



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE
EM REGIME TRANSITÓRIO**

FELLIPE SOUTO SOARES

Campina Grande, Paraíba

Março de 2015

FELLIPE SOUTO SOARES

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM REGIME TRANSITÓRIO

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

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos

Orientador:

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Campina Grande, Paraíba

Março de 2015

FELLIPE SOUTO SOARES

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM REGIME TRANSITÓRIO

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

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a meus pais, que nunca mediram esforços para me proporcionar a melhor educação e formação pessoal possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ter me guiado durante essa caminhada e por ter me encorajado diante das adversidades.

Agradeço também aos meus pais, Arlete e Adalberto, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me apoiado, dando força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as dificuldades enfrentadas.

Agradeço também a minha namorada, Taís, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis e pelo apoio dado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Chagas, pela paciência e tempo dedicado as sugestões e correções, e por ter me dado à oportunidade de ampliar meus conhecimentos nas atividades desenvolvidas.

Agradeço aos meus amigos de graduação, especialmente ao grupo formado por Danilo Freire, Danilo Brito, Damião Fernandes, Edvaldo Ângelo, Leonardo Jordão, Glauber Dantas, Márcio Herson, Rubem Aragão e Rodrigo César, pelas grandes amizades formadas, pelas noites de estudo e principalmente pelo apoio dado durante essa jornada.

Agradeço a “Galera do Rual” – Dalisson, Renan, Pedro, Nesomar, Allan, Anderson, Ramonnito e Thomas – pela amizade, companheirismo e pelos momentos de descontração.

Enfim, agradeço a todos os amigos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Não eduque seu filho para ser rico,
eduque-o para ser feliz.
Assim ele saberá o valor das coisas
E não o seu preço.”*

Max Gehringer.

RESUMO

O trabalho tem por objetivo o estudo e a análise do comportamento de transformadores de corrente (TCs) em regime transitório. Os transformadores de corrente são equipamentos projetados e construídos para alimentar instrumentos de medição, proteção e controle em redes de energia elétrica. O ponto mais importante na modelagem dos TCs é a representação do comportamento não linear do núcleo magnético, o qual apresenta um comportamento saturável e histerético. Para analisar o comportamento dos modelos realizaram-se simulações em rotinas computacionais e simulação em software de análise de transitórios eletromagnéticos *EMTP-RV*.

Palavras-chave: Modelos, transitórios, TCs, Transformadores de Corrente, Saturação.

ABSTRACT

The main goal of this work is to analyse and comprehend the behaviour of Current Transformers (CTs) in transient state. Current Transformers are designed and constructed to feed measurement and protection tools and electrical energy network control. The main point regarding current transformers modelling is a representation of the magnetic core non-linear behaviour, which presents a saturable behaviour. To achieve a behavioural analysis of the models, computational routines were performed, moreover electromagnetic transient program EMTP-RV software simulation.

Keywords: models, transient, CTs, Current Transformers, Saturation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1.1. Transformador de corrente e modo de ligação.	17
Fig. 1.2. Aspecto externo do TC tipo barra.	18
Fig. 1.3. Aspecto externo TC tipo Janela.	19
Fig. 1.4. Constituição básica TC tipo Enrolado.	19
Fig. 1.5. TC de núcleo dividido.	19
Fig. 1.6. TC tipo bucha com detalhes nos seus enrolamentos.	20
Fig. 1.7. TC com vários enrolamentos primários.	20
Fig. 1.8. TC de vários núcleos secundários.	21
Fig. 1.9. Circuito elétrico equivalente de um TC.	22
Fig 2.1. Representação simplificada do sistema primário.	23
Fig. 2.2. Corrente assimétrica de curto-circuito.	24
Fig. 2.3. Transformador de corrente e seu circuito equivalente simplificado.	25
Fig. 2.4. Curva de saturação linearizada por partes.	26
Fig. 2.5. Fluxo de enlace no núcleo do TC na ocorrência de um curto-circuito no primário.	27
Fig. 2.6. Fluxo de enlace no núcleo do TC.	28
Fig. 2.7. Correntes primária, secundária e de magnetização durante a ocorrência de um curto-circuito.	28
Fig. 2.8. Corrente secundária no TC com carga com componente indutiva.	29
Fig. 2.9. Curva de excitação secundária de TCs.	30
Fig. 2.10. Ilustração do ensaio laboratorial para levantar a curva de excitação secundária.	31
Fig. 2.11. Ponto de joelho (a) Estabelecido pelo IEEE. (b) Estabelecido pelo IEC.	31
Fig. 3.1. Representação do circuito para o modelo de Pseudo-histerese.	34
Fig. 3.2. Representação dos efeitos no núcleo por um indutor não linear em paralelo com um resistor linear.	35
Fig. 3.3. Circuito elétrico simplificado de um TC.	36
Fig. 3.4. Modelo de TC utilizado no <i>EMTP-RV</i>	40
Fig. 4.1. Representação do sistema de transmissão utilizado.	42
Fig. 4.2. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga R)	43
Fig. 4.3. (a) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (b) Corrente de magnetização im . (Carga R).....	44
Fig. 4.4. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga R)	44
Fig. 4.5. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga RL)	45
Fig. 4.6. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga RL).....	45
Fig. 4.7. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga RL).....	45
Fig. 4.8. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga tipicamente indutiva)	46
Fig. 4.9. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb (Carga tipicamente indutiva)	46
Fig. 4.10. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga tipicamente indutiva).....	47
Fig. 4.11. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga tipicamente indutiva)	47
Fig. 4.12. (a) Corrente de magnetização im (b) Fluxo de enlace no secundário, núcleo sem fluxo residual. (Carga tipicamente indutiva)	48
Fig. 4.13. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga tipicamente indutiva).....	48
Fig. 4.14. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 (Carga R)	49
Fig. 4.15. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga R)	49
Fig. 4.16. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga R)	49

Fig. 4.17. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga RL)	49
Fig. 4.18. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga RL)	51
Fig. 4.19. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga RL)	51
Fig. 4.20. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2	52
(Carga tipicamente indutiva)	52
Fig. 4.21. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga tipicamente indutiva).	52
Fig. 4.22. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga tipicamente indutiva).....	52
Fig. 4.23. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2	53
(Carga tipicamente indutiva)	53
Fig. 4.24. (a) Corrente de magnetização im . (b) Fluxo de enlace no secundário, núcleo sem fluxo residual. (Carga tipicamente indutiva)	53
Fig. 4.25. Curva de magnetização no plano $\lambda - im$. (Carga tipicamente indutiva).....	54
Fig. 4.26. Representação do TC no $EMTP-RV$	54
Fig. 4.27. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga R)	55
Fig. 4.28. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga R).....	55
Fig. 4.29. Corrente de magnetização im . (Carga R)	55
Fig. 4.30. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga RL).....	56
Fig. 4.31. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga RL)	56
Fig. 4.32. Corrente de magnetização im . (Carga RL)	56
Fig. 4.33. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga tipicamente indutiva) ...	57
Fig. 4.34. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga tipicamente indutiva).....	57
Fig. 4.35. Corrente de magnetização im . (Carga tipicamente indutiva)	57

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	13
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Organização do Trabalho.....	14
1.3 Revisão Bibliográfica.....	15
1.3.1 Levantamento Histórico.....	15
1.3.2 Características Gerais de um Transformador de corrente.....	16
1.3.3 Características Construtivas:.....	18
1.3.4 Classificação.....	21
1.3.5 Relação entre as Correntes nos Transformadores de Corrente.....	22
Capítulo 2 - TCs em Regime Transitório.....	23
2.1 Representação do Sistema Primário.....	23
2.2 Representação do TC.....	25
2.2.1 Considerações Gerais.....	25
2.2.2 Desempenho em Regime Não-Saturado.....	26
2.2.3 Desempenho em Regime Saturado.....	28
2.3 Erro nos TCs para Serviço de Proteção.....	29
2.3.1 Erro de Relação.....	29
2.3.2 Curva de Excitação Secundária.....	30
2.3.3 Causas de Erros Nos TCs.....	32
2.4 Influência da Saturação Nos TCs de Proteção.....	32
Capítulo 3 - Modelos de TCs para Cálculo de Transitórios.....	34
3.1 Modelo de Pseudo-Histerese.....	34
3.2 Modelo de Tellinen.....	36
3.3 O Programa <i>EMTP-RV</i>	39
3.3.1 Evolução do <i>EMTP-RV</i>	39
3.3.2 Circuito Utilizado.....	40
Capítulo 4 - Resultados Obtidos.....	42
4.1 Modelo da Pseudo-histerese.....	43
4.1.1 Carga Puramente Resistiva.....	43
4.1.2 Carga com Componente Indutiva.....	44
4.1.3 Carga Tipicamente Indutiva com Fluxo Residual.....	46
4.1.4 Carga Tipicamente Indutiva sem Fluxo Residual.....	47
4.2 Modelo de Tellinen.....	48
4.2.1 Carga Puramente Resistiva.....	49
4.2.2 Carga com Componente Indutiva.....	50
4.2.3 Carga Tipicamente Indutiva com Fluxo Residual.....	51
4.2.4 Carga Tipicamente Indutiva sem Fluxo Residual.....	53
4.3 Utilização do <i>EMTP-RV</i>	54

4.3.1	Carga Puramente Resistiva	55
4.3.2	Carga com Componente Indutiva	56
4.3.3	Carga Tipicamente Indutiva	57
4.4	Análise dos Resultados	58
Capítulo 5 - Conclusão		60
Referências		62

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

As correntes que resultam durante um defeito são formadas por duas componentes: uma componente com comportamento senoidal, e outra com decaimento exponencial, que resulta em uma onda de fluxo assimétrico de elevado valor de pico no núcleo magnético dos transformadores de correntes (TCs). Esse fluxo, adicionado a um possível fluxo residual que haja no núcleo, pode levar o TC a um elevado grau de saturação, fazendo com que a forma de onda da corrente no enrolamento secundário apresente distorções durante os primeiros ciclos. Com isso podem surgir alguns problemas no sistema de proteção:

- Os relés não são sensibilizados com rapidez suficiente, devido a forte saturação e distorção que reduz o valor eficaz da corrente secundária.
- Os relés não são sensibilizados quando necessário, pelo mesmo motivo acima citado.
- Os relés são sensibilizados indevidamente, principalmente os relés diferenciais.
- Os localizadores de defeito não fornecem indicação precisa.

1.1 OBJETIVOS

Diante dos problemas expostos anteriormente, torna-se importante um estudo do comportamento de transformadores de corrente nos regimes permanente e transitório, operando ou não com um fluxo residual, utilizando-se um modelo que represente os fenômenos magnéticos citados, além de implementar rotinas computacionais para realizar o estudo.

Assim, objetiva-se nesse trabalho apresentar um modelo de TC que represente com veracidade os principais fenômenos relacionados ao núcleo magnético, possibilitando a reprodução precisa das correntes no enrolamento secundário no regime de curto-circuito com elevadas correntes no enrolamento primário.

Para esse estudo serão utilizadas rotinas no *MATLAB*, além de simulações no *EMTP-RV*.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Objetivos e Revisão Bibliográfica.

Apresentam-se os objetivos do trabalho e realiza uma explanação geral no assunto.

- Capítulo 2: TC em Regime Transitório.

Realiza a análise da representação do modelo simplificado do núcleo do TC, analisando o processo de distorções de correntes no secundário devido a ocorrência de um defeito.

- Capítulo 3: Modelos de TC para Cálculos de Transitórios.

Desenvolvimento de modelos de TCs que simule uma saturação residual no núcleo e também um modelo baseado no modelo de histerese proposto por Tellinen (1998). Análise de modelo de TC utilizando o software de análise de transitórios *EMTP-RV*.

- Capítulo 4: Resultados Obtidos:

Obtenção de resultados para os diferentes modelos de TCs desenvolvidos e comparação dos seus resultados.

- Capítulo 5: Conclusão:

Considerações finais sobre o assunto abordado.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 LEVANTAMENTO HISTÓRICO

Com o passar dos anos os sistemas elétricos se desenvolveram em tamanho e em complexidade, e acompanhando o seu crescimento também houve um aumento na ocorrência de defeitos, trazendo a tona uma grande preocupação com os dispositivos de proteção que garantem a correta operação do sistema. Para que ocorra um bom monitoramento do sistema é necessário que ocorra uma reprodução precisa das correntes do sistema, para isso os transformadores de corrente (TCs) estão dentre os principais componentes do sistema de proteção, já que o seu papel é espelhar e reproduzir com fidelidade os sinais do circuito por meio de réplicas reduzidas. Por essa razão, a completa compreensão do comportamento de TCs em regime transitório é de grande relevância para o estudo de proteção de sistemas elétricos.

Dessa forma, publicações a respeito do desempenho de TCs em regime transitório têm sido feitas há mais de meio século. WRIGHT (1968) executou diversos desenvolvimentos analíticos relacionados a influencia do tipo de carga e ao fluxo residual no núcleo magnético. Abordagens analíticas sobre o comportamento do TC tanto em regime permanente quanto em regime transitório foi feita por CHRISTOPOULOS e WRIGHT (1999) e WARRINGTON (1969). Onde são analisados diversos fatores que podem causar a saturação do seu núcleo, como exemplo o fluxo remanescente, a componente de corrente contínua de falta e a carga ligada ao secundário, denominada *burden*.

MCLAREN et al. (1992) apresentaram um modelo de TC que foi implementado no *EMTP*. Neste modelo, o ramo de magnetização é representado por um indutor não linear e as perdas no núcleo são representadas por um resistor não linear em paralelo com o ramo de magnetização.

A popularização do uso do computador possibilitou considerar a histerese bem como as perdas parasíticas clássicas e perdas anômalas no núcleo magnético. GUERRA & MOTA (2007) propuseram um modelo de TC no qual a histerese é descrita por equações simplificadas e os efeitos das perdas são representadas pela inserção de um resistor linear (perdas por correntes parasitas) e um resistor não-linear (perdas

dinâmicas). Os resultados obtidos por simulações pelos autores quando comparados com resultados experimentais obtiveram um grande grau de aproximação.

TZIOUVARAS (2000) realizou a análise de modelos matemáticos que poderiam se utilizados para representar o comportamento não-linear do núcleo magnético em TCs. O autor compara os resultados obtidos através dos modelos matemáticos com resultados experimentais, obtendo semelhanças nas respostas.

Segundo SEGATTO e COURY (2005), a correta operação do sistema de proteção é, pelas razões já citadas, dependente do desempenho dos TCs, os quais, para operarem satisfatoriamente demandam uma reprodução, a mais exata possível, dos sinais de corrente durante faltas no sistema.

Evitar a saturação dos núcleos dos TCs se torna quase impossível, pois exige que as áreas de seções transversais dos seus núcleos fossem muito grandes, inviabilizando assim as suas construções. Portanto, para que a saturação do núcleo não impacte na confiabilidade e no bom funcionamento dos sistemas de proteção, uma solução é empregar algoritmos computacionais para detectar e conseqüentemente compensar os efeitos causados pela saturação.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Os transformadores de Corrente (TCs) são equipamentos que permitem a instalação e o funcionamento de aparelhos de medição e proteção, sem que haja necessidade dos mesmos possuírem correntes nominais da ordem de grandeza do sistema de potência as quais estão instalados. Além disso, eles promovem isolação elétrica entre os instrumentos de medição e o sistema de potência.

Os TCs, através do fenômeno de conversão eletromagnética, transformam correntes elevadas que percorrem o sistema primário em correntes de menor intensidade que circulam no seu secundário. Eles são constituídos basicamente por um enrolamento primário, que normalmente possui poucas espiras, ligado em série ao sistema de potência, e um enrolamento secundário no qual a corrente nominal transformada é na maioria dos casos 5 A (ampères), e alimenta um instrumento, seja ele um medidor ou um relé de proteção.

A constituição básica e o modo de ligação de um TC são mostrados na figura 1.1.

