



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RUBEM DA COSTA ARAGÃO

**SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE TRANSFORMADORES DE
CORRENTE UTILIZANDO O SIMSCAPE (MATLAB)**

Campina Grande, Paraíba
2017

RUBEM DA COSTA ARAGÃO

SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE UTILIZANDO O
SIMSCAPE (MATLAB)

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
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: Eletrotécnica

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, Dr.
Orientador

Campina Grande, Paraíba
2017

RUBEM DA COSTA ARAGÃO

SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE UTILIZANDO O
SIMSCAPE (MATLAB)

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em 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 Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, Dr.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Rogério Rodrigues Aragão e Maria Rosita da Costa por todo o apoio durante o curso, e em toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Rosita da Costa, e a meu pai, Rogerio Rodrigues Aragão por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado e criado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço as minhas irmãs, Rebeca e Rafaelle da Costa Aragão que sempre me escutaram, aconselharam e apoiaram nos momentos de necessidade.

Agradeço ao meu orientador, Professor Francisco das Chagas, pela paciência e compreensão que sempre teve comigo e pela disponibilidade em orientar de maneira elucidativa na execução deste trabalho.

Agradeço ao engenheiro eletricitista Fellipe Souto, amigo que fiz durante o curso e que muito ajudou para a realização desse trabalho.

Agradeço também aos funcionários do departamento, Adail Ferreira e Tchaikowsky Oliveia, que sempre se mostraram disposto a ajudar e motivar os alunos que a eles recorreram em momentos de dificuldade, principalmente nesta reta final em todas as questões burocráticas da faculdade.

Por fim, agradeço todos os amigos/irmãos que fiz durante essa jornada, compartilhando momentos de estresse e felicidade, tornando-se inesquecíveis para o resto da minha vida.

*“Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente
de qualquer jeito.”*

Martin Luther King.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo e a análise do comportamento de transformadores de corrente (TC) 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 TC é a representação do comportamento não linear do núcleo magnético, o qual apresenta um comportamento saturável e histerético. Para analisar o comportamento dos modelos foram realizadas simulações no Matlab através do Simscape, que permite construir modelos de componentes físicos baseados em conexões físicas que se integram diretamente com diagramas de blocos e outros paradigmas de modelagem.

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

ABSTRACT

This work has as objective the study and analysis of the behavior of transformer current transformers (CT). Current transformers are designed and designed to power metering, protection and control instruments in power grids. The most important point in the modeling of CT is a representation of the non-linear behavior of the magnetic core, which presents a saturable and hysteretic behavior. In order to analyze the behavior of the models, simulations were performed in Matlab through Simscape, which allows the construction of physical component models based on physical connections that integrate with the block diagrams and other modeling paradigms.

Keywords: Models, transient, CT, Current transformers, Saturation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transformador de corrente e modo de ligação.....	14
Figura 2 - TC tipo barra; constituição básica e aspecto externo.	16
Figura 3 - TC tipo janela; constituição básica e aspecto externo.....	16
Figura 4 - TC de núcleo dividido e utilização em instrumentos de medição.	17
Figura 5 - TC tipo bucha.	17
Figura 6 - TC de múltiplas relações de transformação.	18
Figura 7 - TC de vários núcleos.....	18
Figura 8 - Representação simplificada do sistema primário.	20
Figura 9 - Corrente assimétrica de curto-circuito.	21
Figura 10 - Transformador de corrente e circuito elétrico equivalente simplificado.....	22
Figura 11 - Curva de saturação linearizada por partes.....	23
Figura 12 - Fluxo de enlace λ no núcleo do TC em condição de curto-circuito no primário.	25
Figura 13 - Fluxo de enlace no núcleo do TC.	25
Figura 14 - Correntes primária, secundária e de magnetização durante a ocorrência de um curto-circuito.	26
Figura 15 - Distorção da onda de corrente secundária - Carga com componente indutiva.....	27
Figura 16 - Curvas de excitação secundária de TC.	28
Figura 17 - Circuito para determinação da curva de excitação secundária.....	28
Figura 18 - Definições de ponto de joelho estabelecidas pelo IEEE e pelo IEC.	29
Figura 19 - Efeito de entreferro em núcleo magnético de liga Fe-Si.....	31
Figura 20 - Transformador Saturável de dois ou três enrolamentos.	33
Figura 21 - Modelo do bloco transformador saturável.	34
Figura 22 - Relação de Fluxo e Corrente de Magnetização, sem e com fluxo residual.	34
Figura 23 - Representação do sistema de transmissão utilizado.....	36
Figura 24 - Modelo da linha estudada no Simscape.	37
Figura 25 - Relação do fluxo e corrente de Magnetização utilizada.....	38
Figura 26 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	39
Figura 27 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	39
Figura 28 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	40
Figura 29 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	40
Figura 30 - Fluxo magnético do TC.	41
Figura 31 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	41
Figura 32 - Fluxo magnético do Núcleo.	42
Figura 33 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	42
Figura 34 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	43
Figura 36 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	43
Figura 38 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	44
Figura 40 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	44
Figura 42 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	45
Figura 44 - Corrente no primário (verde) e corrente no secundário (vermelho).....	45
Figura 46 - Fluxo magnético no núcleo do TC.....	45
Figura 48 - Corrente primária (verde) e corrente secundária (vermelha).	46
Figura 50 - Fluxo Magnético no núcleo.	46
Figura 52 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	47
Figura 54 - Fluxo magnético no núcleo.....	47
Figura 56 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).....	48

Figura 58 - Fluxo magnético no TC.	48
Figura 60 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).	49
Figura 62 - Fluxo magnético no núcleo do TC.	49
Figura 64 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).	50
Figura 66 - Fluxo magnético no núcleo do TC.	50
Figura 68 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).	51
Figura 70 - Tensão de excitação.	51

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivos.....	12
1.2	Organização do Trabalho.....	13
2	Revisão Bibliográfica.....	13
2.1	Levantamento Histórico.....	13
2.2	Características Gerais.....	14
2.3	Características Construtivas.....	16
2.4	Classificação.....	19
3	TCs em Regime Transitório.....	20
3.1	Representação do Sistema Primário.....	20
3.2	Representação do TC.....	22
3.2.1	Considerações Gerais.....	22
3.2.2	Desempenho em Regime Não-Saturado.....	23
3.2.3	Desempenho em Regime Saturado.....	25
3.3	Erros nos TC de Proteção.....	27
3.3.1	Erro de Relação.....	27
3.3.2	Curva de Excitação Secundária.....	27
3.3.3	Causa de Erros nos TC.....	30
3.4	Influência da Saturação Nos TC de Proteção.....	30
3.5	TC com Entreferro no Núcleo.....	31
4	Modelo do TC para Análise de Transitórios.....	33
4.1	O Bloco Transformador Saturável.....	33
4.1.1	Conversão em PU.....	34
5	Resultados Obtidos.....	36
5.1	Simulações Sem Fluxo Residual.....	38
5.1.1	Carga com Componente Resistiva.....	38
5.1.2	Cargas com Componentes Resistiva e Indutiva.....	40
5.2	Simulações Com Fluxo Residual.....	43
5.2.1	Carga com Componente Resistiva.....	43
5.2.2	Cargas com Componentes Resistiva e Indutiva.....	44
5.3	Análise dos resultados obtidos.....	52
6	Conclusão.....	54
	Bibliografia.....	55

1 INTRODUÇÃO

Ao ocorrer um defeito na linha de transmissão, a corrente resultante será constituída por duas componentes: uma componente com comportamento senoidal, e outra contínua, com declínio exponencial. Atribuindo uma onda de fluxo assimétrica de elevado valor de pico aos núcleos magnéticos dos transformadores de corrente (TC). Este fluxo, somado a um possível fluxo residual no núcleo, pode ocasionar um elevado grau de saturação no TC. Isto faz com que a forma de onda da corrente no enrolamento secundário apresente-se distorcida durante os primeiros ciclos. Tal distorção pode causar problemas do sistema de proteção, como:

- 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, torna-se importante um estudo do comportamento de transformadores de corrente nos regimes permanente e transitório, fazendo uso de 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*, utilizando o Simscape no ambiente Simulink.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Objetivos, Organização.
Apresentam-se os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica.
Realiza uma explanação geral do assunto.
- Capítulo 3: TC em Regime Transitório.
Realizar 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 4: Modelos de TC para Análise de Transitórios.
Apresentação do modelo de TC utilizado pelo Simscape para o cálculo de transitórios.
- Capítulo 5: Resultados Obtidos.
Obtenção de resultados para os diferentes modelos de TCs desenvolvidos e comparação dos seus resultados.
- Capítulo 6: Conclusão.
Considerações finais sobre o assunto abordado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LEVANTAMENTO HISTÓRICO

A proteção dos sistemas elétricos de potência é feita pelos relés, sensores estrategicamente colocados no sistema, que garantem a proteção do mesmo. Devido à alta dimensão das grandezas no sistema, corrente e tensão, é necessário o uso de transformadores de correntes e potencial para ligar aparelhos de medição, proteção e controle. Assim, é imprescindível que o transformador de corrente reproduza com

fidelidade o sinal do circuito para que o relé possa atuar, ocasionando o isolamento do defeito, evitando maiores prejuízos.

Com isso os transformadores de corrente tornaram-se objetos valiosos de estudo, uma vez que seu mau funcionamento ocasiona perdas devido a falha de proteção na linha. Dessa forma, estudos a respeito do comportamento de transformadores de corrente em regime transitório já são realizados a mais de meio século, tendo WRIGHT (1968) realizado extensos desenvolvimentos analíticos relacionados à influência do tipo de carga ao fluxo residual no núcleo magnético.

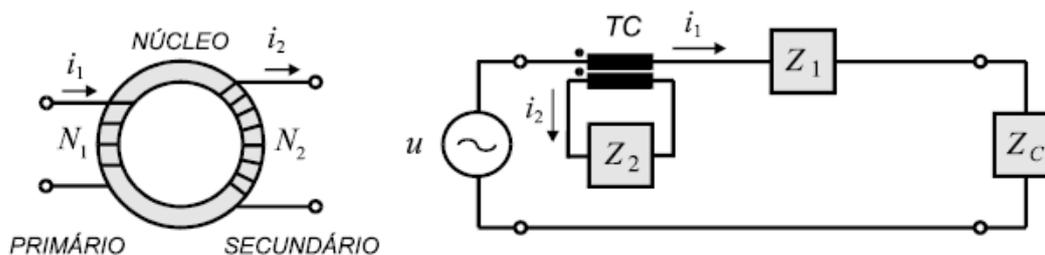
Com a popularização do computador possibilitou-se considerar a histerese, as perdas parasíticas clássicas e perdas anômalas no núcleo magnético. GUERRA & MOTA (2007) propuseram um modelo de TC no qual a histerese é descrita por equações simplificadas, os efeitos das perdas são representados por um resistor 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 uma ótima aproximação.

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os transformadores de correntes ou TC, são responsáveis por alimentar instrumentos de proteção, controle e medição nas redes de energia elétrica, também isolando esses do circuito. Funciona reduzindo a corrente do sistema a um valor adequado aos equipamentos, de modo que haja uma relação fixa entre os valores instantâneos correspondentes das ondas de corrente de saída e de entrada, com diferenças de fase mínimas possíveis entre si.

