



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LILY DA SILVA CARDOSO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM
REGIME TRANSITÓRIO, INCLUINDO O EFEITO DA HISTERESE NO NÚCLEO
MAGNÉTICO.**

Campina Grande, PB

2019

LILY DA SILVA CARDOSO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM
REGIME TRANSITÓRIO, INCLUINDO O EFEITO DA HISTERESE NO NÚCLEO
MAGNÉTICO.**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador: UFCG

Campina Grande, PB

2019

LILY DA SILVA CARDOSO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM
REGIME TRANSITÓRIO, INCLUINDO O EFEITO DA HISTERESE NO NÚCLEO
MAGNÉTICO.**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Lily da Silva Cardoso

Orientanda, UFCG

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

*Dedico este trabalho a minha família que sempre me
estimulou a seguir meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Á Deus por me proporcionar tamanha vitória, concedendo-me a força necessária para levantar a cada queda e me ouvindo na aflição

Aos meus pais pelo estímulo aos estudos desde de minha infância e por me fornecer condições financeiras para cursar esta graduação com dedicação exclusiva.

Aos meus irmãos Anajás, Mário e Marcos Haroldo por sempre acreditarem em meu potencial e me auxiliarem das mais diversas formas, mesmo que a distância, na realização deste sonho.

Aos secretários do DEE Adail e Tchai por serem tão humanos em suas atribuições.

Ao meu Orientador Francisco das Chagas Fernandes Guerra pela dedicação e paciência.

A todos os Amigos que esta caminhada me presenteou e que fizeram o fardo do cansaço físico e mental tornar-se mais leves assim como contribuindo com minha formação como ser humano através do compartilhamento do conhecimento, ideais e vivências ao longo deste tempo.

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de
seus sonhos.”*

Eleanor Roosevelt.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo da Saturação em TC'S sob condições de regime transitório dado um sistema de potência, analisando seu comportamento com a presença da histerese e do religamento e sua influência diante das variações do ângulo de incidência do defeito, da componente indutiva da carga, do módulo da impedância da carga e do fluxo residual, para tanto é feito um embasamento teórico pautado na familiarização a respeito das características dos transformadores de corrente, sejam estruturais ou sejam elétricas e suas conformidades segundo a norma NBR 6856, assim como a apresentação do equacionamento necessário para a definição das variáveis envolvidas no objeto de estudo como no desenvolvimento do modelo de Juhani Tellinen, concluindo-se que alguns desses casos devem ser previstos e evitados durante o dimensionamento do TC e projeção do sistema.

Palavras-chave: Transformadores de Corrente, Histerese, Saturação , Fluxo residual, Modelo de Tellinen.

ABSTRACT

In this work is presented the study of saturation in TC'S under transient regime conditions given a power system, analyzing its behavior with and without the presence of hysteresis and reclosing and its influence on the variations of the incidence angle of the defect, the inductive component of the load, the load impedance module and the residual flow, the theoretical basis is based on familiarization about the characteristics of the current transformers, either structural or electrical and their conformity according to NBR 6856, as well as the presentation of the necessary equation for the definition of the variables involved in the object of study as in the development of the model of Juhani Tellinen, concluding that some of these cases should be anticipated and avoided during TC sizing and system design.

Keyword: Current transformers, Hysteresis, Saturation, Residual flow, Tellinen model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - TC Tipo Barra.....	3
Figura 2 - TC tipo Janela.....	4
Figura 3 - TC tipo Bucha.....	4
Figura 4 - Circuito Equivalente de um TC	5
Figura 5 - Definição Ponto De Joelho JEC	10
Figura 6 - Ponto de Joelho IEEE	11
Figura 7 - Circuito Elétrico Equivalente para a Representação do TC	12
Figura 8 - Curva de saturação sem remanência .X Curva de saturação com remanência	13
Figura 9 - Laço Maior De Histerese em Termos Das Grandezas $\lambda - i_m$	14
Figura 10 - Diagrama Unifilar do Sistema Primário	16
Figura 11 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$	17
Figura 12 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$	18
Figura 13 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$	18
Figura 14 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$	19
Figura 15 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 45^\circ$	19
Figura 16 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 45^\circ$	20
Figura 17 - Corrente de excitação - $\theta = 45^\circ$	20
Figura 18 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 45^\circ$	21
Figura 19 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 90^\circ$	22
Figura 20 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 90^\circ$	23
Figura 21 - Corrente de excitação - $\theta = 90^\circ$	23
Figura 22 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação = 90°	24
Figura 23 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado)- $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s= 0$	25
Figura 24 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s= 0$	25
Figura 25 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s= 0$	26
Figura 26 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=178$ e $X_s= 0$	26
Figura 27 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$	27
Figura 28 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$	28
Figura 29 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$	28
Figura 30 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$	29
Figura 31 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s= 0$	30
Figura 32 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s= 0$	31
Figura 33 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s= 0$	31

Figura 34 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$, Rs=2,25 e Xs= 0.....	32
Figura 35 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 81^\circ$, Rs=0,75e Xs= 0.....	33
Figura 36 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 81^\circ$, Rs=0,75e Xs= 0	33
Figura 37 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 82^\circ$, Rs = 0,75e Xs= 0.....	34
Figura 38 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 82^\circ$, Rs=0,75e Xs= 0	34
Figura 39 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$, Rs=1,75, Xs= 0 e fluxo residual = 0,45	35
Figura 40 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - sem religamento - $\theta = 0^\circ$, Rs=1,75, Xs= 0 e fluxo residual=0,45	36
Figura 41 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$, Rs=1,75, Xs= 0 com religamento.	37
Figura 42 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$, Rs=1,75, Xs= 0 com religamento.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Padronizados De Corrente Nominal -----	6
Tabela 2 - Padronização Das Cargas a Serem Ligadas No Secundário-----	7
Tabela 3 - Padronização Dos Níveis de Tensão-----	8

LISTA DE SÍMBOLOS

- A Área de seção reta do núcleo magnético.
- a_j Coeficiente das funções que aproximam a curva de magnetização inicial e o ramo superior do laço de histerese ($j = 1, 2, 3$).
- B Módulo do vetor indução magnética.
- C_s Carga ligada ao secundário.
- C_{ap} Carga correspondente à bobina de corrente.
- C_n Carga nominal.
- E_s Tensão induzida no enrolamento secundário do TC.
- F_s Fator de sobrecorrente nominal ou de segurança.
- F_{tcc} Fator Térmico de Curto-circuito
- H Módulo do vetor intensidade de campo magnético.
- i_a Corrente associada as perdas anômalas.
- i_e Corrente associada as perdas parasíticas clássicas.
- i_m Corrente de magnetização.
- i_l Corrente refletida do primário para o secundário pela relação de espiras.
- i_{1F} Corrente de curto-circuito no primário do TC.
- i_2 Corrente no secundário do TC.
- I_{1F} Corrente de curto-circuito simétrica eficaz no primário do TC.
- I_2 Corrente no secundário.
- $I'1$ Corrente que passa no primário.
- I_{cs} Corrente que circula no secundário.
- I_{tr} Corrente térmica nominal.
- I_{np} Corrente primária nominal.
- IN Corrente nominal.
- i_{mf} Valor máximo de corrente de excitação.
- I - Corrente nominal secundária.
- L_C Comprimento do fio condutor.
- l Comprimento médio da trajetória magnética.
- $L1$ Indutância equivalente em serie do sistema primário.
- $L2$ Indutância total no enrolamento secundário.
- L_m Indutância de magnetização.

L_e	Indutância diferencial de magnetização do núcleo com entreferro.
L_T	Comprimento da linha.
L_S	Indutância equivalente do sistema alimentador.
L_{ds}	Inclinação da reta descendente na região saturada.
L_{as}	Inclinação da reta ascendente na região saturada.
M	Módulo do vetor magnetização.
N	Número de espiras do enrolamento secundário.
N_1	Número de espiras do enrolamento primário.
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário.
P	Perdas magnéticas totais.
P_e	Perda instantânea de potência em todo o volume de um núcleo de várias laminas.
r	Resistência em série.
R_1'	Resistência do enrolamento primário.
R_2	Resistência do enrolamento secundário.
R_P	Resistência do núcleo equivalente a perdas por correntes de Foucault e Histerese.
R_C	Resistência da carga do secundário (Burden).
R_c	Resistência da carga.
R_{tc}	Resistência do enrolamento secundário do TC
S_{CC}	Potência de curto-circuito na barra
T_{1S}	Constante de tempo equivalente da barra.
U_e	Tensão eficaz.
U	Tensão eficaz no enrolamento secundário quando o TC opera no ponto de joelho.
U_N	Tensão nominal.
X_1'	Indutância do enrolamento primário.
X_2	Indutância do enrolamento secundário.
X_m	Indutância de magnetização do núcleo.
X_c	Indutância da carga do secundário.
X_c	Reatância da carga.
X_{tc}	Reatância do enrolamento secundário do TC.
x	Variável auxiliar.
Z_C	Impedância do conduto.
Z_T	Impedância de Thévenin da barra.

- λ Fluxo de enlace.
- λ_r Fluxo de enlace no ponto de saturação do laco de histerese.
- λ_d Fluxo do ramo descendente.
- λ_a Fluxo do ramo ascendente.
- λ_f Fluxo onde a corrente de excitação é máxima).
- μ_0 Permeabilidade magnética no vácuo.
- σ Espessura de uma lamina de material magnético.
- P Resistividade do material ferromagnético.

ABREVIATURAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira De Normas Técnicas.
<i>TC</i>	Transformador De Corrente.
<i>SEP</i>	Sistema Elétrico De Potência
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>CC</i>	Corrente Continua
<i>CA</i>	Corrente Alternada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	3
2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	3
2.1.1. TC Tipo Barra.....	3
2.1.2. TC Tipo Enrolado.....	3
2.1.3. TC Tipo Janela	3
2.1.4. TC Tipo Bucha	4
2.1.5. TC Tipo Núcleo Dividido.....	4
2.1.6. TC Tipo com Vários Enrolamentos Primários	4
2.1.7. TC Tipo Vários Núcleos Secundários	5
2.1.8. TC Tipo Vários Enrolamentos Secundários	5
2.1.9. TC Tipo Derivação no Secundário	5
2.2. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS.....	5
2.2.1. Correntes Nominais	6
2.2.2. Cargas Nominais	6
2.2.3. Fator de Sobrecorrente.....	7
2.2.4. Corrente de Magnetização	7
2.2.5. Tensão Secundária.....	8
2.2.6. Fator Térmico Nominal	8
2.2.7. Fator Térmico de Curto-Circuito.....	9
2.2.8. Corrente Dinâmica Nominal.....	9
2.3. TRANSFORMADORES DE CORRENTE DESTINADOS A PROTEÇÃO	9
2.3.1. Classe de Transformadores de Corrente Relativo a Impedância do Seu Enrolamento Secundário	10
2.3.2. Tensão no Ponto de Joelho	10
3. REPRESENTAÇÃO DE TCS PARA CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS	12
3.1.1. Modelo de histerese de TELLINEN.....	13
4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL DA SATURAÇÃO EM TC'S DE PROTEÇÃO DURANTE TRANSITÓRIO SOB VARIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS NO SISTEMA.	16
4.1. CENÁRIO 1	17
4.2. CENÁRIO 2	24
4.3. CENÁRIO 3	32
4.4. CENÁRIO 4	35
4.5. CENÁRIO 5	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Com a expansão dos sistemas elétricos de potência, surge a necessidade de um dispositivo que possua como finalidade a diminuição em escala da corrente do primário para o secundário e assim ocorra o processo de proteção e medição da SEP, para tanto foi então criado o Transformador de Corrente (TC).

Constituído basicamente de enrolamentos e núcleo ferromagnético, o TC é sensível a fatores que interferem em seu funcionamento normal, como o seu mal dimensionamento e curtos-circuitos, dessa forma no período transitório há sobreposição do fluxo residual com o fluxo assimétrico, este que é provocado pelo decréscimo exponencial da componente contínua da corrente fazendo com que a forma da onda no secundário do TC apresente-se distorcida, elevando a saturação em níveis indesejáveis.

A histerese, palavra que vem do termo grego “retardo”, é o fenômeno que tende a manter inalteradas as propriedades dos materiais mesmo diante de estímulos ou fatores que as modifiquem, sendo assim, a histerese magnética faz com que o campo magnético gerado pelo núcleo ferromagnético tenha um retardo quanto ao seu caminho inicial, por tanto sua influência sobre o fluxo residual e com isso saturação nos TC’S deve ser analisada.

A NBR 6856 é a norma técnica que regulamenta a terminologia e as especificações dos transformadores de corrente no Brasil sob o regimento da associação brasileira de normas técnicas (ABNT), que estipula para TC’S de proteção um valor em 20 vezes maior entre a corrente do primário e a corrente nominal de operação, margem elevada, mas necessária quando refere-se a proteção diante de um cenário transitório.

1.2. Objetivos do Trabalho

O objetivo primordial deste trabalho consiste em analisar os diferentes comportamentos da saturação em TCs de proteção, simulando o comportamento transitório e ainda a influência que o núcleo magnético com histerese possui na mesma.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Avaliar a influência do ângulo de incidência do defeito na saturação do TC.
- Avaliar a influência da componente indutiva da carga na saturação do TC.
- Avaliar a influência do módulo da impedância da carga na saturação em CC (corrente contínua) e em CA (corrente alternada) do TC.

- Avaliar a influência do fluxo residual no núcleo do TC.
- Avaliar o comportamento do TC através do modelo de histerese TELLINEN

1.3. Estrutura do Trabalho

Este trabalho é estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 é introdutório, contextualiza o trabalho, define os objetivos e apresenta a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a descrição quanto à forma estrutural do transformador de corrente através da diferenciação dos seus tipos, da representação elétrica e de suas variáveis de relevância, dos seus fatores e correto dimensionamento segundo a NBR 6856 e da especificação mais detalhada sobre os TC'S de proteção, descrevendo suas classes segundo a impedância secundária e definindo tensão de ponto de joelho.