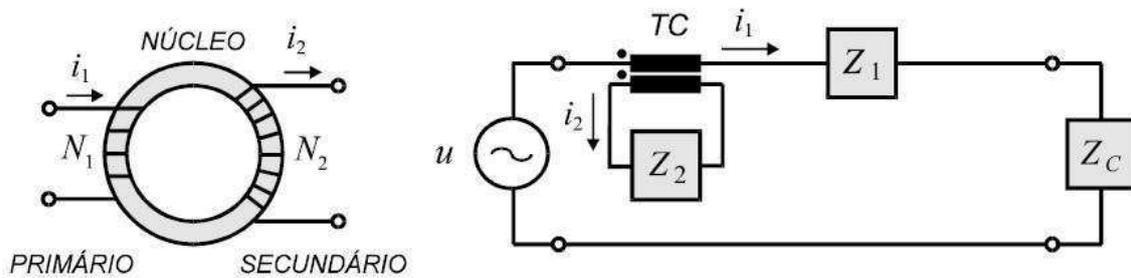


Fig. 1.1. Transformador de corrente e modo de ligação.

O seu núcleo geralmente tem forma de toróide, e é constituído por uma fita de liga de ferro-silício (3,2% Si) de grãos orientados helicoidalmente enrolada. Utilizando a Lei de Ohm aplicada a circuitos eletromagnéticos no seu núcleo obtemos:

$$\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2 = \mathcal{R}\Phi \quad (1.1)$$

Onde: $\mathcal{F}_1 \rightarrow$ força magnetomotriz da bobina primária do TC
 $\mathcal{F}_2 \rightarrow$ força magnetomotriz da bobina secundária do TC
 $\mathcal{R} \rightarrow$ relutância do circuito magnético do núcleo do TC
 $\Phi \rightarrow$ Fluxo magnético no núcleo do TC

Desenvolvendo:

$$N_P I_P - N_S I_S = \mathcal{R}\Phi \quad (1.2)$$

Supondo o transformador ideal, a sua relutância magnética vale zero:

$$N_P I_P - N_S I_S = 0 \quad (1.3)$$

$$N_P I_P = N_S I_S$$

$$I_P = \frac{N_S}{N_P} I_S$$

$$I_S = \frac{1}{\frac{N_S}{N_P}} I_P \quad (1.4)$$

Então como o TC tem o objetivo de reduzir a corrente, temos $N_P \leq N_S$.

Assim define-se a relação de transformação do TC por:

$$RTC = \frac{N_S}{N_P} \quad (1.5)$$

$$I_S = \frac{I_P}{RTC} \quad (1.6)$$

1.3.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS:

Os transformadores de corrente podem ter diferentes formas de utilização e diferentes formas de constituição, por isso são classificados de acordo com o modelo do enrolamento primário, uma vez que o enrolamento secundário é formado por uma bobina com derivações ou múltiplas bobinas combinadas em série ou em paralelo com o objetivo de se obter diferentes relações de transformação.

- TC tipo barra:

São de baixa tensão, e o seu enrolamento primário consiste de uma só espira fixada através do núcleo do transformador, como ilustrado na figura 1.2.

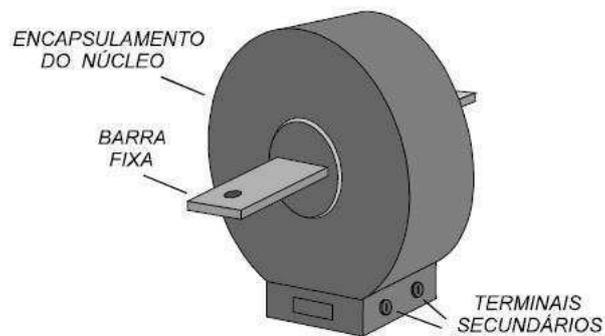


Fig. 1.2. Aspecto externo do TC tipo barra.

- TC tipo janela:

Também é classificado como de baixa tensão, onde seu enrolamento primário não é fixo no núcleo, e o mesmo consiste de uma ou mais espiras que passa através de uma abertura no núcleo, conforme se mostra na figura 1.3.

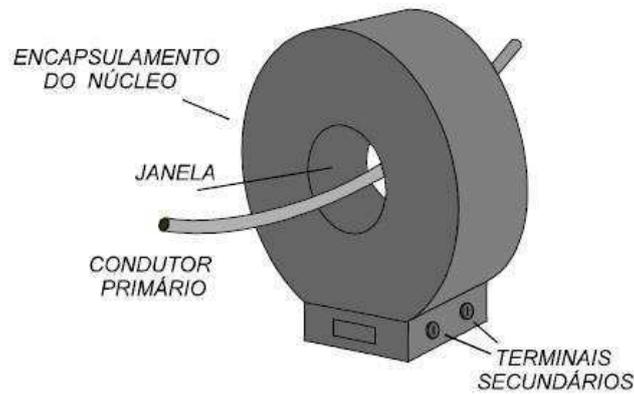


Fig. 1.3. Aspecto externo TC tipo Janela.

- TC tipo enrolado:

São os TCs cujo enrolamento primário é formado por uma ou mais espiras, e envolve mecanicamente o núcleo do transformador, conforme ilustrado abaixo:

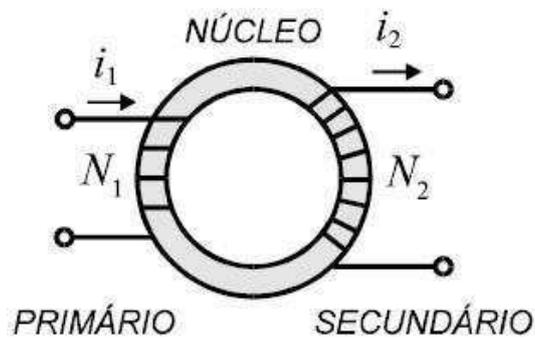


Fig. 1.4. Constituição básica TC tipo Enrolado.

- TC tipo núcleo dividido:

É aquele TC que possui características semelhantes ao tipo janela, o seu núcleo pode ser aberto, envolvendo assim o condutor que funciona como enrolamento primário. É muito utilizado em instrumentos de medição de corrente e potência, conforme está ilustrado na figura abaixo.

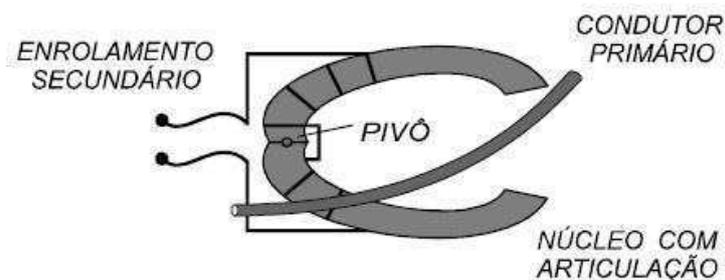


Fig. 1.5. TC de núcleo dividido.

- TC tipo bucha:

Possuem larga aplicação em subestações de energia elétrica. São constituídos de um núcleo toroidal em forma de anel, o qual está situado ao redor de uma bucha de isolamento, através da qual passa o condutor primário. Sua instalação é feita na bucha dos equipamentos, por exemplo, transformadores ou disjuntores, assim o condutor primário consiste do próprio condutor da linha.

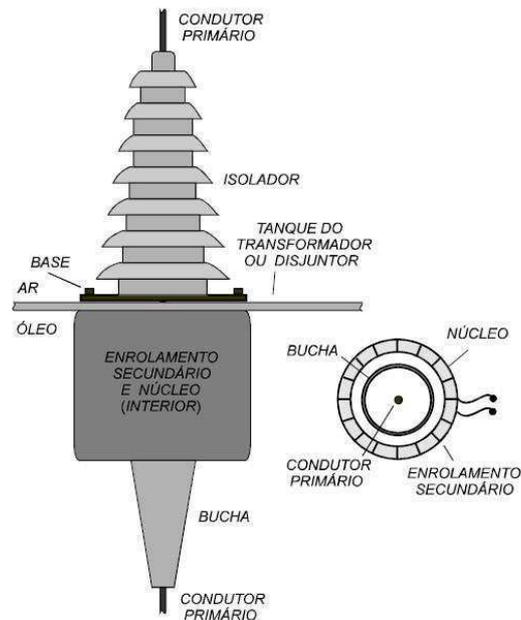


Fig. 1.6. TC tipo bucha com detalhes nos seus enrolamentos.

- TCs de vários enrolamentos primários:

São aqueles TCs que possuem vários enrolamentos primários separados isoladamente e um só enrolamento secundário. Assim as bobinas primárias podem ser ligadas em série ou paralelo obtendo-se várias relações de transformação.

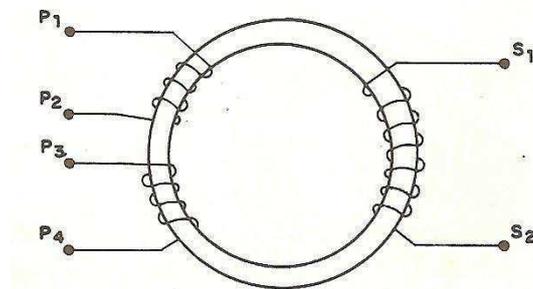


Fig. 1.7. TC com vários enrolamentos primários.

- TCs de vários núcleos:

São constituídos de dois ou mais enrolamentos secundários montados isoladamente em seu próprio núcleo, onde cada núcleo pode possuir características magnéticas distintas. Se um dos enrolamentos não estiver sendo utilizado, o mesmo deve ser curto-circuitado.

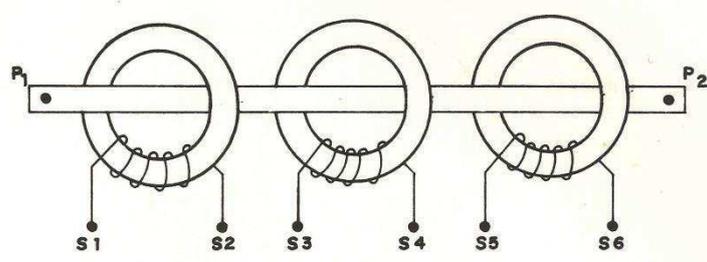


Fig. 1.8. TC de vários núcleos secundários.

1.3.4 CLASSIFICAÇÃO

Os transformadores de corrente são fabricados de acordo com a finalidade para a qual serão utilizados. A NBR 6856 da ABNT classifica os TCs em dois tipos: para serviço de medição e para proteção.

- TCs para serviço de medição:

Os transformadores de corrente destinados ao serviço de medição, seja corrente ou energia, são equipamentos capazes de transformar as correntes do sistema de potência na proporção de $I_p/5$. Assim os instrumentos de medição são dimensionados em tamanhos reduzidos e registram os valores das medições sem que estejam ligados diretamente ao circuito primário.

- TCs para serviço de proteção:

Esses TCs são capazes de transformar elevadas correntes de defeitos, sobrecarga ou curto-circuito, em pequenas correntes, permitindo a operação dos relés sem que estes estejam diretamente ligados ao sistema de potência, tornando-os um material extremamente econômico, e favorecendo a manutenção dos seus componentes.

Capítulo 2

TCS EM REGIME TRANSITÓRIO

Apresenta-se uma análise do desempenho de TCS em regime transitório, com as seguintes simplificações: perdas magnéticas nulas e curva de saturação linearizada por partes.

2.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO

Considerando-se uma linha de transmissão monofásica, na qual ocorreu um curto circuito como mostrado na figura abaixo, onde temos que $u(t) = U_m \text{sen}(\omega t + \theta)$. Para $t = 0$, tem-se que $u(0) = U_m \text{sen}(\theta)$. Daí o ângulo θ determina o valor da tensão no instante do curto-circuito, sendo denominado ângulo de incidência do defeito.

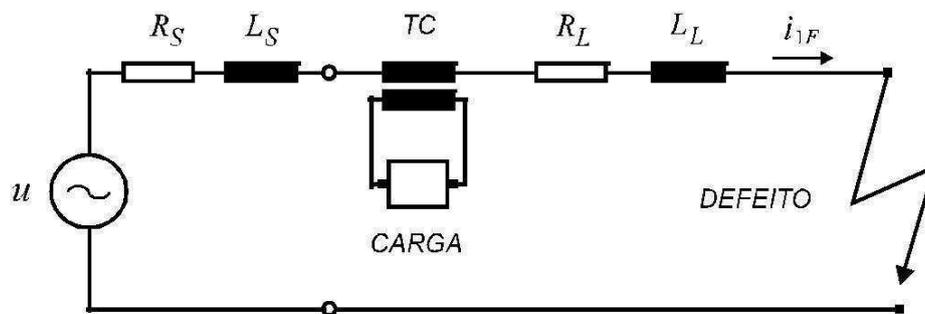


Fig 2.1. Representação simplificada do sistema primário.

A impedância primária total é:

$$\mathbf{Z}_1 = Z_1 e^{j\phi_1}, \quad (2.1)$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}, \quad (2.2)$$

$$R_1 = R_S + R_L, \quad (2.3)$$

$$L_1 = L_S + L_L, \quad (2.4)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_1}{R_1} \right), \quad (2.5)$$

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

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} \quad (2.6)$$

Assim, pode-se escrever para o circuito:

$$L_1 \frac{di_{1F}}{dt} + R_1 i_{1F} = U_m \text{sen}(\omega t + \theta). \quad (2.7)$$

Supondo que o curto-circuito indicado na Figura 2.1 ocorre em $t = 0$ e que o valor instantâneo da corrente pré-falta é $i_{1F}(0) = I_0$, a solução de (2.7) é (RAO, 1979):

$$i_{1F} = \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\omega t + \theta - \phi_1) + \left[I_0 - \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\theta - \phi_1) \right] e^{-t/T_1} \quad (2.8)$$

Observamos que a corrente i_{1F} possui uma componente alternada senoidal, e outra componente contínua com decaimento exponencial, como mostra a figura 2.2.

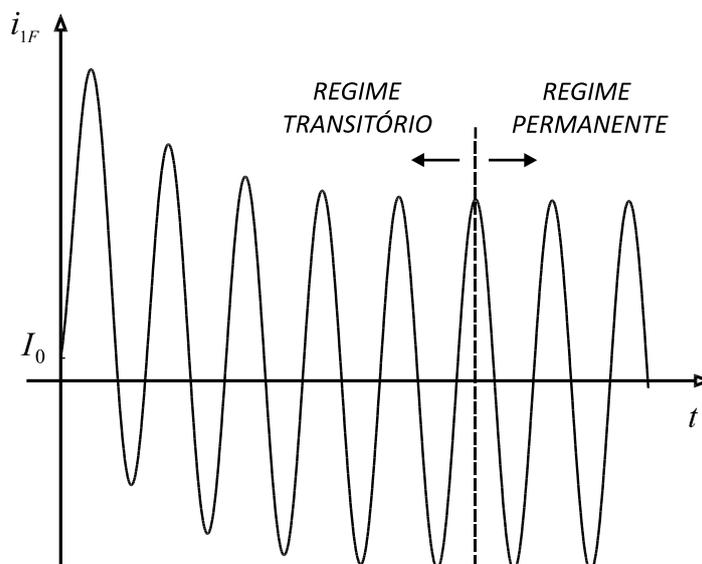


Fig. 2.2. Corrente assimétrica de curto-circuito.

Considerando $\theta - \phi_1 = -\pi/2$, obtém-se a situação mais pessimista, pois assim a componente contínua de i_{1F} assume o seu maior valor possível. Para linhas de transmissão de alta tensão, o ângulo ϕ_1 , a medida que a tensão nominal da mesma aumenta, torna-se mais próximo de 90° . Assim deduz-se que a máxima assimetria da corrente de curto-circuito (ou seja, a condição mais desfavorável de ocorrência do defeito) ocorre quando a onda de tensão $u(t)$ assume valores próximos de zero.