A forma básica e o esquema de ligação são mostrados na Figura 1:

Figura 1- Transformador de corrente e modo de ligação.



Fonte: Guerra (2015).

O núcleo na maioria das vezes apresenta forma de toróide, composto por uma fita de liga ferro-silício (3,2% Si) de grãos orientados helicoidalmente enrolada. Em torno do núcleo há dois enrolamentos. O enrolamento primário de N_1 espiras é ligado em série a rede de energia elétrica enquanto o enrolamento secundário de N_2 espiras alimenta um instrumento (relé ou medidor).

Para o circuito magnético da Figura 1, tem-se:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (1.1)$$

O vetor \mathbf{H} é o campo magnético e $d\mathbf{l}$ é o vetor elemento de comprimento ao longo da trajetória magnética. Se a permeabilidade do núcleo é alta, tem-se $\mathbf{H} \approx 0$; assim, tem-se:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (1.2)$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2$$

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2$$

$$i_2 = \frac{1}{\frac{N_2}{N_1}} i_1 \quad (1.3)$$

Como o TC tem como objetivo reduzir a corrente do primário para o secundário, temos $N_1 \leq N_2$. Assim define-se a relação de transformação do TC por:

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.4)$$

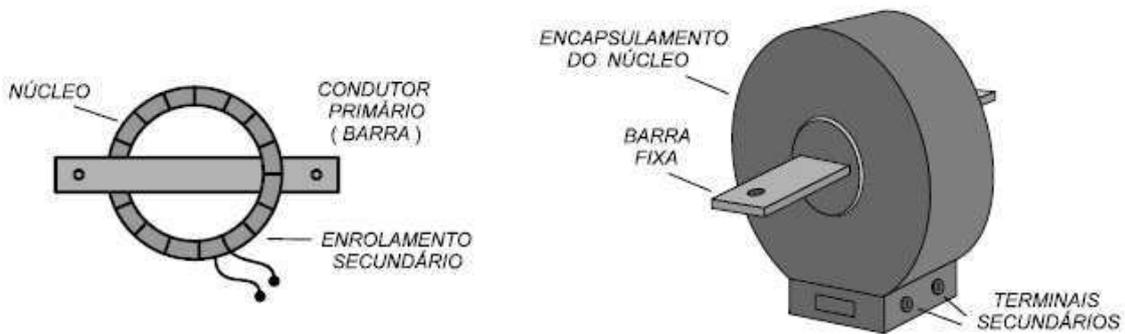
$$i_2 = \frac{i_1}{RTC} \quad (1.5)$$

2.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Os transformadores de corrente podem ser construídos de diferentes formas para atenderem a diferentes finalidades, alguns deles serão apresentados.

- TC tipo barra: Se trata de um TC para baixa tensão, em que o enrolamento primário é constituído por uma barra fixada através do núcleo do transformador.

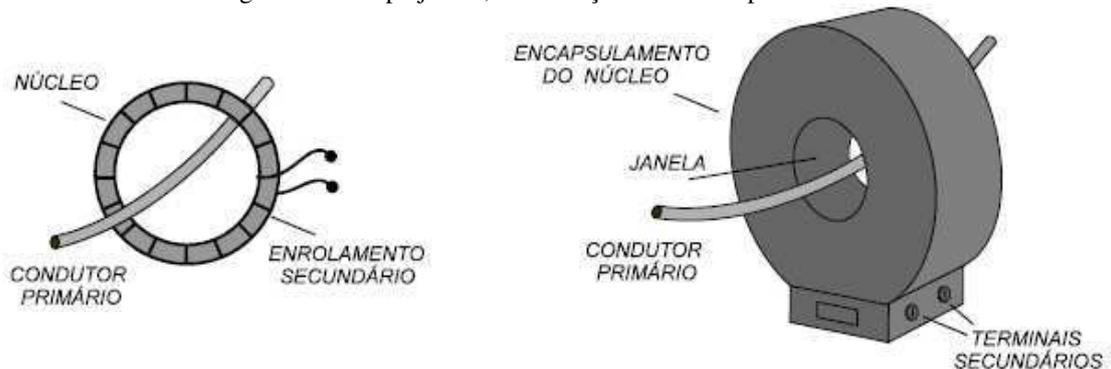
Figura 2 - TC tipo barra; constituição básica e aspecto externo.



Fonte: Guerra (2015).

- TC tipo janela: Também para uso em baixa tensão, não possui um primário fixo no transformador e é constituído de uma abertura através do núcleo.

Figura 3 - TC tipo janela; constituição básica e aspecto externo.



Fonte: Guerra (2015).

- TC tipo núcleo dividido: Nesse TC o núcleo pode ser aberto para envolver o condutor que se deseja medir a corrente.

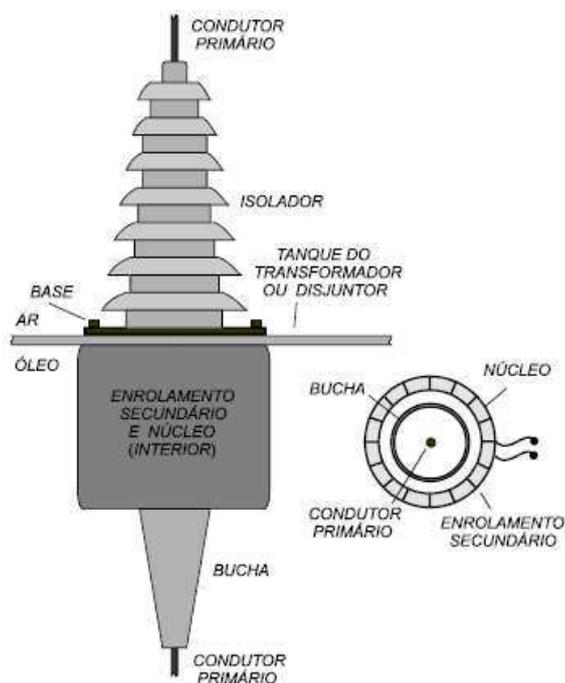
Figura 4 - TC de núcleo dividido e utilização em instrumentos de medição.



Fonte: Guerra (2015).

- TC tipo bucha: Muito utilizado em subestações de energia elétrica, lembra um pouco o TC tipo barra e janela. Bucha é um elemento isolante que permite a passagem de um condutor de um ambiente para outro. Sua instalação é feita na bucha do equipamento, como transformadores e disjuntores, assim o condutor primário consiste do próprio condutor da linha.

Figura 5 - TC tipo bucha.

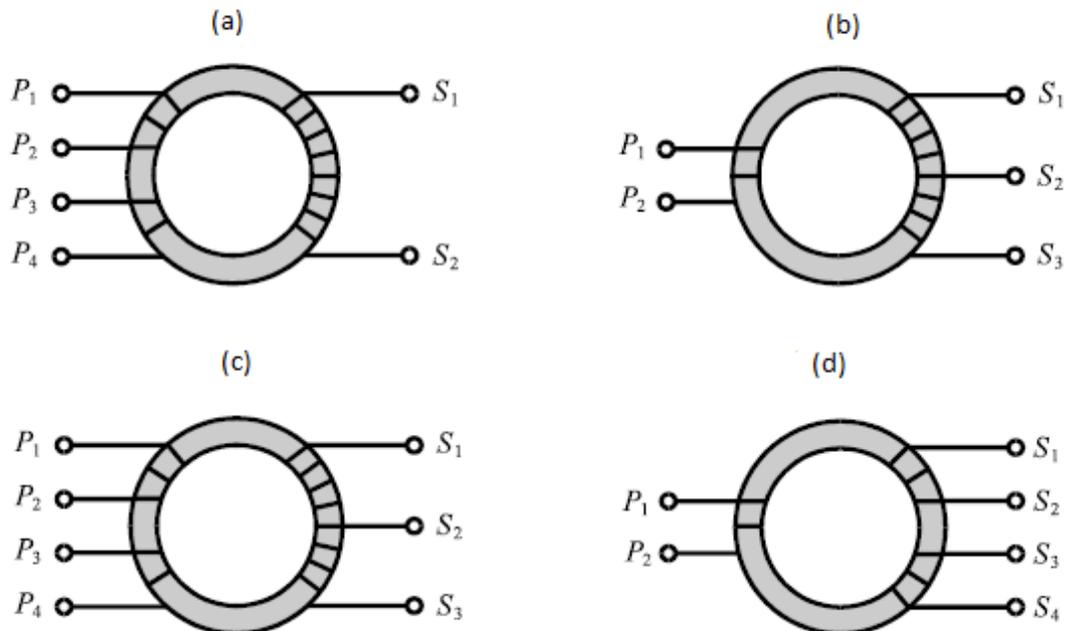


Fonte: Guerra (2015).

- TC de múltiplas relações de transformação: Há TC que apresentam mais de uma relação de transformação. Podendo os vários terminais primários serem ligados em série e paralelo para apresentarem mais valores de

relação de transformação. No secundário os terminais não utilizados deverão permanecer aberto.

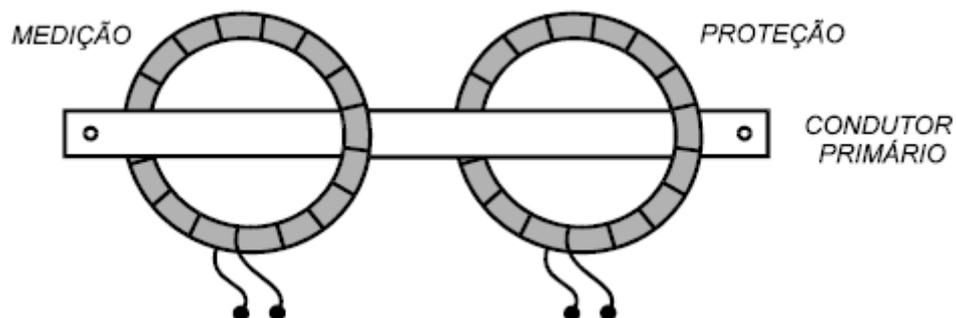
Figura 6 - TC de múltiplas relações de transformação.



Fonte: Guerra (2015).

- TC 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.

Figura 7 - TC de vários núcleos.



Fonte: Guerra (2015).

2.4 CLASSIFICAÇÃO

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

A norma NBR 6856 – ABNT / 1992 estabelece diferentes classes de exatidão para diferentes finalidades dentro do serviço de medição. Define-se classe de exatidão de um TC como sendo o máximo erro de relação apresentado quando o TC opera com 100% da corrente primária nominal.

A seguir, são estabelecidas finalidades para as respectivas classes de exatidão usuais de transformadores de corrente destinados ao serviço de medição:

- Alimentação de medidores de demanda e consumo ativo e reativo para faturamento 0,3;
- Alimentação de medidores para acompanhamento de custos industriais: 0,6;
- Alimentação de amperímetros e registradores gráficos: 1,2;
- Alimentação de instrumentos de painel, exceto medidores de potência e energia: 3.

