.41)$$

Segundo a referência [17], a tensão no ponto de joelho pode ser de 50 % até 75 % acima da tensão nominal de classe de exatidão do TC (por exemplo: um TC classe C400, onde o número 400 indica a tensão nominal da classe de exatidão conforme norma ANSI [13], deve possuir a tensão no ponto de joelho entre 600 V a 700 V).

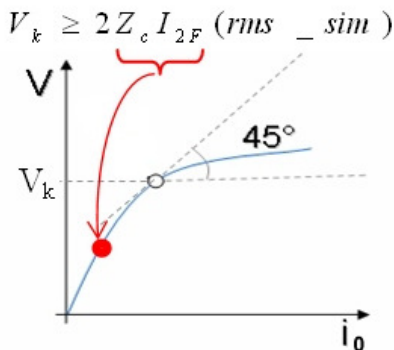


Figura 3.27 – Visualização da aplicação da regra de ouro na atuação do TC sob uma corrente máxima simétrica.

Conforme a IEEE Std C37.110-1996 [17], a saturação do TC pode ser evitada tendo-se os cuidados apresentados no Anexo F.

3.5.2. Avaliação da tensão de saturação na curva de excitação por diferentes normas e especialistas

O objetivo das Seções 3.5.2.1, 3.5.2.2 e da 3.5.2.3 vinculadas a esta Seção 3.5.2 é avaliar como as diferentes normas e especialistas indicam a localização da tensão de saturação na curva de excitação.

Segundo o dimensionamento do TC conforme fabricante (*vide* Anexo D), basicamente pode-se dividir os tipos de classe de TC quanto ao dimensionamento elétrico e geométrico em relação ao ponto de saturação em: Clássico, TPX, TPY e TPZ, sendo que os TPY e TPZ são os TC com entreferro. Esta divisão está em consenso com a norma IEC [14]. Em síntese determina-se o fluxo de saturação e a corrente de excitação correspondente a este ponto.

Geralmente os fabricantes adotam o ponto da tensão de joelho como a tensão que representa o ponto limite de operação máxima à carga nominal na zona linear da curva de excitação, dentro do limite de exatidão a qual se compromete a classe do TC.

Em todas as classes, a tensão limite de exatidão E_{at} (geralmente ponto de joelho para os fabricantes) basicamente é representada por um fator de dimensionamento multiplicando a corrente nominal e a impedância secundária do TC. Este fator de dimensionamento muda

para os diferentes tipos de classes (no Anexo D é apresentada a maneira de aplicação deste fator). O fator de dimensionamento não deixa de ser semelhante ao fator denominado de sobrecorrente F_s encontrado na norma ANSI [13]. Com o advento da tecnologia e atualização das normas, se subdividiu em vários os fatores que contribuem para o dimensionamento do TC, dependendo qual o tipo de classe do TC. Têm-se as seguintes equações para determinar a tensão E_{al} para os diferentes tipos de classe do TC [1].

- a) Equação para a determinação da tensão limite de exatidão E_{al} de TC Clássico:

$$E_{al} = (r_c + r_2)I_2K_{ssc} \quad (3.42)$$

onde, I_2 é a corrente nominal secundária, r_c a resistência ôhmica da carga considerando os cabos de ligação ao relé, r_2 a resistência do enrolamento secundário do TC. K_{ssc} é o fator de curto-circuito simétrico nominal dado pela Equação (3.43), sendo que I_{psc} representa a corrente primária de curto-circuito simétrica e I_{In} a corrente primária nominal.

$$K_{ssc} = \frac{I_{psc}}{I_{In}} \quad (3.43)$$

- b) Equação para a determinação da tensão limite de exatidão E_{al} de classe TPX:

$$E_{al} = (r_c + r_2)I_2K_{tf}K_{ssc} \quad (3.44)$$

onde, K_{tf} é o fator de transiente expresso pela Equação (F.24) no Anexo F.

- c) Equação para a determinação da tensão limite de exatidão E_{al} de classe TPY:

$$E_{al} = (r_c + r_2)I_2K_{tf}K_{rem}K_{ssc} \quad (3.45)$$

onde, K_{rem} é a constante de remanência utilizada para definir o dimensionamento do núcleo pelo fabricante dada pela Equação (3.46).

$$K_{rem} = \frac{1}{1 - \frac{\% \text{ Remanência}}{100}} \quad (3.46)$$

- d) Equação para a determinação da tensão limite de exatidão E_{al} de classe TPZ:

$$E_{al} = (r_c + r_2)I_2K_{ssc} \quad (3.47)$$

Alguns exemplos de curva de excitação são mostrados na Figura 3.28, para diferentes classes de TCs, considerando todos de mesma relação e para carga de 10VA [1]. Destas curvas, os seguintes parâmetros são obtidos:

$$\text{TC Clássico } E_{al} = (r_c + r_2)IK_{ssc} = 60V \quad I_0 = 0,17 \text{ A}$$

$$\text{Classe TPX: } E_{al} = (r_c + r_2)IK_{if}K_{ssc} = 795V \quad I_0 = 0,80 \text{ A}$$

$$\text{Classe TPY: } E_{al} = (r_c + r_2)IK_{if}K_{rem}K_{ssc} = 803V \quad I_0 = 5,8 \text{ A}$$

$$\text{Classe TPZ: } E_{al} = (r_c + r_2)IK_{ssc} = 600V \quad I_0 = 5,6 \text{ A}$$

Observa-se que os TC Clássicos apresentam para zona linear uma baixa corrente de excitação, assim como, baixa tensão de saturação. Mas para os TC de classe TPX, TPY e TPZ, estes valores são maiores.

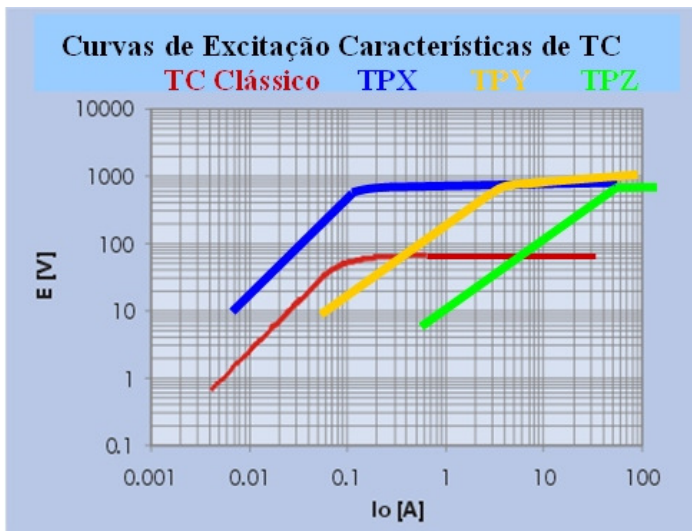


Figura 3.28 - Curvas de Excitação típicas de TCs [1].

O conhecimento do que as normas relatam é fundamental para se entender os conceitos adotados nas avaliações da curva de excitação. Deste modo nas próximas seções se abordarão as normas sobre este assunto.

3.5.2.1. Avaliação da norma ANSI

A norma ANSI [13] não deixa claro que o ponto da tensão de classe limite de exatidão (por exemplo: C400 ou K400 (ver Anexo C C3)) está abaixo do ponto de joelho na curva de saturação. Portanto, quando se especificar a aquisição de um TC deve-se tomar o cuidado de solicitar que a tensão de classe limite de exatidão esteja abaixo do ponto de joelho e, de preferência, obedecendo à regra de ouro, conforme Equação (3.48) (observação: o fator de dimensionamento adotado pela ANSI é o fator de sobrecorrente F_s , geralmente igual a 20). Caso isto não seja bem informado o fabricante pode fornecer um TC cuja tensão de classe de exatidão esteja na região de saturação, porém, dentro do erro de 10 %.

$$F_s I_{2n} Z_{2T} \leq \frac{V_k}{2} \quad (3.48)$$

Na equação acima, V_k é a tensão no ponto de joelho, Z_{2T} é a impedância total do secundário do TC, I_{2n} é a corrente secundária nominal e F_s é o fator de sobrecorrente.

A Figura 3.29 apresenta as curvas de excitação de um TC com enrolamentos de derivações com vários pontos destacados mostrando a localização para as diferentes classes da norma ANSI [13]. Geralmente, as classificações ANSI [13] são realizadas sobre a maior curva de excitação, correspondente ao enrolamento de maior número de espiras. As classificações apresentadas na Figura 3.29 satisfazem a especificação do erro admissível de 10 % para proteção. Por exemplo, um TC com $I_{2n} = 5$ A e $F_s = 20$, e como 20 vezes 5 é igual a 100, como o erro adotado em proteção é de 10 %, o que equivale a 10 A. Assim, se o ponto calculado para a classe estiver abaixo de 10 A, esta atende a norma sem necessariamente estar abaixo do ponto de joelho. Portanto, todo cuidado é importante no momento de uma especificação de compra para não se adquirir um TC que não atenda a proteção devida.

O Anexo C C3, quando descreve um exemplo retirado da Std C37.110-1996 [17], exemplifica este procedimento: tomando as curvas da Figura 3.29 como referência, onde se determina que para relação 1200:5 se obtém 500 V correspondente a 10 A, equivalente a 10 % de erro de exatidão, se chega à conclusão que a classe de exatidão padronizada próxima mais abaixo que atende o requisito de erro menor que 10 % é equivalente a C400. No entanto, isto representa uma tensão

de 400V que está acima da tensão de Joelho que é 240 V. Portanto, estaria numa zona não linear, o que contradiz com o que a própria norma em sua Seção 4.5.2 [17] recomenda: para que a tensão de Joelho esteja acima da máxima corrente de falta esperada sob a carga secundária. A localização do ponto referente à classe C400 está em destaque na Figura 3.29.

Para este exemplo em questão a classe ANSI escolhida deveria ser C200 (localizado na Figura 3.29) no máximo, em vez de C400, conforme Tabela C.1 do Anexo C, que é a classe normalizada logo abaixo da tensão de Joelho, ou seja, 240 V.

Para este mesmo caso, se a regra de ouro e a norma [17], fossem obedecidas, o valor da tensão de classe de exatidão para este TC devia estar entre 120 V e 60 V. Portanto, este TC seria classificado como C100 ou C50 (localizados na Figura 3.29) (*vide* Anexo C).

Ainda para este caso apresentado acima, se a classe fosse K, a tensão de classe deveria estar por volta de 72 V. Logo a classe escolhida seria K50 (localizado na Figura 3.29) (*vide* Anexo C). A Figura 3.29 ilustra o que foi descrito no estudo deste caso.

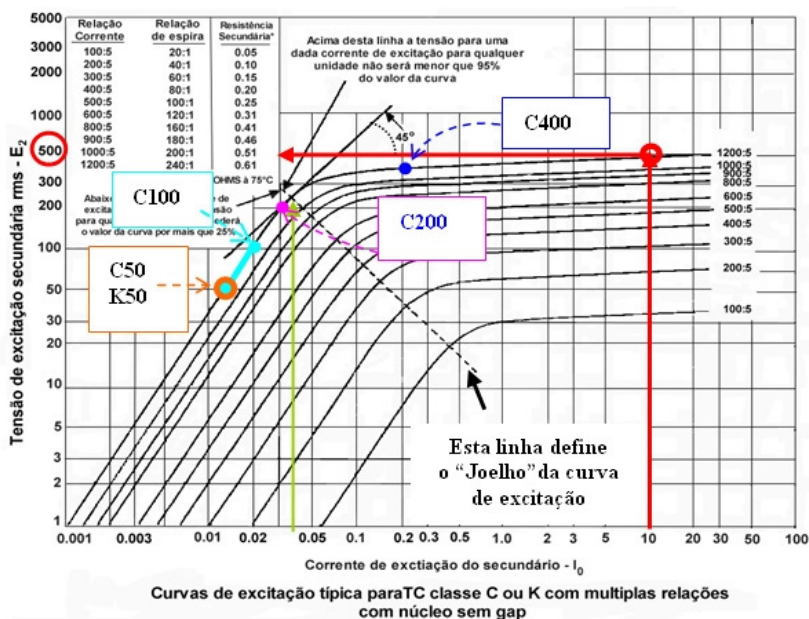


Figura 3.29 - Classificação do TC conforme ANSI [13][17].

É importante realçar que no tocante à classe K de exatidão citada no exemplo acima, em sua definição na norma [17], Seção 4.4, na parte que fala da designação do código da letra no tocante à classe K, apresenta uma redação do texto que dá margem a uma má interpretação. Nesta norma [17] está escrito que:

A classe K é o mesmo que a classe de categoria C, mas a tensão do ponto de joelho da curva de saturação deve **estar pelo menos** 70% da tensão nominal do terminal secundário.

Para evitar uma possível má interpretação na citação da norma, o mais claro seria “estar acima de”, em vez de “pelo menos”. Muitos autores interpretam conforme está escrito “estar pelo menos 70% da tensão nominal do terminal secundário” ao pé da letra. Na referência [22], há um exemplo mostrando que um TC classe K800 terá uma tensão de ponto de joelho igual ou maior que $0,7 \times 800 = 560$, esquecendo-se do conceito real da proteção, de que o TC deve apresentar aos relés um sinal sem distorção. Pois, neste exemplo, o TC K800 estaria na zona de saturação, já que o 800 representa a tensão sobre a carga quando uma corrente de falta de 20 vezes a corrente nominal circular no primário do TC. Neste caso, o ponto K800 estaria acima do ponto de joelho da curva de magnetização.

A classe K da ANSI é um avanço em relação à classe C, que não define claramente a respeito da posição do ponto da classe de exatidão estar abaixo do ponto de joelho. Considerando as colocações acima escritas a respeito da classe K, pode-se dizer que a classe K se adequa à regra de ouro ou à recomendação contida na IEEE Std C37.110-1996 [17], onde no seu primeiro parágrafo da Seção 4.5.2 sobre fator de saturação e tempo de saturação, apresenta a citação abaixo:.

Se possível, os efeitos de saturação podem ser evitados pelo dimensionamento do TC para ter um ponto de tensão do joelho superior ao necessário para a falta máxima de corrente esperada à carga secundária nominal do TC, com subsídio adequado para a possível efeitos da componente *dc* e da remanência. **A tensão no ponto de joelho pode ser 50% a 75% da tensão nominal de classe de exatidão do TC** [17].

Neste texto da norma [17] supra citado o termo "...50% a 75% da tensão..." também gera dúvida na interpretação, sendo que o mais claro seria acrescentar o termo "acima", ficando "...50% a 75% acima da tensão...".

Um detalhe importante a ser observado na Figura 3.30 é que diferentes curvas de excitação, com diferentes posicionamentos do ponto de joelho, podem atender as condições de especificação conforme a classe C. Pois, a norma ANSI [13] somente indica que o ponto de exatidão da classe C é limitado aos 10 % do erro de proteção.

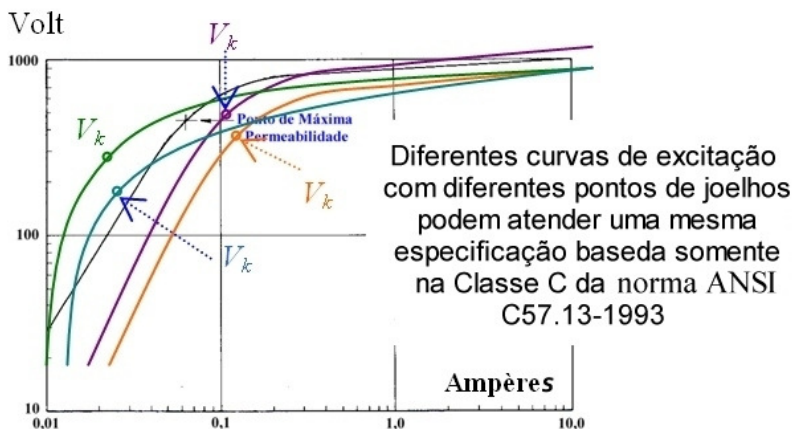


Figura 3.30 - Diferentes pontos de joelho para uma mesma especificação de classe C para TC

É através do entendimento das normas que se evita equívocos de interpretação. Entretanto, nem sempre as normas são muito claras na forma como são escritas, sendo que se pode encontrar equívocos na literatura como o da referência [33] onde a determinação do ponto de joelho é apresentada de maneira semelhante como mostra a Figura 3.31. "A reta tangente de 45° teria sua origem no ponto de inflexão em que a curva deixa de ser linear, sendo o ponto de joelho o último ponto de cruzamento desta reta com a curva de excitação." Conforme Seção 2.5.2, Figura 2.13, esta maneira de determinar o ponto de joelho apresentada na referência [33] está equivocada em relação à norma ANSI/IEEE [13][2]. A Figura 3.32 reafirma que é equívoco, mostrando que a reta tangente à curva de excitação e que defini o ponto de joelho V_k não é a mesma reta de origem no ponto de inflexão.

O fato da ANSI realçar a determinação da tensão do ponto de joelho e não o de saturação faz com que alguns autores cometam confusão, ou que admitam propositalmente que o ponto de saturação sugerido da ANSI seja o ponto de joelho [29]. Isto, na verdade, é um equívoco de confundir a interpretação da norma ANSI [13] com a norma IEC [15]. A Figura 3.33 mostra esse equívoco.

As Figuras 2.12 e 2.13, nas Seções 2.5.1 (c) e 2.5.2 (d) respectivamente, apresentam a maneira como a norma ANSI se utiliza para encontrar o ponto de saturação de maneira gráfica sobre a curva de excitação.

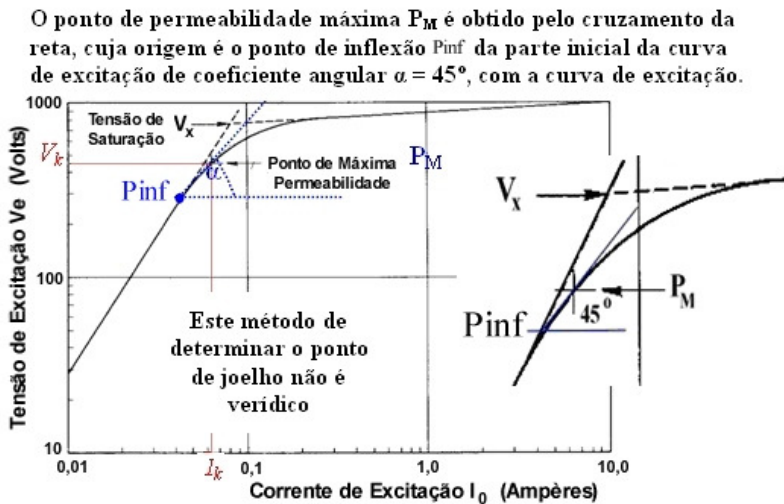


Figura 3.31 - Determinação do ponto de joelho equivocada [33].



Figura 3.32 - Demonstração do equívoco da referência [33].

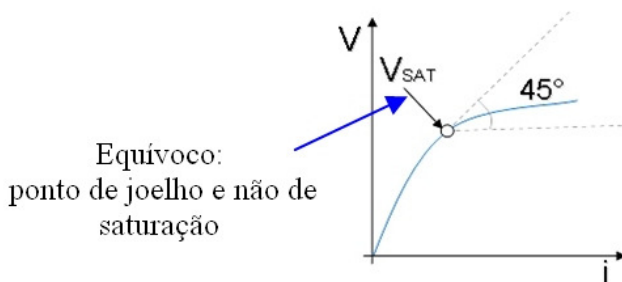


Figura 3.33 - Equívoco comum na interpretação da ANSI [29].

3.5.2.2. Avaliação da norma IEC

Para a Norma IEC o ponto de joelho é determinado conforme o método apresentado na Figura 2.11. Porém para classe TPS se adota conforme [15][34] a seguinte condição:

As condições limites de exatidão são definidas pela característica de magnetização e a tensão secundária limite de excitação (U_{al}) não deve ser inferior ao valor especificado. Ela deve ser tal que

um aumento de 10% em seu valor não ocasione um aumento do valor instantâneo de crista da corrente de excitação correspondente a 100%. O valor de crista da corrente de excitação medido à tensão secundária limite de excitação não deve ultrapassar o valor especificado se este é fixado pelo cliente. Se nenhum limite é fixado, a corrente de excitação não deve em nenhum caso ultrapassar o valor correspondente a 10% da corrente térmica I_{th} , referido ao lado secundário (ver transformador de corrente classe TPX).

A Figura 3.34, mostra graficamente estas duas condições de determinação do ponto de joelho.

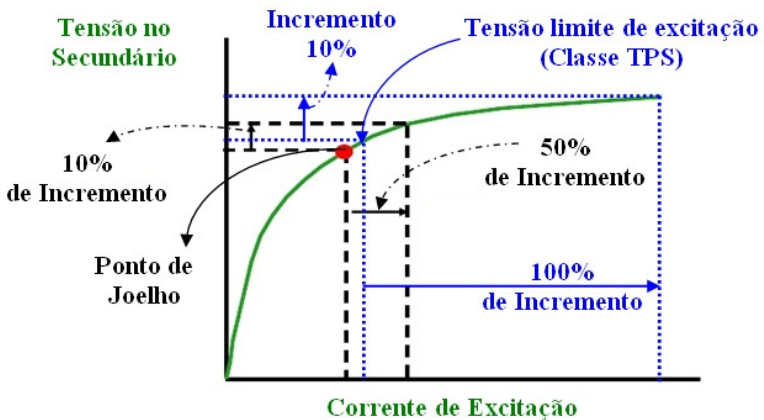


Figura 3.34 - Limites de referência adotados pela IEC [34].

3.5.2.3. Avaliação através do método adotado pelo especialista Krüger

Diante do exposto, até o momento alguns profissionais adotam critérios diferentes para avaliação da curva de excitação, como o especialista Michael Krüger em [35]. Ele reconhece duas regiões na curva de excitação:

- 1ª – Região não saturada (R1)
- 2ª – Região saturada (R2)

Na região não saturada (R1) é calculada a indutância de magnetização L_{OR1} através da relação da variação da tensão de excitação na região não saturada com a variação da corrente de excitação na região não saturada, denominadas por ΔU_{R1} e ΔI_{R1} respectivamente, e expresso pela Equação (3.49), considerando a frequência f igual a do sistema de operação do TC.

$$L_{OR1} = \frac{\Delta U_{R1}}{\Delta I_{R1} 2\pi f} \quad (3.49)$$

Na região saturada (R2) é calculada a indutância de saturação L_{SR2} através da relação da variação da tensão de excitação na região saturada com a variação da corrente de excitação na região saturada, denominadas por ΔU_{R2} e ΔI_{R2} respectivamente, e expresso pela Equação (3.50), considerando a frequência f igual a do sistema de operação do TC.

$$L_{SR2} = \frac{\Delta U_{R2}}{\Delta I_{R2} 2\pi f} \quad (3.50)$$

A Figura 3.35 mostra como são distinguidas estas duas regiões pelo encontro de duas retas tracejadas. Do ponto de cruzamento destas retas tracejadas se traça outra reta paralela ao eixo da ordenada, que vai determinar o ponto de joelho sobre a curva de excitação, denominado por U_{Joelho} . Partindo, dos pontos de inflexão das retas tracejadas das duas regiões com a curva de excitação se obtém os valores da indutância de magnetização na zona linear L_{OR1} , e na zona de saturação L_{SR2} , conforme visto pelas Equações (3.49) e (3.50).

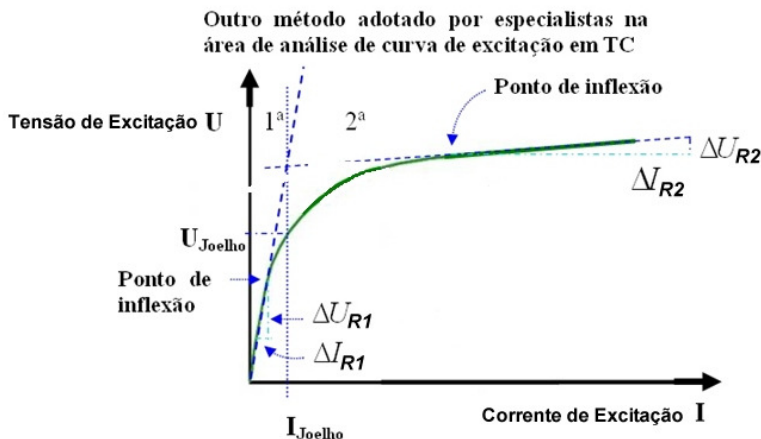


Figura 3.35 - Método adotado pelo especialista Krüger [35].

Caso se tenha somente o gráfico da curva de excitação, pode-se determinar a declinação D_1 , que representa a relação de ΔU_{R1} e ΔI_{R1} , e D_2 , que representa a relação de ΔU_{R2} e ΔI_{R2} , expressos pelas Equações (3.51) e (3.52), respectivamente. Através do uso de réguas se mensura as regiões correspondentes à ΔU_{R1} , ΔI_{R1} , ΔU_{R2} e ΔI_{R2} , sobre o gráfico conforme mostra a Figura 3.45.

$$D_1 = \frac{\Delta U_{R1}}{\Delta I_{R1}} \quad (3.51)$$

$$D_2 = \frac{\Delta U_{R2}}{\Delta I_{R2}} \quad (3.52)$$

Na Figura 3.36 mostra-se um exemplo em que se encontra um valor para D_2 de aproximadamente 0,0753. Obtendo-se os valores de D_1 e D_2 é só aplicar as Equações (3.51) e (3.52) para se determinar L_{OR1} e L_{SR2} , respectivamente.

Como medir a Declinação tendo-se somente o desenho do gráfico de excitação: Use uma régua para determinar a Declinação. Não leia a corrente e a tensão para este objetivo. Admite-se um gráfico log-log com espaçamentos de décadas iguais.

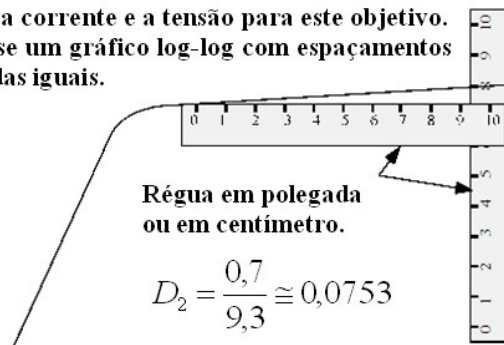


Figura 3.36 - Declinação pelo método gráfico [36].

Atenção deve ser dada para o uso desta maneira de calcular as indutâncias pelas declinações, D_1 e D_2 . Neste caso, utilizam-se gráficos log-log para se representar uma melhor formação retilínea da curva de excitação, principalmente nas regiões que se chama de linear e de saturação.

Como observado na Seção 3.4.2, referente aos resultados obtidos de experimentos avaliando o comportamento da indutância de magnetização através das Figuras 3.23 e 3.24, a permeabilidade magnética do núcleo não se comporta de maneira tão linear assim, tanto na zona dita linear ou na zona de saturação em gráfico log-log. A Figura 3.23 mostra que, para TC com entreferro, o ponto de máxima indutância de magnetização, ou o ponto de máxima permeabilidade na realidade é alcançado antes da zona de joelho e começa a decair próximo do ponto que é considerado como tensão de joelho num gráfico log-log. Deste modo faz-se coerente a adoção da regra de ouro ao escolher o ponto da tensão da classe de exatidão do TC aproximadamente duas vezes abaixo do ponto de joelho, para os TCs com entreferro. Isto também concorda com a referência [17] que estipula a faixa de 50% a 75% antes do ponto de joelho para a escolha do ponto da tensão da classe de exatidão.

3.5.3. Influência da carga no fator limite de exatidão

O fator limite de exatidão conhecido como (*Accuracy Limit Factor*) “*ALF*” é o que se vem chamando nesta dissertação de fator de sobrecorrente F_s (*vide* Anexo C). Até o momento, abordou-se sobre o F_s ou *ALF* nominal como as normas geralmente apresentam para determinação dos parâmetros das especificações dos TCs, considerando estes sob cargas nominais geralmente baseadas ainda em relés eletromecânicos. Atualmente, as cargas aplicadas aos TCs são muito menores do que estas cargas nominais, devido aos novos relés de alta tecnologia.

O diagrama simplificado do circuito do TC, para a análise que se segue, é representado na Figura 3.37.

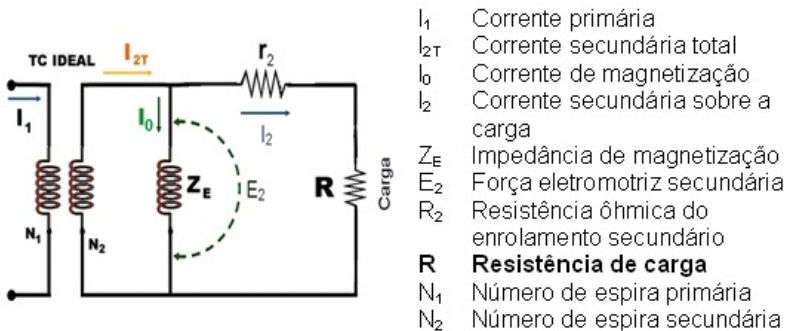


Figura 3.37 - Diagrama equivalente simplificado de um TC [37].

Do circuito desta figura tem-se a força eletromotriz secundária E_2 expressa pela Equação (3.53).

$$E_2 = I_2(r_2 + R) \quad (3.53)$$

onde, R é a resistência da carga, inclusive contemplando a fiação.

Quando houver uma sobrecorrente que induza no secundário uma corrente secundária no limite de exatidão nominal tem-se um I_2 conforme a Equação (3.54).

$$I_{2al} = ALFI_{2n} \quad (3.54)$$

onde, I_{2n} é a corrente secundária nominal e I_{2al} é a corrente secundária no limite de exatidão nominal.

