

MARIA BETANIA GAMA DOS SANTOS

TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA RELÉS DE PROTEÇÃO -
MODELAGEM E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO

Dissertação apresentada à Coordenação
de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento parcial às
exigências para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Wellington Santos Mota

Campina Grande - PB

Setembro de 1991



S237t

Santos, Maria Betania Gama dos

Transformadores de corrente para reles de protecao :
modelagem e analise do comportamento transitorio / Maria
Betania Gama dos Santos. - Campina Grande, 1991.

142 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

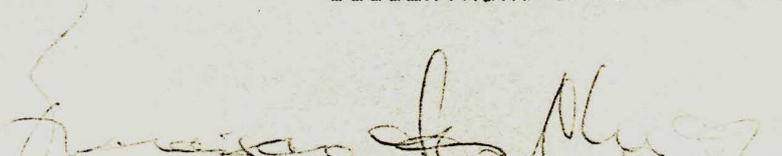
1. Sistema Eletrico de Potencia 2. Reles 3. Dissertacao
I. Guerra, Francisco das Chagas Fernandes, M.Sc. II. Mota,
Wellington Santos, Dr. III. Universidade Federal da Paraiba
- Campina Grande (PB)

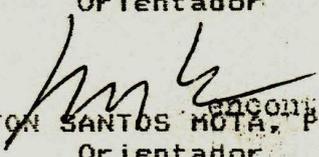
CDU 621.3.016.2(043)

TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA RELES DE PROTEÇÃO
MODELAGEM E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO

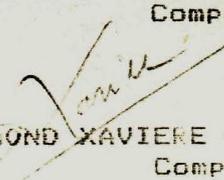
MARIA BETANIA GAMA DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25.09.91


FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, mestre, UFPB
Orientador


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFPB
Orientador


ANTONIO DO NASCIMENTO EPAMINONDAS, Mestre, UFPB
Componente da Banca


DRUMOND XAVIERE CAVALCANTI LIMA, Dr., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
SETEMBRO - 1991

A meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, pela excelente orientação, durante toda a execução deste trabalho.

Aos professores Edson Guedes da Costa e Antônio do Nascimento Epaminondas, pelos auxílios prestados na obtenção dos resultados finais.

Ao Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (GTZ), órgão de cooperação técnica internacional da República Federal da Alemanha, por todo o suporte instrumental necessário à realização deste trabalho.

À SIEMENS, pela gentileza do fornecimento dos dados do TC de 245 KV.

RESUMO

Esta pesquisa objetiva estudar o comportamento transitório dos transformadores de corrente destinados à proteção de sistemas elétricos. Neste trabalho são analisadas as distorções apresentadas pelas correntes secundárias, em 60 Hz, causadas pela operação do núcleo em regime saturado, por ocasião de defeitos que produzem altas correntes primárias, com elevados graus de assimetria.

Quatro modelos são apresentados para simulação digital, onde, por ordem de apresentação, o núcleo ferromagnético é representado com saturação; saturação e histerese; saturação, histerese e correntes parasitas, bem como saturação, histerese e entreferro. Tais modelos são usados para simular o desempenho de TC's em diferentes condições de operação no primário e no secundário, respectivamente.

Para fins de validação dos modelos analisados, alguns resultados obtidos através de simulação digital são comparados com aqueles obtidos mediante a utilização de um TC real e montagens com elementos de parâmetros concentrados, destinados a reproduzir os parâmetros de um sistema de potência real.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the transient performance of current transformers for electric systems protection purpose. An analyses of the distorsion presented by secondary current in 60 Hz caused by the operation of the core in saturated regime, because of the deffects which produces high primary currents, with an elevated grade of assimetry is performed.

Four models for digital simulation are presented, where for presentation order, the ferromagnetic core is represented with saturation; saturation and hysteresis; saturation, hysteresis and eddy currents as well saturation, hysteresis and air gap. These models are used to simulate the working of TC's in different conditions of operation at the primary and secondary respectively.

For the validation of the analysed models, some results obtained through digital simulation, were compared with those obtained by the utilization of a real TC and montage with elements of the concentrated parameters, in order to reproduce the parameters of a real power systems.

SIMBOLOGIA

A	Área da secção reta do núcleo
B	Densidade de campo magnético
B_m	Densidade máxima do fluxo senoidal
c	Espessura das lâminas do núcleo ferromagnético
H	Intensidade do campo magnético
i_a	Corrente de magnetização do entreferro
i_e	Corrente de perdas no ferro
i_m	Corrente de magnetização total
i_{m1}	Corrente de magnetização do ferro
I_0	Corrente primária no instante da falta
i_1	Corrente primária
I_1	Corrente primária simétrica de defeito (valor eficaz)
i_2	Corrente secundária
K_s	Fator de sobredimensionamento do núcleo do TC
l	Comprimento médio da trajetória magnética
L_s	Indutância equivalente da fonte
L_a	Indutância de magnetização do entreferro
L_m	Indutância de magnetização do ferro
L_L	Indutância da linha de transmissão
L_1	Indutância primária total
L_2	Indutância secundária total
N	Relação de espiras do TC (N_2/N_1)
N_1	Número de espiras no primário do TC
N_2	Número de espiras no secundário do TC
R_c	Resistência de perdas parasitas

R_e	Resistência equivalente de perdas dinâmicas
R_s	Resistência equivalente da fonte
R_L	Resistência da linha de transmissão
R_1	Resistência primária total
R_2	Resistência secundária total
t_s	Tempo de saturação
T_1	Constante de tempo do sistema primário
T_2	Constante de tempo do sistema secundário
u	Tensão da fonte
U_m	Valor de pico da tensão primária
U_s	Tensão do ponto de joelho
u_2	Tensão de excitação secundária
U_2	Tensão de excitação secundária (valor eficaz)
\hat{Z}_1	Impedância primária total
\hat{Z}_2	Impedância secundária total
α	Ângulo de fase de \hat{Z}_1
ϕ	Ângulo de fase da tensão da fonte ou ângulo de chaveamento
λ	Fluxo magnético concatenado ou de enlace
λ_s	Valor do fluxo no ponto de saturação
μ	Permeabilidade magnética do núcleo
μ_0	Permeabilidade magnética do ar
ρ	Resistividade do ferro Silício
ω	Frequência angular
θ	Ângulo de fase de \hat{Z}_2

* todas as unidades são expressas no Sistema Internacional

SUMÁRIO

1	Introdução	
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Revisão de Trabalhos Anteriores	3
1.3	Motivação e Objetivo do Trabalho	5
1.4	Contéudo dos Capítulos Subsequentes	7
2	Análise Simplificada do Comportamento Transitório dos TC's de Proteção	
2.1	Introdução	9
2.2	Corrente Transitória Primária	9
2.3	Modelo Simplificado de TC	11
2.3.1	Generalidades	11
2.3.2	Análise sem Consideração do Regime Saturado	13
2.3.3	Análise Levando em Consideração o Regime Saturado	19
2.3.4	Influência da Carga Secundária no Comportamento Transitório dos TC's	24
2.4	Comentários	26
3	Modelagem de TC's de Proteção para Cálculo Computacional de Transitórios	
3.1	Introdução	27

3.2	Modelo A - Núcleo com Saturação	28
3.2.1	Circuito Equivalente e Equações Básicas	28
3.2.2	Representação da Curva Normal de Magnetização	29
3.3	Modelo B - Núcleo com Saturação e Histerese	38
3.3.1	Circuito Equivalente e Equações Básicas	38
3.4	Modelo C - Núcleo com Saturação, Histerese e Correntes Parasitas	46
3.4.1	Circuito Equivalente e Equações Básicas	46
3.4.2	Perdas Parasíticas - Análise Clássica	47
3.4.3	Perdas Anômalas	48
3.4.4	Influência das Perdas Dinâmicas na Histerese	50
3.4.5	Determinação da Resistência de Perdas Dinâmicas	51
3.5	Modelo D - Núcleo com Saturação, Histerese e Entreferro	58
3.5.1	Circuito Equivalente e Equações Básicas	58
3.6	Comentários	61
4	Descrição do Trabalho Experimental	
4.1	Introdução	63
4.2	Levantamento da Curva de Saturação do TC	63
4.3	Obtenção da Resistência de Perdas Dinâmicas	64
4.4	Obtenção do Ciclo Limite de Histerese	66
4.5	Obtenção dos Oscilogramas das Correntes Secundárias Distorcidas	67

4.6	Instrumentação Usada	71
4.7	Comentários	72
5	Resultados Obtidos	
5.1	Introdução	73
5.2	Simulações Considerando Diferentes Modelos	74
5.2.1	Modelo A - Núcleo com Saturação	74
5.2.2	Modelo B - Núcleo com Saturação e Histerese	75
5.2.3	Modelo C - Núcleo com Saturação, Histerese e Correntes Parasitas	76
5.2.4	Considerações sobre modelagem de núcleos Ferromagnéticos de TC's sem Entreferro	77
5.3	Simulações Considerando Diferentes Condições de Operação	79
5.3.1	Generalidades	79
5.3.2	Relação X/R da Carga Secundária	79
5.3.3	Módulo da Impedância Secundária	80
5.3.4	Constante de Tempo do Sistema Primário	81
5.3.5	Ângulo de Chaveamento	82
5.3.6	Fluxo Residual no Núcleo	83
5.4	Simulações Considerando-se a Influência de Entreferros no Núcleo do TC	83
5.5	Determinação dos Tempos de Saturação	86

6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	
6.1	Conclusões	130
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	132
	Referências Bibliográficas	133
	Apêndice: Aspectos Relativos ao Projeto de TC's para Desempenho em Regime Transitório	140
1.	Introdução	140
2.	TC's da Classe TPX	140
3.	TC's da Classe TPY	141
4.	TC's da Classe TPZ	141
5.	Comentários	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação simplificada do sistema primário	10
Figura 2.2	TC de proteção e circuito equivalente simplificado	11
Figura 2.3	Curva de saturação linearizada por partes	12
Figura 2.4	Variação do fluxo total sem considerar a saturação	17
Figura 2.5	Correntes primária, secundária e fluxo considerando a saturação	19
Figura 2.6	Curva de excitação secundária com ponto de joelho indicado	20
Figura 2.7	Família de curvas para determinação de T_s ($T_1 = 0.04$ s)	23
Figura 2.8	Operação de um TC com secundário em aberto	25
Figura 3.1	Circuito equivalente de TC - Modelo A	28
Figura 3.2	Curva normal de magnetização típica de um TC de proteção	30
Figura 3.3	Ciclo limite e famílias de trajetórias	

ascendentes e descendentes	40
Figura 3.4 Trajetória descendente e ascendente para um mesmo nível de distribuição de correntes parasitas no núcleo	42
Figura 3.5 Geração de trajetórias assimétricas	43
Figura 3.6 Fluxograma simplificado para o cálculo de i_m considerando a histerese	45
Figura 3.7 Circuito equivalente de um TC - Modelo C	46
Figura 3.8 Perdas totais por ciclo versus frequência	49
Figura 3.9 Influência das perdas dinâmicas na histerese	51
Figura 3.10 Montagem para determinação do resistor de perdas R_e	53
Figura 3.11 Contornos referentes à Fig 3.10	54
Figura 3.12 Gráfico interpretativo do cálculo de R_e pelo método de SWIFT (1971)	56
Figura 3.13 Método de cálculo de R_e proposto por BAPTISTA (1982)	57

Figura 3.14 Núcleo magnético com entreferro	58
Figura 3.15 Característica resultante de $\lambda \times i_m$ de um núcleo ferromagnético com entreferro (c), obtida a partir das características $B \times H_m$ do ferro (a) e $B \times H_a$, do ar (b)	59
Figura 3.16 Circuito equivalente de um TC com entreferro considerando saturação e histerese	60
Figura 4.1 Montagem para obtenção da curva de saturação	64
Figura 4.2 Circuito utilizado na obtenção dos ciclos de histerese à 60 Hz e 120 Hz	65
Figura 4.3 Montagem para obtenção do ciclo limite de histerese	67
Figura 4.4 Montagem utilizada para a obtenção dos oscilogramas das correntes secundárias distorcidas	69
Figura 4.5 Descrição do funcionamento do circuito da Fig. 4.4	70

Figura 5.1 Curva de saturação do TC de modelo reduzido	88
Figura 5.2 Curva de excitação do TC de modelo reduzido	88
Figura 5.3 Correntes primária e secundária - núcleo com saturação	89
Figura 5.4 Corrente de magnetização - núcleo com saturação	90
Figura 5.5 Fluxo de histerese em 60 Hz - núcleo com saturação	91
Figura 5.6 Laço de histerese em 60 Hz - Não compensado	92
Figura 5.7 Trajetórias assimétricas típicas da operação do núcleo em regime transitório	92
Figura 5.8 Detalhe da Fig 5.7 - Trajetórias assimétricas contidas no ciclo limite	92
Figura 5.9 Correntes primária e secundária - núcleo com saturação e histerese	94
Figura 5.10 Corrente de magnetização - núcleo com	

saturação e histerese	95
Figura 5.11 Fluxo de enlace secundária - núcleo com saturação e histerese	96
Figura 5.12 Trajetórias assimétricas no caso de saturação menos intensa que a mostrada na Fig. 5.7.	97
Figura 5.13 Caso base ($\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 0^\circ \Omega$)	98
Figura 5.14 Influência da relação X/R da carga secundária - $\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 32.2^\circ \Omega$	99
Figura 5.15 Influência da relação X/R da carga secundária - $\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 57^\circ \Omega$	100
Figura 5.16 Influência do módulo da impedância secundária - $\hat{Z}_2 = 1.50 \angle 0^\circ \Omega$	101
Figura 5.17 Influência do módulo da impedância secundária - $\hat{Z}_2 = 0.70 \angle 0^\circ \Omega$	102
Figura 5.18 Influência do módulo da impedância secundária - $\hat{Z}_2 = 0.60 \angle 0^\circ \Omega$	103

Figura 5.19	Influência da constante de tempo do sistema primário - $T_1 = 6.2$ ms	104
Figura 5.20	Influência da constante de tempo do sistema primário - $T_1 = 5.0$ ms	105
Figura 5.21	Influência da constante de tempo do sistema primário - $T_1 = 3.8$ ms	106
Figura 5.22	Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 30^\circ$	107
Figura 5.23	Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 60^\circ$	108
Figura 5.24	Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 90^\circ$	109
Figura 5.25	Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 120^\circ$	110
Figura 5.26	Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 150^\circ$	111
Figura 5.27	Influência do fluxo residual no núcleo -	

$\lambda(0) = 30\% \lambda_s$	112
Figura 5.28 Influência do fluxo residual no núcleo - $\lambda(0) = 50\% \lambda_s$	113
Figura 5.29 Influência do fluxo residual no núcleo - $\lambda(0) = 80\% \lambda_s$	114
Figura 5.30 Influência do fluxo residual - Religamento automático correntes primária e secundária superpostas	115
Figura 5.31 Influência do fluxo residual - Religamento automático fluxo de enlace	116
Figura 5.32 Religamento automático - TC de 245 KV sem entreferro fluxo de enlace	117
Figura 5.33 Religamento automático - TC de 245 KV sem entreferro correntes primária e secundária superposta	118
Figura 5.34 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 2.5 mm - fluxo de enlace	119

Figura 5.35 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 2.5 mm - correntes primária e secundária superposta	120
Figura 5.36 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 10 mm - fluxo de enlace	121
Figura 5.37 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 10 mm - correntes primária e secundária superposta	122
Figura 5.38 Caso 1	123
Figura 5.39 Caso 3	124
Figura 5.40 Caso 6	125
Figura 5.41 Caso 7	126
Figura 5.42 Caso 10	127
Figura 5.43 Caso 12	128
Figura 5.44 Caso 15	129

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização de transformadores de corrente com núcleo de ferro nos sistemas de proteção de usinas e redes de energia elétrica tem sido feita há cerca de um século, com pleno sucesso. Entretanto, ao longo dos anos, tornou-se necessário efetuar-se sucessivas modificações no projeto desses dispositivos, face à contínua evolução dos sistemas elétricos de potência. Nos modernos sistemas de alta e extra-alta tensão, as necessidades de transmissão de blocos de potência cada vez maiores implicam em:

- a. Aumento das correntes de curto-circuito.
- b. Necessidade de eliminação mais rápida das faltas.
- c. Requisitos de confiabilidade mais rígidos.

Isto exige que, durante a ocorrência de um defeito, os relés devam ser corretamente sensibilizados, mesmo considerando as situações mais adversas.

As correntes de falta apresentam duas componentes: uma alternada, senoidal, e outra contínua, com decréscimo exponencial, a qual pode levar o núcleo do transformador de corrente (TC) a uma saturação forte, distorcendo de forma acentuada a corrente

secundária fornecida ao relé durante os primeiros ciclos. Com isto, podem surgir três problemas:

a. Os relés são sensibilizados quando não deveriam ser, devido à superposição do fluxo associado à corrente de defeito com o fluxo remanescente no núcleo.

b. Os relés não são sensibilizados quando deveriam ser, devido à forte saturação e distorção que reduz o valor eficaz da corrente secundária.

c. Os relés não são sensibilizados com a rapidez suficiente, pelo mesmo motivo anterior.

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

Face ao exposto, o comportamento transitório dos TC's deve necessariamente ser matéria de conhecimento do engenheiro de proteção. Além do mais, com o advento da digitalização das subestações e usinas, toda a teoria de processamento digital de sinais tornou-se aplicável à proteção dos sistemas elétricos, tendo as citadas distorções nas correntes secundárias dos TC's assumido importância crítica.

1.2 REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES.

A primeira publicação relacionada ao estudo do desempenho dos TC's em regime transitório foi feita por MARSHALL e LANNGUTH (1929). Pouco mais de uma década após, WENTZ e SONNEMANN (1940) estudaram os efeitos causados pela assimetria das correntes de defeito e sua influência no desempenho dos TC's empregados nos esquemas de proteção diferencial. SEELEY (1943) realizou investigações acerca da influência do fluxo residual nos esquemas de proteção citados. SOHIER (1966) foi mais além, apresentando um desenvolvimento teórico baseado num modelo linearizado. Além disso, o autor deduziu uma expressão para o cálculo aproximado do tempo que o TC leva para saturar, a partir do instante de ocorrência de um defeito. WIZSNIEWSKY (1972) e SMOLINSKY (1973) apresentaram sugestões para o projeto dos TC's com o objetivo de melhorar o desempenho dos mesmos em regime transitório. KORPONAY (1978) estabeleceu uma análise comparativa acerca de três diferentes formas não-convencionais de projeto de TC's, com o mesmo objetivo.

O "Institute of Electrical and Electronics Engineers" (IEEE, 1976), através de um grupo de estudos, publicou um relatório no qual foram resumidos os principais aspectos relacionados ao comportamento transitório dos TC's, além de serem apresentadas importantes considerações acerca da influência desses transitórios em diferentes esquemas de proteção. A partir de um modelo linearizado, foi encontrada uma solução analítica que permitiu o

estabelecimento de um conjunto de curvas destinadas à obtenção gráfica dos tempos de saturação.

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

A consideração da não-linearidade do núcleo somente tornou-se praticável a partir da utilização do computador. Com este recurso, as características de magnetização dos TC's puderam ser representadas com maior exatidão. Funções dos mais diferentes tipos e graus de precisão foram usadas para representar a curva fluxo X corrente de magnetização dos núcleos ferromagnéticos (KRISHNAMOORTHY e VENUGOPAL, 1974; PEREIRA e MARTINEZ, 1984; MARIOTTO, 1986).

O efeito de histerese foi considerado por WRIGHT e CARNEIRO (1974), WIZSNIEWSKY (1978), bem como CONRAD e OEDING (1987). Isto permitiu uma melhor avaliação teórica dos efeitos do fluxo residual no núcleo sobre o desempenho transitório dos TC's. Nos dois primeiros trabalhos, são sugeridos métodos relativamente simples e de precisão razoável. No terceiro, a precisão é bastante maior, sendo a histerese representada através de um sofisticado algoritmo. Além disso, é proposto um método de correção em tempo real da corrente secundária distorcida, mediante equipamento microprocessado.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO

Após verificação nas bibliografias mais completas relacionadas a este tema, nota-se que não são comuns trabalhos nos quais sejam representados todos os efeitos característicos da operação de núcleos ferromagnéticos em corrente alternada.

É importante observar a influência do efeito de histerese no grau de distorção da corrente secundária. A consideração deste efeito também torna possível avaliar os efeitos do fluxo residual no núcleo do TC, o que é muito importante no caso dos TC's sem entreferro, especialmente se os mesmos forem empregados em esquemas com religamento automático. A influência de entreferros com diferentes comprimentos na redução do fluxo residual do núcleo é um ponto que também merece ser avaliado.

A necessidade de representação do efeito das correntes parasitas no núcleo deve ser investigada. Ainda que os transitórios analisados neste trabalho sejam de frequência baixa, é importante avaliar a magnitude do erro cometido ao se desprezar tal efeito.

Um outro ponto a ser considerado refere-se a outros fatores, relacionados, por exemplo, ao sistema primário e à carga secundária.

Face ao exposto, sentiu-se a necessidade de realizar um aprofundamento no estudo do comportamento transitório dos TC's de proteção, sendo isto feito através de:

- Consideração de modelos para simulação digital mais

completos que aqueles usualmente relatados na bibliografia existente.

- Consideração de uma maior variedade de condições de serviço.

Nos modelos analisados, em ordem crescente de complexidade, serão representados os seguintes efeitos:

- Saturação.
- Saturação e histerese.
- Saturação, histerese e correntes parasitas.
- Saturação, histerese e entreferro.

Nas condições de serviço analisadas, serão levados em consideração os seguintes itens:

- Módulo da impedância e constante de tempo primárias.
- Módulo da impedância e constante de tempo secundárias.
- Valor do ângulo de fase da tensão no ponto de instalação do TC no instante do curto-circuito.
- Valor do fluxo residual no instante do curto-circuito.
- Religamento automático.

Para fins de validação dos modelos aqui analisados, alguns resultados obtidos através de simulação digital serão comparados com aqueles obtidos em laboratório, mediante montagens utilizando elementos de parâmetros concentrados, destinados a reproduzir os parâmetros do sistema real.

1.4 CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS SUBSEQUENTES.

Os demais capítulos deste trabalho são brevemente descritos a seguir.

CAPÍTULO II: ANÁLISE SIMPLIFICADA DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS TC'S DE PROTEÇÃO.

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

CAPÍTULO III: MODELAGEM DE TC'S DE PROTEÇÃO PARA O CÁLCULO COMPUTACIONAL DE TRANSITÓRIOS.

Modelos destinados à simulação digital do comportamento transitório dos TC's são descritos, considerando-se os efeitos de saturação, histerese, correntes parasitas e entreferros. Importantes aspectos físicos, relacionados às perdas no núcleo, são comentados.

CAPÍTULO IV: DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

O instrumental, as montagens e os procedimentos utilizados nos testes realizados em laboratórios, destinados à validação dos resultados calculados por computador, são descritos.

CAPÍTULO V: RESULTADOS OBTIDOS.

Os resultados obtidos através da simulação digital e do modelo analógico montado em laboratório são apresentados. Uma

comparação entre os mesmos é estabelecida, justificando-se as eventuais discrepâncias.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.

As conclusões finais do trabalho são apresentadas, sugerindo-se também alguns estudos adicionais a serem realizados neste campo. Com isto, visa-se a obtenção de resultados mais precisos que aqueles aqui alcançados. Também deseja-se abordar outros aspectos relativos ao comportamento transitório dos TC's, os quais não foram incluídos neste trabalho.

Adicionalmente, apresenta-se um APÊNDICE no qual estão contidas descrições sucintas acerca do projeto de TC's especiais, destinadas a minimizar os problemas concernentes à operação em regime transitório.

CAPÍTULO II

ANÁLISE SIMPLIFICADA DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS TC's DE PROTEÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo objetiva descrever a modelagem convencionalmente utilizada na análise do comportamento transitório dos TC's de proteção. São feitas várias simplificações, sendo uma delas a suposição de linearidade das propriedades magnéticas do núcleo, o que permite o emprego de transformada de Laplace na resolução das equações diferenciais associadas ao modelo. Através das soluções encontradas, descreve-se a forma usual de cálculo do tempo que o núcleo leva para entrar em estado de saturação. Também comenta-se alguns aspectos gerais relativos à operação dos TC's de proteção.

2.2 CORRENTE TRANSITÓRIA PRIMÁRIA.

Para os propósitos desta análise, o sistema de potência é representado pelo circuito monofásico mostrado na Fig. 2.1.

A impedância primária total é:

$$\hat{Z}_1 = |Z_1| \angle \alpha$$

Onde:

$$|Z_1| = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

$$R_1 = R_s + R_L$$

$$L_1 = L_s + L_L$$

$$\alpha = \text{Tg}^{-1} (\omega L_1 / R_1)$$

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

$$T_1 = L_1 / R_1$$

Supondo que o curto-circuito indicado na Fig. 2.1 ocorre em $t=0$ e que o valor instantâneo da corrente pré-falta é $i_1(0)=I_0$, tem-se (RAO, 1979):

$$i_1 = \frac{U_m}{|Z_1|} \text{sen}(\omega t + \phi - \alpha) + \left[I_0 - \frac{U_m}{|Z_1|} \text{sen}(\phi - \alpha) \right] e^{-t/T_1} \quad (2.1)$$

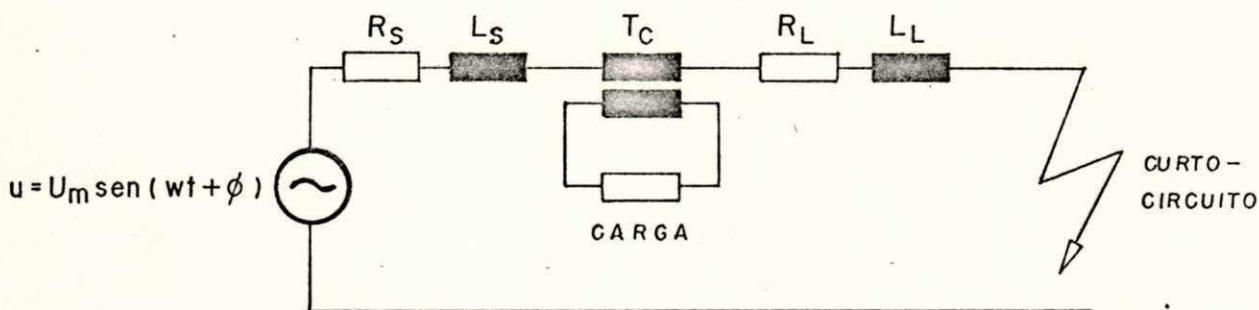


Fig. 2.1 - Representação simplificada do sistema primário.

A corrente i_1 possui duas componentes: uma alternada e outra contínua, com decréscimo exponencial. Para simplificar, será suposto que $i_1(0) = I_0 = 0$ e que $\phi - \alpha = -\pi/2$. Assim:

$$i_1 = \frac{U_m}{|Z_1|} (e^{-t/T_1} - \cos \omega t) \quad (2.2)$$

A suposição de que $\phi - \alpha = -\pi/2$ representa a situação mais pessimista, uma vez que a componente contínua de i_1 sofre deslocamento máximo. Assim, a expressão (2.2) será a utilizada nos desenvolvimentos a seguir.

2.3 MODELO SIMPLIFICADO DE TC.

2.3.1 GENERALIDADES.

Na Fig. 2.2 é mostrado o circuito que será usado na modelagem do TC.

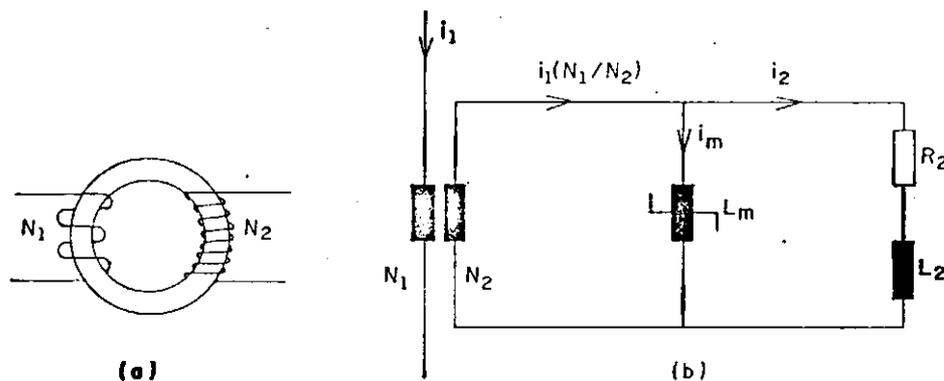


Fig. 2.2 - TC de proteção e circuito equivalente simplificado.

Em relação ao modelo considerado são feitas as seguintes simplificações:

- Despreza-se a impedância primária.
- Despreza-se as perdas parasíticas e histeréticas.
- Despreza-se as capacitâncias dos enrolamentos.
- Despreza-se o fluxo remanescente no núcleo do TC.
- Considera-se a curva "fluxo concatenado x corrente de magnetização" linearizada por partes, como mostra a Fig. 2.3. A indutância saturada é suposta nula.

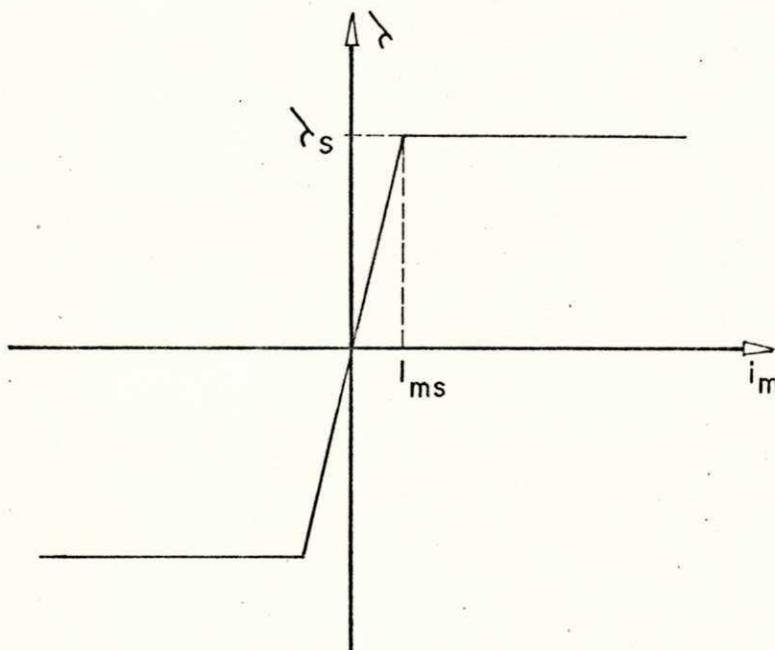


Fig. 2.3 - Curva de saturação linearizada por partes.

2.3.2 ANÁLISE SEM CONSIDERAÇÃO DO REGIME SATURADO.

O desenvolvimento apresentado a seguir objetiva encontrar a expressão do fluxo de enlace total no núcleo do TC.

Considerando o circuito da Fig. 2.2, pode-se escrever:

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2.3)$$

$$u_2 = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.4)$$

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = H l \quad (2.5)$$

H - Intensidade do campo magnético.

l - Comprimento médio da trajetória magnética.

Adicionalmente, tem-se:

$$H = B/\mu = \lambda/\mu N_2 A \quad (2.6)$$

B - Densidade de campo magnético.

μ - Permeabilidade magnética do núcleo.

A - Área da seção reta do núcleo.