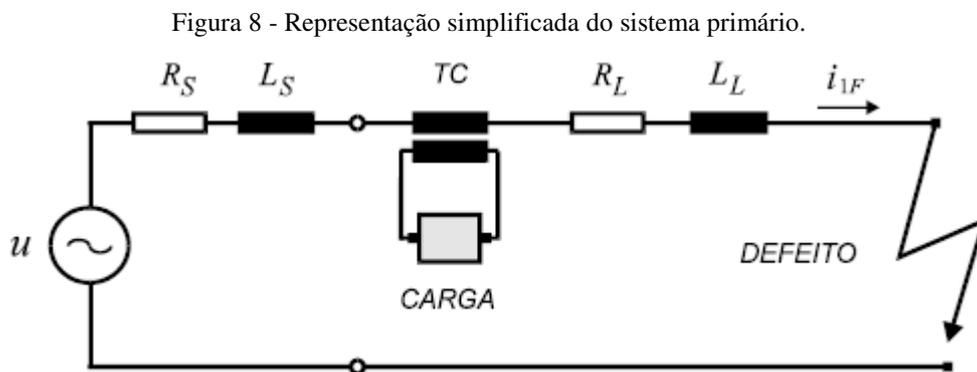
A referida norma estabelece as classes de exatidão 5 e 10 para os TC de proteção.

3 TCS EM REGIME TRANSITÓRIO

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

3.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO

Considerando a linha de transmissão monofásica, na qual ocorreu um curto circuito, conforme é apresentado na Figura 8. A fonte fornece uma tensão de $u(t) = U_m \text{sen}(\omega t + \theta)$. Para $t=0$, tem-se $u(0) = U_m \text{sen}\theta$, de modo que o ângulo θ determina o valor da tensão no instante do curto circuito, sendo denominado ângulo de incidência do defeito.



Fonte: Guerra (2015).

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:

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

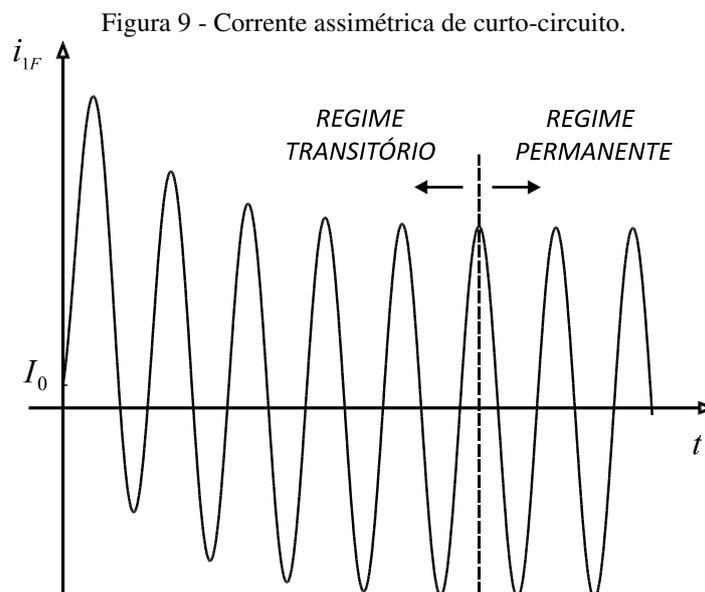
Assim, pode-se escrever para o circuito:

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

Supondo que o curto-circuito indicado na Figura 8 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-se na Figura 9.



Fonte: Guerra (2015).

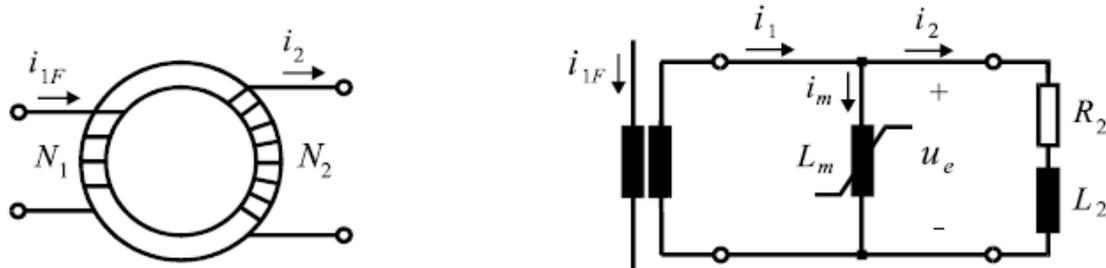
Fazendo $\theta - \phi_1 = -\pi/2$, tem-se a situação mais pessimista, porque assim a componente contínua de i_{1F} assume o seu maior valor possível. Para linhas de transmissão de alta tensão, o ângulo ϕ_1 , a medida que a tensão nominal da mesma aumenta, torna-se mais próximo de 90° . Assim, deduz-se 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.

3.2 REPRESENTAÇÃO DO TC

3.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste modelo são desprezadas as capacitâncias dos enrolamentos, a resistência e a indutância do enrolamento primário, o efeito de histerese e as perdas dinâmicas no núcleo.

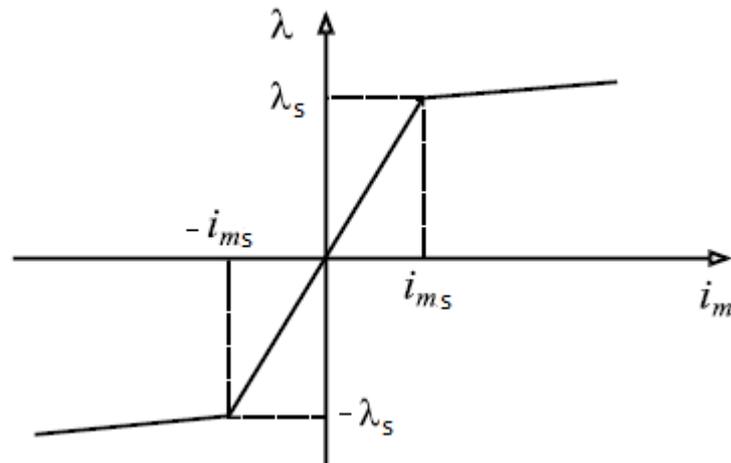
Figura 10 - Transformador de corrente e circuito elétrico equivalente simplificado.



Fonte: Guerra (2015).

O número de espiras dos enrolamentos primário e secundário são dados por N_1 e N_2 , respectivamente; R_2 representa a resistência ligada ao enrolamento do secundário, e L_2 a indutância ligada ao mesmo enrolamento; L_m é a indutância de magnetização do núcleo. A curva de saturação, linearizada por partes, é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Curva de saturação linearizada por partes.



Fonte: Guerra (2015).

3.2.2 DESEMPENHO EM REGIME NÃO-SATURADO

Analisando o circuito apresentado na Figura 10, e considerando $-\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_s$, obtemos a seguinte expressão para o fluxo de enlace no secundário:

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

Sendo 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:

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

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

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

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

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

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

Anotando por I_{1F} o valor eficaz da componente simétrica da corrente primária de defeito, após uma série de aproximações e manipulações algébricas, resulta:

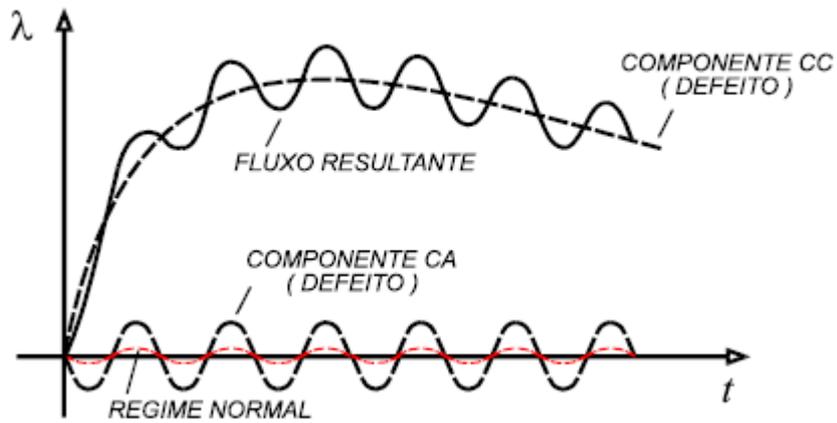
$$\lambda = \frac{\sqrt{2}I_{1F}R_2}{\omega k_N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\cos\phi_2} \text{sen}(\omega t + \phi_2) \right] \quad (2.16)$$

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

Observa-se que equação descreve a curva esboçada com traço cheio na Figura 12, a qual corresponde a soma de uma componente alternada senoidal com uma componente contínua transitória, 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 ser identificados 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 componente contínua de λ , além dos fatores já citados, são de fundamental importância para análise do desempenho dos TC os valores das constantes de tempo T_1 e T_2 .

Figura 12 - Fluxo de enlace λ no núcleo do TC em condição de curto-circuito no primário.

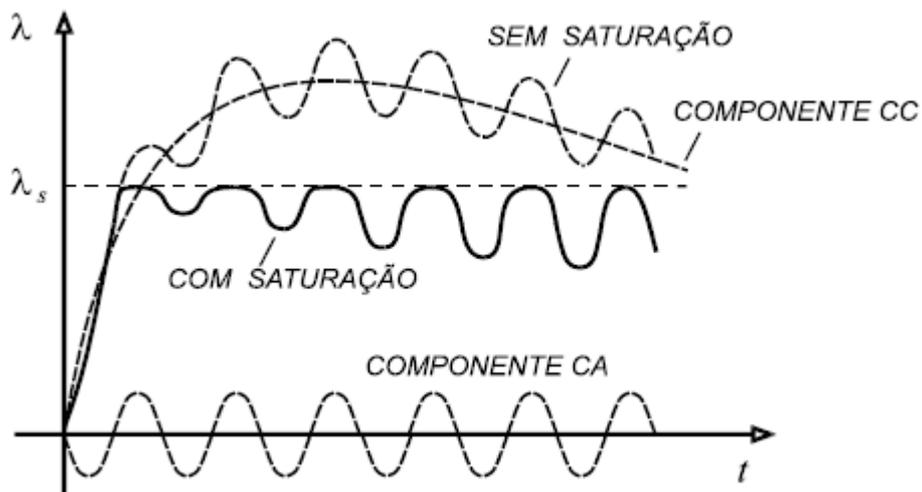


Fonte: Guerra (2015).

