

# **INVESTIGAÇÃO SOBRE OS EFEITOS DA SATURAÇÃO EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO**

**PAULO SÉRGIO SILVA**

**Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase em Supervisão, Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.**

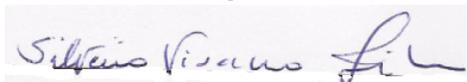
**Aprovada em 22 de julho de 2014.**



---

**Alberto Resende De Conti - Dr.**

**Supervisor**



---

**Silvério Visacro Filho - Dr.**

**Coordenador do CESEP**

---

## RESUMO

Este trabalho é dedicado à avaliação da saturação de transformadores de corrente (TCs) de proteção e dos fatores envolvidos neste fenômeno, tendo como referência o desempenho destes equipamentos em condição de curto-circuito assimétrico. Inicialmente, são abordadas as condições do sistema onde o TC deve ser aplicado, sendo identificados os parâmetros necessários para a avaliação de seu desempenho, como os valores de reatância e resistência, o módulo e o ângulo do curto-circuito, e as constantes de tempo primária e secundária. Outros parâmetros relevantes discutidos nesta monografia se referem à carga aplicada ao secundário do TC e à tensão de saturação do TC, que junto com os efeitos da assimetria da corrente primária e de sua representação no secundário do TC influenciam na saturação do núcleo. Para avaliar o desempenho de transformadores de corrente pertencentes às classes 10B200 e 10B400, utiliza-se a planilha de referência do IEEE e um modelo equivalente implementado na plataforma ATPDraw. Em ambos os casos, são simuladas três cargas no secundário. Os resultados obtidos indicam que as duas classes de TCs avaliadas levam praticamente ao mesmo resultado caso sejam consideradas as suas respectivas cargas padrão, o mesmo ocorrendo se a impedância padrão for mantida com alteração apenas do fator de potência para um valor próximo a 1. No caso de conexão de carga de baixo valor ôhmico no secundário de ambos os TCs, o TC de classe 10B200 leva a um resultado menos satisfatório, com uma maior saturação inicial em relação ao TC de classe 10B400. Embora este resultado não inviabilize a utilização do TC de classe 10B200 no caso particular investigado neste trabalho, ele é um indicativo da necessidade de se avaliar se o relé é capaz realizar a compensação da saturação do TC e atuar nos primeiros ciclos da falta.

---

## ABSTRACT

This work is dedicated to the evaluation of current transformer (CT) saturation and of factors involved in this phenomenon, taking as reference the CT performance in asymmetrical short-circuit conditions. Initially, the system conditions where the CT is applied are outlined. The parameters necessary for evaluating the CT performance are identified, namely system reactance and resistance, absolute value and angle of short-circuit current, and primary and secondary time constants. Other important parameters refer to the characteristics of the load seen from the CT's secondary terminal and the CT's saturation voltage. Together with the asymmetry of the primary current and its representation in the CT secondary, these parameters play an important role on the saturation of the CT core. For evaluating the performance of CTs of classes 10B200 and 10B400, both a spreadsheet proposed by IEEE and an equivalent model implemented in ATPDraw are considered. In both cases, three different load conditions are assumed in the CTs' secondary terminal. The results indicate that the two evaluated CT classes lead almost to the same results if their respective standard loads are considered, the same happening if the default impedance value is maintained except for a change in its power factor to a value close to 1. If a load with low-ohmic value is connected at the secondary of both CTs, the CT class 10B200 leads to a less satisfactory result, with higher initial saturation in relation to TC class 10B400. Although this result does not hinder the use of CT class 10B200 in the particular condition investigated in this work, it is indicative of the need to assess whether the relay is able to perform the compensation of the CT saturation and actuate in the first cycles of the fault.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	4
<b>2</b>	<b>TRANSFORMADORES DE CORRENTE: ASPECTOS FUNDAMENTAIS.....</b>	<b>5</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E MODELO SIMPLIFICADO .....	5
2.2	TABELA DE CARGA PADRÃO CONFORME ABNT – ANSI – IEC .....	8
2.3	ASPECTOS BÁSICOS DE MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	9
2.3.1	<i>Constante de tempo primária (<math>T_1</math>) .....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Constante de tempo secundária (<math>T_2</math>).....</i>	<i>12</i>
2.3.3	<i>Constantes de tempo <math>T_1</math> e <math>T_2</math> aplicadas ao desempenho de um TC em regimes transitórios.....</i>	<i>13</i>
2.3.4	<i>Fator de assimetria aplicado ao desempenho do TC em regimes transitórios</i>	<i>14</i>
2.3.5	<i>Saturação dos transformadores de corrente .....</i>	<i>17</i>
2.4	TIPOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO E NORMAS PERTINENTES .....	20
<b>3</b>	<b>MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE .....</b>	<b>23</b>
3.1	MODELO COMPUTACIONAL DO ATPDRAW.....	23
3.2	O MODELO DE TC IEEE PSRC .....	24
<b>4</b>	<b>ESTUDO COMPARATIVO DOS MODELOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....</b>	<b>29</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
4.2	ANÁLISE DO TC 600-5 A DE CLASSE 10B400.....	30
4.2.1	<i>Dados de ensaio.....</i>	<i>30</i>
4.2.2	<i>Dados para a simulação na planilha do IEEE PSRC.....</i>	<i>31</i>
4.2.3	<i>Dados para a simulação no ATPDraw .....</i>	<i>32</i>
4.2.4	<i>Simulação com carga máxima padrão (<math>X_c = 3,464 \Omega</math>, <math>R_c = 2 \Omega</math>).....</i>	<i>33</i>

---

---

4.2.5	<i>Simulação com carga máxima resistiva (<math>X_c = 0,1 \Omega</math>, <math>R_c = 4 \Omega</math>)</i> .....	34
4.2.6	<i>Simulação com carga mínima resistiva (<math>X_c = 0,1 \Omega</math>, <math>R_c = 0,6 \Omega</math>)</i> .....	35
<b>4.3</b>	<b>ANÁLISE DO TC 600-5 A DE CLASSE 10B200</b> .....	<b>37</b>
4.3.1	<i>Dados de ensaio</i> .....	37
4.3.2	<i>Dados para a simulação na planilha do IEEE PSRC</i> .....	37
4.3.3	<i>Dados para a simulação no ATPDraw</i> .....	37
4.3.4	<i>Simulação com carga máxima padrão (<math>X_c = 1,732 \Omega</math>, <math>R_c = 1 \Omega</math>)</i> .....	39
4.3.5	<i>Simulação com carga máxima resistiva (<math>X_c = 0,1 \Omega</math>, <math>R_c = 2 \Omega</math>)</i> .....	40
4.3.6	<i>Simulação com carga mínima resistiva (<math>X_c = 0,1 \Omega</math>, <math>R_c = 0,6 \Omega</math>)</i> .....	41
4.3.7	<i>Avaliação do desempenho dos TCs classe 10B200 e 10B400</i> .....	42
<b>4.4</b>	<b>RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>46</b>
5.1	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	<b>46</b>
5.2	<b>PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b> .....	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>49</b>

---

# 1 Introdução

## 1.1 Relevância e Contexto da Investigação

Um sistema de proteção típico é composto por relés (*hardware* e *software*), transdutores de tensão e corrente (transformadores de potencial e de corrente) e unidades de comunicação [PEREIRA, 1981]. A eficiência desse sistema na identificação de situações anormais de operação depende da exatidão do sinal dos transdutores e da eficiência do processamento desse sinal pelo *hardware* e *software* dos relés. Neste contexto, o transformador de corrente (TC) desempenha um papel de extrema importância para a proteção, pois é responsável por fornecer ao relé informações sobre o módulo e o ângulo da corrente do sistema primário e ao mesmo tempo garantir o isolamento da tensão do sistema e a redução da corrente primária para valores adequados.

A correta especificação do TC define a exatidão e o bom desempenho do sistema de proteção, principalmente em situações que envolvem elevada assimetria da corrente de curto-circuito primária. Nessas condições extremas de curto-circuito, é essencial conhecer os parâmetros do sistema de potência, as características do TC e os tempos de atuação da proteção para que se possa realizar a especificação adequada do TC [IEC 61869-2, 2007].

Ressalta-se que para se especificar o TC deve-se estar atento ao fato de que o curto-circuito pode ser simétrico ou assimétrico. Caso o curto-circuito seja simétrico, somente os parâmetros associados ao TC tem influência na corrente secundária. Por outro lado, caso o curto-circuito seja assimétrico, além dos parâmetros do TC deve-se considerar o impacto dos parâmetros da componente contínua gerada pelo sistema primário. A condição de curto-circuito assimétrico, em que as componentes contínuas associadas aos parâmetros do sistema e do secundário do TC interagem, é a pior condição para a especificação do TC.

No TC, a transdução do sinal de corrente do sistema de potência para o relé é feita através de um núcleo ferromagnético que realiza o acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário. A transdução de corrente é dependente da densidade de fluxo magnético máxima no núcleo do TC, que não deve exceder aproximadamente 18500 Gauss [BASSETO, 2010]. Se este limite for ultrapassado, verifica-se o aumento da corrente de excitação do TC, o que provoca distorções na forma de onda da corrente secundária do TC e pode levar a falhas de atuação do relé de proteção.

As características do sistema elétrico e da proteção definem qual o tipo de TC a ser utilizado. No caso de cubículos isolados a ar e a gás, aplicados em subestações abrigadas (Figura 1.1), existem limitações de espaço físico que dificultam a especificação do TC. De acordo com a norma NBR 6856 [1992], a maior classe de TCs de proteção é a 10B800, que foi muito utilizada em relés eletromecânicos no passado. Porém, essa classe de TC não é normalmente empregada em cubículos devido ao seu tamanho e à substituição dos relés eletromecânicos por digitais. Atualmente, o mais usual é utilizar classes menores que a 10B400, cargas secundárias reduzidas e fatores de potência próximos a 1. Considerando que a redução da classe diminui a tensão de saturação, para não haver saturação do TC em situações críticas de assimetria de corrente de curto-circuito ou para reduzir este efeito nos instantes iniciais deste fenômeno, o ideal seria o aumento da seção do núcleo do TC, o que é incompatível com o espaço disponível no cubículo e as classes utilizadas. Portanto, nesta condição, há a necessidade de se avaliar melhor o desempenho da proteção considerando a possibilidade de não se dimensionar o TC para a pior condição do curto-circuito assimétrico.



Figura 1.1 - Cubículo de manobra; reprodução do original em [SCHNEIDER, 2014].

---

Na literatura técnica diversos trabalhos são dedicados a avaliar o desempenho de transformadores de corrente frente aos efeitos de saturação causados pela assimetria do curto-circuito [DE CARVALHO et al., 2013; OSÓRIO, 2005; KEZUNOVIC et al., 1994; PEREIRA, 1981; PSRC, 2001]. Nestes, normalmente se recomenda a aplicação de TC especial e, se necessário, a realização de simulações para a avaliação do desempenho do relé.

Na aplicação de TC especial, além do sobredimensionamento da seção do núcleo há, em algumas soluções, a necessidade de inserção de entreferro. Esta solução pode ser inviabilizada por causa do espaço limitado no interior do cubículo. Neste caso, é necessário realizar simulações para avaliar a eficácia da atuação do relé nas diversas condições definidas pelo sistema de proteção, considerando a possibilidade de não transdução ou de distorção da corrente pelo TC. Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar o desempenho de transformadores de corrente considerando a melhor transdução da corrente para o relé na condição de curto-circuito assimétrico. Esta avaliação é realizada por meio da investigação dos parâmetros do sistema, do secundário do TC, da tensão de saturação, da relação de transformação e de seus efeitos na saturação do núcleo do TC.

## **1.2 Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento**

O objetivo desta monografia consiste em avaliar o desempenho de transformadores de corrente aplicados em cubículos de manobra considerando a sua capacidade de reproduzir com fidelidade o módulo e o ângulo da corrente de curto-circuito assimétrica no circuito secundário. Este desempenho é verificado através da identificação das constantes de tempo primária e secundária, da relação de transformação, da tensão de saturação e do instante de ocorrência do curto-circuito. Estes dados são utilizados como parâmetros de entrada de modelos computacionais implementados em planilhas eletrônicas e na plataforma ATPDraw. Por meio destes modelos são realizadas comparações do desempenho de transformadores de corrente em diferentes situações de operação. Através da análise dos resultados são sugeridos critérios e metodologias para melhor adequação do TC a ser utilizado em cubículos de manobra empregados em sistemas elétricos.

---

---

### 1.3 Organização do texto

O texto deste trabalho foi distribuído em cinco capítulos, incluindo a presente **Introdução**. No **Capítulo 2** é realizada uma caracterização sucinta dos aspectos fundamentais do TC de proteção, de sua modelagem e do fenômeno da saturação. No **Capítulo 3** são discutidas diferentes abordagens de modelagens de transformadores de corrente para estudos transitórios (modelo computacional e o modelo do IEEE). No **Capítulo 4** é realizado um estudo comparativo dos dois modelos definidos no Capítulo 4 considerando-se um caso base e os consequentes efeitos da assimetria da corrente de curto-circuito, da carga do TC e de sua constante de tempo no comportamento deste equipamento em situações de operação. As conclusões finais deste trabalho, decorrentes das avaliações realizadas, assim como os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade, são apresentadas no **Capítulo 5**. Ao final do texto são apresentadas as **Referências Bibliográficas** utilizadas.

---

# 2 Transformadores de Corrente: Aspectos Fundamentais

## 2.1 Características básicas e modelo simplificado

O transformador de corrente pode ser caracterizado pelo modelo equivalente ilustrado na Figura 2.1 [BASSETO, 2010]. Este modelo inclui um transformador ideal para caracterizar a relação de espiras ( $N$ ) de primário para secundário, a impedância primária referida ao secundário, representada pelos parâmetros  $L_1'$  e  $R_1'$ , o ramo de magnetização, representado por  $L_m$  e  $R_p$ , que caracteriza a corrente de excitação e as perdas no núcleo, a impedância do secundário, representada por  $L_2$  e  $R_2$ , e a impedância da carga, representada por  $R_c$  e  $L_c$ . No circuito da Figura 2.1,  $i_1$  representa a corrente primária referida ao circuito secundário do TC,  $i_2$  representa a corrente secundária e  $i_0$  representa corrente de excitação.

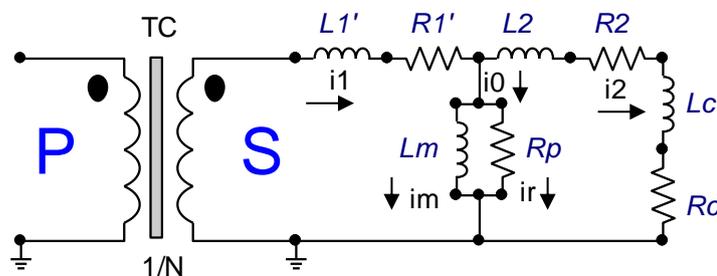


Figura 2.1 - Modelo básico do transformador de corrente

Na Figura 2.1 as indutâncias  $L_1'$  e  $L_2$  tem por origem o fluxo dispersão. O fluxo de dispersão é responsável pela alta ou baixa reatância secundária do TC, que é dividido em classes A e B conforme a norma [NBR 6856, 1992]. O TC Classe A possui alta impedância interna (alta reatância de dispersão no secundário com carga nominal em relação à impedância total do circuito secundário) [OLIVEIRA, 2012]. Esta classe de TC possui a bobina primária enrolada sobre o núcleo, conforme ilustrado na Figura 2.2(a). O TC Classe B possui baixa impedância interna (baixa reatância de dispersão no secundário com carga nominal) [OLIVEIRA, 2012]. Esta classe de TC possui núcleo toroidal com enrolamento secundário uniformemente distribuído, conforme ilustrado na Figura 2.2(b).

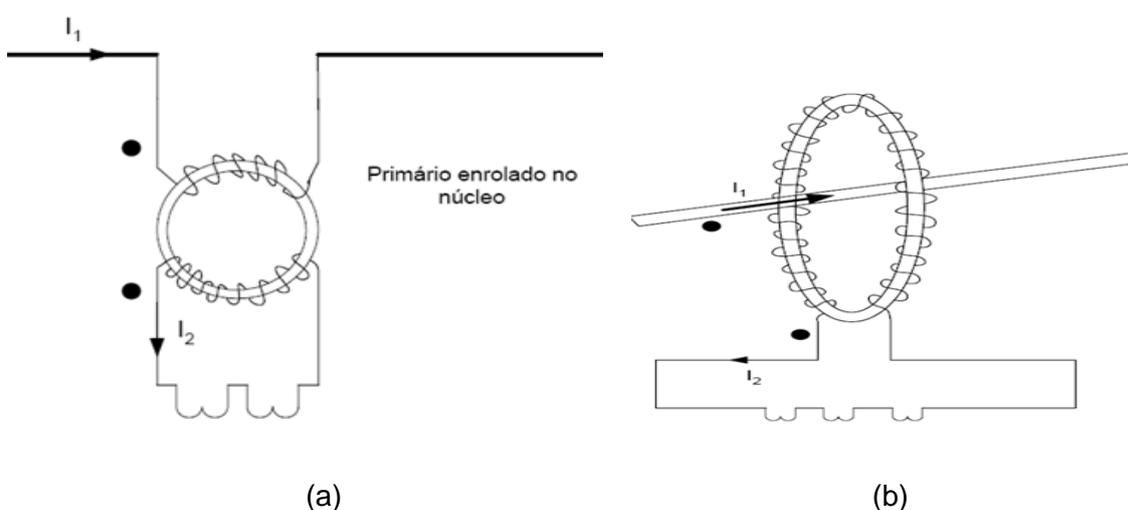


Figura 2.2 – (a) TC classe A; (b) TC classe B; reprodução do original em [OLIVEIRA, 2012].