Fazendo $N = N_2/N_1$ e substituindo (2.6) em (2.5):

$$i_2 = \frac{i_1}{N} - \left[\frac{l}{\mu N_2^2 A} \right] \lambda \quad (2.7)$$

Derivando ambos os membros de (2.7) e fazendo

$$L_m = \mu N_2^2 A / l :$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{N} \frac{di_1}{dt} - \frac{1}{L_m} \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.8)$$

Substituindo (2.4), (2.7) e (2.8) em (2.3), resulta:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2}{N} i_1 - \frac{R_2}{L_m} \lambda + \frac{L_2}{N} \frac{di_1}{dt} - \frac{L_2}{L_m} \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.9)$$

Aplicando transformada de Laplace em (2.9) e considerando que: $i_1(0) = 0$, $\lambda(0) = 0$:

$$\lambda(s) = \left[\frac{R_2}{L_m} + s \left(\frac{L_m + L_2}{L_m} \right) \right] = \frac{1}{N} \left[R_2 + s L_2 \right] i_1(s) \quad (2.10)$$

Aplicando transformada de Laplace também em (2.2), tem-se:

$$i_1(s) = \frac{U_m}{|Z_1|} \left[\frac{1}{s + 1/T_1} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (2.11)$$

Substituindo (2.11) em (2.10) e efetuando algumas manipulações algébricas, resulta:

$$\lambda(s) = \frac{L_2 L_m \frac{U_m}{|Z_1|}}{N(L_2 + L_m)} \left[\frac{s + \frac{R_2}{L_2}}{\left(s + \frac{R_2}{L_m + L_2} \right) \left(s + \frac{1}{T_1} \right)} - \frac{s \left(s + \frac{R_2}{L_2} \right)}{\left(s + \frac{R_2}{L_m + L_2} \right) (s^2 + \omega^2)} \right] \quad (2.12)$$

Fazendo

$$K = U_m / N |Z_1|$$

$$a = R_2 / L_2$$

$$b = R_2 / (L_2 + L_m)$$

$$c = 1 / T_1$$

pode-se escrever:

$$\lambda(s) = K \frac{L_2 L_m}{L_2 + L_m} \left[\frac{s + a}{(s + b)(s + c)} - \frac{s(s + a)}{(s + b)(s^2 + \omega^2)} \right] \quad (2.13)$$

No domínio do tempo, fica:

$$\lambda = K \frac{L_2 L_m}{L_2 + L_m} \left[\frac{(a - b) e^{-bt} - (a - c) e^{-ct}}{(c - b)} + \frac{b(a - b) e^{-bt}}{b^2 + \omega^2} - \frac{(Z_b / L_2)}{Z_c / (L_2 + L_m)} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right] \quad (2.14)$$

Onde,

$$Z_b = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

$$Z_c = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 (L_2 + L_m)^2}$$

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

$$\theta = \cos^{-1} (R_2 / Z_b)$$

ou ainda,

$$\lambda = K L_m \left[\frac{R_2}{L_2 + L_m} \frac{e^{-bt} - e^{-ct}}{c - b} + \frac{L_2}{L_2 + L_m} \frac{c e^{-ct} - b e^{-bt}}{c - b} + \frac{L_2 b (a - b) e^{-bt}}{(L_2 + L_m) (b^2 + \omega^2)} - \frac{Z_b}{Z_c} \cos(\omega t + \theta - \delta) \right] \quad (2.15)$$

Nesta análise, supõe-se que o TC opera inicialmente na região não-saturada, com indutância L_m constante, tal que:

$$L_m \gg L_2$$

$$\omega L_m \gg R_2$$

Isto permite desprezar o segundo e terceiro termo na expressão (2.15), resultando em (IEEE, 1976):

$$\lambda = K \left[R_2 \frac{e^{-bt} - e^{-ct}}{c - b} - L_m \frac{Z_b}{Z_c} \text{sen}(\omega t + \theta) \right] \quad (2.16)$$

Considerando que:

$$K = \frac{U_m}{N |Z_1|} = \frac{\sqrt{2} I_1}{N}$$

$$b = \frac{R_2}{L + L_m} \approx \frac{R_2}{L_m} = \frac{1}{T_2}$$

$$c = \frac{R_1}{L_1} = \frac{1}{T_1}$$

a expressão (2.16) modifica-se para:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{\omega N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1} \right) - \frac{1}{\cos \theta} \text{sen}(\omega t + \theta) \right] \quad (2.17)$$

Vê-se que, em condições transitórias, λ apresenta uma componente contínua e outra alternada, como mostra a Fig. 2.4.

O máximo valor da componente CC ocorrerá quando:

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

$$\frac{1}{T_2} e^{-t/T_2} = \frac{1}{T_1} e^{-t/T_1} \quad (2.18)$$

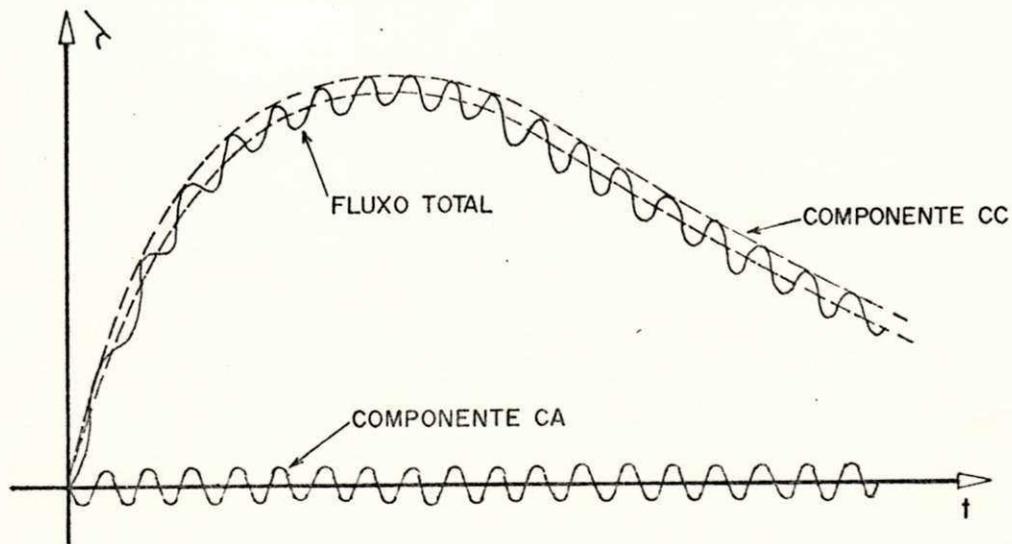


Fig 2.4 - Variação do fluxo total sem considerar saturação

Fazendo neste instante $t = t_m$, resulta:

$$t_m = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \left[\frac{T_1}{T_2} \right] \quad (2.19)$$

T_1 e T_2 são, respectivamente, as constantes de tempo primária e secundária. Nos sistemas reais, $T_1 \ll T_2$, o que permite fazer em (2.18):

$$e^{-t/T_2} \cong 1 \quad \therefore \quad \frac{T_1}{T_2} \cong e^{-t/T_1}$$

Substituindo esses valores no primeiro termo de (2.17), tem-se o valor máximo da componente CC:

$$\lambda_{\max, CC} = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{N} T_1 \quad (2.20)$$

O valor máximo da componente CA de λ é:

$$\lambda_{\max, Ca} = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{\omega N \cos\theta} \quad (2.21)$$

Se o valor máximo de CC coincidir com o valor máximo CA, tem-se o maior valor possível para λ , ou seja:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{\omega N} \left(\omega T_1 + \frac{1}{\cos\theta} \right) \quad (2.22)$$

A expressão para a corrente de magnetização, i_m , é obtida dividindo-se a expressão correspondente de λ pela indutância não-saturada, L_m . Assim:

$$i_m = \frac{\sqrt{2} I_1}{\omega N} \left[\frac{\omega T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1} \right) - \frac{1}{\cos\theta} \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (2.23)$$

$$i_{m, \max, CC} = \frac{\sqrt{2} I_1 T_1}{N T_2} \quad (2.24)$$

$$i_{m, \max, Ca} = \frac{\sqrt{2} I_1}{\omega N T_2 \cos\theta} \quad (2.25)$$

$$i_{m, \max} = \frac{\sqrt{2} I_1}{\omega N T_2} \left(\omega T_1 + \frac{1}{\cos\theta} \right) \quad (2.26)$$

Finalmente, a corrente secundária i_2 pode ser calculada a cada instante substituindo-se as equações (2.2) e (2.23) em:

$$i_2 = i_1 / N - i_m \quad (2.27)$$

2.3.3 ANÁLISE LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO O REGIME SATURADO.

O efeito da saturação no núcleo do TC pode ser avaliado através da Fig. 2.5, para uma carga resistiva e $N_1 = N_2$. Como foi anteriormente estabelecido, a indutância L_m é considerada nula durante o regime saturado, o que implica que toda a corrente secundária circula através do ramo magnetizante. Nesta situação, o fluxo não consegue ultrapassar o nível de saturação. Assim, o TC entrará e sairá de saturação durante certos períodos em cada ciclo, causando distorções em i_2 .

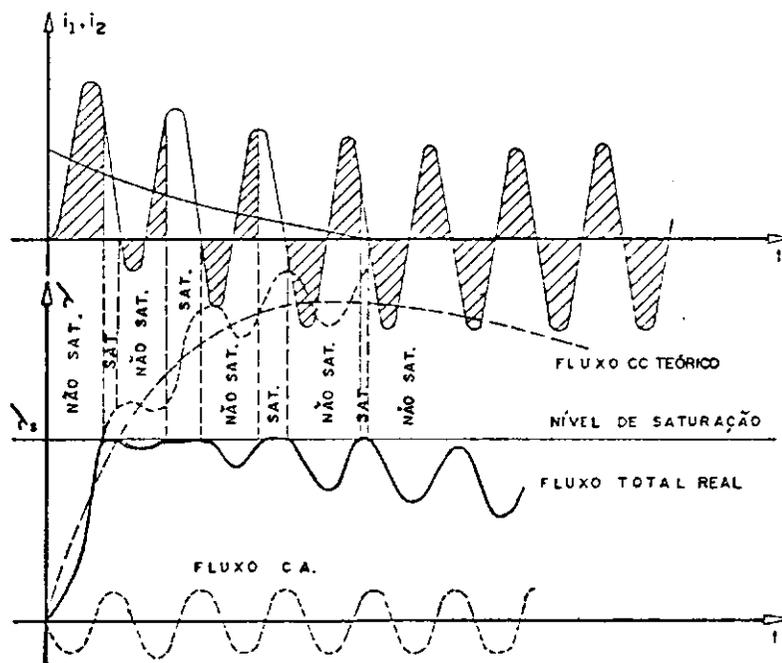


Fig. 2.5 - Correntes primária, secundária e fluxo considerando saturação.

A seguir, serão estabelecidos alguns conceitos usuais na análise de TC's de proteção em regime saturado. Será considerada agora, a curva de magnetização $\lambda \times i_m$ real (não linearizada).

TENSÃO DE PONTO DE JOELHO

Esta tensão estabelece o ponto de transição entre os regimes não-saturado e saturado. Considerando a curva de excitação secundária mostrada na Fig. 2.6, a tensão de ponto de joelho, U_s , é definida como sendo o valor acima do qual 10% de acréscimo na tensão de excitação secundária, U_2 , provoca 50% de acréscimo na corrente de magnetização i_m (GEC, 1975).

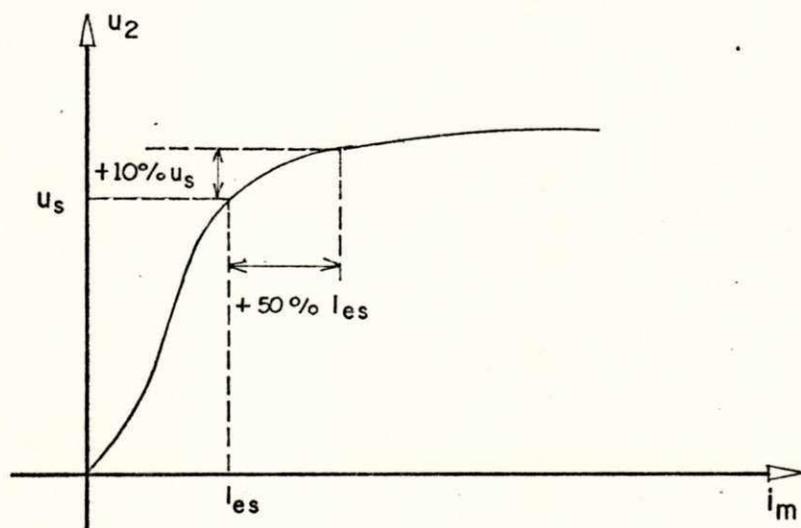


Fig. 2.6 - Curva de excitação secundária com ponto de joelho indicado.

A partir desta definição, pode-se afirmar que o TC satura quando o fluxo alcança um valor superior a:

$$\lambda_s = \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega} \quad (2.28)$$

TEMPO DE SATURAÇÃO

Define-se "tempo de saturação" de um TC, t_s , como sendo o intervalo de tempo compreendido entre o instante de ocorrência de um defeito e o instante em que o fluxo atinge pela primeira vez o valor de saturação, λ_s , correspondente à tensão de ponto de joelho, U_s . Para a determinação deste tempo, considera-se a equação (2.17) com as seguintes simplificações:

- A componente alternada possui valor máximo, ou seja, $\text{sen}(\omega t + \theta) = -1$.

- Nos sistemas reais, como $T_2 \gg T_1$, é comum fazer-se:

$$e^{-t/T_2} \approx 1$$

Logo, pode-se modificar (2.17) para:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2} I_1 R_2}{\omega N} \left[\omega \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} (1 - e^{-t/T_1}) + \frac{1}{\cos \theta} \right] \quad (2.29)$$

O tempo de saturação, será dado por (2.29), fazendo $t = t_s$ e $\lambda = \lambda_s$. Assim, resulta:

$$t_s = -T_1 \ln \left[1 - \frac{T_1 - T_2}{\omega T_1 T_2} \left(\frac{\omega N \lambda_s}{\sqrt{2} I_1 R_2} - \frac{1}{\cos \theta} \right) \right] \quad (2.30)$$

FATOR DE SOBREDIMENSIONAMENTO

A "International Electrotechnical Commission" (IEC, 1986) define um fator de sobredimensionamento para transitórios, K_s , como sendo:

$$K_s = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left[\omega \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1} \right) + 1 \right] \quad (2.31)$$

Considerando em (2.17) que $\theta = 0^\circ$ e que $\sin(\omega t + \theta) = -1$, pode-se escrever:

$$K_s = \frac{\omega N}{\sqrt{2} I_1 R_2} \lambda \quad (2.32)$$

No ponto de saturação, $\lambda = \lambda_s$. Substituindo (2.28) em (2.32), fica:

$$K_s = \frac{U_s}{R_2 \frac{I_1}{N}} \quad (2.33)$$

A expressão (2.33) sugere um significado físico para K_s . O mesmo representa a relação entre a tensão de ponto de joelho (U_s) e a tensão associada à componente AC da corrente de defeito referida ao secundário (I_1/N), quando esta circula numa resistência R_2 ligada no secundário.

Assim, usando os parâmetros envolvidos na equação (2.33), para diversos valores de constantes de tempo primária, são traçados conjuntos de curvas que permitem obter-se graficamente o tempo de saturação. Um desses conjuntos de curvas é mostrado, como exemplo, na Fig. 2.7.

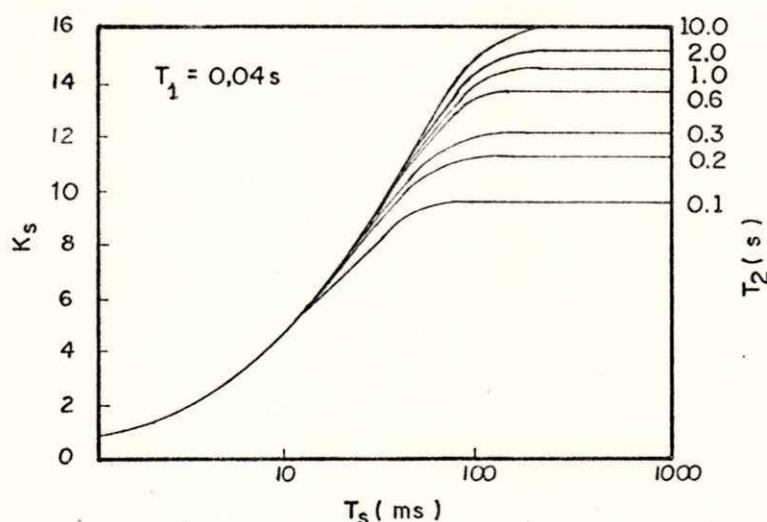


Fig. 2.7 - Família de curvas para determinação de T_s ($T_1 = 0.04$ s).

O procedimento para a determinação do tempo de saturação através deste método é o seguinte.

- a. Calcula-se o fator de saturação (K_s) por (2.33).
- b. Determina-se as constantes de tempo primária (T_1) e secundária (T_2).
- c. Com K_s , T_1 , T_2 , vai-se às curvas e determina-se T_s .

2.3.4 INFLUÊNCIA DA CARGA SECUNDÁRIA NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS TC'S.

A análise da equação (2.17) indica que o fator de potência da carga não exerce influência na componente contínua do fluxo. Entretanto, a componente alternada aumenta à medida que $\cos\theta$ decresce, ou seja, as cargas indutivas contribuem para a redução do tempo de saturação do TC.

Já o módulo da carga secundária influi drasticamente na saturação dos TC's. No caso de transformadores de potência e de potencial, a força magnetomotriz primária ($N_1 i_1$) depende predominantemente da carga secundária. A ausência desta implica num valor de $N_1 i_1$ apenas suficiente para magnetizar o núcleo, mantendo-se a tensão secundária dentro dos limites normais. No caso dos TC's, os mesmos têm o enrolamento primário ligado em série na linha, sendo projetados para operar em regime normal com densidades de fluxo muito baixas (em torno de 0.1 Tesla). Um aumento da carga secundária faz com que haja um aumento da corrente através do ramo magnetizante, uma vez que a força magnetomotriz primária independe da carga secundária, sendo imposta pela linha. Com isto, o TC é levado a operar cada vez mais próximo do ponto de joelho.

O caso extremo ocorre quando o TC opera em circuito aberto. Nesta situação, a fonte de corrente independente ligada ao primário gera uma força magnetomotriz $N_1 i_1$ que é totalmente

destinada a magnetizar o núcleo, pois não existe o efeito desmagnetizante induzido no secundário ($N_2 i_2 = 0$). Com isto, o núcleo é levado a um estado de saturação intensa a cada semiciclo, gerando sobretensões muito elevadas que certamente destruirão o isolamento. Isto é ilustrado na Fig. 2.8.

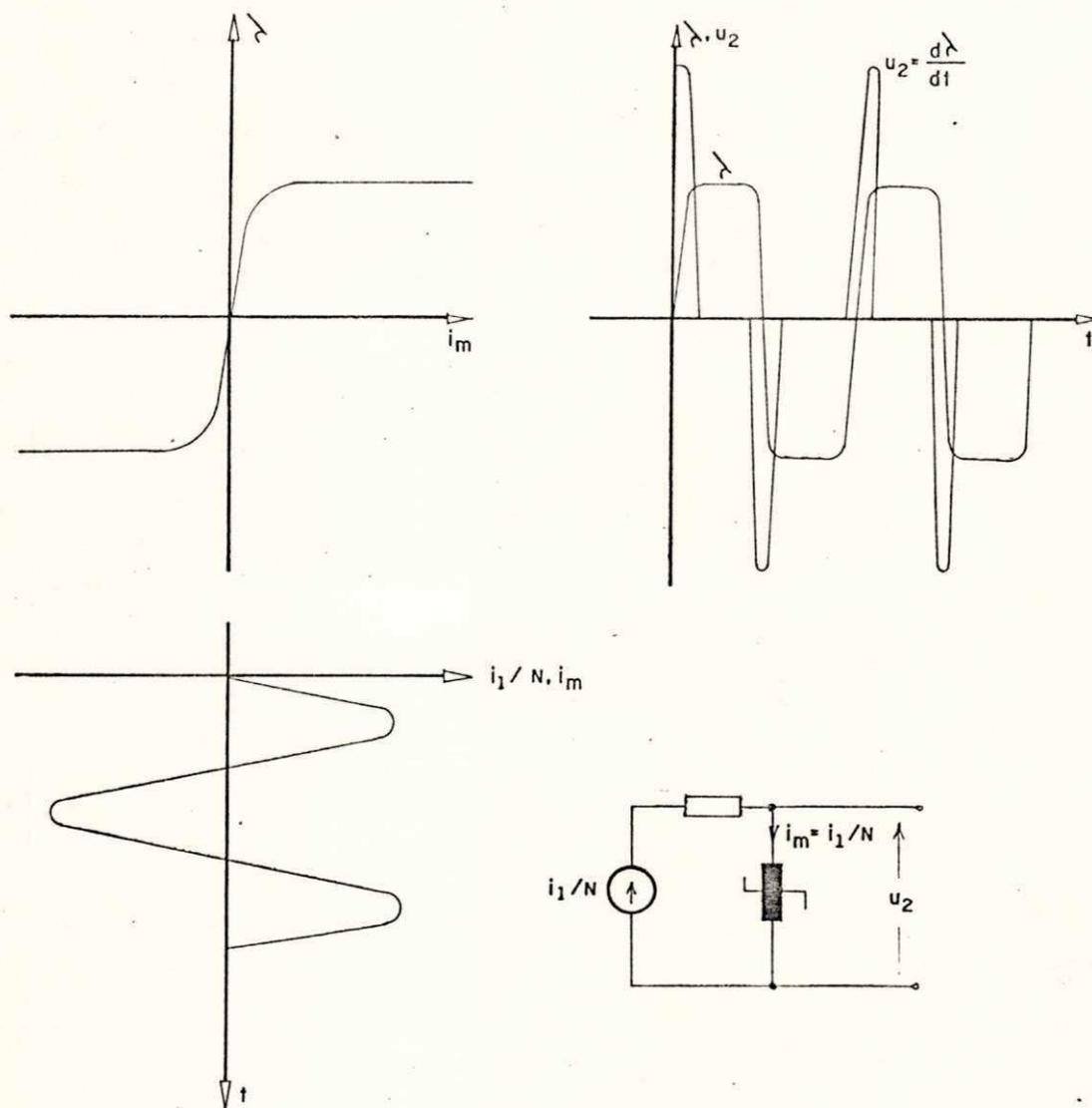


Fig. 2.8 - Operação de um TC com secundário em aberto.

2.4 COMENTÁRIOS.

Uma visão geral do método mais simples e mais usado na análise do comportamento transitório dos TC's de proteção foi proporcionada. Apesar de já ter sido focalizado em alguns trabalhos anteriores, é indispensável que ele preceda os desenvolvimentos baseados em técnicas numéricas. É fácil perceber que os métodos analíticos de resolução das equações diferenciais proporcionam uma visão mais "panorâmica" do problema, permitindo que, ao se ter em mãos as expressões finais, tenha-se uma boa idéia da influência de determinados parâmetros no comportamento transitório dos TC's de proteção, mesmo levando-se em consideração as inevitáveis hipóteses simplificadoras inicialmente estabelecidas.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DE TC'S DE PROTEÇÃO PARA CÁLCULO COMPUTACIONAL DE TRANSITÓRIOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descreve-se a modelagem de TC's destinada a estudo do comportamento transitório. Deseja-se representar os efeitos mais importantes associados aos núcleos ferromagnéticos, tais como saturação, histerese e corrente parasitas. Uma vez que esses fenômenos envolvem não-linearidades, torna-se indispensável o uso de técnicas de integração numérica na resolução das equações associadas ao modelo. Como não pretende-se estudar transitórios de alta frequência (KHz), as capacitâncias dos enrolamentos não serão consideradas.

A seguir, serão analisados quatro modelos básicos, nos quais, por ordem de apresentação, o núcleo ferromagnético é representado com os seguintes efeitos:

- saturação,
- saturação e histerese,
- saturação, histerese e correntes parasitas,
- saturação, histerese e entreferro.

3.2 MODELO A - NÚCLEO COM SATURAÇÃO.

3.2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE E EQUAÇÕES BÁSICAS.

O circuito equivalente associado a este modelo é mostrado na Fig. 3.1. A maior precisão que o mesmo proporciona em relação ao modelo descrito no capítulo anterior deve-se ao fato de que agora é considerada, logo de início, uma relação fluxo X corrente de magnetização não-linear. Isto constitui uma aproximação mais realista que a linearização por partes, anteriormente adotada.

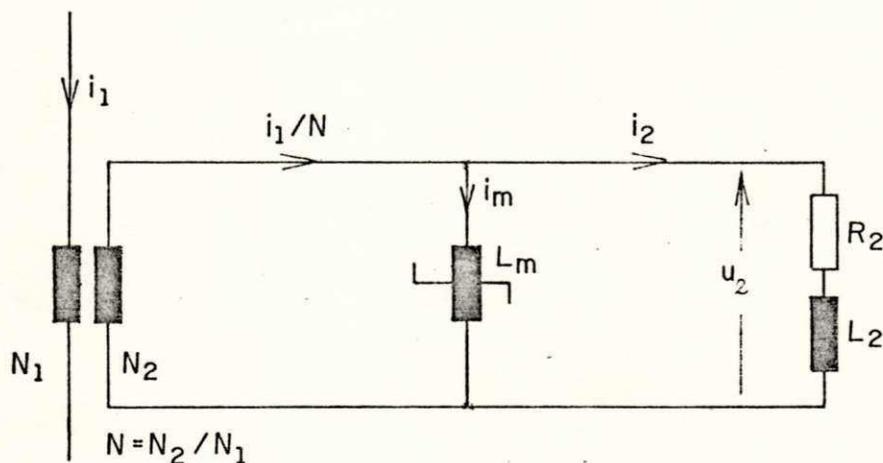


Fig. 3.1 - Circuito equivalente de um TC - Modelo A.

Analisando o mesmo, pode-se escrever:

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (3.1)$$

$$u_2 = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.2)$$

$$i_2 = i_1/N - i_m \quad (3.3)$$

$$i_m = g(\lambda) \quad (3.4)$$

g é uma função que representa a característica não-linear de magnetização do núcleo ferromagnético (curva normal de magnetização), estabelecida mais adiante.

Substituindo (3.2) e (3.3) em (3.1), após algumas manipulações algébricas, resulta:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\frac{R_2}{N} i_1 - R_2 i_m + \frac{L_2}{N} \frac{di_1}{dt}}{1 + L_2 \left(\frac{di_m}{d\lambda} \right)} \quad (3.5)$$

A relação $di_m/d\lambda$ corresponde ao inverso da indutância incremental, L_m . Esta última é geometricamente interpretada como sendo a inclinação da curva de saturação $\lambda \times i_m$, a qual é variável a cada instante.

A equação (3.5) pode ser resolvida pelos métodos de integração usuais. Aqui, optou-se pelo método da predição e correção ou método de Euler modificado.

3.2.2 REPRESENTAÇÃO DA CURVA NORMAL DE MAGNETIZAÇÃO.

A representação da curva $i_m = g(\lambda)$ constitui um dos pontos mais importantes no estudo do comportamento dos TC's em regime transitório. Como mostra a Fig. 3.2, a mesma apresenta três

regiões notáveis:

- Região 1, ou região de RAYLEIGH, onde a indutância incremental $L_m = d\lambda/di_m$ é crescente.

- Região 2, ou região intermediária, onde a indutância incremental é levemente decrescente.

- Região 3, ou região saturada, situada além do ponto de joelho K, na qual a indutância incremental sofre uma apreciável redução.

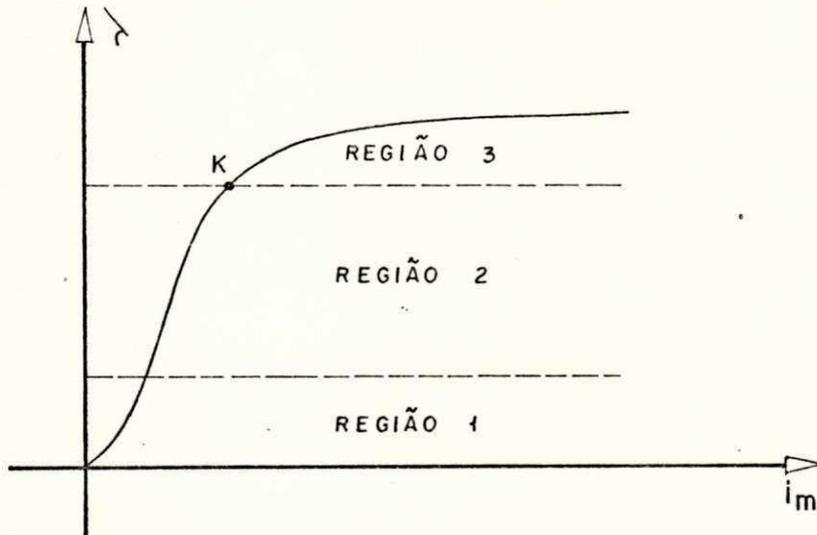


Fig. 3.2 - Curva normal de magnetização típica de um TC de proteção.

A importância de uma boa representação desta curva nos estudos de transitórios deve-se ao fato de que, nestas condições,

o TC opera em todas as três regiões indicadas. Assim, não é uma tarefa muito simples obter uma função completamente satisfatória para a reprodução de tal comportamento. Devido à baixa indutância na região saturada, um pequeno aumento de λ provoca um abrupto aumento na corrente de magnetização. Isto sugere que, ao se cometer erros consideráveis na representação da curva nesta região, os resultados obtidos poderão ser drasticamente afetados.

Diversas tentativas de aproximação desta curva por funções polinomiais, exponenciais e/ou hiperbólicas, bem como séries de Fourier, são observadas na literatura, sem muito sucesso (KAVANAGH, 1960; TRUTT et alii, 1968; KRISHNAMOORTHY e VENUGOPAL, 1974). Foram investigadas aproximações por série exponenciais e cubic spline simples, que também resultaram em pouco sucesso. Entretanto, WIDGER (1969) sugere a representação da mesma por funções racionais. Comparativamente aos modelos analisados, esta função apresenta erros muito pequenos (inferiores a 5 %), associados a uma representação simples e satisfatória. Estas funções são do tipo:

$$Y = \left[\frac{a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_n x_i^n}{1 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + \dots + b_n x_i^n} \right] x_i \quad (3.6)$$

onde

$i = 1, 2, \dots, N$

$N =$ Número de amostras

$n =$ Grau da função.

São usadas as variáveis genéricas X e Y pelo fato de se desejar, em algumas aplicações, a aproximação de i_m em função de λ e, em outros casos, o contrário.

Neste trabalho, foram usadas funções racionais, sendo adotada, entretanto, uma aproximação mais geral, do seguinte tipo:

$$Y = \frac{a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_n x_i^n}{1 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + \dots + b_n x_i^n} \quad (3.7)$$

Esta expressão pode aproximar curvas que não passam pela origem, ao contrário de (3.6). A mesma é também denominada "aproximação de Padé" (GERALD, 1978).

CRITÉRIO DE AJUSTE E EQUACIONAMENTO

A fim de encontrar os valores mais adequados para os coeficientes a_1, a_2, \dots, a_n e b_1, b_2, \dots, b_n (3.7), minimiza-se o erro relativo, dado por:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - yr_i}{yr_i} \right]^2 \quad (3.8)$$

ε - Erro relativo.

y_i - Valor calculado por (3.7).

yr_i - Valor real levantado em testes.

N - Número de amostras.

Substituindo (3.7) em (3.8), fica:

- j. Fasímetro digital, 705 - EURELCO.
- k. Ponte RLC digital, AG 4301B - LANDO.
- l. Ponte de Wheaststone, M273 - A2 - SIEMENS.
- m. Osciloscópio, HM 103 - HAMEG.
- n. Osciloscópio de Memória Digital, 468-TEKTRONIX
- o. Conjunto motor de indução - motor síncrono, usado como conversor de frequência.

4.7 COMENTÁRIOS

Alguns problemas tiveram de ser superados nesta fase do trabalho. Além das dificuldades intrínsecas às atividades experimentais, houve o problema da falta de equipamentos adequados. No caso da medição das perdas no núcleo do TC, não foi possível a obtenção de um aparelho de Epstein. Isto fez com que se recorresse a outro método, o qual consistiu na medição das áreas dos ciclos de histerese através de um planímetro, resultando em valores menos precisos para a resistência de perdas dinâmicas, R_e . Afortunadamente, conforme será visto no próximo capítulo, essa resistência influi muito pouco no comportamento transitório do TC em estudo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS OBTIDOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são inicialmente apresentados os resultados obtidos por simulação digital, referentes a uma mesma condição de operação do TC de tamanho reduzido, citado no capítulo IV. São considerados os três primeiros modelos descritos no capítulo III.

A seguir, apresenta-se os resultados de simulações realizadas em computador, relativas a várias condições de operação em regime transitório do TC, nas quais utilizou-se o MODELO B. Esses resultados são comparados com oscilogramas correspondentes, registrados em laboratório.

Adicionalmente, considera-se um TC real, com núcleo de grandes dimensões e elevada relação de espiras, para o qual é analisada a influência de entreferros no núcleo ferromagnético, destinados à redução de fluxo residual. Neste caso, resultados obtidos através da utilização do MODELO D são comparados com os obtidos através do MODELO B.

Por fim, compara-se os tempos de saturação deste TC, determinados através de simulações utilizando-se o MODELO B e o MODELO D, com os calculados mediante o emprego do método convencional.

Todos os programas foram escritos em linguagem FORTRAN 77, sendo processados num computador VAX 11/750, da DIGITAL. Na obtenção dos gráficos, utilizou-se o "software" REGIS.