3.2.3 DESEMPENHO EM REGIME SATURADO

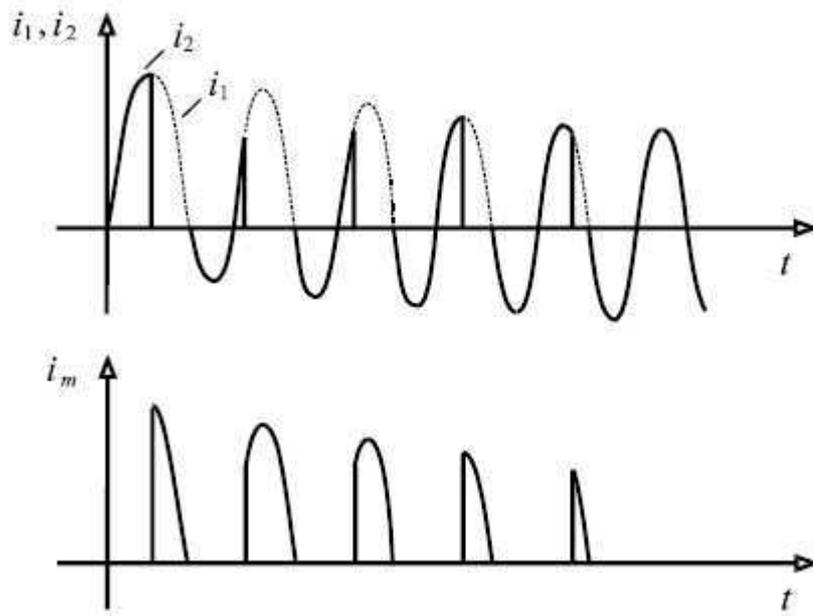
Considerando um TC com carga resistiva, e $N_1 = N_2$, temos demonstrado nas figuras seguintes as curvas do fluxo de enlace no núcleo, as correntes nos enrolamentos primário e secundário e a corrente que circula pelo ramo de magnetização:

Figura 13 - Fluxo de enlace no núcleo do TC.



Fonte: Guerra (2015).

Figura 14 - Correntes primária, secundária e de magnetização durante a ocorrência de um curto-circuito.

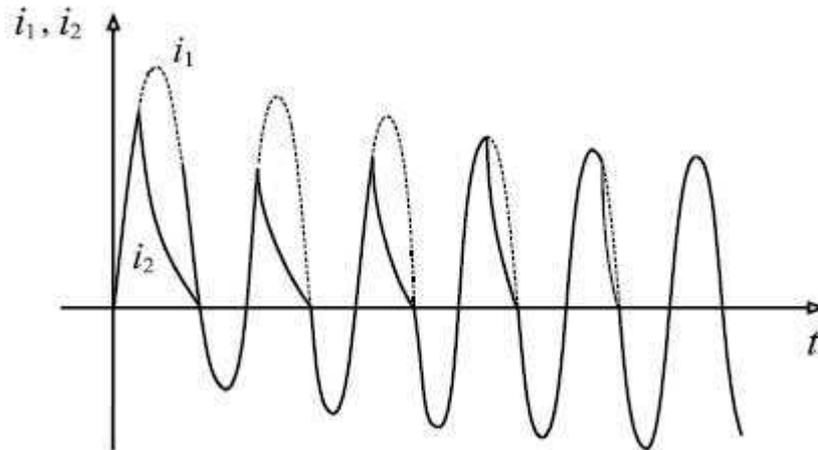


Fonte: Guerra (2015).

Observa-se que o efeito de saturação no núcleo faz com que o fluxo imposto pela fonte não cresça muito além do valor λ_s indicado. Na região não-saturada ($-\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_s$), a indutância L_m é elevada e i_m é pequena. Porém, em regime de saturação, o valor de L_m cai abruptamente. Durante os instantes em que o núcleo satura praticamente toda a corrente i_1 passa a circular através do ramo de magnetização, ocorrendo pronunciadas distorções na forma de onda da corrente secundária, i_2 .

Para o caso da carga apresentar uma componente indutiva, quando o núcleo atinge a saturação a corrente não cai instantaneamente para zero, diferentemente do caso anterior, devido a propriedade dos indutores em oferecer dificuldades as variações bruscas de corrente.

Figura 15 - Distorção da onda de corrente secundária - Carga com componente indutiva.



Fonte: Guerra (2015).

3.3 ERROS NOS TC DE PROTEÇÃO

3.3.1 ERRO DE RELAÇÃO

Para o modelo de TC apresentado na figura 10, a NRB 6856 – ABNT (1992) determina que o erro de relação percentual seja calculado por:

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

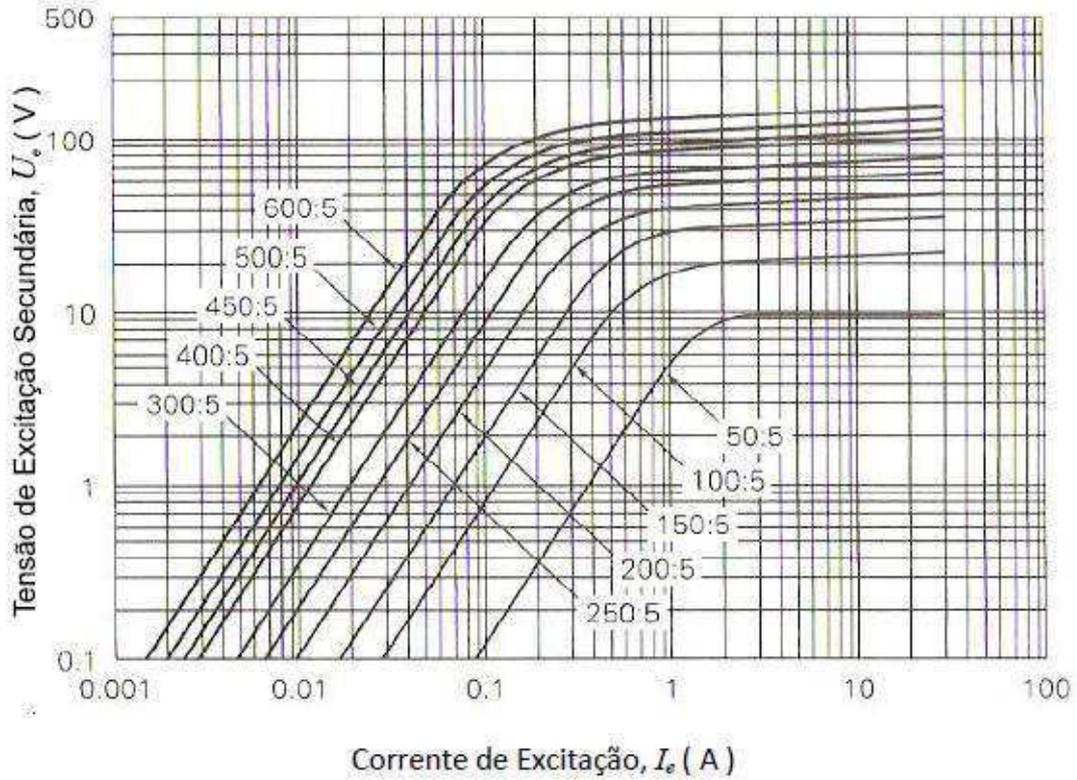
No qual as grandezas I_2 e I_m são os valores eficazes das correntes i_2 e i_m , respectivamente. Nos TC de proteção o erro de fase não é levado em consideração e o erro máximo admissível $\varepsilon_{\%}$ deve ser calculado para a corrente secundária igual a vinte vezes o seu valor nominal ($I_2 = 20I_{2N}$).

3.3.2 CURVA DE EXCITAÇÃO SECUNDÁRIA

Os fabricantes fornecem a característica de magnetização em termos das curvas que relacionam a tensão de excitação secundária, U_e , com a corrente de excitação, I_e , em valores eficazes, as quais são chamadas *curvas de excitação secundária*, normalmente

traçadas em escalas logarítmicas, para determinação do erro dos TC. As curvas são mostradas a seguir:

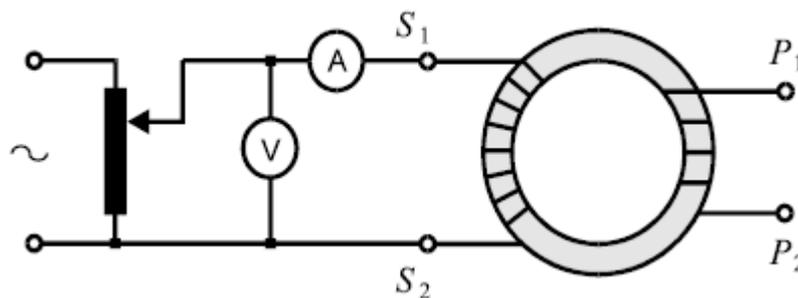
Figura 16 - Curvas de excitação secundária de TC.



Fonte: Guerra (2015).

O circuito e as etapas para o cálculo do $\varepsilon\%$ são apresentados a seguir:

Figura 17 - Circuito para determinação da curva de excitação secundária.



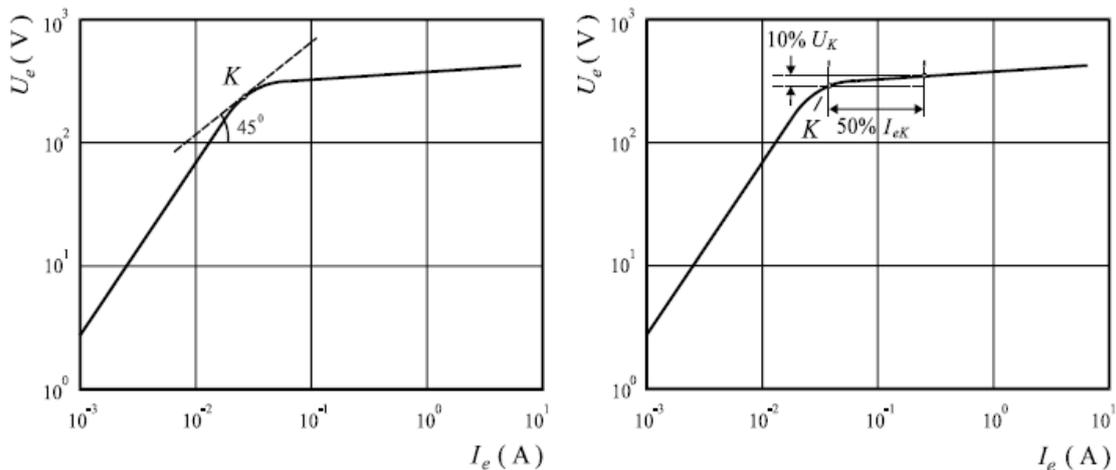
Fonte: Guerra (2015).

Para determinados valores da corrente e da impedância no enrolamento secundário, realiza-se as seguintes etapas para cálculo do erro de relação percentual:

- 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 $I_2 = 20I_{2N}$;
- Com os valores encontrados de U_e , e utilizando a curva de excitação secundária, encontram-se os valores correspondentes de I_e ;
- Pela expressão 2.17 calculam-se os erros.

A norma americana C57.13 - IEEE / 2008 define o ponto de joelho da curva $U_e - I_e$ como aquele que apresenta uma reta tangente com inclinação de 45° . A norma 60044-1 - IEC / 2003, mais adotada na Europa, define este ponto como aquele em que um acréscimo de 10% de U_e causa um acréscimo de 50% em I_e . Normalmente, o ponto de joelho definido pelo IEC situa-se acima do definido pelo IEEE.

Figura 18 - Definições de ponto de joelho estabelecidas pelo IEEE e pelo IEC.



Fonte: Guerra (2015).

3.3.3 CAUSA DE ERROS NOS TC

Da expressão 2.16, desenvolvendo para a indução B no núcleo do TC:

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

As induções típicas correspondentes ao ponto de joelho da curva de saturação dos TCs acham-se no entorno de 1,5 T. Assim, os fatores que levam os núcleos dos TCs à saturação, ocasionando distorções na onda de corrente secundária, são citados a seguir:

- Quanto maior for o módulo da corrente de curto-circuito no primário (I_{1F}), maior será a indução magnética (B) imposta ao 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 é inversamente proporcional a indução (B), logo, quanto menor for a área A, maior será a indução, aumentando as chances do TC atingir a saturação mais rapidamente;
- A relação de espiras é inversamente proporcional, pois quanto maior for a relação $K_N N_2$, menor será a indução provocada no núcleo.
- A constante de tempo T_1 e T_2 também são fatores que são diretamente proporcionais a indução imposta.