No modelo de TC ilustrado na Figura 2.1 a corrente de excitação  $i_0$  atravessa o ramo composto pela reatância de magnetização, representada por  $L_m$ , e a resistência de perdas do núcleo. A corrente  $i_0$  divide-se entre estes ramos, sendo definidas a corrente de magnetização do núcleo ( $i_m$ ) e a corrente de perdas por foucault e histerese ( $i_r$ ). A reatância de magnetização do núcleo é dividida em duas regiões de atuação. Na primeira, tem-se uma região linear onde prevalece uma relação de proporcionalidade entre a corrente de magnetização e a tensão do secundário do TC. Na segunda região, definida como região de saturação do núcleo do TC, perde-se esta relação de linearidade. A região de linearidade vai de zero até a tensão limite do Joelho de saturação. Após este ponto, entra-se na região de saturação. Nesta região, verifica-se uma redução brusca da impedância do ramo de magnetização e o crescimento exagerado da corrente de magnetização. O fenômeno de redução da impedância de magnetização é motivado pela redução da disponibilidade dos domínios magnéticos

do núcleo. Estes domínios são limitados pela relação máxima do fluxo que pode atravessar a seção do núcleo sem que este sature [PEREIRA, 1981]. As curvas de excitação ilustradas na Figura 2.3 definem as regiões linear e de saturação. Nesta figura é possível identificar as curvas de excitação referentes às diversas derivações de um TC com relação máxima de 1200-5 A. Também é possível verificar o Joelho de saturação, que indica a mudança brusca da corrente de excitação em função da tensão aplicada no secundário, e as duas regiões delimitadas por esse Joelho.

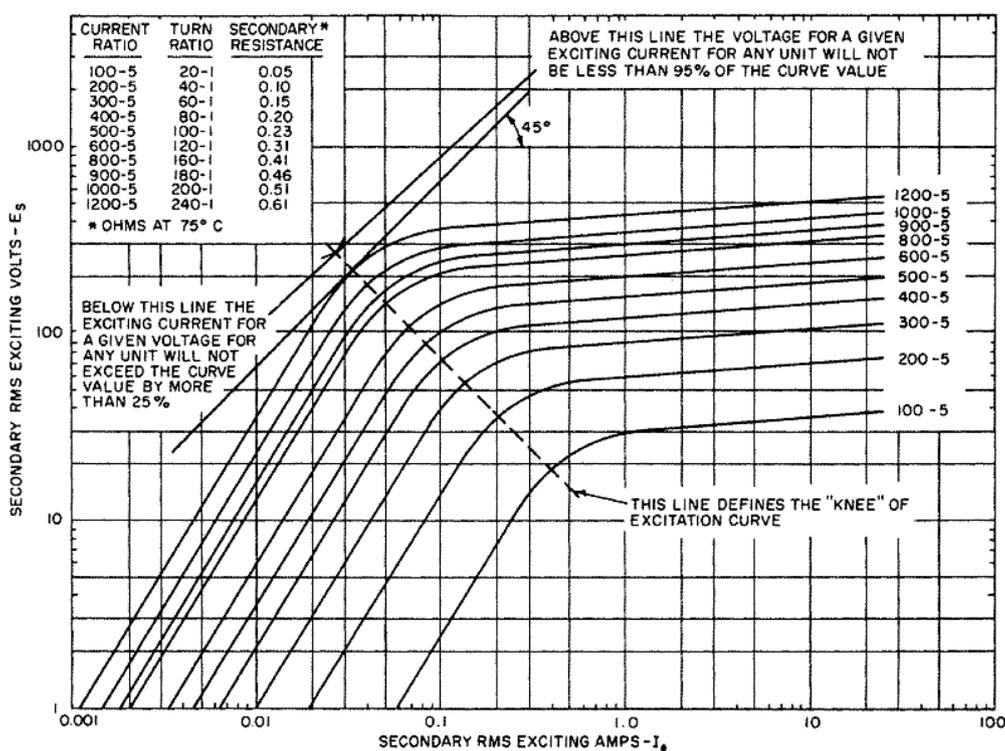


Figura 2.3 - Gráfico da tensão de saturação versus corrente de excitação; reprodução do original em [IEC 61869-2, 2007].

O Joelho de saturação do TC da Figura 2.3, além caracterizar a máxima tensão de saturação, indica a impedância máxima no secundário do TC. Esta impedância pode ser obtida de forma aproximada dividindo-se a tensão de saturação por 100, que corresponde ao produto da corrente nominal, que no caso ilustrado é de 5 A, pelo fator limite de precisão considerado, definido como 20, conforme NBR 6856 [1992]. Vale notar que a Figura 2.3 auxilia na identificação aproximada da impedância máxima do secundário do TC, mas não traz informações sobre o fator de potência (FP) desta impedância. Para completar a informação sobre a carga nominal do TC é necessário verificar a tabela padrão recomendada pelas normas aplicadas aos TC's de proteção.

## 2.2 Tabela de carga padrão conforme ABNT – ANSI – IEC

Na seção anterior apresenta-se uma discussão sobre como estimar o valor da impedância máxima no secundário do TC. Contudo, não há como extrair informações sobre o fator de potência (FP) da carga utilizando o método apresentado. Para a obtenção do FP da carga padrão do TC, conforme [NBR 6856, 1992; IEC 61869-2, 2007; IEEE C57.13, 2008], são apresentadas as Tabelas 2.1 e 2.2. Na Tabela 2.1, verifica-se a existência de várias cargas com fator de potência de 0,5 e 0,9 para a corrente padrão de 5 A. Essas cargas são importantes para a análise do desempenho de transformadores de corrente na condição de curto-circuito assimétrico, pois entram no cálculo da constante de tempo  $T_2$  [OSÓRIO, 2005].

Tabela 2.1 - Carga padrão do TC [NBR 6856, 1992]

Tensão de saturação	Potência (VA)	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Impedância ( $\Omega$ )	FP	Carga	Designação	Corrente (A)
10	2,5	0,09	0,044	0,1	0,9	C 2,5	B 10	5
20	5	0,18	0,087	0,2	0,9	C 5	B 20	5
50	12,5	0,45	0,218	0,5	0,9	C 12,5	B 50	5
90	22,5	0,81	0,392	0,9	0,9	C 22,5	B 90	5
100	25	0,5	0,866	1	0,5	C 25	B 100	5
180	45	1,62	0,785	1,8	0,9	C 45	B 180	5
200	50	1	1,732	2	0,5	C 50	B 200	5
360	90	3,24	1,569	3,6	0,9	C 90	B 360	5
400	100	2	3,464	4	0,5	C 100	B 400	5
800	200	4	6,928	8	0,5	C 200	B 800	5

Na Tabela 2.2, tem-se um quadro resumo dos padrões de cargas adotados nas normas NBR 6856 [1992], IEC 61869-2 [2007] e IEEE C57.13 [2008]. Nesta é possível identificar as cargas e relacioná-las com as demais normas. Verifica-se que a norma IEEE C57.13 [2008], com exceção de duas cargas, é semelhante à norma brasileira NBR 6856 [1992]. Já a norma IEC 61869-2 [2007] limita sua maior carga padronizada a 30 VA, adotando na maioria dos casos FP=0,8. Nesta norma o comprador deve informar ao fabricante se há necessidade de cargas acima de 30 VA, pois não são previstas cargas padronizadas acima deste valor. Também se observa que as cargas presentes na norma IEC se baseiam em uma corrente secundária nominal de 1 A, enquanto nas outras duas normas a corrente padrão é de 5 A.

Tabela 2.2 - Quadro resumo das cargas padrão das diversas normas; reprodução do original em [OLIVEIRA, 2012]

ABNT	ANSI	IEC	Características a 60 Hz e 5 A			
			ANSI e ABNT			IEC
			Potência [VA]	Z [ $\Omega$ ]	Cos $\varphi$	Cos $\varphi$
C 2,5	B – 0,1	2,5 VA	2,5	0,1	0,9	1
C 5,0	B – 0,2	5,0 VA	5	0,2	0,9	0,8
C 12,5	B – 0,5	10 VA	12,5	0,5	0,9	0,8
C 22,5	B – 0,9	15 VA	22,5	0,9	0,9	0,8
C 45	-	-	45	1,8	0,9	-
C 90	-	-	90	3,6	0,9	-
C 25	B – 1	30 VA	25	1	0,5	0,8
C 50	B – 2	-	50	2	0,5	-
C 100	B – 4	-	100	4	0,5	-
C 200	B – 8	-	200	8	0,5	-

### 2.3 Aspectos básicos de modelagem dos transformadores de corrente

A partir do circuito da Figura 2.1, é possível identificar alguns parâmetros de interesse para a caracterização do desempenho de transformadores de corrente. Deve-se para tanto utilizar estes parâmetros para equacionar um modelo matemático que permita definir as variáveis que são importantes para a caracterização das correntes do TC.

Para um equacionamento básico, pode-se considerar  $R_2' = R_c + R_2$ ,  $L_2' = L_c + L_2$ ,  $R_p = 0$ ,  $i_r = 0$  e  $i_m = i_0$ , de onde se obtém, a partir do circuito da Figura 2.1 [OSÓRIO, 2005],

$$L_m * \left( \frac{di_0}{dt} \right) = L_2' * \left( \frac{di_2}{dt} \right) + (R_2' * i_2) \quad (2.1)$$

Fazendo

$$i_2 = i_1 - i_0 \quad (2.2)$$

e substituindo (2.2) em (2.1), tem-se

$$(L_m + L_2') * \left(\frac{di_0}{dt}\right) + R_2' * i_0 = L_2' * \left(\frac{di_1}{dt}\right) + (R_2' * i_1) \quad (2.3)$$

Fazendo

$$T_2 = \frac{L_m + L_2'}{R_2'} \quad (2.4)$$

$$P = \frac{L_2'}{L_m + L_2'} \quad (2.5)$$

e substituindo (2.4) e (2.5) em (2.3), obtém-se

$$\left(\frac{di_0}{dt}\right) + \frac{i_0}{T_2} = P * \left(\frac{di_1}{dt}\right) + \frac{i_1}{T_2} \quad (2.6)$$

A partir de (2.6), podem ser desenvolvidas duas equações para  $i_0$  [OSÓRIO, 2005]: uma, válida para análises em regime permanente (curtos-circuitos simétricos), é expressa na equação (2.7). Outra, válida para análises em regimes transitórios (curtos-circuitos assimétricos), é expressa na equação (2.8). Na dedução de (2.7), supõe-se que  $i_1 = I * \text{sen}(\omega t + \delta)$ , onde  $I$  corresponde ao valor máximo da corrente secundária do TC desprezando-se os efeitos de magnetização e  $\delta$  corresponde ao ângulo entre a fonte e a carga primária. Na dedução de (2.8), supõe-se  $i_1 = I * [-\text{sen}(\delta) * e^{-t/T_1} + \text{sen}(\omega t + \delta)]$ , onde  $T_1 = L_1/R_1$  é definida como constante de tempo primária, que depende dos valores de indutância  $L_1$  e resistência  $R_1$  vistos no ponto de ocorrência do curto-circuito.

$$i_0 = \left[ I * \frac{P * \omega^2 * T_2^2 + 1}{(\omega^2 * T_2^2 + 1)} \right] * \text{sen}(\omega t) + \left[ \frac{I * \omega * T_2 * (1 - P)}{\omega^2 * T_2^2 + 1} \right] * \left[ e^{\frac{-t}{T_2}} - \cos(\omega t) \right] \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
i_0 = & \left[ I * \frac{T_1 - P * T_2}{(T_1 - T_2)} \right] * \left[ e^{\frac{-t}{T_1}} - e^{\frac{-t}{T_2}} \right] - \left( \frac{I * \omega * T_2}{\omega^2 * T_2^2 + 1} \right) \\
& * \left\{ \text{sen}(\omega t) - \omega * P * T_2 * \left( e^{\frac{-t}{T_2}} - \cos(\omega t) \right) + \left[ \frac{1}{(\omega^2 * T_2^2 + 1)} \right] \right. \\
& \left. * \left[ e^{\frac{-t}{T_2}} - \cos(\omega t) + \omega * P * T_2 * \text{sen}(\omega t) \right] \right\} \quad (2.8)
\end{aligned}$$

Nas equações (2.7) e (2.8) deve-se observar as constantes de tempo  $T_1$  e  $T_2$ , que são importantes para a evolução da corrente no secundário do TC. Verifica-se que  $T_2$  aparece em (2.7) e (2.8), pois corresponde à relação  $L/R$  do secundário do TC. Já a constante  $T_1$  aparece somente na equação (2.8), onde se supõe a existência de assimetria na corrente de curto-circuito primária. Nas subseções a seguir discute-se em maior detalhe a importância de  $T_1$  e  $T_2$  para o desempenho do transformador de corrente. Vale notar que as equações (2.7) e (2.8) são deduzidas supondo-se a operação do TC na região linear, desprezando-se para isso qualquer efeito de saturação.

### 2.3.1 Constante de tempo primária ( $T_1$ )

Durante a ocorrência de um curto-circuito no sistema de elétrico de potência, os transformadores de corrente devem reproduzir em seu secundário a corrente de curto-circuito dentro dos limites de erro definidos por norma. Um dado importante para o bom desempenho do TC é a identificação da máxima assimetria no ponto de aplicação deste equipamento, que geralmente ocorre quando a tensão no momento da falta é nula. Esta assimetria ocorre devido à componente contínua da corrente do curto-circuito, que decai exponencialmente com o tempo. Conforme [PINTO e GOUVÊA, 1986] esta assimetria é caracterizada pela constante de tempo  $T_1$ , que está associada à relação  $X/R$  do sistema. A constante de tempo  $T_1$  pode ser calculada como

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{X_1}{2 * \pi * f * R_1} \quad (2.9)$$

onde  $f$  é a frequência de operação,  $R_1$  é a resistência,  $X_1$  é a reatância e  $L_1$  é a indutância primária do sistema.

Grandes valores de  $X/R$  são verificados, por exemplo, em transformadores com elevada impedância de curto-circuito e baixas perdas totais, sendo este o caso de transformadores de subestações de distribuição e transmissão cuja potência é definida em MVA. Já o contrário é observado em transformadores de redes de distribuição com potência da ordem de KVA, pois possuem baixa impedância de curto-circuito [GE MULTILIN, 2006].

### 2.3.2 Constante de tempo secundária ( $T_2$ )

A constante de tempo secundária caracteriza a relação  $L/R$  do circuito secundário do TC. Seu valor pode ser calculado através da razão entre a indutância equivalente e a resistência equivalente do secundário do TC, conforme indicado na equação (2.4). Esta constante de tempo é utilizada para otimizar o tamanho do núcleo do TC, pois ao reduzir-se  $T_2$  diminui-se o tempo de saturação do núcleo do TC. Para esta redução pode-se, por exemplo, introduzir um entreferro no núcleo do TC, o que reduz a indutância de magnetização ( $L_m$ ). A redução de  $L_m$ , embora reduza o tempo de saturação, implica por outro lado o aumento da corrente de excitação e do erro do TC. Portanto, deve-se avaliar se há algum ganho nesta implementação.

Na Tabela 2.3 é apresentado um quadro resumo de equações que permitem o cálculo da constante  $T_2$  em diferentes condições de aplicação.

Tabela 2.3 - Equações para o cálculo da constante de tempo  $T_2$  [IEC 61869-2, 2007; OSÓRIO, 2005].

Descrição	Constante $T_2$	
<b>Núcleo sem entreferro</b>	$\frac{L_m}{R_2'} = \mu_0 * \mu_r * A * \frac{N_2^2}{l_m * R_2'}$	(2.10)
<b>Núcleo com entreferro</b>	$\frac{L_m}{R_2'} = \mu_0 * A * \frac{N_2^2}{l_a * R_2'}$	(2.11)
<b>Norma IEC 61869-2</b> (Equação Geral)	$\frac{L_m + L_c}{R_2 + R_c}$	(2.12)

Na Tabela 2.3,  $N_2$  corresponde ao número de espiras do secundário do TC,  $\mu_r$  representa a permeabilidade do material magnético do núcleo,  $A$  corresponde à área da seção reta do núcleo,  $l_m$  é o comprimento médio do circuito magnético,  $R_2'$  representa a resistência do circuito secundário, juntamente com a resistência do relé e dos condutores de conexão ao relé, e  $l_a$  corresponde à soma de todos os comprimentos de entreferro introduzidos no núcleo do TC [PEREIRA, 1981].