5.2 SIMULAÇÕES CONSIDERANDO-SE DIFERENTES MODELOS.

5.2.1 MODELO A - NÚCLEO COM SATURAÇÃO.

Neste estudo, considerou-se os seguintes dados:

$$I_1 = 8.0 \text{ A}$$

$$T_1 = 30.3 \text{ ms } (\theta = 85^\circ)$$

$$\phi = 0^\circ$$

$$\lambda(0) = 0$$

$$\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 0^\circ \Omega$$

O TC considerado foi o de tamanho reduzido, descrito no capítulo anterior. As curvas de saturação e de excitação secundária correspondentes são indicadas na Fig. 5.1 e Fig. 5.2, respectivamente. Essas curvas foram aproximadas através das seguintes funções racionais de segundo grau:

$$i_m = \frac{25.06 \lambda - 467.69 \lambda^2}{1 + 84.21 \lambda - 3254.28 \lambda^2} \quad (5.1)$$

$$i_m = \frac{-7.59 U_2 + 247.69 U_2^2}{1 - 1.39 U_2 + 28.24 U_2^2} \quad (5.2)$$

O ponto de joelho da curva de excitação secundária foi determinado através da definição do item 2.3.3. O mesmo corresponde aos seguintes valores:

$$U_2 = U_g = 7.3 \text{ V}$$

$$i_m = 0.38 \text{ A}$$

Com os dados acima, obteve-se as formas de onda de i_1 , i_2 (Fig. 5.3), i_m (Fig. 5.4) e λ (Fig. 5.5).

5.2.2 MODELO B - NÚCLEO COM SATURAÇÃO E HISTERESE

Na Fig. 5.6 é mostrado o laço de histerese em 60 Hz, não compensado, obtido através da montagem da Fig. 4.2. O mesmo é considerado como sendo o laço maior de histerese, uma vez que as perdas dinâmicas não são levadas em conta. Este contorno pode ser aproximado através das seguintes funções:

a. Região saturada:

Para $\lambda \geq 0.0300$:

$$i_m = 6666(\lambda - 0.0300) + 0.693 \quad (5.3)$$

Para $\lambda \leq -0.0300$:

$$i_m = 6666(\lambda + 0.0300) - 0.693 \quad (5.4)$$

b. Região não-saturada:

Para $0 \leq \lambda < 0.0300$ e $d\lambda/dt \geq 0$:

$$i_m = 0.0301 \text{ Tg}(49.98 \lambda) + 0.27 \quad (5.5)$$

Para $0 \leq \lambda < 0.0300$ e $d\lambda/dt < 0$:

$$i_m = 0.0300 \text{ Tg}(51.30 \lambda) - 0.27 \quad (5.6)$$

Para $-0.0300 < \lambda < 0$ e $d\lambda/dt \geq 0$:

$$i_m = 0.0300 \text{ Tg}(51.30 \lambda) + 0.27 \quad (5.7)$$

Para $-0.0300 < \lambda < 0$ e $d\lambda/dt < 0$:

$$i_m = 0.0301 \text{ Tg}(49.98 \lambda) - 0.27 \quad (5.8)$$

Conforme exposto no ítem 3.2.2, os laços de histerese assimétricos são gerados a partir deste laço maior. Considerando os mesmos dados apresentados no ítem anterior, são mostradas na Fig. 5.7 as trajetórias assimétricas típicas da operação do núcleo em regime transitório. Na Fig. 5.8 é mostrado um detalhe dessas trajetórias no interior do ciclo limite. A seguir, são apresentadas as formas de onda de i_1 , i_2 (Fig. 5.9), i_m (Fig. 5.10) e λ (Fig. 5.11).

Na Fig. 5.12 são mostrados os laços assimétricos correspondentes à situação em que a impedância secundária \hat{Z}_2 é reduzida de $0.90 \angle 0^\circ \Omega$ para $0.087 \angle 0^\circ \Omega$, ocasionando um estado de saturação menos intensa que o mostrado na Fig. 5.7.

5.2.3 MODELO C - NÚCLEO COM SATURAÇÃO, HISTERESE E CORRENTES PARASITAS.

Neste modelo, é incorporada a resistência de perdas R_o (Fig. 3.7). O método empregado para a determinação da mesma (BAPTISTA, 1982) foi descrito de modo geral no capítulo III, tendo sido também apresentadas no capítulo IV considerações acerca dos métodos e instrumentos utilizados para tal fim. Assim, R_o apresentou o seguinte valor:

$$R_o = 46.0 \Omega$$

Com base neste resultado, considerou-se desnecessário apresentar resultados de simulações envolvendo o efeito das perdas dinâmicas na modelagem do TC's. Isto é justificado no ítem a

seguir.

5.2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE MODELAGEM DE NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS DE TC'S SEM ENTREFERRO.

Com base nos resultados obtidos, será feita uma avaliação da importância da representação dos efeitos de saturação, histerese e correntes parasitas no núcleo dos TC's de proteção. Inicialmente, apresentou-se resultados de simulações onde foram utilizados o MODELO A e o MODELO B, indicando que praticamente não há diferença entre os mesmos. As distorções na corrente secundária i_2 são praticamente idênticas em ambos os casos (Fig. 5.3 e Fig. 5.9). Isto pode ser explicado mediante observação da Fig. 5.7, a qual indica que a faixa de variação da corrente de magnetização i_m é muito maior que a largura do laço maior de histerese. Desta forma, a representação dos laços assimétricos no interior deste último torna-se irrelevante quando a condição inicial do fluxo é nula.

Por outro lado, a representação da histerese é de fundamental importância quando parte-se de uma condição na qual o fluxo remanescente é diferente de zero. Isto será mostrado mais adiante.

Em relação à representação dos efeitos das correntes parasitas, deve-se observar o seguinte fato: no TC até agora considerado, a tensão de ponto de joelho é $U_g = 7.3$ V. Para a corrente simétrica secundária de valor eficaz $I_1 = 8.0$ A

(considerada nas simulações anteriores), ocorrerá saturação em regime permanente se a impedância secundária for superior a:

$$Z_2 = 7.3/8.0 = 0.91 \Omega$$

Obviamente, para que o TC apresente um bom comportamento em regime transitório, é necessário que Z_2 apresente valores muito inferiores a 0.91Ω . Como R_e e Z_2 estão ligados em paralelo e como $R_e \gg Z_2$, conclui-se que a representação das perdas dinâmicas é perfeitamente dispensável neste caso. Isto pode também ser verificado durante a visualização do laço de histerese compensado em 60 Hz, onde foi utilizada a montagem da Fig. 4.3. Observou-se que era muito pequena a diferença existente entre este laço e o laço em 60 Hz não-compensado (Fig. 5.6).

Em relação aos TC's de grande porte, os valores apresentados por R_e chegam a alguns milhares de ohms (D'AJUZ et alii, 1984). Em contrapartida, os mesmos devem sempre operar com baixas impedâncias no secundário (a maior carga nominal estabelecida por normas é 8.0Ω). Assim, a consideração de R_e é ainda mais irrelevante que no caso dos TC's de pequeno porte.

Face ao exposto, o modelo escolhido para a representação de núcleos ferromagnéticos de TC's sem entreferro será, daqui por diante, o MODELO B (núcleo com saturação e histerese).

5.3 SIMULAÇÕES CONSIDERANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

5.3.1 GENERALIDADES.

Inicialmente, será considerado um caso, denominado "caso base". O mesmo corresponde aos seguintes dados:

$$I_1 = 8.0 \text{ A}$$

$$T_1 = 10.6 \text{ ms}$$

$$\phi = 0^\circ$$

$$\lambda(0) = 0$$

$$\hat{Z}_2 = 0.90 \quad | \quad 0^\circ$$

O resultado da simulação e o oscilograma correspondente, registrado em laboratório, são mostrados na Fig. 5.13.

Tomando como referência o caso base, foram realizadas modificações nas seguintes grandezas:

- Relação X/R da carga secundária.
- Módulo da carga secundária, Z_2 .
- Constante de tempo do sistema primário, T_1 .
- Ângulo de chaveamento, ϕ .
- Fluxo residual do núcleo.

5.3.2 RELAÇÃO X/R DA CARGA SECUNDÁRIA.

A influência deste fator pode ser observada comparando-se o caso base com outros casos, na seguinte sequência:

a. $\hat{Z}_2 = 0.90 \quad | \quad 0^\circ \quad \Omega$ - Fig. 5.13 (caso base)

b. $\hat{Z}_2 = 0.90 \quad | \quad 32.2^\circ \quad \Omega$ - Fig. 5.14

c. $\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 57^\circ \Omega$ - Fig. 5.15

Neste caso, pode-se constatar que os valores de pico da corrente distorcida i_2 são mais elevados quando a citada relação é baixa. Imediatamente após este valor ser alcançado na Fig. 5.13 ($X/R = 0$), i_2 cai abruptamente para zero, indicando que o TC alcança imediatamente o estado de saturação plena. Em contrapartida, quando X/R cresce, os valores de pico de i_2 tornam-se cada vez menores. Entretanto, i_2 não cai abruptamente para zero, como no caso das cargas resistivas. Obviamente, isto ocorre devido à impossibilidade cada vez mais acentuada de variação brusca de corrente na indutância da carga secundária. Este fato tem muita importância quando emprega-se proteção por comparação de fase. Nesta circunstância, as cargas puramente resistivas representam o pior caso.

5.3.3 MÓDULO DA IMPEDÂNCIA SECUNDÁRIA.

A influência deste fator pode ser avaliada comparando-se o caso base com outros casos, na seguinte ordem:

a. $\hat{Z}_2 = 1.50 \angle 0^\circ \Omega$ - Fig. 5.16

b. $\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 0^\circ \Omega$ - Fig. 5.13 (caso base)

c. $\hat{Z}_2 = 0.70 \angle 0^\circ \Omega$ - Fig. 5.17

d. $\hat{Z}_2 = 0.60 \angle 0^\circ \Omega$ - Fig. 5.18

A Fig. 5.16 ilustra um caso em que o TC satura em regime permanente. Se isso não ocorresse, a tensão de excitação secundária alcançaria o seguinte valor:

$$U_2 = I_2 Z_2 = 8.0 \times 1.5 = 12 \text{ V}$$

Esta tensão é superior à tensão de ponto de joelho, que é $U_g = 7.3 \text{ V}$. Nestes casos, a redução da impedância resistiva Z_2 afeta o grau de distorção de i_2 de modo apreciável apenas nos primeiros ciclos. Nos ciclos subsequentes, o grau de distorção é praticamente o mesmo, independentemente do valor de Z_2 .

5.3.4 CONSTANTE DE TEMPO DO SISTEMA PRIMÁRIO.

A influência deste fator pode ser avaliada através da sequência de casos abaixo:

- a. $T_1 = 10.6 \text{ ms}$ - Fig 5.13 (caso base)
- b. $T_1 = 6.2 \text{ ms}$ - Fig. 5.19
- c. $T_1 = 5.0 \text{ ms}$ - Fig. 5.20
- d. $T_1 = 3.8 \text{ ms}$ - Fig. 5.21

Observa-se que o grau de distorção nos primeiros ciclos é praticamente o mesmo. Entretanto, à medida que T_1 decresce, o grau de distorção nos ciclos subsequentes tende a ser menor. Isto sugere que sistemas primários com constantes de tempo elevadas (X_1/R_1 altos) tendem a produzir transitórios de duração mais longa. Este fato pode ser visto com mais clareza através da comparação da Fig. 5.9 com a Fig. 5.13. Em ambas as simulações, considerou-se os mesmos dados, exceto a constante de tempo T_1 . No primeiro caso, $T_1 = 30.3 \text{ ms}$ ($\theta = 85^\circ$), e no segundo, $T_1 = 10.6 \text{ ms}$ ($\theta = 76^\circ$).

5.3.5 ÂNGULO DE CHAVEAMENTO.

Foram simulados casos com diferentes ângulos de fase da tensão da fonte, como é mostrado a seguir:

- a. $\phi = 0^\circ$ - Fig. 5.13 (caso base)
- b. $\phi = 30^\circ$ - Fig. 5.22
- c. $\phi = 60^\circ$ - Fig. 5.23
- d. $\phi = 90^\circ$ - Fig. 5.24
- e. $\phi = 120^\circ$ - Fig. 5.25
- f. $\phi = 150^\circ$ - Fig. 5.26

Vê-se que este parâmetro afeta de modo drástico o grau de distorção de i_2 , sendo esta mais intensa quando $\phi = 0^\circ$, reduzindo-se à medida que ϕ aproxima-se do valor correspondente ao ângulo da linha.

5.3.6 FLUXO RESIDUAL NO NÚCLEO.

Este estudo foi feito apenas com simulações em computador. As situações analisadas foram as seguintes:

- a. $\lambda(0) = 0$ - Fig. 5.13 (caso base)
- b. $\lambda(0) = 30\% \lambda_s$ - Fig. 5.27
- c. $\lambda(0) = 50\% \lambda_s$ - Fig. 5.28
- d. $\lambda(0) = 80\% \lambda_s$ - Fig. 5.29

$\lambda_s = 0.0300(\text{Wb. esp})$ é o valor de λ no vértice ou ciclo limite de histerese.

Neste caso, vê-se que quando o fluxo residual é aumentado, mais pronunciada torna-se a distorção na forma de onda

de i_2 .

Na Fig. 5.30 e na Fig. 5.31 é ilustrada a influência do fluxo residual no caso de religamento automático de uma tentativa, com $\hat{Z}_2 = 0.90 \mid 57^\circ$. Foram assumidos os seguintes valores de tempo:

- 25 ms, para atuação da proteção.
- 50 ms, para disjuntores de 3 ciclos.
- 50 ms, para o tempo morto.

Vê-se que no primeiro instante de ocorrência do defeito, o fluxo residual é nulo, enquanto que no instante do religamento, esse fluxo assume um valor próximo ao de saturação. Isto faz com que a distorção no segundo período seja muito mais pronunciada.

5.4 SIMULAÇÕES CONSIDERANDO-SE A INFLUÊNCIA DE ENTREFERROS NO NÚCLEO DO TC.

Neste estudo, foram realizadas apenas simulações em computador, utilizando-se MODELO B e o MODELO D. São considerados os seguintes dados:

$$I_1 = 40000 \text{ A}$$

$$T_1 = 30.3 \text{ ms } (\theta = 85^\circ)$$

$$\phi = 0^\circ$$

$$\lambda(0) = 0$$

$$\hat{Z}_2 = 1.0 \mid 0^\circ \Omega$$

Os dados do TC, fornecidos pelo fabricante (SIEMENS),

são:

- Tensão nominal: 245 KV
- Relação de corrente: 2000/5
- Número de espiras secundárias: 400
- Exatidão: 10B800 (ABNT)
- Diâmetro interno: 43.0 cm
- Diâmetro externo: 27.0 cm
- Altura do núcleo: 60.0 cm
- Tensão de ponto de joelho: 749.8 V

O ciclo limite de histerese a 60 Hz não foi fornecido pelo fabricante. Por isso, assumiu-se um laço típico apresentados pelos aços-silício normalmente utilizados na fabricação de TC's. O mesmo pode ser bem aproximado pelas seguintes funções:

a. Região saturada:

Para $\lambda \geq 3.26$:

$$i_m = 600 (\lambda - 3.26) + 0.303 \quad (5.9)$$

Para $\lambda \leq -3.26$:

$$i_m = 600 (\lambda + 3.26) - 0.303 \quad (5.10)$$

b. Região não-saturada:

Para $0 \leq \lambda < 3.26$ e $d\lambda/dt \geq 0$:

$$i_m = 1.3688 \cdot 10^{-2} \operatorname{Tg}(0.4662 \lambda) + 2.525 \cdot 10^{-2} \quad (5.11)$$

Para $0 \leq \lambda < 3.26$ e $d\lambda/dt < 0$:

$$i_m = 7.7156 \cdot 10^{-3} \operatorname{Tg}(0.4740 \lambda) - 2.525 \cdot 10^{-2} \quad (5.12)$$

Para $-3.26 < \lambda < 0$ e $d\lambda/dt \geq 0$:

$$i_m = 7.7156 \cdot 10^{-3} \operatorname{Tg}(0.4740 \lambda) + 2.525 \cdot 10^{-2} \quad (5.13)$$

Para $-3.26 < \lambda < 0$ e $d\lambda/dt < 0$:

$$i_m = 1.3688 \cdot 10^{-2} \operatorname{Tg}(0.4662 \lambda) - 2.525 \cdot 10^{-2} \quad (5.14)$$

Na Fig. 5.32 e na Fig. 5.33 é ilustrado o caso de um religamento automático 280 ms após a atuação do disjuntor, considerando o TC sem entreferro. Foram assumidos valores de tempo realísticos, ou seja:

- 20 ms, para atuação da proteção (relés estáticos modernos).
- 40 ms, para atuação do disjuntor (2.5 ciclos)
- 280 ms, para o tempo morto, valor este superior ao mínimo tempo de desionização do meio extintor empregado no disjuntor. Este valor mínimo foi calculado tomando como base uma tensão nominal da linha igual a 230 KV, utilizando a seguinte expressão (WESTINGHOUSE, 1979):

$$t_m = 16.67 \left[10.5 + \frac{U_n}{34.5} \right] \quad (5.15)$$

t_m - tempo morto, em ms.

U_n - tensão nominal da linha, em KV.

Considerando os mesmos dados, foram inseridos entreferros de diferentes comprimentos no núcleo do TC. Assim, obteve-se:

- Fig. 5.34 e Fig. 5.35, $x = 2.50$ mm
- Fig. 5.36 e Fig. 5.37, $x = 10.0$ mm

Comparando esses casos com aquele onde há ausência de entreferro (Fig. 5.32 e Fig. 5.33), pode-se claramente notar que o efeito deste último consiste em reduzir o fluxo residual e, conseqüentemente, as distorções na forma de onda de i_2 no período

de religamento.

5.5 DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE SATURAÇÃO.

Neste ítem, foram obtidos o tempo de saturação do TC considerado anteriormente, tendo sido os mesmos calculados através de dois diferentes métodos. No primeiro, daqui por diante denominado de "método do IEEE", foi utilizada a equação (2.30). No segundo, utilizou-se os resultados de simulações em computador, empregando-se o MODELO B e o MODELO D. Considerou-se T_s como sendo o tempo que o fluxo λ leva para alcançar pela primeira vez o valor $\lambda_s = U_s / (4.44 f)$, onde U_s é a tensão de ponto de joelho fornecida pelo fabricante (749.8 V). Este segundo método será referenciado como "método de Euler".

Na tabela 5.1 são mostrados os diferentes casos simulados. Acham-se indicados na mesma as figuras correspondentes aos oscilogramas de i_1 , i_2 (superpostos) e de λ , dos casos de caráter mais ilustrativos.

Em quase todos os casos, observa-se que os tempos de saturação calculados por ambos os métodos acham-se bastante próximos um do outro. Os tempos de saturação calculados pelo método do IEEE são geralmente menores. Isto é explicado pelo fato de que, na dedução da equação (2.30), considerou-se o valor máximo da componente senoidal do fluxo de enlace λ . Assim, os valores de T_s decorrentes de tal simplificação constituem estimativas pessimistas.

CASO	ENTRE-FERRO (mm)	I_1 (KA)	T_1 (ms)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	T_s (ms) IEEE	T_s (ms) EULER	FIG.
1	0	40	30	1.00	0	25.46	26.90	5.38
2	0	40	30	2.00	0	8.33	9.70	—
3	0	40	30	4.00	0	2.40	6.70	5.39
4	0	40	30	1.00	0.36	25.08	25.90	—
5	0	40	30	1.00	1.00	23.02	24.00	—
6	0	40	30	1.00	5.67	5.01	4.80	5.40
7	0	40	80	1.00	0	19.49	24.10	5.41
8	0	30	30	4.00	0	4.24	7.70	—
9	0	20	30	4.00	0	8.30	9.60	—
10	0.30	40	30	1.00	0.36	24.93	25.90	5.42
11	0.30	40	30	1.00	1.00	22.97	24.10	—
12	0.30	40	30	1.00	1.73	19.87	22.80	5.43
13	2.50	40	30	1.00	0.36	19.53	23.10	—
14	2.50	40	30	1.00	1.00	22.34	24.60	—
15	2.50	40	30	1.00	1.73	23.61	26.50	5.44

Tabela 5.1 - Comparação entre os tempos de saturação.

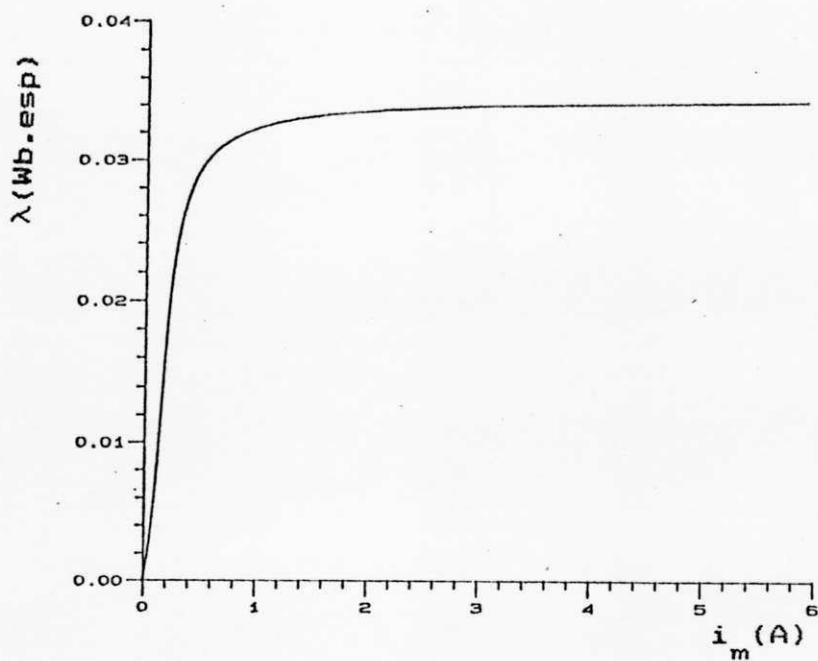


Fig. 5.1 Curva de saturação do TC de modelo reduzido.

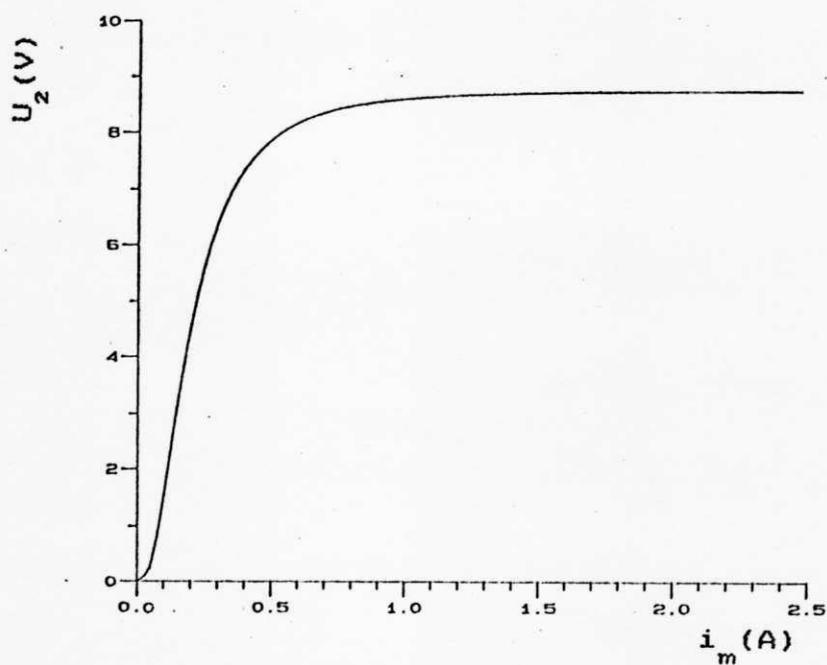


Fig. 5.2 Curva de excitação do TC de modelo reduzido.

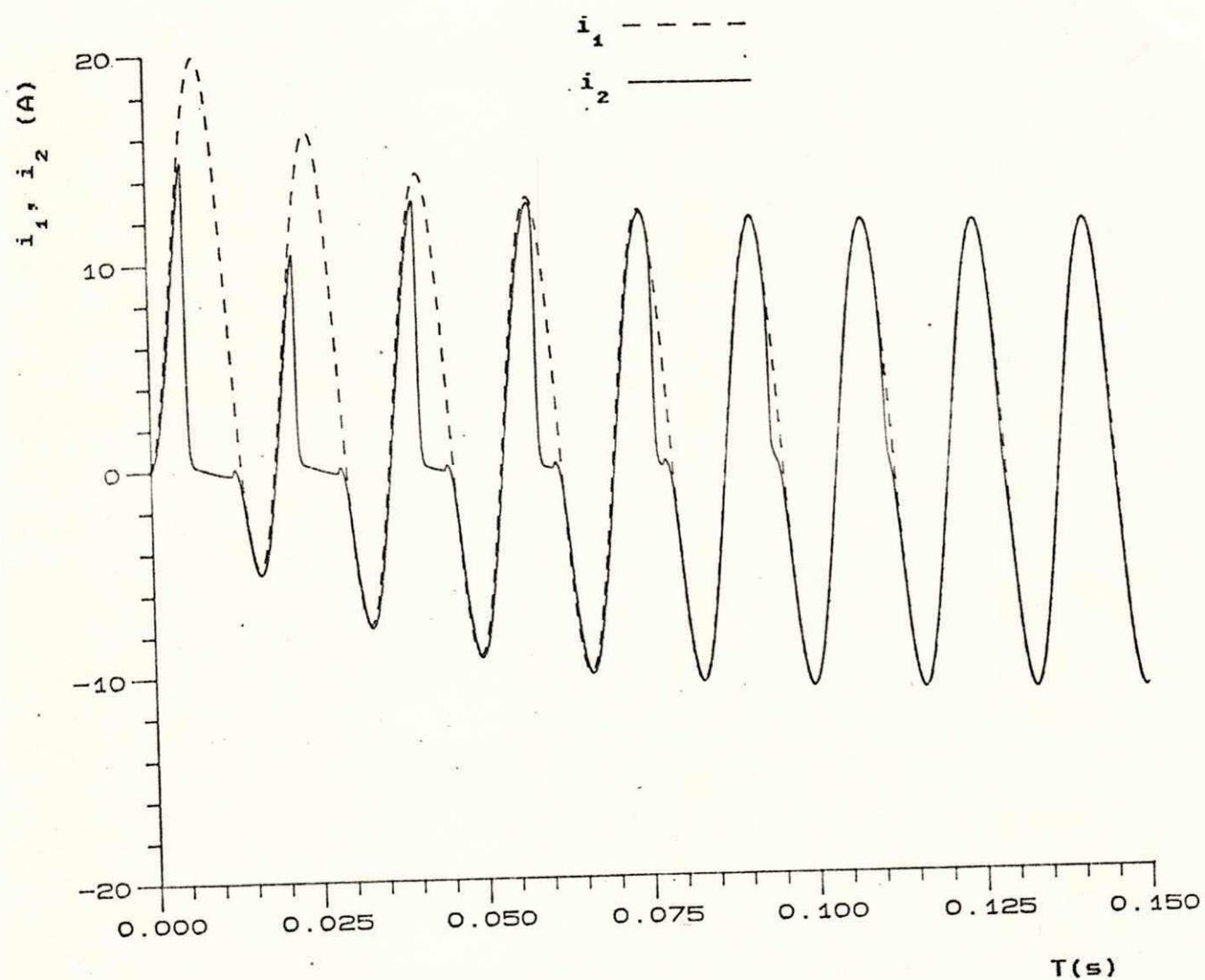


Fig. 5.3 Correntes primária e secundária - núcleo com saturação.

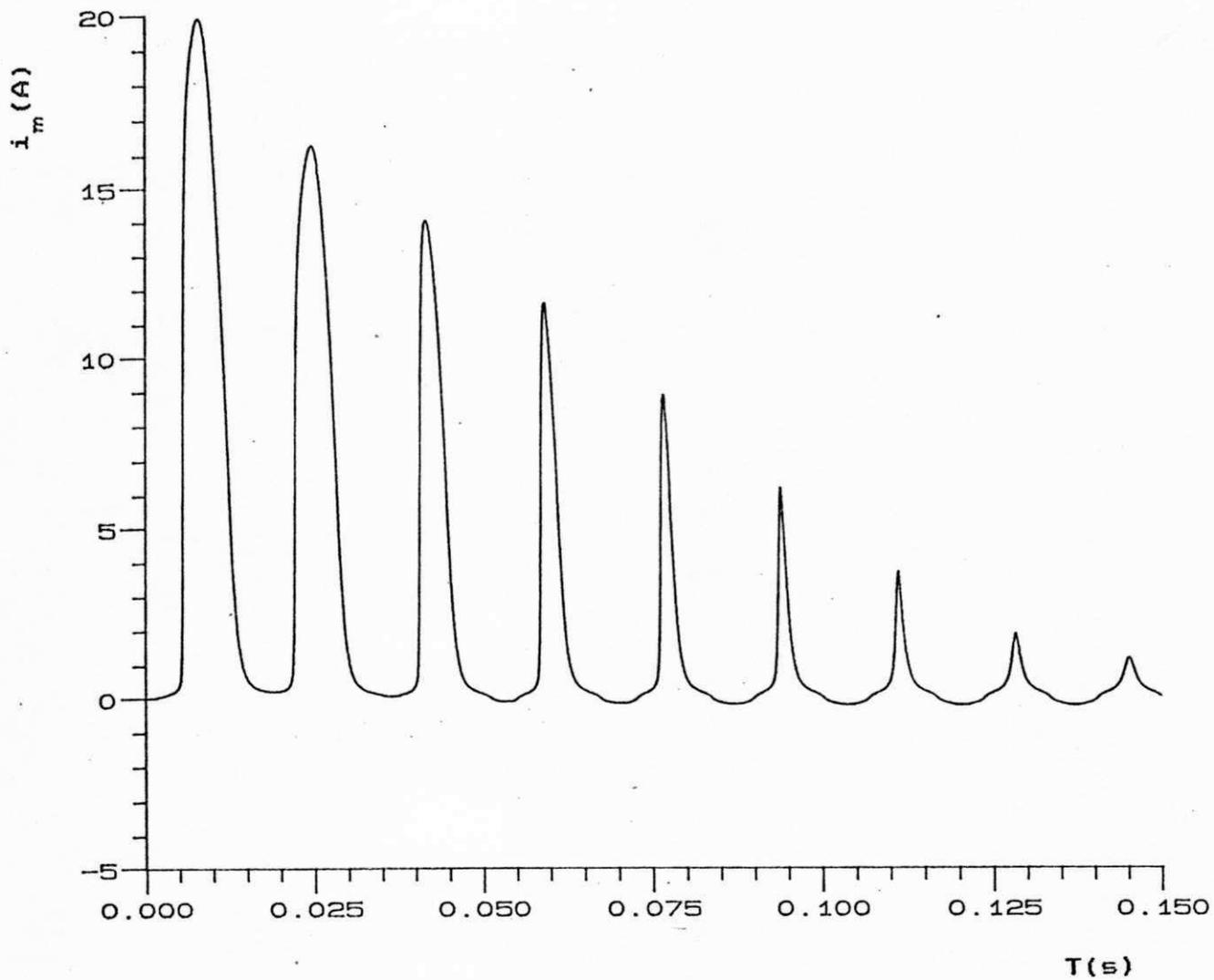


Fig. 5.4 Corrente de magnetização - núcleo com saturação.