O Capítulo 3 descreve a representação e o equacionamento do transformador de corrente para proteção durante período transitório assim como o equacionamento do modelo de TELLINEN para o TC sob o efeito da histerese.

O Capítulo 4 trata da análise da simulação de um TC durante período transitório para um dado sistema sob diferentes cenários, avaliando a influência das variáveis em estudo.

O Capítulo 5 destaca as principais conclusões do trabalho evidenciando a robustez do método adotado.

O Capítulo 6 - lista as fontes consultadas durante a realização do trabalho.

2. FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1. Características Construtivas

O TC é um dispositivo que apresenta em sua constituição elementos importantes como seu enrolamento primário e seu núcleo, e a partir das variadas formas que os mesmos podem tomar surgem alguns tipos de classificações.

2.1.1. TC Tipo Barra

Figura 1 - TC Tipo Barra



Fonte: Minulight, 2019.

Possui seu enrolamento primário constituído por uma barra e está atravessa o núcleo do transformador, o secundário tem enrolamentos que permitem a possibilidade de uma ou mais derivações afins de se obter uma menor relação de transformação e com isso correntes mais baixas.

2.1.2. TC Tipo Enrolado

Neste tipo de TC podemos notar que seu enrolamento primário se apresenta sempre enrolado, seja com uma ou mais espiras, ao núcleo do transformador.

2.1.3. TC Tipo Janela

Seu próprio nome advém da forma de seu núcleo, que tem uma abertura (janela) e esta é transpassada por um condutor, seu primário

Como podemos constar na figura 2.

Figura 2 - TC tipo Janela



Fonte: Rehtom, 2019.

2.1.4. TC Tipo Bucha

Normalmente situado próximo das buchas de isolamento, este tipo de TC possui núcleo em forma de anel em conjunto com seus enrolamentos secundários, seu primário é constituído de um condutor que passará através do núcleo.

Figura 3 - TC tipo Bucha



Fonte: BrasilTec, 2019.

2.1.5. TC Tipo Núcleo Dividido

É constituído por um condutor com enrolamento primário e cujo núcleo é dividido.

2.1.6. TC Tipo com Vários Enrolamentos Primários

Neste tipo o TC possui vários enrolamentos primários isolados podendo serem ligados em paralelo para obtenção de melhores relações de transformação, já seu enrolamento secundário é único.

2.1.7. TC Tipo Vários Núcleos Secundários

Apresenta vários núcleos assim como um enrolamento secundário para cada núcleo, formando juntamente com o enrolamento primário, um conjunto.

2.1.8. TC Tipo Vários Enrolamentos Secundários

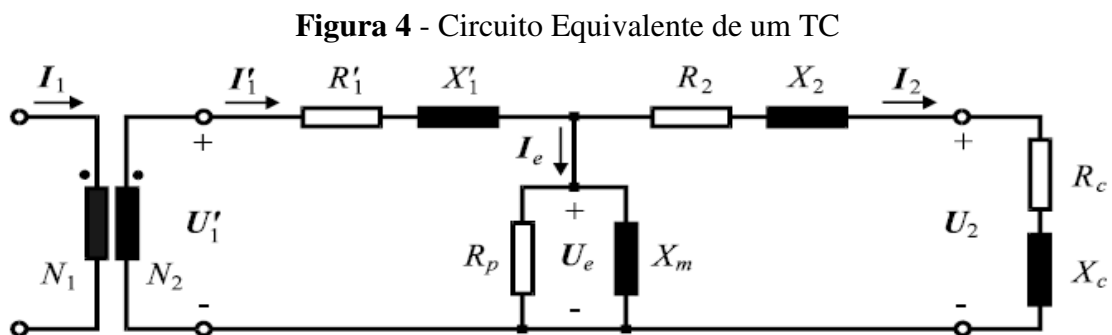
Tem como sua principal característica a presença de vários enrolamentos no secundário e único núcleo, onde estes enrolamentos secundários assim como o primário estão envolvidos.

2.1.9. TC Tipo Derivação no Secundário

Possui núcleo único e este é envolvido tanto pelo enrolamento primário quanto pelo secundário, podendo o primário possuir mais de um enrolamento e seu secundário derivações.

2.2. Características Elétricas

O circuito equivalente de um transformador de corrente apresenta-se conforme ilustrado a baixo:



Fonte: Guerra, 2009.

Neste circuito tem-se que:

R_1' -- Resistência do enrolamento primário;

R_2 -- Resistência do enrolamento secundário;

R_p -- Resistência do núcleo equivalente a perdas por correntes de Foucault e Histerese;

R_c -- Resistência da carga do secundário (Burden);

X_1' -- Indutância do enrolamento primário;

X_2 -- Indutância do enrolamento secundário;

X_m -- Indutância de magnetização do núcleo;

X_c -- Indutância da carga do secundário;

Através do circuito da Fig.5. podemos observar uma forma simplificada do funcionamento elétrico de um TC, a corrente I'_1 é aquela que passa no primário, onde sua impedância primária ($Z_1 = R_1' + X_1'$) pode ser desprezada, a corrente I_e passa pelo ramo que representa o núcleo do TC e a ela dar-se o nome de corrente de excitação, além de ser atrasada em 90° da tensão na carga e a corrente I_2 é aquela que passa no secundário do transformador e também aquela destinada a carga.

2.2.1. Correntes Nominais

As correntes nominais primárias devem ser compatíveis com a corrente de carga do circuito primário.

As correntes nominais secundárias são geralmente iguais a 5 A. Em alguns casos especiais, quando os aparelhos, normalmente relés de proteção, são instalados distantes dos transformadores de corrente, pode-se adotar a corrente secundária de 1A, a fim de reduzir a queda de tensão nos fios de interligação (MAMEDE, 2005).

Tabela 1 - Dados Padronizados De Corrente Nominal

Corrente Nominal (A)	Relação Nominal (A)	Corrente Nominal (A)	Relação Nominal (A)	Corrente Nominal (A)	Relação Nominal (A)	Corrente Nominal (A)	Relação Nominal (A)
5	1:1	60	12:1	400	80:1	2500:1	500:1
10	2:1	75	15:1	500	100:1	3000:1	600:1
15	3:1	100	20:1	600	120:1	4000:1	800:1
20	4:1	125	25:1	800	160:1	5000:1	1000:1
25	5:1	150	30:1	1000	200:1	6000:1	1200:1
30	6:1	200	40:1	1200	240:1	8000:1	1600:1
40	8:1	250	50:1	1500	300:1	-	-

Fonte: NBR 6856, 1992.

2.2.2. Cargas Nominais

A carga que será instalada no transformador de corrente deve estar padronizada, levando-se em conta na soma das impedâncias os casos frequentes de fios muito longos ligados ao TC e com isso impedâncias consideráveis.

A equação abaixo é expressa por esse somatório, independente da finalidade do TC.

$$C_{ap} = \sum C_{ap} + L_c \times Z_c \times I^2 \quad 2.1$$

$\sum C_{ap}$ - Soma das cargas correspondentes às bobinas de corrente dos aparelhos considerados, em VA;

I - Corrente nominal secundária, normalmente igual a 5 A;

Z_C - Impedância do conduto r, em Ω/m ;

L_C - Comprimento do fio condutor, em m.

A NBR 6856 padroniza as cargas que devem serem ligadas no secundário dos TC'S e assim facilitar sua correta especificação.

Tabela 2 - Padronização Das Cargas a Serem Ligadas No Secundário

Designação	Resistência Ω	Indutância mH	Potência nominal (VA)	Fator de potência	Impedância Ω
C 2,5	0,09	0,116	2,5	0,0	0,1
C 5,0	0,18	0,232	5,0	0,9	0,2
C 12,5	0,45	0,580	12,5	0,9	0,5
C 25	0,5	2,300	25,0	0,5	1,0
C 50	1,00	4,600	50,0	0,5	2,0
C 100	2,00	9,200	100,0	0,5	4,0
C 200	4,00	18,400	200,0	0,5	8,0

Fonte: NBR 6856, 1992.

2.2.3. Fator de Sobrecorrente

A corrente máxima que deve circular no primário de um TC de proteção obedecendo a NBR 6856 é de até 20 vezes o valor da corrente nominal, onde o fator de sobre corrente nominal é o valor a ser multiplicado a corrente nominal sem que extrapole da sua classe de exatidão.

$$F.S = \frac{C_n}{C_s} \times F_s \quad 2.2$$

Onde:

C_s - Carga ligada ao secundário, em VA;

F_s - Fator de sobrecorrente nominal ou de segurança;

C_n - Carga nominal, em VA.

2.2.4. Corrente de Magnetização

Conhecer a corrente de magnetização fornecida para um transformador de corrente nos possibilita encontrar alguns parâmetros importantes tais como a tensão induzida no secundário e a corrente no mesmo, esses valores mudam para cada TC, já que possuem características impostas por cada núcleo.

Os TC'S destinados ao serviço de proteção, por exemplo, que atingem o início da saturação a $20 \times I_n$, ou 1,5 T Quando não se consegue uma chapa de ferrosilício que trabalhe a corrente nominal primária com um valor de densidade magnética igual ou inferior a $1/20$ do

valor de densidade magnética de saturação, é necessário utilizar reatores não lineares em derivação com os terminais de carga. Logo, neste caso, a corrente deduzida da carga é igual à corrente de magnetização mais a corrente que flui pelo reator em derivação (MAMEDE, 2005).

2.2.5. Tensão Secundária

A saturação do núcleo do TC é geralmente quem exerce a função de regular os níveis de tensão nominal no secundário, no entanto fatores como correntes elevadas no primário ou mesmo cargas superiores da nominal para o TC, podem ocasionar sobre tensões.

A equação que permite definir a tensão induzida no enrolamento secundário do TC é a seguinte:

$$E_s = I_{cs} X \sqrt{(R_c + R_{tc})^2 + [(X)_c + X_{tc}]^2} \quad 2.3$$

Onde:

I_{cs} – Corrente que circula no secundário (A);

R_c – Resistência da carga (Ω)

R_{tc} – Resistência do enrolamento secundário do TC (Ω)

X_c – Reatância da carga, em (Ω)

X_{tc} – Reatância do enrolamento secundário do TC (Ω)

A tabela a baixo mostra a padronização de alguns desses níveis de tensão:

Tabela 3 - Padronização Dos Níveis de Tensão

Carga (VA)	Tensão Secundária (V)	TC Normalizado	
		Classe A	Classe B
C 25	10	A10	B10
C5	20	A20	B20
C12,5	50	A50	B50
C25	100	A100	B100
C50	200	A200	B200
C100	400	A400	B400
C 200	800	A800	B 800

Fonte: NBR 6856,1992.

2.2.6. Fator Térmico Nominal

O fator previsto em norma que regula o quanto pode-se multiplicar uma determinada corrente do primário de um TC mediante sua carga especificada, sem haver elevação da temperatura e de valores superiores ao da norma.

A NBR 6856/92 especifica os seguintes fatores térmicos nominais: 1,0 – 1,2 – 1,3 – 1,5 – 2,0.

2.2.7. Fator Térmico de Curto-Circuito

É a relação entre a corrente térmica nominal (I_{tr}) e a corrente primária nominal (I_{np}), o valor eficaz que circula no primário do transformador de corrente pode ser dado da seguinte forma:

$$F_{tcc} = \frac{I_{tr}}{I_{np}} \quad 2.4$$

2.2.8. Corrente Dinâmica Nominal

É interessante observar que as correntes que circulam nos enrolamentos primário e secundário do TC apresentam as seguintes particularidades;

- se as correntes circulantes são paralelas e de mesmo sentido, os condutores se atraem;
- se as correntes circulantes são paralelas e de sentidos contrários, os condutores se repelem (MAMEDE, 2005).

A corrente dinâmica nominal é normalmente 2,5 vezes a corrente térmica nominal.

2.3. Transformadores de Corrente Destinados a Proteção

Os transformadores de corrente para proteção têm como finalidade proteger o sistema de sobrecargas ou curtos-circuitos, através da diminuição dos níveis de corrente e assim facilitando o acionamento dos relés mesmo que estes não estejam ligados de forma direta com o circuito primário, e com isso o TC de proteção torna-se uma forma barata e eficaz quanto a segurança dos operadores.

Ao contrário dos transformadores de corrente para medição, os TC's para serviço de proteção não devem saturar para correntes de elevado valor, tais como as que se desenvolvem durante a ocorrência de um efeito no sistema. Caso contrário os sinais de corrente recebidos pelos relés estariam mascarados, permitindo, desta forma, operação inconsequente do sistema elétrico. Assim, os transformadores de corrente para serviço de proteção apresentam um nível de saturação elevado igual a 20 vezes a corrente nominal (Mamede, 2005).

Pode-se perfeitamente concluir que jamais se deve utilizar transformadores de proteção em serviço de medição e vice-versa. Além disso, deve-se levar em conta a classe de exatidão em que estão enquadrados os TC's para serviço de proteção que, segundo a NBR 6856/81, podem ser de 5 ou 10 (MAMEDE, 2005).

2.3.1. Classe de Transformadores de Corrente Relativo a Impedância do Seu Enrolamento Secundário

Os transformadores de corrente para serviço de proteção são caracterizados pela sua classe, relativamente à impedância do seu enrolamento secundário, ou seja (MAMEDE, 2009):

Classe B:

São aqueles cujo enrolamento secundário apresenta reatância que pode ser desprezada. Nesta classe, estão enquadrados os TC's com núcleo toroidal, ou simplesmente TC's de bucha.

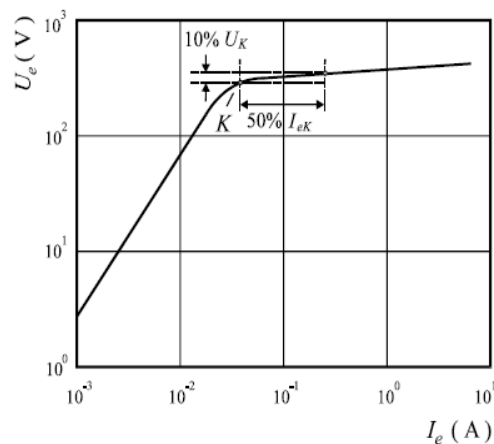
Classe A:

São aqueles cujo enrolamento secundário apresenta uma reatância que não pode ser desprezada. Nesta classe, estão enquadrados todos os TC's que não se enquadram na classe B.