Caso a indutância de magnetização ( $L_m$ ) não seja conhecida, a norma IEC 61869-2 [2007] define este valor utilizando a equação (2.13) e os dados da Figura 2.3 em 20% e 90% da parte linear da curva de saturação considerando uma tensão de saturação ( $E_s$ ) correspondente ao joelho da saturação.

$$L_m = \frac{0,7 * E_s}{(i_{90} - i_{20}) * (2 * \pi * f)} \quad (2.13)$$

Na equação (2.13),  $i_{90}$  e  $i_{20}$  correspondem ao pico da corrente na região linear a 20% e 90% do seu valor e  $f$  é a frequência da fonte de alimentação utilizada no ensaio de saturação.

A norma IEEE C37.110 [2007], para cálculo da indutância de magnetização, propõe a utilização da tensão e da corrente no ponto de inflexão da curva de saturação, conforme indicado na equação (2.14).

$$L_m = \frac{E_{spico}}{2 * \pi * f * I_{pico}} \quad (2.14)$$

### **2.3.3 Constantes de tempo $T_1$ e $T_2$ aplicadas ao desempenho de um TC em regimes transitórios**

A Figura 2.4 ilustra a relevância das constantes de tempo  $T_1$  e  $T_2$  na caracterização das correntes primária e secundária de um TC supondo que este opere na região linear. Percebe-se que, em função da diferença entre as duas constantes, a corrente secundária pode apresentar taxa de decaimento diferente da taxa de decaimento da corrente original. Nas situações em que o nível de assimetria é

suficiente para levar à saturação o TC, a constante de tempo secundária pode ter grande importância na distorção da forma de onda da corrente resultante. Isto porque, com a ocorrência de saturação, o valor de  $L_m$  sofre um decréscimo pronunciado, fazendo com que a corrente secundária do TC apresente um decaimento bem mais acentuado do que a corrente primária. Portanto, é importante otimizar a constante de tempo  $T_2$ , que é definida pelos parâmetros elétricos e magnéticos do TC e da carga, de forma a minimizar o seu impacto na distorção da forma de onda da corrente secundária.

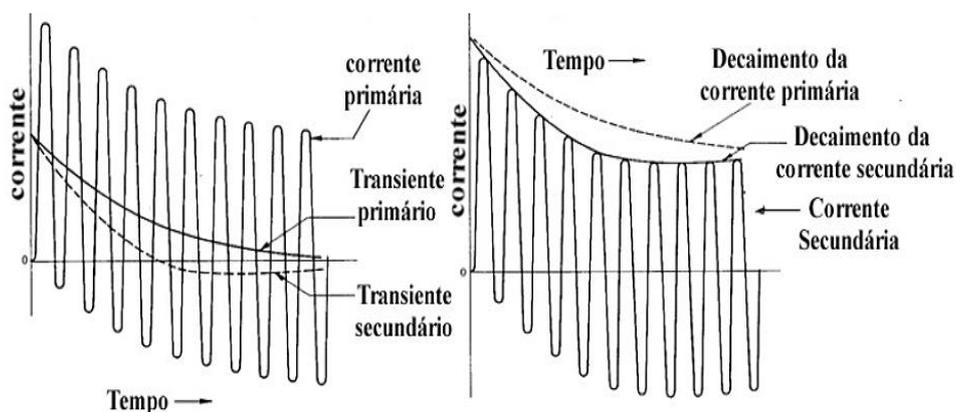


Figura 2.4 – Comportamento do tempo de resposta do TC no secundário em relação ao tempo de estímulo no primário; reprodução do original em [COELHO, 2011].

### 2.3.4 Fator de assimetria aplicado ao desempenho do TC em regimes transitórios

Transformadores de corrente tem que lidar, normalmente, com curtos-circuitos primários assimétricos. Neste contexto, é necessário avaliar o grau de assimetria da corrente de curto-circuito para assegurar o dimensionamento correto do TC. Conforme discutido anteriormente, a corrente de curto-circuito transitória é composta por uma componente exponencial (normalmente denominada componente contínua) e uma componente senoidal, que são representadas, respectivamente, pelo primeiro e segundo termos da equação (2.15). Conforme discutido anteriormente, a componente exponencial depende da constante  $T_1$ , que caracteriza a assimetria e o tempo de decaimento da corrente de curto-circuito. Em outras palavras, esta constante determina o tempo em que a componente exponencial fica ativa no secundário do TC.

$$i_1 = -I * \text{sen}(\delta) * e^{\frac{-t}{T_1}} + I * \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.15)$$

Na equação (2.15),  $I$  é o valor de pico da corrente de curto-circuito,  $\delta$  é a diferença entre o ângulo da fonte e da carga,  $\omega$  é a frequência angular e  $t$  é o instante de ocorrência do curto-circuito. Caso  $\delta$  seja  $\pm 90^\circ$ , o valor máximo da corrente de curto-circuito ocorre em  $\omega * t = 0$ . A Figura 2.5 ilustra a aplicação da equação (2.15) considerando uma corrente de falta assimétrica.

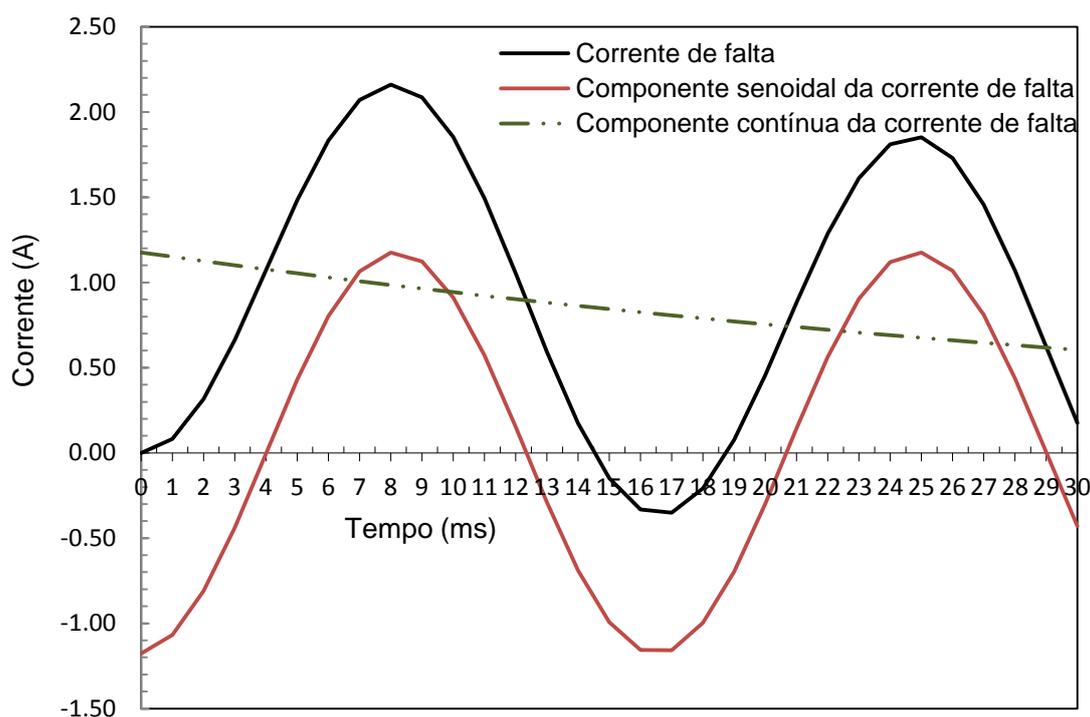


Figura 2.5 - Corrente de falta assimétrica.

O grau de severidade da componente contínua é definido pelo fator de assimetria ( $F_a$ ), que é a razão entre o valor instantâneo de  $i_1$ , representado pela equação (2.15), e o valor eficaz da corrente de curto-circuito em regime permanente, dado pela equação (2.16). Segundo [PINTO e GOUVÊA, 1986], o valor máximo do fator de assimetria ocorre no primeiro semiciclo após a falta assimétrica. Na Figura 2.5, verifica-se que após o curto-circuito assimétrico a componente contínua do curto-circuito aparece com sinal contrário ao da componente senoidal. Portanto somente após a inversão da polaridade da componente senoidal em seu primeiro ciclo é que ocorre o valor máximo da corrente de um curto-circuito assimétrico.

$$i_{1ca\text{ eficaz}} = \frac{I}{\sqrt{2}} * \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.16)$$

A Figura 2.6 apresenta a variação do fator de assimetria em função de X/R. Neste gráfico tem-se duas curvas. A primeira representa o valor máximo do fator de assimetria definido anteriormente e indicado pela legenda “I Pico”. Na segunda curva, é apresentado o valor máximo do fator de assimetria eficaz, que é definido como a relação entre o valor máximo eficaz da corrente de curto-circuito assimétrica e o valor eficaz simétrico. Em ambos os casos, verifica-se que o aumento de X/R do sistema resulta em um aumento do fator de assimetria.

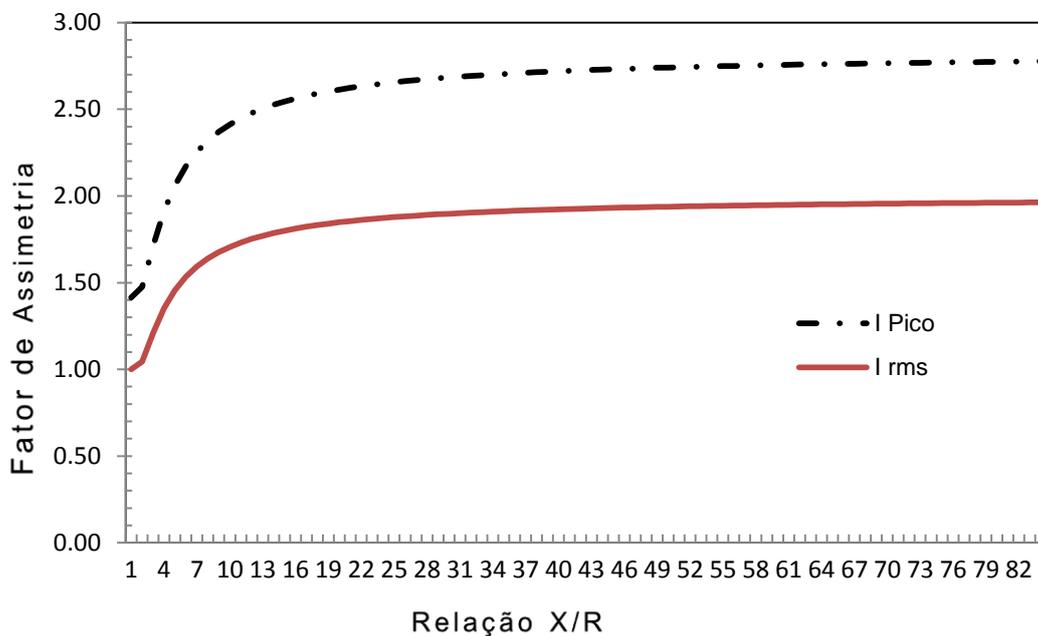


Figura 2.6 – Relação do fator de assimetria com o fator X/R em função do tempo.

A Figura 2.7 apresenta a variação do tempo de decaimento da componente contínua para vários valores de X/R em função do tempo. Percebe-se que o aumento de X/R resulta em um decaimento mais lento da componente contínua da corrente de curto-circuito, conforme esperado.

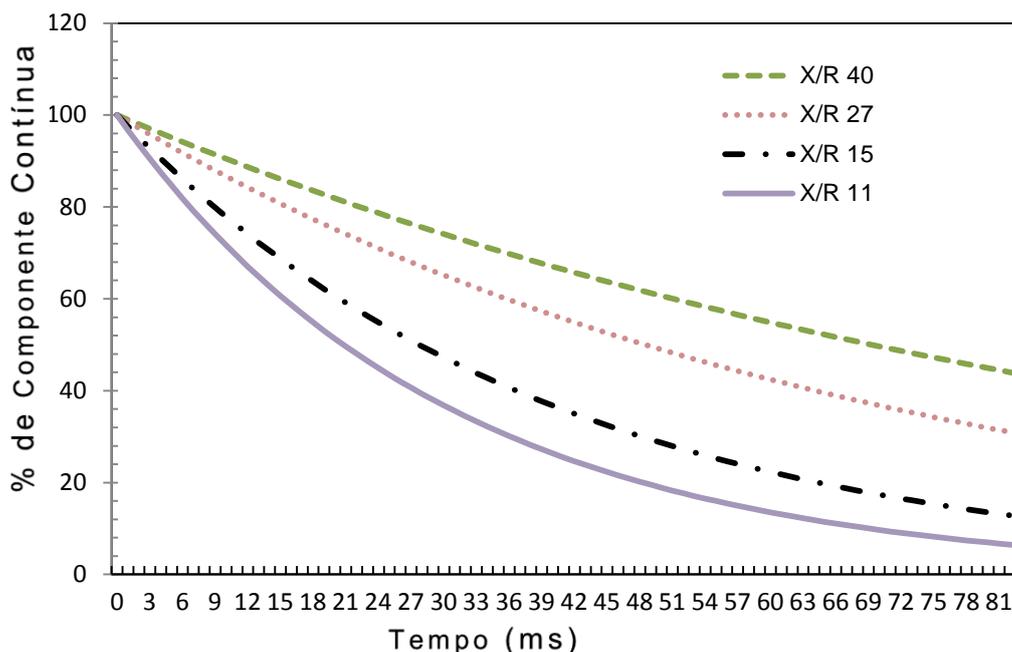


Figura 2.7 – Relação entre a componente contínua e o valor de X/R em função do tempo.

### 2.3.5 Saturação dos transformadores de corrente

O fluxo magnético gerado pela corrente primária é responsável pela transdução da corrente secundária no transformador de corrente. Com a eventual indisponibilidade dos domínios magnéticos do núcleo causada por um aumento excessivo da densidade de fluxo resultante, verifica-se a ocorrência do fenômeno de saturação. A ocorrência de saturação pode ser representada eletricamente no modelo do TC por meio do controle da indutância de magnetização  $L_m$ . Conforme discutido anteriormente, a indutância de magnetização tem seu comportamento dividido em duas regiões. Na primeira região, denominada região linear, é verificado um valor elevado de  $L_m$ , sendo este valor determinado aproximadamente pela razão entre a tensão no secundário e a corrente de magnetização. Na segunda região, definida como região de saturação, o valor da indutância de magnetização cai de forma acentuada, deixando de ser observada a relação de linearidade entre a tensão no secundário e a corrente de magnetização. Como consequência, a corrente de magnetização cresce exageradamente. A redução da indutância se deve à diminuição da disponibilidade dos domínios magnéticos do núcleo, sendo estes limitados pela relação entre o fluxo magnético máximo e a seção do núcleo. Para a caracterização dessas duas regiões, na prática, é realizado o levantamento da curva de excitação,

que relaciona a tensão secundária à corrente de excitação [PEREIRA, 1981]. Na Figura 2.3 observa-se a primeira região linear antes do joelho de saturação (*knee point*) e a segunda região de saturação após o joelho de saturação.

Conforme discutido anteriormente, a componente contínua associada a  $T_1$  e  $T_2$  é um fator relevante para a saturação do núcleo do TC [PEREIRA, 1981]. Esta componente, por conta de sua unidirecionalidade, compromete a disponibilidade dos domínios magnéticos no núcleo. Estas constantes podem acarretar no aumento do erro do TC através da elevação da corrente de magnetização e da redução ou distorção da corrente secundária, afetando o desempenho da proteção.

Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de saturação de um TC em função da componente contínua do curto-circuito. Nesta figura pode-se verificar que o TC não foi dimensionado para suportar esta componente em seus ciclos iniciais. Também é possível observar que, com o aumento do fluxo, o núcleo entra em saturação devido à forte assimetria da corrente primária em seus primeiros ciclos. Com o núcleo saturado, não há mais domínios disponíveis para a reprodução da corrente secundária. Neste momento, a corrente secundária e a impedância de magnetização se anulam e a corrente de magnetização dispara. Para haver domínios magnéticos disponíveis é necessário que o fluxo inverta sua polaridade, o que permite a reprodução parcial da corrente secundária. Esta reprodução da corrente secundária permanece enquanto a polaridade for contrária à polaridade de saturação do núcleo. Como o fenômeno de saturação e polarização do núcleo por componente contínua do curto-circuito é dependente das constantes  $T_1$  e  $T_2$ , deve-se aguardar o decaimento da componente exponencial da corrente curto-circuito para que haja a diminuição da saturação e o consequente retorno das correntes secundária e de magnetização a seus valores nominais sem distorções e erros [PEREIRA, 1981].

Para reproduzir sem erros os primeiros ciclos de correntes de curto-circuito com alto fator de assimetria, conforme verificado na Figura 2.8, é necessário sobredimensionar o núcleo do TC [PEREIRA, 1981]. Já em condições de religamentos, é necessário verificar o tempo de decaimento da saturação do TC, pois se o religamento ocorrer com um tempo morto pequeno o núcleo pode estar saturado e a proteção pode atuar indevidamente ou não atuar. Para diminuir este tempo de decaimento e, portanto, o tempo de permanência do fluxo remanente no núcleo ou até mesmo a sua eliminação, é necessária a introdução de entreferro, o que modifica a constante de tempo  $T_2$ .