Sabe-se que a carga R quando nominal pode ser expressa pela Equação (3.55).

$$R = R_n = \frac{P_n}{I_{2n}^2} \quad (3.55)$$

onde, P_n é a potência da carga nominal e R_n a resistência da carga nominal. Assim, a força eletromotriz secundária nominal de falta E_{2al} é expressa conforme Equação (3.56).

$$E_{2al} = ALFI_{2n}(r_2 + R_n) \quad (3.56)$$

Se caso circule no secundário uma corrente secundária $I_{2al} = ALF \cdot I_{2n}$, mas a resistência de carga R não seja mais igual R_n , ou seja, uma carga R_r conforme Equação (3.57), tem-se, então, a força eletromotriz secundária real de falta E_{2r} expressa conforme Equação (3.58).

$$R = R_r = \frac{P_r}{I_{2n}^2} \quad (3.57)$$

onde, P_r é a potência da carga real diferente da nominal e R_r a resistência da carga real diferente da nominal.

$$E_{2r} = ALFI_{2n}(r_2 + R_r) \quad (3.58)$$

onde, E_{2r} é a tensão de magnetização de falta real do TC ou força eletromotriz secundária real do TC.

Na Figura 3.38 pode-se ver que, se R_r é muito inferior a R_n o ponto de joelho de saturação da curva de excitação, conforme IEC [15], do TC está longe de ser alcançado no fator limite de exatidão ALF anunciado (E_{al}).

Se a carga R_r é inferior a carga nominal R_n , então o fator limite de exatidão real ALF_r será maior que o fator limite de exatidão nominal ALF , ou seja, ($ALF_r > ALF$).

Comparando as Equações (3.56) e (3.58), chega-se à Equação (3.59)

$$ALF_r = ALF \frac{P_i + P_n}{P_i + P_r} = ALF \frac{r_2 + R_n}{r_2 + R_r} \quad (3.59)$$

onde, P_i são as perdas internas do TC para I_{2n} , dada pela Equação (3.60); P_n é potência de exatidão do TC para carga nominal, dada pela Equação (3.61) e P_r é o consumo da carga real do TC para I_{2n} , dado pela Equação (3.62).

$$P_i = r_2 I_{2n}^2 \quad (3.60)$$

$$P_n = R_n I_{2n}^2 \quad (3.61)$$

$$P_r = R_r I_n^2 \quad (3.62)$$

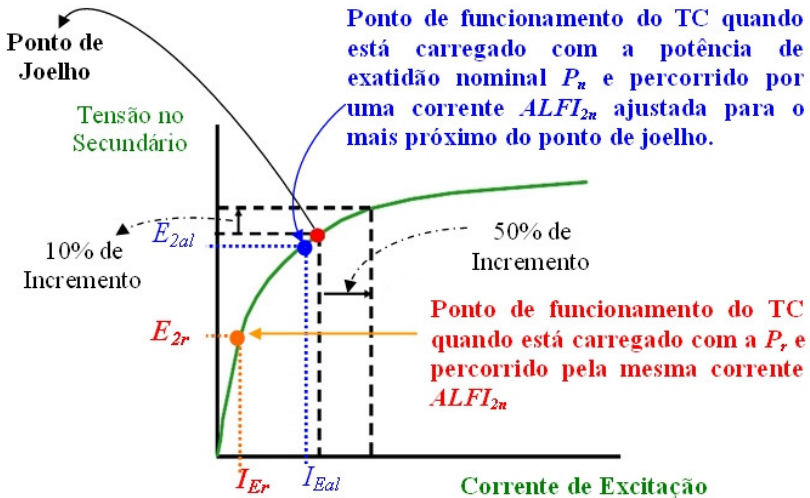


Figura 3.38 - Pontos de funcionamento do TC em sua carga [37].

É evidente que o bom funcionamento de um relé de proteção está ligado ao comportamento do TC associado com sua carga real, e não ao comportamento do TC associado com uma carga nominal teórica [37]. A necessidade real permite determinar a potência mínima de exatidão a ser escolhida. Utilizar um TC com uma carga P_r menor que P_n ($P_r < P_n$) aumenta o fator limite de exatidão (ALF). Da mesma forma, o ALF aumenta mais se a r_2 (as perdas internas P_i) é baixa (vide Figura 3.39).

O cálculo do ALF real (ALF_r) de um TC, associado à sua carga real, assegura, em todos os casos tradicionais, a boa escolha de um TC. Entretanto, o especialista de proteção deve sempre ficar atento caso este TC venha ser mudado de posição no circuito elétrico de uma subestação.

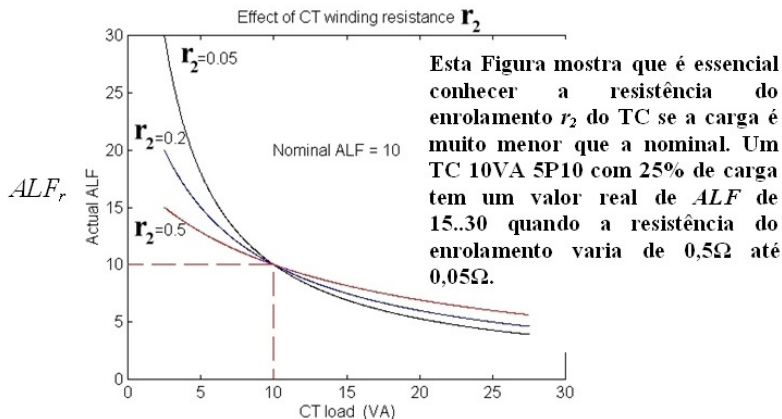


Figura 3.39 - Influência da carga em ALF_r [34].

Provavelmente, o motivo de se escolher a classe de exatidão nominal próximo ao ponto de joelho da curva de excitação do TC (utilizando a norma ANSI ou a IEC) seja devido à carga real ser menor que a nominal usada para o dimensionamento do TC. Entretanto, caso necessite alterar a carga do TC pode-se cometer equívocos e por em risco o sistema elétrico. Por isso, se aconselha a adotar a regra de ouro considerando a carga nominal por segurança e manutenção da confiabilidade do sistema de energia.

Usar o ALF_r é bom para os fabricantes, onde não se gasta muito com o sobredimensionamento do núcleo do TC. Portanto, a decisão do especialista de proteção da empresa solicitante do TC é de primordial importância neste momento, para evitar surpresas futuras com o uso do TC.

3.5.4. Síntese referente aos limites de tensão utilizados na curva de excitação para o dimensionamento do TC

Os estudos relacionados sobre a determinação dos valores da tensão de saturação e do ponto de joelho da curva de excitação possuem importância, pois é baseado nestes parâmetros que se pode inferir o quanto se quer ser conservador em relação à segurança do sistema ao qual o TC está conectado, alimentando os relés de proteção. A escolha

da tensão de limite de exatidão nominal próximo ao ponto de joelho adotado pela IEC e os fabricantes parece ser conservadora, mas se pode ser mais conservador adotando a regra de ouro para estabelecer o limite de operação do TC, quando atuado por uma sobrecorrente. A tensão de ponto de joelho adotada pela ANSI/IEEE [13] também é conservadora ao considerá-la como o limite da zona linear na resposta do TC.

O ponto importante é a escolha de qual valor será considerado como ponto do fluxo de saturação, pois implicará na definição do ponto da tensão de saturação, que contribuirá para o dimensionamento do TC. A definição também do fator de remanência será influenciada, fator este que será abordado a seguir.

Muitas vezes a relação custo benefício na compra de um TC é que vai ser determinante na escolha do tipo e classe do TC, num ponto que seja tolerável à proteção do sistema. Pois, a escolha pelo uso da regra de ouro implica em um TC com uma curva de excitação que tenha uma maior região linear e, portanto mais caro. Este provavelmente é o motivo pelo qual os fabricantes adotam o ponto do limite de exatidão de 10% (*vide* Figura 3.41) como referência para o ponto de saturação, assim como, a adoção da tensão da classe de exatidão próxima do ponto de joelho.

Como já mencionado, é muito importante que o profissional ao especificar o TC tenha ciência destes detalhes para não cometer equívocos numa eventual utilização deste TC numa outra configuração de circuito do sistema elétrico.

Como síntese do estudo até aqui sobre diferentes conceitos a respeito da determinação do ponto de joelho e de saturação, tem-se a Figura 3.40 mostrando a proposta da IEC [14][15], a Figura 3.41 a proposta da IEEE/ANSI [2][13] e a Figura 3.42 ilustrando a proposta de Krüger [35].

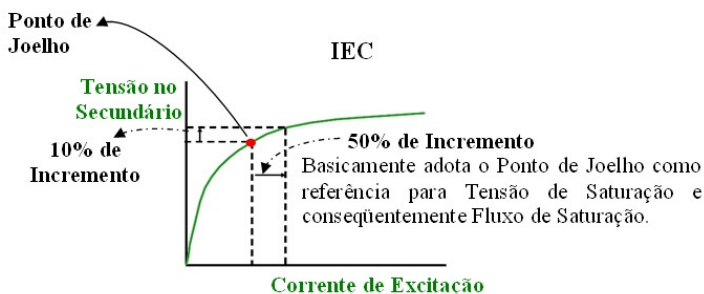


Figura 3.40 - Determinação do ponto de joelho conforme IEC [14][15].

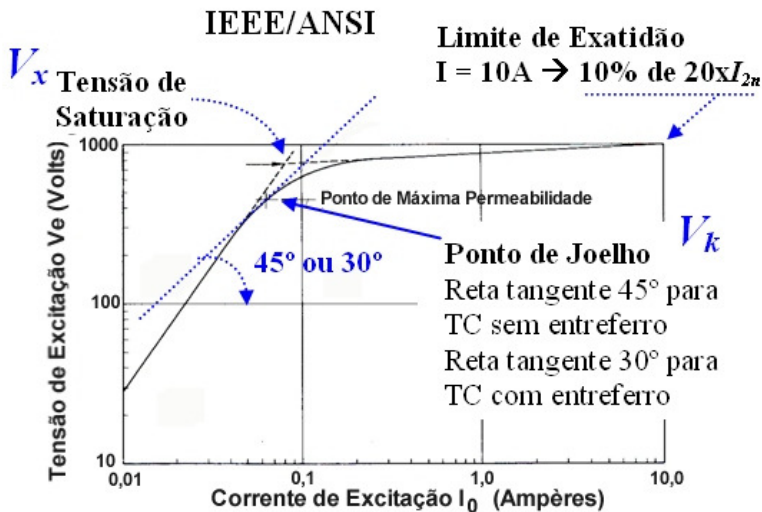


Figura 3.41 - Método determinar V_k e V_x pela IEEE/ANSI [2][13].

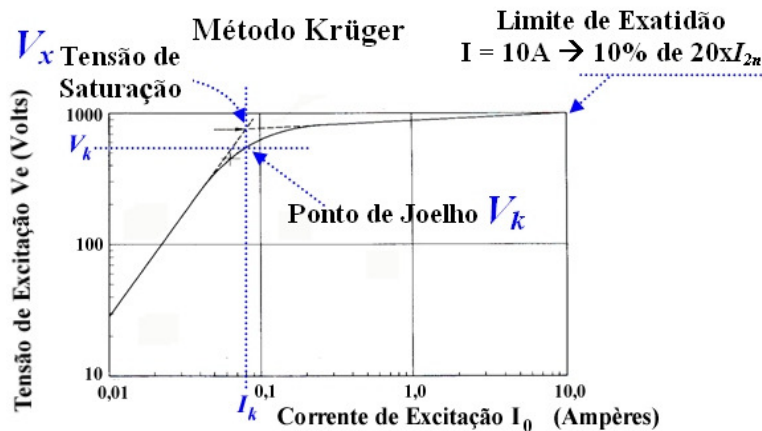


Figura 3.42 - Determinação V_k e V_x pelo método Krüger [35].

3.5.4.1. Método proposto para determinação do ponto de joelho e de saturação

Como sugestão para melhorar a avaliação através da curva de excitação, sugere-se o uso do conceito de traçar retas referenciais na região linear e de saturação proposto pela IEEE/ANSI [2][13], porém adotando o ponto de inflexão inferior e superior como ponto de joelho e de saturação, respectivamente. Sugere-se isto, pois estes pontos são os que parecem ter mais coerência como representantes de zonas limites do comportamento da curva de excitação do TC. O ponto de inflexão inferior delimita a região linear da região de transição ou de joelho propriamente dita, enquanto o ponto de inflexão superior delimita a região de joelho da região de saturação. A Figura 3.43 mostra esta proposta de análise. Esta definição da tensão de joelho V_{joelho} é mais conservadora do que a determinação dos valores definidos pelas normas, mas é mais coerente com o que se espera para uma atuação adequada de TC para a proteção. Para valores a acima deste ponto proposto, não se garante uma representação adequada da corrente primária no circuito secundário.

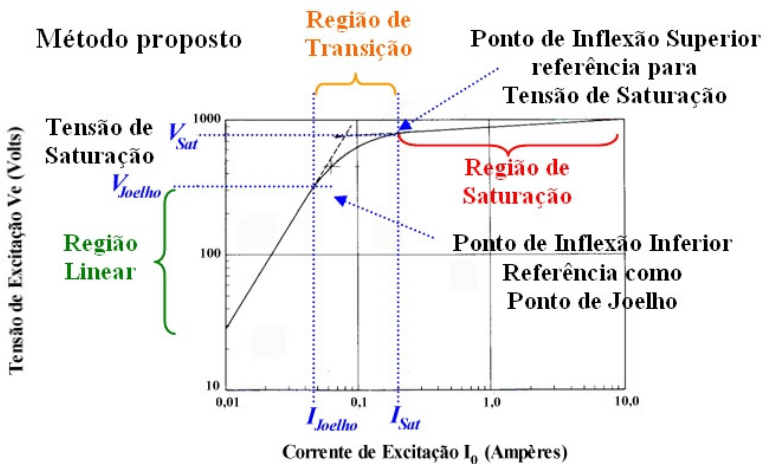


Figura 3.43 - Método proposto para determinação do ponto de joelho e de saturação.

3.5.4.2. Resultados da avaliação dos diferentes métodos para determinar a tensão de joelho e de saturação através de ensaios de TC no laboratório de alta tensão

Semelhante ao que se fez na avaliação da indutância de magnetização utilizou-se ensaios de dois TCs de classe C400, de relação 1200/5:

- Um TC sem entreferro, denominado por TC3S,
 $r_2 = 0,42779 \Omega$, 69 kV;
- Um TC com entreferro, denominado por TC6200377,
 $r_2 = 0,51346 \Omega$, 145 kV.

Neste caso estudado, foram avaliados os valores do ponto de joelho e de saturação, pelas diferentes maneiras apresentadas neste estudo.

A Figura 3.44 mostra dois ensaios implementados no VI de análise, onde as curvas de magnetização “tensão eficaz por corrente eficaz” (procedimento normalizado) do TC3S e do TC6200377 são apresentadas. Os valores de corrente e tensão do ponto de joelho foram obtidos pelos diferentes métodos: IEEE/ANSI [2][13], IEC [14][15] e Krüger [35] (*vide* Tabela 3.4).

Curvas de excitação $V \times I$ com os pontos de joelho nos diferentes métodos:
Vermelho → Método Krüger **Azul** → IEEE/ANSI **Verde** → IEC

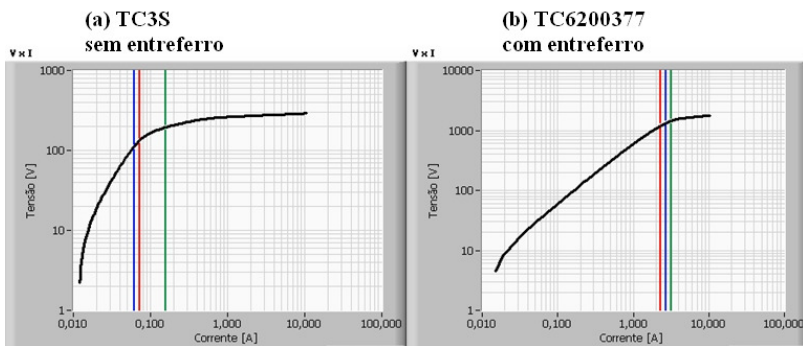


Figura 3.44 – Resultados de ensaios da primeira avaliação dos diferentes métodos estudados na determinação do ponto de joelho.

Tabela 3.4 - Valores do ponto de joelho do ensaio

Valores eficazes	Ponto de joelho TC3S			Ponto de joelho TC6200377		
	IEEE ANSI	IEC	Krüger	IEEE ANSI	IEC	Krüger
Tensão [V]	111,25	193,58	133,84	1327,86	1442,40	1194,35
Corrente [A]	0,0612	0,1586	0,0733	2,7432	3,1989	2,3316

Os valores do ponto de joelho para o método IEEE/ANSI são encontrados usando o critério da reta tangente a curva de excitação em 45° para TC sem entreferro e 30° para TC com entreferro. Observa-se que os valores são diferentes para os diferentes métodos avaliados. O método IEC apresentou os maiores valores, tanto para TC sem e com entreferro, sendo que estes valores serão utilizados para determinação do fator de remanência K_r , pois para IEC o ponto de joelho é o mesmo ponto de saturação. O método IEEE/ANSI apresentou o menor valor da tensão de joelho para o TC sem entreferro, enquanto que para o TC com entreferro o menor valor foi o do método Krüger.

A Figura 3.45 apresenta os pontos obtidos pelo método proposto, IEEE/ANSI e Método Krüger.

Curva de magnetização Tensão x Corrente para um TC de proteção sem entreferro e com entreferro, em valores eficazes. Encontro dos valores de tensão de saturação V_x (IEEE/ANSI), do ponto de joelho conforme método Krüger e pontos de inflexão inferior e superior conforme Método Proposto.

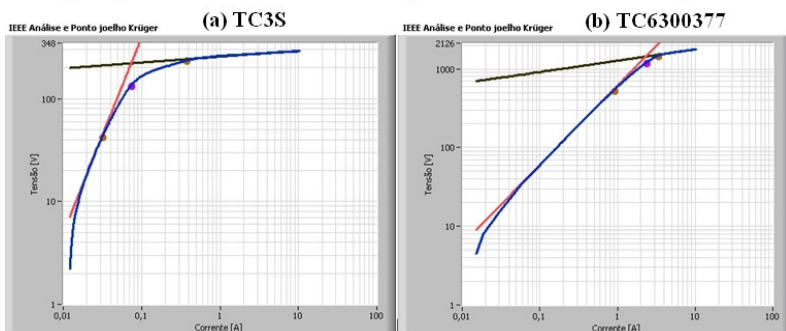


Figura 3.45 - Ensaio da segunda avaliação dos diferentes métodos.

Através do ensaio que deu origem a Figura 3.45, com o método proposto avalia-se os pontos de inflexão inferior (último ponto da região linear, tensão de joelho) e de inflexão superior (primeiro ponto da região superior, tensão de saturação). Com o método IEEE/ANSI [2][1] avalia-se a tensão de saturação, enquanto com o método Krüger [35] avalia-se o ponto de joelho. Os valores de tensão e corrente correspondentes aos pontos destes diferentes métodos avaliados são mostrados nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 - Valores da tensão e corrente para TC3S

Valores eficazes	TC3S – TC sem entreferro			
	IEEE/ANSI e método Krüger	Método Krüger	Método proposto	
	Ponto de saturação V_x	Ponto de joelho	Ponto de inflexão inferior	Ponto de inflexão superior
Tensão [V]	218,82	133,84	42,71	234,145
Corrente [A]	0,0733	0,0733	0,0316	0,3684

Tabela 3.6 - Valores da tensão e corrente para TC6200377

Valores eficazes	TC6200377 – TC com entreferro			
	IEEE/ANSI e método Krüger	Método Krüger	Método proposto	
	Ponto de saturação V_x	Ponto de joelho	Ponto de inflexão inferior	Ponto de inflexão superior
Tensão [V]	1439,33	1194,35	537,19	1464,44
Corrente [A]	2,3316	2,3316	0,9064	3,3131

Pelo método proposto, os valores para a tensão de saturação são superiores em relação aos métodos IEC e IEEE/ANSI, sendo isto importante para a determinação do fator de remanência K_r . Se fosse utilizado o valor de saturação determinado pelo método proposto, os valores seriam interessantes aos fabricantes (menor tamanho do núcleo),

mas não tão interessantes para os usuários. O método proposto também apresentou o menor valor de tensão de joelho, isto é importante para a definição da zona linear contribuindo para um controle mais conservador em relação à resposta do sistema à transitórios.

3.6. AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE REMANÊNCIA MAGNÉTICA DE TC TPY

Ao longo da dissertação muito já se comentou a respeito da influência da remanência magnética no comportamento da resposta dinâmica do TC para o sistema elétrico. A Equação (3.63) define este fator como (no final do Anexo C, encontram-se mais detalhes sobre o fator de remanência):

$$K_r = 100 \times \frac{\Phi_r}{\Phi_s} \quad (3.63)$$

Na Equação (3.63) K_r é o fator de remanência, Φ_r é o valor do fluxo remanente e Φ_s é o valor do fluxo de saturação.

As empresas do setor elétrico brasileiro adotam ou têm maior preferência à aplicação do TC TPY quando desejam que o fator de remanência seja baixo, na ordem de 10%. No entanto, há uma dificuldade para se efetivar ensaios de verificação se o fator de remanência está atendendo as normas (no caso somente a norma IEC 60044-6 [14] trata deste requisito).

A empresa Eletrobrás Eletrosul, por meio de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) [3], capacitou seu sistema de levantamento de curva de saturação de TC para medição do K_r através de laços de fluxo *versus* corrente, obtendo-se o fluxo conforme é dado pela Equação (3.27). Todo o procedimento está implementado em um VI desenvolvido com o *software* LabView. Entretanto, como apresentado anteriormente nesta dissertação, as normas não deixam muito claro qual o ponto a ser considerado como fluxo de saturação magnética ou há contradição entre elas. Por este motivo, utilizando-se o VI de análise desenvolvido para Eletrosul, fez-se mensurações da remanência magnética no TC3S (sem entreferro) e no TC6200377 (com entreferro) para avaliar o resultado das diferentes metodologias apresentadas nesta dissertação. A avaliação considerou as seguintes definições para a determinação de fatores de remanência:

a) K_{rIEC}

Em princípio, este é o método normalizado pela IEC 60044-6 [14]. Para o fluxo de saturação, a norma define que se deve encontrar o ponto onde há um crescimento da indução magnética B em 10% resultando um aumento do campo magnético H de 50%. No entanto, para se obter os valores de B e H é necessário o conhecimento das dimensões do núcleo e dos enrolamentos do TC, algo muito difícil de estar disponível na prática. Além disso, sabe-se que ocorre a variação do caminho médio magnético, provocando incertezas nos valores calculados para o campo magnético. Assim, para viabilizar a aplicação da norma IEC 60044-6 [14], utiliza-se o ponto calculado, conforme esta norma, para a tensão de joelho E_k , conforme exemplifica a Figura 2.11, só que em valores de pico. Converte-se este valor de tensão de pico em fluxo de pico, o qual passa a ser considerado como fluxo de saturação Φ_s . O fluxo remanente Φ_r é obtido conforme a norma IEC 60044-6 [14], isto é, o valor do fluxo (passagem do laço de fluxo) quando a corrente possui o valor nulo. O VI de análise sempre utiliza este procedimento para determinar o valor do fluxo remanente, bem como, calculando para o laço relativo ao último ponto de operação do TC medido, isto é, para o “maior” laço de fluxo por corrente. Como se verá mais adiante, o maior valor de K_r obtido dentre os quatro procedimentos analisados é o que utiliza os valores obtidos conforme IEC60044-6 [14], pois utiliza o menor valor de fluxo de saturação Φ_s , ou seja, é um valor correspondente ao da “tensão de joelho” (o qual é menor que o provindo do valor de tensão de saturação V_x ou do ponto de inflexão superior).

b) $K_{rFluxMax}$

Este método de cálculo utiliza o valor máximo da forma de onda do fluxo, sendo o fluxo de saturação obtido do último ponto de operação de ensaio. Não é um procedimento normalizado, apesar de que algumas informações de algumas figuras da norma IEC 60044-6 [14] podem conduzir a esta interpretação. Este valor obtido de K_r é o menor entre os quatro procedimentos analisados, pois é utilizado o maior valor de fluxo de saturação Φ_s para o cálculo de K_r . Geralmente os TCs ensaiados são de 5 A no secundário e têm um fator de sobrecorrente F_s igual a 20, o que implica ter 100 A como limite para carga nominal do TC e, como o erro admissível é de 10 % na informação à proteção, isto equivale a 10 A. Comumente é até onde as curvas de excitação são obtidas, isto é,

com uma corrente secundária em torno de 10 A. Sendo assim, $Kr_{FluxMax}$ representa o ponto equivalente à classe de exatidão ANSI, isto quando a curva chegar a 10 A. Os fabricantes adotam este ponto como ponto de referência do fluxo de saturação, conforme estimado pela Equação (D1) no Anexo D (mas as normas não afirmam que é desta maneira que se define os valores correspondentes à saturação).

c) $Kr_{IEEE_{V_x}}$

Este método calcula o fluxo de saturação através do valor eficaz da tensão de saturação (V_x) determinado conforme a norma do IEEE/ANSI [2][13] (veja Figura 3.41). Este valor é convertido em valor de pico e, posteriormente, no valor de fluxo. Este valor obtido de K_r é o segundo valor maior, pois V_x possui um valor levemente inferior à tensão do ponto de inflexão superior. Este método denominado aqui por “ $Kr_{IEEE_{V_x}}$ ” não é normalizado, embora utilize o único método normalizado de obtenção do ponto de saturação através da determinação do valor de V_x .

d) $Kr_{InflexãoSup}$

Este método calcula o fluxo de saturação através do valor eficaz de tensão do ponto de inflexão pelo método proposto. Este valor é convertido em valor de pico e, posteriormente, no valor de fluxo.

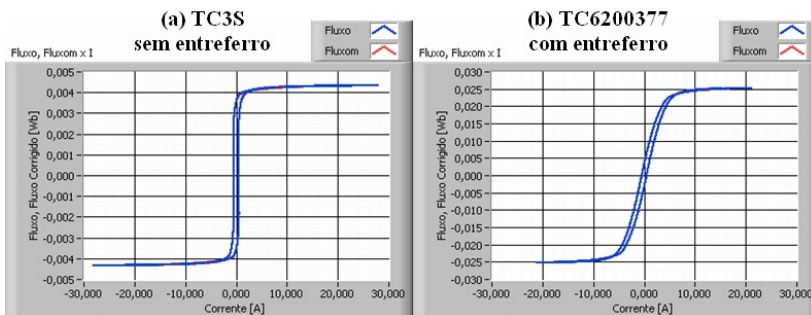
3.6.1. Resultados da avaliação do fator de remanência K_r por diferentes métodos através de ensaios realizados em laboratório de alta tensão

Utilizando-se dos TCs de proteção ensaiados, TC3S e TC6200377, obtiveram-se os valores apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8. A Figura 3.46 mostra os laços de fluxo para os dois TCs ensaiados.

Tabela 3.7 - Valores obtidos do K_r para o TC3S

TC3S – sem entreferro			
IEEE/ANSI referência (V_x) valor eficaz	Método IEC valor de pico	Método proposto valor eficaz	IEEE/ANSI referência (erro da classe de exatidão) *
$Kr_{IEEE_Vx} \%$	$Kr_{IEC} \%$	$Kr_{InflaçãoSup} \%$	$Kr_{FluxMax} \%$
104,67	135,82	97,82	82,41

* independente do cálculo dos valores em pico ou eficaz, este permanece o mesmo valor.

Figura 3.46 - Laço Fluxo versus Corrente para determinar K_r .Tabela 3.8 - Valores obtidos do K_r para o TC6200377

TC6200377 – com entreferro			
IEEE/ANSI referência (V_x)	Método IEC	Método proposto	IEEE/ANSI referência (erro da classe de exatidão) *
$Kr_{IEEE_Vx} \%$	$Kr_{IEC} \%$	$Kr_{InflaçãoSup} \%$	$Kr_{FluxMax} \%$
14,61	15,42	14,36	12,98

* independente do cálculo dos valores em pico ou eficaz, este permanece o mesmo valor.

Analisando as quatro maneiras de se determinar o fator de remanência K_r , o único método que é normalizado, IEC, utiliza um valor correspondente à região de joelho da curva de magnetização. Assim, este é o valor menos conservador em relação à proteção do sistema. Os dados foram retirados do ensaio apresentado na Figura 3.44. Nota-se que os valores não estão na região de saturação do núcleo.

Os valores de $K_{r_{IEEE_{V_x}}}$ igual a 104,67 % e $K_{r_{IEC}}$ igual a 135,82 % para TC sem entreferro demonstram que estes métodos não são eficientes para determinar o fator de remanência magnética, quando se utiliza TC sem entreferro. Para TC sem entreferro com núcleo de grão orientado, os quais possuem laços de fluxo semelhantes ao apresentado na Figura 3.46 (a), o laço de fluxo tem um formato íngreme. Assim, pode facilmente ocorrer pontos adotados como referência (V_x conforme IEEE e o ponto de joelho conforme IEC) de não serem adequados, de maneira que o valor calculado para o Φ_r seja maior que o de Φ_s , resultando assim valores maiores que 100 %, fato incorreto dentro do conceito do fator de remanência.

Talvez o fator de remanência K_r determinado utilizando o ponto de inflexão superior (onde inicia a região de saturação propriamente dita) proposto nesta dissertação seja o mais coerente com a física do problema, embora não seja uma metodologia normalizada. Através do método proposto se obteve valores de K_r na ordem de 97,82 %, para o TC sem entreferro, e 14,36 %, para TC com entreferro. Resultados estes menores que o método IEEE/ANSI e o IEC.

O método IEC que define e propõe a metodologia para determinação do fator de remanência é o que apresentou o maior valor de K_r (15,42 %), para TC com entreferro, sendo assim, o pior dos resultados avaliados.