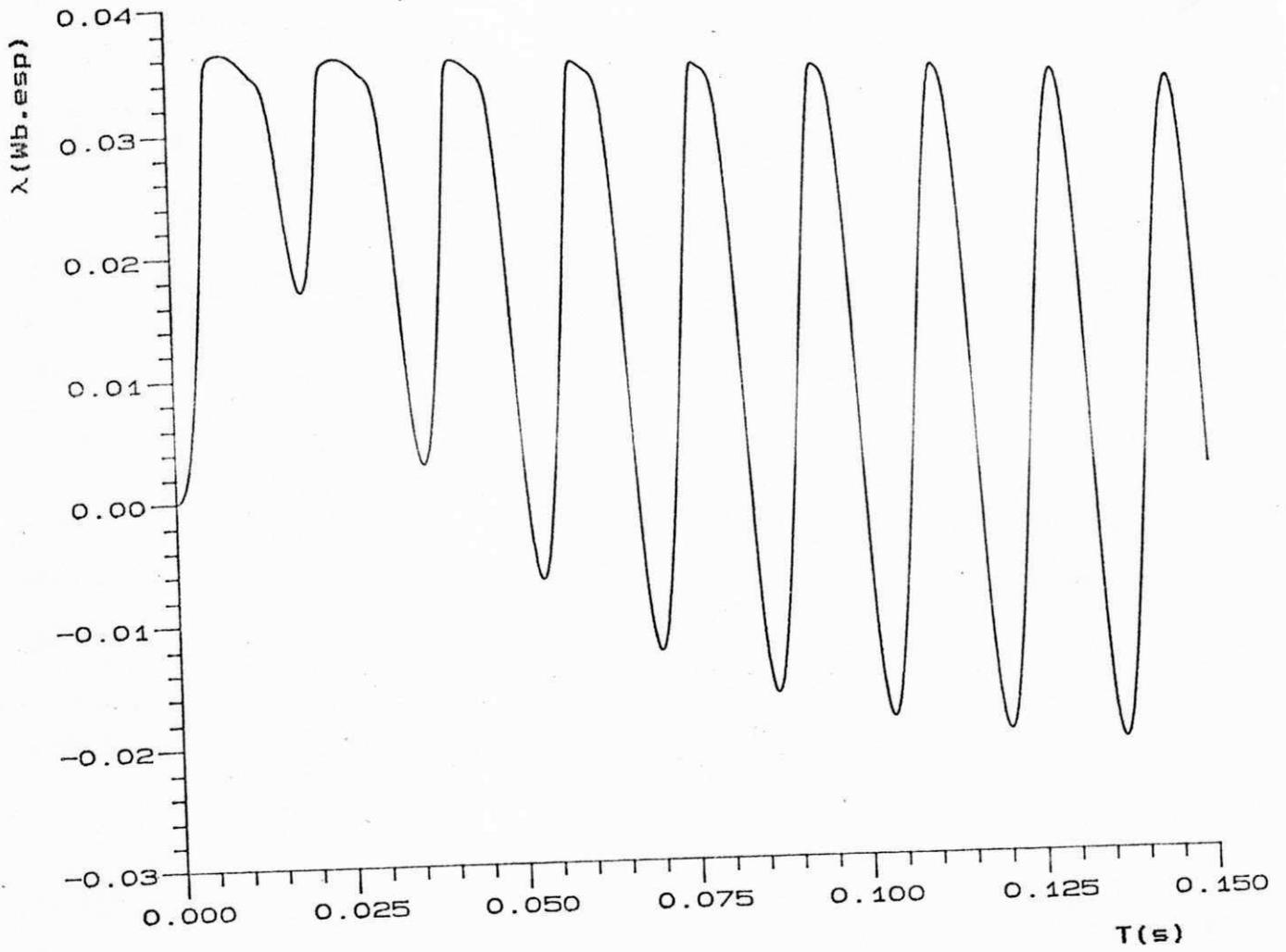
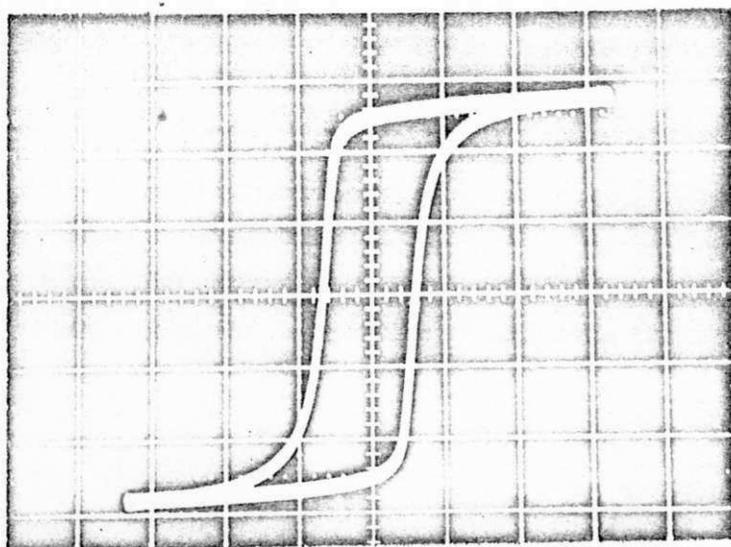


Fig. 5.5 Fluxo de enlace secundário - núcleo com saturação.



ESC. VERTICAL:
 0.012 Wb.esp/div
 ESC. HORIZONTAL:
 0.5 A/div

Fig. 5.6 Laço de histerese em 60 Hz - não compensado.

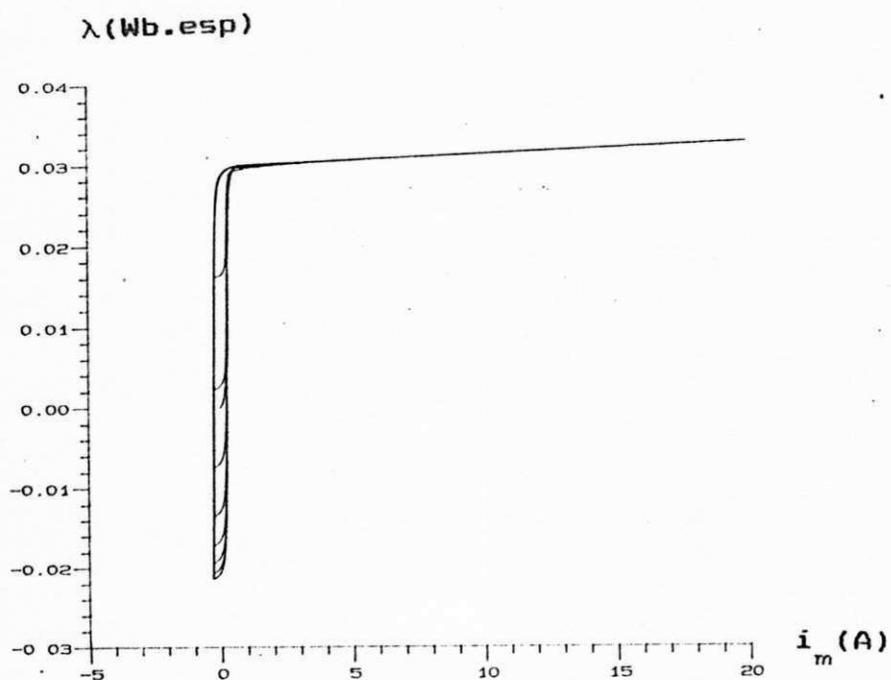


Fig. 5.7 Trajetórias assimétricas típicas da operação do núcleo em regime transitório.

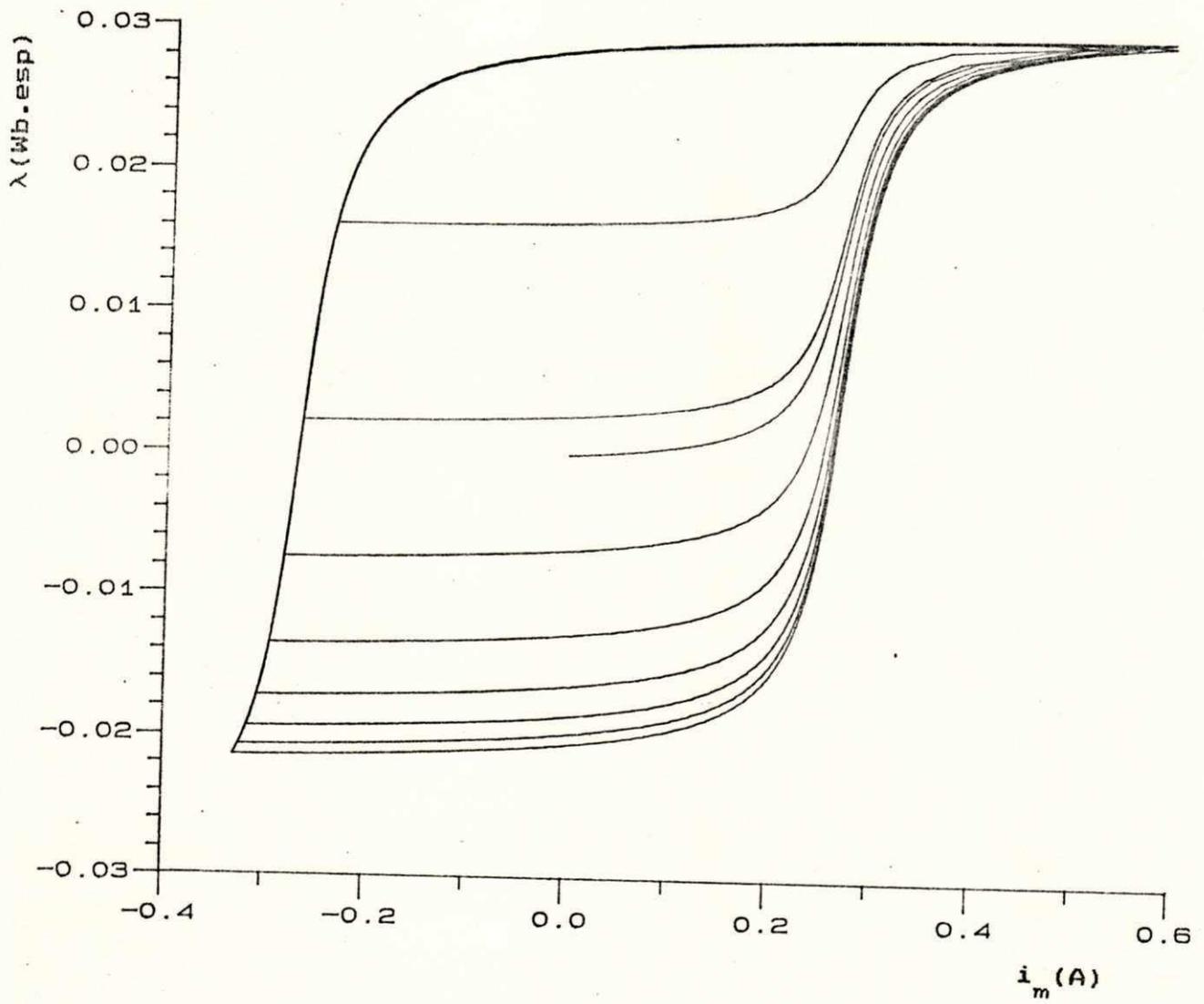


Fig. 5.8 Detalhe da Fig. 5.7 - trajetórias assimétricas contidas no ciclo limite.

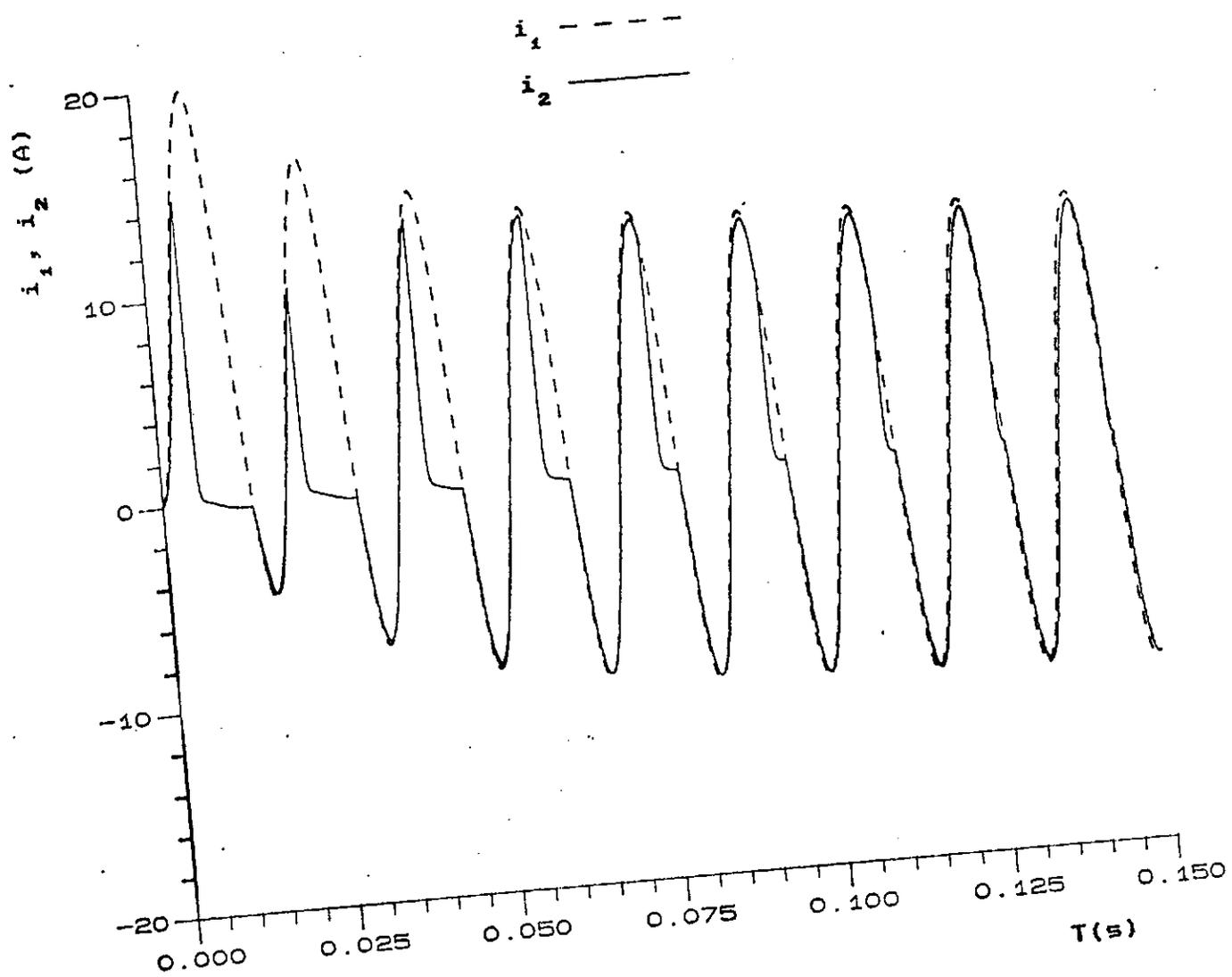


Fig. 5.9 Correntes primária e secundária - núcleo com saturação e histerese.

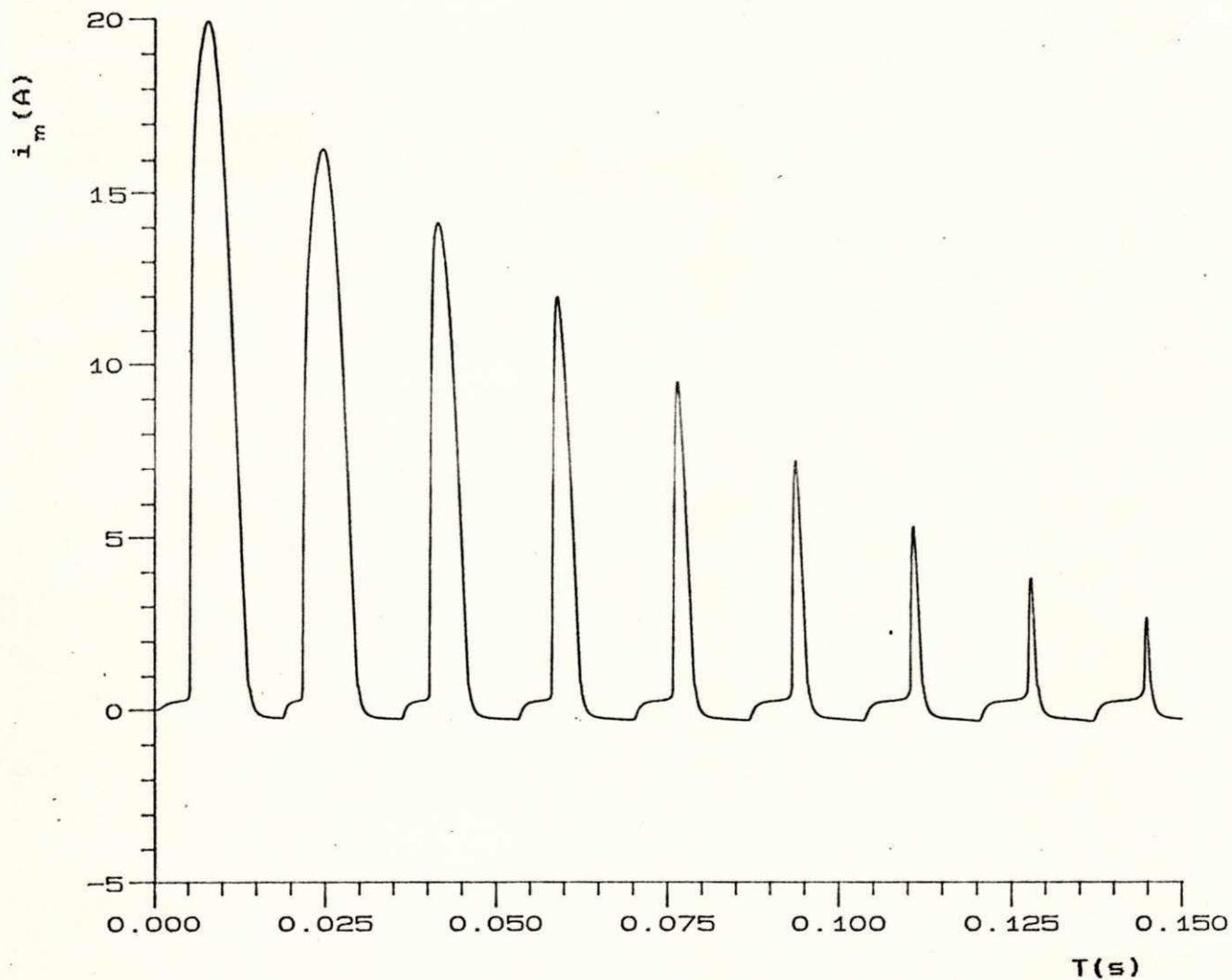


Fig. 5.10 Corrente de magnetização - núcleo com saturação e histerese.

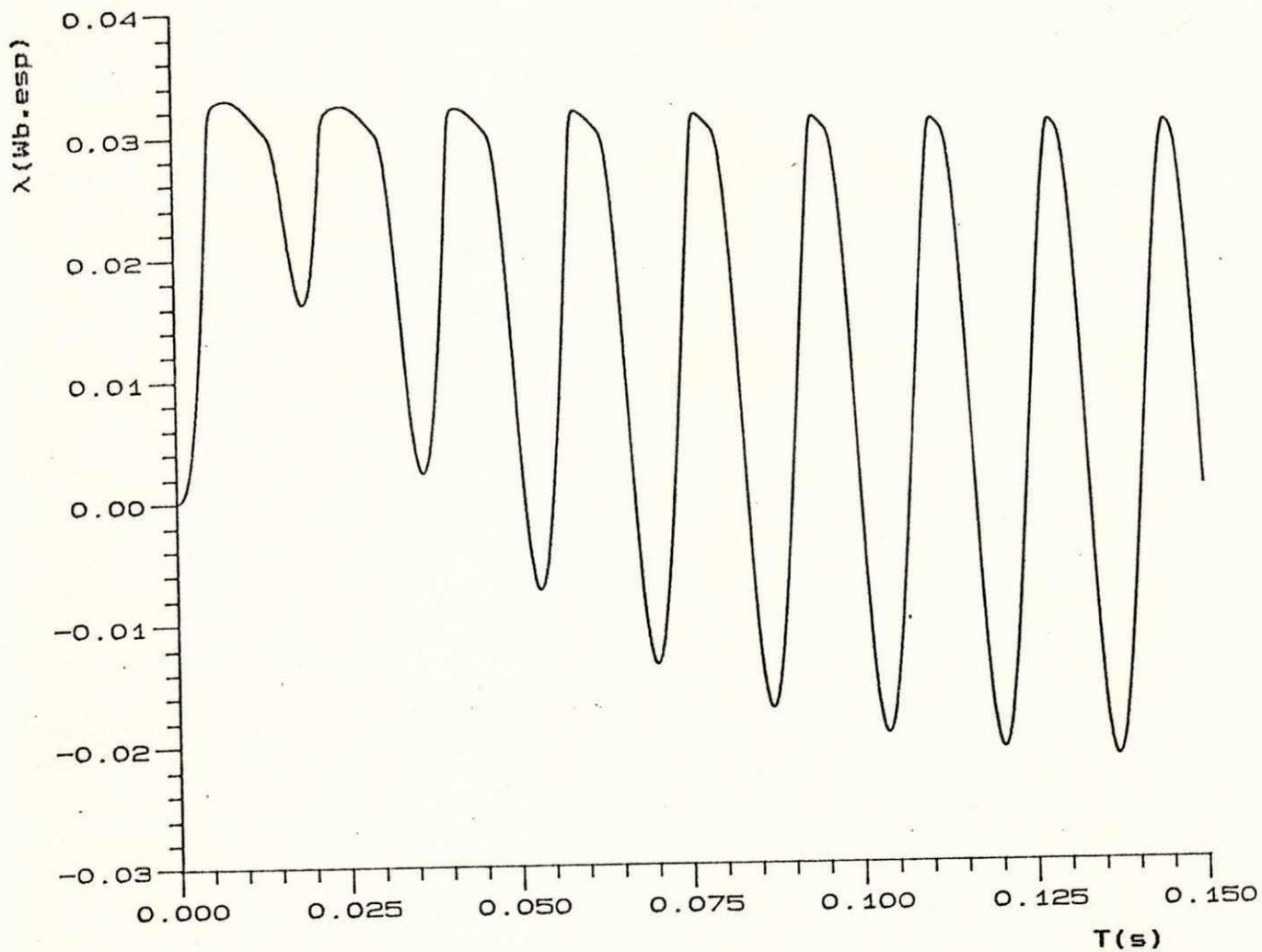


Fig. 5.11 Fluxo de enlace secundário - núcleo com saturação e histerese.

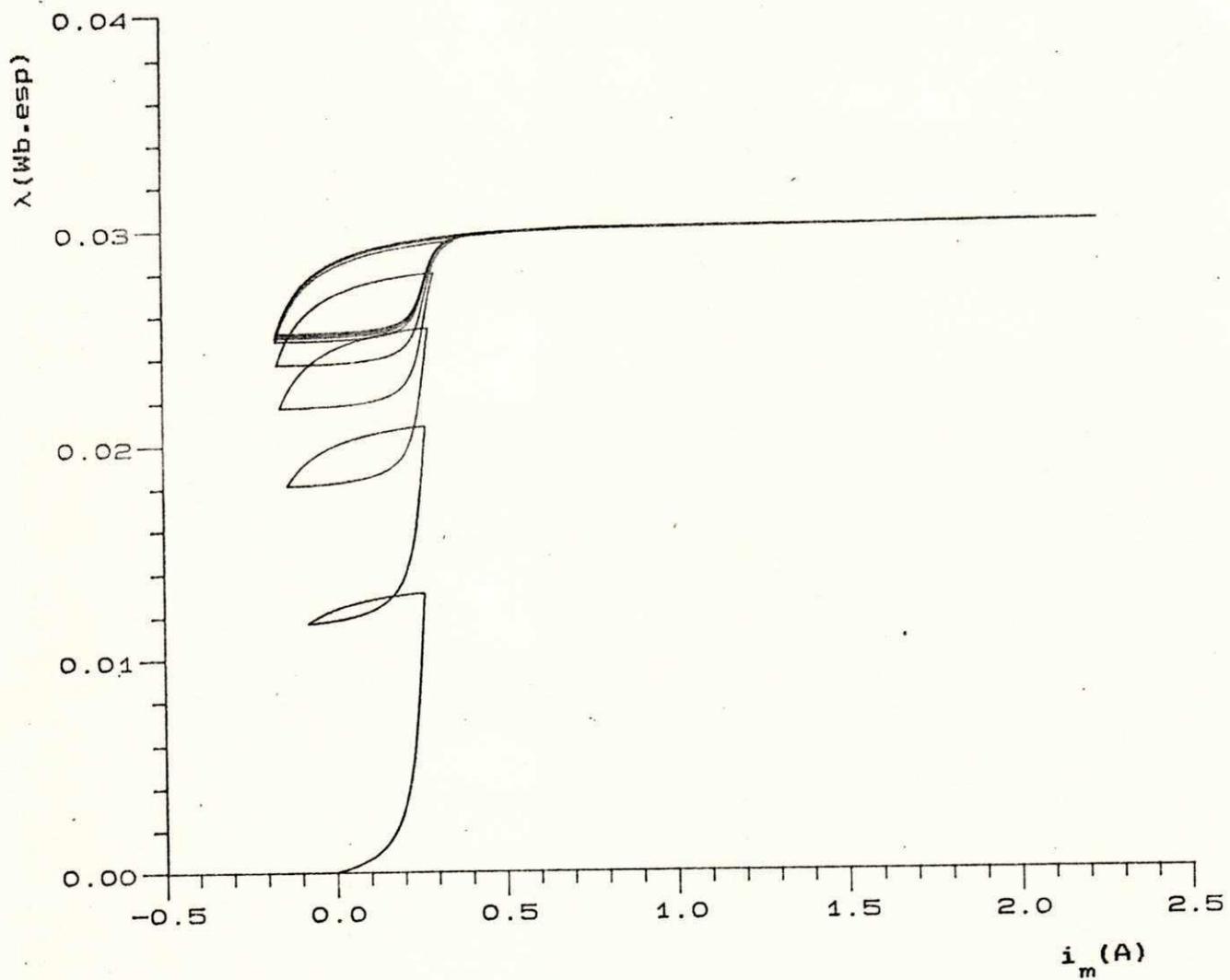
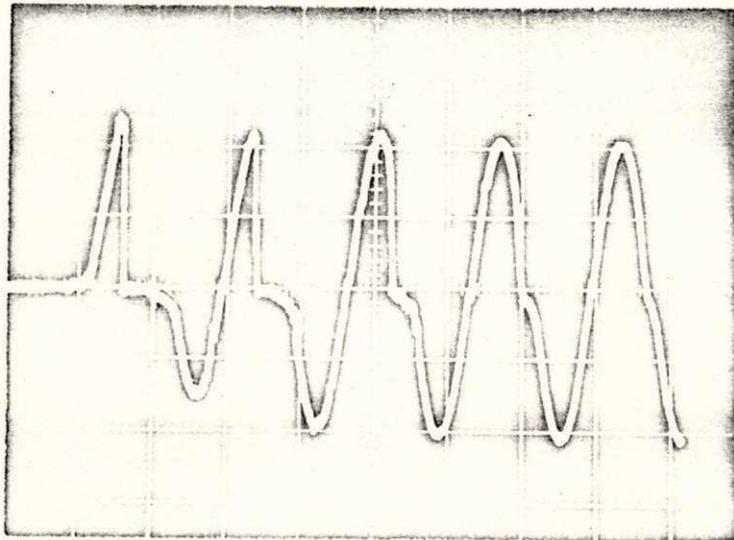
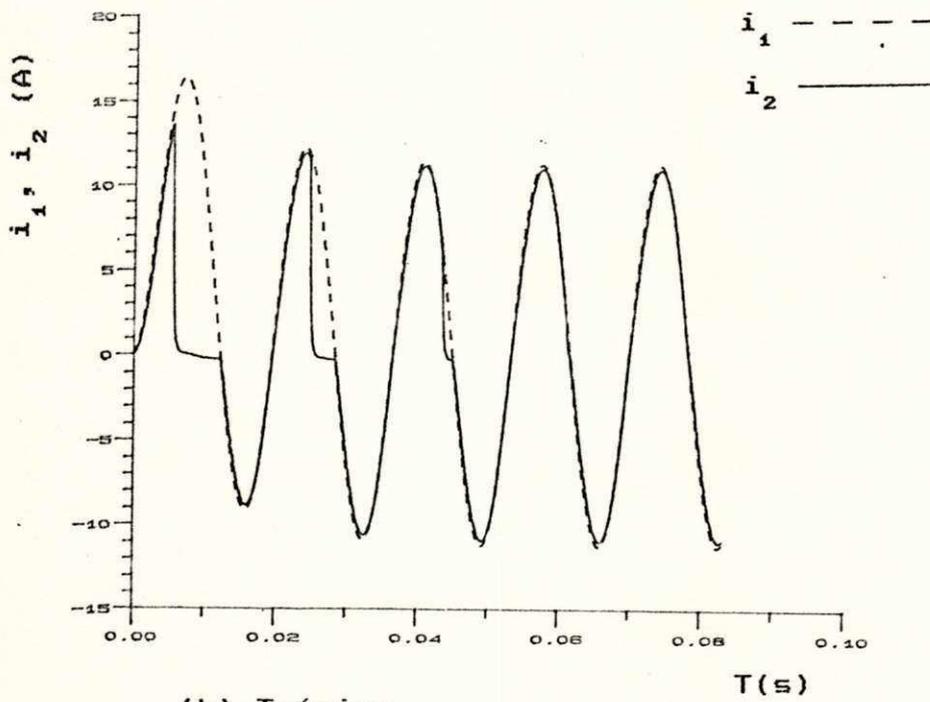


Fig. 5.12 Trajetórias assimétricas no caso de saturação menos intensa que a mostrada na Fig. 5.7.



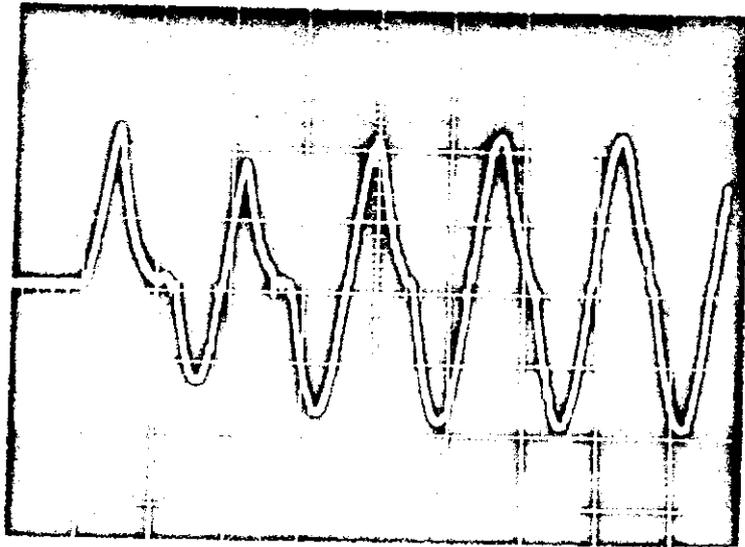
ESC. VERTICAL
5 V/div
ESC. HORIZONTAL
10 ms/div

(a) Experimental



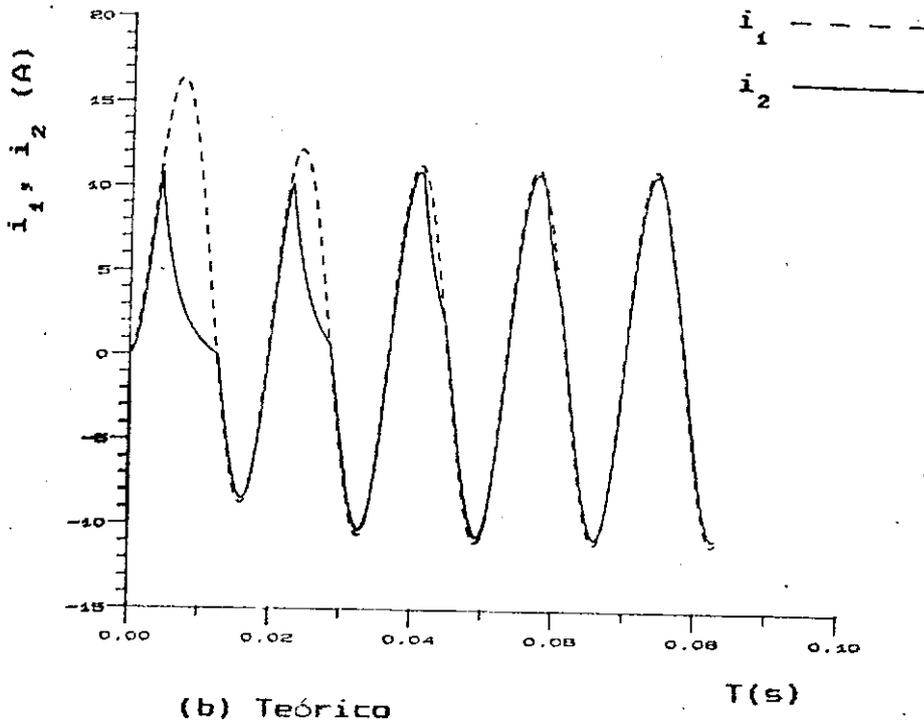
(b) Teórico

Fig. 5.13. Caso base ($\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 0^\circ \Omega$).