2.3.2. Tensão no Ponto de Joelho

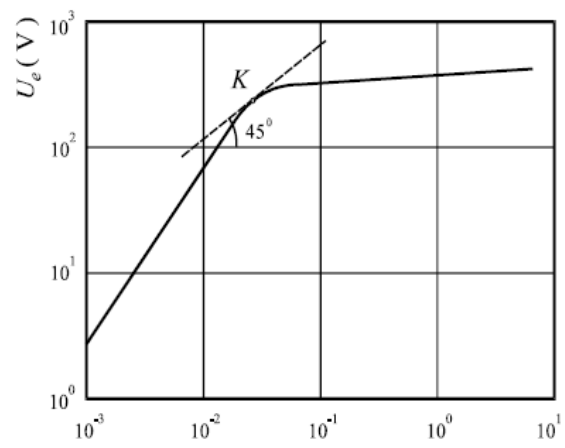
Segundo (60044-1 – IEC / 2003) o ponto de joelho da curva $U_e \times I_e$ é aquele cujo aumento de 10% de U_e equivale a um aumento de 50% em I_e .

Figura 5 - Definição Ponto De Joelho JEC



Fonte: Guerra, 2009.

A norma americana IEEE C57.13 (2008) [5] define o ponto de joelho da curva $U_e - I_e$ como o que apresenta uma reta tangente com inclinação de 45° (em TCs com entreferro, 30°) (GUERRA, 2009)

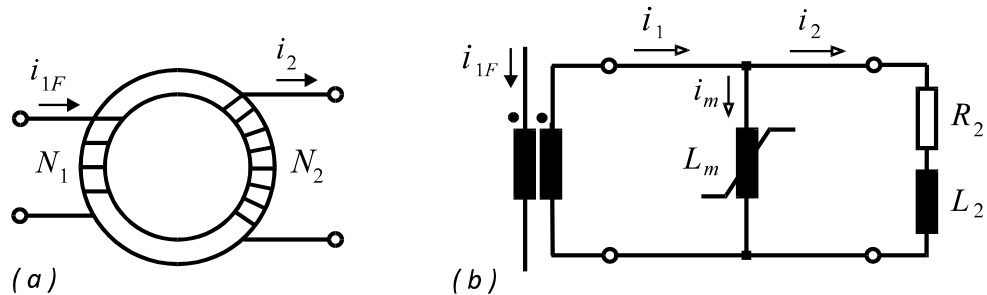
Figura 6 - Ponto de Joelho IEEE

Fonte: Guerra, 2009.

3. REPRESENTAÇÃO DE TCS PARA CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS

Durante o transitório o modelo empregado aos transformadores de corrente, que despreza capacitâncias dos enrolamentos, impedância no primário, efeito da histerese e perdas dinâmicas no núcleo, propicia o desenvolvimento de estudos durante faltas elétricas nos TC'S

Figura 7 - Circuito Elétrico Equivalente para a Representação do TC



Fonte: Guerra,2009

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad 3.1$$

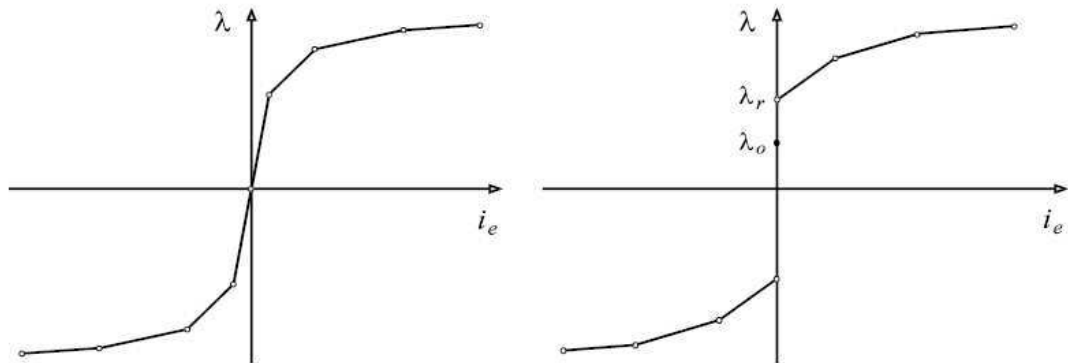
$$I_2 + I_m = \frac{N_1}{N_2} I_{1F} \quad 3.2$$

Logo combinando as equações, obtém-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} I_{1F} - I_m \right) + L_2 \frac{N_1}{N_2} \frac{dI_{1F}}{dt}}{1 + L_2 \frac{d\lambda}{dI_m}} \quad 3.3$$

O fluxo residual pode ser considerado ou não. Na curva da Fig.6 a esquerda, o fluxo residual não é considerado, o que é o caso das simulações de regime permanente. Em regime transitório, pode-se representar o fluxo residual segundo a curva da Fig.7 a direita, onde λ_r é o fluxo de enlace correspondente ao ponto de remanência. Assim, tem-se - $\lambda_r \leq \lambda_o \leq \lambda_r$.

Figura 8 - Curva de saturação sem remanência .X Curva de saturação com remanência



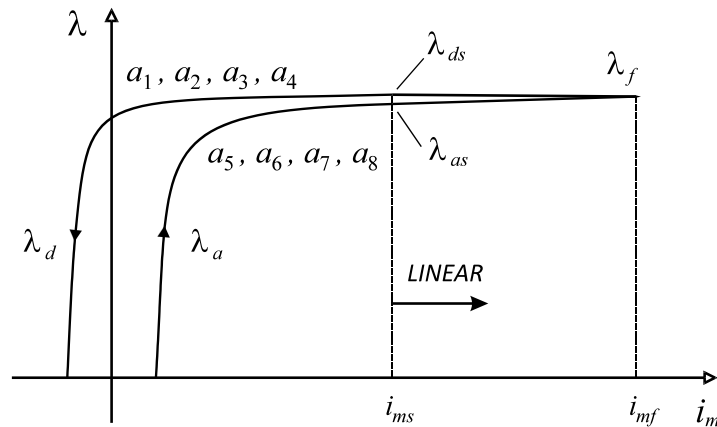
Fonte: Guerra, 2009.

3.1.1. Modelo de histerese de TELLINEN

Em 1998 um novo modelo de histerese é enunciado por Juhani Tellinen, baseado na trajetória magnética simétrica, partindo do plano (fluxo de enlace /corrente de magnetização) e sob o núcleo em saturação. Esse modelo pode ser descrito pela equação 2.20, levando em consideração tão somente a parte onde $\lambda > 0$, pois por possuir simetria, $\lambda < 0$ torna-se facilmente calculada.

$$\frac{di_m}{d\lambda} = \left\{ L_s + \frac{\lambda_d(i_m) - \lambda(i_m)}{\lambda_d(i_m) - \lambda_a(i_m)} \left[\frac{\lambda_d(i_m)}{di_m} - L_s \right] \right\}^{-1}, \lambda_{k+1} \geq \lambda_k \quad 3.4$$

$$\frac{di_m}{d\lambda} = \left\{ L_s + \frac{\lambda - \lambda_d(i_m)}{\lambda_d(i_m) - \lambda_a(i_m)} \left[\frac{\lambda_d(i_m)}{di_m} - L_s \right] \right\}^{-1}, \lambda_{k+1} < \lambda_k \quad 3.5$$

Figura 9 - Laço Maior De Histerese em Termos Das Grandezas $\lambda - i_m$ 

Fonte: Guerra, 2009.

Onde:

$\lambda_d(i_m)$: Função cuja parcela superior do ramo descendente é aproximada do laço maior e assim expressa por:

$$\lambda_d = a_1 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{i_m + a_2}{a_3} \right) + a_4 i_m \quad 3.6$$

E entre a região ($i_m > i_{ms}$):

$$\lambda_d = L_{ds} (i - i_{ms}) + \lambda_{ds} \quad 3.7$$

$\lambda_a(i_m)$: Função cuja parcela do ramo superior ascendente é aproximada a valores de > 0 , e assim descrita como:

$$\lambda_a = a_5 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{i_m - a_6}{a_7} \right) + a_8 i_m \quad 3.8$$

E entre a região ($i_m > i_{ms}$):

$$\lambda_a = L_{as} (i - i_{ms}) + \lambda_{as} \quad 3.9$$

L_s : Constante que expressa a média aritmética das inclinações dos dois ramos lineares na área saturada.

Dessa forma teremos:

$$L_s = \frac{L_{ds} + L_{as}}{2} \quad 3.10$$

Cujas componentes L_{ds} (inclinação da reta descendente na região saturada) e L_{as} (inclinação da reta ascendente na região saturada) são expressas por :

$$L_{as} = \frac{\lambda_f - \lambda_{as}}{i_{mf} - i_{ms}} \quad 3.11$$

Sendo o fluxo onde a corrente de excitação é máxima, descrito como:

$$\lambda_f = L_{ds} (i_{mf} - i_{ms}) + \lambda_{ds} \quad 3.12$$

E

$$L_{ds} = \mu_o \frac{N^2 A}{l} \quad 3.13$$

μ_o - Permeabilidade magnética no vácuo.

N - Número de espiras do enrolamento secundário.

A - Área de seção reta do núcleo magnético.

l - Comprimento médio da trajetória do fluxo no núcleo magnético.

Considerações a respeito das perdas magnéticas no núcleo

A corrente de excitação no núcleo (i_e), pode ser representada da seguinte forma:

$$i_e(t) = i_m(t) + \sigma \frac{d\lambda}{dt} \quad 3.14$$

Onde a componente $\sigma \frac{d\lambda}{dt}$, representa a contribuição da condutância advinda das perdas

magnéticas no núcleo.

Para a determinação de σ pode ser feitos duas considerações:

Núcleo incluindo efeito da histerese – neste caso a condutância corresponde as perdas da histerese em corrente contínua e perdas parasíticas da frequência de operação.

Núcleo sem o efeito da histerese – apenas as perdas parasíticas são consideradas.

O cálculo de σ é realizado através da comparação de trajetórias simétricas de histerese, tomando as equações 3.15 e 3.16 ponto inicial da estimativa:

$$P = \sigma U^2 \quad 3.15$$

$$\sigma = \frac{P}{U^2} \quad 3.16$$

Sendo:

P – Perdas magnéticas totais, descritas pela equação 3.18

$$P_e = \frac{P}{\rho A l} \quad 3.17$$

$$P = \rho A l \quad 3.18$$

U - Tensão eficaz no enrolamento secundário quando o TC opera no ponto de joelho da curva de saturação. Demonstrado por:

$$U = \frac{\omega \lambda_{\kappa}}{\sqrt{2}} \quad 3.19$$

E combinando as equações 3.16, 3.17 e 3.19 resulta em:

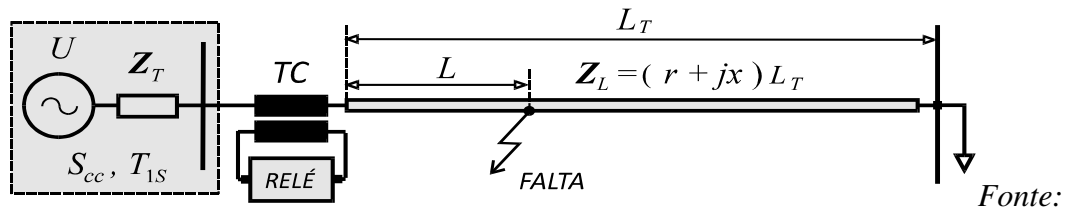
$$\sigma = \frac{2 \rho A I P_e}{\omega^2 \lambda_K^2} \quad 3.20$$

A metodologia vista embasou o desenvolvimento de uma rotina computacional que visa simular características dos TC'S durante transitório utilizando o método de TELLINEN e foi a partir dela que foi possível a realização do estudo.

4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL DA SATURAÇÃO EM TC'S DE PROTEÇÃO DURANTE TRANSITÓRIO SOB VARIAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS NO SISTEMA.

Análise do sistema dado sob 5 diferentes cenários propicia resultados importantes no estudo de TC'S para tanto teremos as seguintes configurações do sistema primário e do transformador de corrente.

Figura 10 - Diagrama Unifilar do Sistema Primário



Fonte: Guerra,2007.

- Tensão nominal, U_N : 230 kV.
- Corrente nominal IN: 800 A.
- Comprimento da linha, L_T : 85 km.
- Resistência em série, r : 0,0319 Ω /km.
- Reatância em série, x : 0,3311 Ω /km.
- Potência de curto-circuito na barra de 230 kV, S_{cc} : 7,2 GVA.
- Constante de tempo equivalente da barra de 230 kV, T_{1s} : 35 ms.
- Impedância de Thévenin da barra de 230 kV, $Z_T = 0,56 + j 7,35 \Omega = 7,37 \angle 85,64^\circ$.
- Distância do defeito ao TC: 5 km.