---

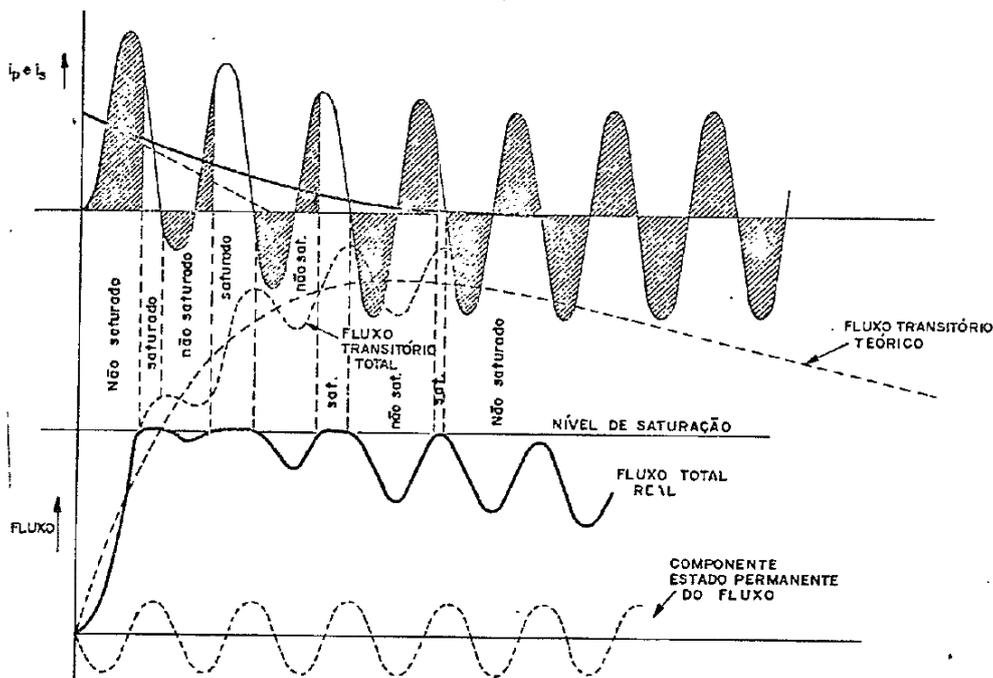


Figura 2.8 – Apresentação da evolução da saturação do núcleo; reprodução do original em [PEREIRA, 1981].

Exemplos de formas de onda da corrente de excitação e da corrente secundária do TC em condição de saturação em um evento de curto-circuito assimétrico são apresentados na Figura 2.9. Verifica-se, nesta figura, que a corrente de excitação inicial é elevada e a corrente secundária é deformada em menos de um quarto de ciclo. Este fenômeno se deve à elevada assimetria da corrente de curto-circuito, representada pela constante de tempo  $T_1$  e sua interação com a constante  $T_2$ . Pode-se observar que após o quinto semiciclo há uma redução da saturação do núcleo. Isso ocorre porque a forma de onda da corrente secundária começa a aumentar, indicando que os efeitos das constantes de tempo primária e secundária diminuem conforme previsto.

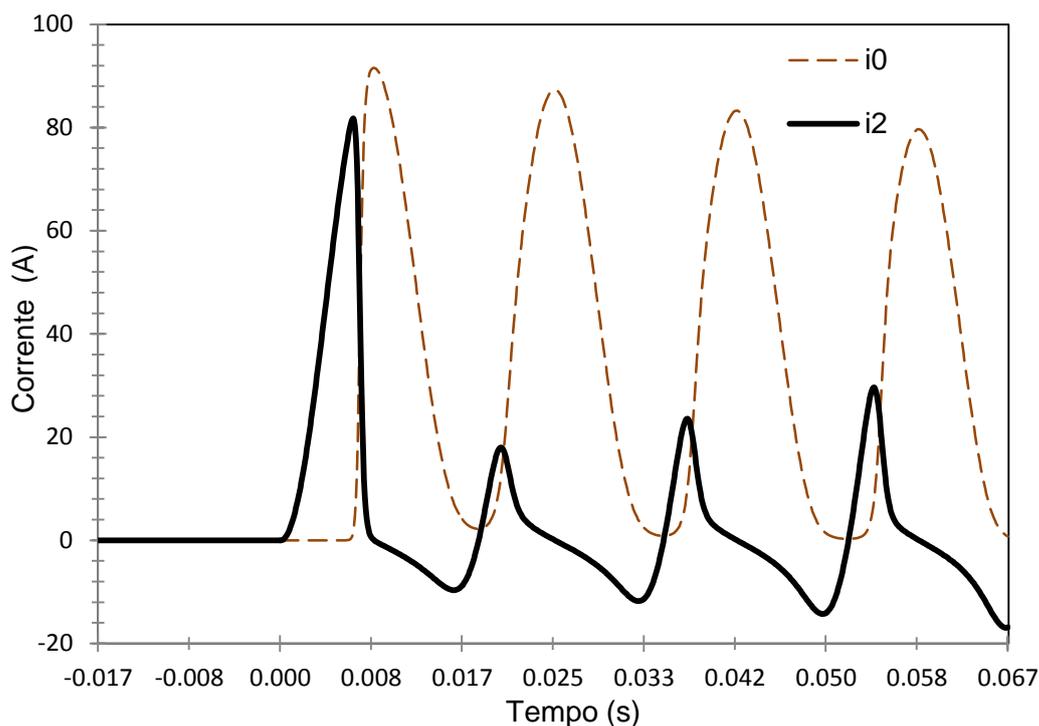


Figura 2.9 - Corrente de excitação  $i_0$  e secundária  $i_2$  com a saturação do núcleo.

## 2.4 Tipos de Transformadores de Corrente de Proteção e Normas Pertinentes

A norma IEC 61869-2 [2007] classifica os transformadores de corrente para que estes atendam às necessidades do sistema de proteção. Para exemplificar este fato, na Figura 2.10 tem-se a ilustração da variação do tamanho do núcleo de um TC com certa relação de transformação, para uma carga de 10 VA, supondo diferentes classes de TCs. Percebe-se que o TC classe P é bem menor que os demais, pois seu núcleo é dimensionado considerando somente a possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos simétricos. O TPX é dimensionado para religamento rápido em condição de assimetria, o que requer que a dimensão de seu núcleo seja maior que a de um TC clássico. Nesta classe, não há preocupação com a definição do percentual de fluxo remanente. Já os TCs de classes TPY e TPZ são dimensionados para religamentos rápidos e posteriores, sendo que o TPY, com fluxo remanente menor ou igual a 10%, é maior que o TPZ, cujo fluxo remanente é nulo.

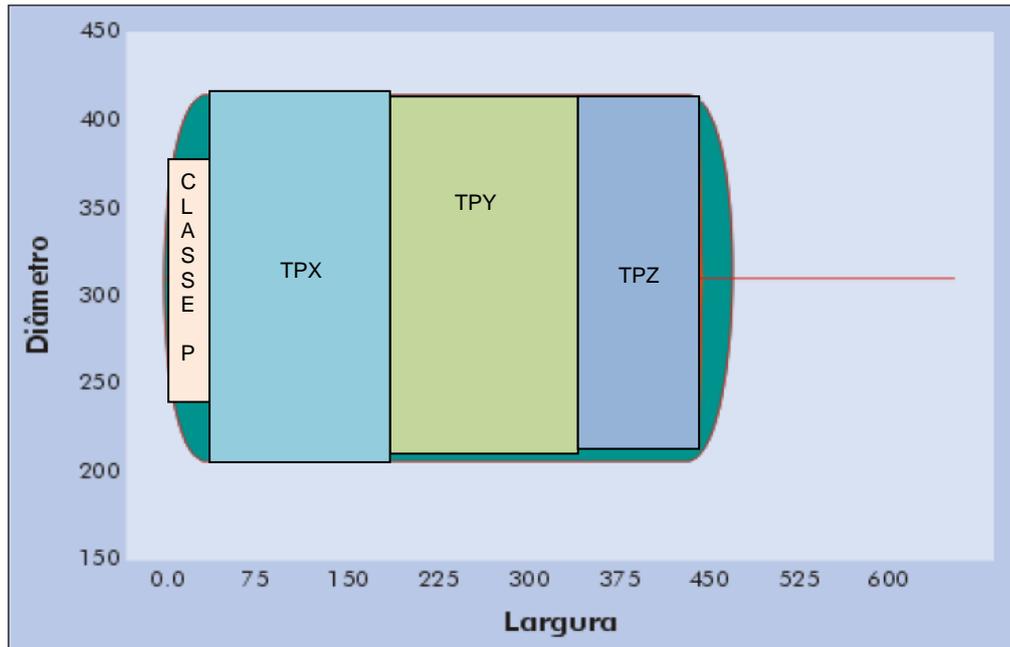


Figura 2.10 – Comparação dimensional de transformadores de corrente de mesma relação (P, TPX, TPY e TPZ); reprodução do original em [OSÓRIO, 2005]

Na Figura 2.11 é apresentada a curva densidade de fluxo ( $B$ ) versus intensidade do campo magnético ( $H$ ) do núcleo do TC de classe TPX, construído sem entreferro, bem como as curvas dos núcleos dos TCs de classes TPY e TPZ, construídos com entreferro. Como se pode observar na figura, a utilização de entreferro lineariza o núcleo e diminui o fluxo remanente. No entanto, como efeito colateral tem-se o aumento da corrente de excitação.

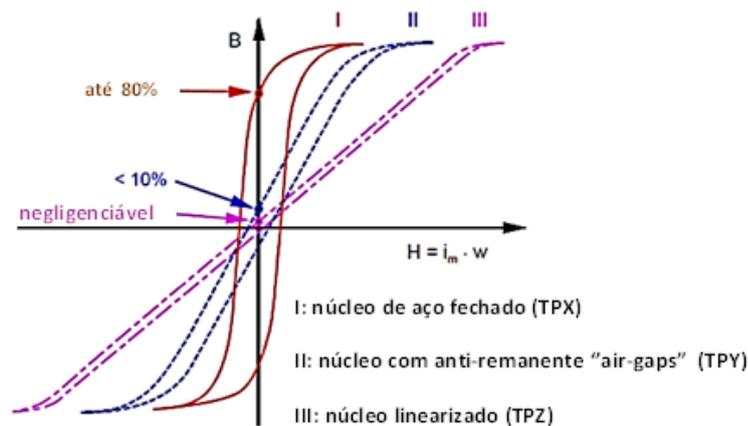


Figura 2.11 – Comparação das diversas curvas B-H dos TCs (TPX, TPY e TPZ); adaptação do original em [OLIVEIRA, 2012]

Para a especificação de transformadores de corrente de proteção são utilizadas normalmente as normas NBR 6856 [1992], IEC 61869-2 [2007] e IEEE C37.110 [2007]. A norma NBR 6856 [1992] classifica o TC de proteção pela máxima tensão de saturação no seu secundário. Para isso, multiplica a impedância máxima secundária pela corrente nominal secundária e também por um fator de segurança menor ou igual a 20. Esta norma não trata das condições transitórias do sistema e classifica o TC de proteção de forma equivalente ao TC classe P da IEC 61869-2 [2007].

A norma IEEE C37.110 [2007] trata do desempenho do TC em regimes transitórios e se limita a calcular a tensão secundária, em condição de assimetria, através da multiplicação da impedância e da corrente simétrica máxima secundária pelo fator  $(1+X/R)$ . No entanto, esta equação, devido ao valor de  $X/R$ , pode levar a valores demasiadamente elevados de tensão, o que inviabilizaria a sua utilização no dimensionamento do TC.

A norma que melhor define os parâmetros do transformador de corrente em função da proteção e do sistema, para desempenho em condições transitórias, é a norma IEC 61869-2 [2007]. Nesta norma os fatores necessários para o dimensionamento do TC são diferenciados para facilitar a especificação do TC pelo comprador, sua construção pelo fabricante e posteriormente sua aplicação no sistema de proteção. Os fatores aplicados no dimensionamento do TC são definidos considerando-se a condição simétrica ou assimétrica da corrente de curto-circuito. Em condições de curto-circuito simétrico é aplicado o fator limite de precisão (ALF) e o fator de dimensionamento ( $K_x$ ), dependendo da classificação do TC. Estes fatores devem ser avaliados junto com as demais características do TC, como carga e tensão máxima secundária, limite de fluxo remanente do núcleo, resistência interna e corrente de excitação, caso estes sejam definidos. Para as condições de curto-circuito assimétrico é utilizado um fator para o dimensionamento do curto-circuito simétrico, definido como ( $K_{ssc}$ ), e outro para o dimensionamento do curto-circuito assimétrico, definido como fator de dimensionamento a transiente nominal ( $K_{td}$ ) ou fator de transiente  $K_{tf}$ . Para o cálculo destes fatores é necessário que sejam informados dados da proteção, como o tempo de atuação da proteção, os tempos de religamentos, o tempo entre um religamento e o seu subsequente (tempo morto) e os dados do sistema e do TC através das constantes  $T_1$  e  $T_2$ . A definição destes parâmetros e os procedimentos para o cálculo dos fatores citados acima são apresentados em detalhes na norma IEC 61869-2 [2007].

---

# 3

## **Modelos para Representação do Comportamento Transitório de Transformadores de Corrente**

Neste capítulo descrevem-se dois modelos para a avaliação do desempenho de transformadores de corrente na condição de saturação. O primeiro modelo tem como base a modelagem computacional dos elementos de um transformador de corrente na plataforma do ATPDraw. O segundo modelo tem como base a planilha de simulações desenvolvida e disponibilizada pelo IEEE [PSRC, 2001].

### ***3.1 Modelo computacional do ATPDraw***

Uma das possibilidades de avaliação do desempenho de transformadores de corrente em condições transitórias, em especial aquelas que envolvem a saturação do núcleo na condição de curto-circuito assimétrico, consiste no emprego de modelos computacionais como aqueles disponíveis na plataforma ATPDraw [KEZUNOVIC et al., 1994; POLJAK E KOLIBAS, 1988]. No contexto desta monografia, utiliza-se como referência o modelo desenvolvido por KEZUNOVIC et al. [1994], que emprega um transformador ideal (componente tipo 98 no ATP) para simular a relação de transformação do TC. Como este componente não permite simular as resistências

internas, indutâncias internas e a saturação do núcleo, estes parâmetros são representados externamente com a inclusão de modelos adequados. Para representar a resistência interna do TC ( $R_{tc}$ ) e a carga no secundário ( $R_c$ ), são utilizados elementos RLC. Para caracterizar o ramo de magnetização, responsável pela saturação do núcleo do TC, é utilizado um indutor não linear tipo 98 ( $L_m$ ) em paralelo com a carga do secundário. O sistema primário é caracterizado por um gerador (VF) tipo 14 e por sua impedância  $Z_s$ , que é representada como uma resistência em série com uma indutância. Esta impedância deve ser dimensionada para representar a assimetria ( $X/R$ ) e o módulo do curto-circuito do sistema. Para simular a condição de máxima assimetria é utilizada uma chave controlada (CHAVE), cujo fechamento é ajustado para o instante de passagem da tensão por zero, ou seja, para a condição em que a corrente primária atinge o seu valor máximo, gerando a máxima corrente de curto-circuito. O modelo implementado no ATPDraw é apresentado na Figura 3.1.

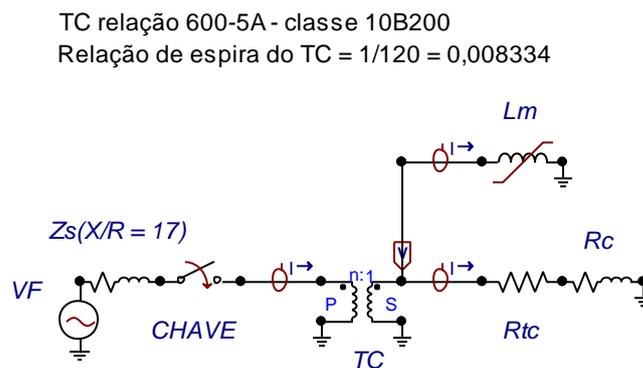


Figura 3.1 - Modelo de simulação no ATPDraw.

### 3.2 O Modelo de TC IEEE PSRC

Uma segunda maneira de se representar o desempenho de transformadores de corrente em regimes transitórios em condições de elevada assimetria das correntes de curto-circuito, levando em consideração o fenômeno de saturação, consiste no emprego da planilha proposta pelo IEEE, que se encontra disponível para o público em geral [PSRC, 2002]. Esta planilha fornece uma indicação rápida da forma de onda real da corrente secundária fornecida por um transformador de corrente em função do tempo de simulação com ou sem saturação do núcleo. Em [PSRC, 2001] são descritos todos os equacionamentos e definições utilizados na planilha IEEE PSRC. Por esta

razão, nesta seção são apresentados apenas os pontos relevantes para entendimento e utilização da planilha.

Para facilitar a avaliação do modelo IEEE PSRC, reproduz-se na Figura 3.2(a) o circuito do modelo do TC da Figura 2.1. Na Figura 3.2(b), este mesmo circuito é reproduzido tendo como base as simplificações sugeridas em [PSRC, 2001]. Estas simplificações consistem na desconsideração das perdas por histerese e por correntes de Foucault ( $R_p$ ) e dos parâmetros indutância ( $L_1'$ ) e resistência ( $R_1'$ ) associados ao enrolamento primário. A indutância secundária ( $L_2$ ), por ser muito pequena, também é desconsiderada. Os parâmetros resistência secundária ( $R_2$ ) e de carga ( $R_c$ ) são somados e representados por uma resistência equivalente ( $R_2'$ ).