O fator de remanência para o fluxo máximo $K_{r_{FluxMax}}$ naturalmente apresenta o menor valor, por utilizar o maior valor de fluxo de saturação.

Todos os resultados obtidos nestes ensaios apresentaram valores maiores do que os 10 % esperado para um TC TPY. No entanto a norma não especifica a tolerância destes 10 %, ficando assim, mais um ponto de decisão do inspetor de ensaio se aceita ou não um TC com esta característica.

3.6.1.1. Resultados da avaliação dos dados obtidos em ensaios com métodos propostos por fabricantes

Alguns fabricantes, devido à dificuldade de realizarem o ensaio de determinação do fator de remanência, conforme descrito na norma IEC [14][15], utilizam-se da Equação (3.64) para determinar K_r .

$$K_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_s} = e^{\frac{-t}{T_2}} \quad (3.64)$$

onde, t é o tempo transcorrido após a abertura definitiva do disjuntor e T_2 é a constante de tempo secundária. Nota-se que a Equação (3.64) não possui uma coerência com a física da questão, visto que relaciona características elétricas com magnéticas.

Segundo a norma IEC60044-1 [15] na Seção 2.3.7:

O fluxo remanente é aquele que fica no núcleo três minutos após a interrupção da corrente de excitação de magnitude suficiente a causar a saturação.

Portanto, o valor utilizado para t na Equação (3.64) é de 180 s. No entanto, a norma IEC 60044-1 [15] não apresenta a relação contida na Equação (3.64), assim como, os fabricantes não apresentam documentos que comprovam esta relação. Também a norma IEC 60044-6 [14], específica para TCs linearizados, que aborda mais sobre o fator de remanência não comenta nada a respeito desta relação apresentada pela Equação (3.64). Para verificar os valores obtidos com a Equação (3.64), utilizou-se os dados obtidos nos ensaios dos TCs, TC3S e TC6200377, onde o Φ_r , Φ_s e o T_2 foram determinados pelos diferentes métodos anteriormente apresentados. Obteve-se os resultados constantes nas Tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 - Comparação K_r , ensaios e fabricantes, TC3S

TC3S sem entreferro				
$t = 180 \text{ s}$	Método proposto	IEC		IEEE
	Valor eficaz	Valor eficaz	Valor de pico	Valor eficaz
L_0 [H]	4,8598	3,5795		
T_2 [s]	11,36	1,4744		
$e^{-\frac{t}{T_2}}$	$1,31 \times 10^{-7}$	$9,54 \times 10^{-54}$		
$K_{rInflexãoSup}$ %	97,82			
K_{rIEC} %			135,82	
K_{rIEEE_Vx} %				104,67
$K_{rFluxMax}$ %	82,41			

Tabela 3.10 - Comparação K_r , ensaios e fabricantes, TC6200377

TC6200377 com entreferro				
$t = 180 \text{ s}$	Método proposto	IEC		IEEE
	Valor eficaz	Valor eficaz	Valor de pico	Valor eficaz
L_0 [H]	1,6127	1,5704		
T_2 [s]	3,1408	0,6248		
$e^{-\frac{t}{T_2}}$	$1,28 \times 10^{-25}$	$7,64 \times 10^{-126}$		
$K_{rInflexãoSup}$ %	14,36			
K_{rIEC} %			15,42	
K_{rIEEE_Vx} %				14,61
$K_{rFluxMax}$ %	12,98			

Os valores obtidos com a Equação (3.64) são relativamente muito pequenos, e mesmo multiplicando por 100 para expressá-los em porcentagem, ficam aquém dos valores dos fatores de remanência K , determinados pelos diferentes métodos apresentados.

A remanência magnética do núcleo de TC pode contribuir para o equipamento alcançar o nível de saturação mais cedo, num contexto de religamento de disjuntores, prejudicando o sistema de proteção. Mas atribuir uma relação da constante de tempo secundária T_2 à remanência magnética não é verdadeiro. A remanência é um fenômeno que ocorre no núcleo magnético. Embora, a indutância de magnetização L_0 que é utilizada para calcular T_2 expresse o comportamento da permeabilidade magnética do material do núcleo, a constante de tempo secundária é um fenômeno elétrico e a remanência magnética um fenômeno característico da histerese magnética, sendo entes distintos em sua natureza. Assim, não se pode fazer a igualdade apresentada na Equação (3.64).

A metodologia utilizada por fabricantes para determinar o fator de remanência de TC (Equação (3.64)) se baseia no fenômeno dinâmico elétrico de dissipação da energia armazenada na indutância do TC após a abertura do circuito primário. A curva da constante de tempo secundária, embora seja definida também pelas características magnéticas do núcleo, não possui informação sobre a trajetória no plano BH do material e, portanto, da indução de remanência do material magnético.

As normas, IEC 60044-6 e IEC 60044-1 [14][15], contêm a definição do fator de remanência em função da magnetização remanente do material, e não do decaimento da tensão induzida no enrolamento secundário do TC provocada por fenômenos elétricos.

A histerese magnética é um fenômeno quase-estático e, após o campo externo ao material (de excitação) ser levado à zero, pode haver um fluxo contínuo que não induz tensão elétrica nos terminais do secundário do TC.

A importância de se ter a base teórica para uma boa análise é fundamental na avaliação das características dinâmicas do TC através da curva de excitação, indutância de magnetização e do laço fluxo corrente. No entanto, o domínio de como o ensaio é executado na prática se faz necessário. Por isso, no capítulo seguinte se apresentará um método de como avaliar a qualidade da tensão aplicada no secundário do TC durante o ensaio.

4. MÉTODO DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA TENSÃO APLICADA NO TC QUANDO SE REALIZA O ENSAIO DO LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO

Objetivando realizar os ensaios do levantamento das características dinâmicas do TC, através da curva de excitação, conforme as normas IEC 60044-6 e IEC60044-1 [14][15], neste capítulo será abordado o que estas propõem em relação a qualidade do sinal de tensão aplicada nos enrolamentos secundário do TC. Como contribuição deste trabalho propõe-se um método de avaliação qualitativa da forma de onda da tensão de excitação.

4.1. NATUREZA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE EXCITAÇÃO PELO MÉTODO DE CORRENTE ALTERNADA

A norma IEC60044-1 [15], no Capítulo 2 *Definitions*, Seção 2.1.31 *exciting current*, diz:

Corrente de excitação é o valor eficaz da corrente obtida no enrolamento secundário do TC, quando uma tensão senoidal de frequência nominal é aplicada nos terminais secundários, estando com o primário, e qualquer outro enrolamento, com o circuito aberto.

Isto dá a entender que o sinal de tensão aplicado no ensaio deve manter-se sempre na forma senoidal. Já a norma IEC 60044-6 [14] em seu Anexo B, Seção B.2 – *A.C. method*, diz⁶:

Uma tensão alternada **substancialmente senoidal** é aplicada aos terminais secundários e o valor

⁶ Note que esta norma prevê que a forma de tensão pode possuir certa distorção.

correspondente da corrente de magnetização é medida. O teste pode ser efetuado com frequência reduzida para evitar tensões de amplitudes elevadas inaceitáveis no enrolamento e terminais secundários. Efeitos das perdas indevidas de correntes parasitas no núcleo e de correntes capacitivas entre as camadas de enrolamento serão menos susceptíveis de causar leituras falsas em frequências mais baixas. A corrente de excitação deverá ser medida com um instrumento que lê o valor de pico para que o resultado seja alinhado com o valor de pico do fluxo.

Portanto, a norma IEC 60044-6 [14] admite uma distorção no sinal senoidal da tensão de ensaio.

Na Seção 2.5.3, no item (a): sobre definição da determinação das características de excitação, apresenta uma forma de como verificar se a tensão fornecida pela fonte de alimentação está adequada ao ensaio. Isto se dá pela observação do erro de leituras obtidas por dois voltímetros, sendo um de valor médio (V_{med}) e outro de valor eficaz (*rms*) (V_{rms}). Quando é feito uma medição da fonte de alimentação sem carga, ou seja, com o enrolamento do secundário do TC desconectado, o erro das leituras destes dois instrumentos não pode exceder a 2% dos valores medidos (V_2) em toda faixa de tensão necessária a ser utilizada para o levantamento da curva de excitação. Portanto, $V_{med} = V_{2med} (\pm 2 \%)$ e $V_{rms} = V_{2rms} (\pm 2 \%)$ nos mesmos instantes de leituras. A Figura 4.1 mostra o circuito de medição da fonte de alimentação a vazio, quando a chave S esta aberta.

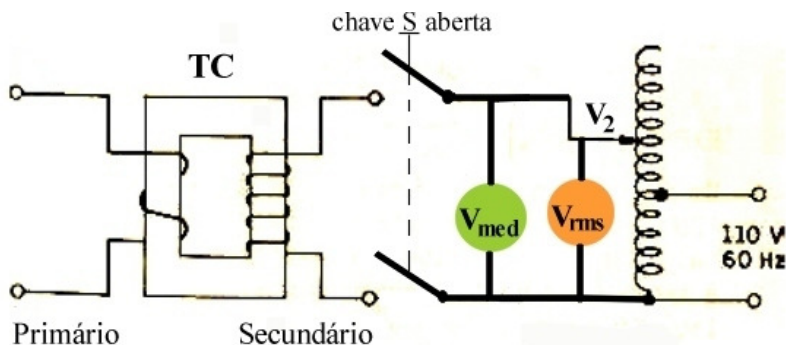


Figura 4.1 – Circuito de ensaio de como verificar a qualidade da tensão de ensaio de saturação com a fonte de alimentação a vazio, conforme a IEEE [22].

Quando é feito uma medição da fonte de alimentação com carga, ou seja, com o enrolamento do secundário do TC conectado, o erro das leituras destes dois instrumentos não pode exceder a 10% dos valores medidos (V_2) em toda faixa de tensão necessária a ser utilizada para o levantamento da curva de excitação. Portanto, $V_{med} = V_{2med} (\pm 10 \%)$ e $V_{rms} = V_{2rms} (\pm 10 \%)$ nos mesmos instantes de leituras. A Figura 4.2 mostra o circuito de medição da fonte de alimentação com carga, quando a chave S esta fechada. Neste ensaio é colocado um amperímetro *_A_* em série para o ensaio de saturação propriamente dito.

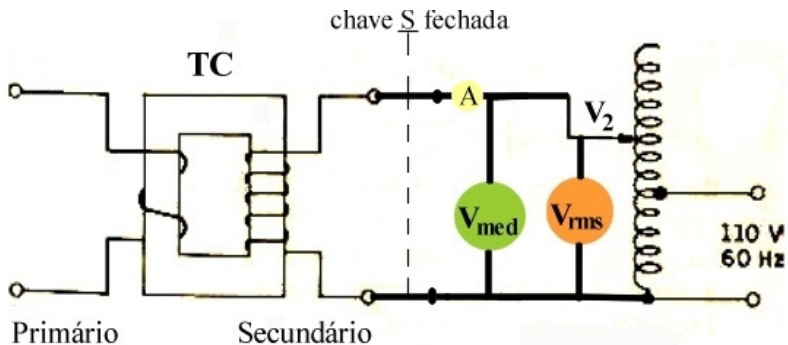


Figura 4.2 – Circuito de ensaio de como verificar a qualidade da tensão de ensaio de saturação com a fonte de alimentação com carga, conforme a IEEE [22].

Estes são os parâmetros a serem usados para avaliação da qualidade da tensão utilizada no ensaio de saturação de TC. Portanto, atendendo estas duas condições a fonte de alimentação é considerada adequada para execução do ensaio de saturação, conforme IEEE [22].

Atualmente pouco se aplica o método conforme a IEEE [22], pois esta recomenda o uso de instrumentos analógicos. Hoje em dia, devido ao avanço tecnológico novos métodos de aquisitar este sinal possibilitam o uso de ferramentas de *softwares* tipo o LabView utilizando instrumentos virtuais. Assim, os sinais aquisitados são processados de maneira matemática mais discretizada, permitindo utilizar outros métodos de avaliação da qualidade da fonte de alimentação do circuito de ensaio de saturação. Partindo deste princípio e tomando o circuito de ensaio de saturação de TC simplificado da Figura 3.18 (b) e as Equações (3.25), (3.26) e (3.27) como referência, se desenvolveu uma nova metodologia para avaliar a qualidade da forma

de onda da tensão aplicada no secundário do TC ao realizar o ensaio de característica de excitação deste. Este estudo se desenvolveu na bancada de ensaios [3], utilizando as formas de onda das tensões e das correntes medidas pelos instrumentos da própria bancada.

4.1.1. Nova Proposta de avaliação da qualidade da forma de onda da tensão

Para avaliar a qualidade da forma de onda de tensão de alimentação do TC, se propõe o uso do fator de forma (FF) dado pela Equação (4.1).

$$FF \triangleq \frac{f_{ef}}{f_{med}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} f^2(t) dt}}{\frac{2}{T} \int_{t_o}^{t_o+T/2} |f(t)| dt} \quad (4.1)$$

O fator de forma de uma onda simétrica $f(t)$ em relação ao eixo dos tempos é a razão entre seu valor eficaz e seu valor médio relativo a meio período ou à forma de onda retificada em um período [38]. Este fator permite avaliar o ensaio qualitativamente.

O fator de forma de uma onda senoidal pura (sem conteúdo harmônico) possui o valor aproximado de 1,1107 e para uma forma de onda quadrada ele vale 1,0000. Por conseguinte, quando uma forma de onda senoidal sofre distorção, ela tende a aumentar o seu valor do fator de forma. Entretanto, quando seu formato tende a ser “achatado” por harmônicas, se aproximando de uma forma de onda quadrada, o valor do fator de forma tende a diminuir em relação ao de uma senóide.

4.1.1.1. Resultados e análise da metodologia proposta de avaliação da qualidade do sinal de tensão aplicada no secundário do TC utilizando o fator de forma

O TC utilizado nos ensaios possui três enrolamentos, sendo que as medições das resistências elétricas se encontram com valores obtidos na temperatura ambiente de 24,6°C, isto é:

- enrolamento de medição 1S1-1S2, com 160 espiras e resistência elétrica de 0,345 Ω ;
- enrolamento de proteção 2S1-2S2, de 240 espiras e resistência elétrica de 0,870 Ω ;
- enrolamento de proteção 3S1-3S2, de 240 espiras e resistência elétrica de 0,840 Ω .

Os resultados do ensaio realizado se referem ao enrolamento de medição do TC. Embora não sejam mostrados aqui, os resultados dos enrolamentos de proteção possuem o mesmo comportamento em termos de metodologia e análise experimental.

Ensaio um TC de medição, obteve-se a curva de magnetização apresentada na Figura 4.3.

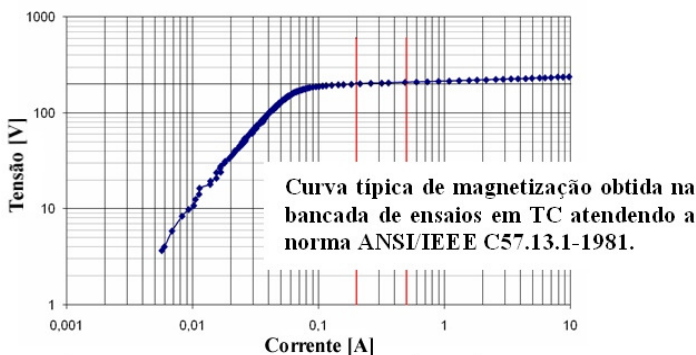


Figura 4.3 - Ensaio da corrente de excitação.

A Figura 4.4 apresenta a mesma curva da Figura 4.3, só que utilizando uma escala linear para o eixo da tensão. Também são mostrados valores do fator de forma (FF) da onda de tensão para determinados pontos marcados pelas retas paralelas ao eixo da tensão. Nota-se que o fator de forma possui valor superior ao da forma de onda senoidal na região de saturação.

Valores do fator de forma ao longo da curva de magnetização de um TC de medição

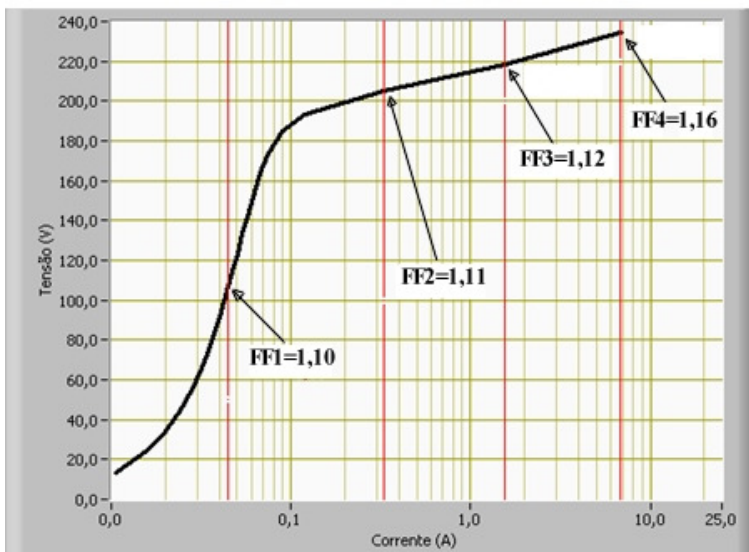


Figura 4.4 - Fator de forma FF na curva de magnetização.

A Figura 4.5 mostra as formas de onda da tensão v e da corrente I de entrada do enrolamento secundário do TC para uma tensão eficaz de 220 V, bem como da tensão corrigida v_m que contempla o efeito da resistência elétrica do enrolamento conforme Equação (3.25). Nota-se nas curvas apresentadas na Figura 4.5 que o efeito da resistência secundária pode ser desprezado para este TC.

Quando ocorre a saturação do material magnético, a corrente é relativamente alta, bem como sua derivada, fazendo com que ocorra uma queda de tensão na impedância série do circuito de alimentação do TC, sendo assim, a forma de onda da tensão imposta no secundário não consegue manter-se senoidal. Esta é a razão pelo qual o valor do fator de forma da tensão aumenta na região de saturação (*vide* Figura 4.4 e 4.5).

Forma de onda da tensão v , tensão corrigida v_m e da Corrente I - ponto de operação de 220 V.

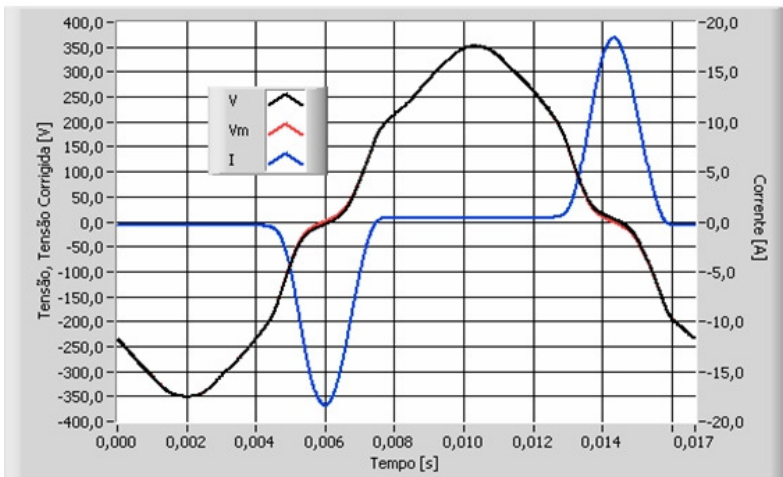


Figura 4.5 – Forma de onda de tensão distorcido no intervalo de tempo sob saturação.

A Figura 4.6 mostra as formas de onda do fluxo ($\phi(t) = \text{Fluxo}$), do fluxo corrigido ($\phi_m(t) = \text{Fluxom}$), conforme Equações (3.26) e (3.27), respectivamente, e da corrente I para o mesmo ponto de operação. O fluxo está 90° atrasado em relação à tensão (compare as formas de onda apresentadas pelas Figuras 4.5 e 4.6).

Na Figura 4.6 também se observa que há um achatamento da forma de onda do fluxo no momento em que ocorre a demanda de corrente. Esta distorção da forma de onda do fluxo é causada pela saturação do núcleo (o sistema opera em malha aberta) e também pela distorção da forma de onda da tensão no intervalo de tempo onde ocorre a saturação do material.

Formas de onda do fluxo $\phi(t)$, do fluxo corrigido $\phi_m(t)$ e da corrente I no mesmo ponto de operação da Figura 4.5.

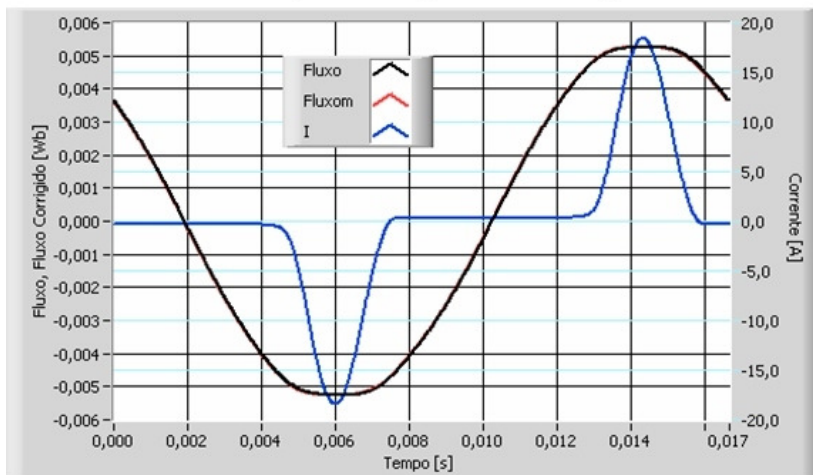


Figura 4.6 - Formas de onda dos fluxos na saturação.

A Figura 4.7 mostra os fatores de forma da tensão (FFv), da tensão corrigida ($FFvm$), do fluxo ($FFfluxo$) e do Fluxo corrigido ($FFfluxom$). Como a forma de onda do fluxo tende a ter um achatamento no seu pico (evidentemente, o TC está saturado), o valor do fator de forma do fluxo tende a diminuir em relação ao valor de uma forma de onda senoidal.

Enquanto que, com o aumento da corrente de magnetização (aumento do grau de saturação do material no núcleo) ocorre uma distorção da forma de onda das tensões, aumentando seus fatores de forma FFv e $FFvm$ (linha preta e vermelha do gráfico da Figura 4.7). Para os fluxos, os seus fatores de forma $FFfluxo$ e $FFfluxom$ diminuem (linha verde no gráfico da Figura 4.7).

A variação do fator de forma da tensão é maior do que o do fluxo porque o fluxo é a integral proporcional da tensão, filtrando as distorções. Assim, o ensaio pode ser avaliado qualitativamente através do fator de forma da tensão, observando seu comportamento de afastamento em relação do ponto de $FFv = 1,1107$, correspondente a um sinal senoidal puro. Neste aspecto, o ideal é que o valor do fator de forma seja o mais próximo de 1,1107, ou seja, que a forma de onda seja mais semelhante a uma forma de onda senoidal pura.

Estudos experimentais ainda poderão ser realizados, com uma quantidade considerável de ensaios de vários TC na busca de se determinar um valor de fator de forma tolerável (afastamento do valor de 1,1107). Porém, estes estudos fogem do escopo deste trabalho.

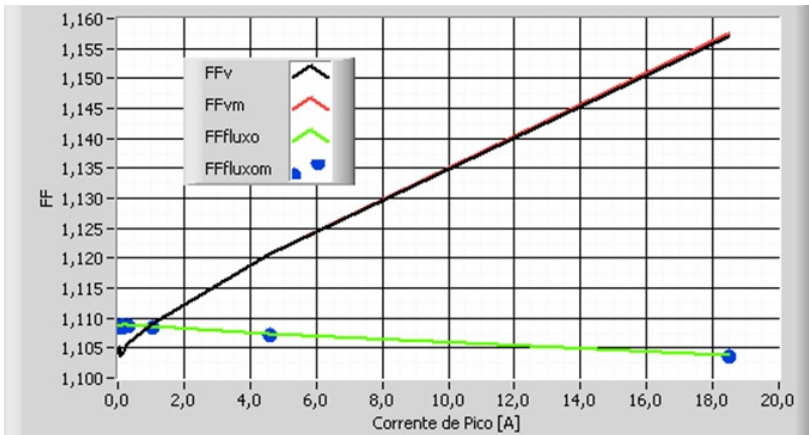


Figura 4.7 - Fatores de forma em função da corrente de pico.

A Figura 4.8 relaciona os valores de corrente de pico e eficaz com a tensão eficaz. É importante observar que o valor da tensão eficaz sofre influência da distorção da forma de onda da corrente. Esta relação é praticamente constante na região linear da curva de magnetização, em torno do valor $\sqrt{2}$, e cresce acentuadamente a partir da região do joelho. Isto ocorre porque a forma de onda da corrente na saturação tende a se aproximar da forma impulsiva (*vide* Figuras 4.5 e 4.6). A dificuldade de se alimentar o TC com uma forma de onda senoidal após o joelho da curva de magnetização também pode ser observado na mudança abrupta (em torno de 210 V) da evolução da relação dos valores de pico e eficazes da corrente de magnetização apresentada na Figura 4.8.

Analisando as formas de onda e curvas apresentadas sob o aspecto da compensação do efeito da queda de tensão provocada pela resistência do enrolamento r_2 , nota-se que para este TC e nesta frequência de operação (60 Hz), praticamente não há diferenças significativas entre a curva de tensão compensada v_m (em vermelho) e a curva de tensão não compensada v (em preto). A Figura 4.9 apresenta os laços destas tensões, v_m e v , em função da corrente de magnetização. Note que, nesta frequência e para este TC, a resistência provoca algum efeito visível apenas na região de saturação.

Relação entre os valores de corrente de pico e eficaz em função da tensão eficaz.

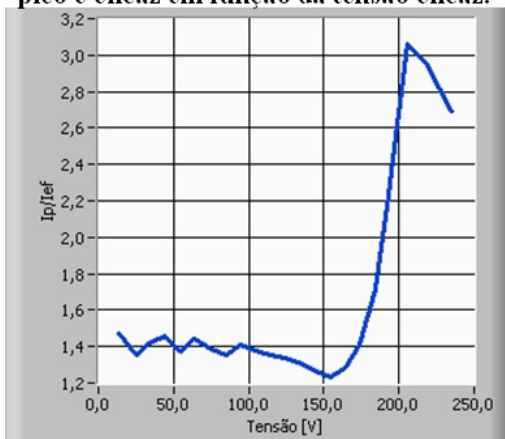


Figura 4.8 – Relação I_{pico}/I_{eficaz} em função da tensão eficaz.

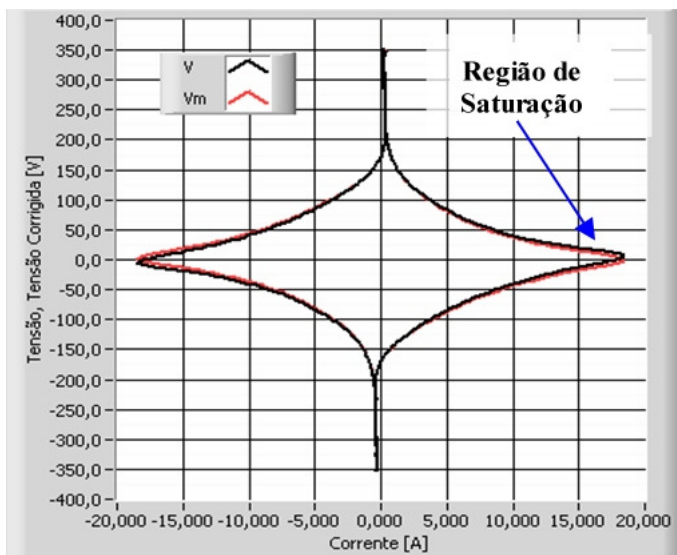


Figura 4.9 - Laço de tensão por corrente – 220 V.

A Figura 4.10 mostra o laço dos fluxos obtido pela Equação (3.26) (notação na figura: Fluxo, em preto) e pela Equação (3.27)

(notação na figura: Fluxom, em vermelho) em função da corrente de magnetização. O valor do fluxo remanente ϕ_r , ponto onde o fluxo de retorno cruza a linha em que a corrente é zero, pode ser obtido através desta curva. Neste caso, mostra-se que o ϕ_r está próximo de 90% de ϕ_s , o que denota ser um TC Clássico, com núcleo sem entreferro.

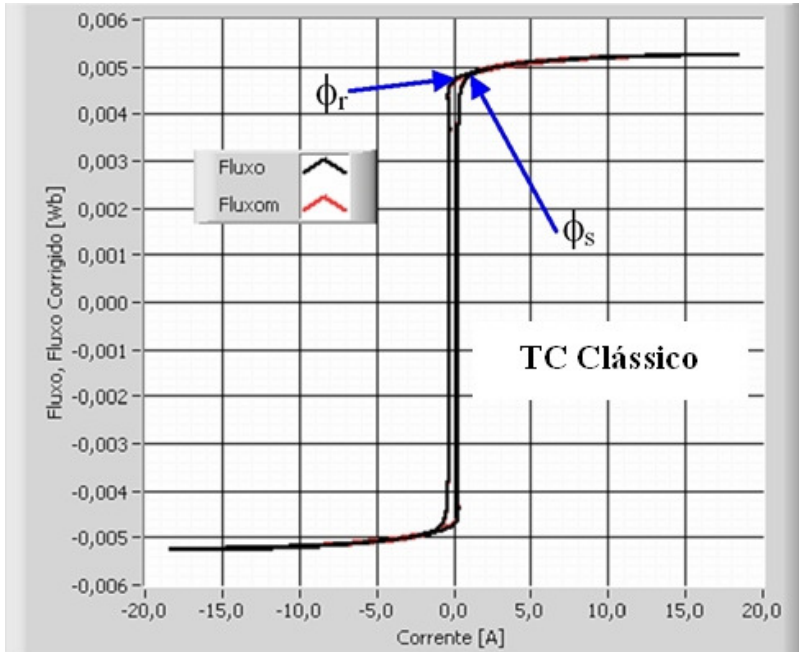


Figura 4.10 - Laços de fluxo por corrente, em 220V.