ESC. VERTICAL
5 V/div
ESC. HORIZONTAL
10 ms/div

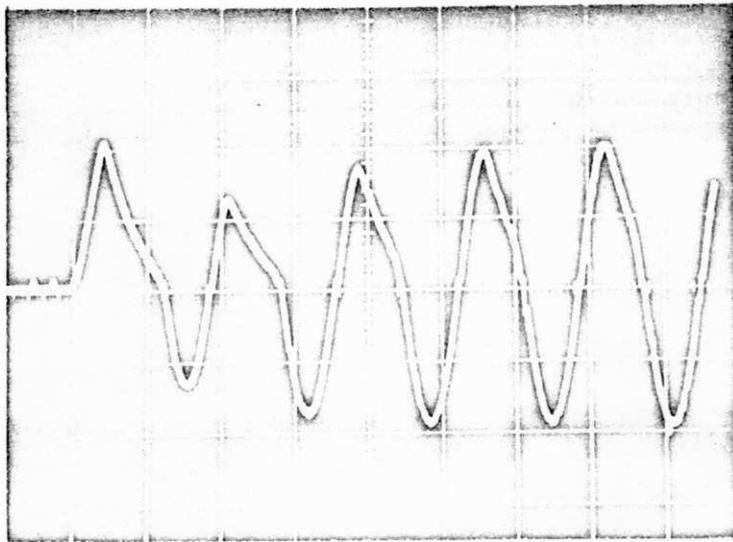
(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.14 Influência da relação X/R da carga secundária -

$$(\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 32.2^\circ \Omega).$$



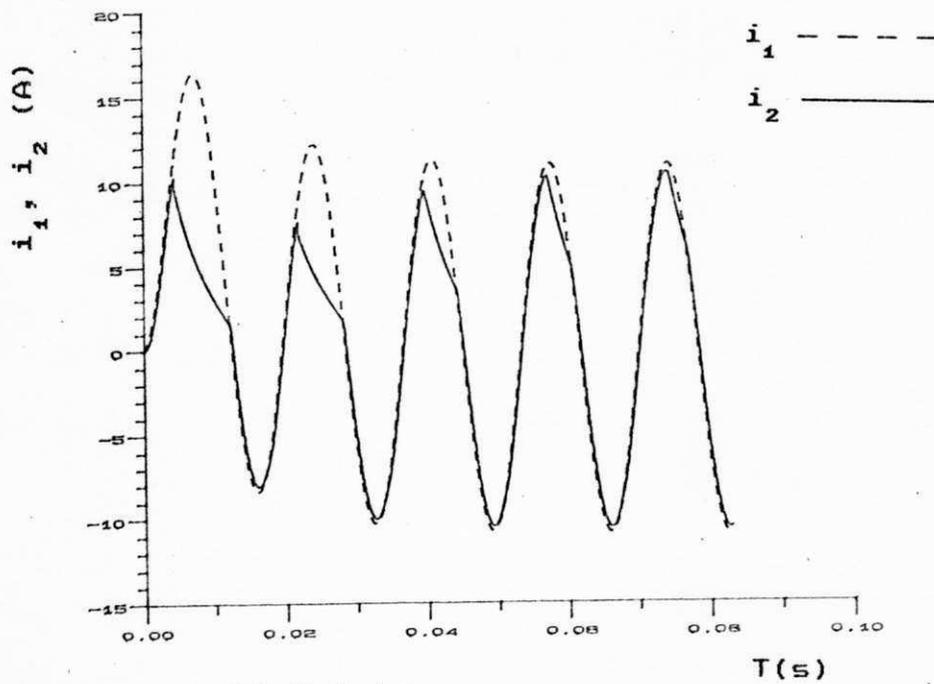
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

10 ms/div

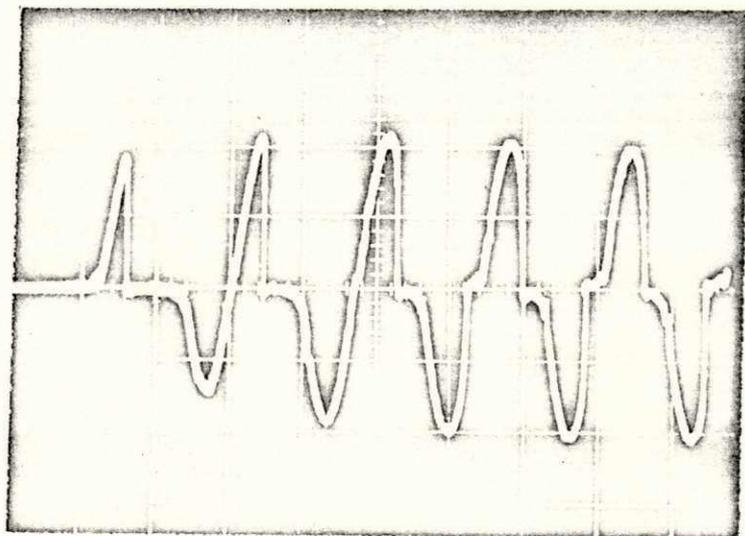
(a) Experimental



(b) Teórico

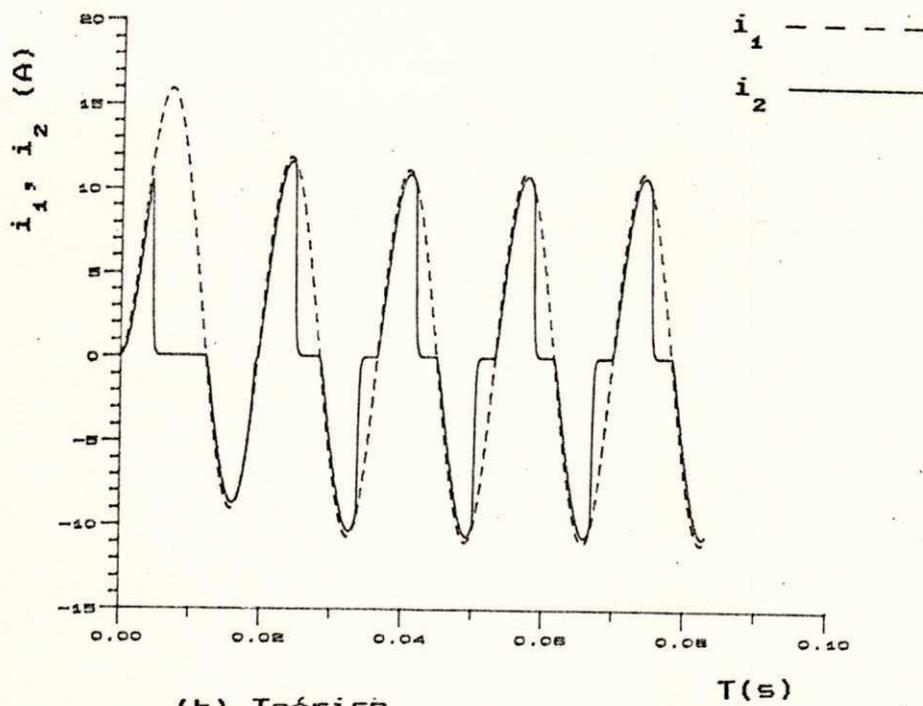
Fig. 5.15 Influência da relação X/R da carga secundária --

$$\hat{Z}_2 = 0.90 \angle 57^\circ \Omega.$$



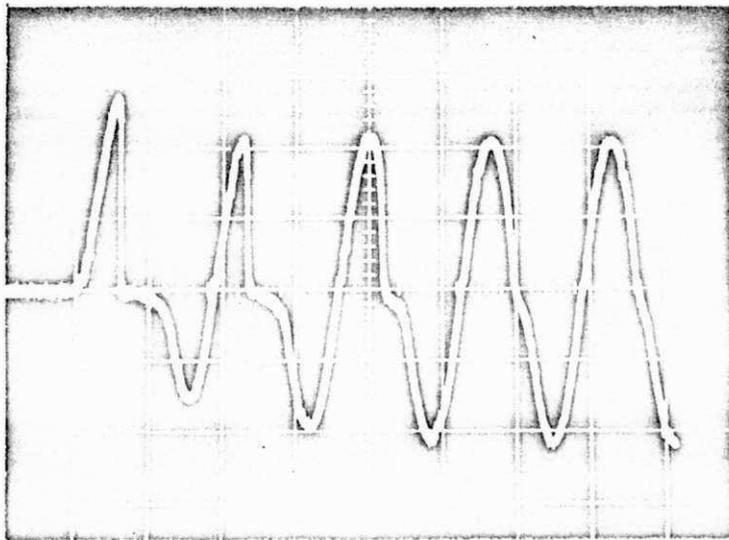
ESC. VERTICAL
5 V/div
ESC. HORIZONTAL
10 ms/div

(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.16 Influência do módulo da impedância secundária -
($\hat{Z}_2 = 1.50 \angle 0^\circ \Omega$).



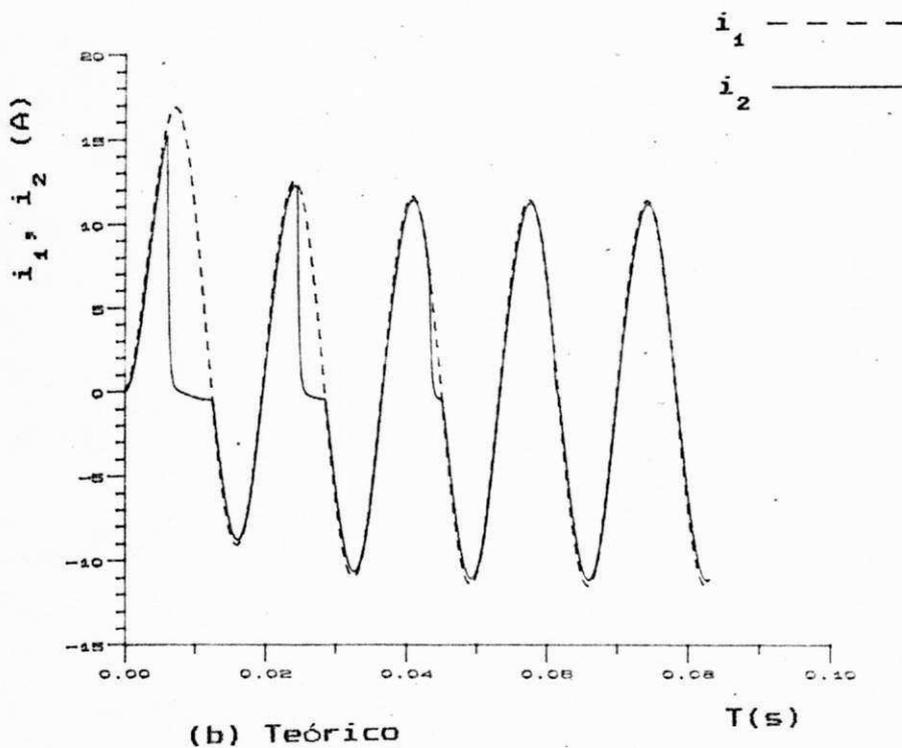
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

10 ms/div

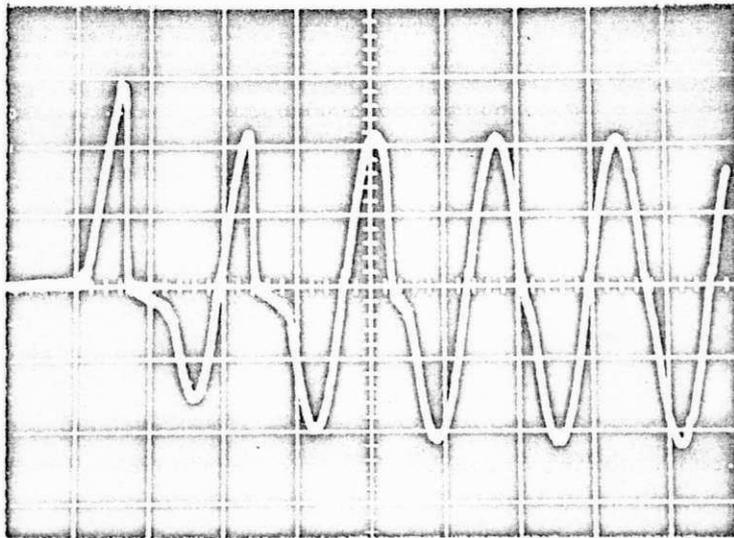
(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.17 Influência do módulo da impedância secundária -

$$(\hat{Z}_2 = 0.70 \angle 0^\circ \Omega).$$



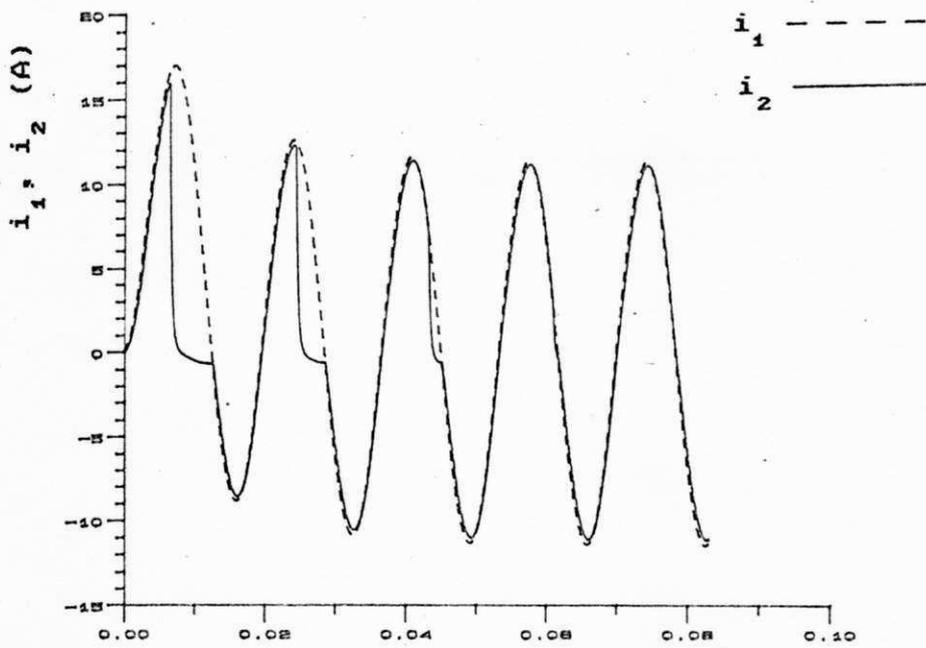
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

10 ms/div

(a) Experimental

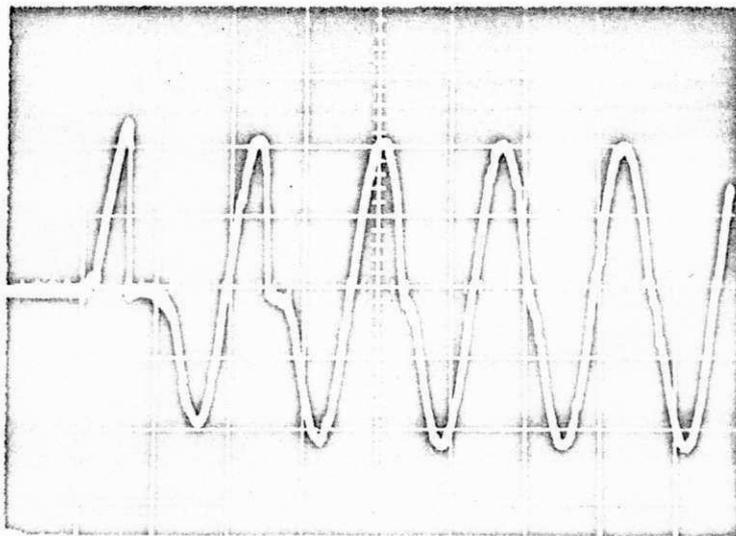


(b) Teórico

T(s)

Fig. 5.18 Influência do módulo da impedância secundária -

$$(\hat{Z}_2 = 0.60 \angle 0^\circ \Omega).$$



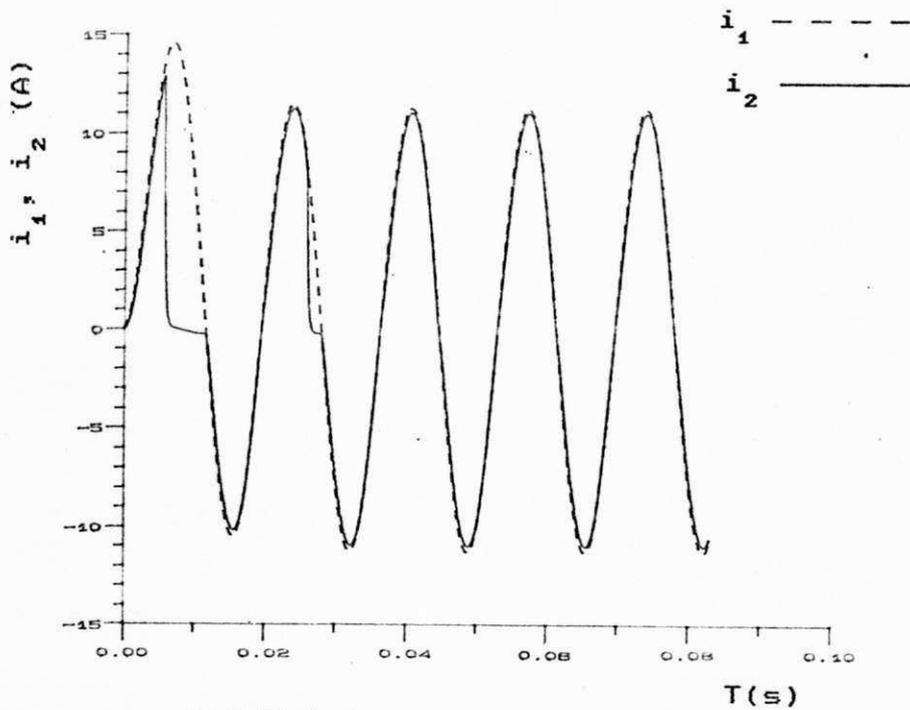
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

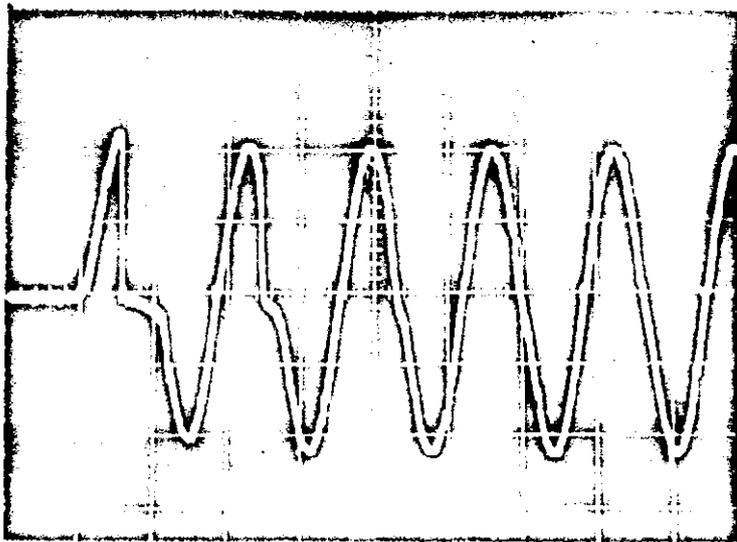
10 ms/div

(a) Experimental

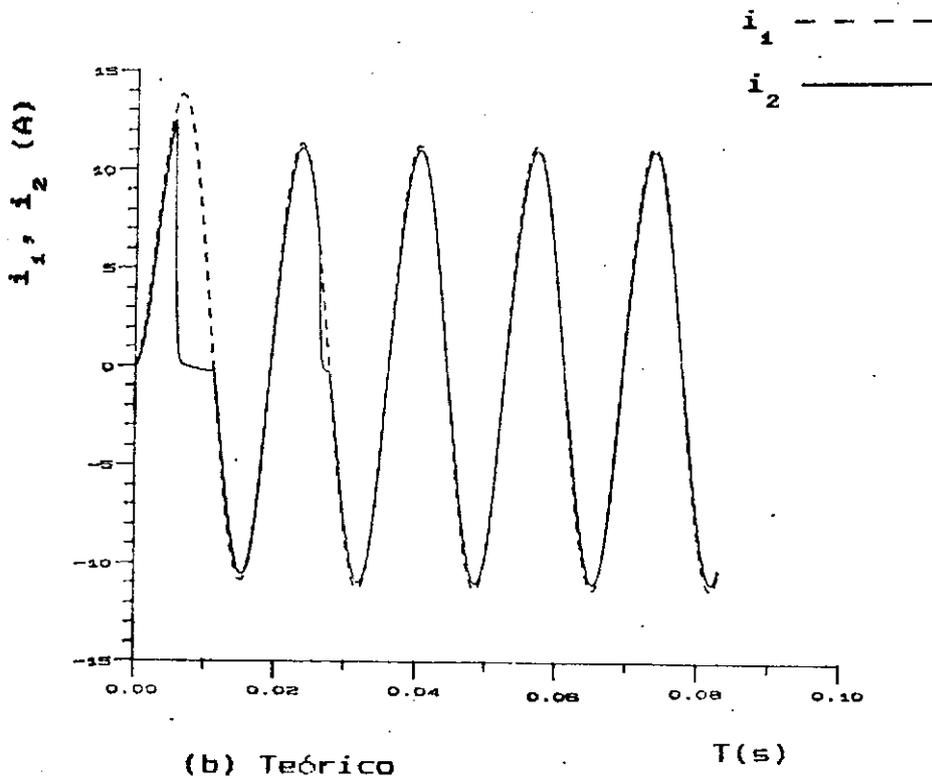


(b) Teórico

Fig. 5.19 Influência da constante de tempo do sistema .
primário - $T_1 = 6.2$ ms.

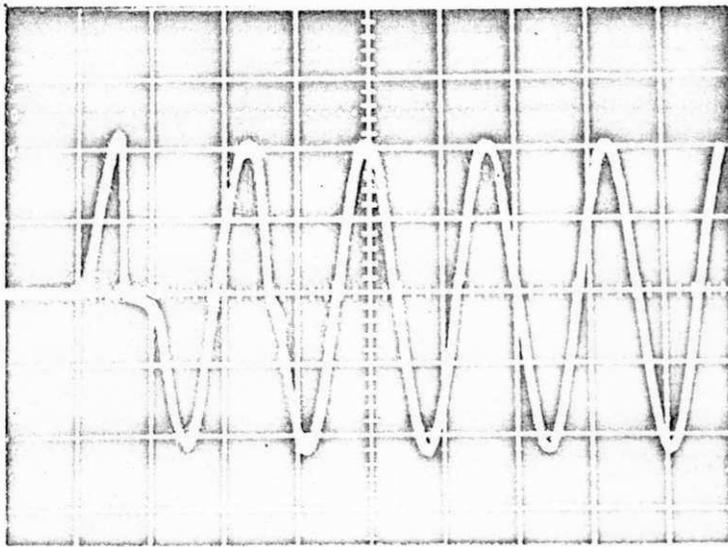


(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.20 Influência da constante de tempo do sistema primário - $T_1 = 5.0$ ms.



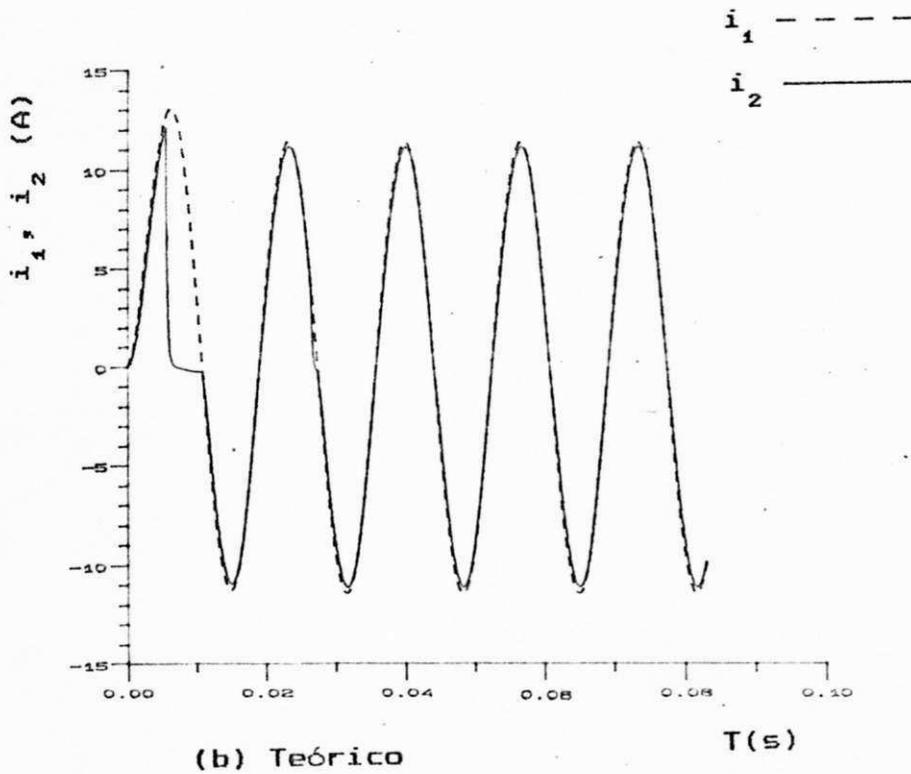
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

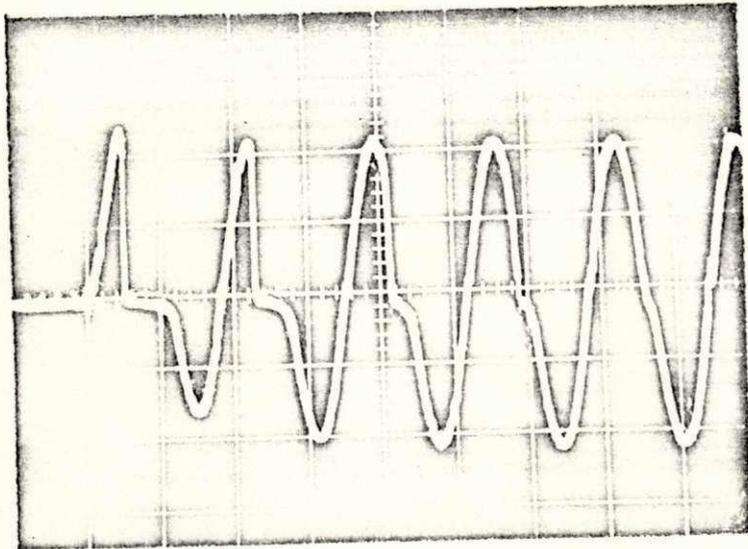
10 ms/div

(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.21 Influência da constante de tempo do sistema primário - $T_1 = 3.8$ ms.



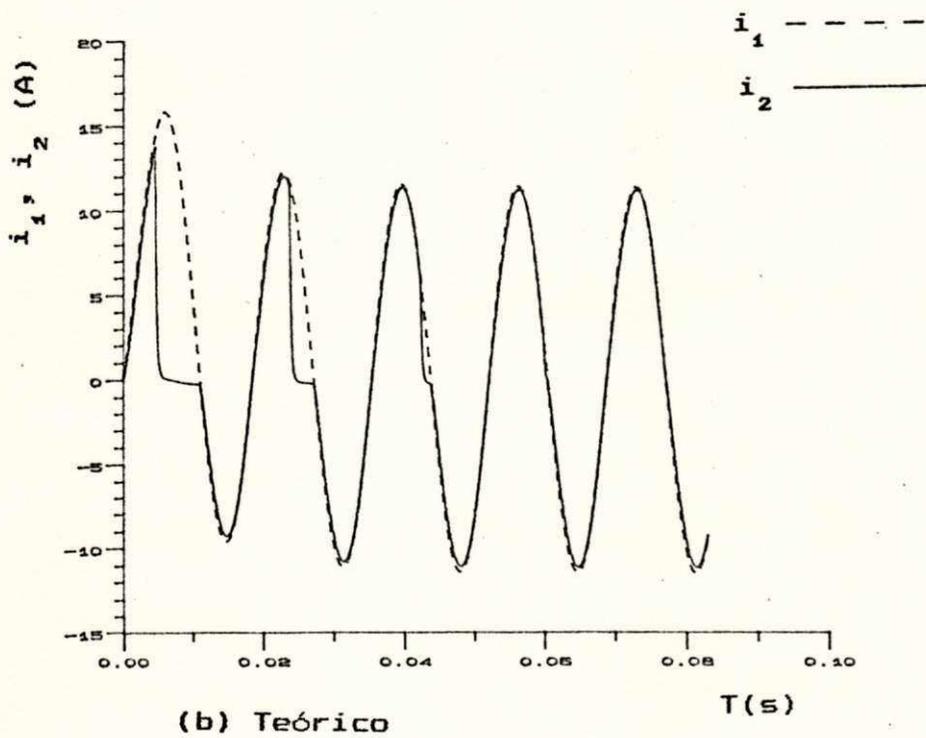
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

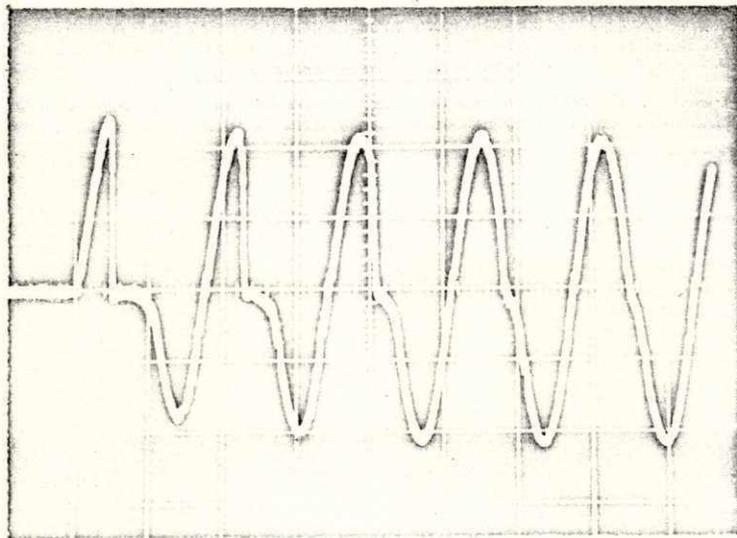
10 ms/div

(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.22 Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 30^\circ$.