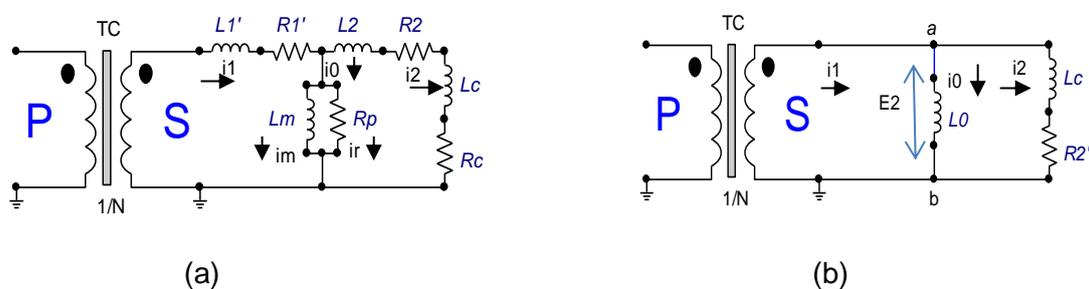


Figura 3.2 – (a) Circuito equivalente de um TC e (b) modelo de TC do IEEE PSRC [2001].

Para facilitar a formulação do problema, não é considerada na planilha a forma de onda da corrente de excitação na região abaixo do ponto do joelho de saturação, pois seu efeito é, em geral, insignificante. Pode-se, portanto, concluir que a utilização do modelo do IEEE é restrita a condições em que a corrente de excitação é desprezível na região linear. Para uma avaliação do erro associado a esta aproximação, deve-se utilizar um modelo mais elaborado [PSRC, 2001].

Alguns parâmetros utilizados na planilha do IEEE podem ser vistos na Figura 3.3, sendo importante defini-los. O primeiro parâmetro é a tensão de saturação ( $V_s$ ), definida como o ponto em que corrente de excitação  $I_0$  é igual a 10 A. Este valor de referência é escolhido porque equivale, conforme definido por norma, a um erro de 10% para uma corrente 20 vezes maior que a corrente secundária de 5 A. Outras duas variáveis são definidas: o ponto do joelho de saturação ( $V_{knee}$ ) e o fluxo remanente ( $\lambda_{rem}$ ). O valor do joelho de saturação é definido em 80% da tensão de saturação e o valor  $\lambda_{rem}$  é definido em 0,8 pu do fluxo magnético máximo associado à tensão de saturação ( $V_s$ ). Na Figura 3.3,  $V_e$  equivale à tensão  $E_2$  no circuito da Figura 3.2,  $I_e$  equivale a  $I_0$  e  $V_s$  equivale a  $E_s$ .

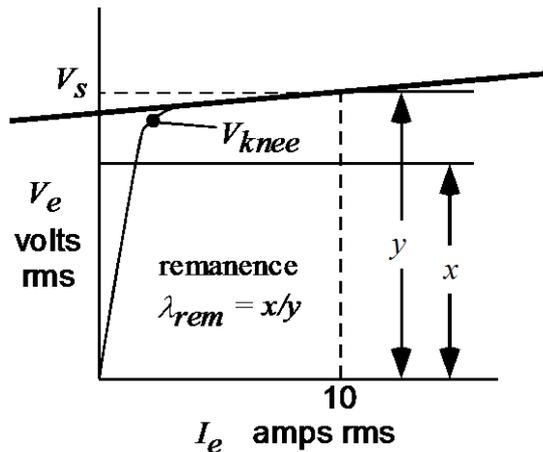


Figura 3.3 - Definição do valor do fluxo remanente em função de  $V_s$  [PSRC, 2001].

A Figura 3.4 apresenta uma curva de saturação típica de um TC segundo [PSRC, 2001]. A partir desta curva podem ser identificados alguns parâmetros de interesse para a modelagem do TC. Entre este, merece destaque a inclinação da seção saturada da curva de magnetização, representada pelo parâmetro  $1/S$ . Este parâmetro define a equação da “reta” em linha contínua com inclinação  $1/S$ , conforme mostrado na Figura 3.7. O valor do parâmetro  $S$  deve ser declarado na planilha do IEEE PSRC e pode ser levantado através do gráfico da curva de tensão de saturação versus corrente de excitação do transformador de corrente a ser simulado.

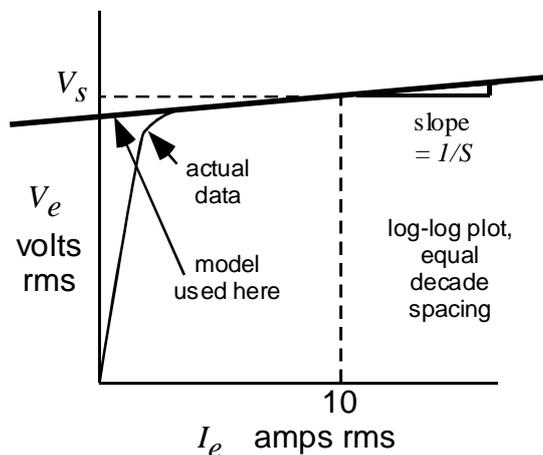


Figura 3.4 - Método para definição do parâmetro  $slope$  ( $1/S$ ) [PSRC, 2001].

O parâmetro Off, utilizado como dado de entrada na planilha, está associado ao parâmetro “Offset pu”. Segundo [PSRC, 2001], “Offset pu” é o valor instantâneo da componente assimétrica da corrente de falta no instante de início da falta, dividido pelo

---

valor de pico da componente simétrica da corrente de falta. O parâmetro Off é um número adimensional que pode variar conforme abaixo:

- $0 < \text{Off} \leq 1$ , quando existir componente assimétrica na corrente de falta.
- $\text{Off} = 0$ , quando houver somente componente simétrica na corrente de falta.

Para simular a corrente secundária de um TC qualquer na planilha do IEEE (PSRC), cuja tela de interface com o usuário correspondente à versão de 30 dezembro 2002 se encontra ilustrada na Figura 3.5, é necessário entrar com os dados solicitados na coluna "ENTER". Os resultados de simulação podem ser observados em um gráfico que ilustra a corrente ideal calculada no secundário (desconsiderando-se saturação) e a corrente secundária real (considerando-se saturação). Este gráfico expressa tanto os valores instantâneos quanto os valores eficazes destas grandezas. Caso seja necessário, os dados da simulação realizada podem ser obtidos por meio das colunas de cada um dos parâmetros simulados, que se encontram disponíveis na planilha abaixo do gráfico. Esta ferramenta viabiliza a exportação e o tratamento dos dados em outros programas computacionais, caso necessário.

---

**CONTENTS**

Sheet 1: CALCULATOR (this sheet)

Sheet 2: INSTRUCTIONS

Sheet 4: BACKGROUND

### CT Saturation Calculator

Excel Spread Sheet

See IEEE publication C37.110: "IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes"

A document of the IEEE Power Systems Relaying Committee

Contact: gswift@nxtphase.com

Refer also to "CT SAT Theory (PSRC)".

**VERSION:**  
30 Dec 2002

---

**ASSUMPTIONS:** CT core losses and sec'y reactance zero (thru-hole primary). Frequency: 60 Hz  
 CT primary current is zero for t<0. CT is 5 amp nominal Time step = 1/12,000 second.

**INPUT PARAMETERS:**

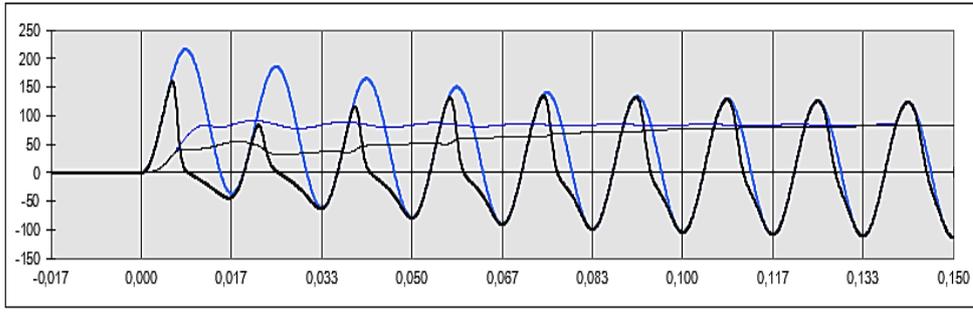
	ENTER:	
Inverse of sat. curve slope = S =	7,755	—
RMS voltage at 10A exc. current = Vs =	506	volts rms
Turns ratio = n2/1 = N =	120	—
Winding resistance = Rw =	0,559	ohms
Burden resistance = Rb =	4,000	ohms
Burden reactance = Xb =	0,100	ohms
System X/R ratio = XoverR =	17,0	—
Per unit offset in primary current = Off =	1,00	-1<Off<1
Per unit remanence (based on Vs) = λrem	0,00	—
Symmetrical primary fault current = Ip =	10,000	amps rms

Saturation Curve

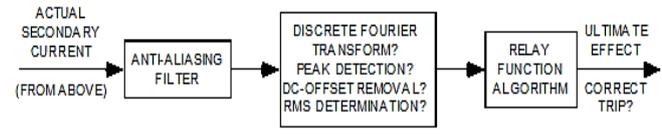
**CALCULATED:**

Rt = Total burden resistance = Rw + Rb =	4,559	ohms
pf = Total burden power factor =	1,000	—
Zb = Total burden impedance =	4,560	ohms
Tau1 = System time constant =	0,045	seconds
Lamsat = Peak flux-linkages corresponding to Vs	1,898	Wb-turns
ω = Radian freq =	376,99	rad/s
RP = Rms-to-peak ratio =	0,44650	—
A = Coefficient in instantaneous ie versus lambda curve: ie = A * λ^S :	1,55E-01	—
dt = Time step =	0,000083	seconds
Lb = Burden inductance =	0,00027	henries

Thick lines: Ideal (blue) and actual (black) secondary current in amps vs time in seconds.  
 Thin lines: Ideal (blue) and actual (black) secondary current extracted fundamental rms value, using a simple DFT with a one-cycle window.



To determine the effect of saturation on a particular digital relay, one must have "models" for the blocks shown below:



step number	time t	pri cur/N i1(t)/N	fl-linkages λ(t)	exc curr ie(t)	sec cur Δλ(t)	d/dt(s) I2(t)	Calculation of Mag. Of Fund1			Calculation of Mag. Of Fund1			Phase		
							IDEAL	ACTUAL	IMAG	ACTUAL	I2(t)*sin	I2(t)*cos	I2MAG	I1PH	I2PH
	seconds	amps	Wb-turns	amps	Wb-turns	amps									
-200	-0,0167	0,000	0,00010	0,000	-0,00008	0,000	-3782							0,0	0,0

Figura 3.5 - Planilha do IEEE para o cálculo de saturação do TC [PSRC, 2001].

# 4 Estudo Comparativo dos Modelos de Transformadores de Corrente

## 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se um estudo comparativo do desempenho dos modelos de transformadores de corrente apresentados no Capítulo 3 em diferentes condições de aplicação. Nas simulações realizadas, utilizam-se transformadores de corrente 600-5 A classes 10B200 e 10B400, cujas curvas de excitação foram retiradas dos relatórios de ensaio A03012 [2003] e 25z127.283/1 [2006]. Os dados disponíveis nestes relatórios formam a base para as simulações computacionais realizadas neste capítulo, pois contêm as informações sobre o comportamento do núcleo do TC nas regiões linear e não-linear. Estes dados podem ser incluídos diretamente na entrada de dados do modelo de indutor não-linear disponível no ATPDraw (através de pares de pontos fluxo x corrente) e na planilha do IEEE PSRC (através de cálculos da inclinação da curva de saturação (*slope*) e da tensão de saturação).

No modelo de TC implementado no ATPDraw, ilustrado na Figura 3.1, é necessário fornecer os dados da curva de saturação. Para isso, deve-se inserir na janela de características do indutor não-linear tipo 98 os valores instantâneos de corrente e fluxo. No entanto, no ensaio utilizado para levantar a curva de saturação normalmente são registrados os valores eficazes da tensão aplicada e da corrente de excitação. Nesse caso, é necessário corrigir esses valores para o padrão do ATPDraw. Para isso, utiliza-se a rotina do modelo BCTRAN para transformar tensão

eficaz em valor instantâneo de fluxo magnético e corrente de excitação eficaz em valor instantâneo de corrente de excitação [ATP RULE BOOK, 1988].

Com base na norma brasileira de disjuntores de alta tensão [NBR 62271-100, 2007], nas simulações apresentadas neste capítulo utiliza-se uma constante de tempo  $T_1$  normalizada em 45 ms, que equivale a um ângulo de 89 graus e a um valor de  $X/R$  de 17.

Para definir o módulo da corrente de curto-circuito, utiliza-se a norma de planejamento da distribuição da CEMIG [ND 1.13, 2013], que define 10.000 A como o maior valor de corrente de curto-circuito possível na rede de distribuição, o que corresponde a uma potência de 250 MVA para uma tensão de linha de 13,8 kV.

No secundário do TC, utiliza-se a carga padrão proposta na norma NBR 6856 [1992], sendo realizadas alterações em seu módulo e no fator de potência com o objetivo de avaliar a influência desses parâmetros na forma de onda da corrente secundária do TC.

Nas simulações apresentadas neste capítulo, o módulo e o ângulo da corrente de curto-circuito e a relação de transformação dos TCs são mantidos inalterados. O que diferencia os transformadores de corrente avaliados (classes 10B200 e 10B400) são a curva de saturação, a resistência interna do secundário e a reatância de magnetização.

Para cada TC são realizadas três diferentes simulações. Na primeira simulação, utiliza-se o valor máximo da carga padrão com fator de potência 0,5. Na segunda simulação, o fator de potência é alterado para um valor praticamente igual a 1 mantendo-se a impedância da carga padrão (condição de carga resistiva máxima). Finalmente, na terceira simulação é utilizada uma impedância de baixo valor (0,6 ohms) com o fator de potência de 0,986 (situação de carga resistiva mínima).

## **4.2 Análise do TC 600-5 A de Classe 10B400**

### **4.2.1 Dados de ensaio**

Os dados de ensaio necessários para a definição do comportamento do transformador de corrente TC 600-5 A Classe 10B400 nos modelos computacionais descritos no Capítulo 3 são apresentados na Figura 4.1, que foi extraída do Relatório A03012 [2003].

---

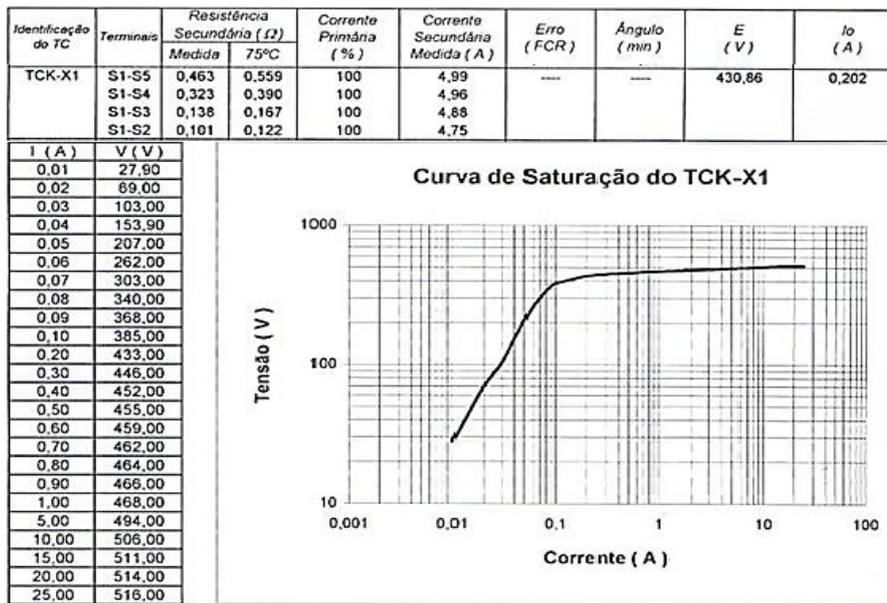


Figura 4.1 - Dados do TC 600-5 A classe 10B400 [Relatório A03012, 2003].

#### 4.2.2 Dados para a simulação na planilha do IEEE PSRC

Os dados de entrada da planilha do IEEE PSRC, extraídos da Figura 4.1, são apresentados na Tabela 4.1; os termos entre parênteses correspondem às abreviaturas utilizadas.