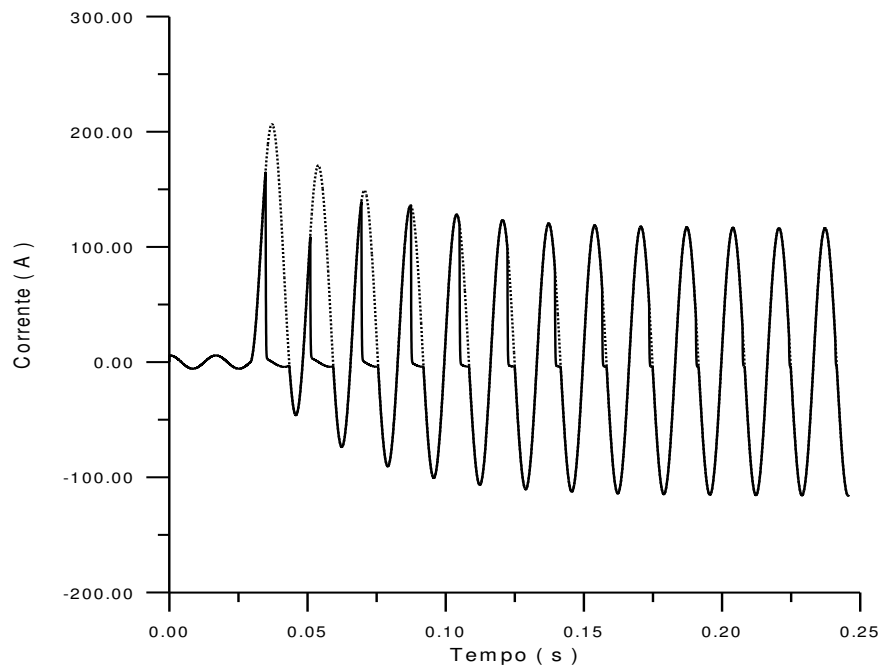
O transformador de corrente dado possui os seguintes parâmetros:

- Relação de espiras: 1 / 180.
- Correntes nominais: 900 / 5 A.
- Área de seção reta: $1,91 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
- Comprimento médio da trajetória magnética: 0,50 m.
- Resistência dos enrolamentos e fiação: $0,75 \Omega$.
- Carga secundária nominal: 1Ω .
- Resistência de perdas no núcleo: $2,5 \text{ k}\Omega$.

4.1. Cenário 1

A modificação no ângulo de incidência do defeito variando-o entre os ângulos de 0° , 45° , 90° resulta nos seguintes panoramas:

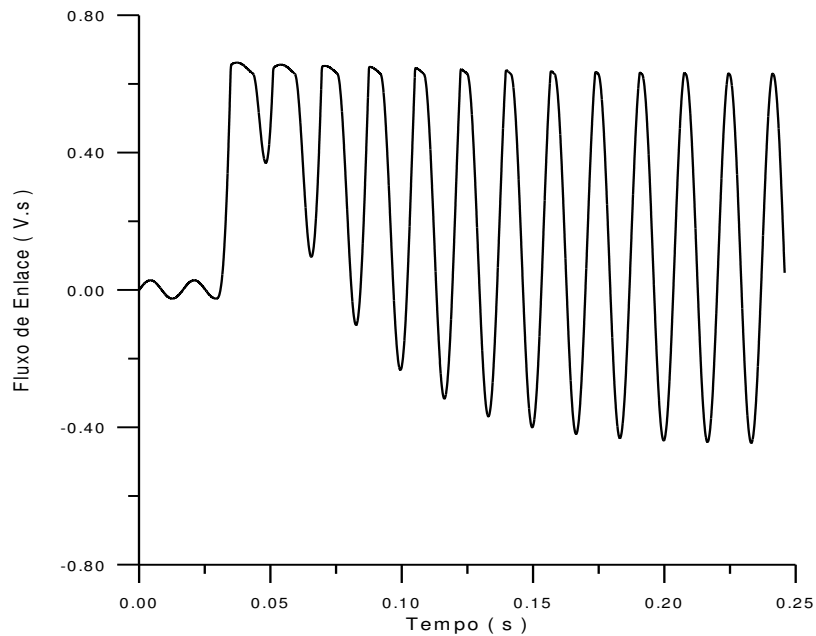
Figura 11 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$.



Fonte: A própria autora

O ângulo incidente de defeito em 0° é o pior dos casos, pois a corrente de curto-circuito assume valores mais assimétricos, neste caso atingindo picos de 200 A.

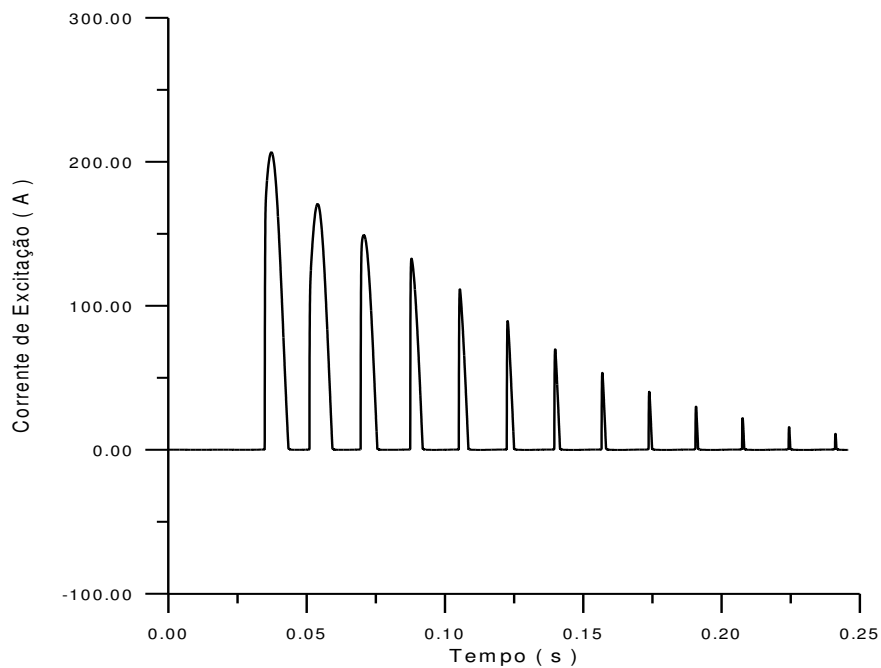
Figura 12 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$.



Fonte: A própria autora

Nota-se alto grau de assimetria logo após a ocorrência do defeito, assim como picos de valores entorno de 0,7 V.s, considerados altos e que tendem a assim se manter.

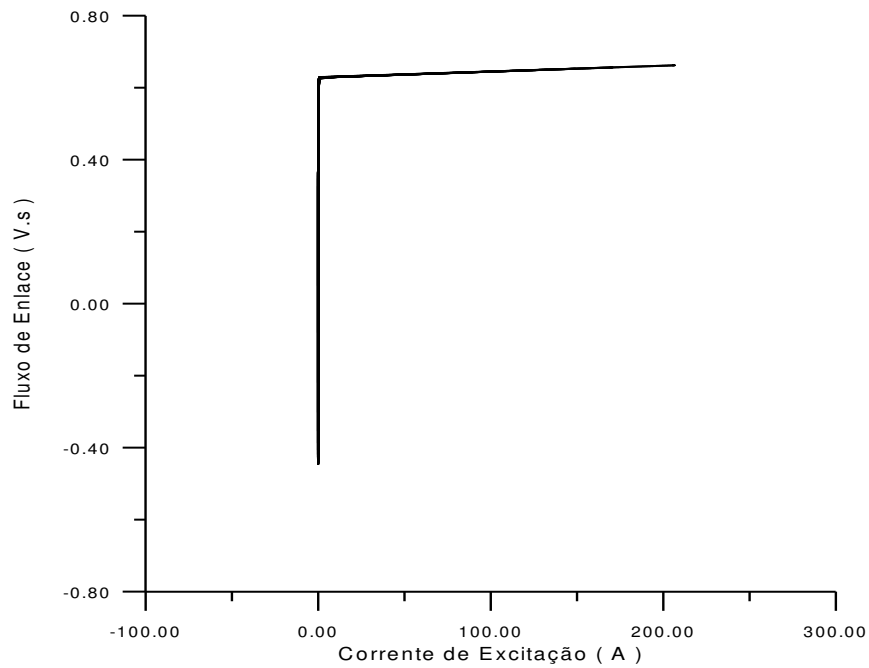
Figura 13 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$



Fonte: A própria autora

Devido ao alto grau de assimetria causada pela componente cc, a corrente de excitação atinge por volta de 220 A e quase de forma exponencial cai a valores próximos de zero à medida que o tempo aumenta.

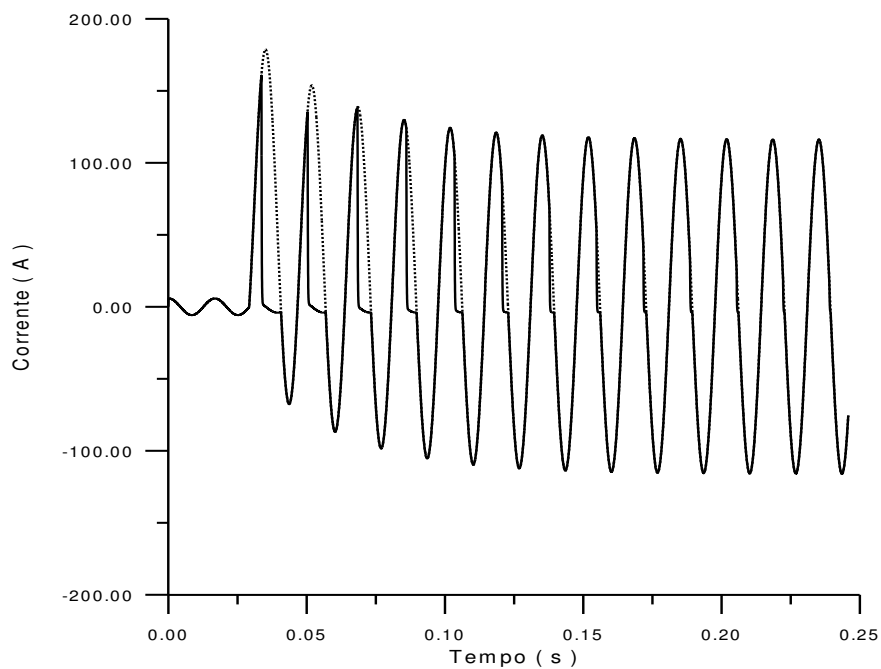
Figura 14 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$



Fonte: A própria autora

A curva de magnetização só possui valores positivos de excitação e valores inicialmente de -0,45 V.S, e entra em saturação a partir de um fluxo de enlace de aproximadamente 0,6 e assim permanece em saturação até a corrente de excitação alcançar valores de 200 A.

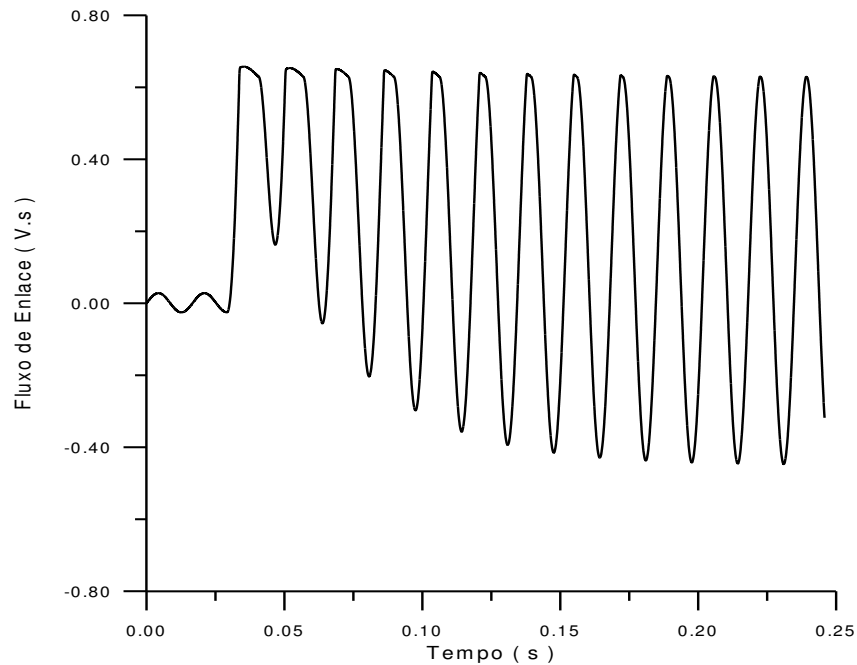
Figura 15 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 45^\circ$



Fonte: A própria autora

O aumento da angulação tornou a componente CC da corrente no primário menor e com isso a assimetria da corrente de curto-circuito tende a diminuir, os picos de corrente atingem agora aproximadamente 180 A.

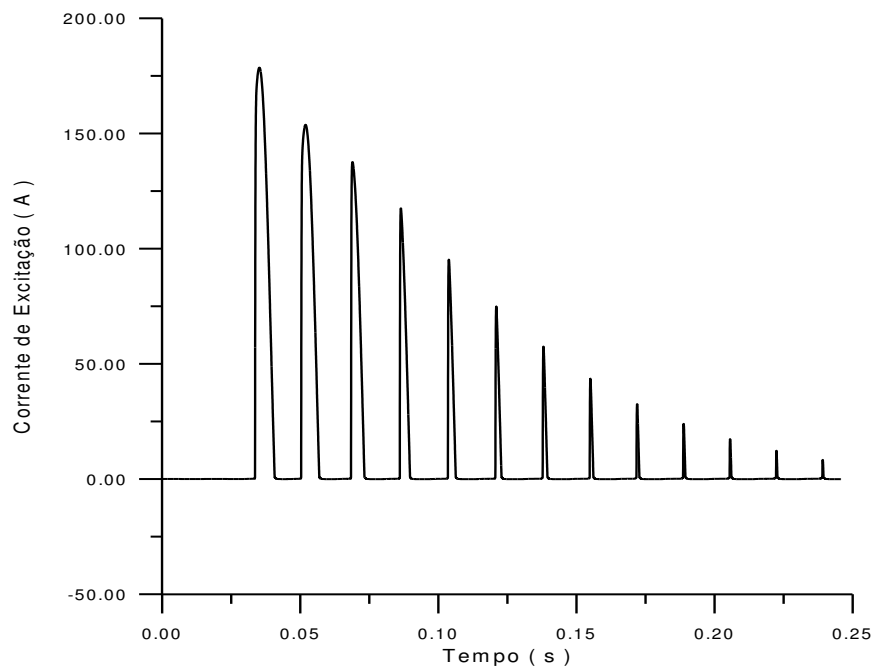
Figura 16 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 45^\circ$



Fonte: A própria autora

O comportamento gráfico é semelhante ao caso de $\theta = 0^\circ$, no entanto o valor de fluxo em para cada instante torna-se menor para o ângulo de $\theta = 45^\circ$.