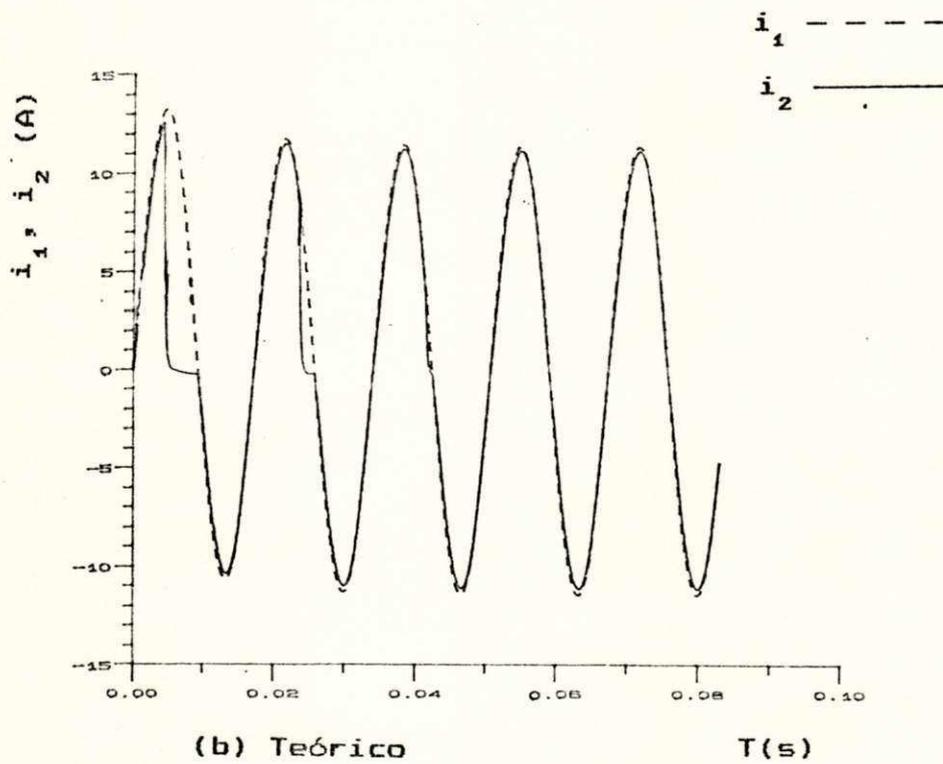
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

10 ms/div

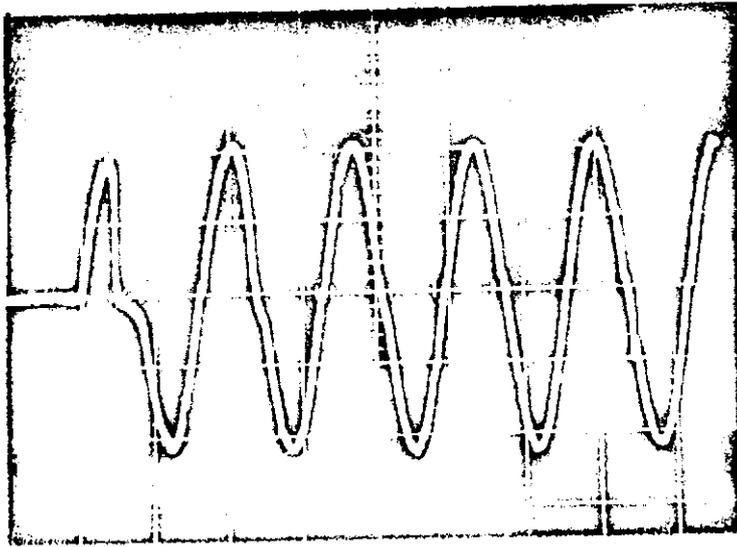
(a) Experimental



(b) Teórico

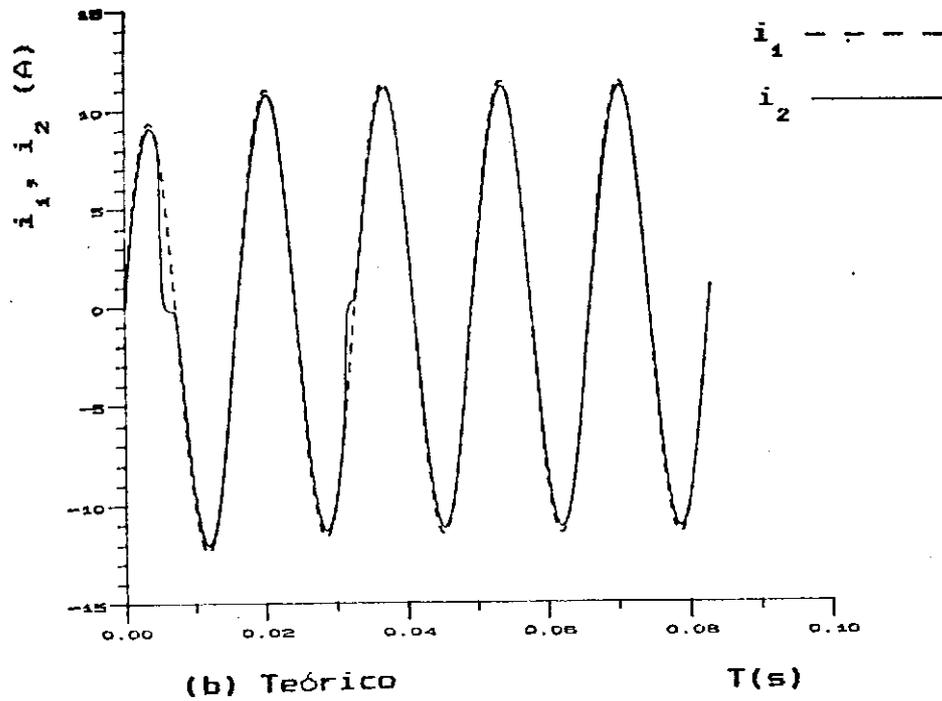
T(s)

Fig. 5.23 Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 60^\circ$.



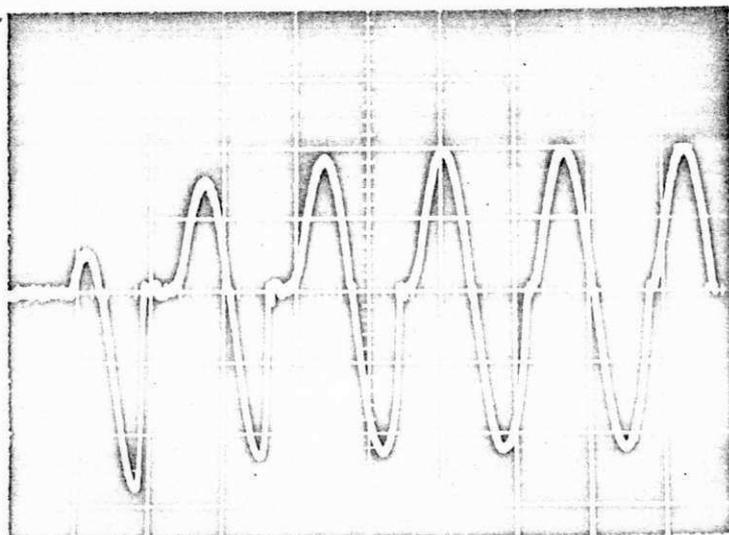
ESC. VERTICAL
5 V/div
ESC. HORIZONTAL
10 ms/div

(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.24 Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 90^\circ$.



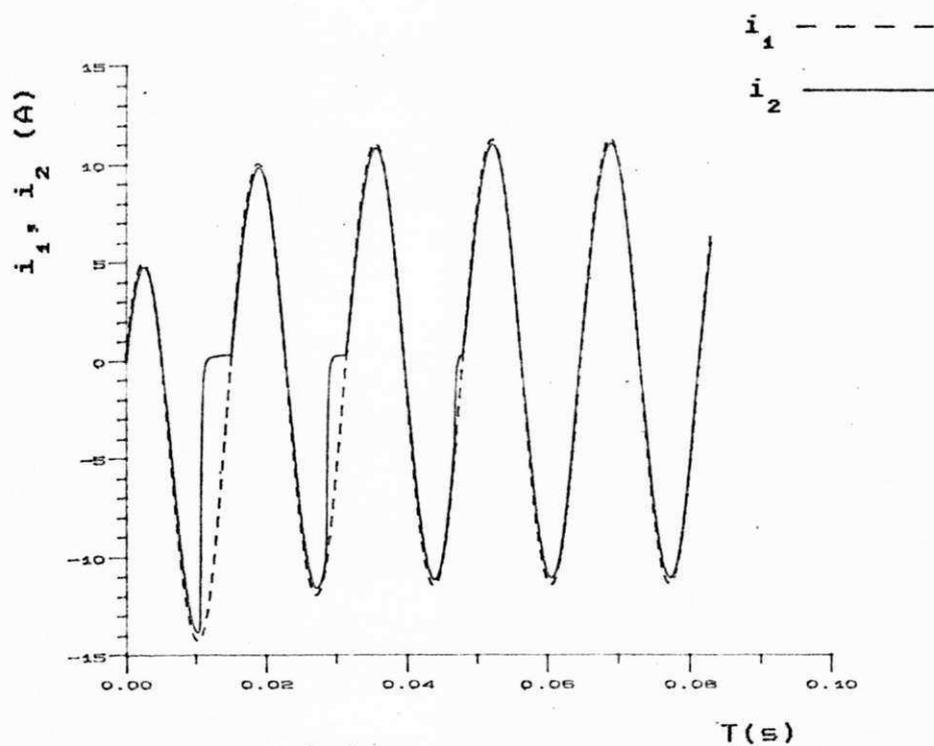
ESC. VERTICAL

5 V/div

ESC. HORIZONTAL

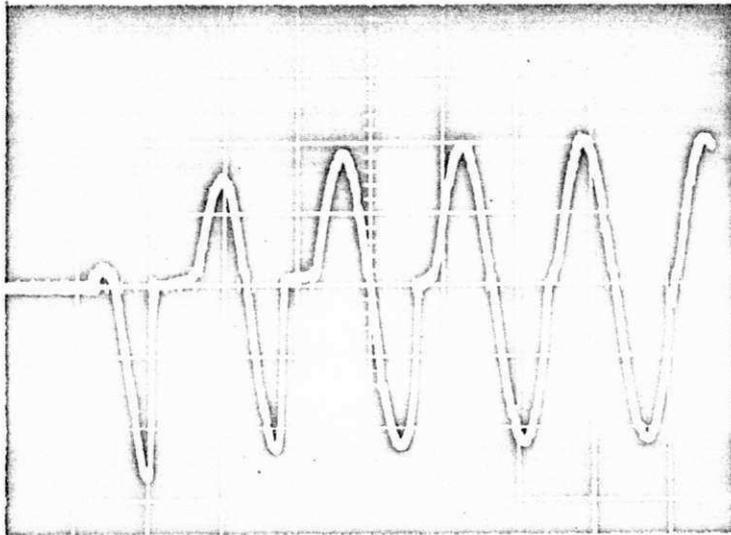
10 ms/div

(a) Experimental



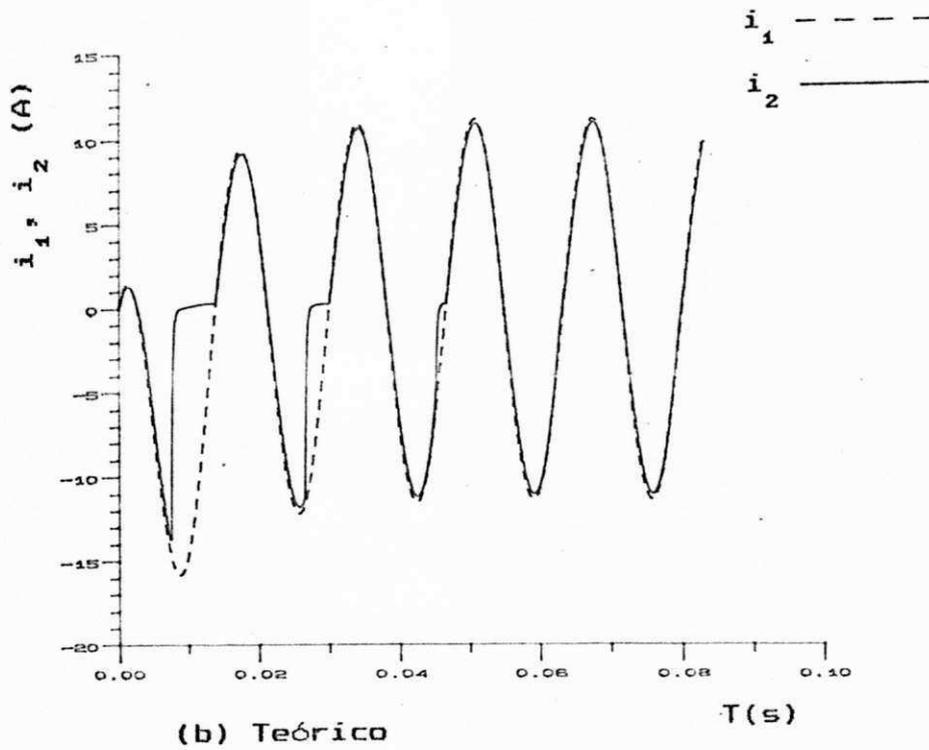
(b) Teórico

Fig. 5.25 Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 120^\circ$.



ESC. VERTICAL
5 V/div
ESC. HORIZONTAL
10 ms/div

(a) Experimental



(b) Teórico

Fig. 5.26 Influência do ângulo de chaveamento - $\phi = 150^\circ$.

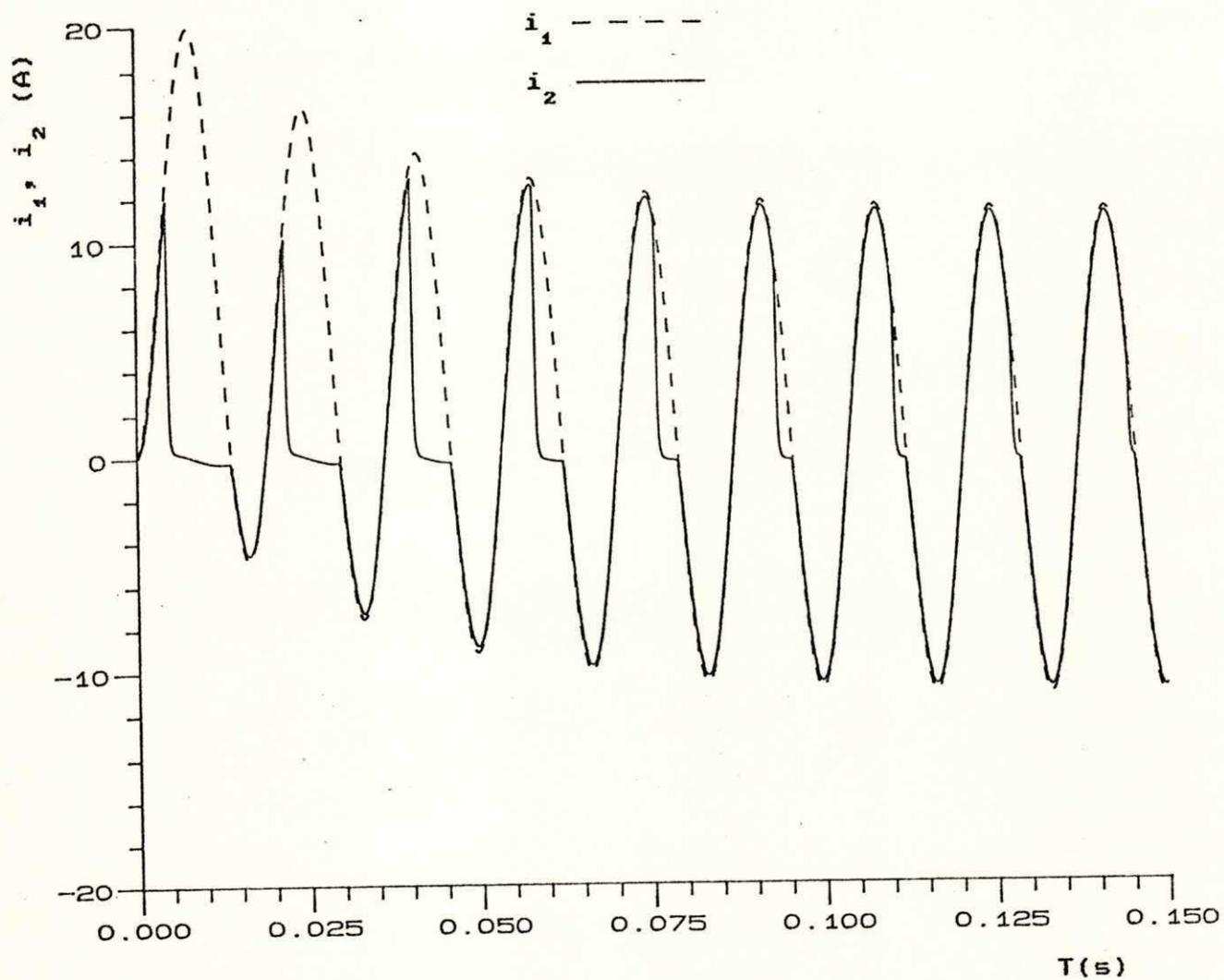


Fig. 5.27 Influência do fluxo residual no núcleo -
 $\lambda(0) = 30 \% \lambda_s$.

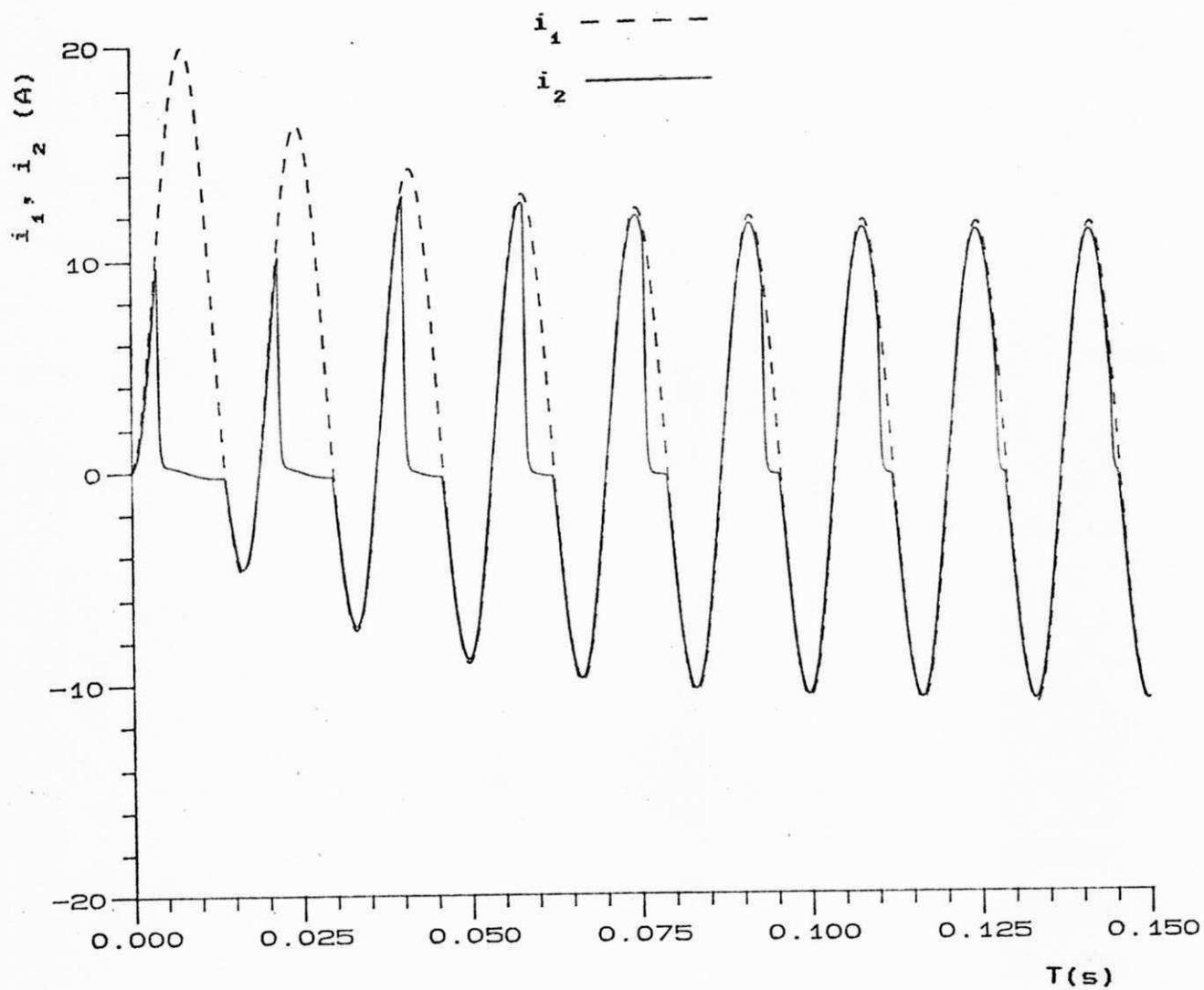


Fig. 5.28 Influência do fluxo residual no núcleo -
 $\lambda(0) = 50 \% \lambda_g$.

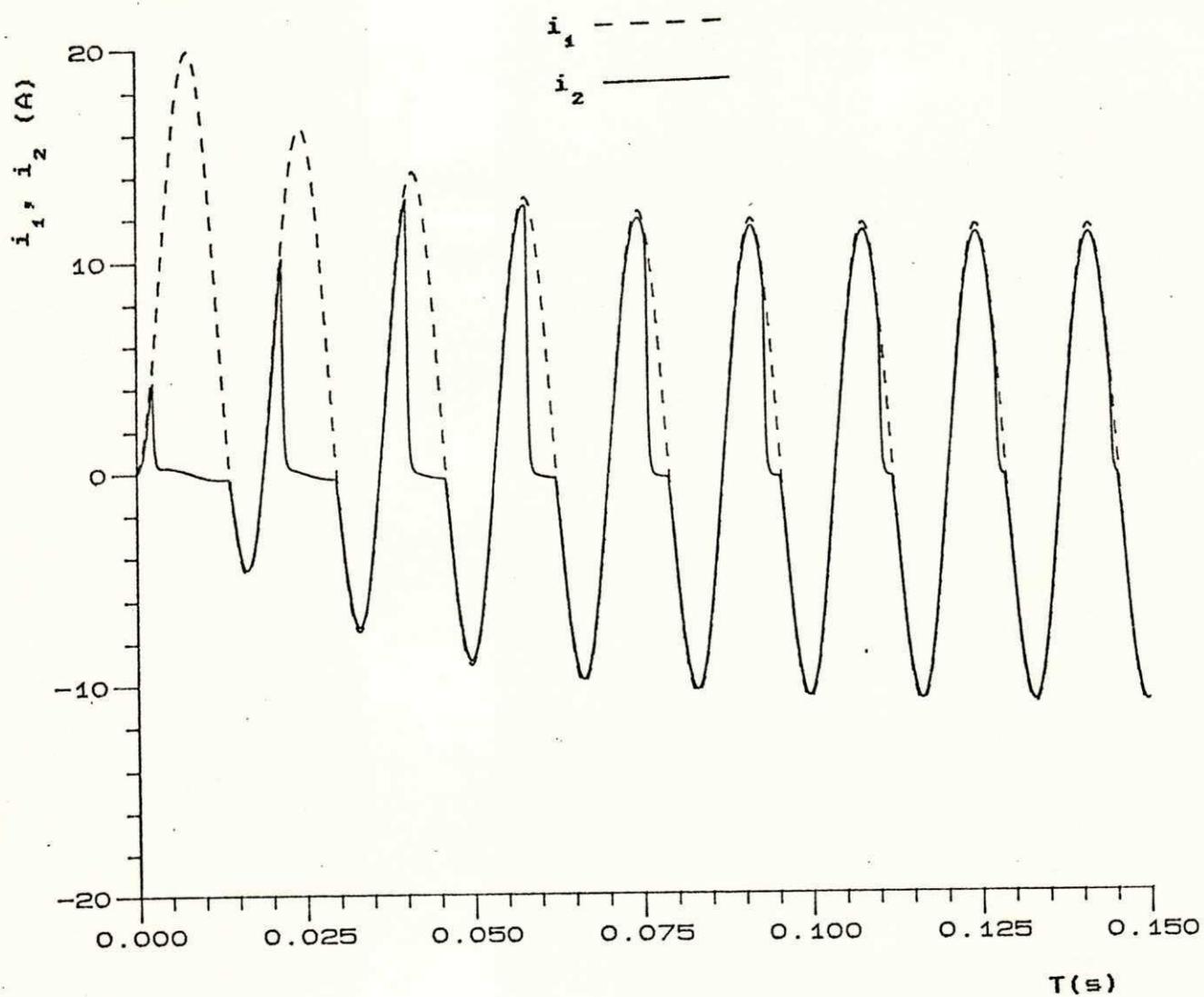


Fig. 5.29 Influência do fluxo residual no núcleo -
 $\lambda(0) = 80 \% \lambda_s$.

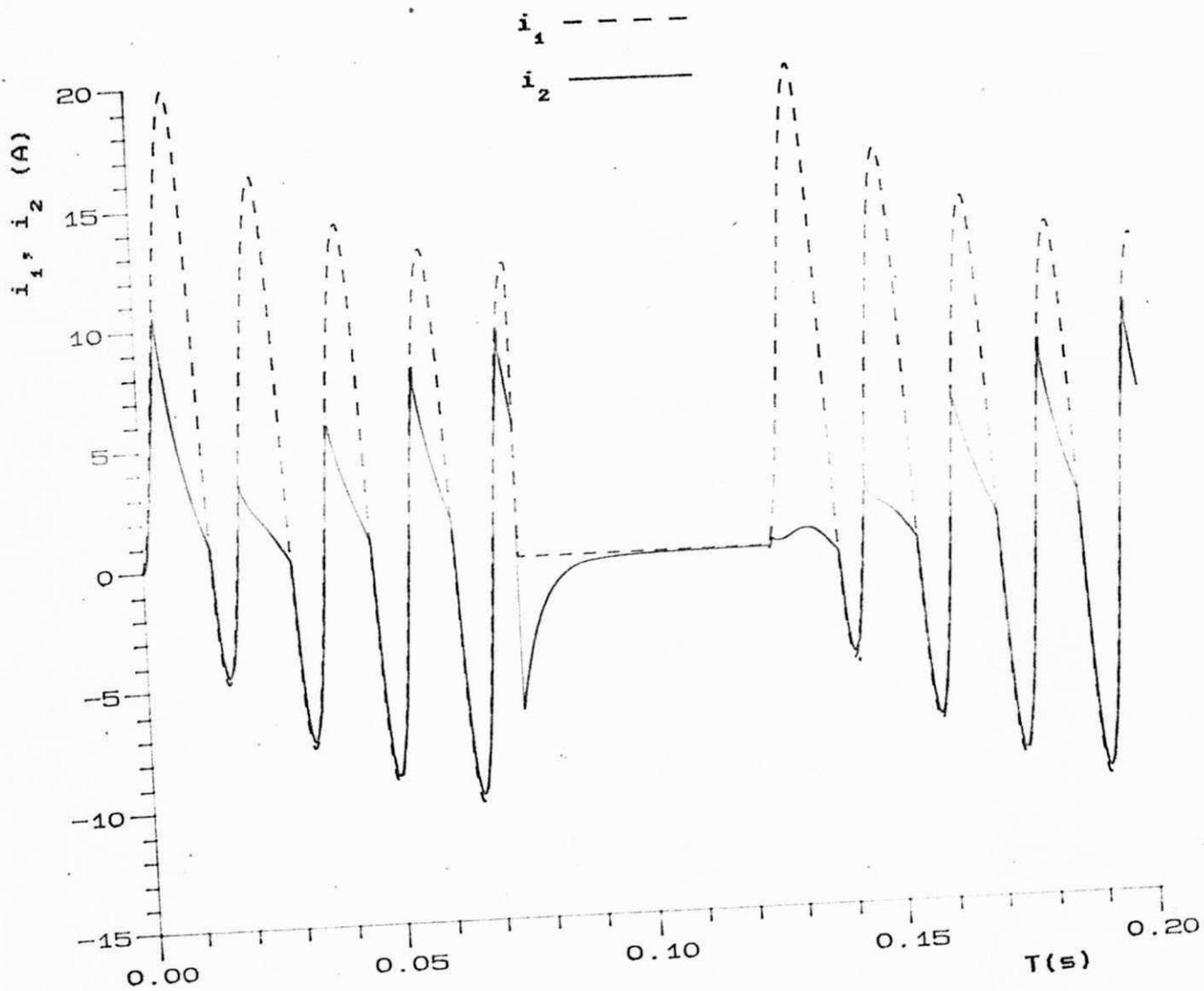


Fig. 5.30 Influência do fluxo residual - religamento automático - correntes primária e secundária superpostas.

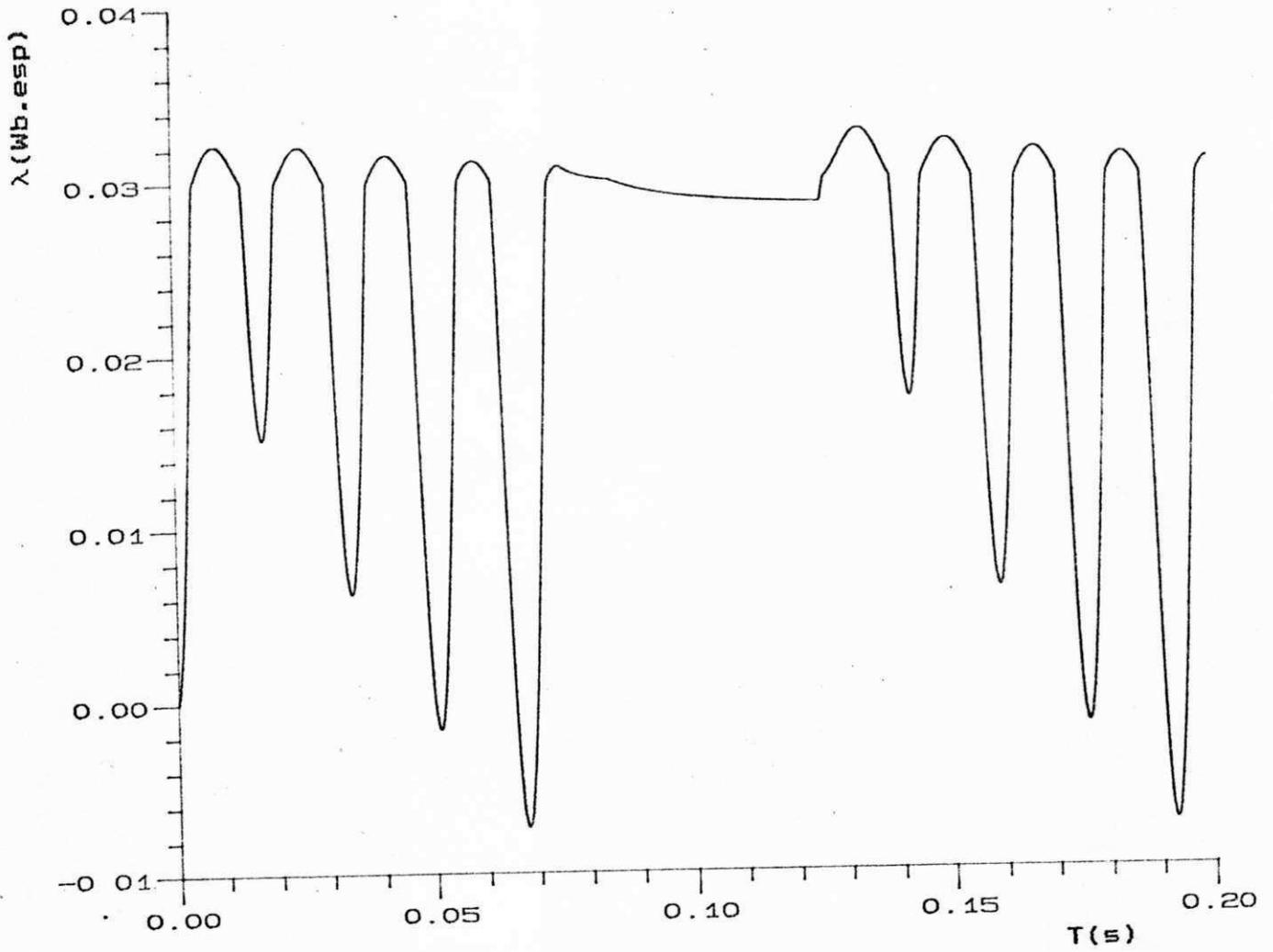


Fig. 5.31 Influência do fluxo residual - religamento automático-fluxo de enlace.

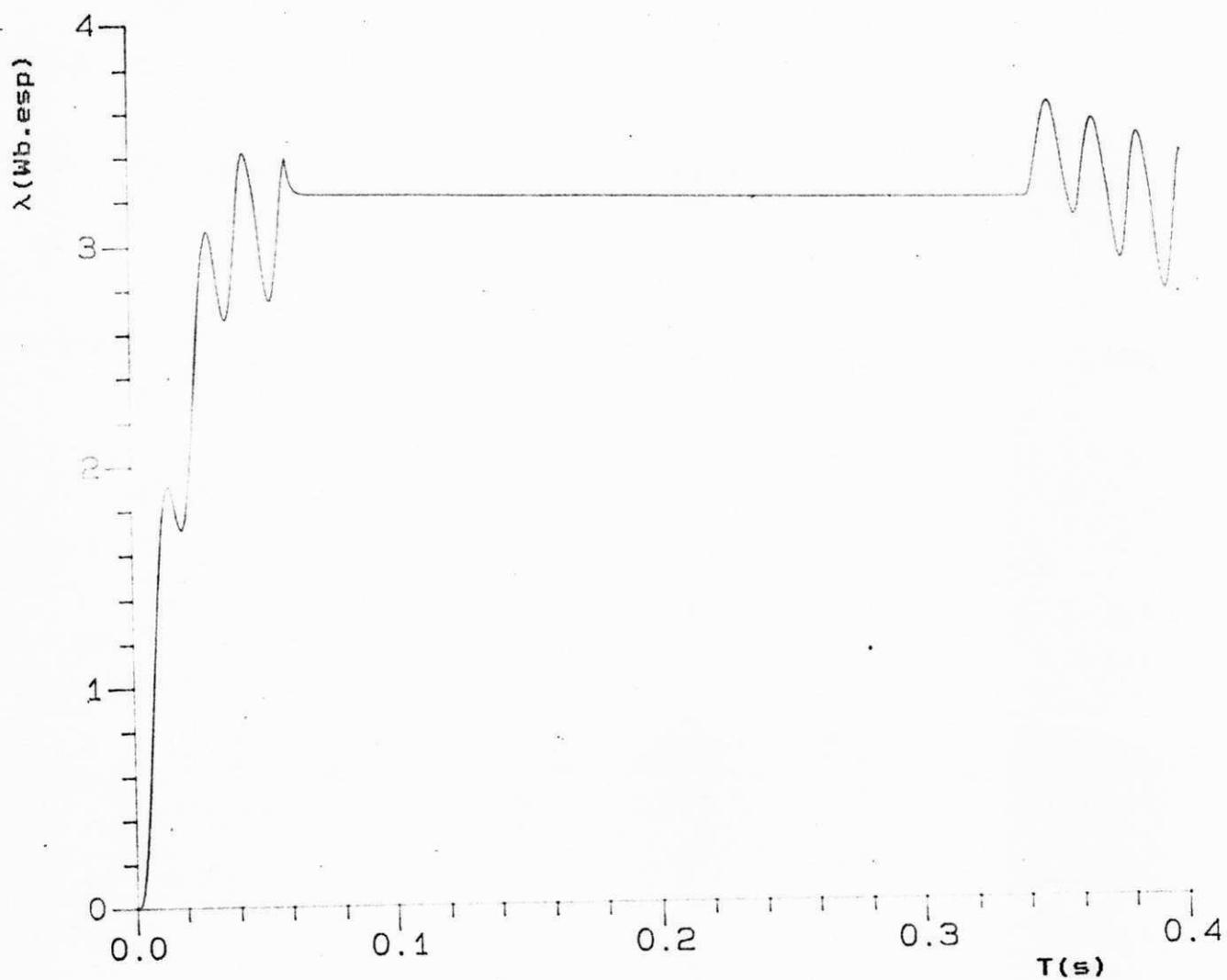


Fig. 5.32 Religamento automático - TC de 245 KV sem entreferro-fluxo de enlace.