4.1.1.2. Considerações finais sobre a metodologia proposta de avaliação da qualidade do sinal de tensão utilizando o fator de forma

Este capítulo abordou algumas dificuldades que ocorrem em ensaio de TC utilizados em sistemas elétricos de alta tensão, principalmente aqueles envolvendo a distorção da forma de onda do sinal de alimentação. Mesmo quando a forma de onda da tensão for mantida senoidal no ensaio de TC, a não linearidade do material faz

com que a corrente absorvida seja distorcida. O compromisso de se manter a forma de onda de tensão senoidal, mesmo com as exigências de corrente na região de saturação do núcleo, pode evitar o aparecimento de problemas de precisão na caracterização de TC.

É conveniente fazer uma análise experimental em ensaios de vários TCs, levando em conta a resistência do enrolamento secundário, para se poder realmente verificar a possibilidade de se desprezar o efeito de r_2 na análise. Os resultados apresentados na frequência de 60 Hz do TC usado como exemplo não apresentaram uma diferença significativa nos valores medidos.

Foi proposta a utilização do fator de forma da onda de tensão como indicativo da qualidade do ensaio realizado. O fator de forma da onda de fluxo magnético também pode ser utilizado. Porém, como o fluxo é determinado através de um processo de integração, distorções na forma de onda são filtradas, dificultando a avaliação do ensaio. Assim, a medida da qualidade do ensaio pode ser efetuada através do fator de forma da tensão, principalmente em casos de ensaios em malha aberta onde não ocorre a imposição da tensão na forma de onda puramente senoidal. Quando o fator de forma da tensão estiver mais próximo de 1,1107 significa que o circuito de ensaio provoca pouca distorção na tensão imposta ao enrolamento secundário do TC sob ensaio. Assim, a tensão do circuito de alimentação pode ser considerada de boa qualidade.

Avaliando o resultado experimental da Figura 4.7, qual seria o valor do fator de forma da tensão FF aceitável? Se o percentual de 10 % adotado pela IEEEE [2] fosse adotado se teria o FF de 1,1107 variando de 0,99963 à 1,22177. Do resultado obtido o FF variou de 1,100 à 1,160, o que está dentro da faixa de variação admissível de 10 %. O valor máximo de 1,160 obtido no ensaio representa aproximadamente 4,24% de 1,1107. Portanto, pela avaliação adotada pela IEEEE [22] a fonte utilizada no experimento poderia ser considerada adequada ou de boa qualidade para realizar o ensaio de saturação. Entretanto, como o método proposto avalia a relação do valor eficaz e do valor médio do sinal e que é um pouco diferente da proposta da IEEEE [22], faz-se necessário um estudo posterior para melhor avaliar qual o valor do fator de forma FF aceitável para considerar a fonte de boa qualidade e também avaliar quais ações devem ser tomadas para diminuir a distorção do sinal. Indiretamente, como já apresentado anteriormente, a norma IEC 60044-6 [14] reconhece esta dificuldade em ensaios deste tipo.

Através do laço de fluxo por corrente e dos valores de remanência e de saturação mensurados, consegue-se identificar se o TC tem ou não entreferro. O TC aqui ensaiado é de medição. Porém, se este fato não fosse conhecido pela curva apresentada na Figura 4.10 é possível verificar se o TC é de proteção ou não. E pela curva apresentada na Figura 4.3, observando a classificação para TC de proteção, conforme a norma IEC 60044-6 [14], sua classificação poderia ser como um TC Clássico ou TPX. Então, pela análise da Figura 4.3, o nível da corrente é próximo a $0,07A$ no ponto de joelho, tendo um nível relativamente baixo de tensão de $200 V$ na região de saturação, indicando que este é um TC de medição.

O objetivo deste capítulo foi de mostrar uma metodologia de avaliação da qualidade da tensão imposta nos secundários de TCs nos ensaios de saturação, e algumas questões de avaliação qualitativa de ensaios típicos de TC em geral.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das maiores motivações para realização deste estudo foi a necessidade do laboratório de alta tensão da Eletrosul desenvolver uma metodologia de análise de TC conforme a norma IEC60044-6 [14], principalmente para verificar experimentalmente o fator de remanência magnética de TC, mais especificamente, dos TCs TPY adotados pela empresa no sistema de proteção.

Através de um projeto P&D [3], foi-se em busca do aperfeiçoamento do sistema de ensaio para levantamento da curva de saturação de TC, bem como de se conhecer mais a fundo as normas e os fenômenos elétricos e magnéticos relacionados à operação de TC.

Durante o desenvolvimento do estudo, percebeu-se que havia muito conhecimento envolvido e que as normas nem sempre são claras em suas explanações e, muitas vezes, também são contraditórias. Isto de certo modo dá margem a interpretações equivocadas, necessitando que a pessoa envolvida com TC seja um grande especialista do sistema de proteção, de modo que se possa entender e utilizar de uma maneira adequada os parâmetros provenientes de ensaios de TC. Este trabalho pretende ser, neste contexto, um referencial aos especialistas no que se refere a ensaios de TC e as particularidades eletromagnéticas de seu funcionamento relacionadas com a determinação experimental de parâmetros de especificação de TC. Provavelmente, se neste trabalho houvesse a colaboração de especialistas de proteção, os resultados e conclusões poderiam ser de maior envergadura do que os atingidos.

Ao longo deste estudo, apresentou-se algumas propostas de métodos de avaliação seguidos de resultados obtidos em ensaios experimentais. Desenvolveu-se neste trabalho:

- 1) Método para escolha do TC de melhor desempenho, dentro de um grupo de equipamentos ensaiados, através da avaliação da curva da indutância de magnetização L_0 e da curva da constante de tempo secundária T_2 obtidas em laboratório;
- 2) Método de determinação do ponto de joelho e de saturação na curva de excitação do TC;
- 3) Avaliação e obtenção experimental do fator de remanência magnética do TC nos diferentes métodos estudados bem como do

levantamento de laços de fluxo magnético *versus* corrente elétrica de magnetização;

- 4) Método de avaliação qualitativa da tensão aplicada no TC durante a realização do ensaio de levantamento da curva de excitação.

Atualmente, no Brasil, muitos dos especialistas em sistema de proteção estão se retirando de suas atividades e novos profissionais estão entrando nesta área, surgindo então, uma carência de atualização de conhecimento na área, pois nem sempre os conhecimentos são repassados naturalmente dos antigos profissionais para os novatos. Assim, se procurou fazer um resgate de conhecimentos, esclarecendo o foco e o objetivo da necessidade de se ter um equipamento transformador de corrente do sistema elétrico para um sistema de proteção, que contribua pela confiabilidade, pela qualidade e pela disponibilidade da energia elétrica a todos. Aos novos especialistas de proteção e inspetores de ensaios em TC, que estão surgindo no mercado, procurou-se organizar, analisar e aplicar as normas, os conceitos e os conhecimentos referentes aos ensaios do comportamento de TC, evidenciando os fenômenos relacionados ao núcleo magnético através de curvas de excitação e de laços de fluxo magnético por corrente.

É importante realçar que o TC é um dos equipamentos mais antigos e usados no sistema elétrico. No entanto, ainda há carência de literatura a seu respeito, principalmente na língua portuguesa. Além disso, com este estudo, verificou-se a importância de que haja especialistas no assunto, pois em muitos casos há necessidade de se analisar qual situação é a mais adequada em vez de se escolher uma solução ideal para um problema ou para se proporcionar a resposta de desempenho desejado.

Apesar das novas tecnologias proporcionarem o surgimento de transdutores de corrente usando circuitos eletrônicos, eliminando a aplicação de núcleos magnéticos (tradicionais), ainda necessitará um longo tempo para que se substitua o uso de TCs tradicionais no sistema elétrico. Mesmo se daqui a 40 anos a maior quantidade de TCs sejam eletrônicos, ainda haverá espaço de aplicação de TCs tradicionais em algum circuito.

Apesar de se ter atingido algumas conclusões ao final do trabalho, identificou-se que alguns tópicos necessitam ser mais bem explorados dentro da continuidade à busca de um entendimento mais completo sobre TC. Apresenta-se uma lista de sugestões de tópicos de estudo que

merecem uma abordagem específica (obviamente, pode haver muitos outros tópicos a serem desenvolvidos):

- a) Estudo sobre a reatância de dispersão de TC de alta tensão, de núcleo toroidal tipo bucha;
- b) Estudo sobre o levantamento da variação do caminho médio magnético *versus* o caminho médio geométrico de TC de núcleo toroidal em ensaios;
- c) Estudo sobre TC de medição, pois neste trabalho se dedicou mais ao TC de proteção;
- d) Estudo do comportamento e uso do TC na região de saturação relativo a sua constante de tempo secundária, pois reportou-se neste trabalho mais à zona linear de operação (embora em princípio, é esta a região que importa à resposta de TC para o sistema de proteção);
- e) Estudo de melhoria da forma de onda de tensão aplicada nos ensaios de saturação de TC, principalmente para atenuar a distorção quando o equipamento entra na região de saturação;
- f) Estudo da resposta elétrica e magnética frente a processos transitórios e de religamentos de disjuntores e seus reflexos no sistema de proteção em subestações.

Enfim, com a colaboração de especialistas em proteção, sugere-se fazer um estudo sobre as faixas de valores ideais para as constantes de tempo secundárias características e especificadas para TC de proteção. Pois, se de um lado uma constante de tempo secundária maior proporciona um tempo de saturação maior, esta constante de tempo secundária de valor elevado irá fazer com que a corrente secundária demore a se extinguir na ocasião de um religamento do sistema de proteção e também tornar o TC lento em sua sensibilidade ao transitório da corrente primária.

REFERÊNCIAS

- [1] Pinheiro, D. W. Comportamento de Transformadores de Corrente durante o Regime Transitório. Curso Transformadores de Corrente, Curitiba, 2005.
- [2] IEEE Power System Relay Committee. Transient Response of Current Transformers, IEEE Report, 76 CH 1130-4 PWR, 1976.
- [3] Coelho, V.V.; Carvalho, J.C.D.; Batistela, N.J. Desenvolvimento de uma Metodologia de Análise de Transformadores de Corrente – TC. Relatório Técnico final do projeto P&D entre UFSC e ELETROSUL, contrato: 80580012; 09/02/2009 - 08/02/2011.
- [4] Filho, S.M.; Medição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Dois S.A., 1983.
- [5] Kindermann, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Porto Alegre, RS: Editora Sagra Luzzato, 1999.
- [6] Zocholl, S. E. Analyzing and Applying Current Transformers. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. USA: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, August 2004.
- [7] D’Ajuz, A. et al. Equipamentos elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.
- [8] Artech. Transformadores de Corrente de Alta Tensão. Catálogo Comercial, 2008.
- [9] VA TECH. Transformadores de Corrente para proteção VA TECH, 2005. Disponível em: <<http://www.vatech-td.com>>. Acesso em: 26 julho 2011.
- [10] Osório, J. M. Regime Transitório para Transformadores de Corrente – Núcleos Linearizados Norma IEC 44-6, Curso Transformadores de Corrente, Curitiba, 1999.

- [11] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformador de Corrente – Especificação. NBR 6856, ABR./1992.
- [12] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformador de Corrente – Método de Ensaio. NBR 6821, ABR/1992.
- [13] ANSI/IEEE Standard REQUIREMENTS FOR INSTRUMENT TRANSFORMERS - IEEE Std C57.13-1993 – March 4, 1994 (Revision of IEEE Std C57.13-1978).
- [14] IEC 60044-6. Instrument Transformers. Part 6: Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, First edition, 1992-2003.
- [15] IEC 60044-1. Instrument Transformers. Part 1: Current Transformers, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, Edition 1.2, 2003-02.
- [16] IEC 185. Transformer Current. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1966.
- [17] IEEE Std C37.110. IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. October 3, 1996.
- [18] ANSI/IEEE Std C57.13.1. IEEE Guide for Field Testing of Relaying Current Transformers, 1981.
- [19] BS 3938. Transformer Current. British Standards, 1982.
- [20] GE. Instrument Transformers. Technical Information. USA, 1986.
- [21] Siemens. The Siemens Answer: CT Dimensioning. - Innovation for Generations - How to select CT's for modern protection relays?
Disponível em:
<<http://w3.energy.siemens.com/cms/00000013/aune/Documents/CT%20Dimensioning.pdf>>. Acesso em: 26 julho 2011.

- [22] IEEE. Gapped core current transformer characteristics and performance. IEEE Power System Relay Committee Report. Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [23] GE. CT Application Guide for the 489 Generator Management Relay. GE Power Management, Technical Notes, Publication No. GTE-8402, 2002.
- [24] Holst, S.; Palki A. S. Co-ordination of fast numerical relays and current transformers – overdimensioning factors and influencing parameters. SC 34 Colloquium, Sibiu, September 10-14, 2001.
- [25] Sadiku, M.N.O. Elementos de Eletromagnetismo. Porto Alegre, RS: ARTMED Editora - BOOKMAN, Terceira Edição, 2006.
- [26] Bastos, J.P.A. Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática. Florianópolis, SC: Editora UFSC, 2004.
- [27] Yahyavi, M.; Brojeni, F. V.; Vaziri, M. Practical Considerations of CT Performance. IEEE Protective Relay, 2007.
- [28] IEEE Std 100. The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms (ANSI), 1992.
- [29] ONS RE-2.1/207/2004 – Revisão 2. Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente, 08 de Setembro de 2005.
- [30] Linders, J. R. et al. Relay Performance Considerations with Low-Ratio CT's and High-Fault Currents. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, March/April 1995.
- [31] Ganesan, S. Selection of Current Transformers and Wire Sizing in Substations. Proceedings in the 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006.
- [32] Hans, J. H. Design of Numerical Relays with regard to CT Saturation. SC 34 Colloquium, Sibiu, September 10-14, 2001.
- [33] Carvalho, M. Especificações para Transformadores de Corrente, Capítulo Tecnologia, Revista Mundo Elétrico, julho 1982.

- [34] Vaasa Electronics Group - VAMP Application note: ANGEN.EN006 Current transformer selection for VAMP series overcurrent and differential relays. Disponível em: <<http://www.vamp.fi>>. Acesso em 07 abril 2011.
- [35] Krüger, M. IEC standards for evaluating the transient performance of current transformers with regard to the reliability of protection function at high currents. Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2003), Hong Kong, China, November 2003.
- [36] Microsoft Excel-CT-SAT-Calculator-PSRC.xls. IEEE Power Systems Relaying Committee, versão 30 Dez. 2002.
- [37] ponti, P. Proteção: como selecionar e especificar transformadores de corrente. Capítulo Instalações, Revista Eletricidade Moderna EM, Setembro 2003.
- [38] Nakata, T. et al. Iron Losses of Silicon Steel under Square Wave Voltage Excitation. Physica Scripta, v. 39, p. 645 – 647, 1989.

ANEXO A - Densidade de fluxo instantânea em TC tipo bucha para corrente primária assimétrica

No Anexo A é apresentado o conteúdo do Apêndice II do documento IEEE 76 [2] sobre “Densidade de Fluxo Instantânea em Transformador de corrente Tipo Bucha devido a uma Corrente Primária Assimétrica” com alguns acréscimos para melhor possibilitar o entendimento do desenvolvimento de deduções matemáticas.

O estudo a seguir será desenvolvido com base em um transformador de corrente tipo bucha com o primário de uma só espira com o enrolamento secundário completamente distribuído uniformemente.

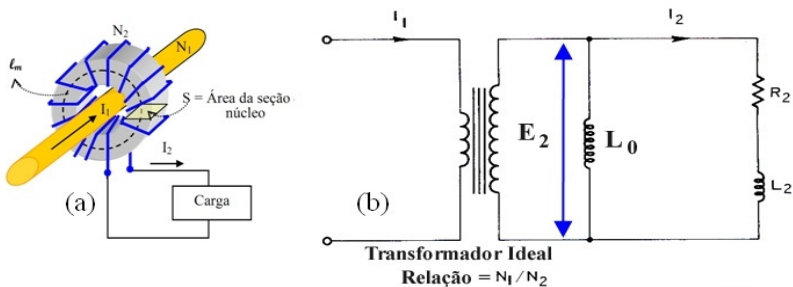


Figura A.1 - Circuito equivalente de TC toroidal [2], (a) TC de bucha; (b) Circuito equivalente simplificado.

A densidade de fluxo neste tipo de TC pode ser determinada da equação de tensão de seu circuito secundário:

$$E_2 = - \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (\text{A.1})$$

onde, E_2 é a tensão induzida no secundário e λ_2 é o fluxo de acoplamento devido ao fluxo mútuo

A tensão E_2 pode ser expressa em termos da corrente secundária e a carga como:

$$E_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (\text{A.1.1})$$

e o fluxo de acoplamento como:

$$\lambda_2 = N_2 \phi = N_2 B S \quad (\text{A.1.2})$$

onde, ϕ é o fluxo magnético mútuo para o primário e o secundário.

Nota:

Com os enrolamentos do secundário plenamente distribuídos, a reatância de dispersão secundária do TC é aproximadamente igual a zero.

De (A.1.1) e (A.1.2) obtém-se:

$$SN_2 \frac{dB}{dt} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (\text{A.2})$$

Considerando um TC tipo bucha ideal tem-se que a relação da corrente primária i_1 com a corrente secundária i_2 é igual à relação do número de espiras secundária N_2 com o número de espiras primária N_1 ($\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$), sendo $N_1 = 1$

obtém-se que a corrente secundária i_2 igual a relação da corrente primária i_1 com o número de espiras secundária ($\frac{i_1}{N_2} = i_2$).

Como o TC não é ideal, a corrente secundária pode ser expressa em termos da corrente primária e a *fmm* (força magnetomotriz) agindo sobre o núcleo:

$$i_2 = \frac{i_1}{N_2} - \frac{h \ell_m}{N_2} \quad (\text{A.3})$$

Substituindo h por: $h = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$ onde: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ henry por metro

obtém-se:

$$i_2 = \frac{i_1}{N_2} - \frac{B \ell_m}{\mu_0 \mu_r N_2} \quad (\text{A.3.1})$$

A derivada da corrente secundária é:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{di_1}{N_2 dt} - \frac{dB}{dt} \frac{\ell_m}{\mu_0 \mu_r N_2} \quad (\text{A.3.2})$$

Substituindo na equação (A.2) tem-se:

$$SN_2 \frac{dB}{dt} = R_2 \left[\frac{i_1}{N_2} - \frac{B \ell_m}{\mu_0 \mu_r N_2} \right] + L_2 \left[\frac{di_1}{N_2 dt} - \frac{dB}{dt} \frac{\ell_m}{\mu_0 \mu_r N_2} \right] \quad (\text{A.3.3})$$

$$\frac{dB}{dt} = \left[\frac{R_2 i_1}{SN_2^2} - \frac{B \ell_m R_2}{\mu_0 \mu_r SN_2^2} \right] + L_2 \left[\frac{di_1}{SN_2^2 dt} - \frac{dB}{dt} \frac{\ell_m L_2}{\mu_0 \mu_r SN_2^2} \right] \quad (\text{A.3.4})$$

Admitindo um valor constante para μ_r , então a expressão (A.3.5) é uma constante:

$$\frac{\ell_m}{\mu_0 \mu_r SN_2^2} = \frac{1}{L_0} \quad (\text{A.3.5})$$

A equação (A.3.4) então torna-se:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{R_2 i_1}{SN_2^2} - \frac{BR_2}{L_0} + \frac{L_2}{L_2} \frac{di_1}{dt} - \frac{L_2}{L_0} \frac{dB}{dt} \quad (\text{A.3.6})$$

Assim:

$$\frac{dB}{dt} + \frac{BR_2}{L_0} + \frac{dBL_2}{dtL_0} = \frac{R_2 i_1}{SN_2^2} + \frac{L_2 di_1}{SN_2^2 dt} \quad (\text{A.3.7})$$

A Transformada de Laplace desta equação é:

$$sB(s) + \frac{B(s)R_2}{L_0} + \frac{sB(s)L_2}{L_0} = \frac{R_2 I(s)}{SN_2^2} + \frac{L_2 sI(s)}{SN_2^2}$$

$$B(s) \left[s + \frac{R_2}{L_0} + \frac{sL_2}{L_0} \right] = \left[\frac{R_2 + sL_2}{SN_2^2} \right] I(s) \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{L_2}{SN_2^2} \left(s + \frac{R_2}{L_2} \right)$$

$$\frac{sL_0 + R_2 + sL_2}{L_0} = \frac{s(L_2 + L_0) + R_2}{L_0} = \left(s + \frac{sR_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(L_2 + L_0)}{L_0}$$

Admitindo um *offset* da corrente primária pleno:

$$i_1 = \sqrt{2} I_i \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right) \quad (\text{A.5})$$

A Transformada de Laplace desta corrente é:

$$I(s) = \sqrt{2} I_i \left[\frac{1}{s + \left(\frac{1}{T_1} \right)} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (\text{A.5.1})$$

Simplificando a equação (A.4) e inserindo a expressão para $I_1(s)$ de (A.5.1), tem-se:

$$B(s) \left[s + \frac{R_2}{L_2 + L_0} \right] \frac{L_2 + L_0}{L_0} = \frac{\sqrt{2} I_i L_2}{SN_2^2} \left[s + \frac{R_2}{L_2} \right] \left[\frac{1}{s + \left(\frac{1}{T_1} \right)} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (\text{A.6})$$

Este pode ser simplificado para:

$$B(s) = \frac{\sqrt{2}I_i L_2 L_0}{SN_2^2 (L_2 + L_0)} \left[\frac{s + \frac{R_2}{L_2}}{\left(s + \frac{R_2}{L_2 + L_0}\right) \left(s + \frac{1}{T_1}\right)} - \frac{s \left(s + \frac{R_2}{L_2}\right)}{\left(s + \frac{R_2}{L_2 + L_0}\right) (s^2 + \omega^2)} \right] \quad (\text{A.6.1})$$

Fazendo, $K = \frac{\sqrt{2}I_i}{SN_2^2}$

Então (A.6.1) se torna (A.6.2)

$$B(s) = K \frac{L_2 L_0}{(L_2 + L_0)} \left[\frac{s + \frac{R_2}{L_2}}{(s + \beta)(s + \alpha)} - \frac{s(s + \alpha)}{(s + \beta)(s^2 + \omega^2)} \right]$$

$\frac{1}{T_2} \qquad T_2 = \frac{L_2 + L_0}{R_2}$

(A.6.2)

A solução desta equação fornece:

$$B = K \frac{L_2 L_0}{(L_2 + L_0)} \left[\frac{(\alpha + \beta)e^{-\beta t} - (\alpha - \gamma)e^{-\gamma t}}{(\gamma - \beta)} + \frac{\beta(\alpha + \beta)e^{-\beta t}}{(\beta^2 + \omega^2)} - \left(\frac{1}{L_2} \frac{Z_B}{Z_C} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right) \right]$$

(A.6.3)

onde: $Z_B = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$, $\delta = \tan^{-1} \left[\frac{\omega(L_2 + L_0)}{R_2} \right]$ e $Z_C = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 (L_2 + L_0)^2}$

Rearranjando os termos, esta expressão se torna:

$$B = KL_0 \left[\left(\frac{R_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{e^{-\beta t} - e^{-\gamma t}}{(\gamma - \beta)} + \left(\frac{L_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(\gamma e^{-\gamma t} - \beta e^{-\beta t})}{(\gamma - \beta)} + \frac{L_2 \beta (\alpha - \beta) e^{-\beta t}}{(L_2 + L_0)(\beta^2 + \omega^2)} - \frac{Z_B}{Z_C} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right]$$

ou seja:

$$B = KL_0 \left[\left(\frac{R_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(e^{-\beta t} - e^{-\gamma t})}{(\gamma - \beta)} + \left(\frac{L_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(\gamma e^{-\gamma t} - \beta e^{-\beta t})}{(\gamma - \beta)} + \frac{L_2 \beta (\alpha - \beta) e^{-\beta t}}{(L_2 + L_0)(\beta^2 + \omega^2)} - \frac{Z_B}{Z_C} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right] \quad (\text{A.7})$$

Em geral, as seguintes relações existirão:

$L_0 \gg L_2$, $\omega L_0 \gg R_2$, $L_2 \gg 1$, $\omega \approx 377$ sendo, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ e $f = 60$ Hz

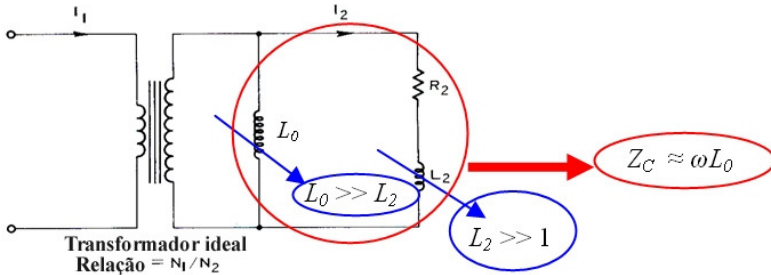


Figura A.2 - Circuito equivalente de TC bucha em estudo.

$$B = KL_0 \left[\left(\frac{R_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(e^{-\beta \cdot t} - e^{-\gamma \cdot t})}{(\gamma - \beta)} + \left(\frac{L_2}{L_2 + L_0} \right) \frac{(\gamma e^{-\gamma \cdot t} - \beta e^{-\beta \cdot t})}{(\gamma - \beta)} + \frac{L_2 \beta (\alpha - \beta) e^{-\beta \cdot t}}{(L_2 + L_0)(\beta^2 + \omega^2)} - \frac{Z_B}{Z_C} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right]$$

Tendência a se comportar como a componente resistiva da carga "Z", pois $Z_B \ll Z_C$, logo podemos considerar $Z_B \approx R_2$

Tendência a se comportar como a impedância total da carga "Z" = $\omega \cdot L_0$, pois $Z_C \gg Z_B$

Com estas relações, o segundo, terceiro e quarto termos na equação (A.7) são desprezíveis, e usando as seguintes substituições:

O fator de potência da carga é expresso por $\cos \theta = R_2 / Z$

$$\frac{Z_B}{Z_C} \cong \frac{R_2}{Z} = \cos \theta \Rightarrow \frac{Z}{R_2} \cong \frac{1}{\cos \theta}$$

$$\cos 90^\circ = 0 \quad \text{se: } (\omega t + \theta) = a \quad \text{e} \quad \delta = b = 90^\circ$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_0}{R_2}\right) \cong 90^\circ \quad Z_C \approx \omega L_0 \approx L_2 + L_0$$

$$\begin{aligned} \cos(a-b) &= \cos a \cos b + \operatorname{sen} a \operatorname{sen} b \\ &= \cos a \cos 90^\circ + \operatorname{sen} a \operatorname{sen} 90^\circ \\ &= \cos a \cdot 0 + \operatorname{sen} a = \operatorname{sen} a \end{aligned}$$

$$\cos(a-b) = \operatorname{sen} a$$

Então tem-se:

$$B = KL_0 \left[\frac{R_2(e^{-\beta t} - e^{-\gamma t})}{\omega L_0 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} - \frac{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 (\omega L_0)^2}} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \right]$$

$$B = KL_0 \left[\frac{R_2(e^{-\beta t} - e^{-\gamma t})}{\omega L_0 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} - \frac{\sqrt{\frac{1}{\omega^2 (R_2^2 \omega^2 + \omega^4 L_2^2)}}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^4 L_0^2}} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \right]$$

$$B = KL_0 \left[\frac{R_2(e^{-\beta t} - e^{-\gamma t})}{\omega L_0 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} - \frac{\sqrt{R_2^2 \omega^2 + \omega^4 L_2^2}}{\omega \sqrt{R_2^2 + \omega^4 L_0^2}} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \right]$$

$$\sqrt{R_2^2 \omega^2 + \omega^4 L_2^2} \ll \sqrt{R_2^2 + \omega^4 L_0^2} \quad \sqrt{R_2^2 \omega^2 + \omega^4 L_2^2} \cong R_2 \quad \sqrt{R_2^2 + \omega^4 L_0^2} \cong Z$$

Portanto:

$$B = K \frac{R_2}{\omega} \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{\frac{t}{T_2}} - e^{\frac{t}{T_1}} \right) - \frac{1}{\cos \theta} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \right] \quad (\text{A.8})$$

A admissão de uma simplificação além desta que fornece um resultado ligeiramente pessimista é admitir valores máximo negativo para o termo $\operatorname{sen}(\omega t + \theta)$.

Isto é, admitir que: $\operatorname{sen}(\omega t + \theta) = -1$

Então a expressão final para a densidade de fluxo instantânea para um TC com uma carga resistiva e indutiva se torna:

$$B = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{SN_2^2 \omega} \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{\frac{t}{T_2}} - e^{\frac{t}{T_1}} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \right] \quad (\text{A.9})$$

Se o TC tiver somente uma carga resistiva, a expressão para a densidade de fluxo instantânea se torna:

$$B = \frac{\sqrt{2}I_1R_2}{SN_2^2\omega} \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \right] \quad (\text{A.10})$$

ANEXO B - Sobre do fator de saturação

O Anexo B apresenta o Apêndice III do documento IEEE 76 [2] sobre a derivação da equação do fator de saturação para determinação do tempo de saturação através de curvas.

A expressão usada para desenvolver as curvas de tempo de saturação é derivada da equação da densidade de fluxo para um TC com **carga resistiva** (Equação A.10, Apêndice II).

Considerando:

B_{max} como máximo valor da densidade de fluxo B , quando B é alternante.

V_x como a tensão induzida secundária eficaz para o ponto de saturação.