3.4 INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO NOS TC DE PROTEÇÃO

Os TC geralmente são projetados para uma corrente nominal no secundário de 5 A, podendo ser fabricado com outros valores dependendo do tipo de equipamento que possa ser ligado a ele. Para evitar a saturação no núcleo, a área de seção transversal do mesmo acabaria por ser muito grande, tornando os transformadores de corrente muito caros. 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.

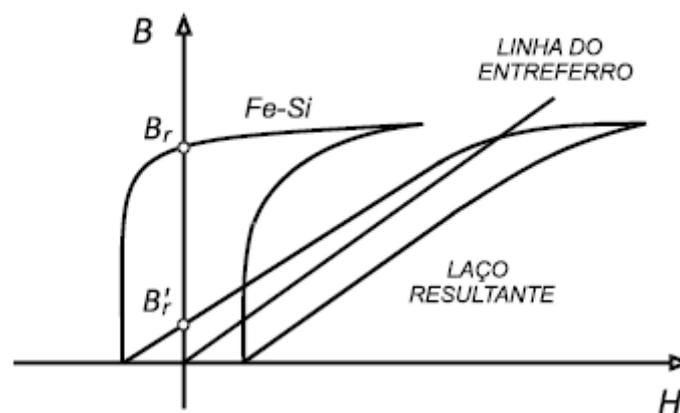
Os relés de sobrecorrente instantâneos digitais não tem seu desempenho afetado pela saturação no TC, que mesmo em regime saturado fornece corrente suficiente para seu funcionamento. Porém, os relés temporizados acabam por sofrer atrasos na sua operação. Já nos relés de distância foram verificados que 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.

Os relés diferenciais utilizados para proteção de geradores, transformadores e linha tem seu desempenho comprometido, por funcionarem através de comparação de correntes de entrada e saída do equipamento ao qual estão ligados, acabam por serem sensibilizados por correntes residuais do TC, quando este satura, fazendo o relé atuar indevidamente.

3.5 TC COM ENTREFERRO NO NÚCLEO

Uma forma de melhorar o desempenho dos TC em regime transitório consiste em inserir entreferrros no núcleo magnético para reduzir o fluxo remanescente, como é mostrado nas características $B - H$ da Figura 19.

Figura 19 - Efeito de entreferro em núcleo magnético de liga Fe-Si.



Fonte: Guerra (2015).

As vantagens da inclusão de entreferro no núcleo são citadas a seguir:

- Melhora a resposta do TC em regime transitório, reduzindo o fluxo residual.

- Redução da constante de tempo $T_2 = L_m / R_2$ do TC, o que também provoca a redução do fluxo no núcleo. Isto deixa que se utilize um TC de área de seção reta do núcleo menor;
- Em comparação com um TC de núcleo fechado, minimiza a influência do fator de potência da carga na resposta do TC em regime transitório;
- Menor tensão que surge nos terminais do secundário em aberto. Em contrapartida, surgem as desvantagens descritas a seguir;
- Acréscimo da corrente de excitação no núcleo, aumentando os erros de relação e de fase;
- Após a interrupção do defeito, quando o fluxo decresce até o valor final, a energia armazenada no circuito magnético é dissipada, sendo produzida uma corrente de longa duração no enrolamento secundário (corrente subsequente, com duração de até 1s). Para atingir a remanência, a variação do fluxo é bem maior que no caso dos TCs de núcleo fechado, como é mostrado na figura 19. Assim, a tensão causada pelo processo de descarga torna-se maior, podendo ocorrer atuação indevida de relés de proteção de falha de disjuntor no caso em que haja dois ou mais TCs em paralelo;
- Os núcleos com entreferros são mecanicamente mais frágeis e mais caros.

Os TC com entreferro têm aplicação mais frequente nos casos citados a seguir:

- Na proteção de geradores, onde são produzidas correntes de valores de pico e graus de assimetria muito elevados;
- Na proteção de linhas com sistemas de religamento automático onde, no instante de religamento, o fluxo imposto pela corrente primária pode apresentar amplitudes elevadas e com mesma polaridade do fluxo remanescente.

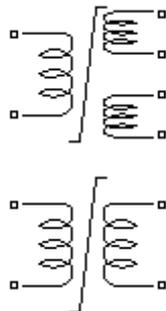
4 MODELO DO TC PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS

É apresentado um modelo de circuito capaz de reproduzir o desempenho de TC em regime transitório no Simscape, este permite que você crie rapidamente modelos de sistemas físicos no ambiente Simulink do Matlab. Com ele constrói-se modelos de componentes físicos baseados em conexões físicas que se integram diretamente com diagramas de blocos e outros paradigmas de modelagem. Capaz de modelar sistemas como motores elétricos, fontes, linhas de transmissão, transformadores, e etc, montando componentes fundamentais em um esquema.

4.1 O BLOCO TRANSFORMADOR SATURÁVEL

O bloco *Saturable Transformer* (transformador saturável) do Simscape implementa um transformador de dois ou três enrolamentos acoplados ao mesmo núcleo, podendo ser escolhido com quantos enrolamentos ocorrerá o trabalho, conforme é mostrado na Figura 20:

Figura 20 - Transformador Saturável de dois ou três enrolamentos.

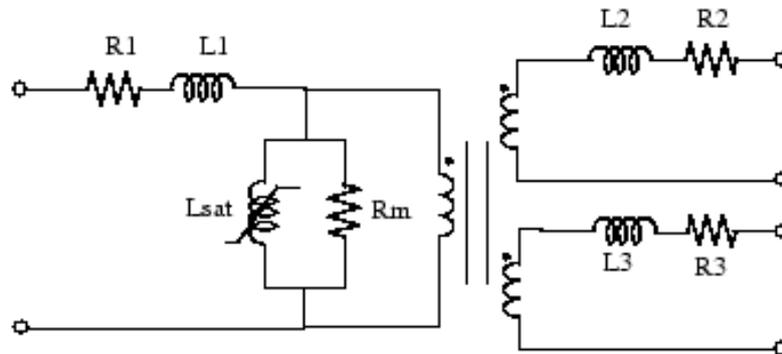


Fonte: Matlab (2016).

O modelo leva em conta as resistências de enrolamento (R_1 R_2 R_3) e as indutâncias de dispersão (L_1 L_2 L_3), bem como as características de magnetização do núcleo, que é modelada por uma resistência R_m simulando as perdas de núcleo, corrente

de Foucault e histerese, e uma indutância saturada L_{sat} , conforme é mostrado na Figura 21:

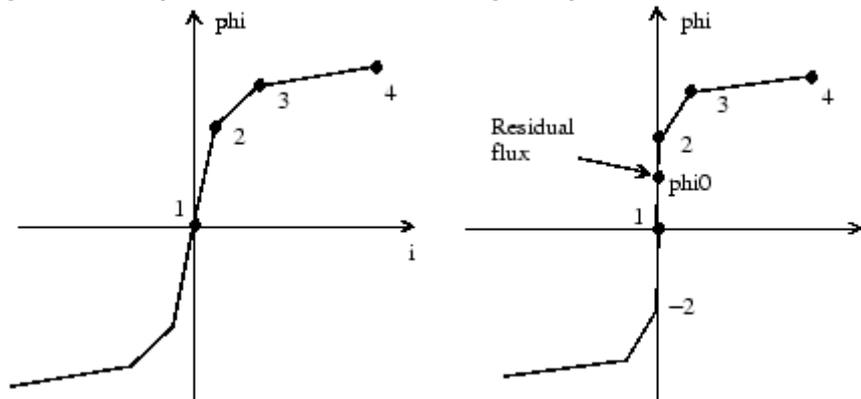
Figura 21 - Modelo do bloco transformador saturável.



Fonte: Matlab (2016).

A característica de saturação do bloco do *Saturable Transformer* é definida por uma relação linear por partes entre o fluxo e a corrente de magnetização.

Figura 22 - Relação de Fluxo e Corrente de Magnetização, sem e com fluxo residual.



Fonte: Matlab (2016).

A característica de saturação é inserida como (i, ϕ) em valores de par-por- unidade, começando com par $(0, 0)$. O software converte o vetor de fluxos Φ_{pu} e o vetor de correntes I_{pu} em unidades padrão para serem usadas no modelo de saturação do bloco,

4.1.1 CONVERSÃO EM PU

Para cumprir a prática da indústria, o bloco permite especificar a resistência e a indutância dos enrolamentos por unidade (pu). Os valores são baseados na potência nominal do transformador P_n em VA, frequência nominal f_n em Hz e tensão nominal V_n , em V_{rms} , do enrolamento correspondente. As fórmulas para conversão das grandezas para PU serão apresentadas, começando pelo cálculo das grandezas base:

$$R_{base} = \frac{V_{2,B}^2}{P_{n,B}} = \frac{V_{2,B}}{I_{base}} \quad (3.1)$$

$$L_{base} = \frac{R_{base}}{2\pi f_n} \sqrt{2} \quad (3.2)$$

$$I_{base} = \frac{P_{n,B}}{V_{2,B}} \sqrt{2} \quad (3.3)$$

$$\Phi_{base} = \frac{V_{2,B}}{2\pi f_n} \sqrt{2} \quad (3.4)$$

Definido os valores bases, agora obtemos os valores em PU:

$$R_{pu} = \frac{R}{R_{base}} \quad (3.5)$$

$$L_{pu} = \frac{L}{L_{base}} \quad (3.6)$$

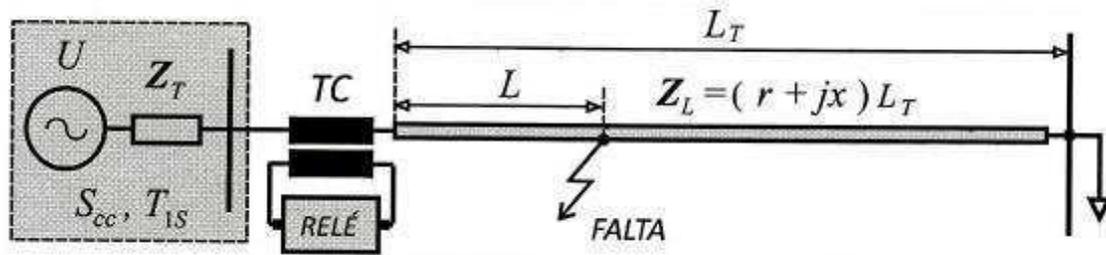
$$I_{pu} = \frac{I}{I_{base}} \quad (3.7)$$

$$\Phi_{pu} = \frac{\Phi}{\Phi_{base}} \quad (3.8)$$

5 RESULTADOS OBTIDOS

As simulações foram realizadas para o caso de um TC instalado em uma linha de transmissão com tensão nominal de 230 kV, como mostrado na Figura 23:

Figura 23 - Representação do sistema de transmissão utilizado.