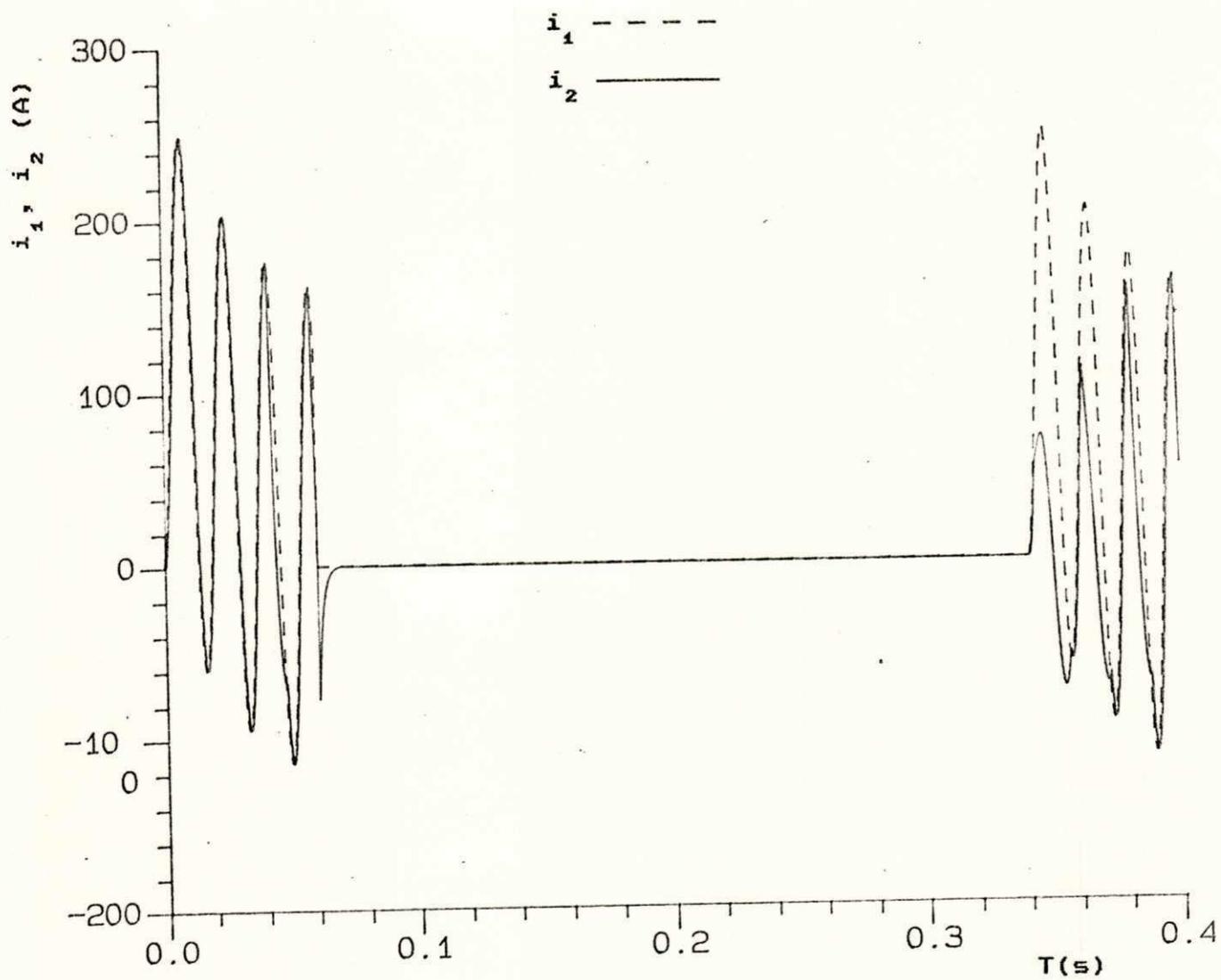


Fig. 5.33 Religamento automático - TC de 245 KV sem entreferro correntes primária e secundária superpostas.

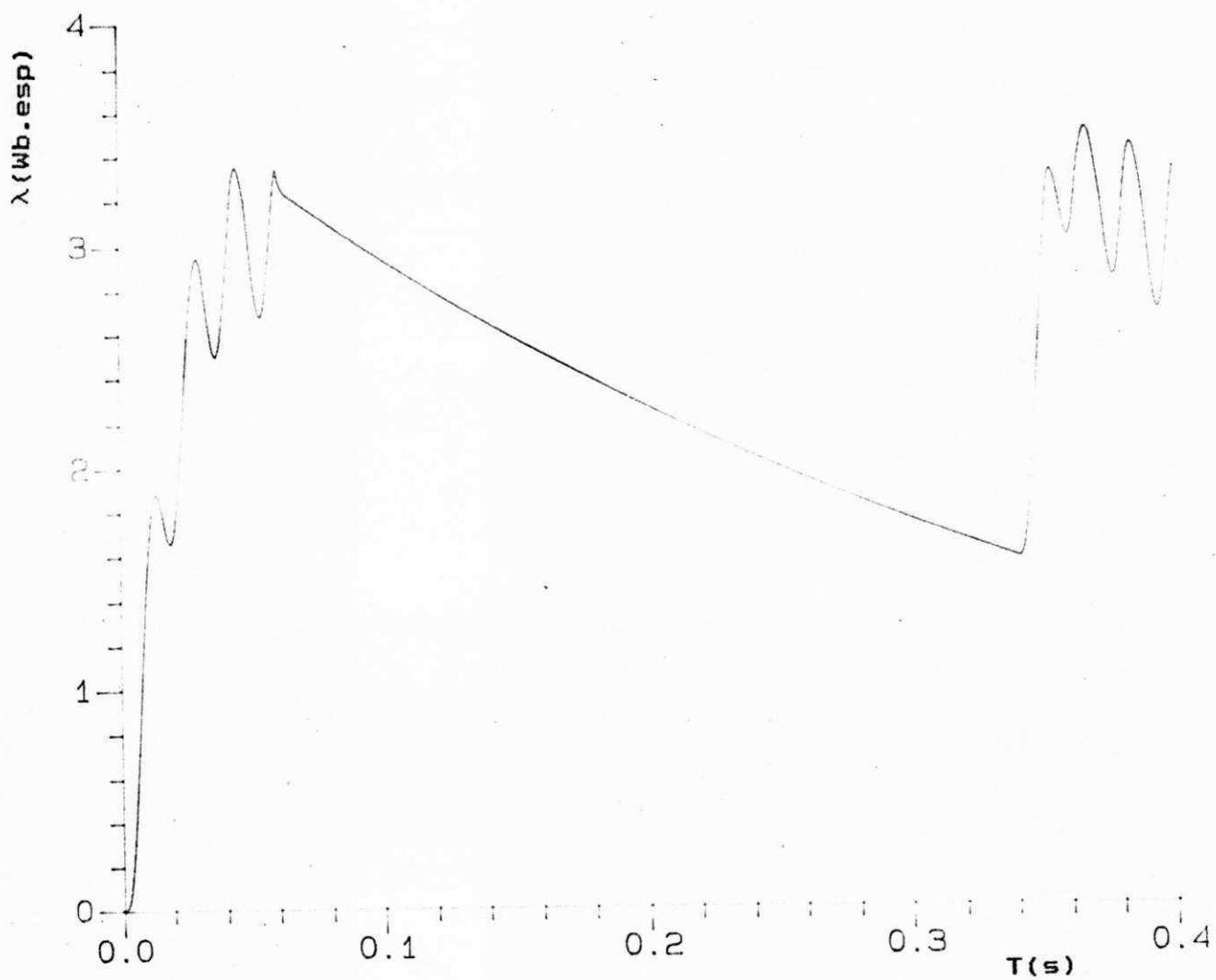


Fig. 5.34 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 2.5 mm - fluxo de enlace.

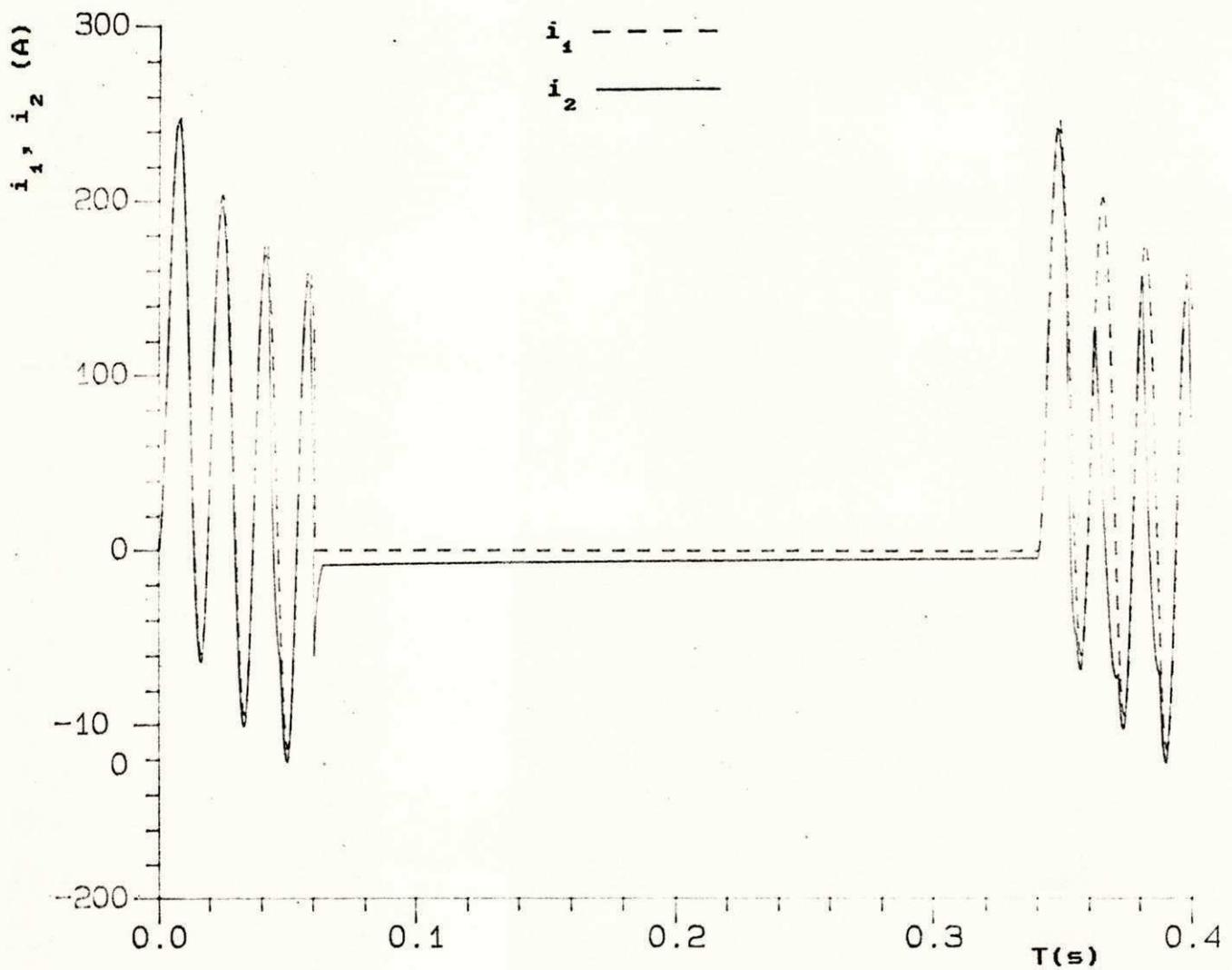


Fig. 5.35 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 2.5 mm - correntes primária e secundária superposta.

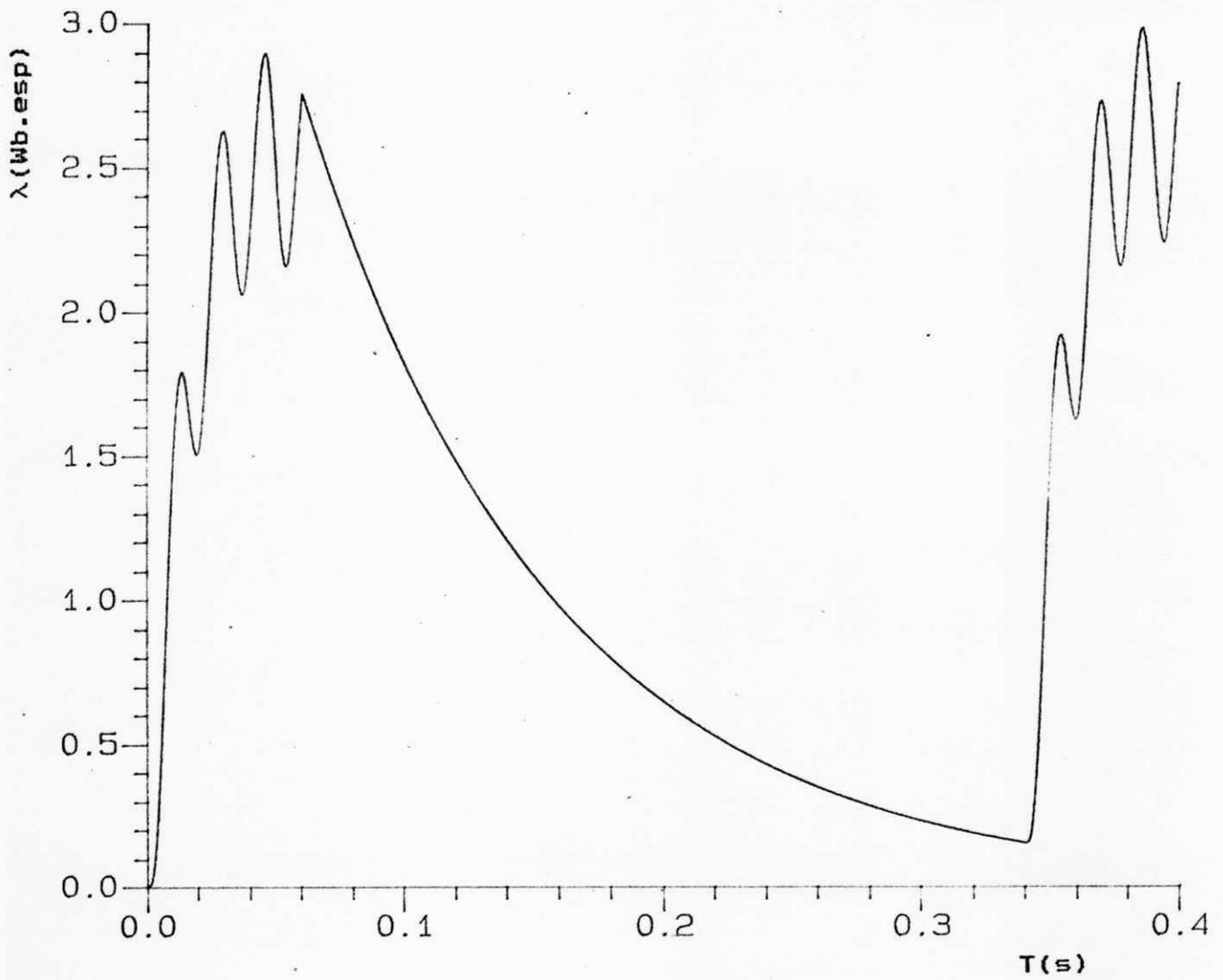


Fig. 5.36 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 10 mm - fluxo de enlace.

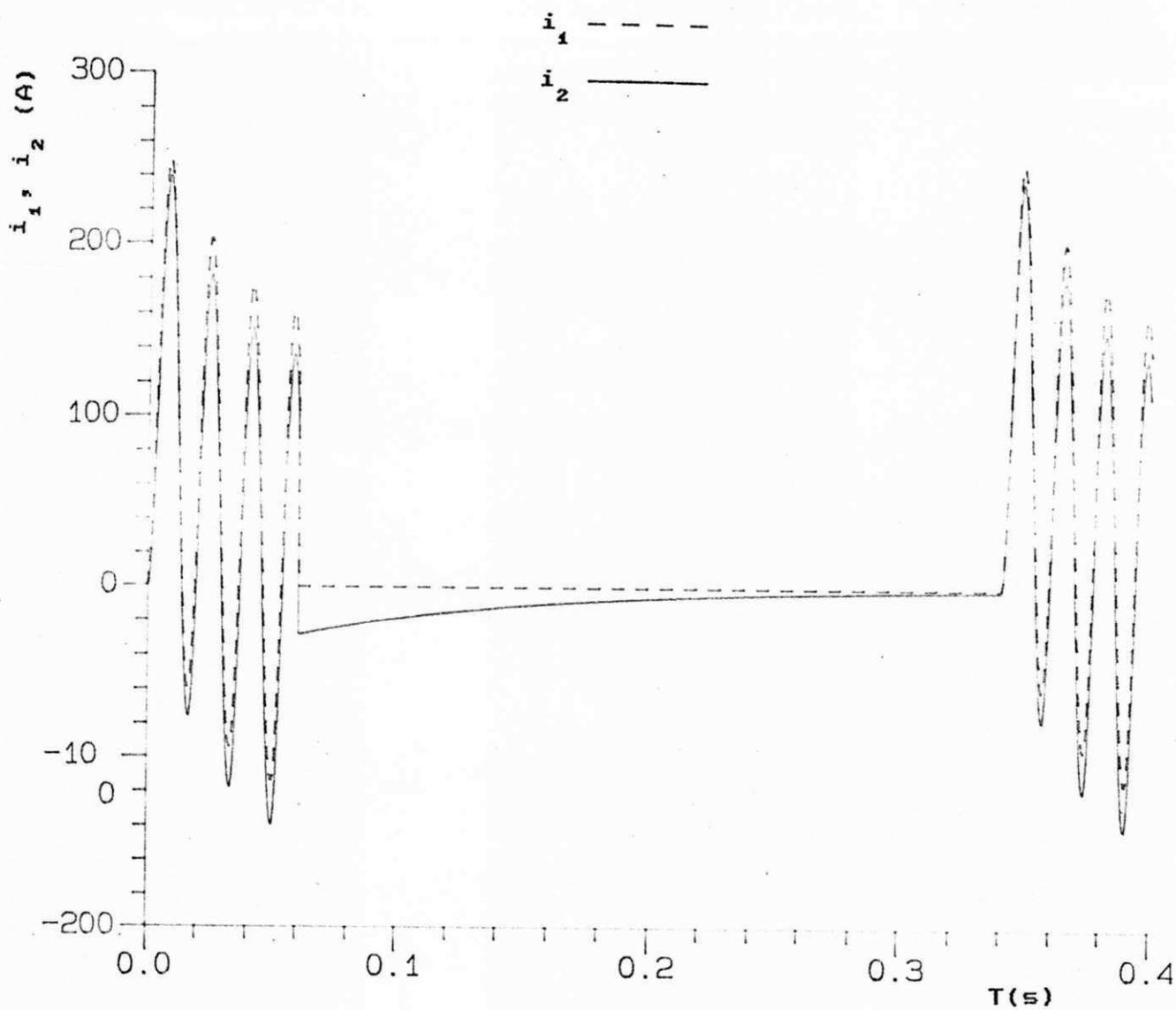


Fig. 5.37 Religamento automático - TC de 245 KV com entreferro de 10 mm - correntes primária e secundária superposta.

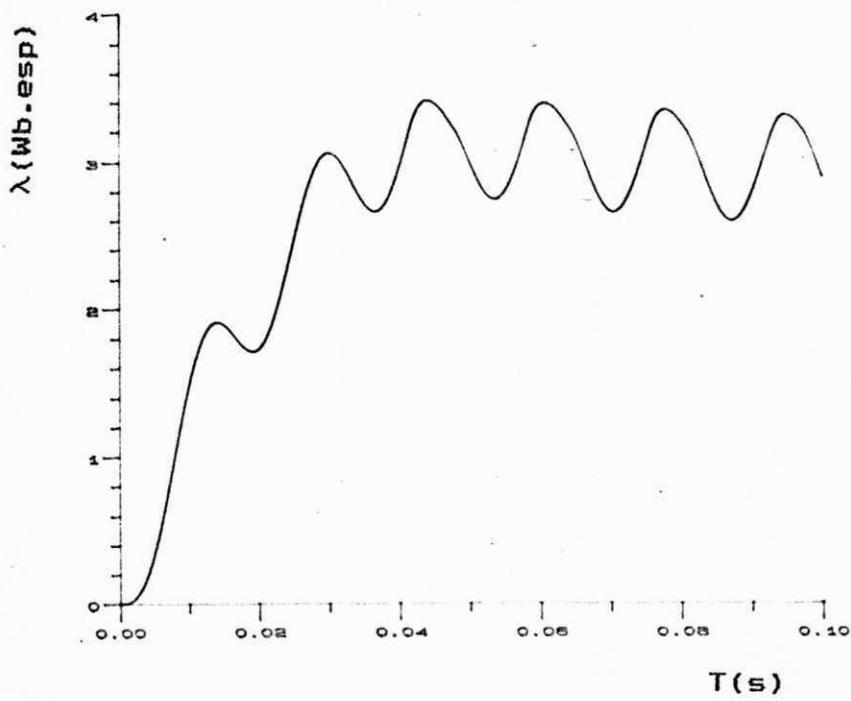
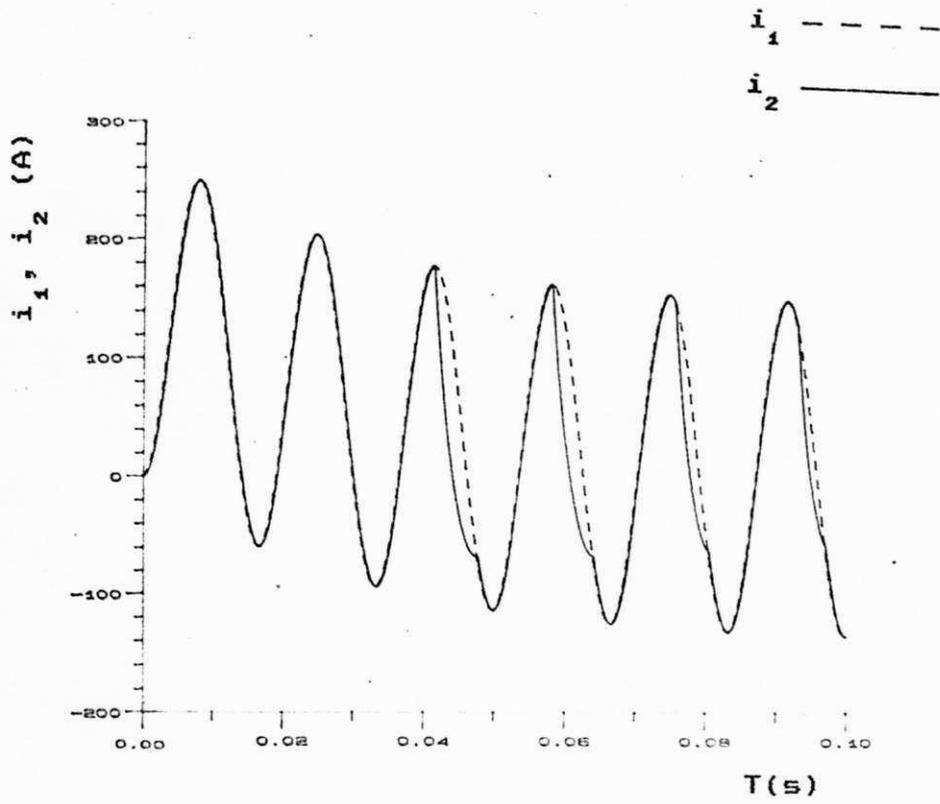


Fig. 5.38 Caso 1.

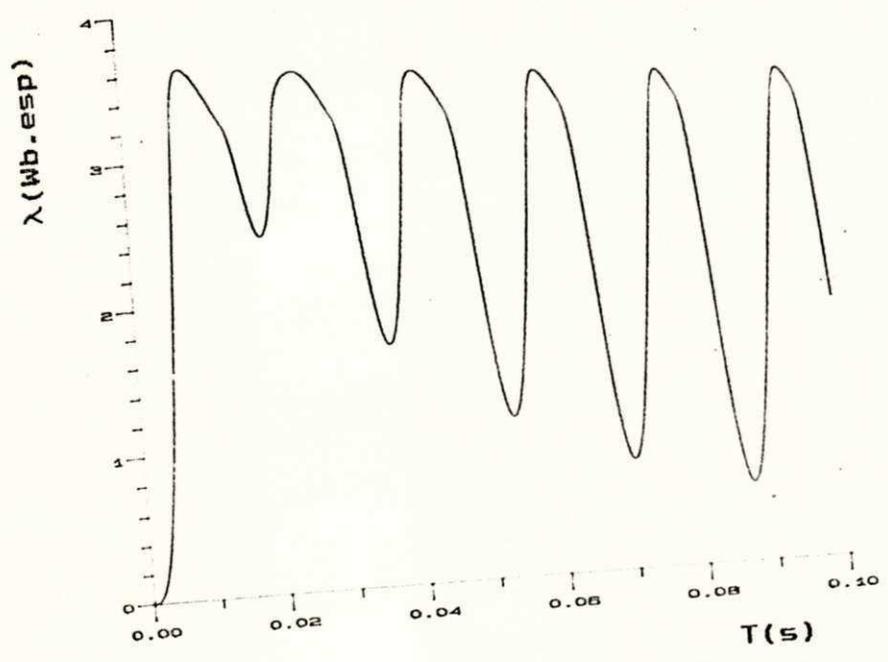
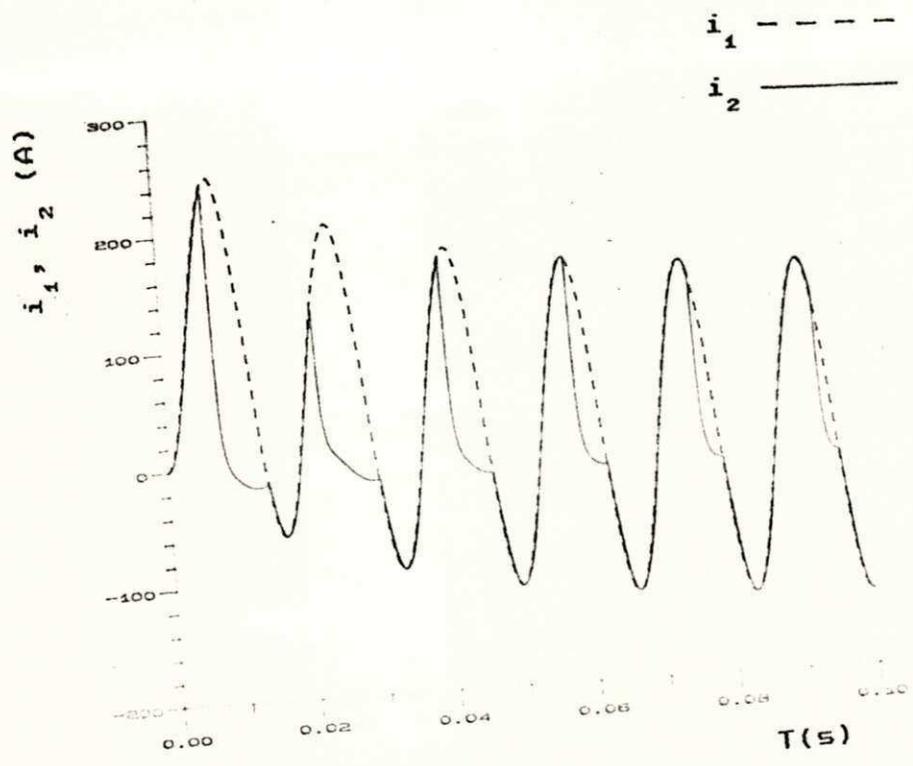


Fig. 5.39 Caso 3

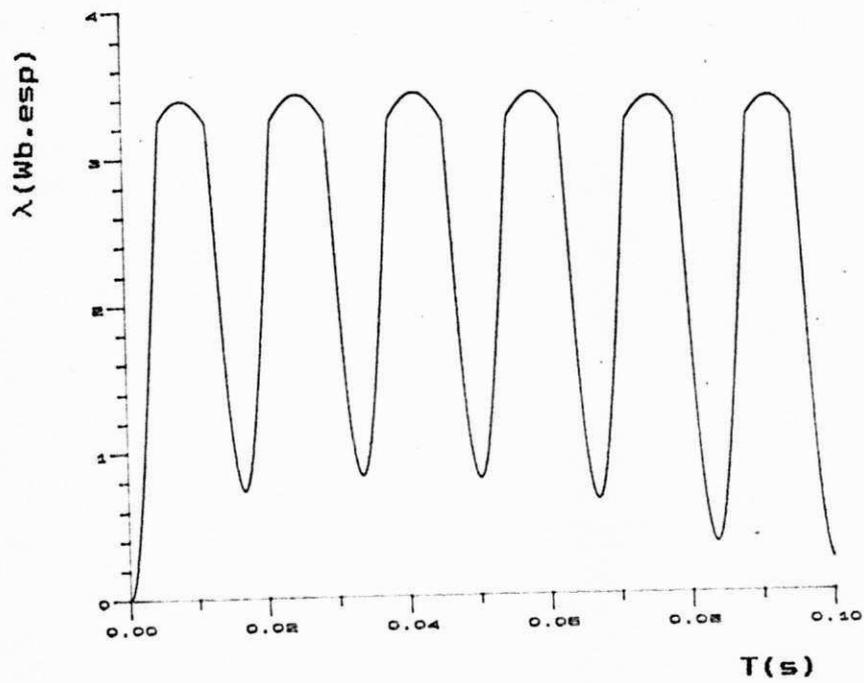
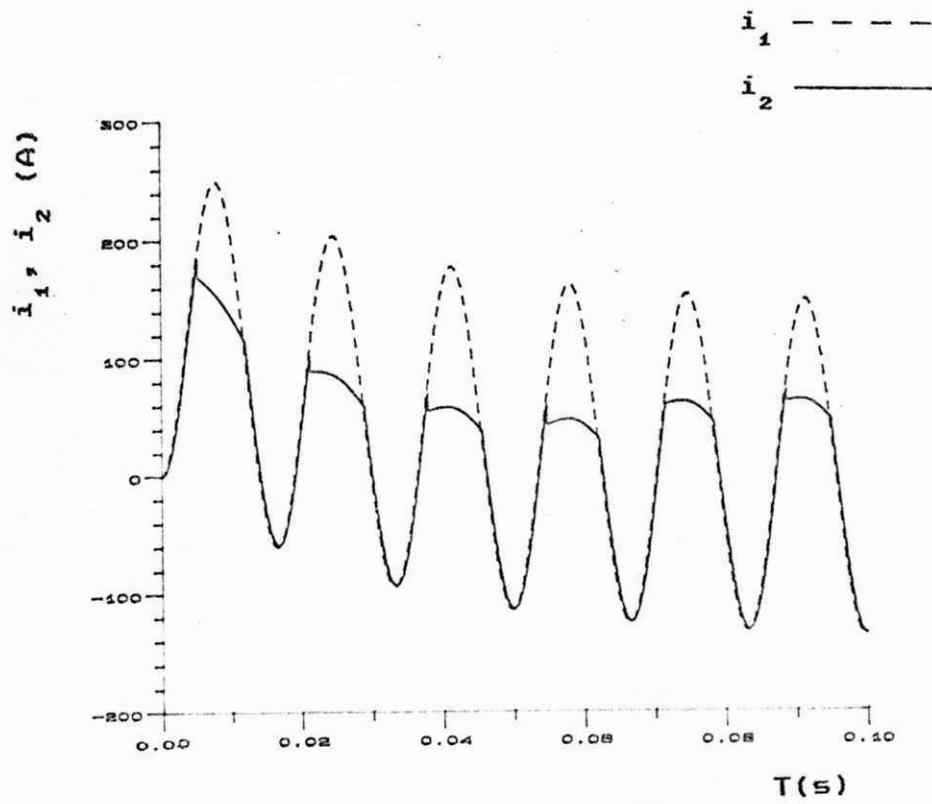


Fig. 5.40 Caso 6.