B_x é o valor de B_{max} quando a tensão eficaz induzida no núcleo de um TC é a tensão V_x .

Deixando, $B = B_x$ e

$$B_x = \frac{\sqrt{2}.V_x}{\omega.S.N_2} \quad (\text{B.1})$$

Substituindo a expressão (B.1) na equação (A.10) e rearranjando os termos, a equação simplifica para a seguinte:

$$\frac{\sqrt{2}.V_x}{\omega.S.N_2} = \frac{\sqrt{2}.I_1.R_2}{S.N_2} \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \right]$$

Assim:

$$K_s = \frac{V_x N_2}{I_1 R_2} = \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \right] \quad (\text{B.2})$$

K_s é o fator de saturação do TC.

Uma similar expressão pode ser derivada para o TC com **carga resistiva e indutiva**:

$$K_s = \frac{V_x N_2}{I_1 R_2} = \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \right] \quad (\text{B.3})$$

Quando $T_1 = T_2$, a equação (B.2) se torna:

$$K_s = \frac{V_x N_2}{I_1 R_2} = \omega e^{-\frac{t}{T_1}} + 1 \quad (\text{B.4})$$

ANEXO C - Classificação dos TC de proteção conforme Normas

C1 CLASSIFICAÇÃO DOS TC PARA PROTEÇÃO QUANTO À IMPEDÂNCIA

A NBR 6856/1992 da ABNT agrupa os TC para proteção, tendo em vista a impedância do enrolamento secundário, em duas classes:

1ª) Transformador de corrente classe B:

TC que possui baixa impedância interna, isto é, aquele cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor desprezível. Constituem exemplos: os TC de núcleo toroidal com enrolamento secundário uniformemente distribuído.

2ª) Transformador de corrente classe A:

TC que possui alta impedância interna, isto é, aquele cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor considerável. Nesta classe se enquadram todos os TC exceto os que são definidos como classe B.

Observação:

Tanto nas antigas normas americanas (ASA) como nas brasileiras (ABNT-EB251) havia uma diferenciação das execuções A = alta impedância (H = High Impedance) e B = baixa impedância (L = Low Impedance) nos limites de carga e tensões secundárias.

a) Classe A = Classe H

A carga nominal deveria ser mantida constante de 5 a 20 vezes a corrente nominal. Exemplo de nomenclatura adotada pela ABNT e pela ANSI para o mesmo TC (ver Figura C.1):

ABNT - A10F20C100

A: classe do transformador indica que o núcleo do TC tem uma reatância de dispersão secundária alta;

10: erro percentual igual a 10%;

F20: fator de sobrecorrente igual a 20, ou seja $F = F_s = 20xI_n$;

C100: carga nominal de 100 VA.

ANSI - 10H400

H: classe do transformador indica que o núcleo do TC tem uma reatância de dispersão secundária alta;

10: erro percentual igual a 10%;
 400: tensão sobre a carga nominal quando circula sobre esta uma corrente igual a $20xI_n$.

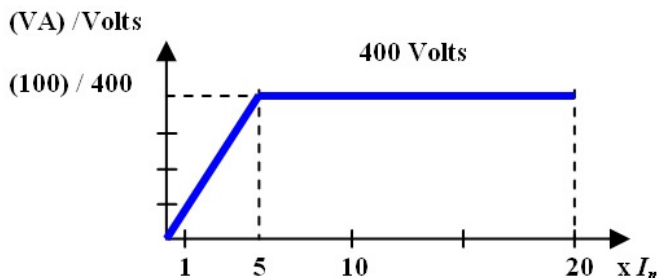


Figura C.1 - TC classe A antiga.

b) classe B = classe L:

A carga nominal deveria ser válida somente à $20 x I_n$ e proporcional entre 1 e $20 x I_n$. Exemplo de nomenclatura adotada pela ABNT e pela ANSI para o mesmo TC (Ver Figura C.2):

ABNT - B10F20C100

B: classe do transformador indica que o núcleo do TC tem uma reatância de dispersão secundária baixa;

10: erro percentual igual a 10%;

F20: fator de sobrecorrente igual a 20, ou seja $F = F_s = 20xI_n$;

C100: carga nominal de 100 VA.

ANSI - 10L400

L: classe do transformadorâm indica que o núcleo do TC tem uma reatância de dispersão secundária baixa;

10: erro percentual igual a 10%;

400: tensão sobre a carga nominal quando circula sobre esta uma corrente igual a $20xI_n$.

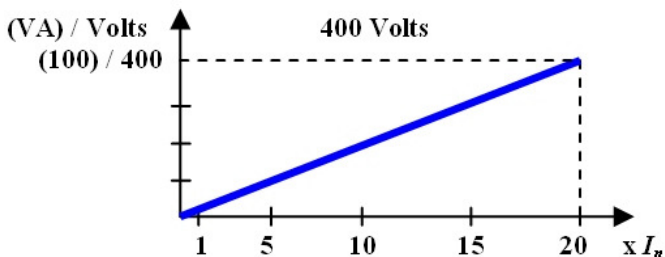


Figura C.2 - TC classe B antiga.

Atualmente (NBR-6856/1981 em diante) não há a diferenciação e a classe de exatidão é válida para todas as correntes de 1 a 20 vezes a corrente nominal (ver Figura C.3).

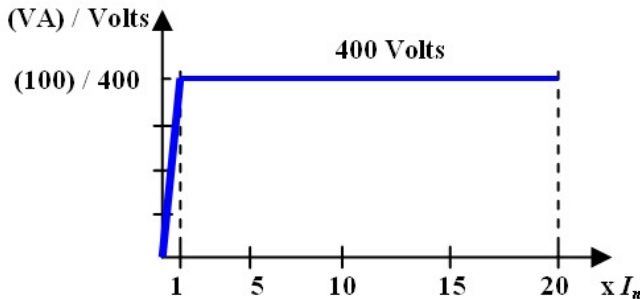


Figura C.3 - TC classes A e B atual.

As cargas padronizadas, obedecendo às especificações da ABNT e ANSI, estão relacionadas na Tabela C.1. Lembrando, que estas cargas não foram “criadas” aleatoriamente, mas sim tendo em vista os tipos de instrumentos elétricos que são usualmente empregados com os quais tais cargas se assemelham em características elétricas. Observações:

- Pela ABNT a letra C representa Carga. Portanto, o número que segue a letra indica a potência em VA. Por exemplo: C 2,5 informa que é uma carga de 2,5 VA. $I^2 Z = VA$ como $I = 5$ A então: $5^2 \times 0,1 = 2,5$ VA.
- Enquanto que pela ANSI a letra B representa Burden e o número que segue indica a impedância Z da carga. Por exemplo: B-0,1 informa que é uma carga de impedância 0,1 Ω . Portanto, C10 na ANSI representa: $I F_s Z = V$ como $I = 5$ A e $F_s = 20$ então $5 \cdot 20 \cdot 0,1 = 10$ V
A letra C na ANSI representa que o valor de 10 volt foi Calculado e não medido.
- Quando a corrente secundária nominal for diferente de 5 A, os valores de resistência, reatância indutiva e impedância das cargas nominais são obtidos multiplicando-se os valores, da Tabela C.1 referente as características à 60Hz para 5 A, pelo quadrado da relação entre 5 A e a corrente secundária nominal. Exemplo: Uma carga C25, referida a 1 A, teria:

$$Z = 1\Omega \times \left(\frac{5A}{1A}\right)^2 = 25\Omega$$

$$R = 0,5\Omega \times \left(\frac{5A}{1A}\right)^2 = 12,5\Omega$$

$$X = 0,866\Omega \times \left(\frac{5A}{1A}\right)^2 = 21,65\Omega$$

Tabela C.1- Cargas nominais padronizadas para ensaios de TC

Designação		Características à 60 [Hz] 5 [A]							Características à 60 [Hz] 1 [A]			Circuito	
		ANSI	ABNT	[VA]	Rc [Ω]	Lc [mH]	Xc [Ω]	Zc [Ω]	Tensão à 20x5A [V]	Fator de Potência FP	Zc [Ω]		Rc [Ω]
B-0,1	B-0,1	C2,5	2,5	0,09	0,116	0,044	0,1	10	0,9	Medição	2,5		
B-0,2	B-0,2	C5,0	5,0	0,18	0,232	0,087	0,2	20			5,0		
B-0,5	B-0,5	C12,5	12,5	0,45	0,580	0,218	0,5	50			12,5		
B-0,9	B-0,9	C22,5	22,5	0,81	1,040	0,392	0,9	90			22,5		
B-1,8	B-1,8	C45	45,0	1,62	2,080	0,785	1,8	180			45,0		
B-3,6	B-3,6	C90	90,0	3,24	4,162	1,569	3,6	360			90,0		
B-1	B-1	C25	25	0,50	2,300	0,866	1,0	100			25,0		
B-2	B-2	C50	50	1,00	4,600	1,732	2,0	200			50,0		
B-4	B-4	C100	100	2,00	9,200	3,464	4,0	400			100,0		
B-8	B-8	C200	200	4,00	18,400	6,928	8,0	800	200,0				
									0,5	Proteção	200,0		
											50,00		
											86,60		

C2 VERIFICAÇÃO DA EXATIDÃO DE UM TC CLÁSSICO PARA PROTEÇÃO CONFORME ABNT

O método ideal para se verificar o erro de relação percentual ε_c de um TC para proteção, conseqüentemente a sua classe de exatidão, correspondente a uma determinada carga padronizada C (Tabela C.1) posta no seu secundário para cada corrente da nominal até 20 vezes a nominal, seria conforme mostra a Figura C.4 (a). Neste caso se mediria no secundário a corrente induzida I_2 correspondente a cada corrente $I_1 = F_s I_{1n}$ aplicada ao primário, onde $F_s = 1, 2, 3, \dots, 19, 20$, e em seguida se calcularia o erro ε_c para cada medição feita:

$$\varepsilon_c = \frac{K_c I_2 - I_1}{I_1} \times 100 \quad (\text{C.1})$$

onde, a relação nominal K_c é a relação entre os valores nominais I_{1n} e I_{2n} das correntes primária e secundária, respectivamente, correntes estas para as quais o TC foi projetado e construído.

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = K_c \quad (\text{C.2})$$

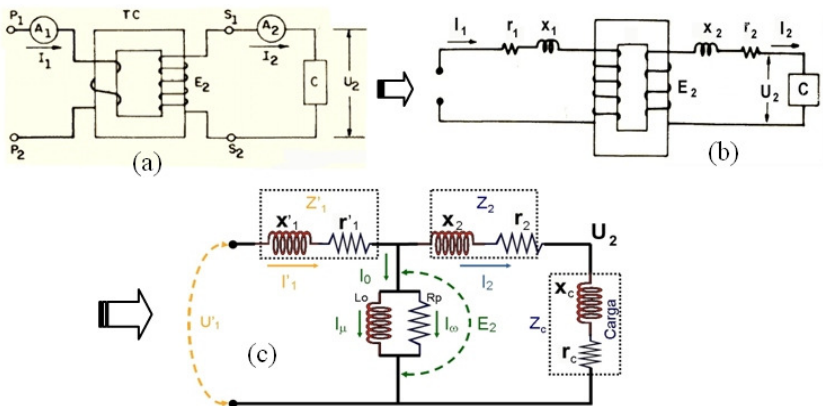


Figura C.4 – Circuito equivalente de um TC normal [1][4][10].

A “relação nominal” é a indicada pelo fabricante na placa de identificação do TC. É chamada também de “relação de transformação”, sendo nas aplicações práticas considerada uma constante para cada TC. Ela é aproximadamente igual à relação entre as espiras:

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = K_c \cong \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{C.3})$$

Vê-se de imediato que o método do circuito da Figura C.4 (a) não é nada prático, e por isto não é utilizado. Na prática prefere-se a sistemática discutida a seguir. Como pode ser visto na Figura C.4 (a), a cada corrente I_1 aplicada ao primário corresponde a uma f.e.m. E_2 induzida no secundário, a qual origina a corrente I_2 :

$$E_2 = U_2 + r_2 I_2 + jx_2 I_2 \quad (C.6)$$

Então, o módulo de E_2 tem a forma:

$$E_2 = I_2 \sqrt{(r_c + r_2)^2 + (x_c + x_2)^2} \quad (C.7)$$

O erro de relação ε_c é determinado adotando-se o seguinte procedimento por ocasião do ensaio:

- 1º) Com base na expressão (C.7) calcula-se a f.e.m. E_2 que deverá existir no secundário do TC correspondente a cada corrente $I_2 = F_s I_{2n}$ onde F_s pode ser igual a: 2, 3, ..., 19, 20, sendo r_2 e x_2 medidos previamente na temperatura ambiente (T_{amb}). Sabendo-se que a resistência varia com a temperatura quando o transformador está em operação normal, torna-se portanto, necessário a correção do valor de r_2 à 75°C no caso de trafos de classe de temperatura 105° a 130°C e à 115°C no caso de trafos de classe de temperatura 115° a 180°C . Portanto, tem-se para TC as seguintes classes de temperatura:

Tabela C.2 - Classes de temperatura para TC

Tipo de TC	Classe de temperatura
Com isolação líquida e conservador ou gás inerte sobre o líquido isolante	A(105°C)
Com isolação líquida e sem conservador ou gás inerte sobre o líquido isolante	A(105°C)
Com isolação sólida	A(105°C) E(120°C) B(130°C) F(155°C) H(180°C)

No caso de TC com isolação líquida (óleo isolante) que é o comum nos TC do sistema de energia, a correção é feita através das seguintes fórmulas:

- a) Enrolamento de cobre eletrolítico:

$$R_{75^\circ\text{C}} = \frac{234,5 + 75^\circ\text{C}}{234,5 + T_{amb}} \times R_m \quad (C.8)$$

b) Enrolamento de Alumínio:

$$R_{75^{\circ}C} = \frac{225 + 75^{\circ}C}{225 + T_{amb}} \times R_m \quad (C.9)$$

onde:

R_m : Resistência medida na temperatura ambiente;

T_{amb} : Temperatura ambiente em °C.

- 2º) Deixando-se o primário do TC aberto, conforme Figura C.5, aplica-se ao seu secundário a tensão V_2 de módulo igual ao de E_2 calculado em (C.7) e mede-se a corrente de excitação i_0 correspondente por meio do amperímetro _A_. A tensão V_2 é medida pelo voltímetro _V_ e recebe o nome de “tensão de excitação secundária”.

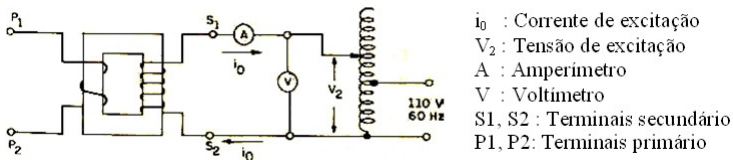


Figura C.5 – Circuito de ensaio de saturação [4].

- 3º) Com este valor de i_0 medido, calcula-se o erro ε_c utilizando-se de três considerações feitas a seguir:

a) Em TC para proteção é perfeitamente aceitável a aproximação:

$$\varepsilon_c = -\frac{I_0}{I_1} \quad (C.10)$$

b) A corrente de excitação I_0 indicada na expressão (C.10) é medida no primário do TC. Como no presente ensaio a corrente de excitação i_0 é medida no secundário, tem-se que:

$$I_0 = K_c i_0 \quad (C.11)$$

c) A corrente secundária $I_2 = F_s I_{2n}$ utilizada no cálculo de E_2 tem um valor equivalente no primário:

$$I_1 = K_c F_s I_{2n} \quad (C.12)$$

Assim sendo, com estas três considerações, a expressão (C.10) toma a forma abaixo para o caso de TC para proteção com ensaios feitos no secundário (lado de 5 A):

$$\varepsilon_c \% = \frac{i_0}{F_s I_{2n}} \times 100 \quad (C.13)$$

Observação:

Após os ensaios, o TC deve ser submetido a um processo de desmagnetização.

Exemplo C.2-1:

Determinar o erro de relação ε_c na condição de $I_2 = 20I_{2n}$ de um TC para proteção especificado conforme ABNT, ver Tabela C.3:

Tabela C.3 - Dados do TC

Classe	Corrente primária nominal	Relação nominal	Frequência de operação	Material do enrolamento	Tipo de isolante	Nível de isolamento
A200	600 A	120:1	60Hz	Cobre	Óleo	69 kV

Solução:

a) Características do TC sob ensaio (valores medidos previamente):

$r_2 = 0,252 \Omega$, medição feita à 20°C, corresponde a $r_2 = 0,307 \Omega$ à 75°C

$x_2 = 1,62 \Omega$

b) A classe A200 (Tabela C.4 – Cargas padronizadas) corresponde a carga padronizada C50 cujas características são as seguintes (Tabela C.1):

$r_c = 1\Omega$, $L = 4,6 \text{ m}\Omega$ e $x_c = 4,6 \times 10^{-3} \times 2\pi \times 60 = 1,734 \Omega$

c) Cálculo da tensão E_2 :

$$E_2 = 20 \times 5 \sqrt{(1 + 0,307)^2 + (1,734 + 1,62)^2}$$

$$E_2 = 100 \times 3,59 \text{ então: } E_2 = 359 \text{ V}$$

d) Aplicada a “tensão de excitação secundária” $V_2 = 359 \text{ V}$ ao secundário do TC semelhante a Figura C.5, obtém-se uma medida de corrente $i_0 = 1,30\text{A}$.

e) Cálculo do erro ε_c por meio da expressão (C.13):

$$\varepsilon_c \% = \frac{1,30}{20 \times 5} \times 100 \text{ então: } \varepsilon_c = 1,30\%$$

Nesse exemplo se quer ressaltar que $E_2 = 359 \text{ V}$ representa a f.e.m. que será induzida no secundário do TC quando a corrente no primário for $I_1 = 20 \times 600 \text{ A}$. Estes 359 V devem ser suficientes para suprirem a queda de tensão interna no secundário e mais os 200 V exigidos na especificação para os terminais da carga C50. A Figura C.6 mostra o diagrama fasorial referente ao exemplo, na condição de $I_2 = 100 \text{ A}$:

$$\text{a) } \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{x_c}{r_c} = \frac{1,734}{1} \Rightarrow \theta_2 = 60^\circ$$

$$b) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{x_c + x_2}{r_c + r_2} = \frac{3,352}{1,307} \Rightarrow \delta = 68,7^\circ$$

$$c) \quad \text{Queda de tensão interna:}$$

$$u = 100\sqrt{(0,307)^2 + (1,62)^2} \Rightarrow u = 165V$$

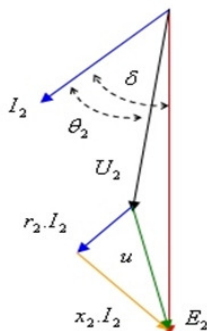


Figura C.6 - Diagrama fasorial-1 [4].

Tabela C.4 - Cargas padronizadas

Carga Nominal ABNT	Impedância Ω	Tensão secundária nominal correspondente V	TC normalizado classe A	TC normalizado classe B
C 2,5	0,1	10	A 10	B 10
C 5,0	0,2	20	A 20	B 20
C 12,5	0,5	50	A 50	B 50
C 25	1,0	100	A 100	B 100
C 50	2,0	200	A 200	B 200
C 100	4,0	400	A 400	B 400
C 200	8,0	800	A 800	B 800

No exemplo C.2-1, o erro de relação ε_c poderia ser também determinado em outros pontos conforme fossem os valores arbitrados para o coeficiente F_s pelo executante do ensaio para o cálculo dos respectivos valores de E_2 . Isto é tão verdade que na prática é frequente traçar-se a “curva de saturação secundária” ou “curva de saturação”, levantada atribuindo-se vários valores à “tensão de excitação secundária” V_2 e medindo-se em cada posição o respectivo valor da corrente de excitação i_0 . Inclusive, o comprador pode exigir do fabricante o

levantamento da “curva de saturação” por ocasião da recepção dos TCs na fábrica, devendo esta exigência estar explícita na sua “ordem de compra”.

A Figura C.7 mostra o diagrama fasorial referente ao exemplo C.2-1, na condição de $I_2 = 100$ A:

a)
$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{x_c}{r_c} = \frac{1,734}{1} \quad \text{corresponde a} \quad \theta_2 = 60^\circ$$

b)
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{x_c + x_2}{r_c + r_2} = \frac{1,734 + 0}{1 + 0,487} \quad \text{corresponde a} \quad \delta = 49^\circ$$

c) Queda de tensão interna:

$$u = 100 \sqrt{(0,487)^2 + (0)^2} \quad \text{corresponde a} \quad u = 48,7V$$

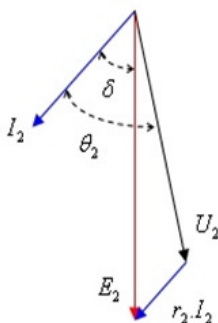


Figura C.7 - Diagrama fasorial-2 [4].

Exemplo C.2-2:

A Tabela C.6 contém os valores da “tensão de excitação secundária” V_2 e os correspondentes da corrente de excitação i_0 obtidos por ocasião do ensaio de um TC para proteção, assim especificado na Tabela C.5:

Tabela C.5 - Especificação do TC

Classe	Corrente primária nominal	Relação nominal	Frequência de operação	Material do enrolamento	Tipo de isolante	Nível de isolamento
B200	600 A	120:1	60Hz	Cobre	Óleo	69kV

Tabela C.6 - Valores de ensaios

V_2 (V)	22,2	44,4	88,8	133,2	177,6	222	266,4	281,94
i_0 (A)	0,0102	0,0175	0,029	0,039	0,051	0,075	0,54	3,6

- 1º) Traçar a “curva de saturação”.
- 2º) Determinar os erros de relação correspondente a $F_s = 20, 15, 10$ e 5 , respectivamente, sabendo que as características do TC sob ensaio são as seguintes:
- $r_2 = 0,395 \Omega$, medição feita à $16,4^\circ\text{C}$, correspondete a $r_2 = 0,487 \Omega$ à 75°C
 - $x_2 = 0 \Omega$

Solução: 1º) A “curva de saturação” está mostrada na Figura C.8

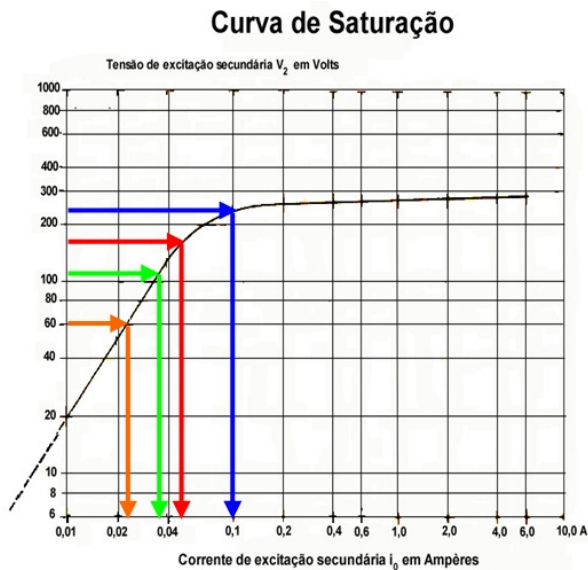


Figura C.8 - Resultado do exemplo [4].

- 2º) Cálculo dos erros de relação:
A classe B200 (Tabela C.3) corresponde a carga padronizada C50 cujas características são as seguintes (Tabela C.1):

$$r_c = 1 \Omega$$

$$x_c = 1,734 \Omega$$

Cálculo da tensão E_2 , sendo que para carga B200, tem-se $x_2 \cong 0$

$$E_2 = F_S I_{2n} \sqrt{(1 + 0,487)^2 + (1,734)^2}$$

$$E_2 = 2,2844 F_S I_{2n} \text{ volt}$$

O resultado final do erro de relação para diferentes F_S encontra-se na Tabela C.7.

Tabela C.7 - Cálculo de ε para $F_S = 20, 15, 10$ e 5 :

Dados de placa		Calculado	Dados da curva de saturação		Erro de relação $\varepsilon_c = \frac{i_0}{F_S I_{2n}} \times 100$
I_{2n} (A)	Fator de sobre-corrente F_S	E_2 (V)	V_2 (V)	i_0 (A)	(%)
5	20	228,44	228,44	0,1	0,1
	15	171,33	171,33	0,055	0,073
	10	114,22	114,22	0,038	0,076
	5	57,11	57,11	0,026	0,104

Observação:

A corrente de excitação i_0 pode atingir até o valor de 10 A quando for aplicada a “tensão de excitação secundária” V_2 correspondente ao máximo de $I_2 = 20I_{2n}$ e o TC ainda será considerado de classe de exatidão 10.

C3 CLASSIFICAÇÃO DO TC DE PROTEÇÃO SEGUNDO SEUS DESEMPENHOS FUNCIONAIS CONSIDERADOS POR DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS

A norma ABNT é praticamente uma cópia da norma ANSI. Por isso, é importante conhecer o histórico da evolução da classe de exatidão pela visão da ANSI e IEC, sendo que para isto se abordará o que relata o documento: IEEE Std C37.110-1996 [17] e a IEC 60044-1 edição 1.2 2003-02 [15].

C3.1 IEEE Std C37.110-1996 [17] - IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes (Guia para aplicação de Transformadores de Corrente usados para proteção a relés)

De acordo com o documento IEEE Std C37.110-1996 [17], a classe de exatidão do TC pela ANSI é determinada por uma letra de designação e a tensão nominal do terminal secundário. Estes descrevem efetivamente o desempenho em regime permanente (ver IEEE Std C57.13-1993, 6.4.1 – IEEE *Standard Requirements for Instrument Transformers* – IEEE requisitos de normas para transformadores de instrumentação [13]). A designação do código da letra são as seguintes (ver Tabela C.8):

Tabela C.8 - Códigos de letras conforme ANSI

C	Indica que a perda de fluxo é desprezível e a característica de excitação pode ser usada diretamente para determinar o desempenho. O erro de relação do TC pode então ser calculado. É assumido que a carga e a corrente de excitação estão em fase e que o enrolamento secundário é uniformemente distribuído (ver 8.1.10 da IEEE Std C57.13-1993 [13] para mais detalhes).
K	É o mesmo que a categoria C, mas a tensão do ponto de joelho da curva de saturação deve estar pelo menos 70% da tensão nominal do terminal secundário.
T	Indica que o erro de relação necessita ser determinado por teste. O TC de classe T tem um apreciável efeito de perda de fluxo no núcleo e contribui para um apreciável erro de relação.
H, L	São as antigas classificações ANSI. Havia duas classes de exatidão reconhecidas: 2,5% e 10%. Os TCs eram especificados na seguinte maneira: 10L200, 2,5H400, etc. O primeiro número indicava a classe de exatidão e o último número indicava a classe da tensão secundária. TC L eram classificados para a carga específica e para 20 vezes a corrente normal. TC H eram classificados para qualquer combinação de carga de 5 vezes até 20 vezes a corrente normal. Estas faixas são aplicáveis somente para antigos TC, a maioria das vezes, fabricados antes de 1954.

A tensão nominal no terminal secundário é a tensão secundária do TC que o TC apresentará quando este é conectado a uma carga secundária padrão, para 20 vezes a corrente secundária nominal, sem exceder a 10% o erro de relação. Além do mais, a correção da relação deve estar limitada a 10% para

qualquer corrente de 1 até 20 vezes a corrente secundária nominal para a carga padrão ou qualquer outra carga padrão menor. Esta tensão nominal atribuída se aplica a relação do enrolamento total somente.

Se utilizado um TC de um *tap* ou multirrelações, a capacidade de tensão é diretamente proporcional a relação entre o valor do *tap* sendo usado e a capacidade do enrolamento total, contanto que os enrolamentos sejam plenamente distribuídos por volta do núcleo. Este é usualmente o caso de TC fabricados depois de 1978, mas não necessariamente com os TC fabricados antes desta data.

Por exemplo, TC classe de exatidão C100 significa que o erro de relação não excederá 10% para qualquer corrente de 1 até 20 vezes a corrente secundária nominal com uma carga padrão de $1,0 \Omega$ ($1,0 \Omega$ vezes 20 vezes a corrente secundária nominal é igual a 100 V, no caso $I_{2n} = 5$ A). Quase todos os TCs usados para aplicação de relés de proteção são cobertos pela classificação C e K. Isto inclui TC de bucha com enrolamentos distribuídos uniformemente e outros TC com núcleo com perdas de fluxo mínima.

Nota: A Tabela C.1 mostra os valores padrões de C e das cargas padrão para proteção.

C3.1.1 Determinação da classificação C ou K usando a curva de excitação

A Figura C.9 e a Figura C.10 mostram respectivamente a curva de excitação e o circuito equivalente do TC que será referência das avaliações apresentadas a seguir. Na Figura C.9, I_0 é a corrente de excitação e I_2 é a corrente secundária que circula na carga.

Tensão do ponto de joelho:

A tensão do ponto de joelho de um TC com núcleo sem entreferro é definida como o ponto de máxima permeabilidade na curva de excitação, plotada num gráfico de eixo log-log com década quadrática, onde a tangente da curva forma um ângulo de 45° com a abscissa.

É mostrado no exemplo de curva de excitação apresentado na Figura C.9 que o ponto de joelho está por volta de 240V, para o enrolamento 1200/5.

Limites do ponto de joelho:

Os valores da tensão a partir de uma dada corrente de excitação para qualquer unidade de acréscimo, acima da linha do ponto de joelho, não serão menor que 95% do valor da curva.

Os valores da corrente de excitação para um dado valor de tensão para qualquer unidade, abaixo da linha do ponto de Joelho, não excederão o valor da curva por mais que 25%.