2.2 REPRESENTAÇÃO DO TC

2.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No modelo mostrado na figura 2.3, e representado pelo seu circuito equivalente, são desprezadas as capacitâncias dos enrolamentos, a resistência e a indutância do enrolamento primário.

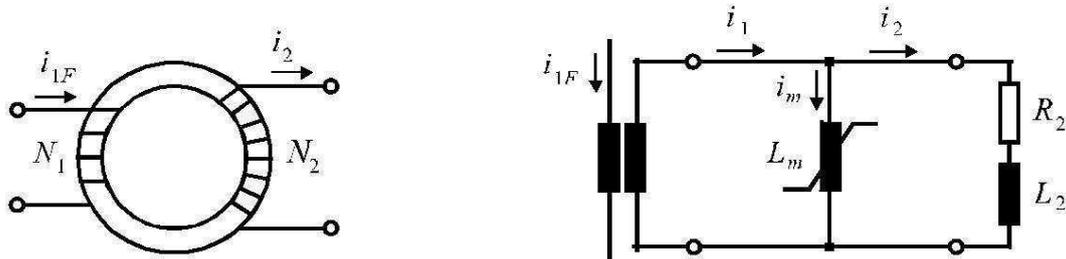


Fig. 2.3. Transformador de corrente e seu circuito equivalente simplificado.

Denomina-se por N_1 e N_2 os números de espiras dos enrolamentos primários e secundário respectivamente; R_2 e L_2 representam respectivamente a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento secundário; e a indutância de magnetização do núcleo é dada por L_m .

A curva de magnetização do núcleo encontra-se representada na figura 2.4, e foi encontrada utilizando linearização por partes.

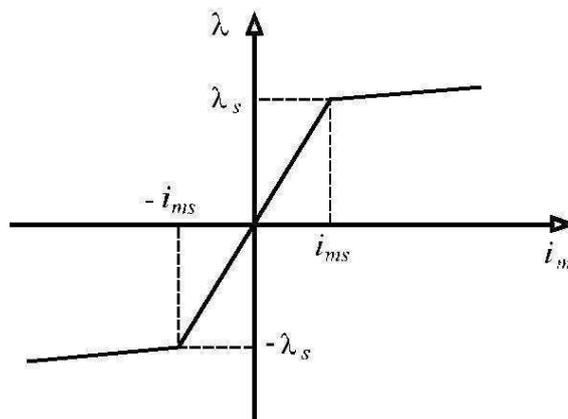


Fig. 2.4. Curva de saturação linearizada por partes.

2.2.2 DESEMPENHO EM REGIME NÃO-SATURADO

Observando-se o circuito representado na figura 2.3, e considerando $-\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_s$, obtemos a seguinte expressão para o fluxo de enlace no secundário:

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2.9)$$

Considerando H o campo magnético, l o comprimento médio do toróide, B a densidade de fluxo, μ a permeabilidade magnética e A a área de seção reta do núcleo, obtemos as seguintes relações:

$$k_N = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.10)$$

$$L_m = \mu \frac{N_2^2 A}{l} \quad (2.11)$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (2.12)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{R_2}{Z_2} \right) \quad (2.13)$$

$$i_2 = \frac{i_{1F}}{k_N} - \frac{1}{L_m} \lambda \quad (2.14)$$

$$T_2 = \frac{L_2 + L_m}{R_2} \cong \frac{L_m}{R_2} \quad (2.15)$$

Onde as variáveis I_{1F} e T_2 representam respectivamente o valor eficaz da componente simétrica de I_{1F} e a constante de tempo secundária. Após algumas substituições e manipulações algébricas encontramos a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}I_{1F}R_2}{\omega k_N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos\phi_2} \text{sen}(\omega t + \phi_2) \right] \quad (2.16)$$

A manipulação algébrica completa de 2.16 pode ser encontrada em GUERRA(2007) e em IEEE PSRC(1976).

Analisando a equação observa-se que ela descreve a curva esboçada com traço cheio na figura 2.5, a qual corresponde a soma de uma componente contínua transitória com uma componente alternada senoidal, além disso, são associadas as componentes senoidal e exponencial da corrente I_{1F} . Dessa forma o núcleo do TC pode sofrer dois tipos diferentes de sobrefluxo.

Podem-se identificar os seguintes fatores de influência no caso do sobrefluxo causado pela componente alternada da corrente I_{1F} , o valor eficaz desta componente e a impedância da carga ligada ao secundário. Para o caso do sobrefluxo causado pela componente contínua, além dos fatores já citados, são de fundamental importância para análise do desempenho dos TCs os valores das constantes de tempo T_1 e T_2 .

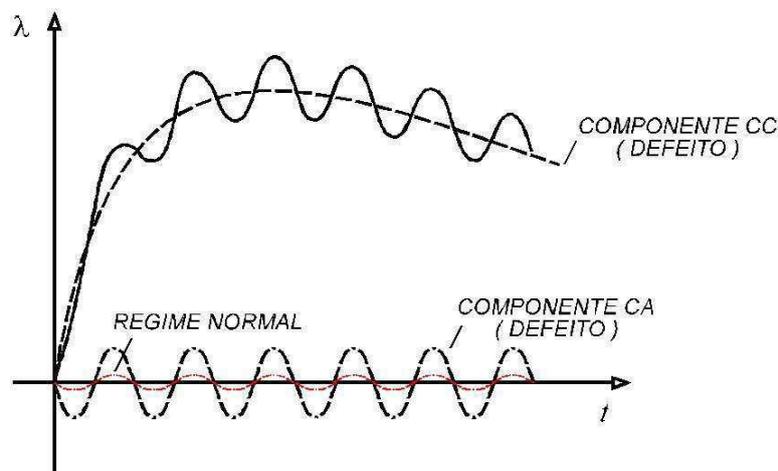


Fig. 2.5. Fluxo de enlace no núcleo do TC na ocorrência de um curto-circuito no primário.

2.2.3 DESEMPENHO EM REGIME SATURADO

Considera-se um TC com carga resistiva, além disso, com $N_1 = N_2$. Nas figuras abaixo estão representadas as curvas do fluxo de enlace no núcleo, as correntes nos enrolamentos primário e secundário e a corrente que circula pelo ramo de magnetização:

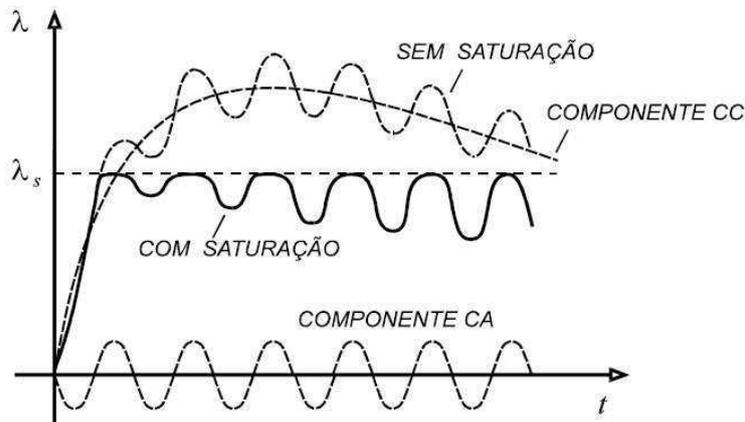


Fig. 2.6. Fluxo de enlace no núcleo do TC.

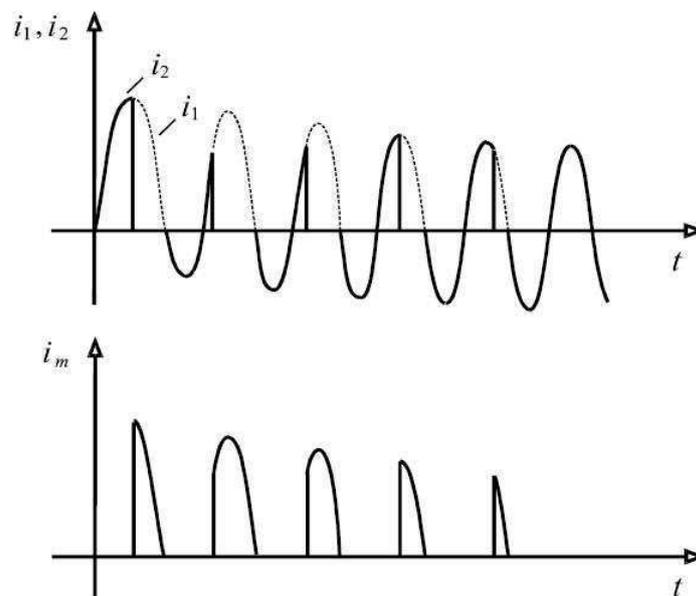


Fig. 2.7. Correntes primária, secundária e de magnetização durante a ocorrência de um curto-circuito.

Analisando os gráficos citados acima se observa que o efeito da saturação no núcleo faz com que o fluxo imposto pela fonte não ultrapasse muito o valor λ_s . Para $-\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_s$, ou seja, para a região não saturada, a indutância L_m é elevada e i_m é pequena. Já para a região saturada, o valor de L_m cai drasticamente. Durante os intervalos de tempo em que o núcleo satura aproximadamente toda a corrente i_1 passa a

circular pelo ramo de magnetização, ocorrendo distorções acentuadas na forma de onda da corrente secundária i_2 .

Para o caso da carga apresentar uma componente indutiva, verifica-se que quando o núcleo atinge a saturação, diferentemente do caso anterior a corrente não cai instantaneamente para zero, devido a propriedade dos indutores em oferecer dificuldades as variações bruscas de corrente, obtém-se o oscilograma de corrente representado na figura abaixo.

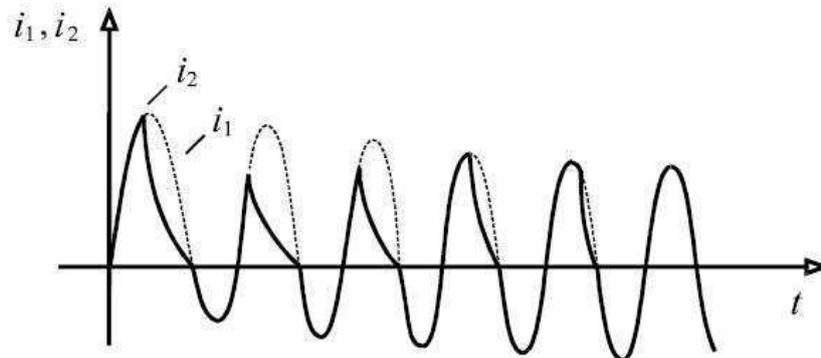


Fig. 2.8. Corrente secundária no TC com carga com componente indutiva.

2.3 ERRO NOS TCS PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO

2.3.1 ERRO DE RELAÇÃO

Levando-se em consideração a representação esquemática mostrada na figura 2.3, a NBR 6856 – ABNT (1992) estabelece que o erro de relação percentual deva ser calculado por:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{I_m}{I_2} \quad (2.17)$$

Onde as grandezas I_2 e I_m são os valores eficazes respectivamente das correntes i_2 e i_m . Além disso, o erro de fase não é levado em consideração nos TCS para serviço de proteção e o erro máximo admissível $\varepsilon_{\%}$ deve ser calculado para a corrente secundária igual a vinte vezes o seu valor nominal ($I_2 = 20I_{2N}$).

2.3.2 CURVA DE EXCITAÇÃO SECUNDÁRIA

As curvas de U_e versus I_e (curvas de excitação secundária), normalmente traçadas em escalas logarítmicas, são fornecidas pelos fabricantes, assim como está ilustrado na figura abaixo:

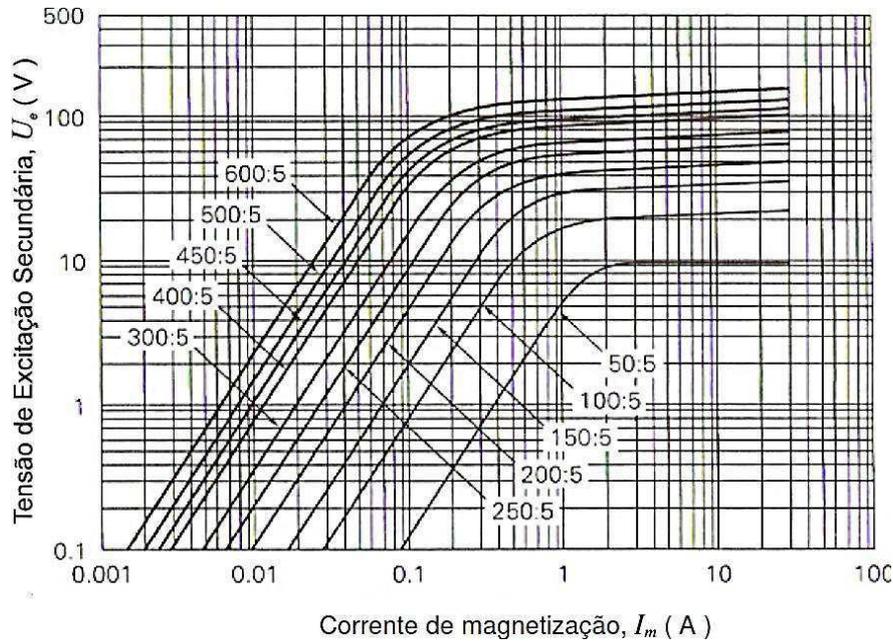


Fig. 2.9. Curva de excitação secundária de TCs.

Considerando o circuito representado na figura 2.3, para determinados valores da corrente I_2 e da impedância no enrolamento secundário, efetua-se o seguinte método para cálculo dos erros:

- Através da corrente eficaz I_2 e da impedância total do enrolamento secundário, calcula-se a tensão eficaz U_e . Esse processo é realizado para diversos valores de I_2 , inclusive para $I_2 = 20I_{2N}$.

$$U_e = I_2 \sqrt{(R_2 + R_c)^2 + X_c^2} \quad (2.18)$$

- Com os valores encontrados de U_e , e utilizando a curva de excitação secundária, encontram-se os valores correspondentes de I_m .
- Pela expressão 2.7 calculam-se os erros.

Para o caso da curva de excitação secundária não esteja disponível, pode-se obter a mesma por ensaio em laboratório, por meio da montagem mostrada na figura 2.10.

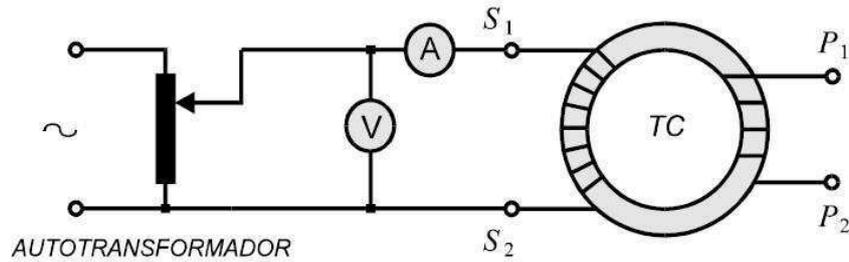


Fig. 2.10. Ilustração do ensaio laboratorial para levantar a curva de excitação secundária.

Os valores eficazes da tensão U_e e da corrente I_m são obtidos no enrolamento secundário, com o enrolamento primário em vazio, para diferentes valores da tensão da fonte, até atingir o grau de saturação desejado.

De acordo com a norma do IEEE Std. C57.13(1993) o ponto de joelho da curva $U_e - I_m$ é o ponto que apresenta uma reta tangente com inclinação de 45° . Considerando a norma do IEC Std. 60044-1 (2000), mais adotada na Europa, estipula esse ponto como aquele em que um acréscimo de 10% de U_e causa um acréscimo de 50% de I_m . Geralmente o ponto de joelho definido pelo IEC situa-se acima do definido pelo IEEE, como é mostrado na figura 2.11.