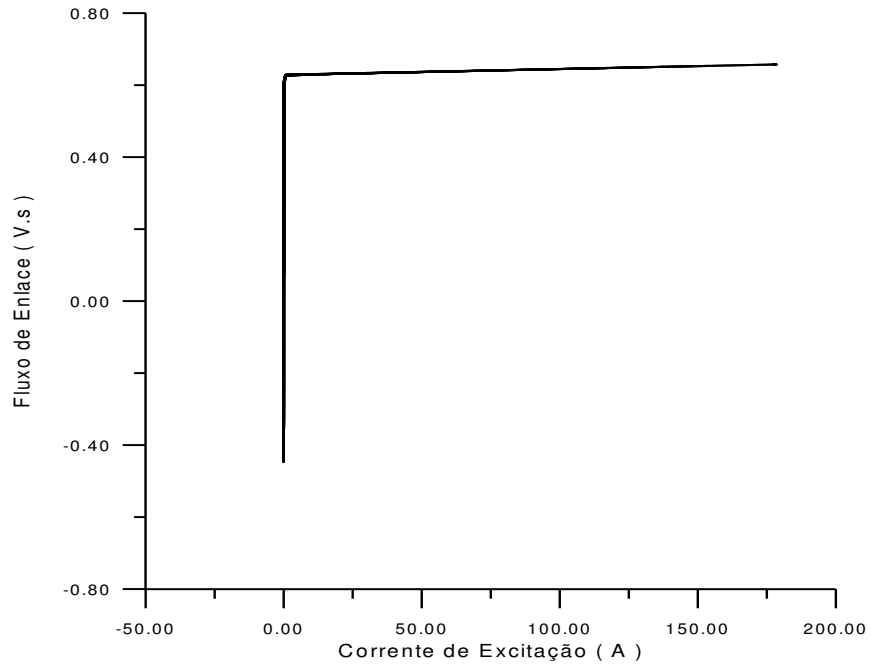
Figura 17 - Corrente de excitação - $\theta = 45^\circ$



Fonte: A própria autora

O efeito na amplitude dos picos é de caráter atenuador, no entanto a corrente de excitação permanece sendo apenas positiva.

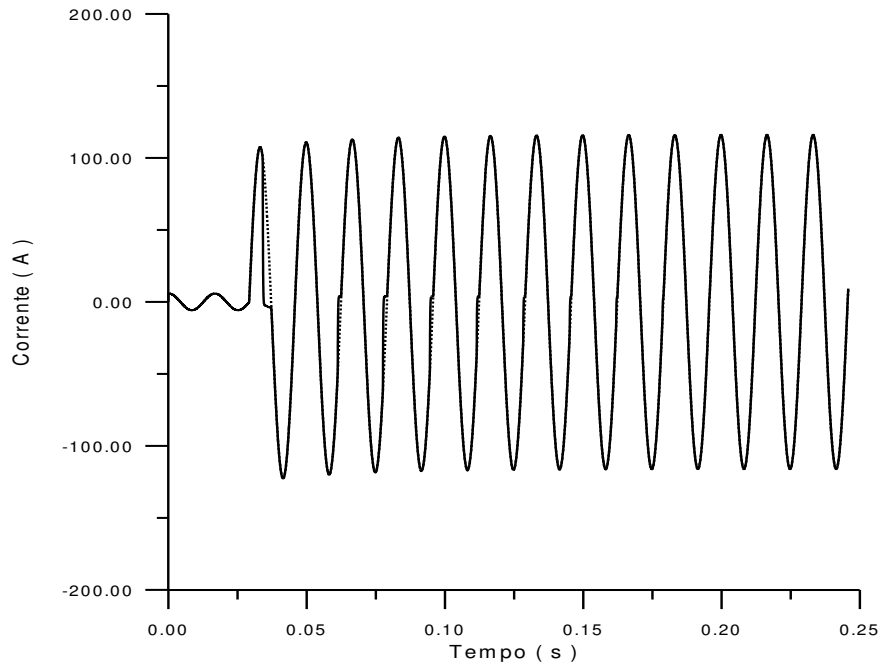
Figura 18 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 45^\circ$



Fonte: A própria autora

O valor de excitação para o qual o fluxo satura é semelhante ao caso $\theta = 0^\circ$, no entanto a corrente de excitação alcança aproximadamente 180 A.

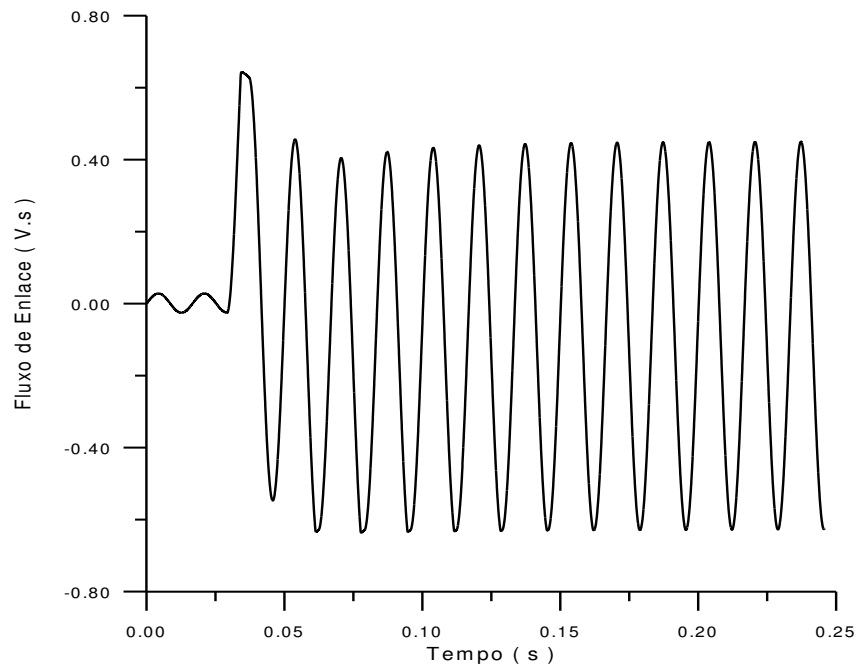
Figura 19 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 90^\circ$



Fonte: A própria autora

Este é o melhor caso, pois como $\theta = 90^\circ$ a componente CC é praticamente anulada da corrente primária, logo seu comportamento tende a ser simétrico e seus valores de pico não ultrapassam 125 A.

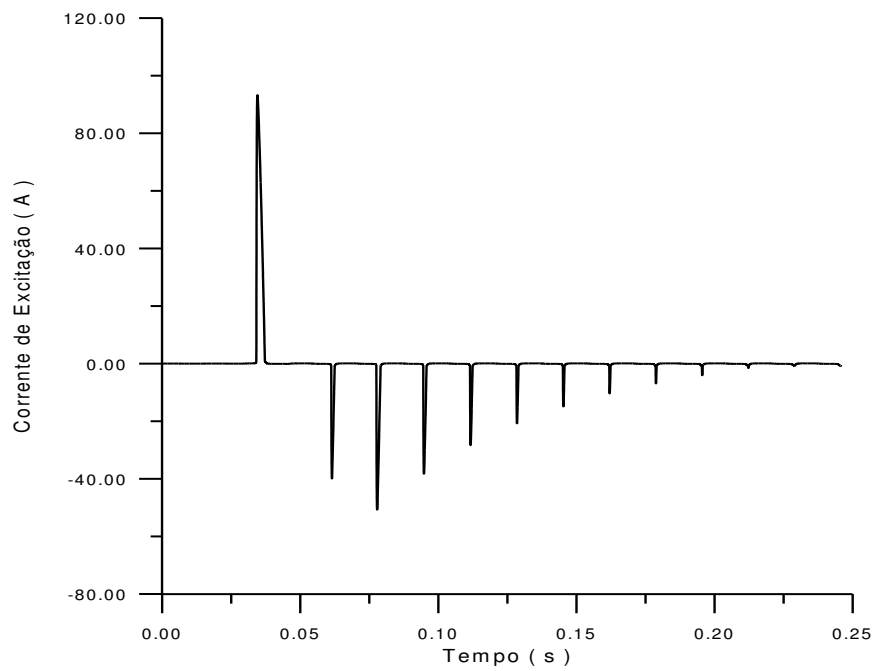
Figura 20 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 90^0$



Fonte: A própria autora

Nota-se o quanto, mesmo logo após o defeito, o fluxo tende a manter-se simétrico e como a amplitude dos picos logo atingem valores mais baixos que nos casos de $\theta = 0^0$ e $\theta = 45^0$ e se estabiliza.

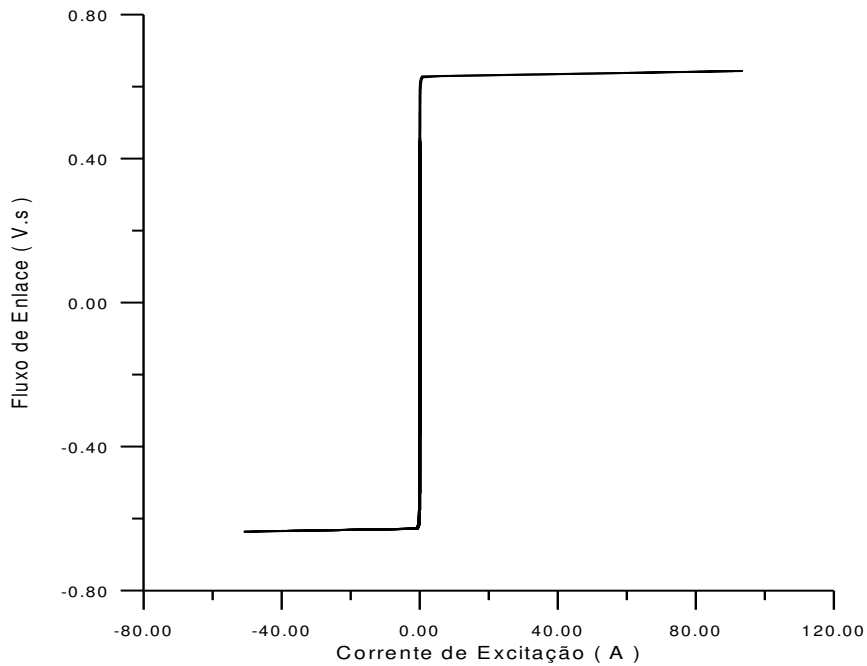
Figura 21 - Corrente de excitação - $\theta = 90^0$



Fonte: A própria autora

Neste caso observamos a corrente de excitação a partir de 0,05 segundos diminuir de forma quase exponencial sua corrente do negativo a quase 0, possuindo apenas um pico de maior amplitude positivo de aproximadamente 90A.

Figura 22 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação = 90°



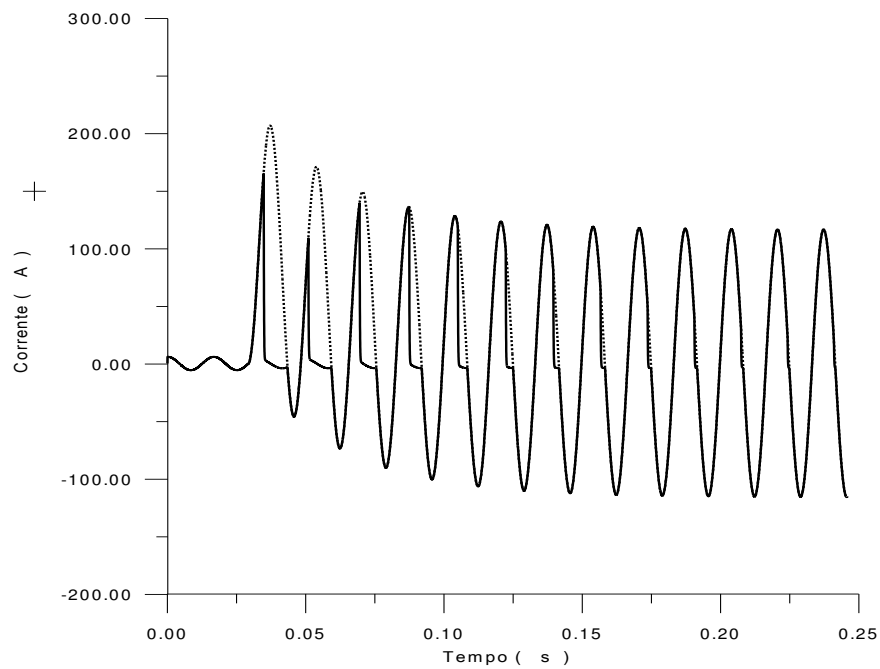
Fonte: A própria autora

Assim como podemos ver na figura 22 teremos a curva magnética de melhor simetria de todos os demais casos vistos neste cenário e que satura quando a corrente de excitação passa no zero com valor de aproximadamente 0,6 V.s e corrente de excitação que chega a valores de 90 A em saturação.

4.2. Cenário 2

Mantendo o ângulo de incidência em $\theta = 0^\circ$, e variando a impedância de carga, no primeiro caso em $R_s=178$ e $X_s=0$ obteremos os seguintes resultados:

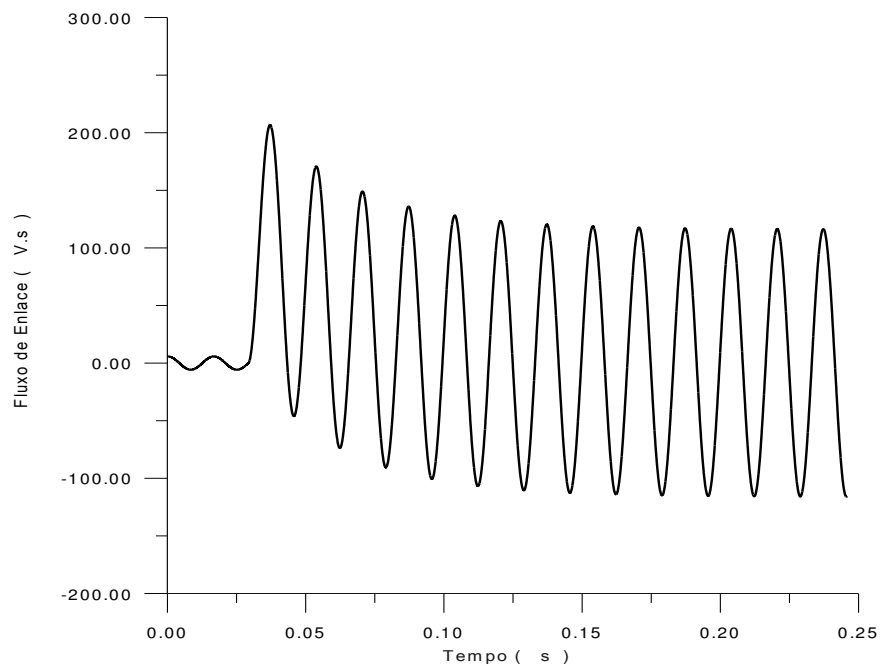
Figura 23 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado)- $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

A saturação ocorre neste caso, tanto causada pela componente CC como também pela componente CA, já que o valor de impedância da carga apresenta-se alto, ocasionando com isso uma distorção ainda maior na corrente I2.