Tabela 4.1 - Dados de entrada da planilha IEEE PSRC – TC classe 10B400

Descrição	Valor	Referência
Corrente de curto-circuito (I <sub>p,rms</sub> )	10000 A	Seção (4.1)
Cargas secundárias (R <sub>b</sub> e X <sub>b</sub> )	2 + j3,464 $\Omega$ 4 + j0,1 $\Omega$ 0,6 + j0,1 $\Omega$	Tabela (2.1)
Tensão de saturação (V <sub>s,rms</sub> )	506 V	Figura (4.1)
Resistência do secundário do TC (R <sub>w</sub> )	0,559 $\Omega$	Figura (4.1)
Relação X/R "T <sub>1</sub> = 0,045s" (XoverR)	17	Equação (2.9)
Indutância de magnetização (L <sub>m</sub> )	5,703 H	Equação (2.14)
Slope (S)	7,755	Figuras (3.3) e (4.1)
Componente contínua (Off)	1 pu	Seção (3.2)
Remanente (I <sub>rem</sub> )	0	-----
Relação de espira (N)	120/1	-----

### 4.2.3 Dados para a simulação no ATPDraw

Para a simulação do TC classe 10B400 no ATPDraw, utilizam-se o modelo da Figura 4.2, a curva de saturação do TC apresentada na Figura 4.3 e os dados apresentados da Tabela 4.2, que foram extraídos da Figura 4.1.

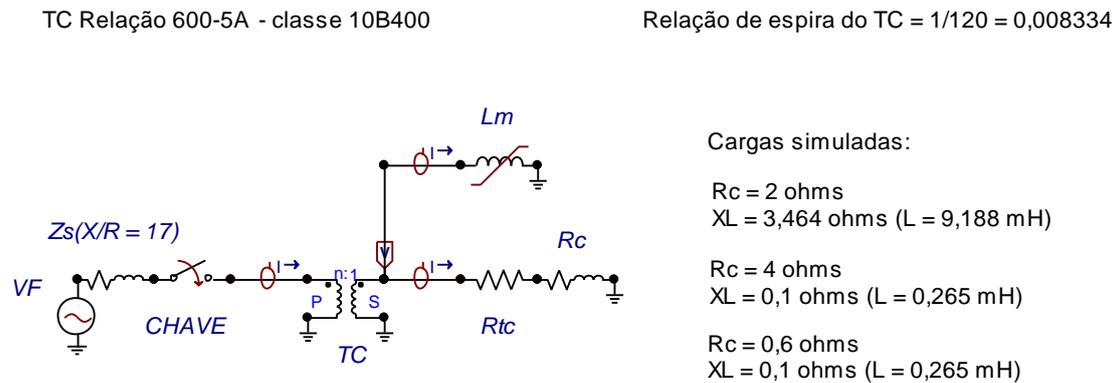


Figura 4.2 - Modelo do TC 10B400 elaborado no ATPDraw.

Tabela 4.2 - Dados de entrada do ATPDraw – TC classe 10B400.

Descrição	Valor	Referência
Tensão da Fonte ( $V_{pico}$ )	14142/0° V	Seção (4.2)
Ângulo de disparo da chave	0.0125 s	Equação (2.15)
Corrente de curto-circuito ( $I_{cc,rms}$ )	10.000/86,63° A	Seção (4.2)
Resistência do sistema ( $R_{sistema}$ )	0.0588 $\Omega$	Seção (4.2)
Reatância do sistema ( $L_{sistema}$ )	2.65 mH	Seção (4.2)
Cargas secundárias ( $R_b$ e $X_b$ )	2 + j3,464 $\Omega$ 4 + j0,1 $\Omega$ 0,6 + j0,1 $\Omega$	Tabela (2.1)
Curva de saturação	Tabela	Figura (4.1)
Resistência do secundário do TC ( $R_{tc}$ )	0,559 $\Omega$	Figura (4.1)
Constante primária ( $T_1$ )	0,045 s	Equação (2.9)
Relação X/R	17	Equação (2.9)
Relação de espira	1/120 = 0,00834	Figura (4.1)

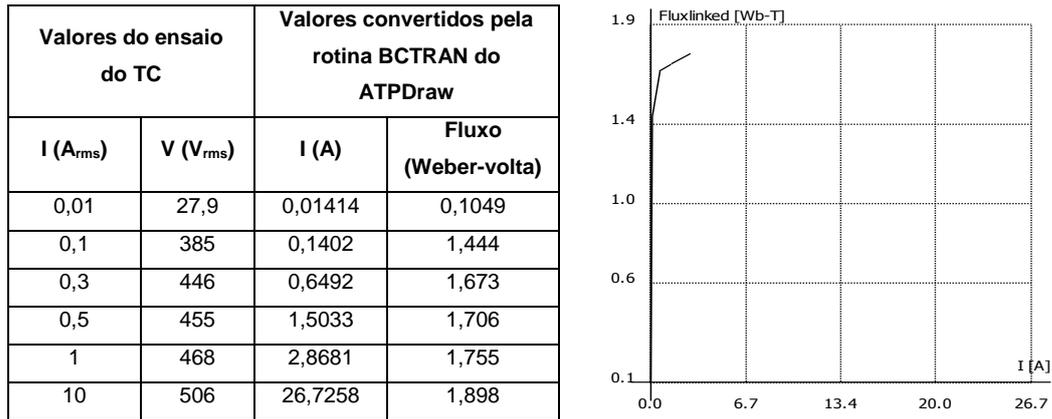


Figura 4.3 - Dados e gráfico da curva de saturação do TC 10B400 gerados pelo ATPDraw.

#### 4.2.4 Simulação com carga máxima padrão ( $X_c = 3,464 \Omega$ , $R_c = 2 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga máxima padrão, que corresponde a  $X_c=3,464 \Omega$  e  $R_c=2 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 2,302 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.4 e 4.5.

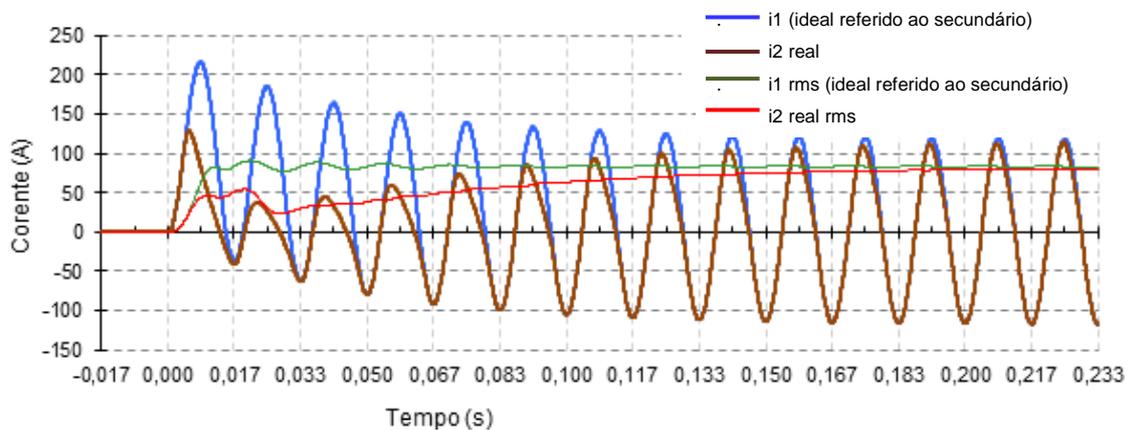


Figura 4.4 - Simulação com a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 3,464 \Omega$  e  $R_c = 2 \Omega$ .

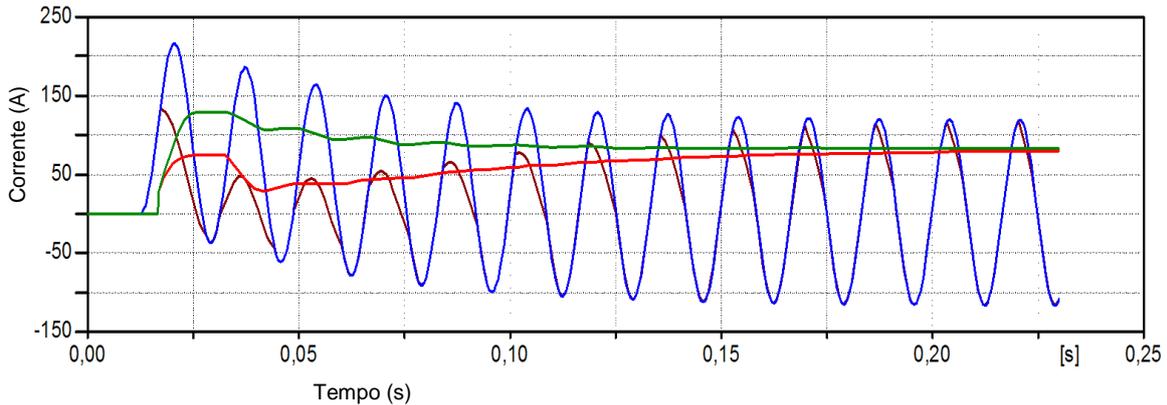


Figura 4.5 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 3,464 \Omega$  e  $R_c = 2 \Omega$ .

Verifica-se que as curvas apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5 possuem formas de onda praticamente iguais. Nota-se, no entanto, que o valor eficaz fornecido pela planilha do IEEE, no primeiro ciclo, é menor do que aquele fornecido pelo ATPDraw. Após o ciclo inicial, os valores eficazes calculados por ambos os modelos se tornam semelhantes. A maior saturação e a maior distorção na forma de onda ocorrem nos dois primeiros ciclos até aproximadamente 33 ms. A partir deste instante, a forma de onda da corrente recupera gradualmente a sua característica linear, retornando à sua forma ideal após 225 ms, aproximadamente.

#### 4.2.5 Simulação com carga máxima resistiva ( $X_c = 0,1 \Omega$ , $R_c = 4 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga máxima resistiva, que corresponde a  $X_c=0,1 \Omega$  e  $R_c=4 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 1,251 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7.

Comparando as Figuras 4.4 e 4.5 com as Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se no caso em que o secundário tem carga de  $4 + j0,1 \Omega$  (ilustrado nas Figuras 4.6 e 4.7) um pequeno aumento do valor eficaz da corrente de curto-circuito e uma redução do tempo de saturação. No entanto, observa-se o aumento da distorção da forma de onda de corrente principalmente nos primeiros ciclos. Este fato é explicado considerando que esta carga possui uma menor constante de tempo secundária ( $T_2$ ) e um maior fator de potência.

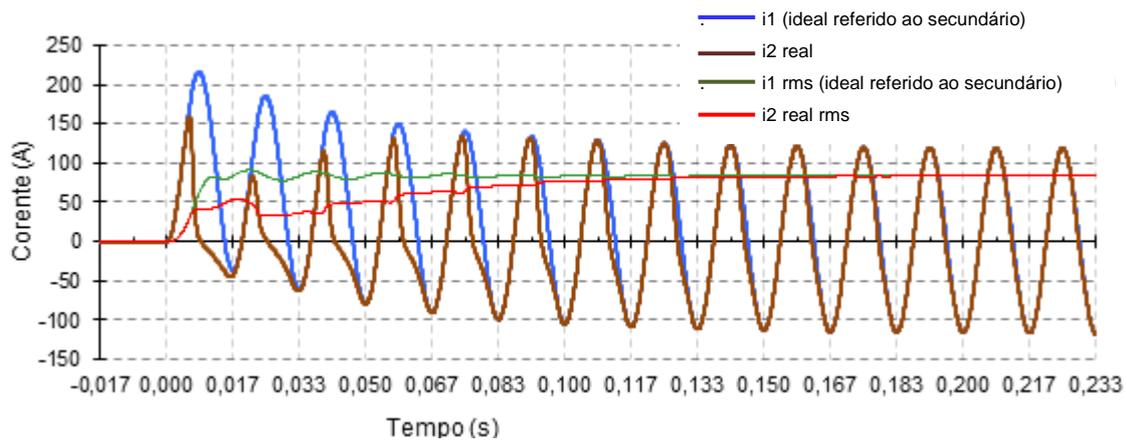


Figura 4.6 - Simulação com a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 4 \Omega$ .

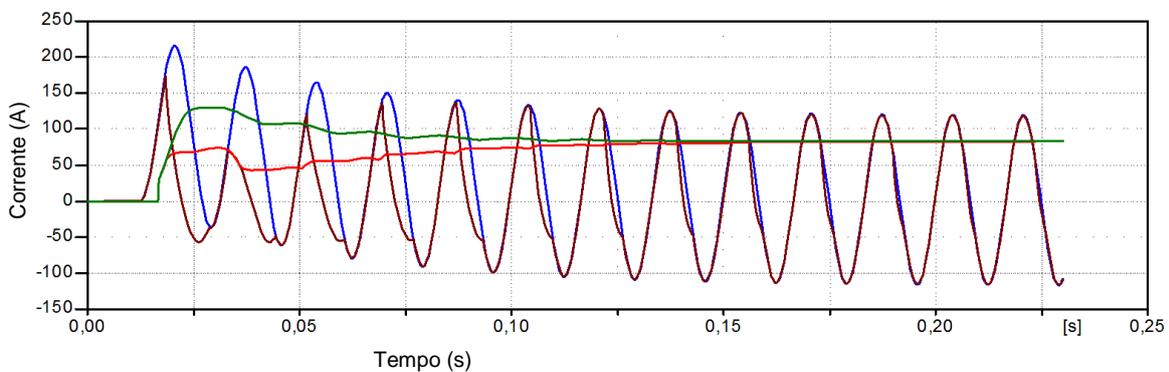


Figura 4.7 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 4 \Omega$ .

#### 4.2.6 Simulação com carga mínima resistiva ( $X_c = 0,1 \Omega$ , $R_c = 0,6 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga mínima resistiva, que corresponde a  $X_c=0,1 \Omega$  e  $R_c=0,6 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 4,951 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.8 e 4.9.

Comparando as Figuras 4.8 e 4.9 com as Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se que o TC com a carga  $0,6 + j0,1 \Omega$  não satura no primeiro ciclo, levando a um maior valor eficaz e a uma menor distorção na forma de onda, ainda que tenha permanecido praticamente o mesmo tempo em saturação. Considerando a constante de tempo secundária, era esperado que com esta carga o núcleo do TC permanecesse mais tempo saturado. No entanto, este fato não ocorreu devido à redução do módulo da

carga secundária. Esta mesma redução da carga justifica a não saturação inicial e o maior valor eficaz calculado por ambos os modelos.

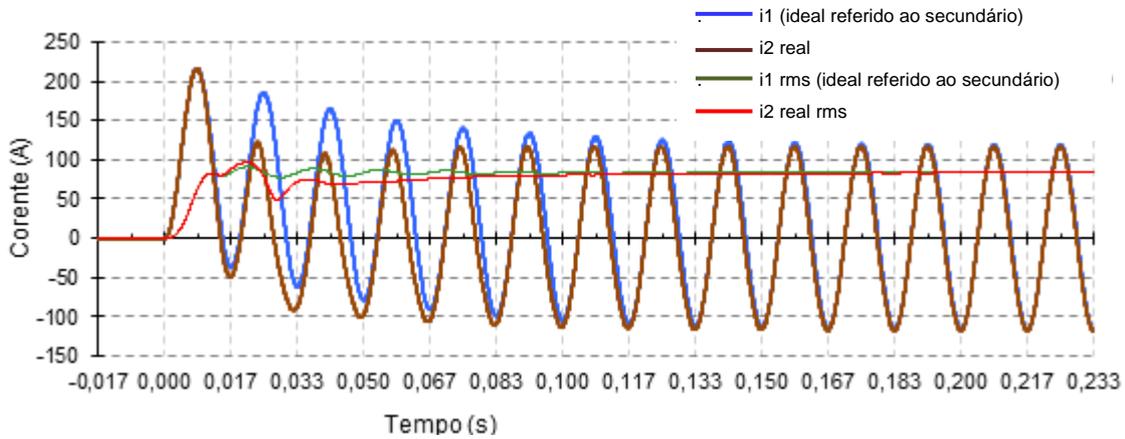


Figura 4.8 - Simulação com a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 0,6 \Omega$ .

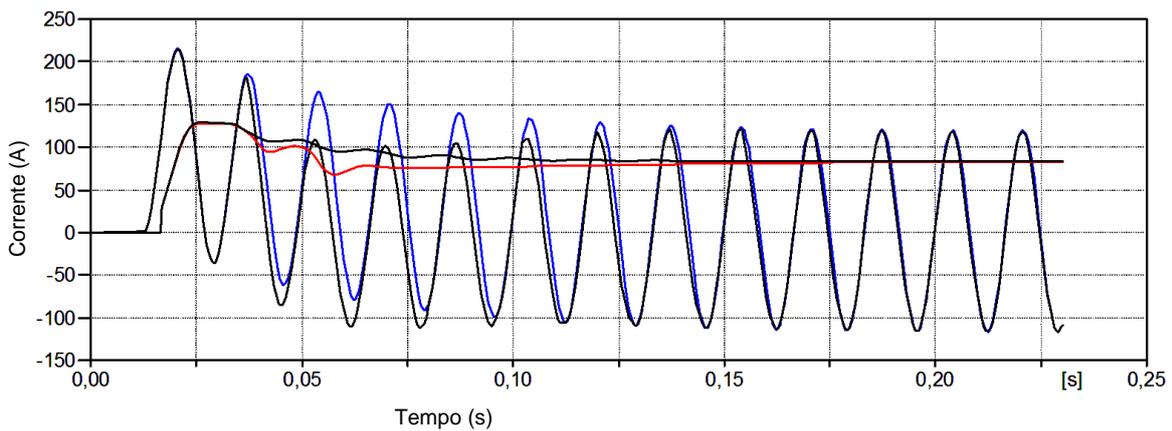


Figura 4.9 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 0,6 \Omega$ .