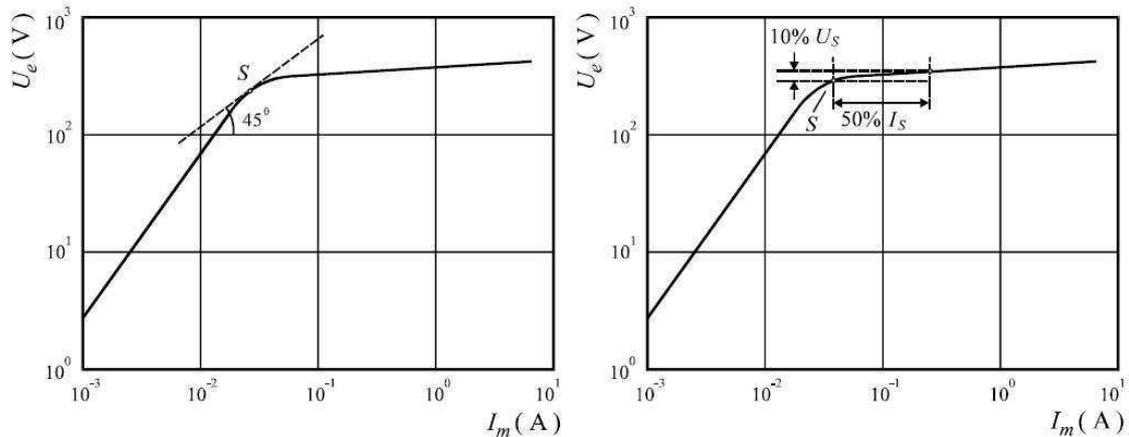


Fig. 2.11. Ponto de joelho (a) Estabelecido pelo IEEE. (b) Estabelecido pelo IEC.

Apesar das características de magnetização dos TCs fornecidas pelos fabricantes sejam dadas em termos dos valores eficazes de U_e e I_m o cálculo de processos transitórios necessita que essas características sejam dadas em valores de pico do fluxo de enlace e da corrente de magnetização. NEVES & DOMMEL (1993) apresentam um algoritmo para essa finalidade.

2.3.3 CAUSAS DE ERROS NOS TCS

Desenvolvendo a equação (2.16), obtém-se a seguinte expressão para a indução B no núcleo do TC:

$$B = \frac{\sqrt{2}I_{1F}R_2}{\omega k_N N_2 A} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos\phi_2} \text{sen}(\omega t + \phi_2) \right] \quad (2.19)$$

Analisando a equação (2.19) observa-se que os fatores que levam os núcleos dos TCS a saturação:

- Quanto maior for o módulo da corrente de curto-circuito no primário (I_{1F}), maior será a indução magnética (B) imposta sobre o núcleo do TC.
- A carga ligada ao enrolamento secundário também é diretamente proporcional a indução no núcleo do TC, ou seja, quanto maior for a carga R_2 maior será a indução magnética imposta.
- A área de seção reta do núcleo é inversamente proporcional, portanto quanto menor for a área A , maior será a indução, e mais é provável que o TC atinja a saturação mais rapidamente.
- A relação de espiras é inversamente proporcional, pois quanto menor for a relação $K_N N_2$, maior será a indução provocada sobre o núcleo.
- A constante de tempo T_1 e o ângulo de incidência da falta (Θ) também são fatores que são diretamente proporcionais a indução imposta.

2.4 INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO NOS TCS DE PROTEÇÃO

Sabe-se que os TCS de proteção devem reproduzir no enrolamento secundário a corrente do sistema de potência com maior veracidade possível. É necessário obter valores próximos de sua grandeza, principalmente durante a ocorrência de curtos circuitos, pois assim o desempenho dos relés não será afetado.

O desempenho dos relés de sobrecorrente instantâneos digitais não é afetado, pois mesmo em regime saturado os TCS podem fornecer corrente suficiente para a operação dos mesmos. Por outro lado, os relés temporizados podem ter seu desempenho afetado devido a saturação do TC, causando atraso na sua operação, assim como é estudado em EL-AMIN e ABBAS (2006).

O funcionamento dos relés de distancia foi estudado por MOONEY (2008), e foi verificado que a redução da magnitude da corrente e o seu atraso do ângulo de fase resultam em um sub-alcance e retardo na operação do relé.

O desempenho dos relés diferenciais é afetado progressivamente para relés utilizados na proteção de geradores, transformadores e linhas respectivamente. O seu desempenho é afetado na ocorrência de defeitos fora da zona de proteção, por causa das correntes residuais causadas pela saturação dos TCs os relés podem atuar indevidamente.

Capítulo 3

MODELOS DE TCS PARA CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS

O ponto mais importante na modelagem dos TCs consiste na representação do desempenho não linear do núcleo magnético dos transformadores de corrente, o qual apresenta um desempenho saturável e histerético.

3.1 MODELO DE PSEUDO-HISTERESE

Neste modelo é utilizado um indutor não linear em paralelo com um resistor linear, como pode ser observado na figura (3.1), onde essa associação representa os efeitos magnéticos no núcleo do TC.

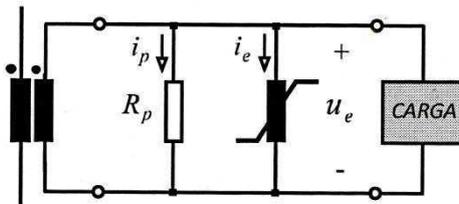


Fig. 3.1. Representação do circuito para o modelo de Pseudo-histerese.

O indutor não linear apresenta uma característica de magnetização $\lambda - i_m$ descrita pela curva de saturação indicada na figura (3.2b). O Resistor R_p exerce a função das perdas no núcleo magnético (perdas histeréticas, parasíticas e anômalas). Para o caso de u_e senoidal, o lugar geométrico é dado por uma elipse. Assim a associação em paralelo do indutor não linear com o resistor linear resulta em uma característica aproximada a um laço de histerese.

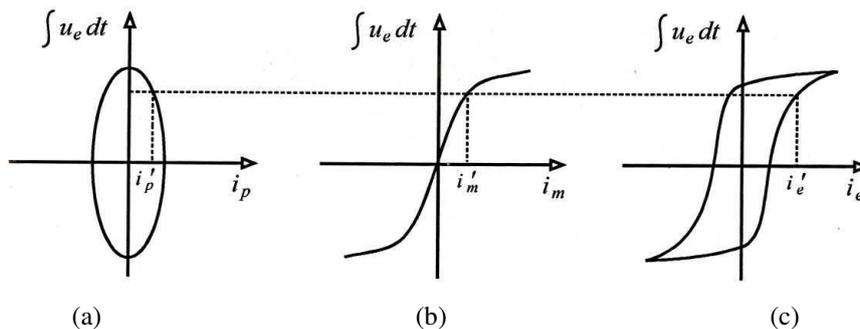


Fig. 3.2. Representação dos efeitos no núcleo por um indutor não linear em paralelo com um resistor linear.

Analisando o circuito da figura (3.1) obtemos as seguintes equações:

$$u_e = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (3.1)$$

$$i_2 = i_1 - i_m - i_p \quad (3.2)$$

Substituindo (3.2) em (3.1), e fazendo simplificações matemáticas temos:

$$u_e = Ri_1 - Ri_m - Ri_p + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{dt} - L \frac{di_p}{dt} \quad (3.3)$$

$$u_e = Ri_1 - Ri_m - u_e \frac{R}{R_p} + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{dt} \frac{d\lambda}{dt} - \frac{L}{R_p} \frac{du_e}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_e = Ri_1 - Ri_m - u_e \frac{R}{R_p} + L \frac{di_1}{dt} - \frac{L}{L_m} u_e - \frac{L}{R_p} \frac{du_e}{dt} \quad (3.5)$$

$$\frac{du_e}{dt} = \frac{R(i_1 - i_m) + L \frac{di_1}{dt} - \left(\frac{R}{R_p} + \frac{L}{L_m} \right) u_e}{\left(\frac{L}{R_p} \right)} \quad (3.6)$$

Para o caso de uma carga puramente resistiva ($L = 0$), tem-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2 i_2 = R_2 (i_1 - i_m - i_p) \quad (3.7)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2(i_1 - i_m - \frac{1}{R_p} \frac{d\lambda}{dt}) \quad (3.8)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2 i_1 - R_2 i_m - \frac{R_2}{R_p} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.9)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} \left(1 + \frac{R_2}{R_p}\right) = R_2(i_1 - i_m) \quad (3.11)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2(i_1 - i_m)}{\left(1 + \frac{R_2}{R_p}\right)} \quad (3.12)$$

3.2 MODELO DE TELLINEN

Apresenta-se um modelo de circuito capaz de reproduzir o desempenho baseado no modelo de histerese de Tellinen (1998).

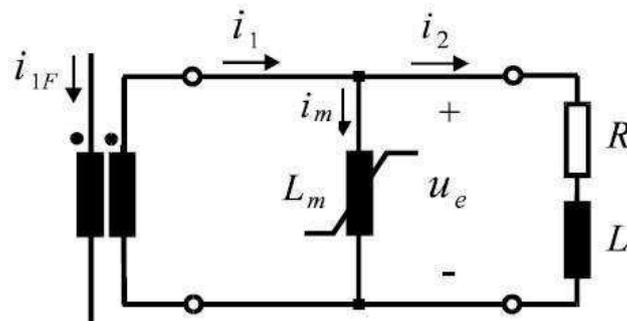


Fig. 3.3. Circuito elétrico simplificado de um TC.

Analisando o circuito acima, utilizando as leis dos nós e a lei das malhas respectivamente, podem-se escrever as seguintes relações:

$$i_m = i_1 - i_2 \quad (3.13)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = R i_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (3.14)$$

Substituindo (3.13) em (3.14), obtém-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = R(i_1 - i_m) + L \frac{d(i_1 - i_m)}{dt} \quad (3.15)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{dt} \quad (3.16)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.17)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} \left(1 + L \frac{di_m}{d\lambda} \right) = Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt}}{1 + L \frac{di_m}{d\lambda}} \rightarrow D_1 \quad (3.19)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{di_m}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \rightarrow D_2 \quad (3.20)$$

Pelo método de Euler:

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + h \cdot D_{1,k} \quad (3.21)$$

$$i_{m,k+1} = i_{m,k} + h \cdot D_{2,k} \quad (3.22)$$

$$i_{2,k+1} = i_{1,k+1} - i_{m,k+1} \quad (3.23)$$

Após manipulações algébricas, obtém-se $\frac{di_m}{d\lambda}$, assim como em TELLINEN (1998).

Para $\lambda_{(K+1)} \geq \lambda_K$:

$$\frac{di_m}{d\lambda} = \left\{ L_S + \frac{\lambda_{d(im)} - \lambda}{\lambda_{d(im)} - \lambda_{a(im)}} \left[\frac{d\lambda_{a(im)}}{di_m} - L_S \right] \right\}^{-1} \quad (3.24)$$

Para $\lambda_{(K+1)} < \lambda_K$:

$$\frac{di_m}{d\lambda} = \left\{ L_S + \frac{\lambda - \lambda_{a(im)}}{\lambda_{d(im)} - \lambda_{a(im)}} \left[\frac{d\lambda_{d(im)}}{di_m} - L_S \right] \right\}^{-1} \quad (3.25)$$

Onde:

- A constante L_S é a indutância de magnetização na região linear, ou seja, região saturada.
- O termo $\lambda_{d(im)}$ aproxima o ramo descendente do laço maior do laço de histerese.
- O termo $\lambda_{a(im)}$ aproxima o ramo ascendente do laço maior do laço de histerese.

Como a simetria $\lambda_{a(im)} = -\lambda_{a(-im)}$ é verídica, então pode-se gerar o ramo ascendente a partir do ramo descendente. O ramo descendente pode ser aproximado por:

$$\lambda = a_1 \tan^{-1} \left(\frac{i_m + a_2}{a_3} \right) + a_4 i_m \quad (3.26)$$

As constantes da expressão são determinadas mediante técnicas de ajustes de curvas.

Além das equações (3.18) e (3.19) citadas acima, outras equações adicionais encontradas do modelo são:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2(i_1 - i_m) + L_2 \frac{di_1}{dt}}{1 + L_2 \frac{di_m}{d\lambda}} \quad (3.27)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{di_m}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.28)$$

3.3 O PROGRAMA *EMTP-RV*

3.3.1 EVOLUÇÃO DO *EMTP-RV*

O *EMTP-RV* é uma ferramenta computacional sofisticada para simulação de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos de sistemas elétricos de potência. Ele foi desenvolvido em contra partida ao *TNA (Transient Network Analyzer)*, porém muitos outros recursos foram adicionados ao *EMTP*, que durante alguns anos se tornou o padrão no seu setor.

O *EMTP* foi desenvolvido no final dos anos de 1960 por Dommel, que trouxe o programa para *Bonneville Power Administration (BPA)*. Quando o Prof. Dommel deixou *BPA* para a *University of British Columbia*, em 1973, duas versões do programa começaram a tomar forma: a relativamente pequena versão *UBC*, usado principalmente para o desenvolvimento do modelo e da versão *BPA*, que se expandiu para atender às necessidades dos engenheiros de serviços públicos. A fim de racionalizar o desenvolvimento do programa e para atrair financiamento de outras utilidades, o Grupo de Coordenação do Desenvolvimento *EMTP (DCG)* foi fundada em 1982.

Desde o início da *DCG*, várias mudanças foram realizadas na comunidade *EMTP*. Esses esforços resultaram no lançamento da terceira versão da versão *DCG* do *EMTP* em 1996 (*EMTP96*). O *EMTP-RV* consiste no resultado final da evolução do *EMTP (EletroMagnetic Transient Program)* feita pela *DCG* em 1998, onde foram atualizados as funcionalidades do *EMTP96*, sendo implementado principalmente pela linguagem Fortran 95. Por isso o emprego do termo *RV*, para marcar a versão reestruturada (*Restructured Version*) do *EMTP*. (*EMTP-RV*, 2012)

A versão reestruturada do software passou a ser comercializada em 2003, sob a administração da *Hydro-Québec*. O *software* é composto por:

- *EMTP-RV*: Interface computacional de cálculo.
- *EMTPWorks*: Mecanismo com interface gráfica amigável, com algumas opções personalizadas, de fácil manuseio pelo usuário.
- *ScopeView*: é o visualizador de resultados do *software*, possui alta capacidade de processamento de sinais e aquisição de dados.

Os softwares da serie *EMTP* são capazes de modelar diversos componentes do sistema elétrico de potência, como por exemplo: elementos lineares e não lineares,

motores, transformadores, dentre outros. Para resolução de elementos não lineares são utilizadas algumas aproximações, sendo as mais usuais a solução pseudolinear e o método da compensação (DOMMEL, 1986).

O *EMTP-RV* utiliza métodos que foram aperfeiçoados para solucionar modelos de estabilidade e não lineares, sempre eliminando as limitações numéricas e permitindo resolver os problemas com um número de iterações reduzido. O *software* utiliza os métodos de Euler Regressivo além do método de Integração Trapezoidal para resolver as equações equivalentes do sistema, cabe ao usuário escolher o método de integração a ser utilizado, podendo também ajustar os demais parâmetros referentes a simulação, como por exemplo o número máximo de iterações, e o critério de convergência. O *EMTP-RV* possui em sua biblioteca uma grande variedade de modelos elétricos e dispositivos utilizados nos sistemas elétricos, além de uma avançada capacidade de modelagem usando *DLLs* e dispositivos na *GUI (Graphical User Interface)* (*EMTP-RV*, 2012).