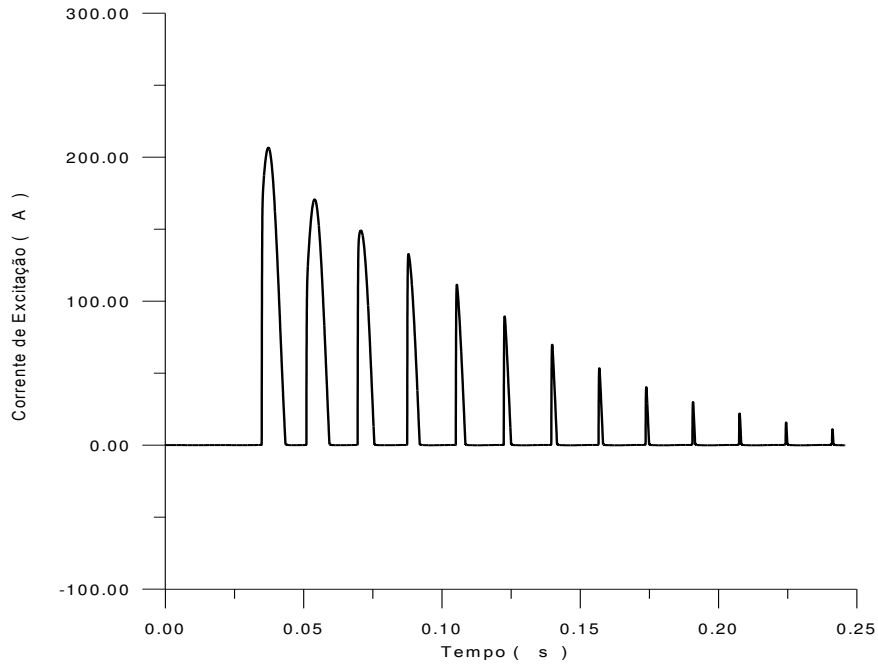
Figura 24 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

O fluxo de enlace terá um pico de aproximadamente 210 V.s, mas logo estabelece sua simetria em aproximadamente 125 V.s no tempo de 0,115 s.

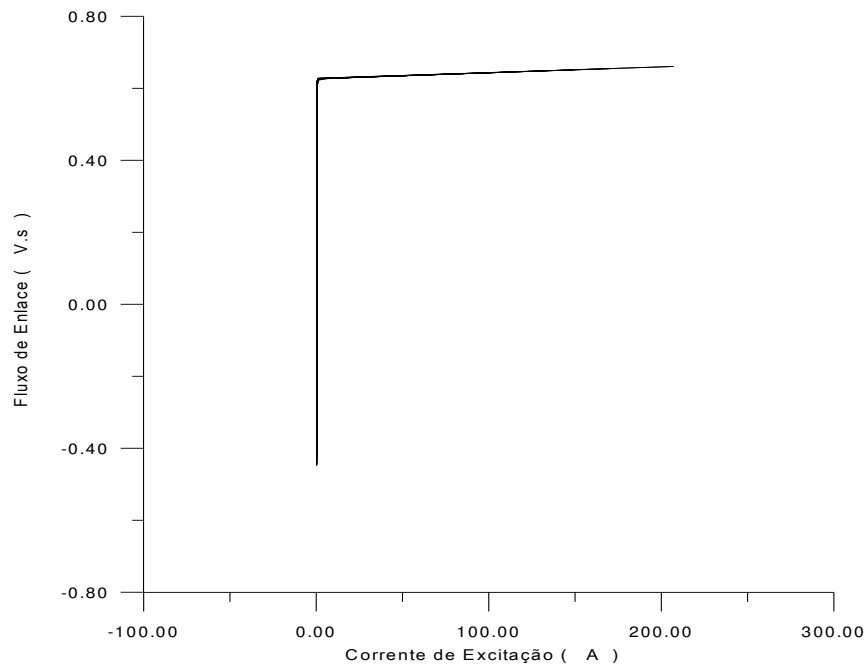
Figura 25 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

Nota-se elevados valores de corrente de excitação, atingindo valores de aproximadamente 225 A.

Figura 26 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ $R_s=178$ e $X_s=0$

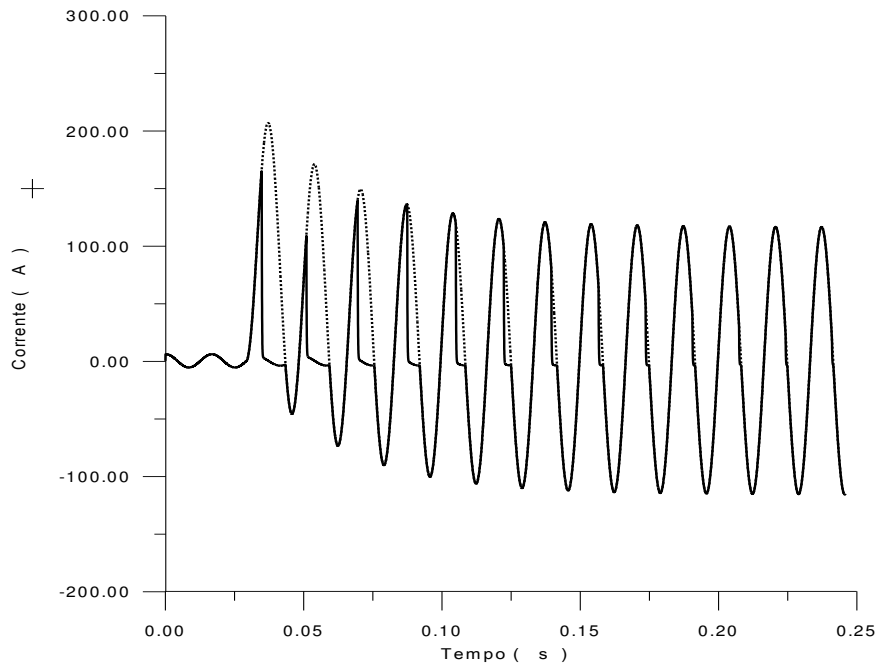


Fonte: A própria autora

Neste caso a saturação se inicia em valores 0,6 V.s e a curva de magnetização não possui valores negativos de corrente de excitação.

Caso 2- $\theta = 0^\circ$, $R_s=0,69$ e $X_s= 1$

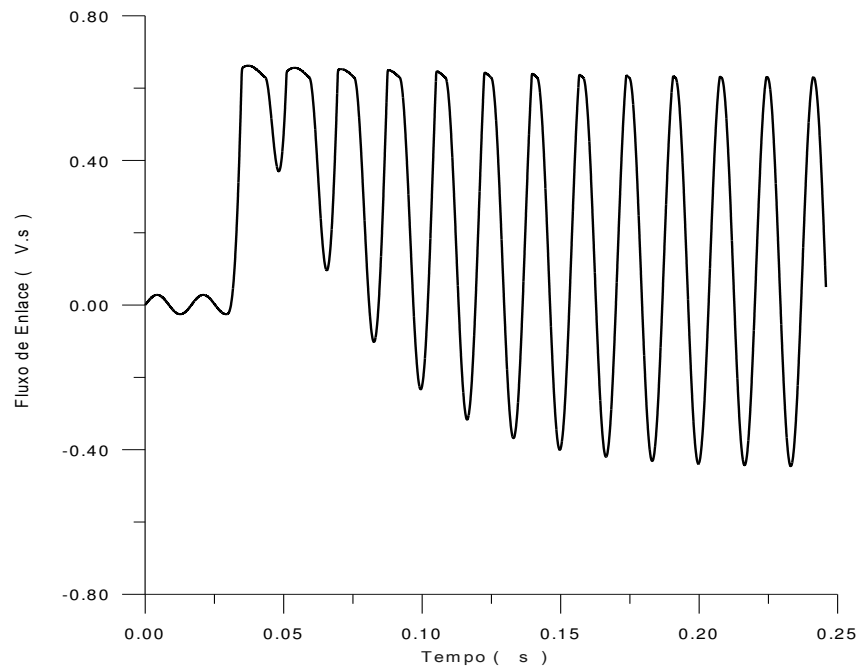
Figura 27 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$



Fonte: A própria autora

Por conter um alto valor de componente indutiva na impedância da carga, o comportamento da corrente no secundário pós saturação tende a se opor a uma variação abrupta, alcançando o zero de forma mais lenta.

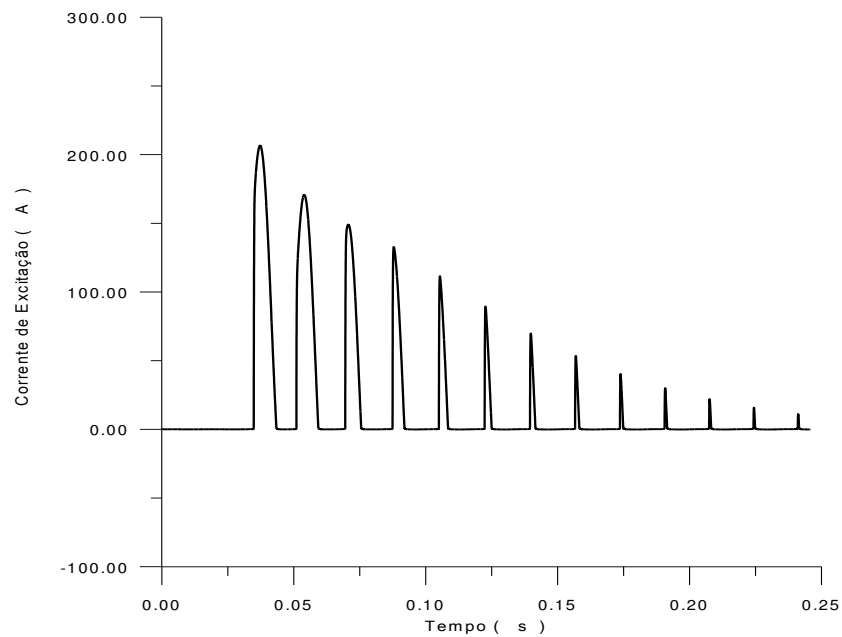
Figura 28 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$



Fonte: A própria autora

Nos primeiros ciclos o fluxo alcança valores altos e tão pouco simétricos que não passam pelo zero e mesmo ao longo do tempo seus valores de pico permanecem altos e em torno de 0.7 V.s.

Figura 29 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ e $R_s=0,69$ e $X_s= 1$

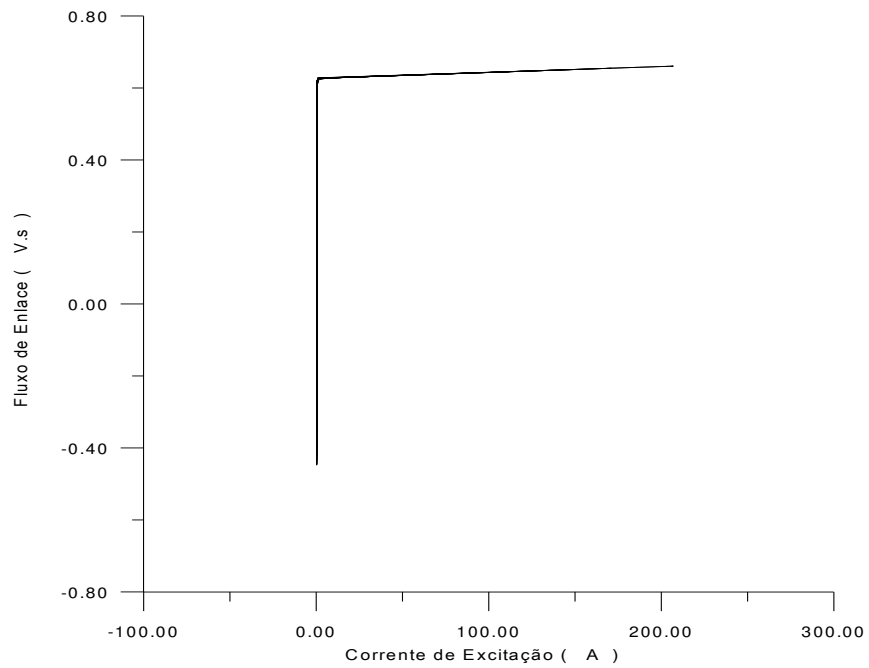


Fonte: A própria autora

A corrente de excitação cai exponencialmente ao longo do tempo ao passo que a saturação pela componente CC diminui.