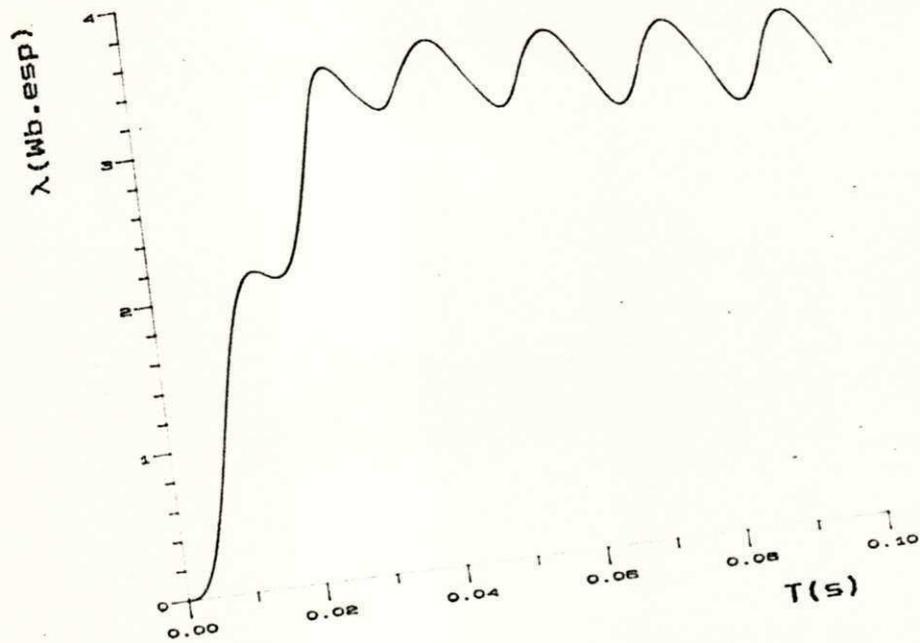
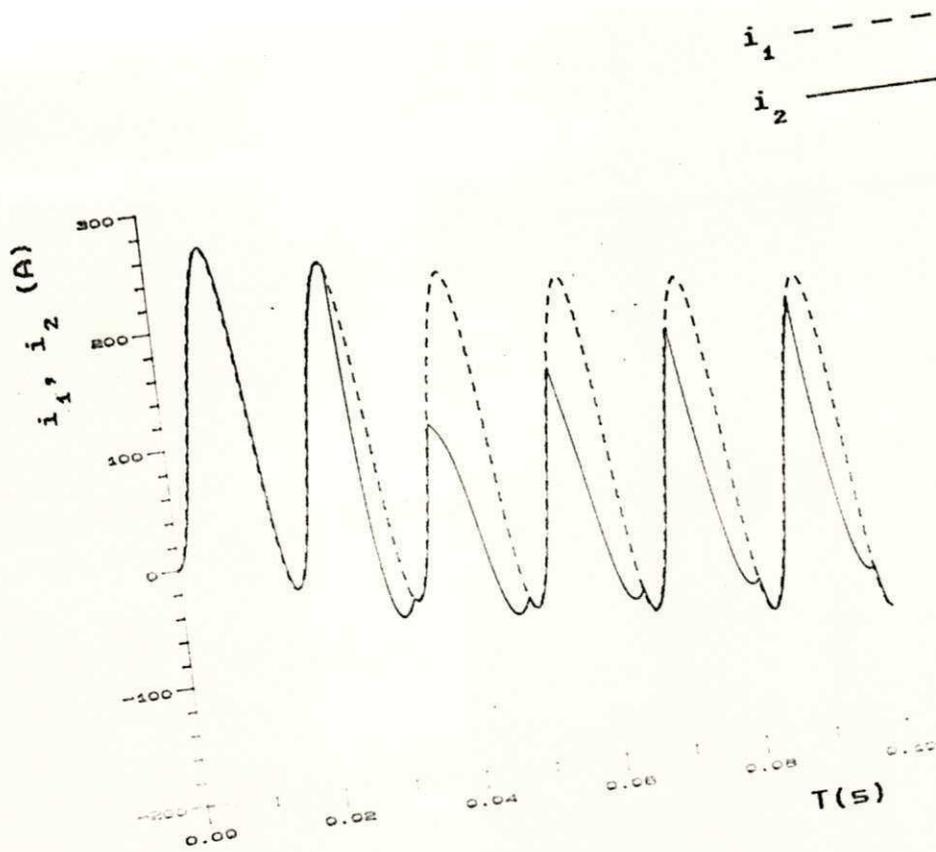


Fig. 5.41 Caso 7.

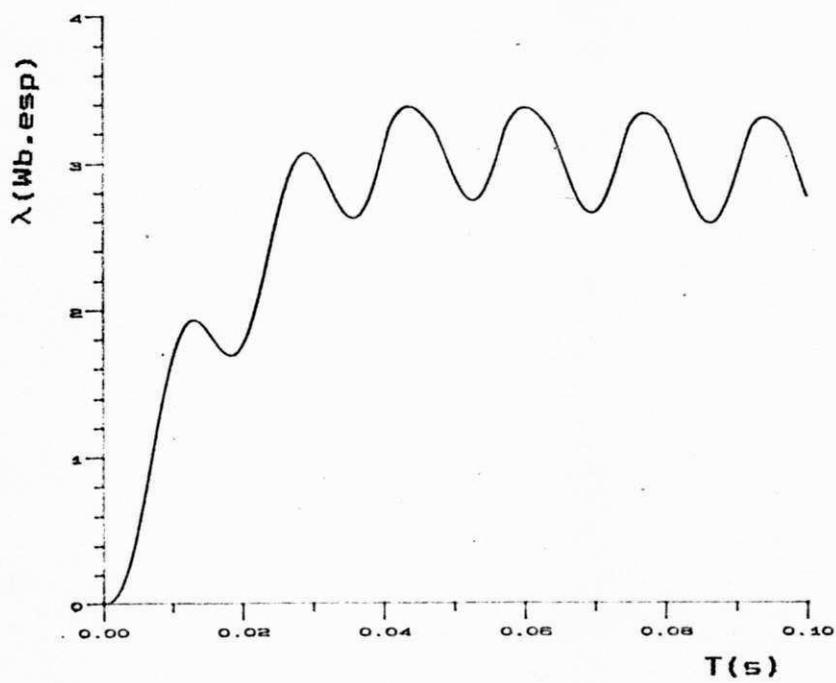
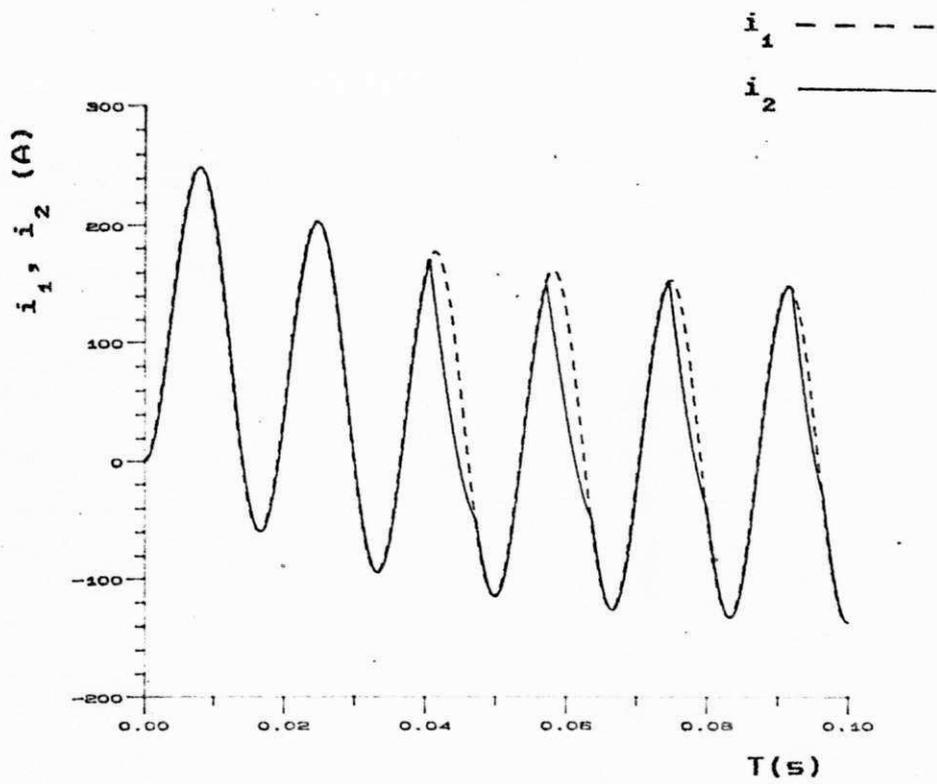


Fig. 5.42 Caso 10.

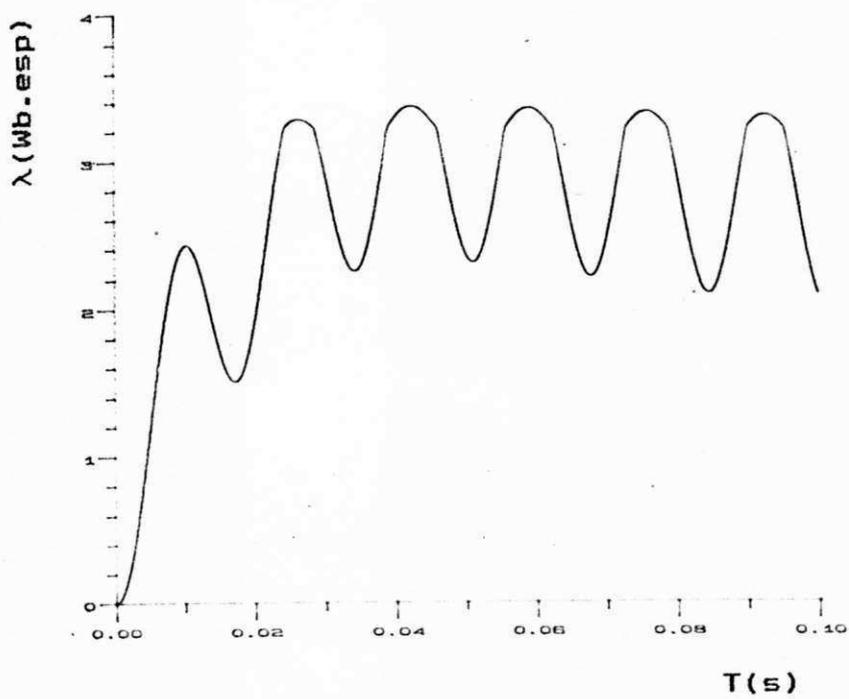
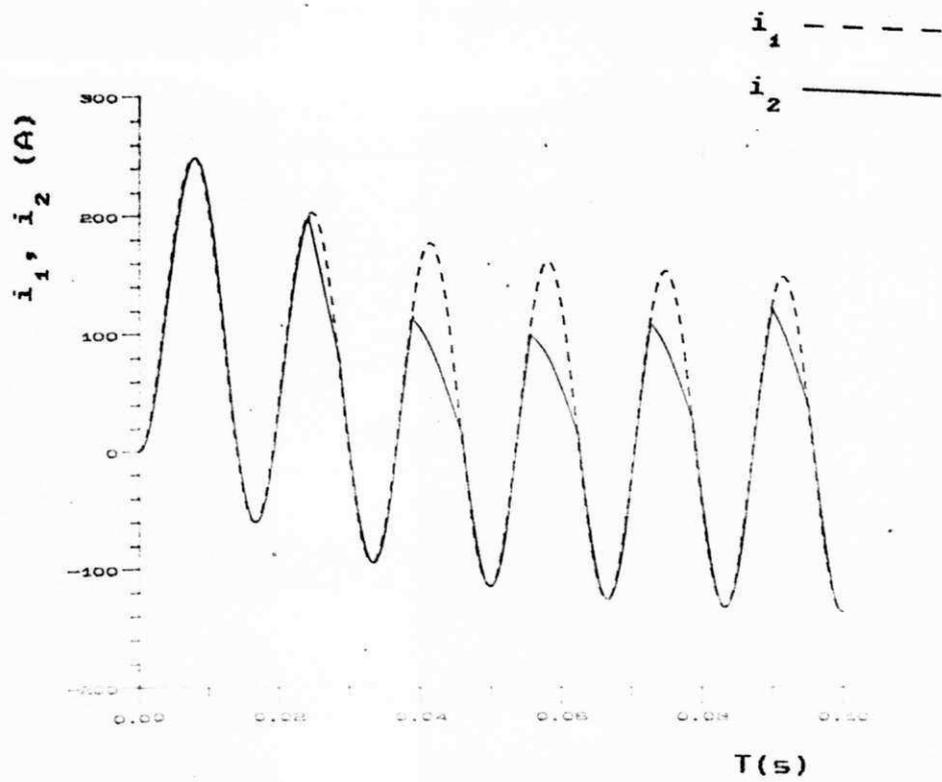


Fig. 5.43 Caso 12.

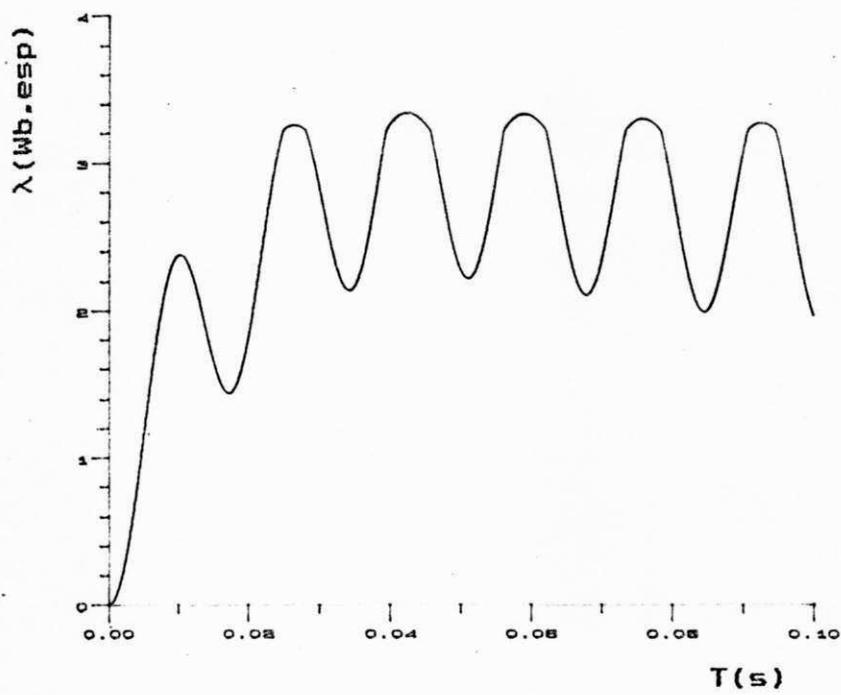
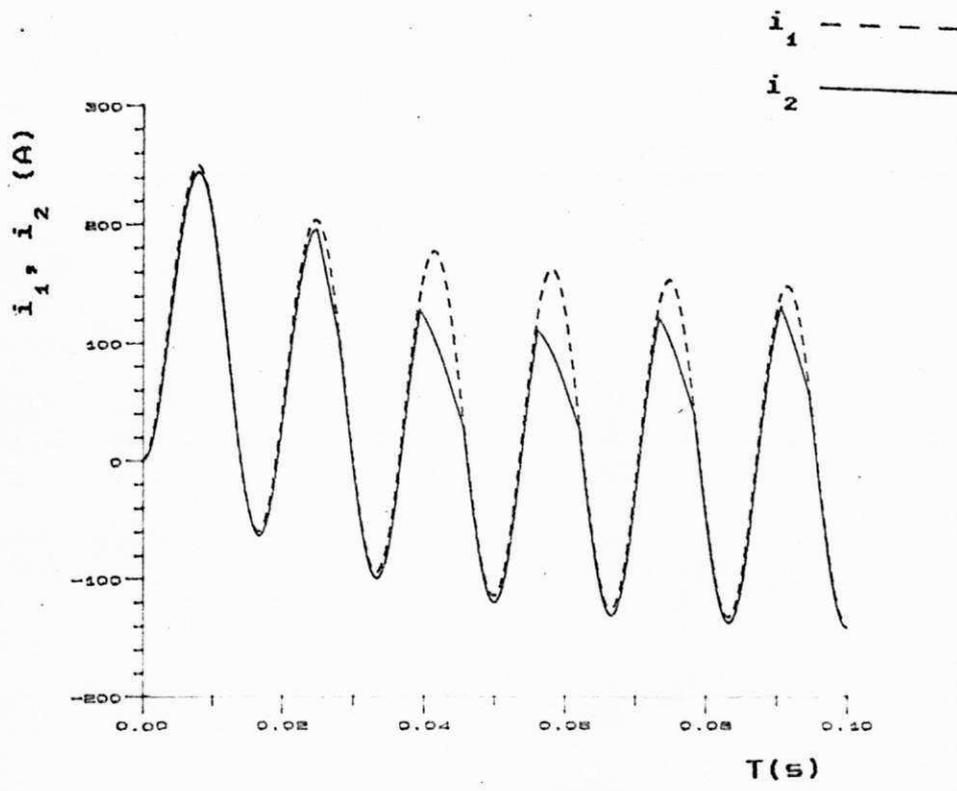


Fig. 5.44, Caso 15.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma revisão dos fenômenos eletromagnéticos associados à operação dos núcleos ferromagnéticos em regime transitório, a baixas frequências. Modelos físicos foram propostos objetivando representar esses fenômenos, cuja característica mais notável consiste na simplicidade do equacionamento. A utilização desses modelos permitiu que fossem realizadas análises a cerca da operação de TC's de proteção em regime transitório, submetidos a correntes de defeito de diferentes valores e graus de assimetria, bem como operando com vários tipos de carga e valores de fluxo residual. Também foram considerados TC's com entreferro, os quais apresentam crescente aplicação nos sistemas com religamento automático.

Adicionalmente, foi realizado um trabalho experimental com o objetivo de validar os resultados teóricos obtidos por simulação em computador. Para isto, desenvolveu-se circuitos eletrônicos destinados a controlar determinadas grandezas de interesse na investigação, como o ângulo de chaveamento ϕ . Para outras finalidades, foram utilizadas montagens proposta em outros trabalhos.

De um modo geral, considera-se que os resultados obtidos através dos modelos utilizados foram satisfatórios, uma vez que foram pequenas as discrepâncias existentes entre os resultados

experimentais e os obtidos pelos métodos analíticos convencionais.

Assim, as conclusões mais importantes deste trabalho são resumidas a seguir.

a. O modelo que inclui apenas a saturação no núcleo do TC (MODELO A) proporciona praticamente os mesmos resultados apresentados pelo MODELO B. No entanto, o mesmo limita-se às simulações onde não existe fluxo remanescente no núcleo. Isto constitui uma séria limitação, pois, na realidade as condições iniciais são quase sempre não-nulas. Ademais, conforme foi visto, essas condições iniciais afetam seriamente o grau de distorção da corrente secundária.

b. A inclusão do efeito de histerese mostra-se imprescindível neste tipo de estudo. Isto não se deve à importância de se representar de modo muito preciso as trajetórias assimétricas, mas ao fato de haver a possibilidade de inclusão do efeito do fluxo residual.

c. Consideração do efeito das correntes parasitas torna-se inteiramente dispensável no caso de TC's operando em baixas frequências.

d. Diante do exposto, o modelo mais adequado para o estudo do comportamento transitório de TC's de proteção sem entreferro é o MODELO B (núcleo com saturação e histerese).

e. Em esquemas com religamento automático, a inclusão de entreferros no núcleo reduz de forma notável os problemas das distorções da corrente secundária, causados pelo fluxo residual. Isto pôde ser constatado através da utilização do MODELO D.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Para aperfeiçoamento deste estudo, sugere-se acrescentar os seguintes itens:

- Modelagem mais exata do ciclo limite de histerese. Sugere-se tentar o emprego de métodos mais precisos (método de "cubic spline" com tensionamento, por exemplo), ao invés das funções aqui empregadas.

- Como sofisticação do processo de cálculo computacional, sugere-se também o emprego de métodos mais precisos na reprodução de laços assimétricos de histerese, tais como os empregados por CONRAD e OEDING (1987).

- Utilização de indutores que permitam simular maiores constantes de tempo para o sistema primário. Com os indutores que foram disponíveis neste trabalho, a máxima constante de tempo obtida foi 10.6 ms ($\theta = 76^\circ$).

- Melhoria da forma de registro dos oscilogramas. Para isto, propõe-se a aplicação de um sistema de aquisição de dados digitalizado ("transient recorder"). Isto constitui uma forma de registro muito mais precisa do que a empregada neste trabalho.

- A inserção de entreferros no núcleo do TC deve também ser investigada sob o ponto de vista da exatidão do mesmo. Isto porque o entreferro constitui uma componente de alta relutância, fazendo com que o fluxo de dispersão aumente. Assim, a especificação do tamanho do entreferro deve ser um item a ser cuidadosamente avaliado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVILA-ROSALES, J.; ALVARADO, F. L. - Nonlinear Frequency Dependent Transformer Model for Eletromagnetic Transient Studies in Power Systems - IEEE TPAS, Vol. PAS-101, No. 11, Nov. 1982.

BAPTISTA, G. N.; TURELI, A.; BARROS, J. G. C. - Modelagem de Núcleos de Transformadores para Estudos Transitórios - VIII SNPTEE, SP/GSP/03, São Paulo - Brasil, 1986.

BOON, C. R.; ROBEY, J. A. - Effect of Domain Wall Motion on Power Loss in Grain Oriented Silicon-Iron Sheet - Proc. IEE, Vol. 115, No. 10, Oct. 1968.

BRADLEY, D. A.; GRAY, C. B.; O'KEELY, D. - Transient Compensation of Current Transformers - IEEE TPAS, Vol. PAS - 97, No. 4, Jul./Aug. 1978.

BRAILSFORD, F.; FOGG, R. - Anomalous Iron Losses in Cold Reduced Grain-Oriented Transformer Steel in Very Low Frequencies - Proc. IEE, Vol. 113, No. 9, Sep. 1966.

BRUCE, R. G.; WRIGHT, A. - Remanent Flux in Current-Transformer Cores - Proc. IEE, Vol. 113. No. 5, May 1966.

CONNER, E. E., GREB, R. G.; WENTZ, E. C. - Control of Residual Flux in Current Transformer - IEEE PES Winter Meeting, New York - N. Y., Jan. 28/Feb. 2, 1973.

CONNER, E. E.; WENTZ, E. C.; ALLEN, D. W. - Methods for Estimating Transient Performance of Practical Current Transformers for Relaying - IEEE PES Summer Meeting & Energy Resources Conf., Anaheim - Cal., Jul. 14-19, 1974.

CONRAD, T.; OEDING, D. - A Method to Correct the Distorted Secondary Currents of Current Transformer - 9th Power System Computation Conference, 1987.

CONRAD, T. - Numerische Korrektur der Sekundarströme gesättigter Stromwandler in Echtzeit (Dr. Ing. Dissertation) - Elektrische Energie Technik der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1989.

D'AJUZ, A.; CARVALHO, F. M. S.; DIAS, L. E. N. - Resposta Transitória de Transformadores de Corrente - Simulação com o Eletromagnetic Transient Program - VII SNPTEE, Brasília - DF, 1984.

ERINGIS, R. - Comportamento Transitório de Transformadores de Corrente - 1a. Parte - Revista Siemens IX 1/89.

FRAME, J. G.; MOHAN, N.; LIU, T. - Histeresis Modelling in an Electro-Magnetic Transient Program - IEEE PES Winter Meeting, New York - N. Y., Jan. 31/Feb. 5, 1982.

GEC - Protective Relays Application Guide - Morrison et Gibb, 1979.

GERALD, C. F. - Applied Numerical Analysis - Addison - Wesley Co., 1978.

IEC - Additional Requirements for Protective Current Transformer for Transient Performance: Classes TPS, TPX, TPY and TPZ - Supplement to IEC Publication 185, Report No. 4 by TC38 / Working Group 14, Sep/1986.

IEEE - Transient Response of Current Transformers - Report Sponsored by the Power Systems Relaying Committee of the IEE PES (76 CH1130-4 PWR), 1976.

KNABLE, A. H. - Electrical Power Systems Engineering - McGraw - Hill - Book Company, 1967.

KAVANAGH, R. J. - An Approximation to the Harmonic Response of Saturating Devices - Proc. IEE, 1960, 107 C.

KORPONAY, N. E. - Nongapped Cores, Antiremanence Gapped Cores or Linear Cores for Current Transformers - IEEE PES Summer Meeting, Mexico City, Mexico, July 17-32, 1977.

KRISHNAMOORTHY, T. S.; VENUGOPAL, M. - New Mathematical Model for Current Transformers - Proc. IEE, Vol. 121, No. 8, Aug. 1974.

LEFEBVRE, M. - Calcul et Réalisation D'une Maquette de Transformateur de Courant 220 KV Destiné à la Mesure en Régime Transitoire - Revue Générale de L'Électricité, Tome 75, No. 9. Sept. 1966.

MARIOTTO, M. I. R. J. - Análise e Simulação do Comportamento Transitório de Transformadores de Corrente em Sistema de Proteção (Tese de Mestrado) - Universidade de Santa Maria, Santa Maria - RS, 1986.

MILASCH, A. A. - Transitórios em Transformadores de Corrente para Relés de Proteção (Tese de Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1978.

OVERSHOTT, K. J.; PREECE, I; THOMPSON, J. E. - Magnetic Properties of Grain-Oriented Silicon Iron - Part 2 - Proc. IEE, Vol. 115, No.12, Dec. 1968.

PEREIRA, P. S.; MARTINEZ, M. L. B. - Simulação Digital do Comportamento Transitório de Transformadores de Corrente - VII SNPTEE, Brasília - DF, 1984.

RAO, T. S. M. - Power System Protection-Static-Relays-Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1979.

RAY, S. - Digital Simulation of B/H Excursions for Power Systems Studies - IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. C, No. 3, May 1988.

SEELEY, H. T. - The Effect of Current-Transformer Residual Magnetism on Balanced-Current or Differential Relays - AIEE Trans., Vol 62, Apr. 1943.

SLEMON, G. R. - Equipamentos Magnetelétricos: Transdutores, Transformadores e Máquinas (Vol. 1) - LTC/EDUSP, Rio de Janeiro GB, 1974.

SMOLINSKY, W. J. - Design Considerations in the Application of Current Transformers - IEEE PES Winter Meeting, New York - N. Y., Jan. 28/Feb. 2, 1973.

SOHIER, J.; GAILLET, B.; LÉGER, H. S. - Comportement des

Transformateur de Courant en Régime Asymétrique de Court-Circuit -
Revue Générale de L'Électricité, Tome 75, No. 6, Juin. 1966.

SWIFT, G. W. - Power Transformer Core Behaviour under Transient
Conditions - New York - N. Y., Jan. 31/Feb. 5, 1971.

TALUKDAR, S. N.; BAILEY, J. R. - Histeresis Models for System
Studies - IEEE TPAS, Vol. PAS-95, No. 4, Jul/Aug. 1976.

TRUTT, F. C.; ERDELWI, E. A.; HOPKINS, R. E. - Representation of
the Magnetization Characteristic of DC Machines for Computer Use -
IEEE TPAS, Vol. PAS 87 No. 3, Mar. 1968.

WESTINGHOUSE - Applied Protective Relaying - 2nd. ed., Silent
Sentinels, 1979.

WIDGER, G. F. T. - Representation of Magnetisation Curves over
Extensive Range by Rational-Fraction Approximations - Proc. IEE,
Vol. 116, No. 1, Jan. 1969.

WISZNIEWSKI, A. - Improvement of Current-Transformer Transient
Performance - Proc. IEE, Vol. 119, No. 5, May 1972.

WISZNIEWSKI, A. - Calculation of Current Transformer Errors - IEEE
TPAS, Vol. PAS-97, No. 6, Nov./Dec. 1978.

WRIGHT, A.; CARNEIRO JUN., S. - Analysis of Circuit Containing
Components with Cores of Ferromagnetic Material - Proc. IEE, Vol.
121, No. 12, Dec. 1974.

APÊNDICE

ASPECTOS RELATIVOS AO PROJETO DE TC'S PARA DESEMPENHO EM REGIME TRANSITÓRIO

1. INTRODUÇÃO.

O desenvolvimento dos relés estáticos de elevada rapidez de atuação, o acréscimo nos níveis de curto-circuito nos sistemas de alta e extra-alta tensão, assim como a prática de religamento automático dos disjuntores tornaram inaceitáveis a operação dos TC's em regime saturado, mesmo durante curtos períodos de tempo. Com isto, houve necessidade de se desenvolver projetos de TC's especialmente destinados a atenderem aos requisitos de bom funcionamento durante os transitórios causados pela assimetria das correntes de defeito.

O objetivo deste tópico consiste em descrever de forma breve as características dos TC's com as citadas propriedades. Serão analisados três tipos diferentes, designados por TPX, TPY e TPZ. Os mesmos constam na recomendação do Grupo de Estudos TC38 do IEC (1986).

2. TC'S DA CLASSE TPX.

Esses TC's não apresentam nenhuma alteração construtiva em relação aos tipos convencionais, havendo apenas o sobredimensionamento do núcleo visando solucionar o problema da

saturação. Geralmente apresentam baixa reatância de dispersão e são mais apropriados para aplicação com relés de terra e com relés de alta impedância, utilizados em esquemas diferenciais. Na prática, nem sempre é viável a construção de tais TC's, pois a área da seção reta do núcleo pode alcançar valores excessivamente elevados. Além disso, problemas relacionados com o fluxo remanescente no núcleo (em esquemas com religamento automático, por exemplo) não são resolvidos com o emprego deste tipo construtivo.

3. TC's DA CLASSE TPY.

Esses TC's apresentam entreferros de tamanhos muito pequenos no núcleo, suficientes para fazer com que o fluxo remanescente não ultrapasse 10% do valor do fluxo de saturação, após três minutos de interrupção do defeito. O circuito equivalente dos mesmos foi mostrado na Fig. 3.16.

A constante de tempo T_2 é calculada através da equação (3.49).

Os TC's da classe TPY apresentam erro de relação e de fase superiores aos da classe TPX. São indicados para esquemas de proteção com religamento automático.

4. TC's DA CLASSE TPZ.

Nesses TC's existem maiores (ou mais) entreferros que nos da classe TPY. Assim, a característica $\lambda \times i_m$ é praticamente

linear e o fluxo remanescente é praticamente desprezível, não devendo ultrapassar 1% do fluxo de saturação após 3 minutos de interrupção de falta. Possuem menor tamanho que os tipos anteriormente descritos. Entretanto, apresentam elevada reatância de dispersão e requerem uma corrente de magnetização de cerca de 5 % do valor da corrente a ser transformada. Isto acarreta em maiores erros quando ambas as componentes da corrente (transitória e permanente) estão presentes.

O circuito equivalente da Fig. 3.16 bem como a equação (3.49) é também válida para os TC's classe TPZ. Neste caso, deve-se considerar $\sum x$ em lugar de x , onde $\sum x$ representa a soma dos comprimentos de todos os entreferros no núcleo.

KORPONAY (1978) cita problemas relacionados a ocorrência de transitórios após a interrupção de correntes primárias.

A aplicação desses TC's torna-se desejável nos esquemas de proteção diferencial de barra, onde a saturação exerce influência crítica.

5. COMENTÁRIOS.

Foram descritos de modo sucinto três tipos de projetos especiais de TC's de proteção. Para cada caso, deve-se estudar com cuidado a aplicação do TC apropriado. Os TC's convencionais também podem operar corretamente com assimetria, dependendo das condições em que esta ocorra e das características do sistemas de proteção.