3.3.2 CIRCUITO UTILIZADO

O modelo utilizado no cálculo através do software de simulação de transitórios *EMTP-RV* está ilustrado na figura abaixo:

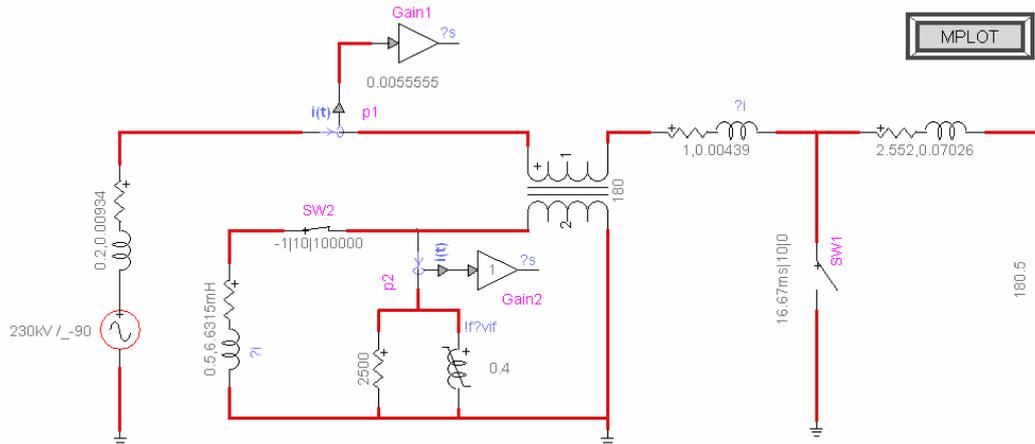


Fig. 3.4. Modelo de TC utilizado no *EMTP-RV*.

O modelo do TC foi implementado através da associação de um transformador, um resistor e uma indutância variável. O transformador possui uma relação de espiras de $RTC = 180$, ou seja, de 1 para 180. O resistor possui uma alta impedância, para representar as perdas dinâmicas, e em paralelo foi empregado uma indutância variável, a

qual pode apresentar um fluxo residual e pode receber valores da curva de saturação (corrente (A) x Fluxo (Wb)).

Além destes componentes, foi necessário aplicar a ferramenta *MPLLOT*, ou pacote de plotagem, função para visualização de dados de formas de onda no domínio do tempo ou da frequência. Para este caso foi utilizado para observação das correntes no primário I_1 , no secundário I_2 e de magnetização I_m .

Capítulo 4

RESULTADOS OBTIDOS

As simulações a seguir foram realizadas para o caso de um TC instalado em uma linha de transmissão com tensão nominal de 230KV, como mostrado na figura abaixo. A impedância entre o TC e o ponto onde ocorre o defeito é $Z_L = 0.1595 + j0.1655$, os dados do TC são informado abaixo.

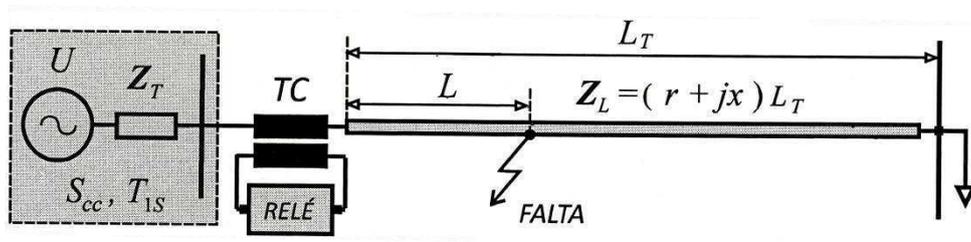


Fig. 4.1. Representação do sistema de transmissão utilizado.

O TC apresenta os seguintes dados:

- Relação de espiras: 1/180, $R_{TC} = 180$;
- Correntes nominais: 900/5 A;
- Comprimento médio do núcleo: 0,50 m;
- Resistência dos enrolamentos: 0,25 Ω ;
- Fator de sobrecorrente: 20.

A linha de transmissão apresenta os seguintes dados:

- Tensão nominal: 230 KV;
- Corrente nominal: 800 A
- Comprimento da linha: 85 km;
- Distancia do defeito: 5 km;
- Resistência em série: $r = 0,0319 \Omega/km$;
- Reatância em série: $x = 0,3311 \Omega/km$.

Para todos os métodos foram calculados a corrente primária i_1 , corrente secundária i_2 , a corrente de magnetização i_m , o fluxo de enlace no secundário e a curva de magnetização para as seguintes cargas ligadas ao enrolamento secundário do TC:

- Carga puramente resistiva: $Z_2 = 2 \Omega$;
- Carga com componente indutiva: $Z_2 = 1,1 + j0,9 \Omega$;
- Carga tipicamente indutiva: $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$;

4.1 MODELO DA PSEUDO-HISTERESE

Este modelo aplica a equação (3.6) para o cálculo do fluxo magnético do núcleo do TC.

4.1.1 CARGA PURAMENTE RESISTIVA

Para uma carga puramente resistiva $Z_2 = 2 \Omega$ ligada ao secundário do TC, o qual foi considerado com um fluxo residual de $0,4Wb$, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.2, 4.3 e 4.4.

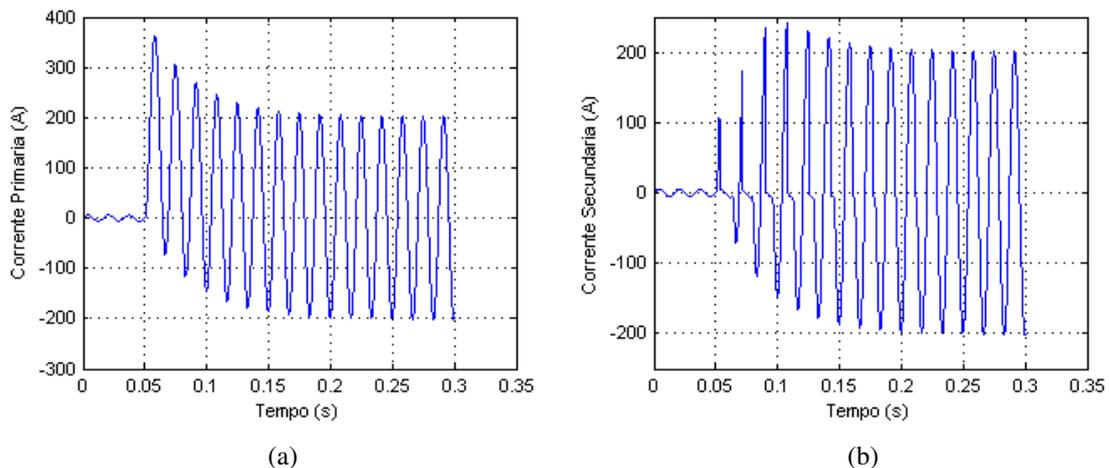


Fig. 4.2. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga R)

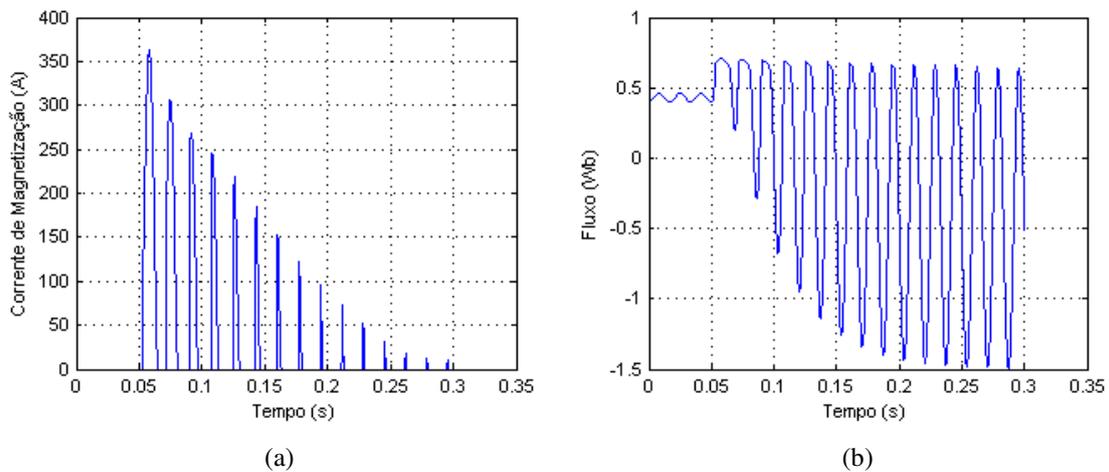


Fig. 4.3. (a) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (b) Corrente de magnetização i_m . (Carga R)

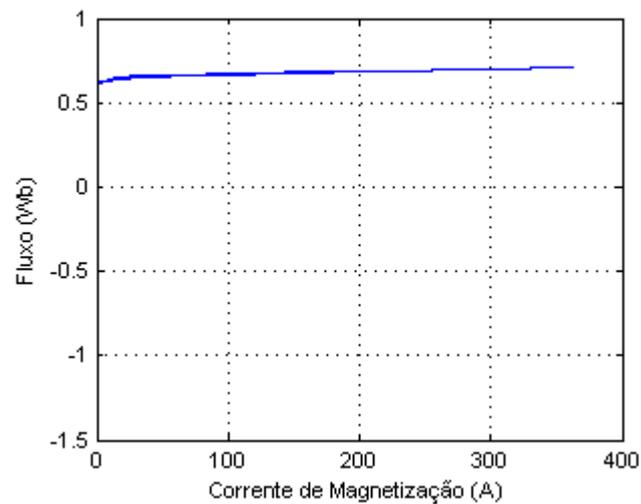


Fig. 4.4. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga R)

4.1.2 CARGA COM COMPONENTE INDUTIVA

Para uma carga que possui uma componente indutiva de valor $Z_2 = 1,1 + j0,9 \Omega$ ligada ao secundário do TC, o qual foi considerado com um fluxo residual de 0,4Wb, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.5, 4.6 e 4.7.

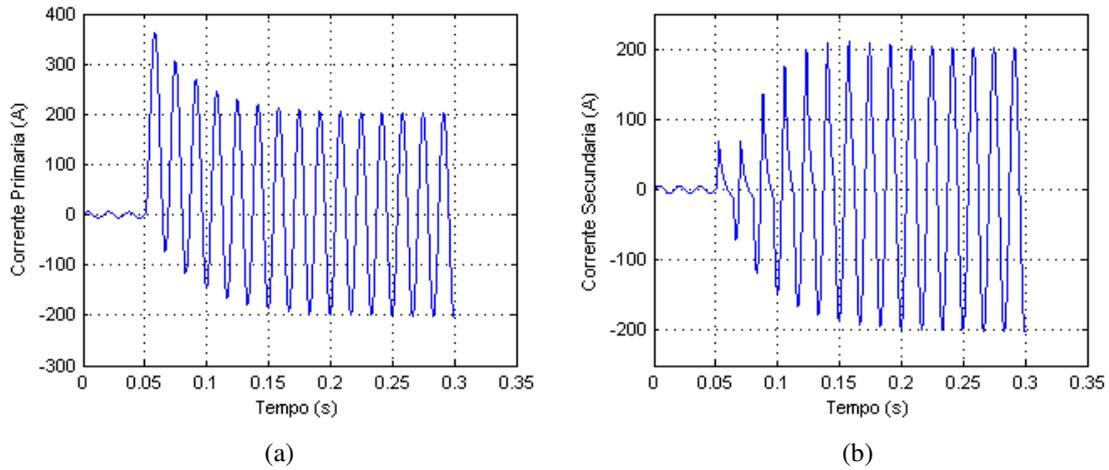


Fig. 4.5. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga RL)

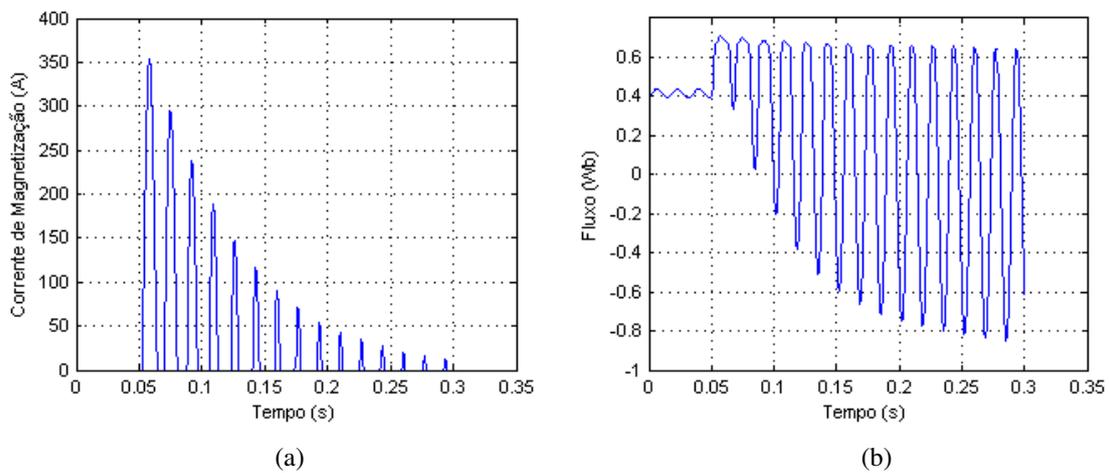


Fig. 4.6. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga RL)

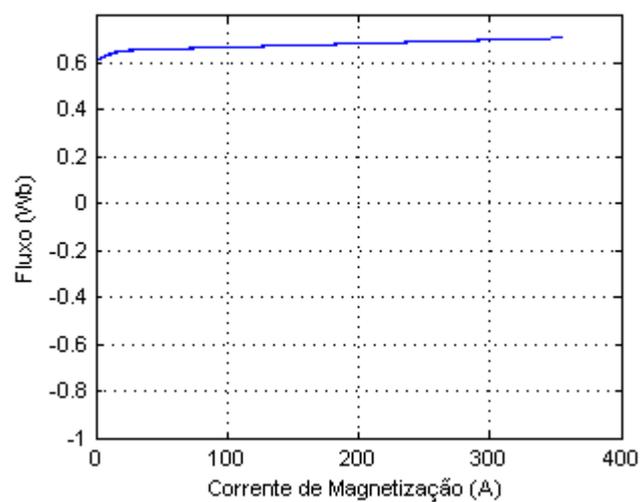


Fig. 4.7. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga RL)

4.1.3 CARGA TÍPICAMENTE INDUTIVA COM FLUXO RESIDUAL

Para uma carga tipicamente indutiva, de valor $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$, instalada no secundário do TC, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.8, 4.9 e 4.10. Também foi considerado um fluxo residual de $0,4Wb$.