Figura 30 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$ e

$$R_s=0,69 \text{ e } X_s= 1$$

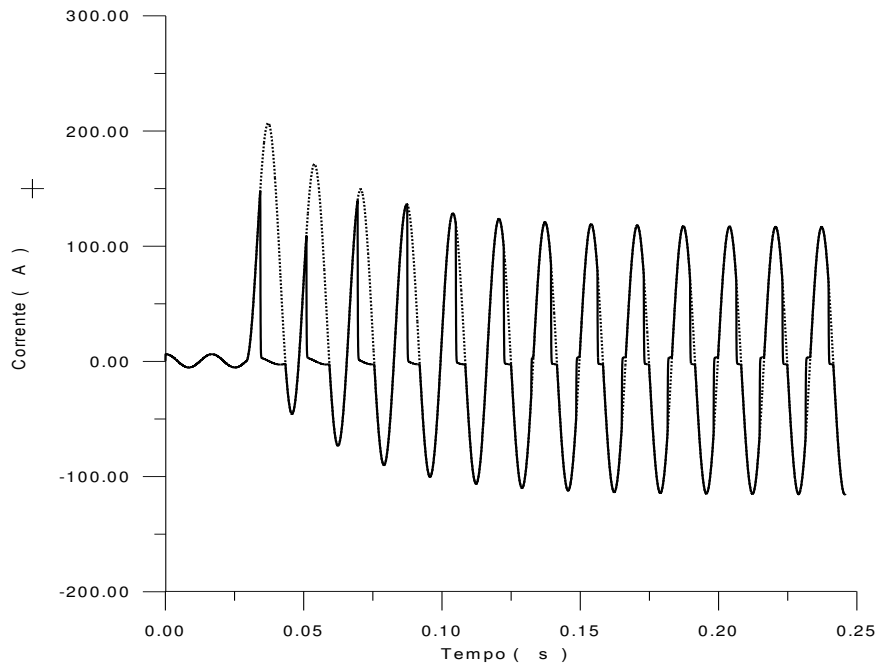


Fonte: A própria autora

A curva de saturação quase não se altera na presença de uma carga predominantemente indutiva.

Caso 3 - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s=0$

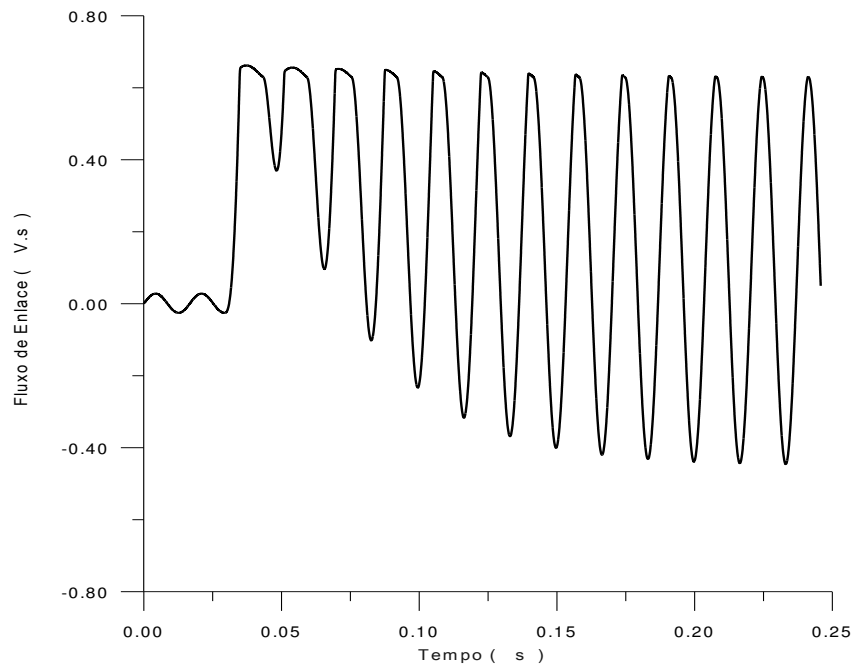
Figura 31 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s=0$



Fonte: O próprio autor

Nota-se que inicialmente há distorções acentuadas causadas pela saturação por duas componentes (CA/CC), mas ao passar do tempo apenas o efeito da saturação sob influência CA permanece devido a carga possuir alto valor de impedância.

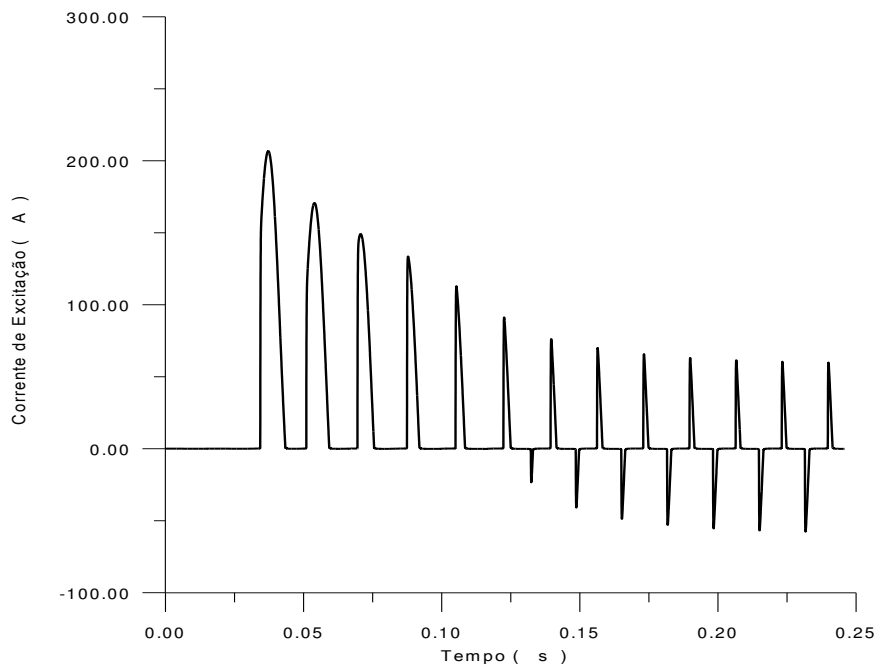
Figura 32 - Fluxo de enlace no secundário - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

Nos primeiros ciclos o fluxo possui elevados picos e formas altamente assimétricas pois não passam pelo zero e mesmo com o passar do tempo os elevados valores de amplitude se conservam.

Figura 33 - Corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$, $R_s=2,25$ e $X_s=0$

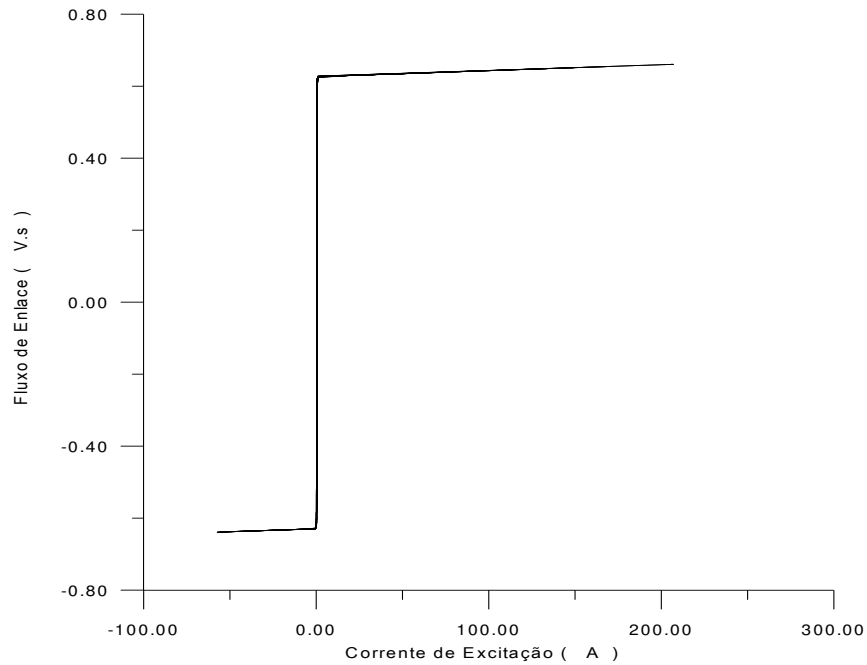


Fonte: A própria autora

A corrente de excitação ao ponto que a componente CC diminui sua influência sob a saturação passa a apresentar uma melhor simetria e amplitudes que não tendem a zero.

Figura 34 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$.

$$R_s=2,25 \text{ e } X_s=0$$



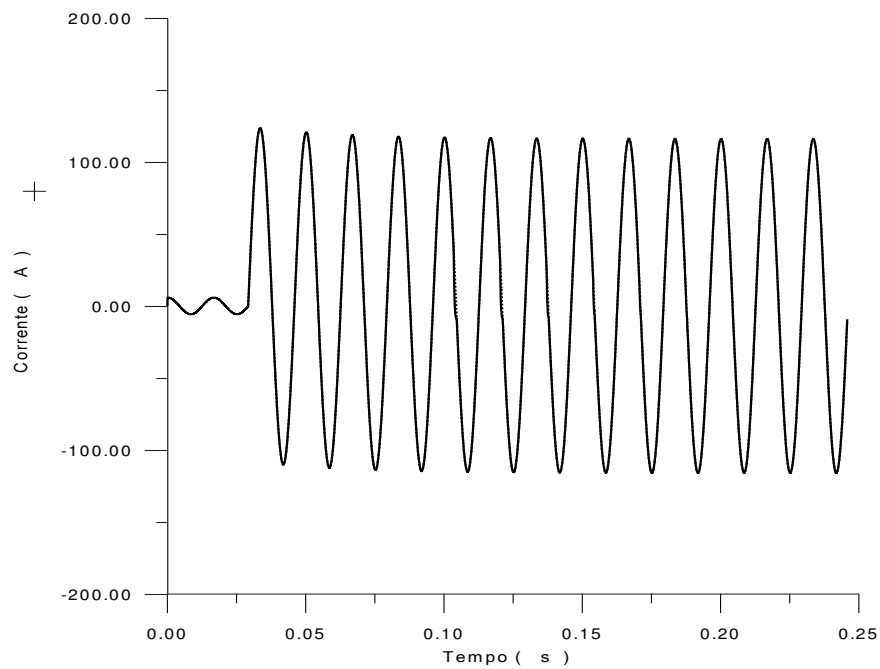
Fonte: A própria autora

A saturação ocorre a valores aproximadamente simétricos de fluxo de enlace em valores de (+ou-)0,61 V.s.

4.3. Cenário 3

Foram feitas as simulações com $\theta = 81^\circ$, $R_s=0,75$ e $X_s=0$ e $\theta = 82^\circ$, $R_s=0,75$ e $X_s=0$ a fim de compara-las em termos de corrente secundária e curvas de magnetização.

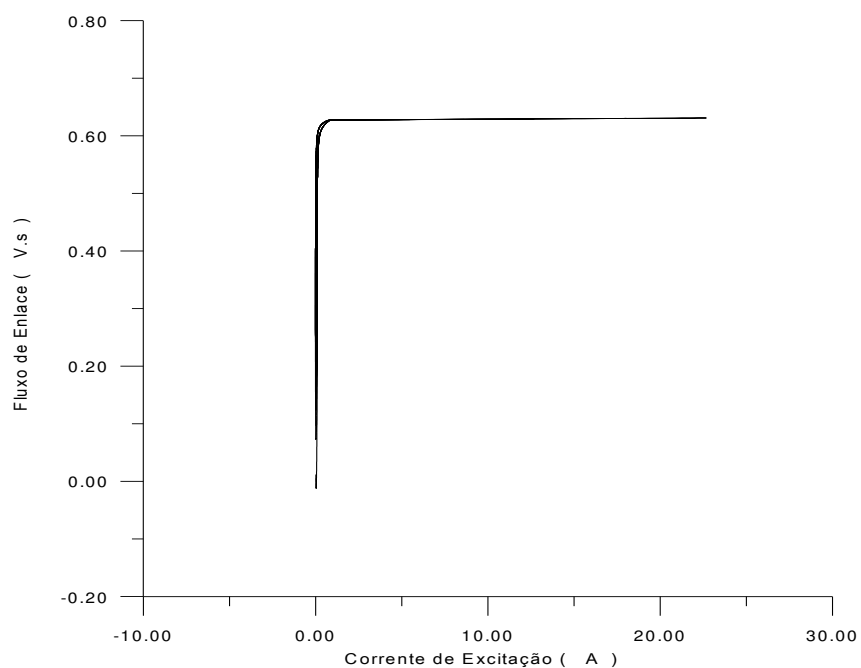
Figura 35 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 81^\circ$, $R_s=0,75$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

Podemos observar que há pouca distorção neste caso já que θ está próximo de 90° e a impedância da carga não é tão elevada, assim distorções devidas as componentes CA e CC são minimizadas.

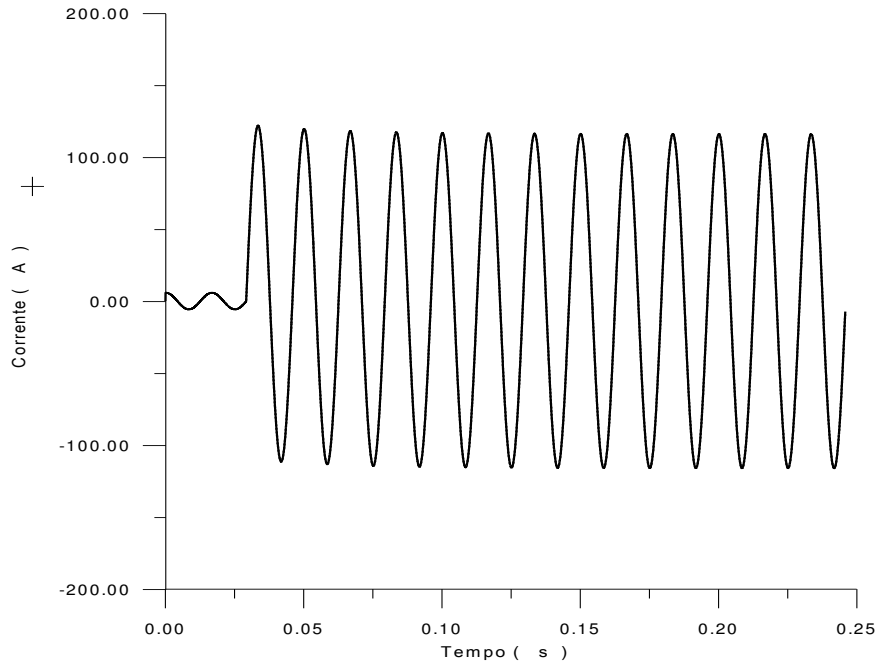
Figura 36 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 81^\circ$, $R_s=0,75$ e $X_s=0$



Fonte: A própria autora

A curva de magnetização satura em valores próximos de 0,65 V.s.