Fonte: Soares (2015).

A linha de transmissão apresenta os seguintes dados:

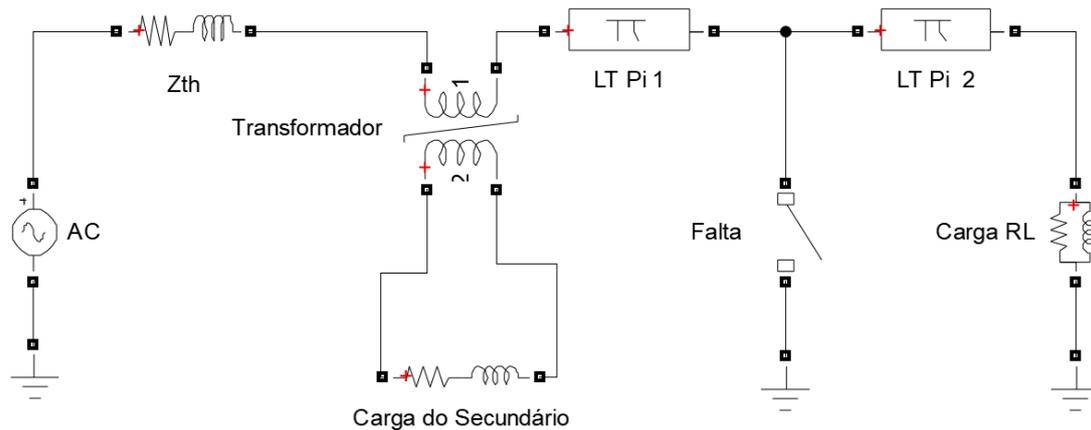
- Tensão nominal: 230 kV;
- Corrente nominal: 800 A
- Comprimento da linha: 80 km;
- Distância do defeito: 5 km;
- Resistência em série: $r = 0,0319 \Omega/km$;
- Reatância em série: $x = 0,3311 \Omega/km$;
- Resistência de magnetização ou perdas: $R_m = 1000 \Omega$.

Para todos as cargas foram simulados a corrente primária i_1 , corrente secundária i_2 e o fluxo de enlace no secundário para as seguintes cargas ligadas ao enrolamento secundário do TC:

- Carga com componente resistiva: $Z_{2,1} = 1,25 \Omega$;
- Carga com componente resistiva e indutiva: $Z_{2,2} = 0,25 + j1,25 \Omega$;
- Carga com componente resistiva e indutiva: $Z_{2,3} = 0,88 + j0,88 \Omega$;
- Carga com componente resistiva e indutiva: $Z_{2,4} = 4 + j0,1 \Omega$.

A representação da linha no Simscape é mostrado na Figura 24:

Figura 24 - Modelo da linha estudada no Simscape.



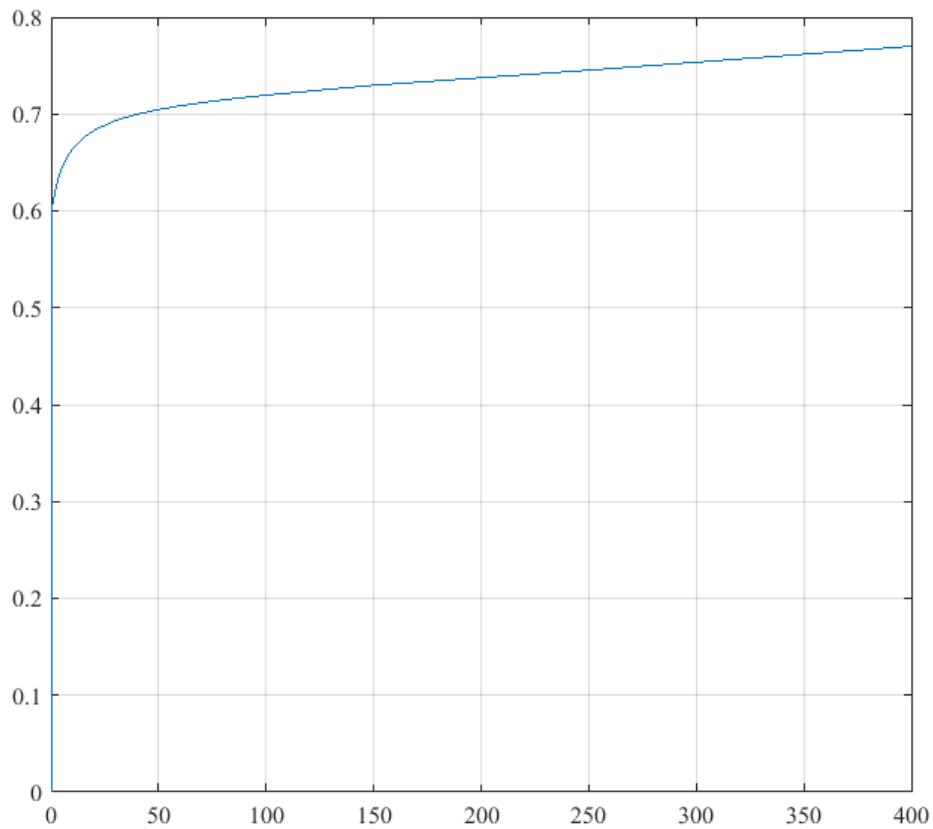
Fonte: Próprio Autor.

A linha foi representada por blocos de circuitos pi, a falta por uma chave, e para o consumidor foi colocado uma carga RL ao final da linha. De acordo com Stevenson (1986), linhas de até 80 km são consideradas curtas e possuem uma capacitância mínima que pode ser desconsiderada na representação da linha de transmissão, assim a linha consta apenas do seu valor de resistência e indutância.

As simulações foram feitas para três situações em relação ao fluxo residual no núcleo do transformador: ausência de fluxo residual, remanência de 0,3 Wb e 0,6 Wb. Todos os casos de fluxo residual foram considerados para todas as cargas no secundário do transformador.

A característica de saturação do bloco do transformador foi definida pela relação linear por partes entre o fluxo e a corrente de magnetização mostrado na Figura 25:

Figura 25 - Relação do fluxo e corrente de Magnetização utilizada.



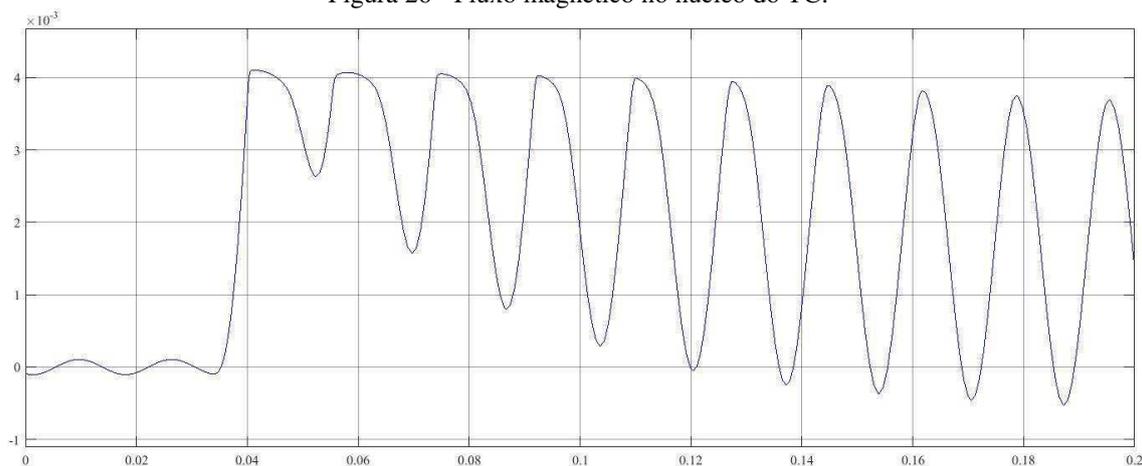
Fonte: Próprio Autor.

5.1 SIMULAÇÕES SEM FLUXO RESIDUAL

5.1.1 CARGA COM COMPONENTE RESISTIVA

Para uma carga puramente resistiva $Z_{2,1} = 1,25 \Omega$ ligada ao secundário do TC, o qual foi considerado sem fluxo residual, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 26, 27.

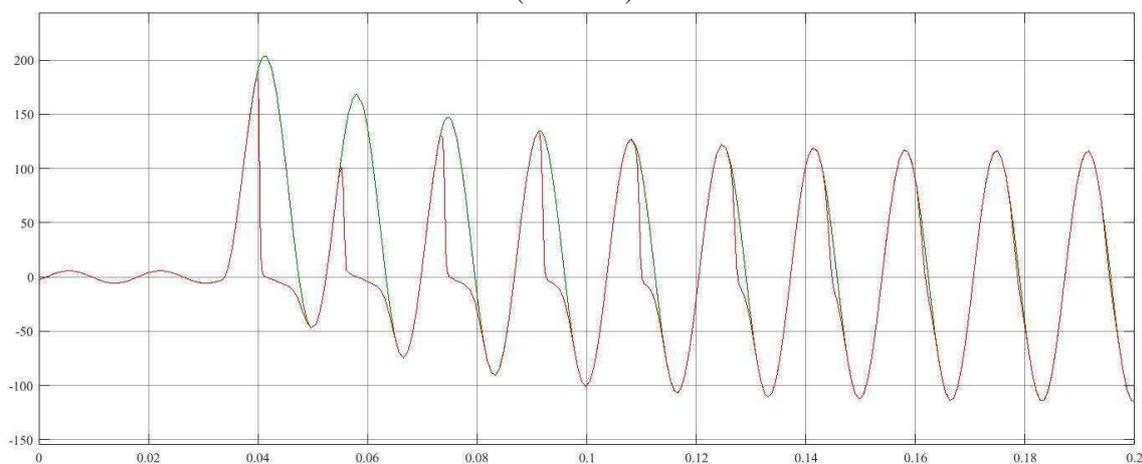
Figura 26 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

Para melhor comparação as correntes primárias e secundárias foram plotadas no mesmo gráfico, porém a corrente primária foi refletida para o enrolamento secundário para que ambas ficassem na mesma ordem de grandeza, esse gráfico é apresentado na figura a seguir:

Figura 27 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



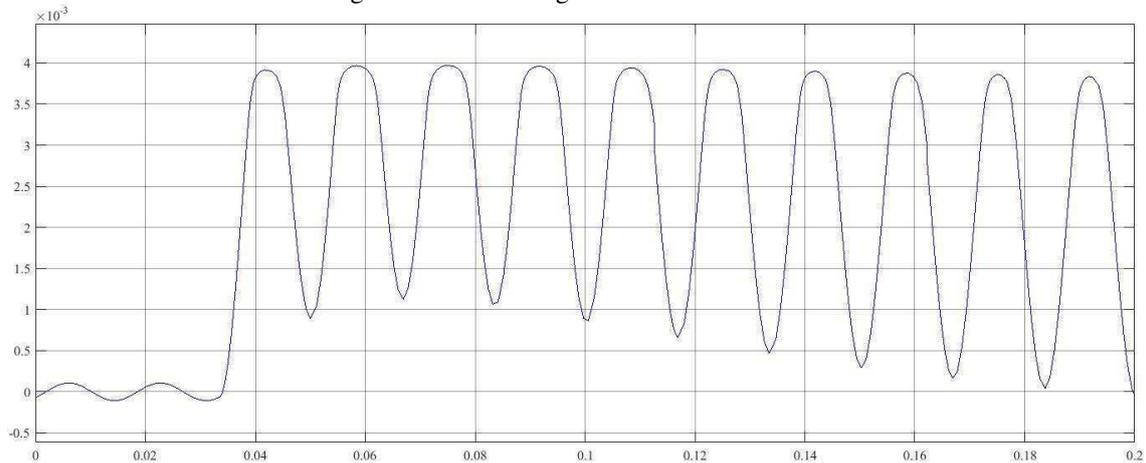
Fonte: Próprio Autor.