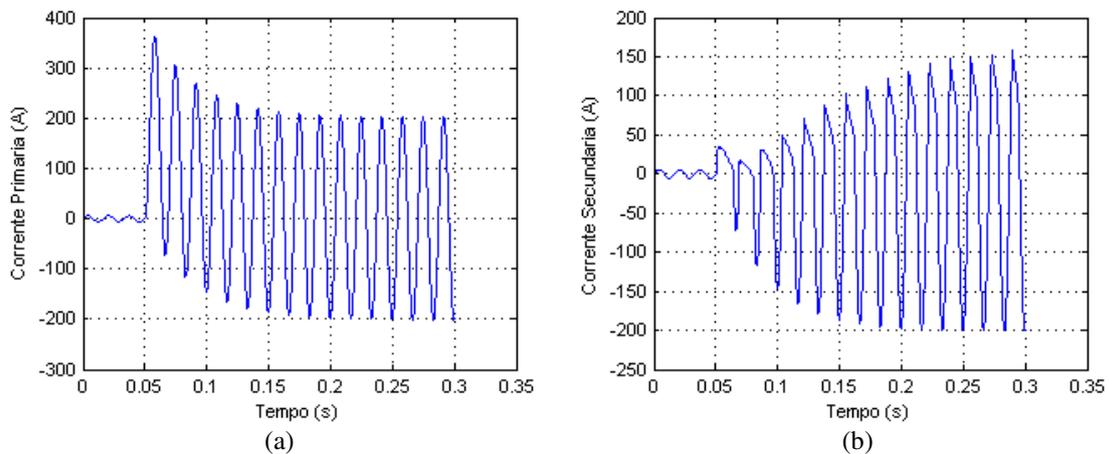


Fig. 4.8. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga tipicamente indutiva)

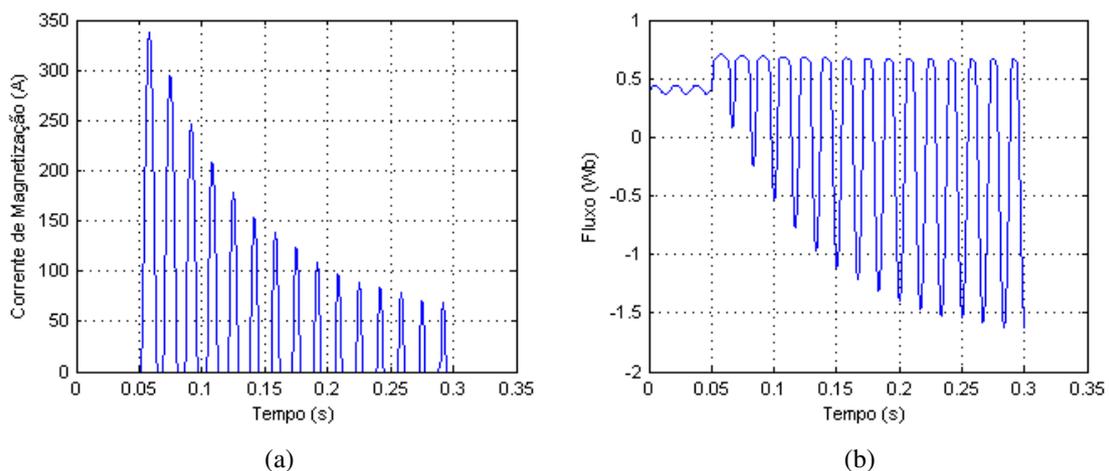


Fig. 4.9. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de $0,4Wb$ (Carga tipicamente indutiva)

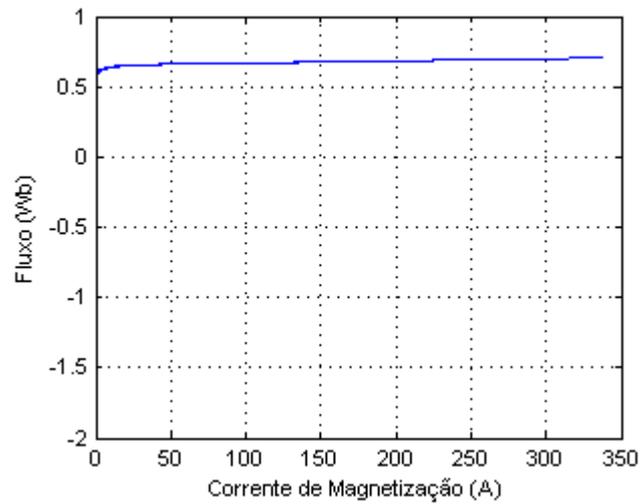


Fig. 4.10. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga tipicamente indutiva)

4.1.4 CARGA TÍPICAMENTE INDUTIVA SEM FLUXO RESIDUAL

Para uma carga tipicamente indutiva, de valor $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$, instalada no secundário do TC, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.11, 4.12 e 4.13. Foi considerado que o núcleo não possuía fluxo residual.

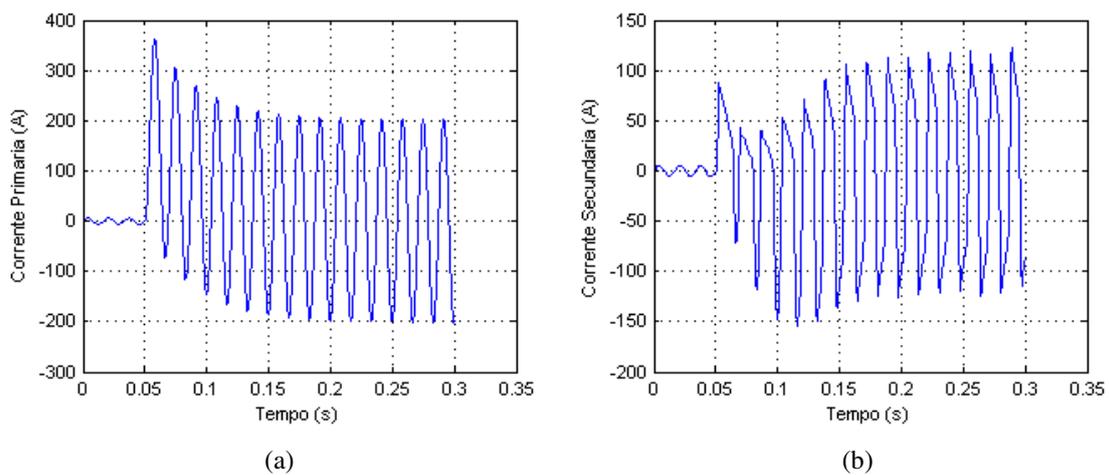


Fig. 4.11. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga tipicamente indutiva)

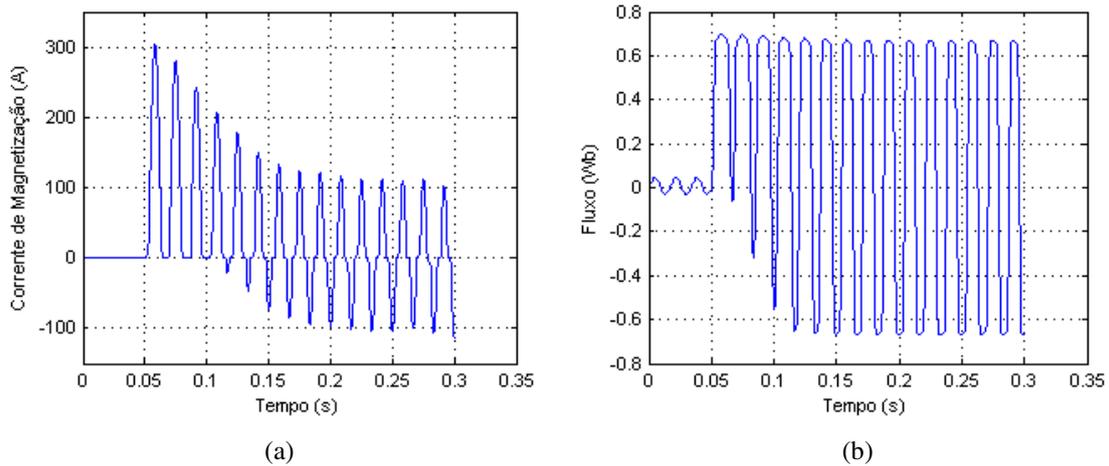


Fig. 4.12. (a) Corrente de magnetização i_m (b) Fluxo de enlace no secundário, núcleo sem fluxo residual. (Carga tipicamente indutiva)

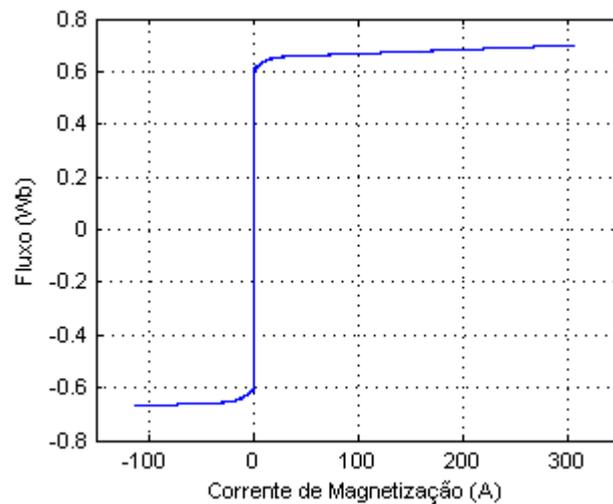


Fig. 4.13. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga tipicamente indutiva)

4.2 MODELO DE TELLINEN

Para as simulações com o modelo de Tellinen foram implementados dois algoritmos, o primeiro nomeado como “Tellinen Linear” faz uso das equações lineares (3.24) e (3.25) para calcular a susceptibilidade diferencial do TC. Já o segundo algoritmo, nomeado “Tellinen Tangente”, faz uso da equação (3.26) para aproximar os ramos do laço de histerese.

4.2.1 CARGA PURAMENTE RESISTIVA

Para uma carga puramente resistiva $Z_2 = 2 \Omega$ ligada ao secundário do TC, o qual foi considerado com um fluxo residual de $0,4Wb$, através da rotina que aplica as equações lineares “Tellinen Linear”, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.14, 4.15 e 4.16.

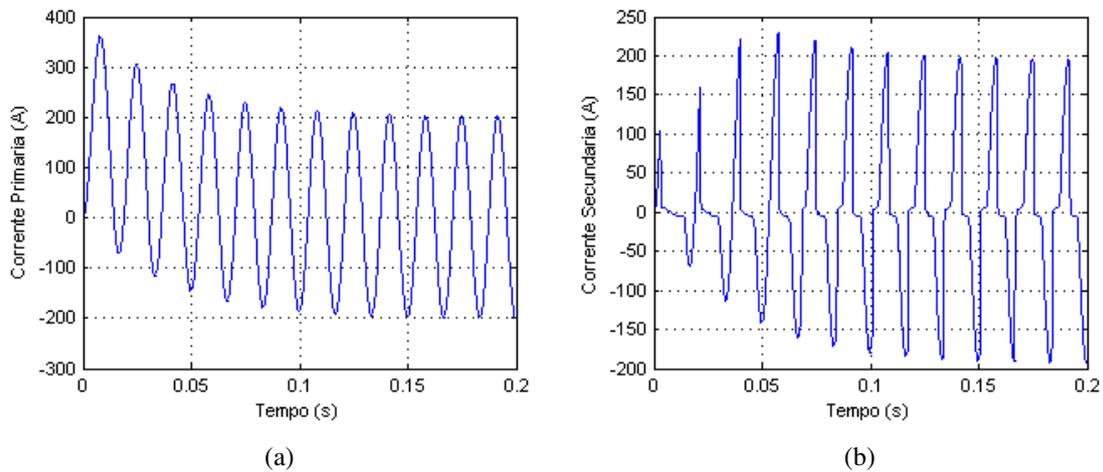


Fig. 4.14. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 (Carga R)

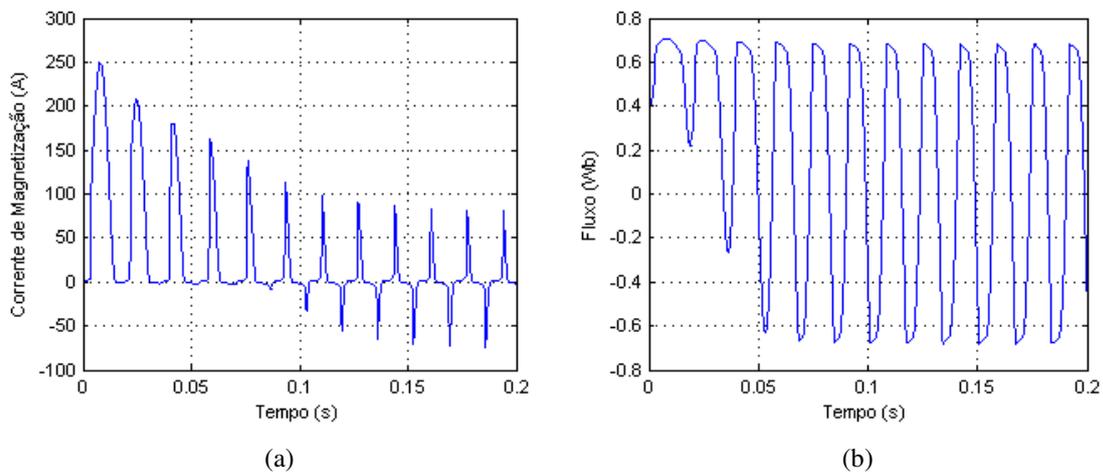


Fig. 4.15. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de $0,4Wb$. (Carga R)

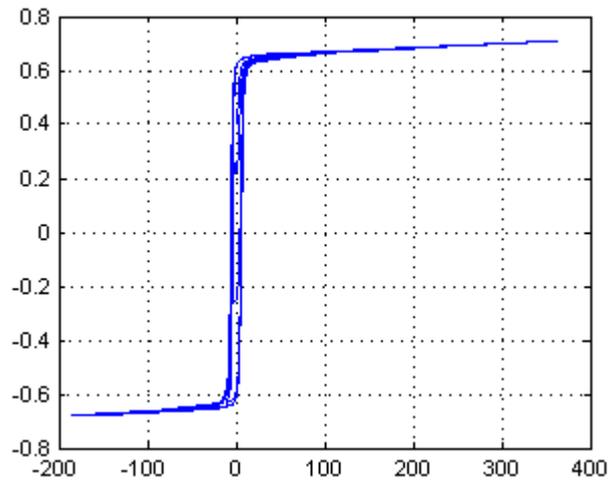


Fig. 4.16. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga R)

4.2.2 CARGA COM COMPONENTE INDUTIVA

Para uma carga com valor $Z_2 = 1,1 + j0,9 \Omega$ ligada ao secundário do TC, o qual foi considerado com um fluxo residual de $0,4Wb$, através da rotina que aplica as equações lineares “Tellinen Linear”, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.17, 4.18, e 4.19.

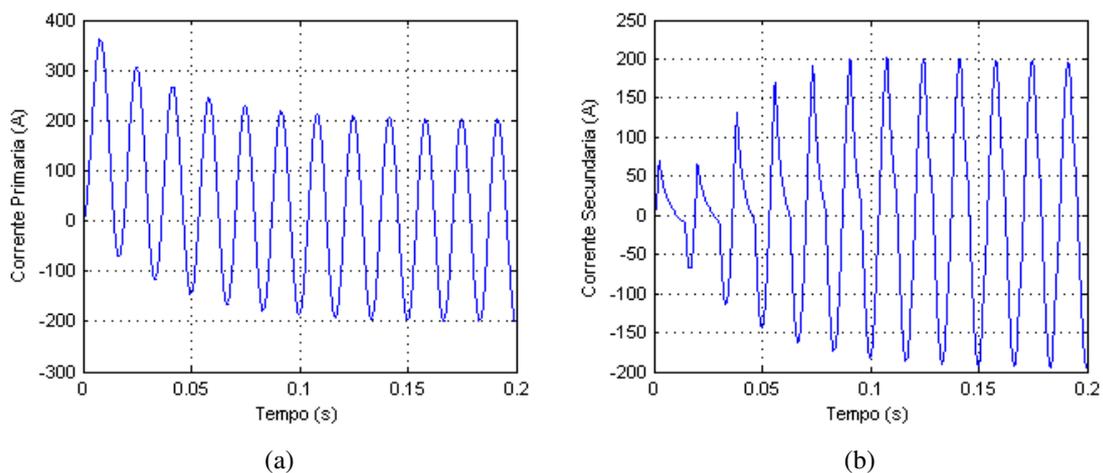


Fig. 4.17. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga RL)

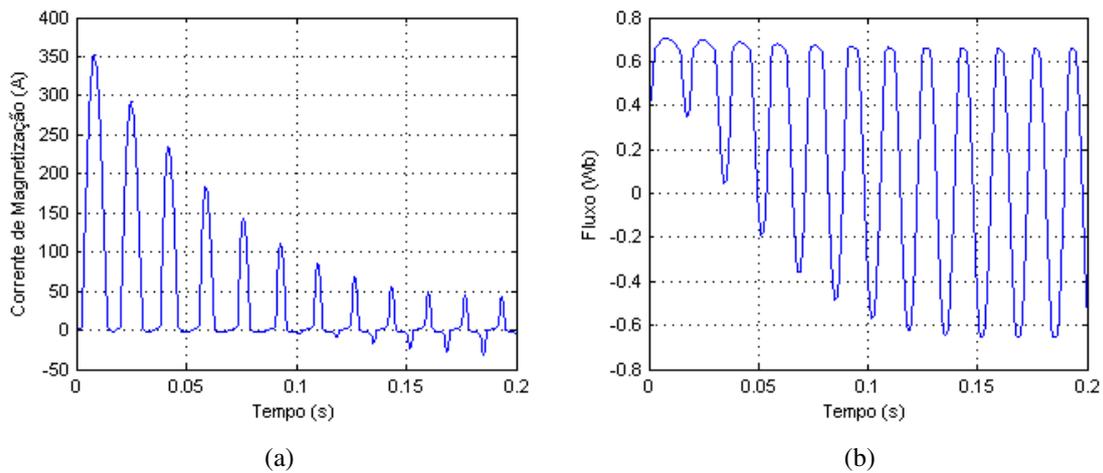


Fig. 4.18. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga RL)

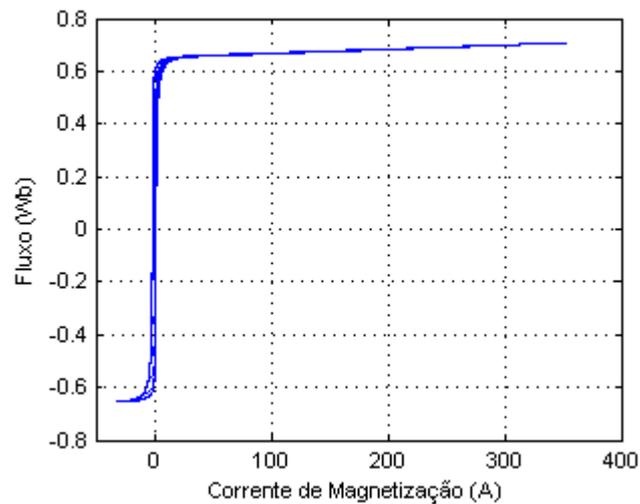


Fig. 4.19. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga RL)

4.2.3 CARGA TÍPICAMENTE INDUTIVA COM FLUXO RESIDUAL

A seguir são mostrados nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22, os resultados das simulações para uma carga tipicamente indutiva, de valor $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$, instalada no secundário do TC, que possui um fluxo residual de 0,4Wb.