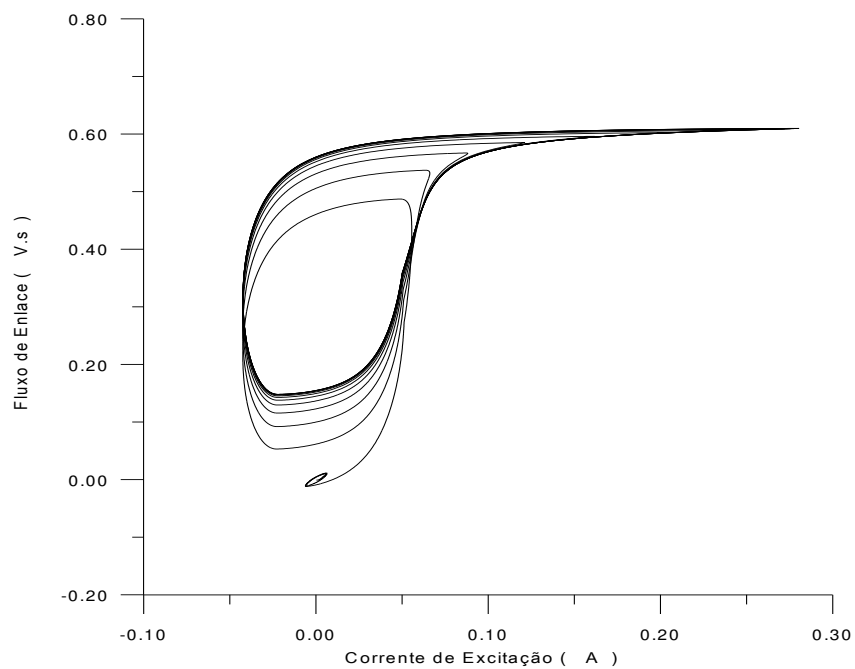
Figura 37 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 82^\circ$, $R_s = 0,75$ e $X_s = 0$



Fonte: A própria autora

Assim como a figura 39, a corrente secundária possui distorção mínima.

Figura 38 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 82^\circ$, $R_s = 0,75$ e $X_s = 0$



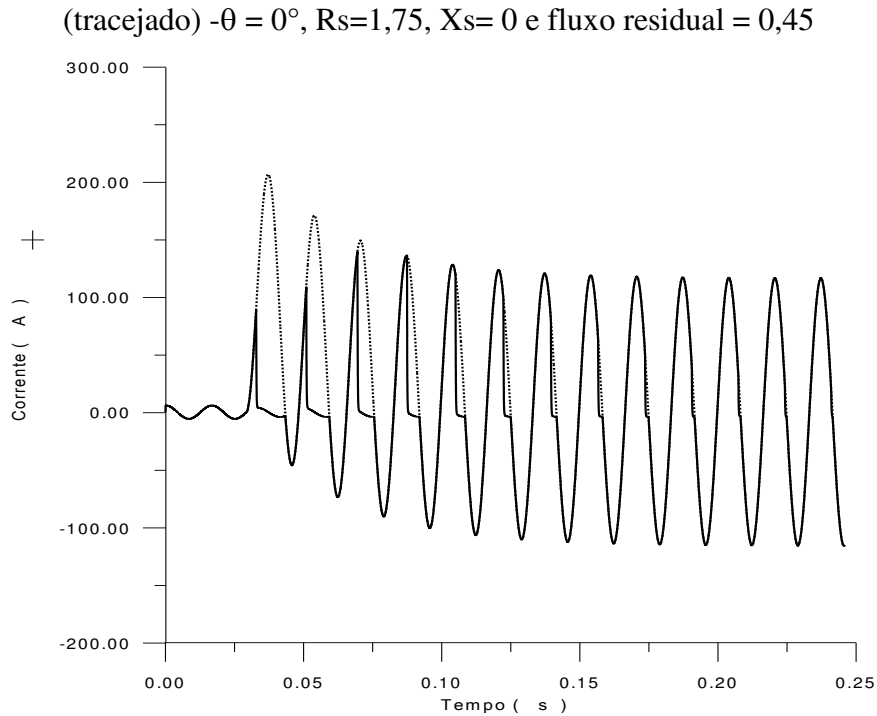
Fonte: A própria autora

Nota-se por tanto que o ângulo de 82° é um ângulo limite quanta a magnetização do núcleo e a formação do laço de histerese.

4.4. Cenário 4

Fazendo o fluxo residual = 0.45 V. s, teremos os seguintes resultados:

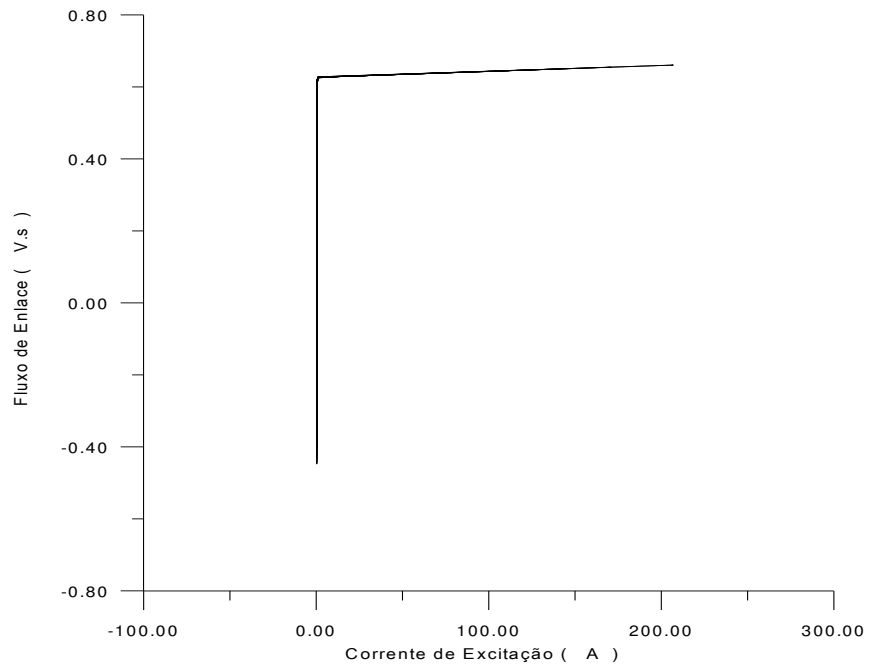
Figura 39 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida



Fonte: A própria autora

Neste caso a distorção da corrente no secundário torna-se mais elevada se comparado quando não temos a presença do fluxo residual.

Figura 40 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - sem religamento $-\theta = 0^\circ$, $R_s=1,75$, $X_s= 0$ e fluxo residual=0,45



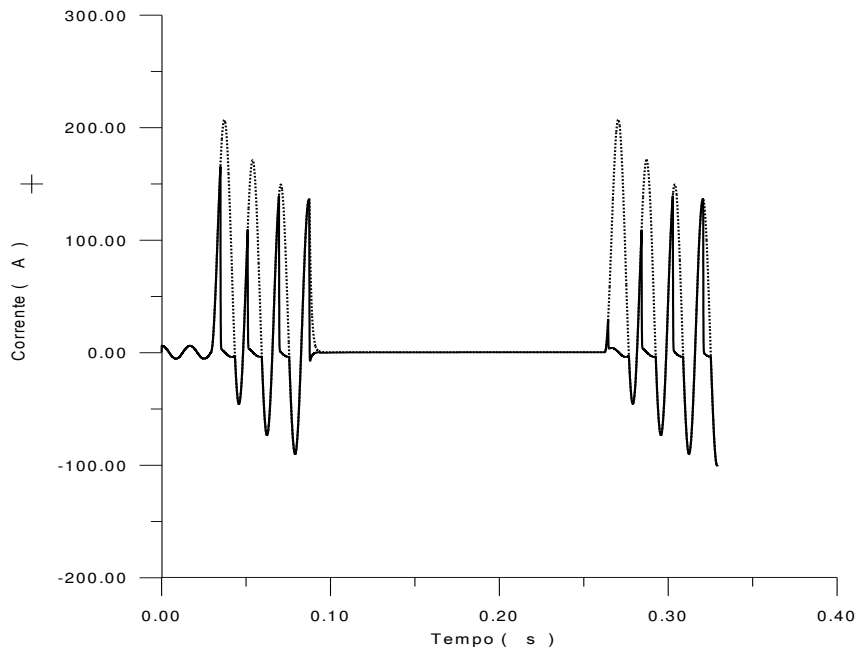
Fonte: A própria autora

A curva de magnetização é praticamente semelhante ao caso sem fluxo residual.

4.5. Cenário 5

Segue abaixo os resultados das simulações gráficas para os casos do sistema possuir religamento automático.

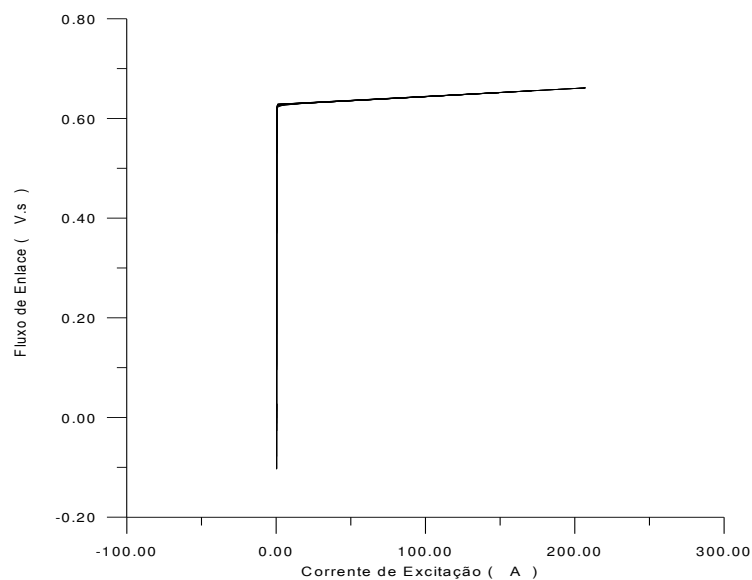
Figura 41 - Corrente secundária não distorcida (traço cheio); corrente secundária distorcida (tracejado) - $\theta = 0^\circ$, $R_s=1,75$, $X_s= 0$ com religamento.



Fonte: A própria autora

Pode-se observar a elevada distorção da corrente secundária em quase que 100% na primeira onda do ciclo pós religamento.

Figura 42 - Trajetórias no plano de fase fluxo de enlace-corrente de excitação - $\theta = 0^\circ$, $R_s=1,75$, $X_s= 0$ com religamento.



Fonte: A própria autora

A saturação se dá em níveis de fluxo de aproximadamente 0,65 V.s e inicia-se em valores mais baixos que no caso sem religamento e em valores em torno de 0,1 V.s.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho através de simulações gráficas baseadas no modelo de TELLINEN analisou o comportamento da saturação em TC'S de proteção face mudanças de impedâncias de carga no secundário do TC, assim como sobre a variação do ângulo de incidência de falta e o efeito da presença do fluxo residual.

A escolha do modelo que é pautado na trajetória simétrica descrita no plano (fluxo de enlace-corrente de magnetização) com o núcleo sendo levado a saturação, apresenta uma forma menos complexa quanto a formulação e a obtenção de dados de entrada além do mesmo expressar uma boa precisão.

A corrente secundária do TC, seu fluxo de enlace e corrente de excitação foram os parâmetros objetos do estudo e observou-se que a cada variação simulada resultados significativos como por exemplo a grande distorção na corrente do secundário causada pelo aumento da impedância na carga e como impedâncias predominantemente indutivas retardam a passagem a zero dessa corrente no instante da saturação.

As análises feitas no referido trabalho repercutem consequências importantes quanto ao projeto e dimensionamento de TC's de proteção pois é possível agora evitar problemas causadas pela saturação por exemplo que incorrem a má sensibilização dos relés de proteção ou ainda a localizadores de defeito que não fornecem indicação precisa e assim juntos tornam-se fatores que contribuem para que o sistema perca a estabilidade e seletividade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6856 Transformadores de Corrente - Especificação**. 1992.

FREIRE, F. C. S. **Desempenho de transformadores de corrente em regime não senoidal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande - PB. 2012.

GUERRA, F. C. F. **Modelos de Transformadores de Corrente para Estudos em baixas frequências**. Tese (Doutorado). COPELE / UFCG. Campina Grande – PB. 2007.

GUERRA, F. C. F. **Transformadores para Instrumentos**. Notas de Aula, DEE/UFCG. 2009.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos - 3ª. ed.** LTC, Rio de Janeiro – RJ. 2005.

SANTOS, E. **Métodos para correção das distorções a forma e onda secundária causa pela saturação de transformadores e correntes para serviço**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2011.

SCHETTINO, M. B. **Uma proposta para detecção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos núcleos dos transformadores de corrente utilizados em circuitos de proteção**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal De Juiz De Fora. Juiz De Fora - MG. 2012.

TELLINEN, J. A simple scalar model for magnetic hysteresis. **IEEE Transactions on 57 Magnetics**. Vol. 34, n. 4, p. 2200-2206. 1998.

TRANSFORMADOR de corrente tipo barra, **Minulight**, 2019. Disponível em : <<https://www.minulight.com.br/>>.Acessado em: 10 de outubro de 2019

TRANSFORMADOR de corrente tipo janela, **Rehtom**, 2019. Disponível em : <<http://www.rehtom.com.br/>>.Acessado em: 10 de outubro de 2019

TRANSFORMADOR de corrente tipo janela, **Brasiltec**, 2019. Disponível em : <<https://www.brasiltec.ind.br/>>.Acessado em: 10 de outubro de 2019