É importante lembrar que as curvas de excitação do fabricante são baseada em cálculos cuja finalidade é especificar o mínimo desempenho garantido. As normas industriais não exigem que as curvas sejam uma representação exata dos valores medidos. Os requisitos da ANSI/IEEE, como já citado, é que na parte linear a corrente de excitação não deve exceder o valor calculado por mais que 25%, já na região de saturação a tensão não deve ser menor que 95% do valor indicado. Não há limite estabelecido no como melhor um TC pode ser em relação ao desempenho garantido. É importante lembrar disto quando usar TCs de diferentes projetos ou fabricantes para aplicações em relés diferenciais. Neste caso um bom casamento do desempenho é importante, assim pode ser necessário efetivamente as medidas da curva de excitação do TC.

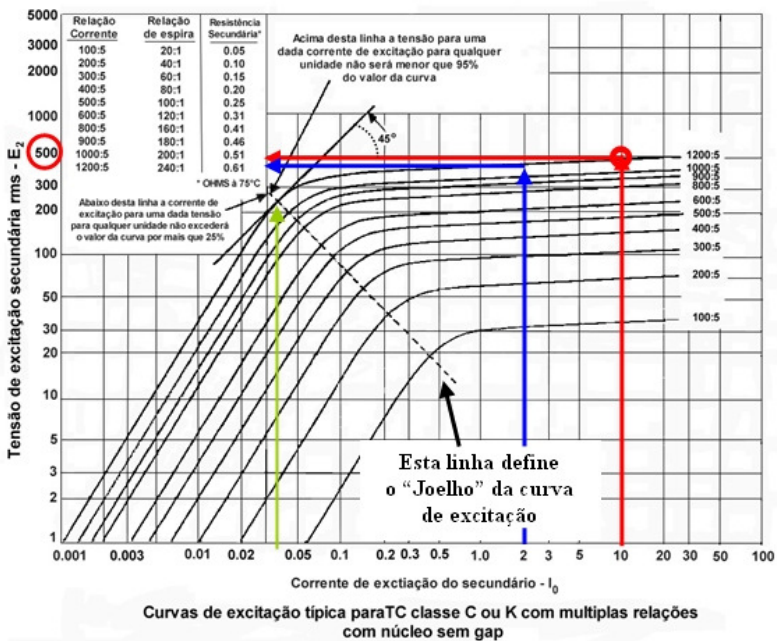


Figura C.9 - Curva de excitação classe C ou K da ANSI [17].

A escolha da relação de $\frac{I_0}{I_2} = 0,1$ define um erro de 10% (I_0 e I_2 são

admitidas estarem em fase). Portanto, para o TC 1200:5 da Figura C.9, tem-se: $I_2 = 100$ A (20 vezes a corrente secundária nominal) corresponde a $I_0 = 10$ A. A tensão de excitação secundária, E_2 para a relação do enrolamento total, correspondente a $I_0 = 10$ A, é obtida da curva de excitação. A Figura C.9 mostra que com $I_0 = 10$ A, E_2 é 500 V (linha vermelha). Embora a carga padrão envolva fator de potência, um rápido cálculo aritmético (pior caso) da tensão no terminal secundário, U_2 , pode determinar a classificação uma vez que os valores padrões de tensão para corrente secundária de 5 A são: 10 V, 20 V, 50 V, 100 V, 200 V, 400 V, ou 800 V (ver Tabela C.4 e Tabela C.1).

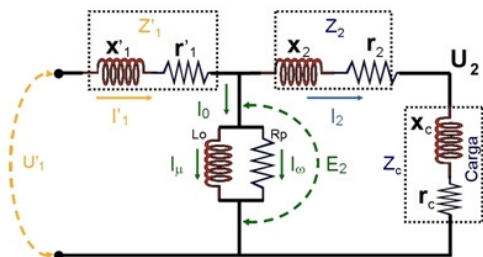
Da Figura C.10:

$U_2 = E_2 - (I_2 \times r_2)$, pois, (x_2 é desprezível)

$E_2 = 500$ V e $r_2 = 0,61 \Omega$ (da Figura C.9)

$$I_2 \times r_2 = 100 \times 0,61 = 61 \text{ V}$$

$U_2 = 500 - 61$ obtém-se $U_2 = 439$ V. Pela seleção da menor classificação de tensão mais próxima, este TC é determinado com tendo uma classificação C400.



I'_1 : Corrente no primário referida ao secundário	U'_1 : Tensão eficaz primária
I_2 : Corrente no secundário do TC	U_2 : Tensão eficaz secundária
Z'_1 : Impedância do primário referida ao secundário	E_2 : Força eletromotriz secundária (valor eficaz)
Z_2 : Impedância do secundário	Φ : Fluxo magnético útil no núcleo produzido por I_μ
Z_c : Carga ligada no secundário do TC	r'_1 : Resistência ôhmica do enrolamento primário
I_0 : Corrente de excitação/magnetização do TC	x'_1 : Reatância de dispersão do enrolamento primário
I_μ : Corrente de magnetização do núcleo do TC	r_2 : Resistência ôhmica do enrolamento secundário
I_ω : Corrente de perdas (Histerese e Joule)	x_2 : Reatância de dispersão do enrolamento secundário
R_p : Resistência equivalente as perdas do TC	x_c : Reatância da carga
L_0 : Indutância de magnetização do núcleo	r_c : Resistência ôhmica da carga

Figura C.10 – Circuito equivalente do TC [1][10].

Se o cálculo aritmético de U_2 é aproximado com respeito à classificação padrão de tensão, uma análise mais exata deve ser feita com uma carga padrão, Z_c , para 0,5 de fator de potência, conforme Tabela C.1 para C400. Para o TC mostrado na Figura C.9 corresponde a uma carga padrão de 4 Ω :

$$\begin{aligned} E_2 &= I_2 \times (r_2 + Z_c) \text{ referente a Figura C.10} \\ &= 100 \times (0,61 + 2,0 + j3,464) \\ &= 261 + j346,4 \\ &= 434 \text{ V } \angle 53^\circ \end{aligned}$$

Reportando-se à Figura C.9 para $E_2 = 434\text{V}$, I_0 é aproximadamente 2,0A (linha azul). O erro, $\frac{I_0}{I_2} = 2/100$, é por volta de 2%, então o TC tem uma classificação

C400 porque para esta tensão no terminal secundário ($U_2 = I_2 \times Z_c = 400\text{V}$), o erro é <10%.

Quando o TC tem um entreferro, a definição da tensão do ponto de joelho é o ponto onde a tangente da curva faz um ângulo de 30° com a abscissa. Ver Figura C.11.

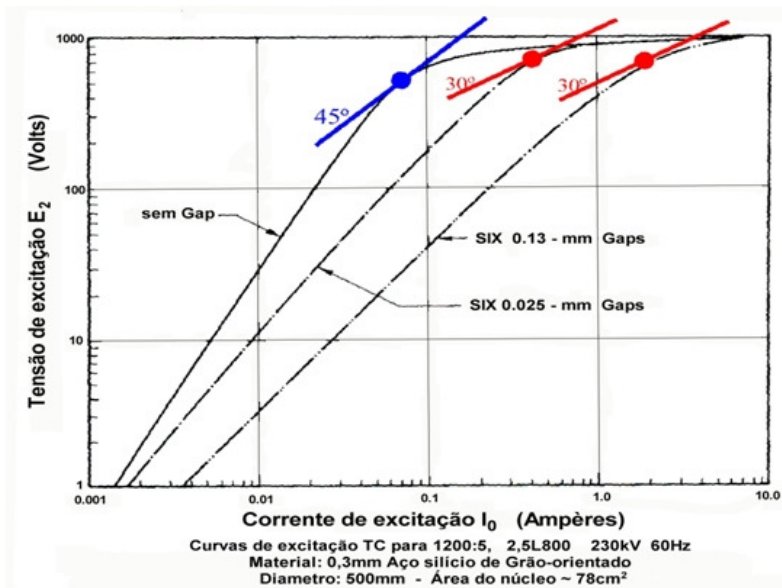


Figura C.11 - Ângulos determinação do ponto de joelho ANSI [2].

Exemplos do uso da classificação da exatidão para estimar o desempenho do TC em regime permanente:

Exemplo 1:

Um TC 1200/5, C400 com curva de excitação semelhante à Figura C.9, é conectado a uma carga de $2,0 \Omega$. Baseado na classificação da exatidão, qual é a máxima corrente de falta simétrica que pode ser aplicada neste TC sem exceder um erro de relação de 10%?

Resposta:

Baseado no critério que o TC pode entregar 20 vezes a corrente secundária nominal sem exceder o erro de relação em 10%, a máxima corrente de falta será $1200 \times 20 = 24000$ A. Porém, com uma carga de 2Ω , isto resulta em uma tensão abaixo do ponto de joelho do TC [$20 \times 5 \times (2) = 200$ V] e, como um caso prático, este estará dentro da exatidão de 10% para altas correntes. Isto pode somente ser determinado da curva de excitação ou curva de correção da relação e não da classificação da exatidão.

Por exemplo, um TC com características mostrada na Figura C.9 produzirá “entre” 180-240 A sem exceder o erro de relação em 10%, “dependendo do fator de potência” da carga de 2Ω . Então:

$$\frac{I_0}{I_2} \leq 0,1, \text{ ou seja, } \frac{I_0}{180} \text{ leva à } I_0 \leq 18A \text{ e } \frac{I_0}{240} \text{ leva à } I_0 \leq 24A$$

$$E_2 = I_2 \times (r_2 + Z_c) \rightarrow E_2 = 180 \times (0,61 + 2) = 469,8V < 500V$$

$$\rightarrow E_2 = 240 \times (0,61 + 2) = 626,4V > 500V$$

Este caso mostra que não se pode simplesmente observar se o erro está dentro de 10%, pois no exemplo dado acima, tanto na condição de 180 A e 240 A apesar de estarem dentro do erro de 10% estão na zona de saturação, portanto distorcendo o sinal que será entregue aos relés e isto não é o que se deseja.

Exemplo 2:

Um TC 1200/5, C400 é conectado no tap 1000/5. Qual é a máxima carga secundária que pode ser usada e ainda mantendo a exatidão nominal para 20 vezes a corrente secundária simétrica nominal?

Resposta:

Uma vez que a capacidade da tensão secundária é diretamente proporcional ao tap conectado, o TC suportará a tensão de $(1000 / 1200) \times 400$ V ou 333 V. Vinte vezes a corrente secundária nominal é 100A. Portanto, a máxima carga é 333 V / 100 A ou 3,33 Ω .

Como se vê para este exemplo de TC de relação 1200/5 o erro de 10 % equivale a $I_0 = 10$ A, E_2 é 500 V (circulo vermelho na Figura C.9). E escolhendo a classificação ANSI menor mais próxima encontramos 400V, que implicará o TC estar dentro do erro de 10 % quando aplicado uma carga padrão $Z_c = 4 \Omega$ com fator de potência 0,5 a tensão nos terminais do secundário será próxima de

400V. Sendo que a classificação “C” não especifica a que nível do ponto de Joelho se encontra esta tensão na curva de saturação. Neste exemplo o ponto de Joelho está próximo de 240 V, portanto $240 / 400 = 0,6$, ou seja, 60 % da tensão de 400 V, porém o que se espera de uma boa atuação da proteção é este valor de 400 V estivesse abaixo do ponto de Joelho, entre 50 % à 75 %. Portanto, $240 \times 0,5 = 120$ V e $240 \times 0,25 = 60$ V, logo a classe escolhida deveria ser C100 ou C50.

Se fosse classificação “K” este TC não atenderia a exigência de que o ponto de Joelho deverá ser 70 % maior que a tensão no terminal secundário, ou seja, $0,3 \times 240 = 72$ V o que implica que o K50 seria o escolhido e não K400. Em todos outros requisitos o TC classe K é igual, ou melhor que o TC classe C. A classe K será preferida para aplicações de relé de proteção [22].

A norma ANSI / IEEE C57.13 [13] reconhece três classes de TC para objetivo de proteção, mas somente o tipo “C”, de baixa dispersão, é usado em larga escala pela indústria. A classe foi nomeada “C” devido sua curva de excitação poder ser elaborada por cálculo. A classificação “C” somente garante que o TC pode entregar, com menos de 10 % de exatidão uma corrente de 20 vezes a corrente nominal, dentro dos sete valores de cargas padrão: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 2 – 4 e 8 ohm. As três primeiras são cargas para circuito de medição com fator de potência 0,9. As outras são cargas para circuito de proteção com um fator de potência de 0,5. O código para esta classificação de exatidão é a letra C seguida pela tensão sobre a carga para a carga especificada. A norma também especifica que o fabricante deve fornecer a curva de excitação típica e o valor da resistência do enrolamento secundário.

O ponto fraco da classificação C é que a tolerância para as curvas de excitação são muito grande, e o fator de remanência não faz parte da especificação. Portanto, o casamento dos TCs fabricados pela mesma norma pelos diferentes fabricantes é difícil. Uma tentativa foi fazer uma tolerância mais estreita pela introdução da classificação “K”, que coloca um limite na tensão do ponto de Joelho com respeito à tensão no terminal secundário nominal, mas não são muitos fabricantes que oferecem tais TC como produto padrão.

C3.1.2 Determinação do percentual de erro e a classificação ANSI da tensão para TC classe “T” usando as curvas de relação de sobrecorrente

Para TC classe “T”, a reatância de dispersão do secundário não é desprezível. Por esta razão, a norma IEEE C57.13-1993 [13] requer que os fabricantes forneçam as curvas de relação de sobrecorrente para estes TCs plotadas em coordenadas retangulares num papel em termos de corrente primária versus corrente secundária, de 1 até 22 vezes a corrente primária nominal, para todas as cargas padrão até a carga que cause uma correção de

relação de 50 %. A Figura C.12 é uma curva típica de relação de sobrecorrente para um TC classe “T”.

O erro percentual de um TC classe T pode facilmente ser calculado de uma curva da relação de sobrecorrente para qualquer carga padrão e uma corrente primária conhecida usando a seguinte relação:

$$\% erro = \left[\left(\frac{\text{Multiplo..da..}I_{1N}}{\text{Multiplo..da..}I_{2N}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (\text{C.14})$$

onde, I_{1N} é a corrente primária nominal e I_{2N} é a corrente secundária nominal.

Curva típica da relação de sobrecorrente para um TC classe “T”.

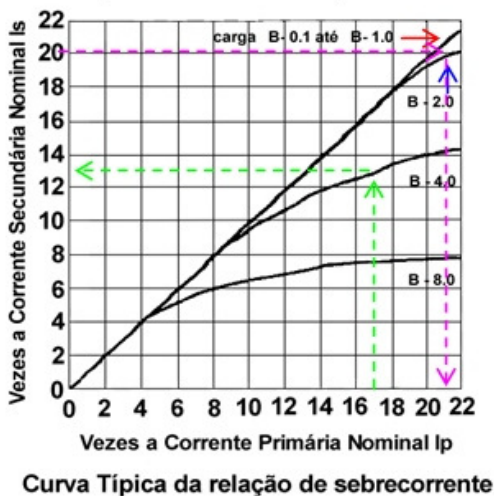


Figura C.12 - Relação de sobrecorrente - TC classe “T” [17].

Exemplo 1:

Da Figura C.12, encontre o percentual de erro de um TC classe T com carga padrão de 4 Ω conduzindo 17 vezes a corrente primária nominal. Quando “Vezez a Corrente Primária Nominal” igual a 17, então “Vezez a Corrente Secundária Nominal” é igual a 13 para intersecção de 17 com a curva de 4 Ω (ver seta pontilhada de cor verde).

Portanto:

$$\% erro = \left[\frac{17}{13} - 1 \right] \times 100 = 30,77\%$$

A tensão nominal de exatidão ANSI pode também ser determinada de uma curva de relação de sobrecorrente da classe T.

Por tentativa e erro, encontre a relação da “Vezez a Corrente Primária Nominal” para 20 vezes a corrente secundária nominal iniciando com a menor carga

padrão e incrementando até a próxima carga maior até que o percentual de erro calculado exceda 10 %. A carga com o percentual de erro não maior que 10 % é a tal com a qual será classificada a tensão nominal de exatidão ANSI.

Exemplo 2:

Da Figura C.12, encontre a tensão nominal de exatidão ANSI deste TC classe T com corrente secundária nominal de 5 A.

Admitindo uma carga padrão de 2 Ω

Quando $I_2 = I_S = 20$ x corrente secundária nominal, tem-se:

$I_1 = I_P = 22$ x corrente primária nominal

$$\% erro = \left[\frac{22}{20} - 1 \right] \times 100 = 10\%$$

Tensão nominal = 20 x 5 x 2 = 200 V

Portanto, o TC pode também ser classificado como um T200 onde o erro de 10 % é subentendido.

Todas as cargas maiores excederão o erro de 10 %, portanto, a classificação ANSI não é aplicável neste caso para as cargas de 4 Ω e 8 Ω .

C3.2 Norma internacional IEC 60044-1 / 2003-02 Edição 1.2

Esta norma estabelece nos requisitos adicionais para transformadores de corrente os fatores limite de exatidão padronizados como: 5 – 10 – 15 – 20 – 30, ou seja, isto representa o fator de sobrecorrente limites padronizados, mas é mais comum se utilizar o fator 20. Este fator não obrigatoriamente deve ser igual à corrente térmica I_{th} .

C3.2.1 Classe de exatidão para transformadores de proteção

Designação da classe de exatidão:

Para transformadores de corrente de proteção, a classe de exatidão é designada pela maior percentagem permitida do erro composto ao limite de exatidão nominal da corrente primária prescrita para a classe de exatidão em questão, seguida pela letra “P” (significando proteção).

C3.2.1.1 Transformador de corrente classe P

Classes de exatidão padrão:

As classes de exatidão padrão para transformadores de corrente para proteção são: 5P e 10P. Estas classificações são para os TCs com o clássico núcleo contínuo sem entreferro para resposta em regime estacionário.

Limites do erro composto para TC de proteção:

Para a frequência nominal e com a carga nominal conectada, o erro de corrente, deslocamento de fase e erro composto não devem ultrapassar os valores apresentados na Tabela C.9 a seguir.

Tabela C.9 - Erros conforme IEC – Classe P

Classe de Exatidão	Erro de Corrente para a corrente primária nominal %	Deslocamento de fase para a corrente primária nominal		Erro Composto ao limite de exatidão nominal da corrente primária %
		Minutos	Centiradianos ($\delta = 1\% = 1$ centiradiano = 34,4 min)	
5P	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10P	± 3	-	-	10

Para fins de ensaio quando na determinação do erro de corrente e deslocamento de fase, a carga deve ter um fator de potência 0,8 indutivo, exceto quando a carga for menor que 5 VA, onde o fator de potência de 1,0 é permitido.

Para determinação do erro composto, a carga deve ter um fator de potência entre 0,8 indutivo e unitário, à critério do fabricante.

Os valores padrão da carga conectada nestes TC conforme esta norma vai até 30 VA e são: 2,5 – 5,0 – 10 – 15 e 30 VA.

Valores acima de 30VA podem ser escolhidos de acordo com a aplicação.

Nota: Para um dado transformador, contanto que um dos valores da carga nominal esteja padronizado e associado com a classe de exatidão padrão, a declaração de outras cargas nominais, os quais podem ser valores não padronizados, mas associados com outras classes de exatidão padrão, não é impedida.

Na placa de identificação consta, além de outros dados exigidos pela norma, o fator limite de exatidão seguido da carga de exatidão correspondente. Sendo que um transformador de corrente com vários enrolamentos, satisfazendo as exigências de diversas combinações de carga, classe de exatidão e fator limite de exatidão pode ser identificado de acordo com todos eles.

Exemplo:

(15 VA classe 0,5) ou (15 VA classe 0,5)

(30 VA classe 1) (15 VA classe 1, ext. 150 %)

(30 VA classe 5P10) (15 VA classe 5P20)

As normas IEC/BS são basicamente semelhantes em relação à definição para classe de exatidão. A IEC60044-1 [15] fornece definição para exatidão a classe P que se aplica à resposta do TC em regime normal de funcionamento. Também a BS3938 [19] apresenta a definição classe X, que se refere à especificação de TC para aplicação em proteção diferencial de alta impedância.

De acordo com a IEC60044-1, a designação do TC é feita pela especificação do máximo erro para a corrente nominal seguido pela letra P (que significa proteção) e o fator limite de exatidão. Isto é, a exatidão do TC é expressa como “xPy”, significando que o TC pode ter “x” erro percentual para uma corrente secundária igual a “y” vezes a corrente secundária nominal. Por exemplo, 5P20 refere a uma exatidão de 5 % de erro para 20 vezes a corrente secundária nominal ou 100A quando a corrente secundária nominal é 5A.

O dimensionamento do TC neste caso é realizado pela exatidão definida para a falta na corrente até o limite de corrente conhecido como *Limit Accuracy current* “ I_{LA} ” para a carga nominal conectada. O fator limite de exatidão (*Accuracy Limit Factor*) “ ALF ” é expresso como um múltiplo da corrente nominal:

$$I_{LA} = ALF \cdot I_N \quad (C.15)$$

Assim para IEC os principais parâmetros do TC para condição normal de operação são:

- Relação nominal do TC
- Carga nominal, o valor da carga na qual a exatidão requerida é baseada. A carga nominal não é um parâmetro que a IEEE define como um dado do TC; a IEEE tem valores normalizados para a carga baseada em cada classe de exatidão.
- Fator limite de exatidão, ALF : ex. 10 (P10), 15 (P15) ou 20 (P20). Este múltiplo da corrente nominal fornece o valor da corrente primária até a qual o TC irá cumprir o erro específico dentro da exatidão definida, com a carga conectada igual à carga nominal.
- Resistência do enrolamento secundário, r_2 em ohm.

De acordo com esta norma, ALF nominal do TC somente se aplica quando a carga nominal é conectada. Se uma carga menor é conectada, resultará num aumento real do ALF_r :

$$ALF_r = ALF \frac{P_i + P_N}{P_i + P_r} = ALF \frac{r_2 + R_N}{r_2 + R_r} \quad (C.16)$$

onde:

P_N é a carga nominal do TC

P_i é a carga interna do TC devido a resistência do enrolamento:

$$P_i = r_2 I_{2N}^2 \quad (C.17)$$

P_r é a carga real conectada:

$$P_r = R_r I_{2N}^2 \quad (\text{C.18})$$

$$R_r = R_{\text{fios}} + R_{\text{relé}} \quad (\text{C.19})$$

R_{fios} é a carga resistiva dos fios de conexão

$R_{\text{relé}}$ é a carga resistiva dos relés conectados.

Em 1996 a IEC 60044-1 passou por uma revisão e introduziu a visão inglesa (norma BSB 3938) na norma européia criando as designações PR e PX.

C3.2.1.2 Transformador de corrente classe PR

É um transformador de corrente com fator de remanência limitado para qual, em alguns casos, um valor do laço da constante de tempo secundária e/ou um valor limite da resistência de enrolamento pode também ser especificado.

a) Requisitos adicionais para a classe PR para transformadores de corrente aplicados à proteção:

Os fatores limites de exatidão padronizados continuam os mesmo:

5 – 10 – 15 – 20 – 30

b) Classe de exatidão para a classe PR:

Designação da Classe de Exatidão:

A classe de exatidão é designada pela maior percentagem permitida do erro composto ao limite de exatidão nominal da corrente primária prescrita para a classe de exatidão em questão, seguida pela letra “PR” (indicando proteção com baixa remanência).

Classes de exatidão padrão:

As classes de exatidão padrão para transformadores de corrente para proteção de baixa remanência são: 5PR e 10PR

Limites do erro para a classe PR para TC de proteção, *vide* Tabela C.10 – “Erro de corrente, deslocamento de fase e erro”.

Tabela C.10 - Erros conforme IEC – Classe PR

Classe de Exatidão	Erro de Corrente para a corrente primária nominal %	Deslocamento de fase para a corrente primária nominal		Erro Composto ao limite de exatidão nominal da corrente primária %
		Minutos	Centiradianos	
5PR	±1	±60	±1,8	5
10PR	±3	-	-	10

Fluxo de Saturação (Φ_s)

É o valor de pico do fluxo que existe em um núcleo na transição da condição de não saturado para totalmente saturado e considerado ser o ponto na característica $B-H$ para o núcleo em questão na qual um aumento de 10 % de B causa um decréscimo de H em 50 %. Onde B pode ser representado por E_2 (tensão de excitação) e H por I_0 (corrente de excitação), conforme Figura C.13.

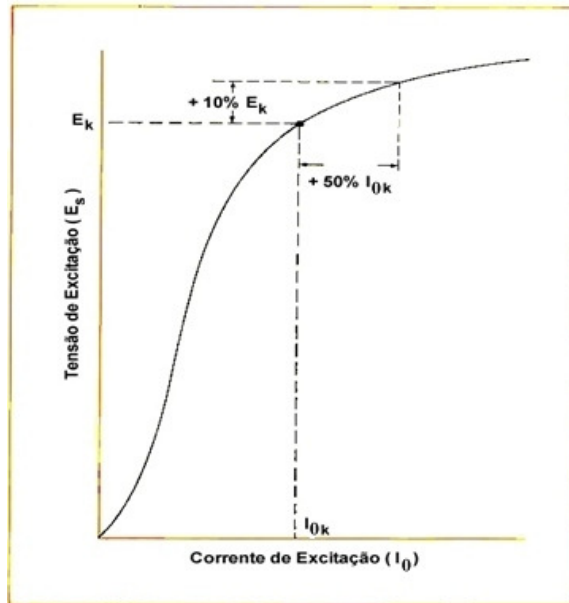


Figura C.13 - Determinação ponto de joelho conforme IEC [19].

Força eletromotriz ($f.e.m.$) nominal no ponto de joelho (E_k)

É aquela $f.e.m.$ sinusoidal mínima (rms) na frequência industrial nominal quando aplicada nos terminais secundário do transformador, todos os outros terminais estando com o circuito aberto, que quando aumentada de 10 % causa o aumento na corrente de excitação rms por não mais que 50 %. Devido a natureza não senoidal das quantidades medidas, as medições devem ser executadas usando instrumentos de medidas rms tendo um fator de crista ≥ 3 .

Nota: A $f.e.m.$ do ponto de joelho real será $\geq f.e.m.$ do ponto de joelho nominal.

Fluxo Remanente (Φ_r)

É aquele valor do fluxo que ficaria no núcleo 3 minutos após a interrupção de uma corrente de excitação de suficiente magnitude para induzir o fluxo magnético (Φ_s) (ver Figura C.14).

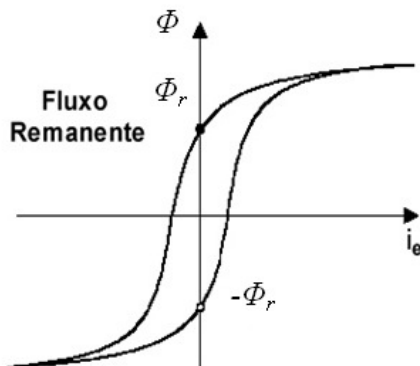


Figura C.14 - Laço de fluxo *versus* corrente [32].

Fator de Remanência (K_r)

É a relação:

$$K_r = 100 \times \frac{\Phi_r}{\Phi_s} \quad (\text{C.20})$$

expressado como uma percentagem (%).

O fator de remanência (K_r) não deve exceder a 10%.

Nota:

A inserção de um ou mais air-gaps (entreferrros) no núcleo pode ser um método para limitar o fator de remanência.

O fator de remanência (K_r) deve ser determinado para provar sua conformidade com o limite de 10%. A norma IEC 60044-6, Anexo B, apresenta vários métodos para determinar o valor da remanência.

Constante de tempo do laço secundário (T_2)

É o valor da constante de tempo do laço secundário do transformador de corrente, obtido da relação entre (L_{Sec}), que é a soma indutância de magnetização e de dispersão, e a resistência do laço secundário (R_2).

$$T_2 = \frac{L_{Sec}}{R_2} \quad (\text{C.21})$$

Caso indutância de dispersão for desprezível a Equação (C.21) a ser expressa pela Equação (C.22), que considera somente a indutância de magnetização.

$$T_2 = \frac{L_0}{R_2} \quad (\text{C.22})$$

Se requerido, o valor deve ser especificado pelo comprador.

A constante de tempo do laço secundário (T_2) deve ser determinada. E não deve diferir do valor especificado por mais que $\pm 30\%$. Se requisitado, o Anexo B da norma IEC 60044-6 é a referência.

Resistência do enrolamento secundário (r_2)

Se requerido, o valor máximo deve ser de comum acordo entre fabricante e comprador. A resistência do enrolamento secundário deve ser medida e uma apropriada correção aplicada se a medição for feita numa temperatura diferente de 75°C ou outra temperatura que tenha sido especificado. O valor assim ajustado é o valor nominal para r_2 .

A marcação na placa de identificação é semelhante a classes “5P” e “10P”, mas agora anotando “5PR” e “10PR” respectivamente. E no caso especial quando requisitado consta também a constante de tempo do laço secundário (T_2) e a resistência do enrolamento secundário r_2 para a temperatura de 75°C .

C3.2.1.3 Transformador de proteção classe PX

É um transformador de baixa reatância de dispersão que conhecido as característica da excitação do secundário do transformador, a resistência do enrolamento secundário, a resistência da carga secundária e a relação de espiras é suficiente para obter seu desempenho em relação ao sistema de relé de proteção com o qual este é usado.

Requisitos adicionais para a classe PX para transformadores de corrente aplicados à proteção:

Especificação do desempenho para a classe PX:

O desempenho do TC classe PX deve ser especificado em termos dos seguintes itens:

- a) Corrente primária nominal (I_{1n});
 - b) Corrente secundária nominal (I_{2n});
 - c) Relação de espira nominal.
- O erro da relação de espira não deve exceder $\pm 0,25\%$;

Erro de relação de espira:

É a diferença entre a relação de espira nominal e real, expressado como uma percentagem.