Comparando as Figuras 4.8 e 4.9 com as Figuras 4.4 e 4.5, verifica-se que o TC com a carga de  $0,6 + j0,1 \Omega$  leva a correntes com maior valor eficaz, menor distorção na forma de onda e menor tempo em saturação. Justifica-se este melhor desempenho através da redução da carga secundária, mesmo considerando que esta carga possui maior  $T_2$ .

### 4.3 Análise do TC 600-5 A de Classe 10B200

#### 4.3.1 Dados de ensaio

Os dados de ensaio necessários para a definição do comportamento do transformador de corrente TC 600-5 A Classe 10B200 nos modelos computacionais descritos no Capítulo 3 são apresentados na Figura 4.10, que foi extraída do Relatório 25z127.283/1 [2006].

Transformadores de corrente para serviço de: ( ) Medição (X) Proteção Cliente: Orteng Cemig  
 Exatidão: 10B200 Relação: 600-5 A Frequência: 60 Hz Norma: ABNT

#### 1 - Resistência ôhmica ( $\Omega$ ).

Número de série	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Terminais				Correção 75 $^{\circ}\text{C}$
		S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S5
4025787-1	26 $^{\circ}$	0,033	0,045	0,108	0,157	0,186

1  
S1-S5  
600-5

I (A)	U (V)
10,0	259
5,00	248
2,00	239
1,00	230
0,50	221
0,20	202
0,10	162
0,05	83
0,02	25
0,01	10

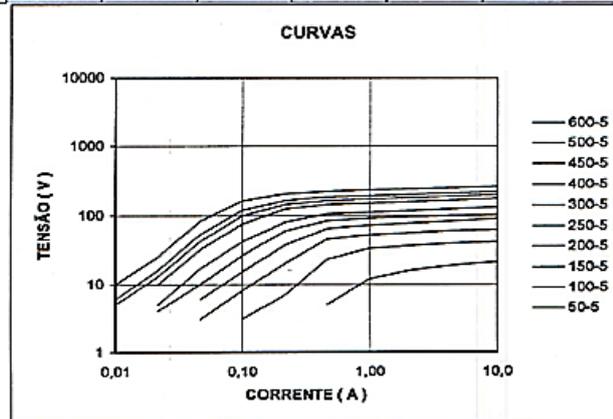


Figura 4.10 - Dados do TC 600-5 A classe 10B200 [Relatório 25z127.283/1, 2006].

#### 4.3.2 Dados para a simulação na planilha do IEEE PSRC

Os dados de entrada da planilha do IEEE PSRC, extraídos da Figura 4.10, são apresentados na Tabela 4.3, em que os termos entre parênteses correspondem às abreviaturas utilizadas.

#### 4.3.3 Dados para a simulação no ATPDraw

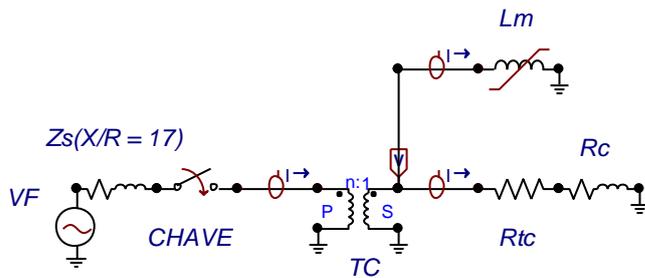
Para a simulação do TC classe 10B200 no ATPDraw, utilizam-se o modelo da Figura 4.11, a curva de saturação do TC apresentada na Figura 4.12 e os dados apresentados na Tabela 4.4, extraídos da Figura 4.10.

Tabela 4.3 - Dados de entrada da planilha IEEE PSRC – TC classe 10B200.

Descrição	Valor	Referência
Corrente de curto- circuito ( $I_{p_{rms}}$ )	10000 A	Seção (4.2)
Cargas secundárias ( $R_b$ e $X_b$ )	$1 + j1,732 \Omega$ $2 + j0,1 \Omega$ $0,6 + j0,1 \Omega$	Tabela (2.1)
Tensão de saturação ( $V_{s_{rms}}$ )	259 V	Figura (4.1)
Resistência do secundário do TC ( $R_w$ )	0,186 $\Omega$	Figura (4.1)
Relação X/R (XoverR)	17	Equação (2.9)
Indutância de magnetização ( $L_m$ )	1,172 H	Equação (2.14)
Slope (S)	4	Figura (3.3 e 4.1)
Componente contínua (Off)	1 pu	Seção (3.2)
Remanente ( $I_{rem}$ )	0	-----
Relação de espira (N)	120/1	-----

TC relação 600-5A - classe 10B200

Relação de espira do TC =  $1/120 = 0,008334$



Cargas simuladas:

$R_c = 1 \text{ ohms}$   
 $X_L = 1,732 \text{ ohms}$  ( $L = 4,594 \text{ mH}$ )

$R_c = 2 \text{ ohms}$   
 $X_L = 0,1 \text{ ohms}$  ( $L = 0,265 \text{ mH}$ )

$R_c = 0,6 \text{ ohms}$   
 $X_L = 0,1 \text{ ohms}$  ( $L = 0,265 \text{ mH}$ )

Figura 4.11 Modelo do TC 10B200 elaborado no ATPDraw.

Tabela 4.4 - Dados de entrada do ATPDraw – TC classe 10B200.

Descrição	Valor	Referência
Tensão da Fonte ( $V_{pico}$ )	14142/0° V	Seção (4.1)
Ângulo de disparo da chave	0,0125 s	Equação (2.15)
Corrente de curto- circuito ( $I_{c_{rms}}$ )	10.000/86,63° A	Seção (4.1)
Resistencia do sistema	$R_{sistema} = 0,0588 \Omega$	Seção (4.1)
Reatância do sistema	$L_{sistema} = 2,65 \text{ mH}$	Seção (4.1)
Cargas secundárias ( $R_b$ e $X_b$ )	$1 + j1,732 \Omega$ $2 + j0,1 \Omega$ $0,6 + j0,1 \Omega$	Tabela (2.1)
Curva de saturação	Tabela	Figura (4.1)
Resistência do secundário do TC ( $R_{tc}$ )	0,186 $\Omega$	Figura (4.1)
Constante primária ( $T_1$ )	0,045 s	Equação (2.9)
Relação X/R	17	Equação (2.9)
Relação de espira	$1/120 = 0,00834$	Figura (4.1)

Valores de ensaio		Valores gerados pela rotina BCTRAN do ATPDraw	
I (A <sub>rms</sub> )	V (V <sub>rms</sub> )	I (A)	Fluxo (Weber)
0.01	10	0.0141	0.0375
0.5	221	0.7121	0.8289
1	230	2.7369	0.8627
2	239	5.3247	0.8964
5	248	14.3688	0.9302
10	259	25.7277	0.9715

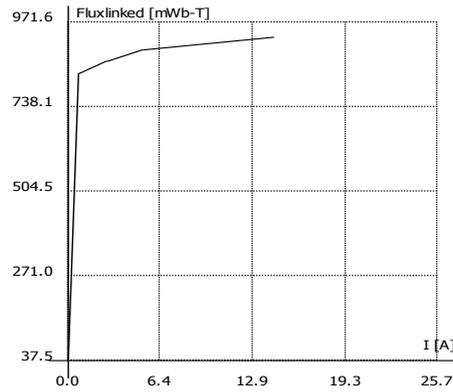


Figura 4.12 - Dados e gráfico da curva de saturação do TC 10B200 no ATPDraw.

#### 4.3.4 Simulação com carga máxima padrão ( $X_c = 1,732 \Omega$ , $R_c = 1 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga máxima padrão, que corresponde a  $X_c=1,732 \Omega$  e  $R_c=1 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 0,992 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

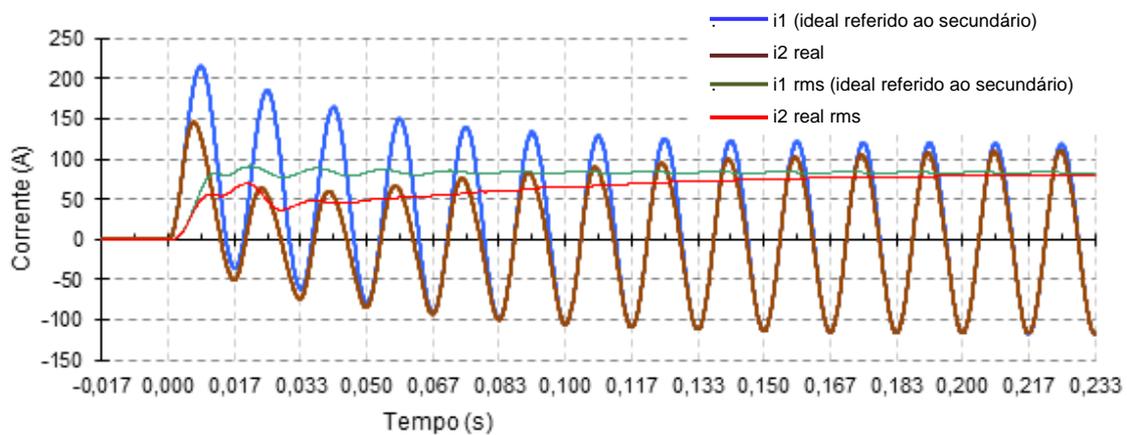


Figura 4.13 Simulação a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 1,732 \Omega$  e  $R_c = 1 \Omega$ .

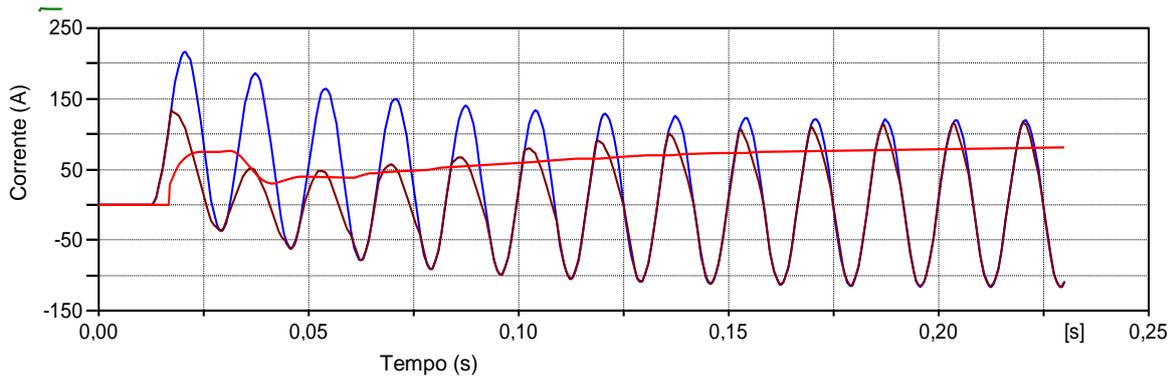


Figura 4.14 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 1,732 \Omega$  e  $R_c = 1 \Omega$ .

Verifica-se, comparando as Figuras 4.13 e 4.14, que as correntes calculadas por ambos os modelos apresentam formas de onda muito semelhantes. Apesar disso, no primeiro ciclo o valor eficaz calculado pela planilha do IEEE apresenta grande divergência em relação ao valor eficaz calculado pelo ATPDraw, com ambos tendendo a valores semelhantes nos ciclos posteriores. A maior saturação e a maior distorção na forma de onda ocorrem nos dois primeiros ciclos, até aproximadamente 33 ms. Posteriormente, as correntes calculadas recuperam gradualmente o seu comportamento senoidal, atingindo a sua forma ideal a partir de aproximadamente 225 ms.

#### 4.3.5 Simulação com carga máxima resistiva ( $X_c = 0,1 \Omega$ , $R_c = 2 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga máxima resistiva, que corresponde a  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 2 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 0,536 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.15 e 4.16.

Comparando as Figuras 4.13 e 4.14 com as Figuras 4.15 e 4.16, verifica-se que no secundário com a carga  $2 + j0,1$  há um pequeno aumento do valor eficaz da corrente de curto-circuito e uma redução do tempo de saturação. No entanto, observa-se o aumento da distorção da forma de onda de corrente principalmente nos primeiros ciclos. Este fato é explicado considerando que esta carga possui uma menor constante de tempo secundária ( $T_2$ ) e um maior fator de potência.

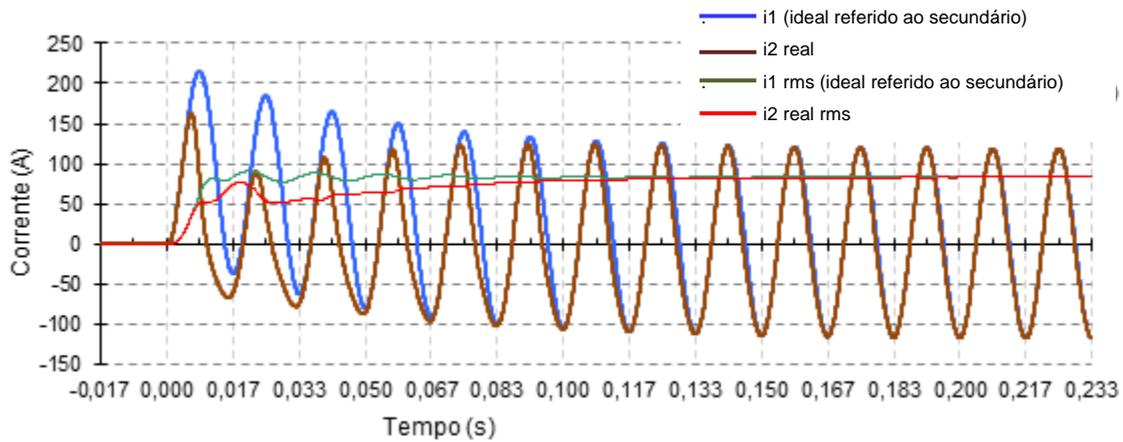


Figura 4.15 - Simulação a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 2 \Omega$ .

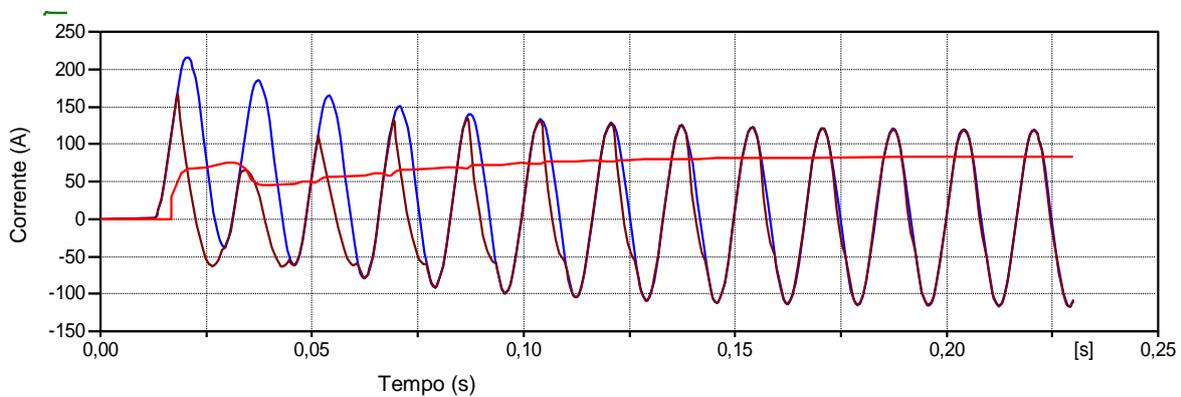


Figura 4.16 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 2 \Omega$ .

#### 4.3.6 Simulação com carga mínima resistiva ( $X_c = 0,1 \Omega$ , $R_c = 0,6 \Omega$ )

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações computacionais com ambos os modelos avaliados para a condição de operação do TC com carga mínima resistiva, que corresponde a  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 0,6 \Omega$ . O uso destes valores de  $X_c$  e  $R_c$  resulta em uma constante de tempo secundária  $T_2$  igual a 1,492 s, conforme equação 2.12. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 4.17 e 4.18.