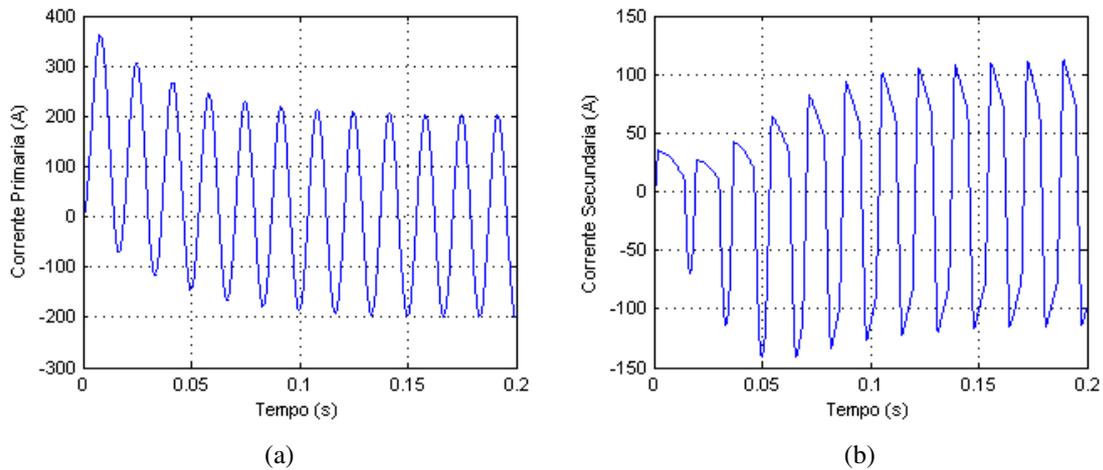


Fig. 4.20. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 . (Carga tipicamente indutiva)

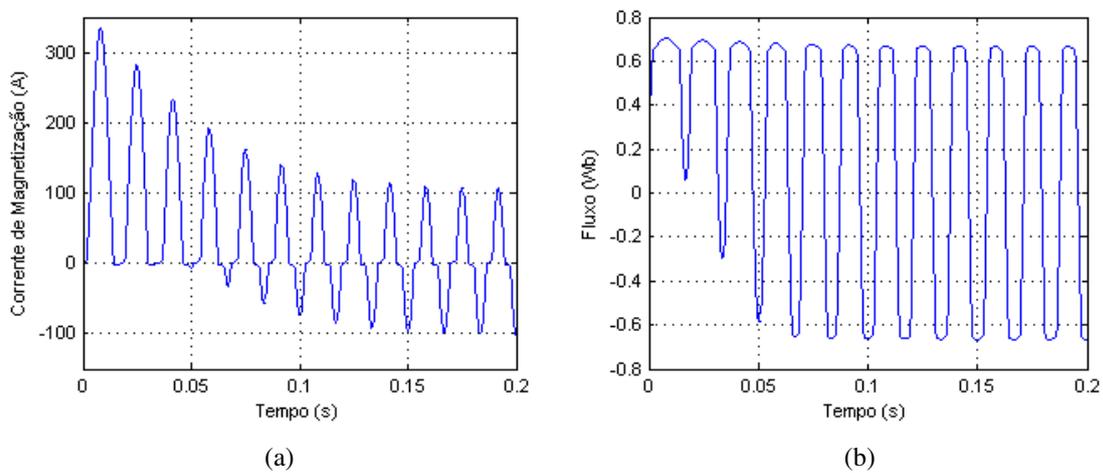


Fig. 4.21. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, com fluxo residual de 0,4Wb. (Carga tipicamente indutiva).

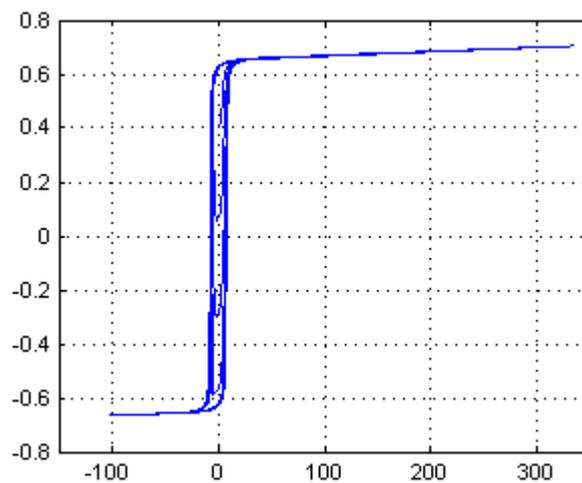


Fig. 4.22. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga tipicamente indutiva)

4.2.4 CARGA TÍPICAMENTE INDUTIVA SEM FLUXO RESIDUAL

Para uma carga tipicamente indutiva, de valor $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$, instalada no secundário do TC, os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 4.23, 4.24 e 4.25. Foi considerado que o núcleo não possuía fluxo residual.

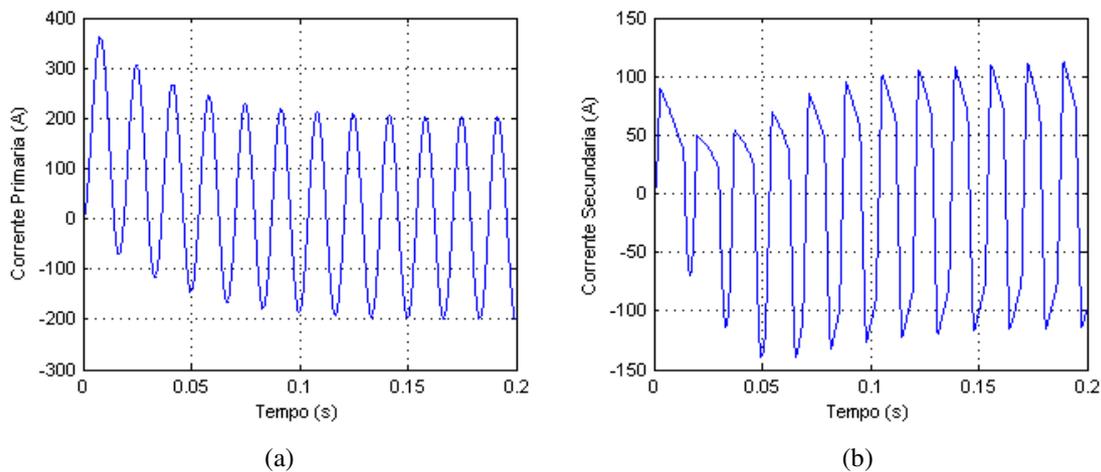


Fig. 4.23. (a) Corrente primária i_1 refletida no secundário. (b) Corrente secundária i_2 .
(Carga tipicamente indutiva)

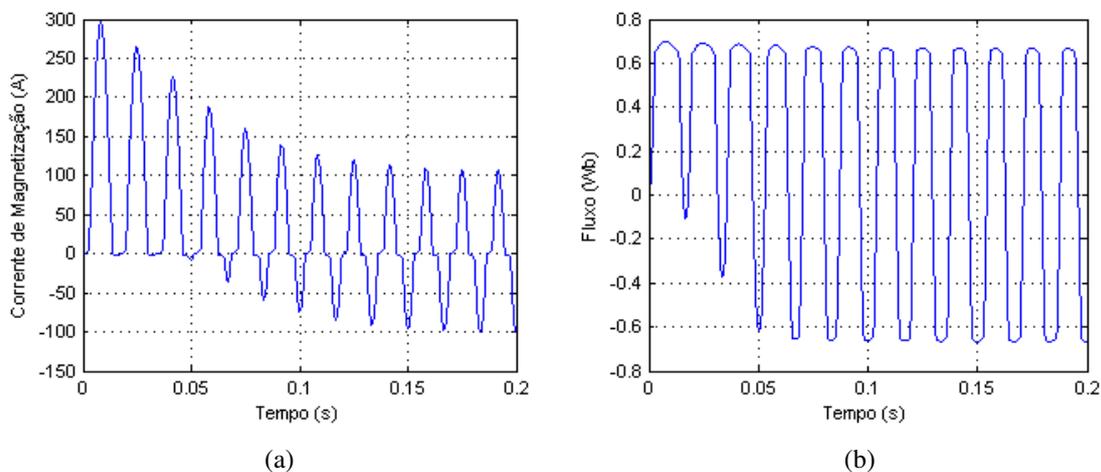


Fig. 4.24. (a) Corrente de magnetização i_m . (b) Fluxo de enlace no secundário, núcleo sem fluxo residual.
(Carga tipicamente indutiva)

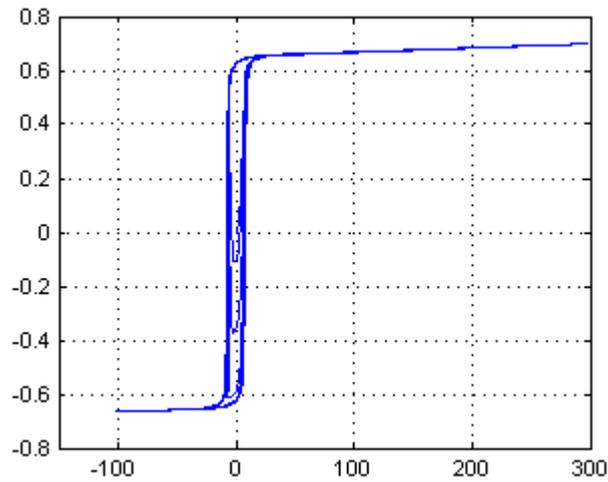


Fig. 4.25. Curva de magnetização no plano $\lambda - i_m$. (Carga tipicamente indutiva)

4.3 UTILIZAÇÃO DO *EMTP-RV*

Foi considerado o modelo de TC apresentado na figura (4.26) para determinar através do software de análise de transitórios as correntes i_1 , i_2 e i_m . Utilizou-se o *software*, que já é de grande utilização na área de transitórios, apenas para servir de referência e comparar com os resultados obtidos nas rotinas criadas.

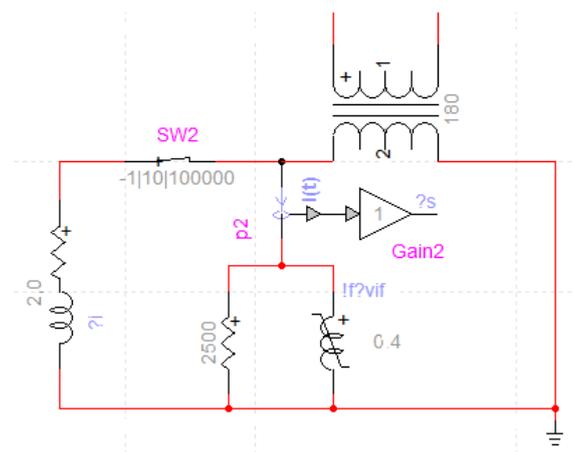


Fig. 4.26. Representação do TC no *EMTP-RV*.

4.3.1 CARGA PURAMENTE RESISTIVA

Com uma carga puramente resistiva, com valor $Z_2 = 2 \Omega$, instalada no enrolamento secundário do TC, verificou as seguintes curvas para as correntes no primário, secundário e de magnetização respectivamente.

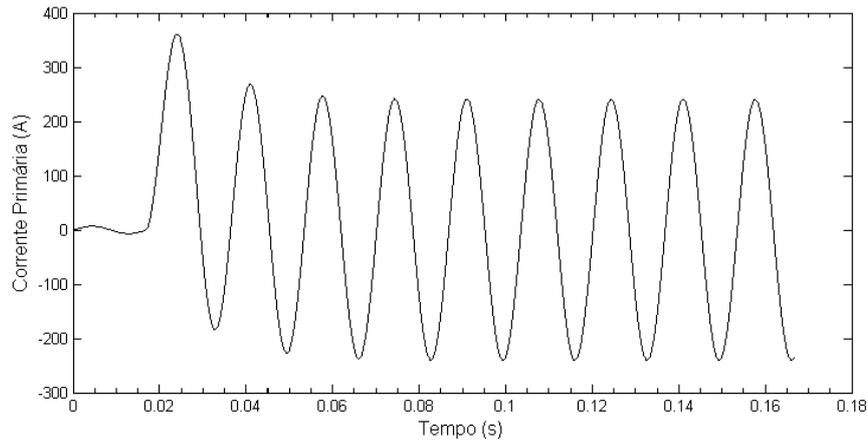


Fig. 4.27. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga R)

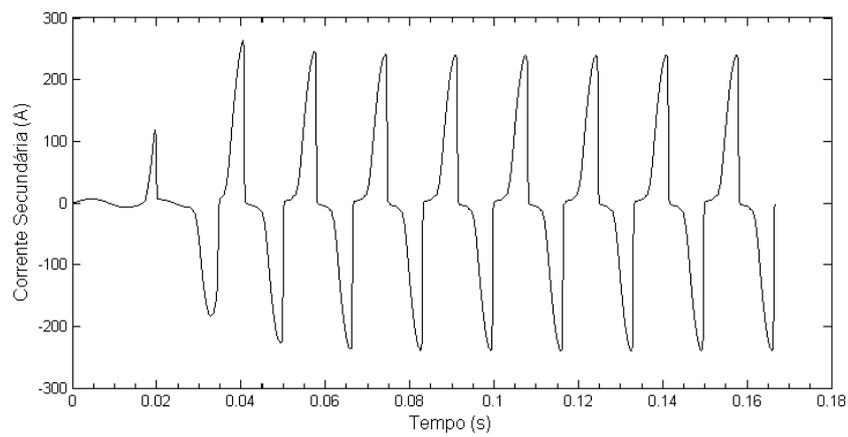


Fig. 4.28. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga R)

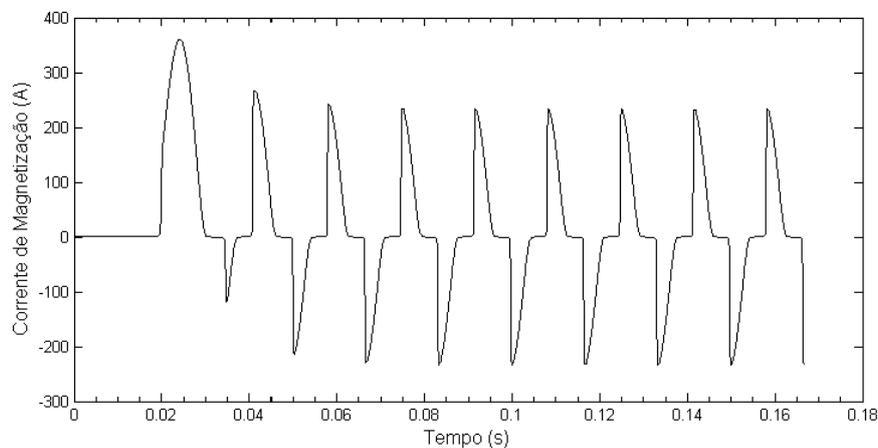


Fig. 4.29. Corrente de magnetização i_m . (Carga R)

4.3.2 CARGA COM COMPONENTE INDUTIVA

Ao instalar uma carga com componente indutiva com valor $Z_2 = 1,1 + j0,9 \Omega$, instalada no enrolamento secundário do TC, obteve-se as seguintes formas de onda para as correntes no primário, secundário e de magnetização respectivamente.