(C.23)

$$\text{Erro..da..Relação.de..Espira..(\%)} = \frac{(\text{relação.de.espira.real} - \text{relação.espira.no min al})}{\text{relação.de.espira.no min al}} \times 100$$

- d) Força eletromotriz (*f.e.m.*) nominal no ponto de joelho (E_k);
- e) Máxima corrente de excitação (I_0) para a *f.e.m.* nominal do ponto de joelho e/ou para um determinado percentual deste;
- f) Máxima resistência do enrolamento secundário para uma temperatura de 75°C (r_2); como um TC de proteção pode ser requisitado para entregar altos valores de corrente secundária, a resistência do enrolamento secundário necessita ser a mais baixa quanto possível.
- g) Carga resistiva nominal (r_c);
- h) Fator de dimensionamento (K_x).
É definido pelo comprador para indicar o múltiplo da corrente secundária nominal (I_{2n}), que ocorre sob a condição de falta no sistema de energia, incluindo o fator de segurança, até o qual o transformador é requisitado para satisfazer o desempenho exigido.

Nota: A *f.e.m.* nominal do ponto de joelho é geralmente determinada como segue:

$$E_k = K_x(r_2 + r_c) \times I_{2n} \quad (\text{C.24})$$

C3.3 Norma internacional IEC 60044-6 [14]

Há outras classificações na IEC além da classe P da IEC 60044-1, tais como na IEC 60044-6: classe TPS, TPX, TPY e TPZ, [14].

Nos TC classe P, o limite de exatidão é definido pelo erro composto para corrente primária simétrica em regime normal de operação. Esta especificação é mais usual quando se aplica um simples atraso de tempo da proteção. Não há limite especificado para fluxo residual.

A classe TPS representa o TC com baixa dispersão de fluxo, com limite de desempenho especificado pela característica de excitação e o limite do erro da relação de espiras. A especificação TPS da IEC é similar a classe C da ANSI, mas não idêntica. É preciso prestar bem atenção aos detalhes do que é especificado em termos de valores de pico ou *rms* ou inclinação das características como definidas nestas normas.

A exatidão classe TPX é definida pelo erro de pico instantâneo durante as condições de transiente especificada. Nenhum limite é especificado para fluxo remanente, indicando assim uso de núcleo de TC sem entreferro.

A classe TPY tem um pequeno entreferro, conseqüentemente seu fluxo residual é muito pequeno, limitado em 10 %.

A classe TPZ tem um entreferro, não necessariamente adequado para todas as aplicações de alta velocidade. O grande entreferro promove uma constante de tempo secundária muito pequena com um colapso dc de tempo muito curto, fazendo o TC idealmente adequado para aplicações de falhas de disjuntores.

ANEXO D - Dimensionamento do TC conforme fabricante

D1 PROCEDIMENTOS REALIZADOS PELOS FABRICANTES CORRESPONDENTES AO DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO E GEOMÉTRICO NO PROJETO DE TC REFERENTE AO PONTO DE SATURAÇÃO

Estes procedimentos foram obtidos do trabalho científico “*ATP/EMTP Model of TPX, TPY and TPZ Current Transformers for Realistic Testing of Protection Devices*”⁷ e do Curso Transformadores de Corrente intitulado “Comportamento de Transformadores de Corrente durante o Regime Transitório” [1].

Para os procedimentos empregados pelos fabricantes correspondentes ao dimensionamento elétrico e geométrico no projeto de TC em atendimento à especificação do cliente referente ao ponto de saturação alguns fatores são fundamentais. A impedância de magnetização Z_E de comportamento não linear (*vide* Figura D.3) é o fator que principalmente determina a característica de transferência do TC.

Outro fator importante no projeto de um TC é determinar qual ponto na curva de excitação que representará o de fluxo de saturação, o qual servirá de referência na determinação dos parâmetros de aplicação do TC. Para o seguinte estudo, adota-se também o parâmetro da corrente de excitação referente às condições de limite de exatidão, denominada I_{Eal} [14].

Para o atendimento de uma especificação desejado pelo cliente há diferentes tipos de classes padronizadas que apresentam alguns procedimentos de dimensionamento de especificações elétricas típicas dadas pelas principais normas internacionais utilizadas como IEEE/ANSI [13], IEC [14][15].

⁷ Luxenburger, R.; Schegner, P.; Igel, M.; Dresden University of Technology and ALSTOM Energietechnik, Germany, “ATP/EMTP Model of TPX, TPY and TPZ Current Transformers for Realistic Testing of Protection Devices” 2004 the Institution of Electrical Engineers.

D2 PROCEDIMENTO CORRESPONDENTE AO DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO E GEOMÉTRICO REFERENTE AO PONTO DE SATURAÇÃO PARA TC TIPO CLÁSSICO

Os TCs tipo Clássico são os de classe P da norma IEC [15] e os de classe C ou K da norma ANSI [13].

Para o TC tipo Clássico, a corrente de excitação referente às condições de limite de exatidão I_{Eal} é dada pela Equação (D.1).

$$I_{Eal} = \sqrt{2} \cdot F_s \cdot \frac{I_{ln}}{K_c} \cdot \frac{\varepsilon}{100} \quad (D.1)$$

sendo:

$$K_c = \frac{I_1}{I_{2T}} \quad (D.2)$$

onde I_{ln} é a corrente primária nominal, K_c a relação de transformação nominal, ε o percentual de exatidão, I_{2T} é a corrente total do secundário do TC e I_1 a corrente primária (*vide* Figura D.3).

A amplitude do fluxo magnético multiplicado com o número de espiras na condição de limite de exatidão será representado por Φ_{sat} . Este fluxo é calculado da conforme a equação (D.3).

$$\Phi_{sat} = \sqrt{2} \cdot \frac{|Z_{2T} \cdot I_{2al}|}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (D.3)$$

onde:

$$Z_{2T} = Z_2 + Z_c = (r_2 + r_c) + j(x_2 + x_c) \quad (D.4)$$

I_{2al} é a corrente secundária para a condição de limite de exatidão e é calculada pela Equação (D.5).

$$I_{2al} = F_s \cdot \frac{I_{ln}}{K_c} \cdot \left(1 - j \frac{\varepsilon}{100}\right) \quad (D.5)$$

A Figura D.1 apresenta a curva de excitação como exemplo mostrando I_{Eal} e Φ_{sat} . Geralmente tanto a ANSI quanto a IEC usam $\varepsilon = 10\%$, $F_s = 20$ e consideram x_2 desprezível para TCs Clássicos.

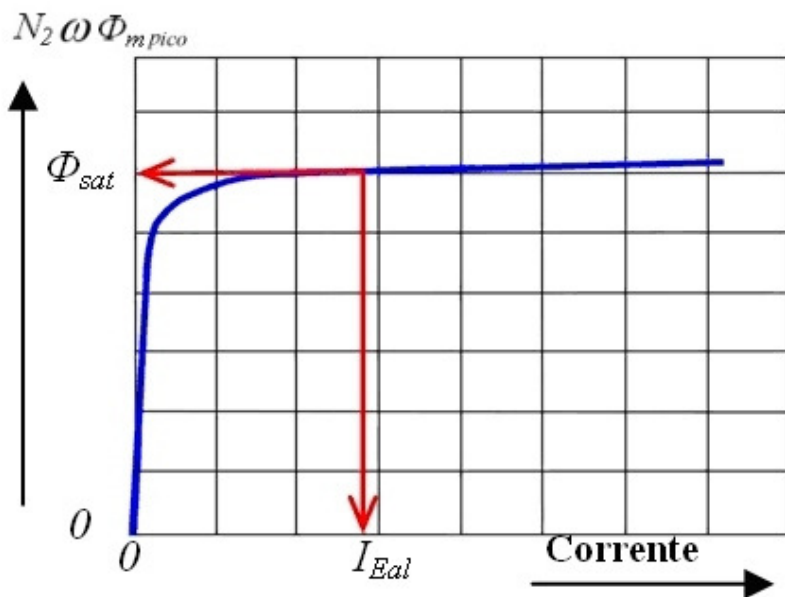


Figura D.1 - Característica de magnetização para TC Clássico.

D3 PROCEDIMENTO CORRESPONDENTE AO DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO E GEOMÉTRICO REFERENTE AO PONTO DE SATURAÇÃO PARA TCs TIPO CLASSES: TPS, TPX, TPY E TPZ DA NORMA IEC

As especificações normalizadas dos TCs tipo classes: TPS, TPX, TPY e TPZ são definidas em [14]. A Tabela D.1 mostra o limite de erros para estes TCs.

Tabela D.1 - Limites de erros de acordo com a IEC 60044-6 [14]

Classe	Para corrente primária nominal I_l		Na condição limite de exatidão
	Erro de relação ε_m em %	Ângulo de defasagem φ_ε em minutos	Erro instantâneo de crista máximo %
TPS Núcleo sem entreferro, baixa dispersão de fluxo	$\pm 0,25$	Especificar o limite da corrente de excitação para a tensão secundária de limite de exatidão (ou para a menor corrente de excitação para o erro instantâneo de pico de 10% da classe TPX)	
TPX Núcleo sem entreferro, baixa dispersão de fluxo	$\pm 0,5$	± 30	$\hat{\varepsilon} = 10$ Durante específico ciclo de operação
TPY Entreferro anti-remanência	$\pm 1,0$	± 60	$\hat{\varepsilon} = 10$ Durante específico ciclo de operação
TPZ Núcleo linear	$\pm 1,0$	$+180 \pm 18$	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 10$ Durante uma energização única com um pulso de máximo para um laço de constante de tempo secundária específica

A condição do limite de exatidão considera um curto-circuito assimétrico pleno com magnitude da corrente primária nominal de curto-circuito I_{psc} ou um religamento automático sem êxito com esta corrente. A exatidão dos TCs de classe TPX e TPY é definida como pela Equação (D.6) e para TPZ pela

Equação (D.7), onde \hat{i}_ε é a amplitude do erro de medição e $\hat{i}_{\varepsilon ac}$ é a amplitude da componente *ac* do erro de medição.

$$\hat{\varepsilon} = \frac{100 \cdot \hat{i}_\varepsilon}{\sqrt{2} \cdot I_{psc}} (\%) \quad (D.6)$$

$$\hat{\varepsilon}_{ac} = \frac{100 \cdot \hat{i}_{\varepsilon ac}}{\sqrt{2} \cdot I_{psc}} (\%) \quad (D.7)$$

D4 CLASSE TPX

A classe de TC TPX é de núcleo de relativa grande dimensão, sem entreferro, com parâmetros nominais adicionais especificando o desempenho à transiente. Não há limite para o fluxo remanente Φ_r . O parâmetro F_s , que é usado para dimensionar a característica do núcleo nas Equações (D.1) e (D.5) para os TC tipo Clássico, não é um valor nominal da classe TPX.

O parâmetro F_s deve ser calculado conforme a Equação (D.8):

$$F_s = K_{td} \cdot K_{ssc} \quad (D.8)$$

onde:

K_{td} é o fator de dimensionamento à transiente nominal para o pior caso;

K_{ssc} é o fator de curto-circuito simétrico nominal, dado pela Equação (D.9) [14].

$$K_{ssc} = \frac{I_{psc}}{I_{ln}} \quad (D.9)$$

A amplitude do erro de medição \hat{i}_ε é calculada conforme a Equação (D.10).

$$\hat{i}_\varepsilon = \sqrt{2} K_{td} K_{ssc} \frac{I_{ln}}{K_c} \frac{\varepsilon}{100} \quad (D.10)$$

Combinando as Equações (D.6) e (D.10) obtém-se a Equação (D.11).

$$\varepsilon = \frac{\hat{\varepsilon}}{K_{td}} \quad (D.11)$$

onde, $\hat{\varepsilon}$ é a exatidão dada na Tabela D.1, e ε é o parâmetro usado nas Equações de dimensionamento (D.1) e (D.5).

Com as Equações (D.8) e (D.11) os parâmetros necessários para equação de dimensionamento são todos conhecidos, sendo assim, pode-se modelar os TC classe TPX da mesma maneira que os TCs de classe P (*vide* a Figura D.2).

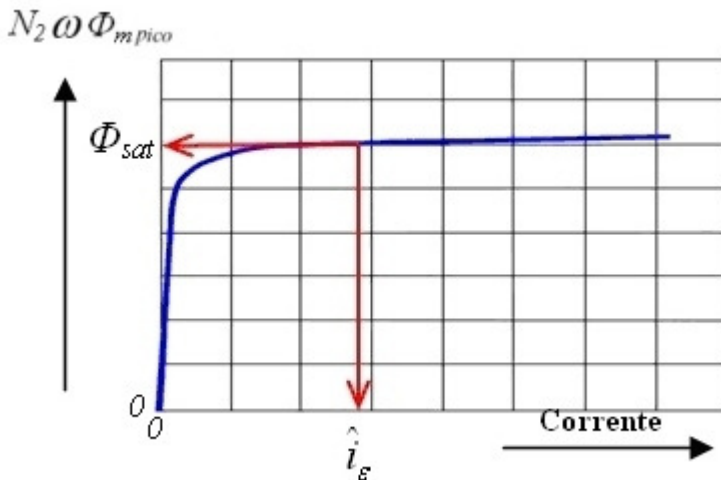


Figura D.2 - Característica de magnetização da classe TPX.

D5 CLASSE TPZ

A classe de TC TPZ apresenta entreferro no seu núcleo, portanto adicionais parâmetros nominais especificam o seu desempenho à transiente. Para a classe TPZ o fluxo remanente Φ_r é muito baixo, portanto desprezado na análise que segue. Ao contrário dos TCs classe P e TPX, os TCs de classe TPZ não são modelados considerando a corrente de limite de exatidão. A modelagem do TPZ é baseada no ângulo de deslocamento de fase φ_ϵ calculado conforme a Equação (D.12), que possibilita determinar o primeiro parâmetro de dimensionamento que é a constante de tempo secundária T_2 .

$$-\varphi_\epsilon = \arctan\left(-\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot T_2}\right) \quad (D.12)$$

onde: T_2 é calculada de maneira mais completa conforme a Equação (D.13), de acordo com a Figura D.3.

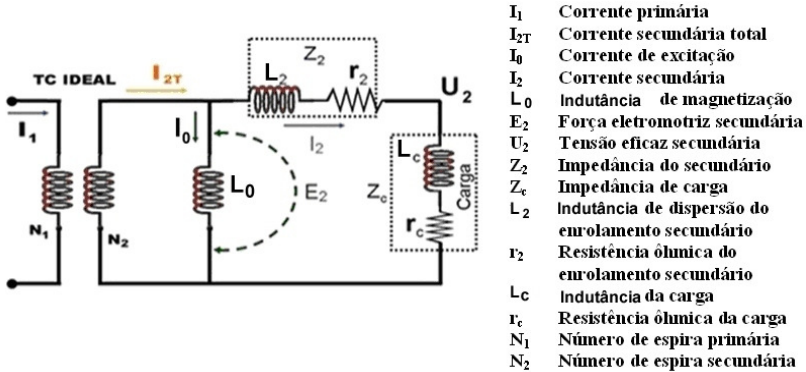


Figura D.3 – Circuito equivalente do TC – 3 [1].

$$T_2 = \frac{L_0 + L_c + L_2}{r_2 + r_c} \quad (D.13)$$

Da Equação (D.12) obtém-se também T_2 dando origem à Equação (D.14).

$$T_2 = \frac{1}{\omega \cdot \tan \varphi_e} \quad (D.14)$$

onde a constante de tempo T_2 é calculada usando o ângulo de deslocamento de fase φ_e , obtido da Tabela D.1, cujo valor é de $+180 \pm 18$ minutos. Portanto, tem-se um φ_e variando de 198 a 162 minutos, ou seja, 0,05759 a 0,04759 radianos, aplicando-se na Equação (D.14) calcula-se a faixa de variação referente aos ± 18 minutos. Então:

para $\varphi_e = 198$ min

$$T_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \tan(0,05759)} \cong 46ms$$

para $\varphi_e = 162$ min

$$T_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \tan(0,04712)} \cong 56,39ms$$

Calculando, para $\varphi_e = 180$ min equivalente a 0,05236 radianos, tem-se:

$$T_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \tan(0,05236)} = 50,6ms$$

Observando-se os valores obtidos de T_2 para os ± 18 minutos verifica-se que estes representam uma variação de ± 10 % sobre o valor de T_2 para $\varphi_e = 180$ min, ou seja, $T_2 = 50,6$ ms ± 10 %.

Baseado neste valor a indutância de magnetização L_0 para a corrente nominal é calculada convertendo a Equação (D.13) para Equação (D.14).

$$L_0 = T_2 \cdot (r_2 + r_c) - L_c \quad (D.15)$$

onde, L_2 é desprezível. Todos os outros valores são conhecidos, pois r_2 é medido, r_c e L_c são parâmetros da carga padrão conhecida.

A indutância de magnetização L_0 para a corrente nominal é igual ao gradiente da característica de magnetização no ponto zero (veja Figura D.4). Portanto, se L_0 é calculado, um dos dois parâmetros de dimensionamento necessita ser conhecido.

O segundo parâmetro de dimensionamento é o fluxo de saturação Φ_{sat} , que pode ser calculado da mesma maneira que para TC com núcleo sem entreferro, ou seja, conforme Equação (D.16).

$$\Phi_{sat} = \sqrt{2} \cdot \frac{|Z_{2T} \cdot I_{\hat{e}ac}|}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (D.16)$$

O mesmo é válido para corrente de exatidão dado pela Equação (D.17).

$$\hat{i}_{\hat{e}ac} = \sqrt{2} \cdot K_{ssc} \cdot \frac{I_{1n}}{K_c} \cdot \frac{\varepsilon}{100} \quad (D.17)$$

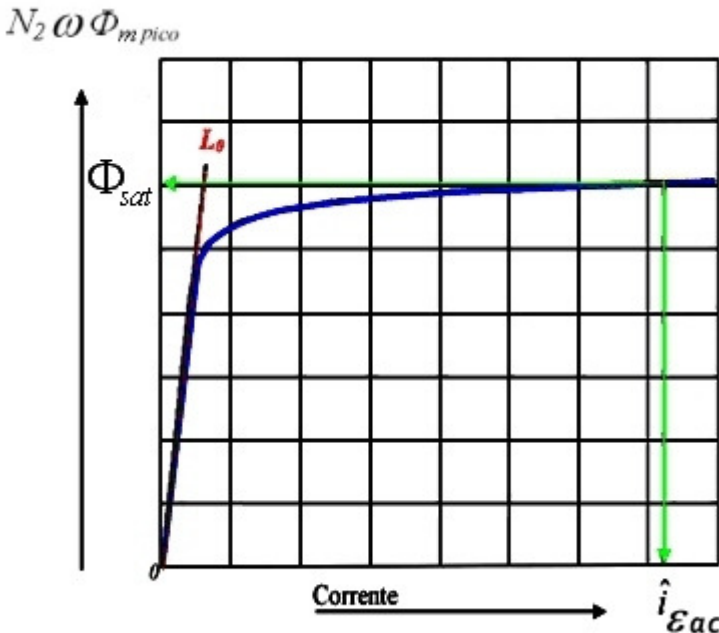


Figura D.4 - Característica de magnetização da classe TPZ.

D6 CLASSE TPY

A classe de TC TPY, também, apresenta entreferro em seu núcleo. Sendo assim, adicionais parâmetros nominais especificam o desempenho à transiente. O fluxo de remanência Φ_r tem que estar abaixo de 10% do fluxo de saturação.

Um valor nominal adicional é a constante de tempo T_2 do TC. Isto permite modelar o TC, classe TPY, da mesma maneira que os de classe TPZ, considerando somente que o TPY apresenta a influência da constante de remanência K_{rem} na Equação (D.10), para definir o dimensionamento do núcleo. K_{rem} é expressa pela Equação (D.18) [24].

$$K_{rem} = \frac{1}{1 - \frac{\% \text{ Remanência}}{100}} \quad (\text{D.18})$$

A modelagem do TPY é baseada no ângulo de deslocamento de fase φ_e calculado conforme Equação (D.12). Da mesma maneira T_2 é calculado pela Equação (D.14), onde a constante de tempo T_2 pode ser calculada usando o ângulo de deslocamento de fase da Tabela D.1, cujo valor é de ± 60 minutos, ou seja, 0,01745 radianos. Aplicando-se a Equação (D.14) tem-se:

$$T_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot \tan(0,01745)} \cong 151,966ms$$

Semelhantemente à classe TPZ, a indutância de magnetização L_0 para a corrente nominal é calculada usando a Equação (D.15).

Tendo definido T_2 se calcula K_{id} para se encontrar a amplitude do erro de medição \hat{i}_e conforme a Equação (D.19)

$$\hat{i}_e = \sqrt{2} \cdot K_{id} \cdot K_{rem} \cdot K_{ssc} \cdot \frac{I_{1n}}{K_c} \cdot \frac{\mathcal{E}}{100} \quad (\text{D.19})$$

O fluxo é calculado conforme Equação (D.20), (veja Figura D.5).

$$\Phi_{sat} = \sqrt{2} \cdot \frac{|Z_{2T} \cdot I_e|}{2\pi \cdot f} \quad (\text{D.20})$$

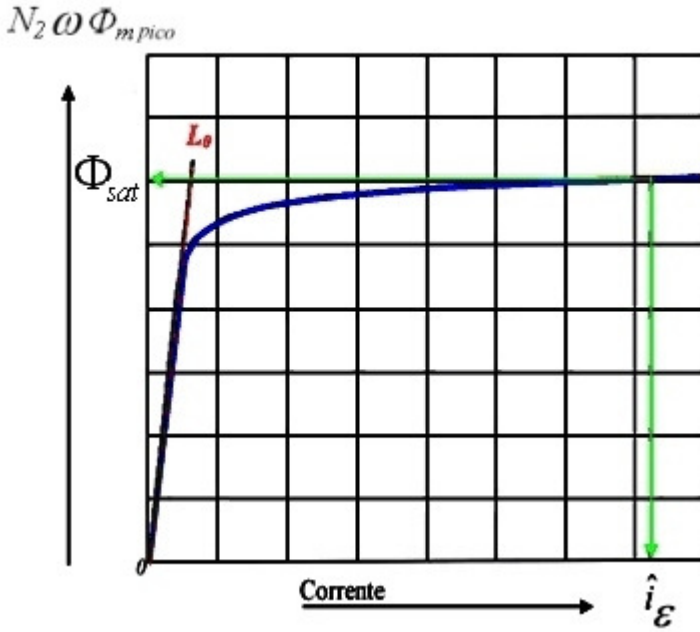


Figura D.5 - Característica de magnetização da classe TPY.

ANEXO E – Aspectos construtivos de TC de alta tensão

E1 INTRODUÇÃO AOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS GERAIS DE UM TC DE ALTA TENSÃO

O projeto de um TC de alta tensão envolve uma série de detalhes para poder se obter um equipamento apto a trabalhar num potencial de alta tensão. Não se descreverá com profundidade os cálculos de dimensionamentos elétricos e mecânicos, mas se procurará mostrar algumas etapas construtivas para se ter uma noção de como são construídos estes equipamentos. A Figura E.1 mostra um desenho da forma construtiva em corte de um TC 245 kV do fabricante Arteche.

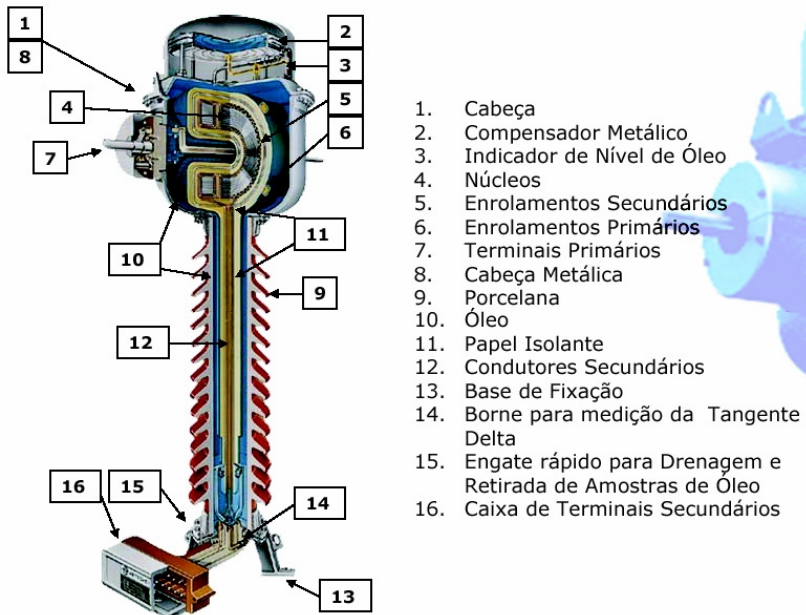


Figura E.1 - Detalhes construtivos de um TC de 245 kV [8].

Basicamente, as etapas construtivas não mudam muito de um fabricante para outro, sendo que cada um tem seus segredos industriais e patentes específicas. Geralmente o material isolante adotado na construção de TC é papel e óleo.

A seguir se mostrará uma sequência de imagens referentes às etapas construtivas de um TC modelo CTH de fabricação AREVA [1].

Este TC possui as seguintes partes:

1. Membrana metálica (ver Figura E.2 (a))

A membrana é localizada no topo do equipamento, coberta pelo domo de alumínio anodizado. A compensação de variação de volume de óleo com a temperatura é feita através da expansão ou retração da membrana. Estas membranas mantêm o óleo completamente vedado do meio exterior. Os TC tipo CTH são aprovados contra explosões. O projeto da membrana permite que a explosão ocorra sempre para cima, sem causar danos para os lados do equipamento e, portanto com pouco risco de afetar pessoas.

2. Cabeça metálica (ver Figura E.2 (b))

A cabeça metálica dos transformadores de corrente tipo CTH é fabricada com a cuba em alumínio fundido, o que proporciona maior resistência à intempérie.

3. Terminais primários (ver Figura E.2 (c))

4. Base de fixação (ver Figura E.2 (d))

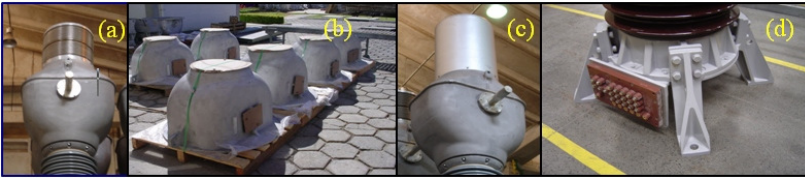


Figura E.2 - Partes terminais de um TC, (a) Membrana metálica; (b) Cabeça metálica; (c) Terminal primário; (d) Base de fixação [1].

Para este tipo de TC, as seguintes etapas de fabricação são empregadas:

1. Núcleo (ver Figura E.3 (a) e (b))

Através das dimensões enviadas pelo departamento técnico, a produção começa com a fabricação do TC pelos núcleos. Os núcleos são feitos de chapa de material ferromagnético Hipersil M4 ou Mumetal. Depois de confeccionados, os núcleos de chapa Hipersil M4 passam por um processo de recozimento para melhorar as características magnéticas e mecânicas.



Figura E.3 - Núcleo de TC, a) montagem de núcleos; (b) Enrolamento do núcleo [1].

Alguns núcleos toroidais de TCs, como mostra a Figura E.4, são feitos sem interrupções, ou seja, sem entreferro (são os de classe P, TPS, TPX). Os materiais utilizados são lâminas de aço Fe-Si, de Grão Orientado – GO.



Figura E.4 - Núcleo sem entreferros [1].

Os núcleos toroidais com entreferros apresentam um processo de fabricação mais especial e são utilizados para TCs denominados de classe TPY, TPZ, apresentando respostas melhores à transitórios [1]. As fotos da Figura E.5 mostram a sequência das etapas deste processo de montagem de um núcleo com entreferro [9]:

- (a) Demarcação definindo onde será feito o corte no núcleo.
- (b) Usinagem para o corte do núcleo.
- (c) e (d) Núcleo seccionado.
- (e) Núcleos cortados e o material de poliéster que será colocado no entreferro.
- (f) Controle da espessura dos espaçadores.
- (g) e (h) Montagem das cintas de material não magnético para segurar o núcleo seccionado.
- (i) Núcleo toroidal isolado com fita plástica (polietileno / polipropileno para TC em SF6 ou papel para TC isolados em óleo). Neste caso é para TC sem entreferro. Processo antes da montagem do enrolamento.
- (j) Núcleo toroidal isolado com fita termoindurente para garantir a compactação e estabilidade do núcleo. Neste caso é para TC com entreferro. Processo antes da montagem do enrolamento.
- (k) Polimerização da camada de fita termoindurente através de aquecimento em estufa. Para TC com entreferro. Processo antes da montagem do enrolamento.



Para TC da Classe TPY e TPZ (IEC) o comprimento do entreferro é assegurado através de espaçadores em material não magnético (poliéster).

Figura E.5 - Processo de fabricação do núcleo com entreferro [9].

2. Bobinagem do enrolamento secundário (ver Figura E.6)

Depois da colocação do colchão sobre o núcleo é feita a bobinagem do enrolamento secundário. A bobinagem é feita com fios de seção circular ou com fios chatos, de acordo com as características técnicas do equipamento.

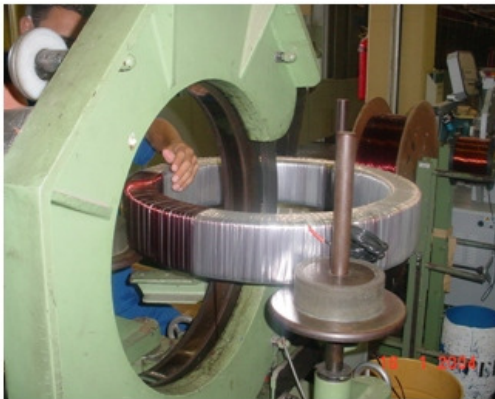


Figura E.6 - Enrolamento secundário [1].