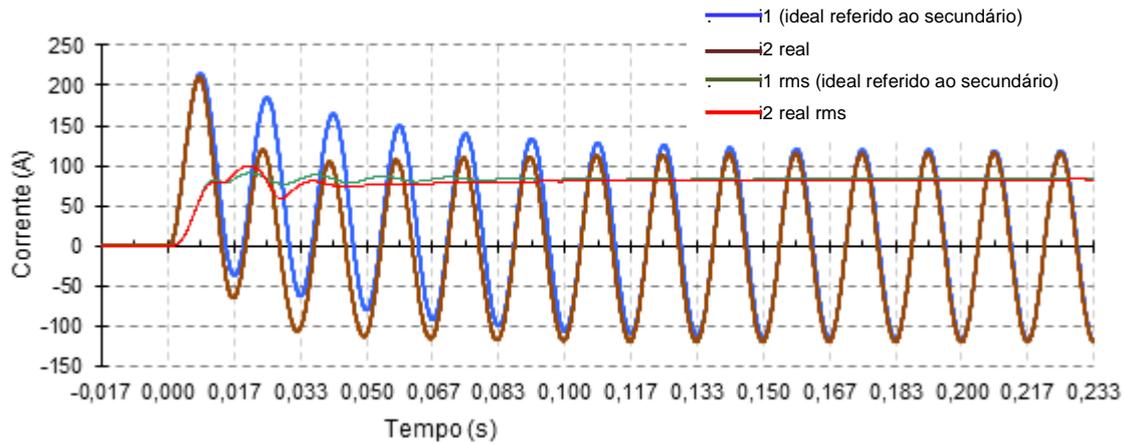


Figura 4.17 - Simulação a planilha IEEE PSRC com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 0,6 \Omega$

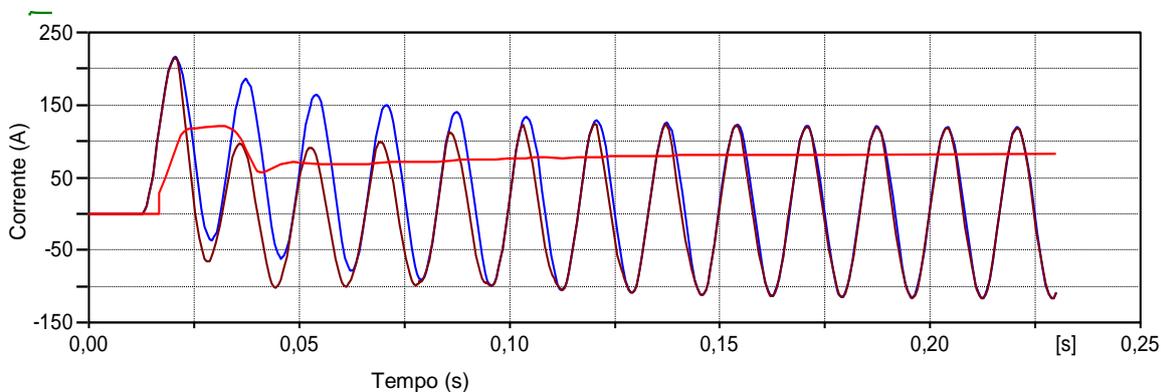


Figura 4.18 - Simulação do ATPDraw com  $X_c = 0,1 \Omega$  e  $R_c = 0,6 \Omega$

Comparando as Figuras 4.17 e 4.18 com as Figuras 4.13 e 4.14, verifica-se que o TC com a carga de  $0,6 + j0,1 \Omega$  resulta em um maior valor eficaz e uma menor distorção na forma de onda de corrente. No entanto, em todos os casos se observou um tempo de saturação praticamente igual. Considerando a constante de tempo secundária associada ao TC operando com carga  $0,6 + j0,1 \Omega$ , era esperado que este permanecesse mais tempo saturado. No entanto, o tempo de saturação observado pode ser justificado pelo valor reduzido da carga, que também contribuiu para a não saturação inicial e para o maior valor eficaz observado.

#### 4.3.7 Avaliação do desempenho dos TCs classe 10B200 e 10B400

Nesta seção compara-se o desempenho dos TCs classe 10B200 e 10B400 tendo como base as simulações realizadas.

Comparando-se o desempenho do TC10B400 operando com carga padrão de  $2 + j3,464 \Omega$  (Figuras 4.4 e 4.5) com o desempenho do TC10B200 operando com carga padrão de  $1 + j1,732 \Omega$  (Figuras 4.13 e 4.14), verifica-se que a corrente secundária possui a mesma forma de onda, o mesmo grau de saturação inicial e final e o mesmo valor eficaz. Portanto, os TCs 10B200 e 10B400 possuem desempenho semelhante na transdução do sinal de corrente secundária. Comportamento semelhante é verificado quando se compara o desempenho do TC 10B400 com carga  $4 + j0,1 \Omega$  (Figuras 4.6 e 4.7) com o desempenho do TC 10B200 com carga  $2 + j0,1 \Omega$  (Figuras 4.15 e 4.16). A similaridade de desempenho nos casos avaliados é justificada, pois o TC 10B200 possui metade da tensão de saturação e metade da carga do TC 10B400, mantendo portanto a proporcionalidade na redução da carga e da tensão e levando a um desempenho equivalente.

Comparando-se o desempenho do TC 10B400 operando com carga  $0,6 + j0,1 \Omega$  (Figuras 4.8 e 4.9) com o desempenho do TC 10B200 operando com carga  $0,6 + j0,1 \Omega$ , (Figuras 4.17 e 4.18), verifica-se que as formas de onda da corrente secundária são diferentes. O TC classe 10B200, comparado com o 10B400, possui uma maior saturação inicial e um menor valor eficaz. Isto é justificável, pois sua tensão de saturação é menor e não houve a redução proporcional da carga secundária. Outro fato observado na simulação se refere ao tempo de saturação, que nas duas simulações foi igual. Esperava-se que o menor tempo de saturação ocorresse com o TC 10B200, que possui a menor constante de tempo  $T_2$ . Porém, a sua tensão de saturação é menor, o que favorece um maior tempo de saturação.

#### **4.4 Resumo dos resultados obtidos**

Nas simulações realizadas, foram utilizadas as cargas padrão previstas na norma ABNT, tendo sido realizadas alterações em seus módulos e em seu fator de potência com o objetivo de avaliar a influência destes parâmetros na forma de onda da corrente secundária do TC. Nestas simulações o módulo e o ângulo da corrente de curto-circuito e a relação de transformação dos TCs foram mantidos sem alteração. O que diferencia os transformadores de corrente avaliados são, fundamentalmente, suas curvas de saturação e suas resistências e reatâncias internas do secundário. Nas Tabelas 4.5 e 4.6 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas na planilha do IIEEE e no ATPDraw.

---

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados das simulações realizadas com o TC classe 10B400.

ATPDraw								
Figura	Carga ( $\Omega$ )	Fator de potência	$T_2$ (s)	Saturação inicial (ciclo)	Máximo I de pico no 1º semiciclo (A)	Tempo total de saturação de I pico (ms)	Máximo I eficaz no 1º semiciclo (A)	Tempo total de saturação de I eficaz (ms)
4.5	4	0,5	2,302	<1/4	130	225	75	225
4.7	4	1	1,251	<1/4	170	150	75	150
4.9	0,6	0,99	4,951	<5/4	225	150	130	150
PLANILHA IEEE								
4.4	4	0,5	2,302	<1/4	130	183	40	217
4.6	4	1	1,251	<1/4	160	117	40	133
4.8	0,6	0,99	4,951	<5/4	225	133	75	133

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados das simulações realizadas com o TC classe 10B200.

ATPDraw								
Figura	Carga ( $\Omega$ )	Fator de Potência	$T_2$ (s)	Saturação inicial (ciclo)	Máximo I de pico no 1º semiciclo (A)	Tempo total de saturação de I pico (ms)	Máximo I eficaz no 1º semiciclo (A)	Tempo total de saturação de I eficaz (ms)
4.14	2	0,5	0,992	<1/4	130	225	75	225
4.16	2	1	0,536	<1/4	170	150	75	150
4.18	0,6	0,99	1,492	<1/2	225	150	120	150
PLANILHA IEEE								
4.13	2	0,5	0,992	<1/4	150	217	50	233
4.15	2	1	0,536	<1/4	160	100	50	100
4.17	0,6	0,99	1,492	<1/2	225	133	75	133

No quadro resumo observa-se que o aumento do fator de potência de 0,5 para 1, mantendo-se a impedância da carga, acarretou na diminuição da constante de tempo secundária. Por outro lado, mantendo-se o fator de potência 1 (ou próximo de 1) e diminuindo-se a impedância da carga verifica-se o aumento da constante de tempo secundária.

Conforme esperado, o TC com melhor desempenho foi o 10B400 com a carga de valor ôhmico reduzido (Figura 4.8 e 4.9), pois demorou um tempo maior para apresentar saturação inicial e levou a um dos menores tempos em saturação e ao melhor desempenho em valor eficaz. Entretanto, seu desempenho pode ser equiparado com o do TC 10B200 com a carga reduzida (Figuras 4.17 e 4.18), caso sejam excluídos os dois ciclos iniciais.

O tempo de saturação inicial ocorreu na maioria dos casos em menos de 1/4 de ciclo, exceto na situação de carga de baixo valor ôhmico ( $0,6+j0,1 \Omega$ ), em que este parâmetro aumentou para até 1 ¼ ciclo. Já o tempo máximo de saturação foi de 233 ms.

O maior valor eficaz, no ciclo inicial, foi de 130 A com carga reduzida, devido à não ocorrência de saturação (Figura 4.9). Por outro lado, o menor valor eficaz inicial ocorreu com a impedância secundária de  $2 \Omega$  no TC 10B200 e de  $4 \Omega$  no TC 10B400, independentemente do fator de potência considerado. Porém, nota-se neste caso que o aumento do fator de potência leva a um aumento no valor de pico da corrente e na distorção da forma de onda.

---

# 5 Conclusões

## 5.1 Considerações Gerais

Este trabalho se propõe a realizar um estudo sobre o efeito de diferentes parâmetros na saturação de transformadores de corrente, com foco na crescente demanda por transformadores de corrente de pequenas dimensões que possam ser utilizados com desempenho satisfatório em cubículos de manobra.

Foram discutidos dois diferentes modelos para o estudo do desempenho de transformadores de corrente na condição de saturação. Um desses modelos se baseia no emprego da plataforma computacional ATPDraw, que permite ao usuário a montagem do circuito elétrico equivalente do transformador de corrente e do sistema elétrico de potência estudado empregando modelos discretos cuja interação é avaliada por meio de simulações computacionais no domínio do tempo. O outro modelo se baseia no emprego da planilha eletrônica disponibilizada pelo IEEE.

Os modelos baseados na planilha do IEEE e no ATPDraw possibilitam a verificação dos dados e dos gráficos gerados nas simulações através de métodos diferentes. Ao contrário do que ocorre no modelo implementado no ATPDraw, a planilha do IEEE permite que o usuário realize alterações nos parâmetros de entrada com agilidade caso o objetivo seja verificar o comportamento de diferentes transformadores de corrente, sem que para isso seja necessário se preocupar com detalhes de modelagem. No entanto, o modelo implementado no ATPDraw permite realizar simulações considerando a curva original de saturação do TC, o que tende a levar a resultados mais precisos. Além disso, o modelo implementado no ATPDraw possui flexibilidade para representar o comportamento de transformadores de corrente em maior detalhe, podendo, por exemplo, incluir efeitos de histerese e perdas, caso necessário.

As simulações realizadas com base nestas ferramentas levaram a resultados semelhantes, a menos de divergências nos valores iniciais dos valores eficazes

---

calculados e de diferenças pontuais nas formas de onda resultantes (que em todos os casos apresentaram comportamento muito semelhante). As diferenças observadas, que podem ser consideradas aceitáveis, são justificadas pelas várias simplificações adotadas na planilha do IEEE em relação ao modelo implementado no ATPDraw. Por exemplo, o ATPDraw utiliza os dados originais da curva de saturação, enquanto a planilha do IEEE utiliza métodos simplificados para definir a inclinação da curva de saturação do núcleo.

Nas análises realizadas, foram considerados dois diferentes transformadores de corrente, um de classe 10B200 e outro de classe 10B400. Levando em consideração as simulações realizadas para uma carga padrão, com alteração apenas do fator de potência, os dois TCs apresentaram o mesmo desempenho. Por outro lado, considerando o emprego dos dois TCs com uma mesma carga no secundário ( $0,6 + j0,1$ ), percebeu-se que o TC 10B400 não entrou em saturação nos primeiros ciclos da simulação e obteve um melhor desempenho geral. Mas o desempenho do TC 10B200, excluindo os dois ciclos iniciais, atenderia à proteção. Caso a proteção necessite atuar nesses dois ciclos iniciais, deve ser verificado se o relé pode atuar adequadamente considerando as distorções nas formas de onda de corrente. Caso este fato seja confirmado, o TC 10B200, com menor dimensão, pode ser utilizado de forma a atender à necessidade de redução de tamanho demandada por alguns cubículos de média tensão.

Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos considerando o desempenho do sistema de proteção, é necessário conhecer os ajustes da proteção, os erros envolvidos e permitidos, a importância dos valores de pico e eficaz e ter ciência do número de ciclos necessários para que o algoritmo do relé possa identificar a ocorrência da falta. Também deve ser verificada a filosofia da proteção, com os seus tempos característicos, e se há necessidade de religamentos. Com isso, uma vez identificada a saturação inicial do TC e se este permanece saturado, é necessário obter mais informações sobre o relé e sobre a filosofia de proteção para que a escolha do TC possa ser feita de maneira adequada.

## **5.2 Propostas de Continuidade**

Um ponto que merece ser mais bem investigado e que é deixado como sugestão para um próximo trabalho consiste na avaliação do impacto da saturação inicial e do tempo de permanência da saturação na precisão dos algoritmos dos relés.

---

---

Sugere-se também acrescentar à simulação a variação da constante de tempo primária e o fluxo remanente no núcleo, que pode aumentar a saturação inicial e final e afetar os relés durante os religamentos. Um último aspecto que seria interessante avaliar seria a inclusão do efeito de histerese na análise do desempenho de transformadores de corrente em condições de correntes de curto-circuito assimétricas.

---

# Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NORMA NBR 6856**, “Especificação de Transformador de Corrente”, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NORMA NBR 62271-100**, “Equipamentos de alta-tensão parte 100: Disjuntores de alta-tensão de corrente alternada”, 2007.

ATP RULE BOOK, Canadian /American EMTP User Group, “**Alternative Transients Program (ATP) Rule Book**”, 1988.

BASSETO, G., “**Comportamento de Transformadores de Corrente Durante Regime Transitório**”, Apresentação da ALSTON, Setembro, 2010.

COELHO, V. V., “**Estudo da Avaliação de Transformadores de Corrente de Alta Tensão Através da Curva de Excitação**”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Batistela N. J., Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Novembro, 2011.

DE CARVALHO, T. S., MORETTI, R. S., FABRIS, G. B., SPRESEOLA, F. E., ANTUNES, R., DE OLIVEIRA, R. G., SALENGUE, R. S., VANIEL, J. F. P. R., DA SILVA O. C., “**Análise De Desempenho de TC em Correntes de Curto-Circuito Assimétricas com Enfoque na Proteção Diferencial de Barras - Panorama Atual e Refinamento de Especificações Técnicas**”, Anais do XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Grupo de Estudo de Subestações de Equipamentos de Alta Tensão, Brasília, Brasil, Outubro, 2013.

GE MULTILIN, “**Dimensioning of Current Transformer for Protection Applications**”, General Electric (GE), Technical Notes - Nº GER-3973B, 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) “**STANDARD IEEE C37.110-2007, Power System Relaying Committee, Guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes**”, 2007

---

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) “**IEEE STANDARD C57.13-2008, Requirements for Instrument Transformers**”, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), “**IEC STANDARD 61869-2: Instrument Transformers – Part 2: Additional Requirements for Current Transformers**”, 2007.

KEZUNOVIC, M., KOJOVIC, L. J., FROMEN, C. W., PHILLIPS, F., ABUR, A., SEVCIK, D. R., “**Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994.

NORMA DE DISTRIBUIÇÃO CEMIG ND-1.13, “**Diretrizes Básicas Para o Planejamento Elétrico de Distribuição em Alta Tensão**”, Dezembro, 2013.

OLIVEIRA, J., “**Transformadores de Corrente**”, Apresentação da ABB para Operador Nacional do Sistema (ONS), Janeiro, 2012.

OSÓRIO, J. M. R., “**Current Transformer Behaviour during the Transient Regime**”, 2005.

PEREIRA, P. S., “**Apostila de Transformadores de Corrente**”, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 1981.

PINTO, E. B., GOUVÊA, M. A., “**Importância do cálculo da relação X/R e dos Níveis de Tensão de Saída nas Subestações para a Especificação de Disjuntores e Religadores**”, Anais do XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – Subgrupo VIII - I Equipamentos Elétricos e Materiais (SGE), São Paulo, Maio, de 1986.

POLJAK, M., KOLIBAS, N., “**Computation Of Current Transformer Transient Performance**”, Product and Production development Electrotechnical Institute – Transformer Department Zagreb, Iugoslávia, October, 1988.

POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (PSRC) COMMITTEE (IEEE), “**Theory for CT Sat. Calculator (Psrc)**”, Spreadsheet originated by the IEEE PSRC Committee Responsible for STANDARD IEEE C37.110, September, 2001.

RELATÓRIO DE ENSAIOS Nº 25Z127.283/1, “**Transformador de Aterramento 13,8kV-1595 kVA**”, 2006.

RELATÓRIO DE ENSAIOS Nº A03012, “**Transformador de Força 138-13,8kV-15 MVA**”, 2003.

---

SCHNEIDER, “**Catálogo de Conjunto de Manobra**”, Disponível no Site <http://www.schneider-electric.com/products/br/bz/3500-sistemas-de-mt/>, Acessado em 28/05/2014.

WORKING GROUP OF THE RELAY INPUT SOURCES SUBCOMMITTEE OF THE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE - (PSRC) COMMITTEE (IEEE), “**CT Saturation Theory and Calculator - version 30 Dec 2002**”, 2002. Disponível no Site [www.pes-psrc.org/Reports/pubs.xls](http://www.pes-psrc.org/Reports/pubs.xls). Acessado em 12/05/2014.

---