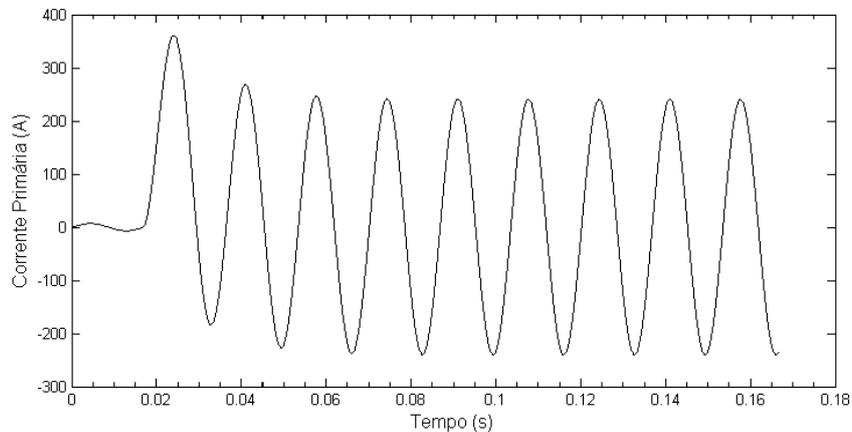


Fig. 4.30. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga RL)

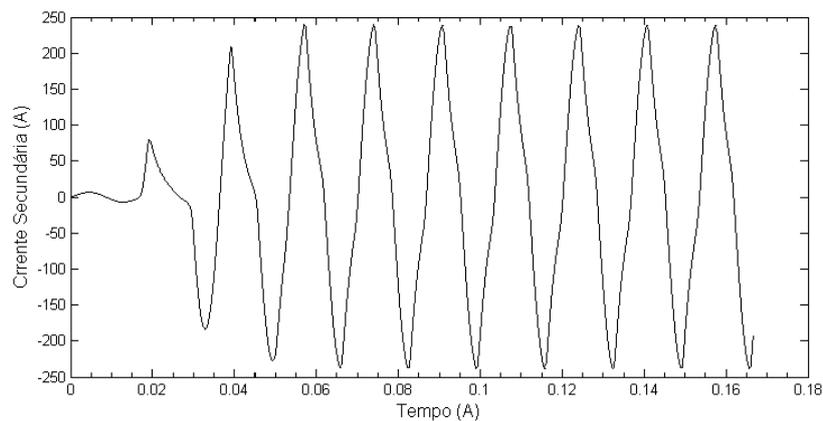


Fig. 4.31. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga RL)

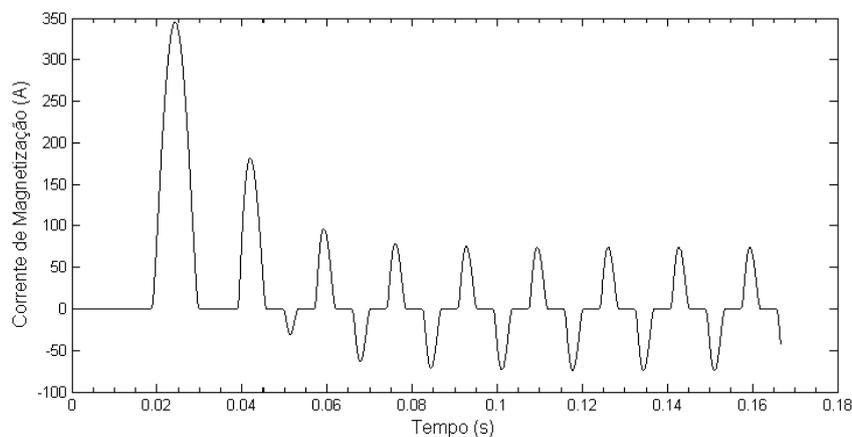


Fig. 4.32. Corrente de magnetização i_m . (Carga RL)

4.3.3 CARGA TIPICAMENTE INDUTIVA

Os gráficos mostrados abaixo foram plotados para uma carga tipicamente indutiva ligada ao secundário do TC. A carga de utilizada possuía impedância de $Z_2 = 0,5 + j2,5 \Omega$.

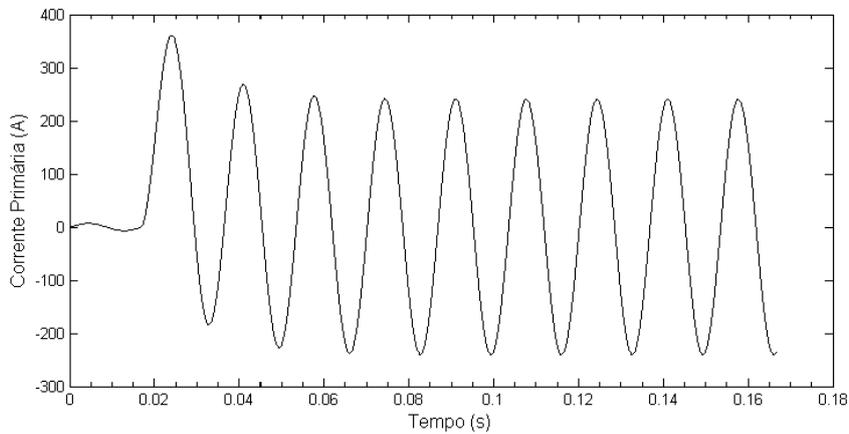


Fig. 4.33. Corrente primária refletida para o enrolamento secundário i_1 . (Carga tipicamente indutiva)

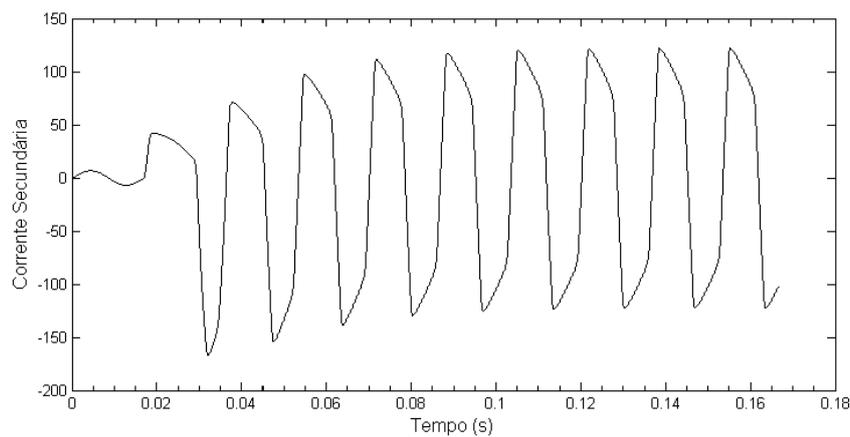


Fig. 4.34. Corrente no enrolamento secundário i_2 . (Carga tipicamente indutiva)

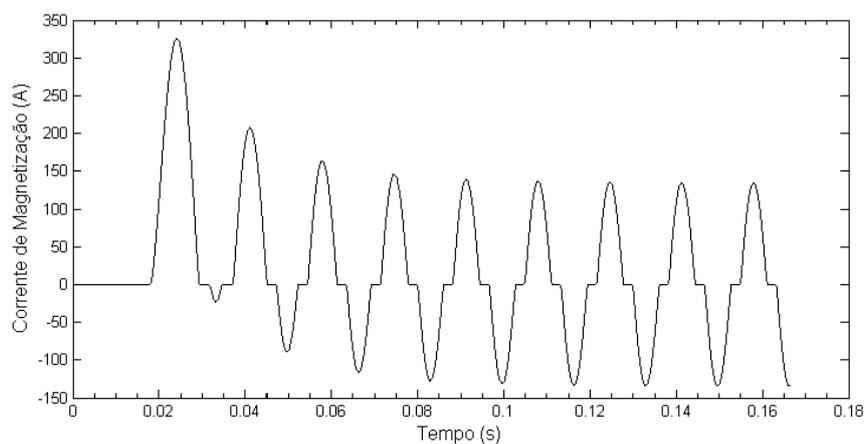


Fig. 4.35. Corrente de magnetização i_m . (Carga tipicamente indutiva)

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentou-se nesse capítulo simulações utilizando os algoritmos programados no *MATLAB*, para isso utilizou-se todo o equacionamento feito no capítulo anterior. Nas quais são obtidos oscilograma de corrente dos TCs para diferentes tipos de cargas ligadas ao enrolamento secundário.

Procurou-se verificar os efeitos da carga secundária e da amplitude da corrente de falta simétrica na saturação do TC. Observa-se que para elevados valores da relação X/R da carga conectada no secundário do TC resulta no aumento do grau de saturação do núcleo, e assim, há a ocorrência de erros na corrente refletida no seu enrolamento secundário.

Com o objetivo de observar a influência do tipo de carga na saturação do TC, todas as simulações foram realizadas sob as mesmas condições, modificando-se apenas a carga ligada ao secundário entre uma carga puramente resistiva, uma com componente indutiva, e uma carga tipicamente indutiva.

Relacionando os gráficos obtidos para a corrente no enrolamento secundário, verifica-se que a carga puramente resistiva apresentou uma deformação mais acentuada, visto que a carga tipicamente indutiva foi a que obteve a menor deformação, devido ao amortecimento causado pela oposição a variações bruscas de corrente do indutor. Observa-se que com o aumento da relação X/R , maior a duração do decaimento exponencial e, por consequência, mais tempo a forma de onda permanece distorcida e com a amplitude reduzida no estado de assimetria.

Comparando as curvas que descrevem o fluxo de enlace no secundário, nota-se que para a carga puramente resistiva o TC alcançou um grau de saturação menor do que para uma carga tipicamente indutiva, assim comprovando o comportamento encontrado e descrito na literatura, ou seja, quanto maior a relação X/R maior o grau de saturação alcançado. Como durante os instantes que o núcleo satura, praticamente toda a corrente passa a circular pelo ramo de magnetização, e sabendo que quanto maior a componente indutiva maior é o período que o núcleo permanece saturado, pode-se verificar que a corrente de magnetização para a carga tipicamente indutiva possui valores maiores em um período maior de tempo comparado com a corrente de magnetização quando o TC possui a carga puramente resistiva.

Percebe-se que a saturação tende a reduzir a amplitude da corrente esperada, isso faz com que os relés do sistema de proteção vejam uma corrente menor, afetando o desempenho do mesmo. Dependendo do tipo de aplicação, é possível que mesmo o núcleo do TC saturando, a corrente secundária vista pelo relé não afete sua operação.

Além de todas as conclusões acima se observa que independente do método utilizado as curvas tiveram comportamentos similares. A pequena diferença observada é devida aos modelos não serem exatamente iguais, como, por exemplo, na forma como é obtida a curva de excitação.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

O transformador de corrente (TC) é um dos equipamentos mais antigos e usados nos sistemas elétricos, o qual desempenha um papel de fundamental importância para o funcionamento correto do sistema de proteção. Porém, ainda existe uma carência de literatura a respeito de sua modelagem, principalmente no que diz respeito ao desempenho em regime transitório.

Com o avanço tecnológico e a popularização do computador, é crescente o número de rotinas computacionais que simulam o comportamento dos transformadores de corrente em caso de defeito nos sistemas de distribuição, de modo a ser possível levar em consideração diferentes configurações de sistemas além de diversos parâmetros que influenciam na atuação da proteção do sistema.

Para efeito de simulação, é possível utilizar modelos de diferentes graus de exatidão e complexidade. Para aplicações em tempo real, essas rotinas devem apresentar tempo de processamento reduzido e baixo esforço computacional.

O estudo a respeito do TC demonstrou os fatores que influenciam na saturação do seu núcleo, e também as consequências causadas por essa saturação.

Este trabalho procurou elaborar rotinas computacionais de fácil manuseio, utilizando diferentes modelos matemáticos para representar o comportamento não linear do núcleo magnético do TC com fluxo residual, e através disso simular e assim estudar o funcionamento de um TC com diferentes tipos de cargas conectadas ao seu enrolamento secundário.

Nem sempre se tem a disposição um Simulador Digital em Tempo Real (*RTDS*) para avaliar o comportamento do transformador em estudo. Desta maneira, a rotina desenvolvida no *MATLAB* se mostrou uma ferramenta auxiliar para analisar a resposta transitória do TC e conseqüentemente melhorar o estudo do fenômeno de saturação sobre o mesmo. Neste sentido, considera-se que o trabalho proporciona uma importante contribuição.

O uso do *software* já consolidado *EMTP-RV* veio confirmar o bom desempenho dos programas desenvolvidos, mediante comparação de valores de pico de corrente, e observação dos oscilogramas de corrente do enrolamento secundário, considerando diferentes impedâncias de cargas conectadas.

Com este trabalho, espera-se ter dado uma contribuição para o estudo do desempenho dos transformadores de corrente em regime transitório, caracterizada como uma ferramenta adicional para análise e teste de sistemas de proteção, que pode ser implementada em programas de larga utilização, como o *ATP*, e em simulações em tempo real com emprego de *RTDS*.

REFERÊNCIAS

- EL-AMIN, I. M., ABBAS, N. H. (2006). Saturation of current transformers and its impact on digital overcurrent relays, Proc. of the IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 1-6, Caracas, Venezuela.
- GUERRA, F. C. F., MOTA, W. S. (2007). Current transformer model, IEEE Transactions on Power Delivery, 22(1): 187-194.
- GUERRA, F. C. F. (2007). Modelos de Transformador de Corrente para Estudos em Baixas Frequências, Tese de Doutorado, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.
- TZIOUVARAS, D. A., MCLAREN, P., ALEXANDER, G., DAWSON, D., EZSTERGALYOS, J., FROMEN, C., GLINKOWSKI, M., HASENWINKLE, I., KEZUNOVIC, M., KOJOVIC, LJ., KOTHEIMER, B., KUFFEL, R., NORDSTROM, J., ZOCHOLL, S. (2000). Mathematical models for current, voltage and coupling capacitor voltage transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, 15(1): 62-72.
- WRIGHT, A. Current Transformers, Chapman & Hall, London, (1968).
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformador de Corrente – Especificação. NBR 6856, 1992.
- MCLAREN, P. G.; LUCAS, J. R.; KEETHIPALA, W. W.; JAYASINGHE, R. P. Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992.
- SEGATTO, E.C.; COURY, D.V. A power transformer protection with recurrent ANN saturation correction. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.

PEREIRA, F. A. (2012). Modelagem de Transformador de Corrente e Correção de Correntes Distorcidas no Enrolamento Secundário, Dissertação de Mestrado, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 1994. v.2.

KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 2. ed. Florianópolis: Ufsc, 2005. v. 1.