É fácil perceber a componente senoidal da corrente do primário do TC incrementada por um decaimento exponencial, e que nos primeiros ciclos da corrente secundária após a falha, esta tem um decaimento brusco para o zero, devido à ausência de amortecimento de uma carga indutiva.

5.1.2 CARGAS COM COMPONENTES RESISTIVA E INDUTIVA

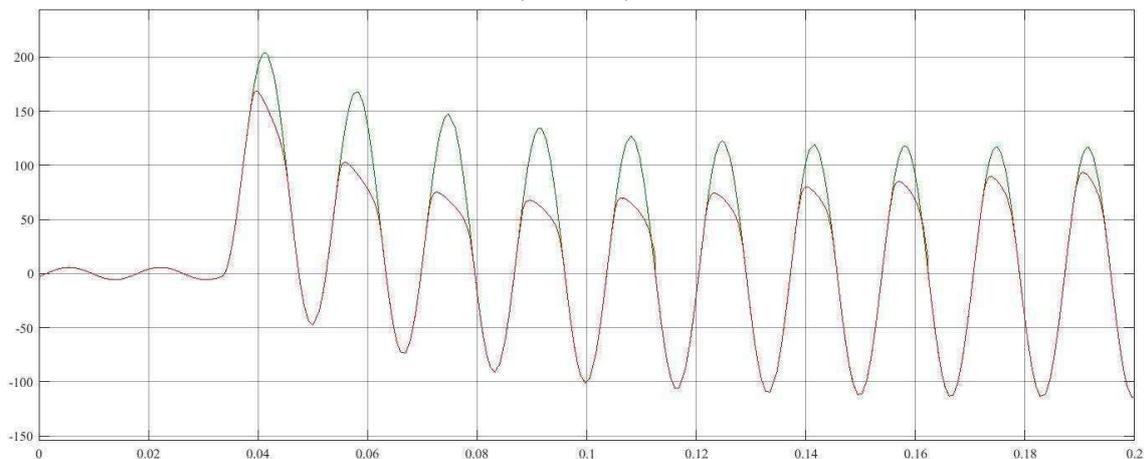
Para uma carga com componentes resistiva e indutiva, de valor $Z_{2,2} = 0,25 + j1,25 \Omega$, instalada no secundário do TC, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

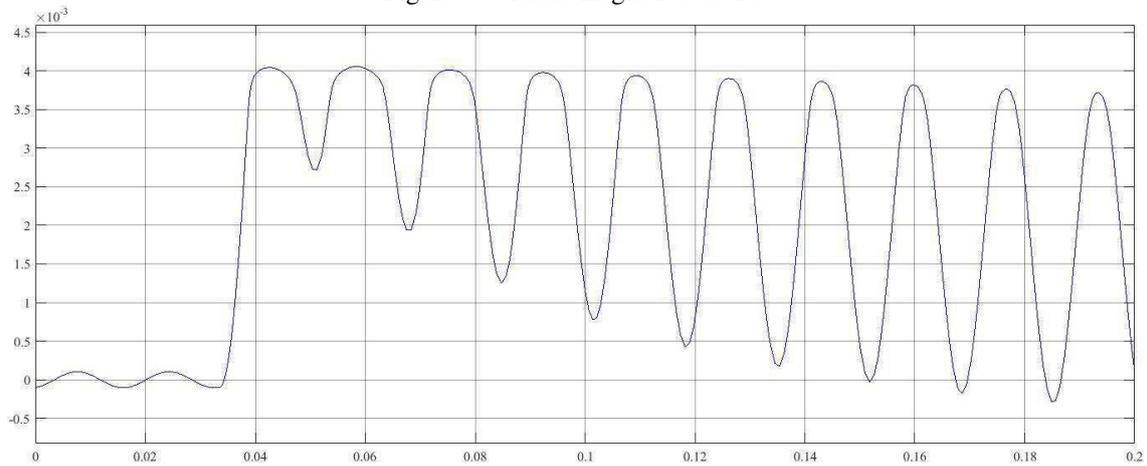
Percebe-se que quando o núcleo satura, a corrente não cai abruptamente para zero, como ocorre com a carga apenas com componente resistiva. Isso se deve à propriedade dos indutores em estabelecer oposição a variações bruscas da corrente.

Também é possível notar que a corrente secundária não consegue atingir os picos da corrente primária refletida, essa diminuição na amplitude da corrente faz com que os

relés do sistema de proteção vejam uma corrente menor, afetando o desempenho do mesmo.

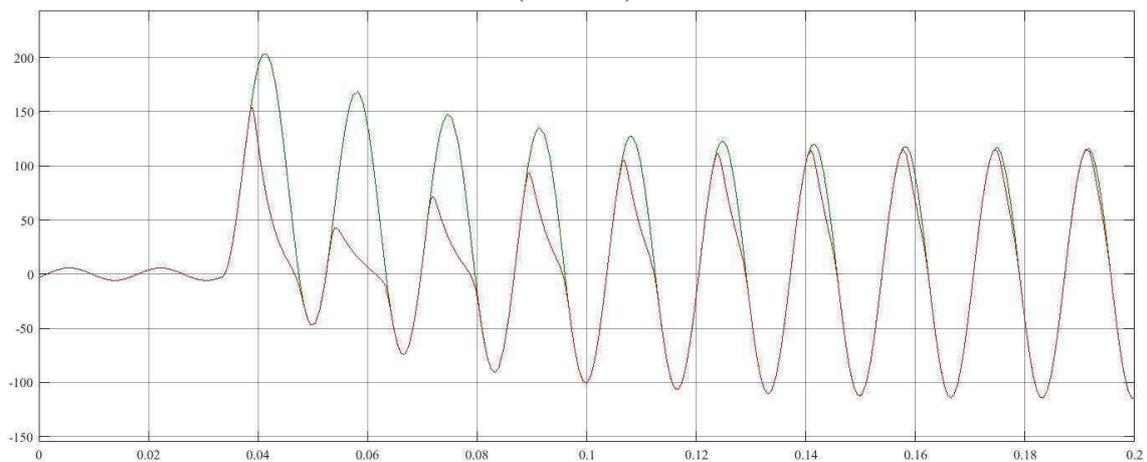
Para uma carga de valor $Z_{2,3} = 0,88 + j0,88 \Omega$ ligada ao secundário do TC, sem fluxo residual, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 30 e 31:

Figura 30 - Fluxo magnético do TC.



Fonte: Próprio Autor.

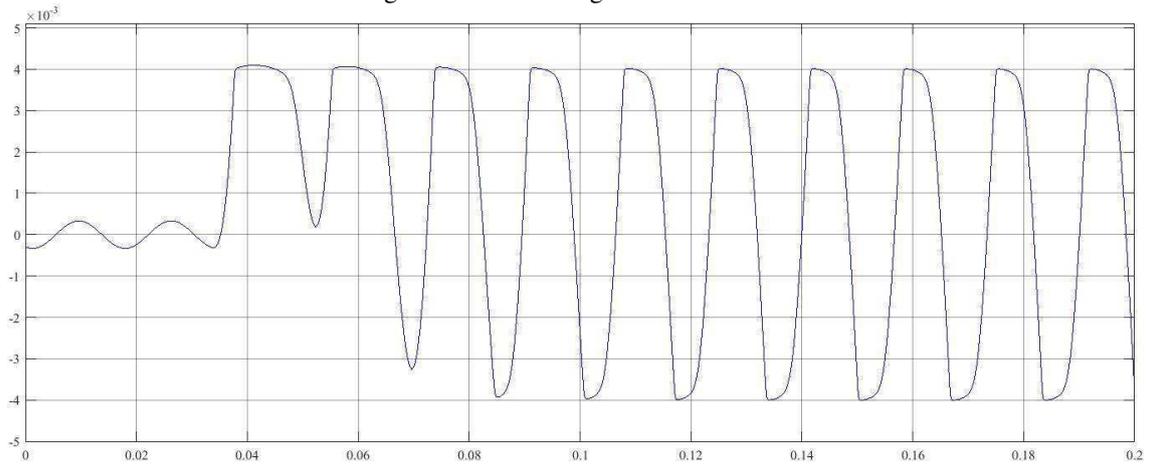
Figura 31 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

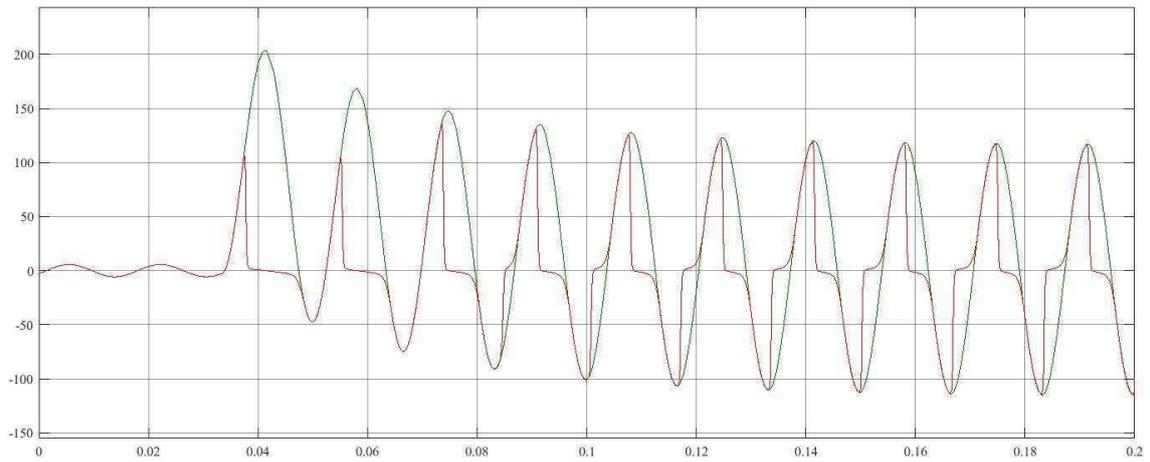
Para uma carga de valor $Z_{2,4} = 4 + j0,1 \Omega$ ligada ao secundário do TC, sem fluxo residual, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 32 e 33:

Figura 32 - Fluxo magnético do Núcleo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