3. Acoplamento (ver Figura E.7 (a))

Uma vez realizada a bobinagem em todos os núcleos, é feita a junção destes e isolados com fita mylar. Todos os núcleos isolados são colocados dentro de uma caixa metálica.

4. Parte ativa (ver Figura E.7 (b))

Por fim, fecha-se a caixa metálica (chamada por virola) e conecta-se o tubo de baixa tensão para começar a confecção do isolamento. Os fios secundários são levados até a caixa secundária dentro do tubo de baixa tensão (ver Figura E.7 (c)). O isolamento é feito manualmente respeitando o projeto de cada equipamento.



Figura E.7 - Construção da parte ativa do TC, (a) Acoplamento; (b) Parte ativa; (c) Isolamento [1].

5. Desenvolvimento do processo de isolamento

Na Figura E.8 é apresentada toda a sequência do processo de confecção do isolamento, mostrando as diferentes etapas desde o núcleo enrolado até o equipamento pronto para ensaios em laboratório:

- (a) Núcleos com os enrolamentos secundários.
- (b) Montagem dos enrolamentos secundários na virola.
- (c) Conexão do tubo de baixa tensão.
- (d) Início do processo de isolamento, depois da colocação do papel Carbon Black (semicondutor responsável pela distribuição do baixo potencial

por todo o TC) até 300 mm do tubo, se começa a colocação do papel crepado e Kraft.

- (e) Processo intermediário do isolamento, colocação de uma nova camada de fita semicondutora de Carbon Black.
- (f) Durante o processo de isolamento colocam-se molas de aço bicromatizado para distribuição dos potenciais (linhas de campo).
- (g) Processo final de isolamento, colocação de tiras de tela de blindagem de cobre estanhado (distribuição de potencial). Assim fica construída a parte ativa do equipamento.
- (h) Montagem do isolador. Colocação dos cabos da caixa secundária e dos terminais secundários. Montagem do enrolamento secundário.
- (i) Tratamento final: aquecimento (105°C) e vácuo (0,1 mBar).
- (j) Preenchimento de óleo sob vácuo. Tratamento do óleo.
- (k) Montagem do domo. Testes de rotina de acordo com normas. Inspeção final. Ao final tem-se o equipamento pronto.

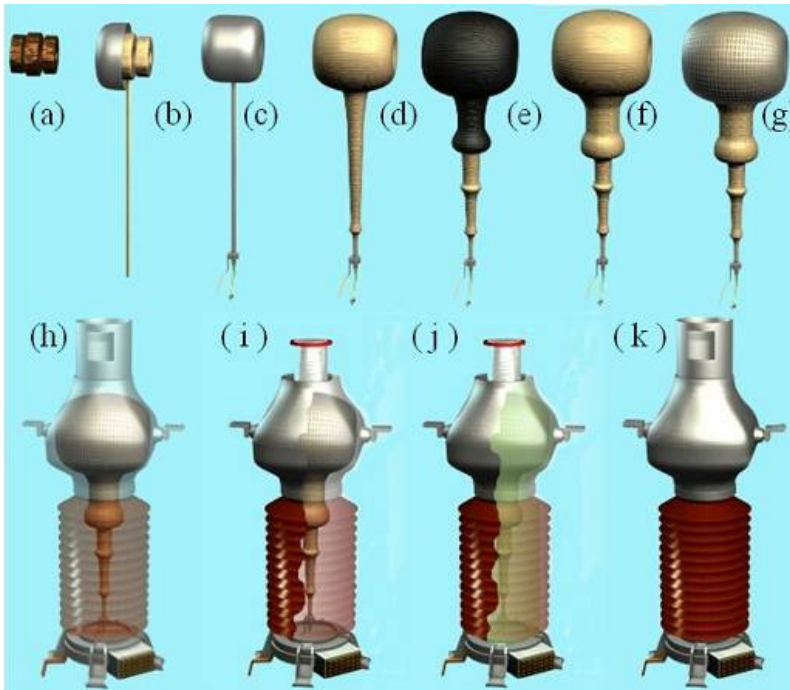


Figura E.8 - Desenvolvimento do processo de isolamento [1][10].

E2 CLASSIFICAÇÃO DE TC CONFORME FINALIDADE DE UTILIZAÇÃO

Os TC utilizados no Sistema Elétrico têm o mesmo princípio físico de funcionamento e são constituídos basicamente com os mesmos elementos. Entretanto, há dois grupos bem distintos quanto à finalidade de utilização: TC para Medição e TC para Proteção (para serviço de relés). Todavia, não se utiliza TC de medição para sistema de proteção, assim como, TC de proteção para sistema de medição, principalmente se for medição para fins de faturamento a consumidor. Isto se baseia nas duas características seguintes:

1) Classe de Exatidão:

Conforme normas ABNT/ANSI [9 - 11], os TCs para medição têm classe de exatidão 0,3 – 0,6 – 1,2. São classificados pelos erros de relação e de fase levantados em ensaios.

Para os TCs de proteção se usa a classe de exatidão 10. Antigamente havia também a classe de exatidão 2,5 (que foi eliminada nas revisões das normas). Para esse tipo de TC é levado em consideração geralmente apenas o erro de relação, pois o que interessa é a amplitude da corrente secundária como função da amplitude da corrente primária. Para esse tipo de aplicação, o erro de fase é negligenciado.

A ABNT/NBR 6856/1992 [11] define desta maneira a classe de exatidão dos TCs para proteção:

Considera-se que um TC para serviço de proteção está dentro de sua classe de exatidão, em condições especificadas, quando, nestas condições, o seu erro de corrente não for superior ao valor especificado, desde a corrente secundária nominal até uma corrente igual a 20 vezes o valor da corrente secundária nominal.

2) Circuito Magnético:

Para núcleos de TC de medição se usa material de elevada permeabilidade magnética (pequena corrente de excitação, pequenas perdas, baixa relutância magnética), trabalhando com relativa baixa indução magnética (cerca de 0,1 tesla). Entretanto, estes entram em saturação quando a indução magnética alcança valores entre 0,4 e 0,8 tesla, correspondendo a valores da corrente primária cerca de quatro vezes o seu valor nominal [4]. Caso a corrente primária ultrapasse esta ordem de grandeza e atinja valores excessivos, se refletirá no secundário uma corrente que atinge no máximo cerca de quatro vezes o valor nominal, conforme mostra a curva 1 (em cor verde) da Figura 2.15. Para TC de proteção, a saturação é atingida com indução magnética elevada, quando a corrente primária for cerca de 20 vezes a corrente nominal. Portanto, neste ponto de operação, no secundário se terá uma corrente 20 vezes

o valor nominal, conforme mostra a curva 2 (em cor laranja) da Figura E.9. As diferenças básicas de um TC de medição e proteção são [1]:

- O TC de medição deve manter sua precisão para correntes nominais, enquanto o TC de proteção deve ser preciso até o valor de fator de sobrecorrente (F_s) especificado pelo cliente;
- O núcleo magnético do TC de medição geralmente é de seção menor que o de proteção, isto possibilita sua saturação durante um curto-circuito quando a corrente primária atinge valores altos.

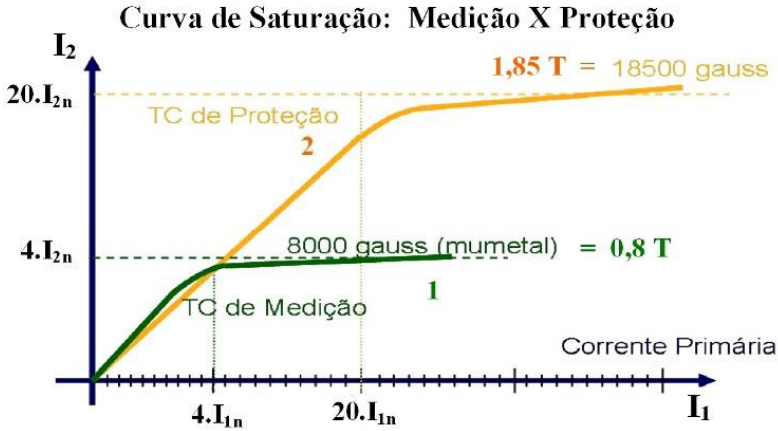


Figura E.9 - Diferença entre TC de medição e proteção [1].

ANEXO F - Dimensionamento do TC pela tensão de saturação (V_x), fator de assimetria, coeficiente de majoração e fator de majoração

A saturação do TC pode ser evitada tendo-se os cuidados apresentados a seguir referentes à tensão de saturação V_x [17] (utilize o circuito apresentado na Figura F.1 para esta análise):

- a) Para evitar a saturação por uma corrente alternada (ac), o TC deve ser capaz de ter um valor de tensão de saturação secundária, V_x dada pela Equação (F.1).

$$V_x > I_{2F} Z_{2T} \quad (\text{F.1})$$

onde, I_{2F} é a corrente primária de falta dividida pela relação de espira, com $I_{2F} = F_s I_{2n}$, (F_s é o Fator de Sobrecorrente para uma falta simétrica e I_{2n} é a corrente secundária nominal. Neste caso, a corrente magnetizante I_0 é muito menor que I_{2F} , portanto I_0 é desprezada e Z_{2T} é a carga secundária total $Z_{2T} = Z_2 + Z_c$ expressa também pela Equação (F.2)). Z_c considera também a impedância dos fios de conexão do secundário do TC até os relés.

$$Z_{2T} = \sqrt{(r_2 + r_c)^2 + (x_2 + x_c)^2} \quad (\text{F.2})$$

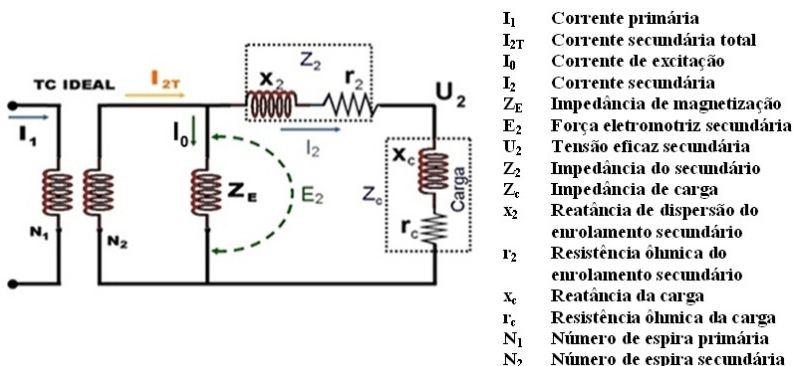


Figura F.1 - Circuito equivalente do TC-2 [1].

- b) Para evitar a saturação quando está presente no sinal de onda primária uma componente dc , tendo uma carga resistiva pura no secundário, a tensão de saturação V_x requerida é dada pela Equação (F.3) [17]. Neste caso, $Z_{2T} = r_2 + r_c$, sendo x_2 desprezível e $x_c = 0$.

$$V_x > I_{2F} Z_{2T} \left(1 + \frac{X}{R} \right) \quad (F.3)$$

onde, X e R são, respectivamente, reatância e resistência do sistema primário até o ponto da falta.

Se a carga do TC é também indutiva, a tensão de saturação V_x requerida para evitar a saturação causada pela componente dc no primário é dada pela Equação (F.4) [17].

Neste caso, tem-se $Z_{2T} = \sqrt{(r_2 + r_c)^2 + (x_2 + x_c)^2}$.

$$V_x > I_{2F} Z_{2T} \left(1 + \frac{X}{R} \right) \left(\frac{r_2 + r_c}{Z_{2T}} \right) \quad (F.4)$$

Considerando também um possível estado de pré-magnetização (na pior direção), tem-se o valor de V_x dado pela Equação (F.5) [17]. O valor de $pu_remanência$ é dado pela razão do valor de remanência (quando a corrente de excitação é zero) pelo valor da remanência base considerado no ponto de saturação. O $pu_remanência$ é o mesmo fator de remanência K_r , que será abordado mais adiante, mas sem ser expresso em percentual.

$$V_x > \frac{I_{2F} Z_{2T} \left(1 + \frac{X}{R} \right) \left(\frac{r_2 + r_c}{Z_{2T}} \right)}{1 - pu_remanência} \quad (F.5)$$

Estes requisitos geralmente resultam em um projeto de um TC muito grande, que o torna impraticável ou inviável economicamente. Portanto, medidas de compensação devem ser tomadas para minimizar os efeitos de saturação no planejamento dos relés de proteção. Isto é primordial principalmente para os relés de proteção cujo tempo de resposta é maior que o tempo de saturação T_s . Alguns relés instantâneos de alta velocidade podem operar antes que a saturação ocorra, ou seja, seu tempo de resposta é mais rápido que o tempo de saturação. Estes relés possibilitam uma atuação da proteção sem o sinal estar distorcido no secundário do TC.

Para atender estes requisitos apresentados surgiram diferentes tipos projeto de TC de acordo com sua aplicação, conforme apresentado pela norma IEC [14], contribuindo para se obter um núcleo de dimensionamento mais adequado e não tão exagerado. Já foi visto previamente que, dependendo do momento da falha, o curto-circuito pode ser simétrico ou assimétrico. Portanto, é importante determinar o fator de assimetria para o melhor dimensionamento do núcleo do TC. O fator de assimetria F_A é definido como [1]:

A razão entre o valor de crista máximo da corrente de curto-circuito, I_{psc} , e o valor eficaz de sua componente senoidal, I_{In} .

Para se iniciar os cálculos destes valores, é preciso se conhecer o instante em que ocorreu o curto-circuito, ou melhor, a fase (ângulo) da onda no instante do evento. A Figura F.2 mostra formas de onda de tensão e de corrente no momento do transitório em uma linha de transmissão. A forma de onda da tensão do sistema elétrico se expressava pela Equação (F.6) e a forma de onda da corrente pela Equação (F.7), onde, I_{psc} é a máxima corrente de curto-circuito suportável pelo sistema elétrico expresso pelos parâmetros da linha de transmissão (Equação (F.8)), θ é a defasagem do sinal de corrente normal do sinal de tensão e φ é o ângulo de incidência da falta, que no caso é 180° .

$$v = \sqrt{2}V_m \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (\text{F.6})$$

$$i_s = \sqrt{2}I_{psc} \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) \quad (\text{F.7})$$

$$I_{psc} = \frac{V_m}{\sqrt{(R^2 + \omega^2.L^2)}} \quad (\text{F.8})$$

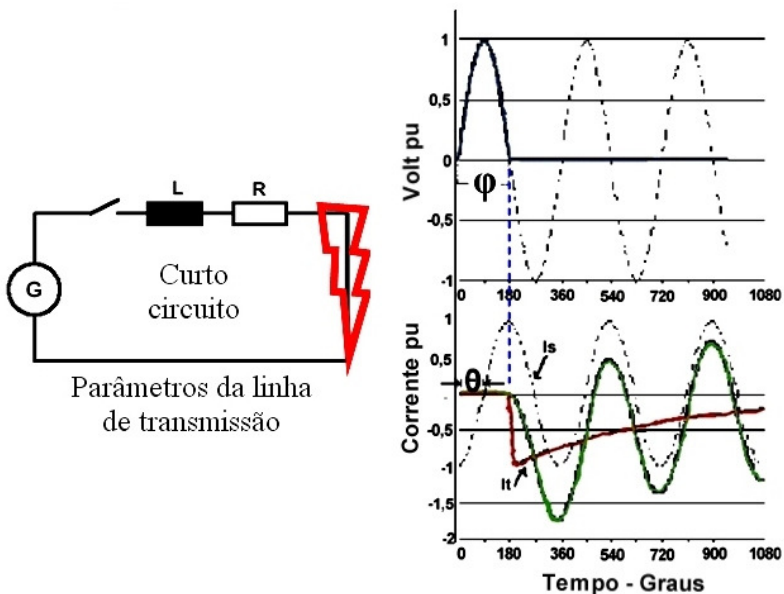


Figura F.2 - Análise no momento de um transitório [23].

Com o objetivo de obter equações genéricas, considerou-se que o curto-circuito ocorreu num instante t_0 genérico onde o ângulo da onda da tensão foi definido como φ . Como o transformador está conectado a um sistema elétrico, deve-se subtrair o ângulo φ do ângulo do sistema θ , que é relacionado à constante de tempo primária do sistema T_1 e expresso pela Equação (F.9).

$$\theta = \arctg \frac{\omega L_1}{R_1} = \arctg \omega T_1 \quad (\text{F.9})$$

A corrente total final, dada pela Equação (F.10), é a soma da corrente do sistema em regime normal I_s , dada pela Equação (F.7), mais a corrente de transitório I_t , dada pela Equação (F.11). Sendo assim, a corrente instantânea final i é expressa por (F.12).

$$I = I_t + I_s \quad (\text{F.10})$$

$$i_t = -\sqrt{2} I_{psc} e^{-\frac{t}{T_1}} \text{sen}(\varphi - \theta) \quad (\text{F.11})$$

$$i = \sqrt{2} I_{psc} \left[\text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) - e^{-\frac{t}{T_1}} \text{sen}(\varphi - \theta) \right] \quad (\text{F.12})$$

Denomina-se δ o ângulo da corrente primária, no instante do curto-circuito, expresso pela Equação (F.13). Portanto, a corrente instantânea final i passa a ser expressa pela Equação (3.55).

$$\delta = \varphi - \theta \quad (\text{F.13})$$

$$i = \sqrt{2} I_{psc} \left[\text{sen}(\omega t + \delta) - e^{-\frac{t}{T_1}} \text{sen} \delta \right] \quad (\text{F.14})$$

O maior valor de crista da corrente ocorre em um tempo denominado t_a que depende do instante em que ocorreu o curto-circuito, ou seja, depende do ângulo φ , conseqüentemente do ângulo δ , e ainda da constante de tempo primária T_1 . A Equação que representa o tempo t_a é dada por (F.15) [1].

$$t_a = \frac{\pi - \delta}{\omega} \quad (\text{F.15})$$

O fator de assimetria F_A pode ser calculado, então, pela Equação (F.16) [1].

$$F_A = \sqrt{2} \left[\text{sen}(\omega t_a + \delta) - e^{-\frac{t_a}{T_1}} \text{sen} \delta \right] \quad (\text{F.16})$$

Para uma situação em que a constante de tempo primária T_1 seja igual a 100 ms, com a frequência do sistema de 60 Hz, através da Equação (F.9) se obtém o valor do ângulo θ igual a aproximadamente 90° ($\pi/2$). O caso extremo de um curto-circuito totalmente assimétrico se dará quando o ângulo φ for igual

a zero, observado pela Equação (F.13) que resultará num ângulo δ igual menos 90° ($-\pi/2$), resultando a se obter pela Equação (F.15) um valor de t_a igual a 0,0083 segundo, contribuindo assim, através da Equação (F.16) a se encontrar o valor do fator de assimetria igual a 2,72. Apesar de ser este o pior caso de curto-circuito assimétrico, por apresentar o maior fator de assimetria possível, pela experiência que se tem do histórico das empresas do sistema elétrico em geral a nível mundial este é um caso raro de ocorrer [1].

Para evitar que o núcleo sature com a presença da componente exponencial da corrente de curto-circuito, que provoca a saturação do núcleo muito antes do que a componente simétrica, se trabalha com um núcleo de proteção com seção majorada. A finalidade da majoração do núcleo de proteção é evitar a saturação por uma corrente de curto-circuito assimétrica. Com a majoração, este núcleo terá uma indutância de magnetização L_0 muito grande, e a corrente de magnetização i_0 será, portanto, desprezível durante todo o curto-circuito. Consequentemente, a corrente de curto-circuito primária será perfeitamente reproduzida no secundário. Define-se, então, coeficiente de majoração C_M como [1]:

Coeficiente de majoração é a relação entre o fluxo exponencial e o fluxo senoidal da onda da corrente de curto-circuito.

O coeficiente de majoração é dado pela Equação (F.17).

$$C_M = \frac{\phi \exp_{\max}}{\phi \text{sen}_{\max}} = \omega T_1 \cos \beta \quad (\text{F.17})$$

onde, o ângulo β , dado pela Equação (F.18), é dado pelos parâmetros da carga no secundário do TC, reatância X_2 e a resistência R_2 .

$$\beta = \arctg \frac{X_2}{R_2} \quad (\text{F.18})$$

Então, define-se como fator de majoração, M , dado pela razão entre o fluxo total máximo $\Phi_{total_{\max}}$ e o fluxo senoidal máximo $\Phi_{sen_{\max}}$, conforme Equação (F.19) [1].

$$M = \frac{\phi \text{total}_{\max}}{\phi \text{sen}_{\max}} \quad (\text{F.19})$$

Por exemplo, para um TC alimentando uma carga Z qualquer, com fator de potência $\cos\beta$, temos como resultado a Equação (F.20) [1].

$$M = \frac{\phi \text{total}_{\max}}{\phi \text{sen}_{\max}} = \frac{\phi \exp_{\max}}{\phi \text{sen}_{\max}} + \frac{\phi \text{sen}_{\max}}{\phi \text{sen}_{\max}} = \omega \cdot T_1 \cdot \cos \beta + 1 \quad (\text{F.20})$$

Sendo a constante primária, T_1 , igual a 100 ms e $\cos\beta = 0,8$, se obtém um M igual a 31,16. Isto significa que, para o núcleo atender as características

transitórias no instante do curto-circuito, ele deve possuir uma seção 31,16 vezes maior que um núcleo projetado para atender um curto-circuito puramente simétrico.

Quando o regime transitório possui dois ciclos de operação, conforme Figura F.3, o fator de majoração M a ser seguido para o dimensionamento do núcleo magnético do TC é dado pela Equação (F.21) [1]

$$M = F_{A1} M_1 e^{-\frac{(t_m + t''_{al})}{T_2}} + F_{A2} M_{12} \quad (F.21)$$

onde, F_{A1} e F_{A2} são os fatores de assimetria referente ao primeiro e segundo ciclo de operação do disjuntor, do mesmo modo, M_1 e M_{12} são os fatores de majoração. T_2 é a constante de tempo secundária do TC.

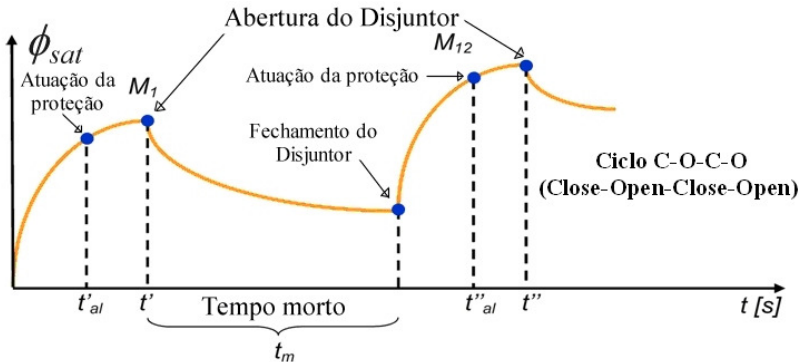


Figura F.3 – Transitório com dois ciclos de operação do sistema de proteção.

Os fatores de majoração M_1 e M_{12} são expressos pelas Equações (F.22) e (F.23), respectivamente [1].

$$M_1 = \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t'}{T_1}} - e^{\frac{-t'}{T_2}} \right) + \frac{1}{\cos \beta} \quad (F.22)$$

$$M_{12} = \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t''_{al}}{T_1}} - e^{\frac{-t''_{al}}{T_2}} \right) + \frac{1}{\cos \beta} \quad (F.23)$$

A norma internacional IEC 60044.6/1992 [14] regulariza os parâmetros dos núcleos de proteção, considerados linearizados, em relação ao fator de majoração utilizando-se do termo fator de transiente K_{yf} expresso pela Equação (F.24) e definido como:

Fator de transiente K_{yf} é a relação do fluxo de acoplamento secundário total teórico com o valor de pico instantâneo da componente ac deste fluxo,

quando um transformador de corrente é submetido a uma única energização especificada e a constante de tempo do laço secundário (T_2) é assumida com sendo um valor constante durante o período de energização.

$$K_{yf} = \frac{\omega I_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t}{T_1}} - e^{\frac{-t}{T_2}} \right) - \text{sen } \omega t \quad (\text{F.24})$$

A norma IEC 60044.6/1992 [14], também utiliza o termo fator de dimensionamento à transiente nominal K_{id} , expresso pela Equação (F.25) para um ciclo de operação C-O (*Close-Open*, fechamento e abertura do disjuntor) e pela Equação (F.26) para dois ciclos de operação C-O-C-O (*Close-Open-Close-Open*, fechamento e abertura do disjuntor por duas vezes seguidas), *vide* Figura F.3, e definido como:

Fator de dimensionamento ao transiente nominal K_{id} é o valor teórico representativo do dimensionamento para o regime transitório necessário a um ciclo de operação específico.

$$K_{id} = \frac{\omega I_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t_{id}}{T_1}} - e^{\frac{-t_{id}}{T_2}} \right) + 1 \quad (\text{F.25})$$

$$K_{id} = \left\{ \frac{\omega I_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t}{T_1}} - e^{\frac{-t_{id}}{T_2}} \right) - \text{sen } \omega t \right\} e^{\frac{-(t_m + t_{id})}{T_2}} + \frac{\omega I_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{\frac{-t_{id}}{T_1}} - e^{\frac{-t_{id}}{T_2}} \right) + 1 \quad (\text{F.26})$$

O fator de transiente K_{yf} , expresso pela Equação (F.24), assim como, a envoltória ou fator de dimensionamento nominal à Transiente K_{id} , expresso pela Equação (F.25), são mostrados graficamente na Figura F.4 para facilitar a compreensão.

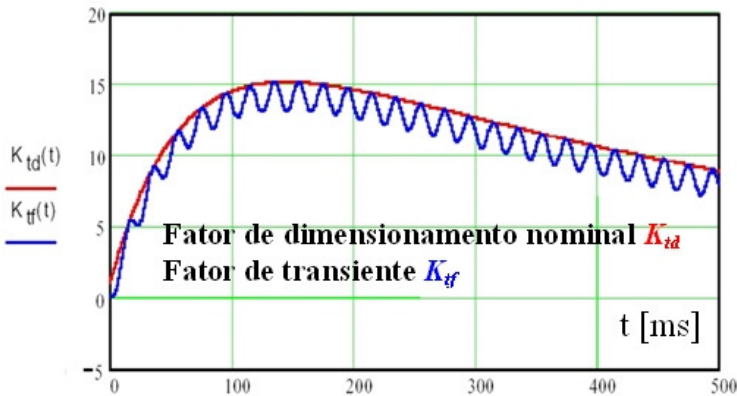


Figura F.4 - Constantes de dimensionamento para um ciclo de operação C-O [32].

No Anexo D são apresentados os procedimentos realizados pelos fabricantes, correspondente ao dimensionamento elétrico e geométrico no projeto de TC referente ao ponto de saturação para os diferentes tipos de classes, conforme as normas ANSI [13] e IEC [14][15].

Uma noção de como varia o tamanho do núcleo de um TC de mesma relação para carga 10VA, porém para condições de não resposta ao transitório (5P20) e aplicações com resposta à transitório (TPX – sem entreferro) e (TPY e TPZ – com entreferro), conforme IEC 60044-6 [14] pode ser vista na Figura F.5, onde se verifica que o tamanho do núcleo para TC com resposta à transitório é bem maior.

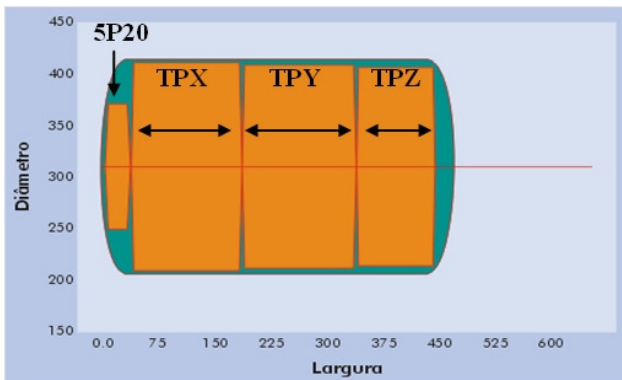


Figura F.5 - Noção do tamanho do núcleo para TC de mesma relação para 10VA de carga [1].

A Figura F.6 apresenta uma noção de como há vários fatores que influenciam a escolha da seção transversal do núcleo, sendo estes:

- O número de ampère-espira de acordo com a relação da capacidade dinâmica e a suportabilidade da corrente térmica, a qual o projeto do TC se destina. Isto contribuirá na definição do número de espira e por sua vez o dimensionamento do TC.
- A carga secundária, que contribuirá também no dimensionamento do enrolamento secundário.
- O tempo de atuação da proteção, que vai implicar no fator de majoração no dimensionamento do núcleo.
- Corrente de curto-circuito.
- Constante de tempo primária.

A Figura F.6 é apenas ilustrativa.

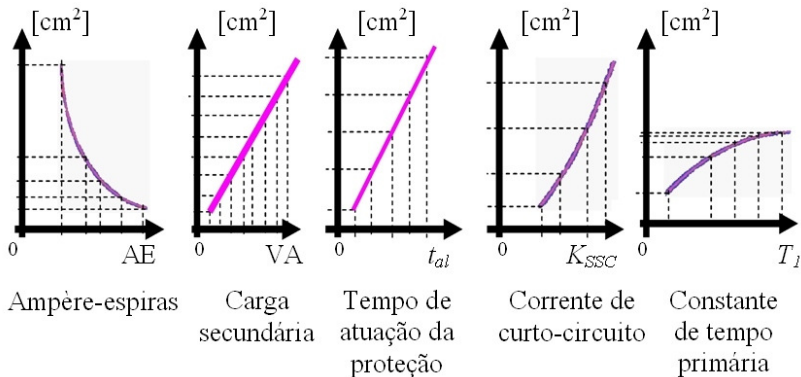


Figura F.6 – Exemplos ilustrativos de fatores que influenciam o tamanho do núcleo [10]