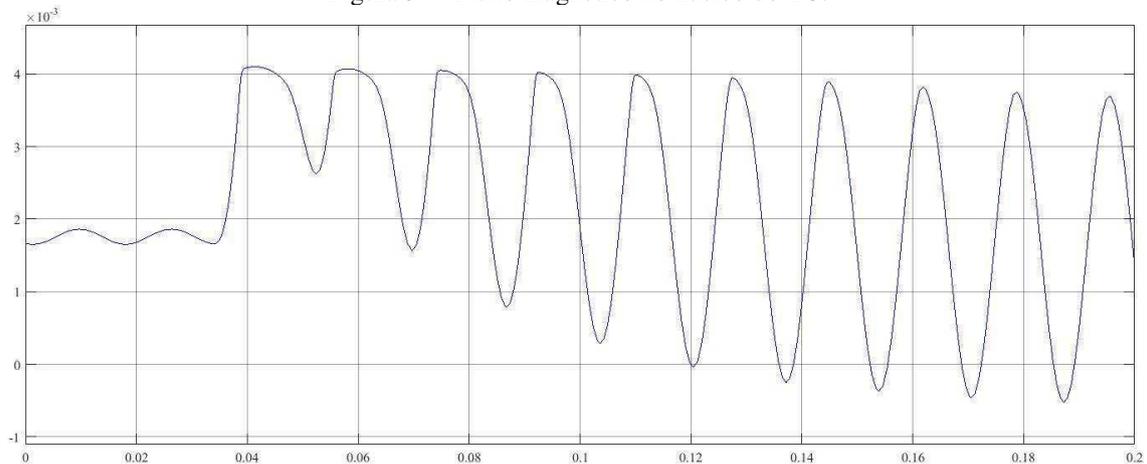
5.2 SIMULAÇÕES COM FLUXO RESIDUAL

Para as simulações com fluxo residual no núcleo do TC os mesmos valores de carga no secundário foram utilizados, mas dois casos diferentes para o fluxo: 0,3 Wb e 0,6 Wb.

5.2.1 CARGA COM COMPONENTE RESISTIVA

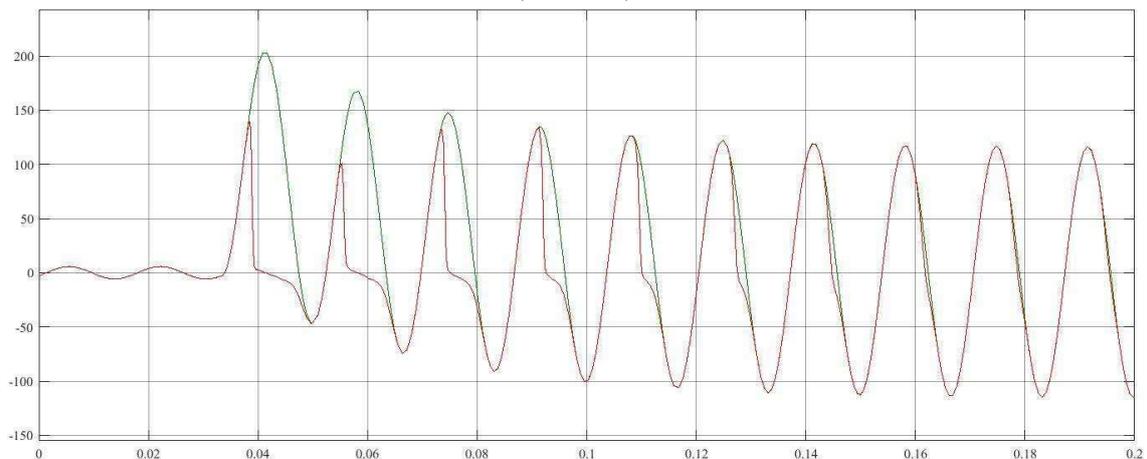
Para uma carga $Z_{2,1} = 1,25 \Omega$ e um fluxo residual de 0,3 Wb, a resposta da simulação é apresentada nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

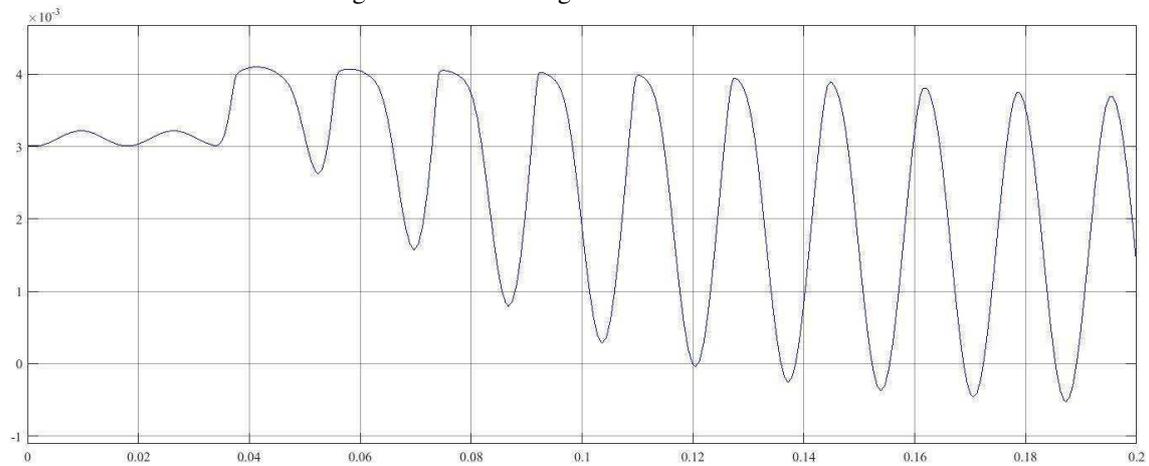
Figura 35 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

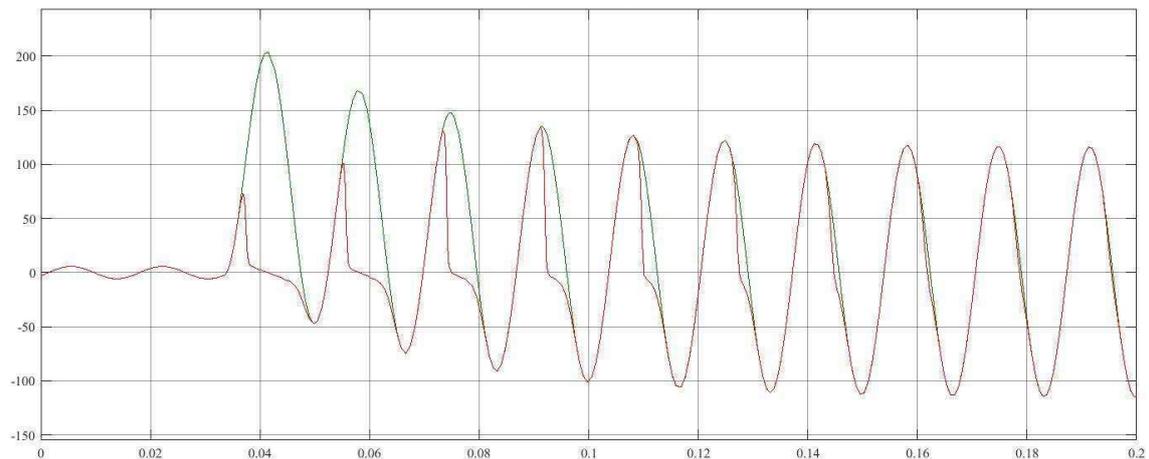
Para o mesmo valor de carga, mas uma remanência no núcleo do TC de 0,6 Wb, temos:

Figura 36 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).

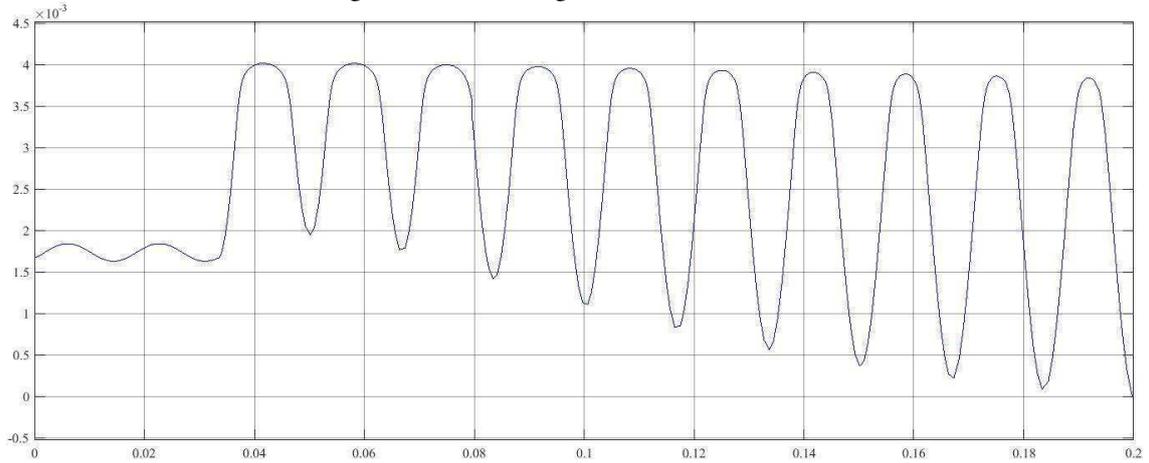


Fonte: Próprio Autor.

5.2.2 CARGAS COM COMPONENTES RESISTIVA E INDUTIVA

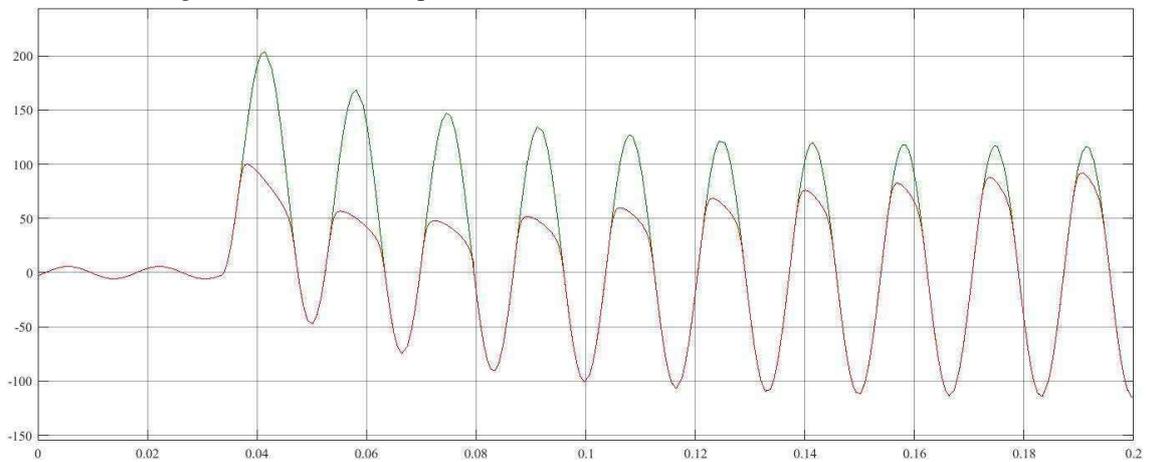
Para uma carga de $Z_{2,2} = 0,25 + j1,25 \Omega$ instalada no secundário do TC, e com um fluxo residual de 0,3 Wb no núcleo, os resultados obtidos foram:

Figura 38 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

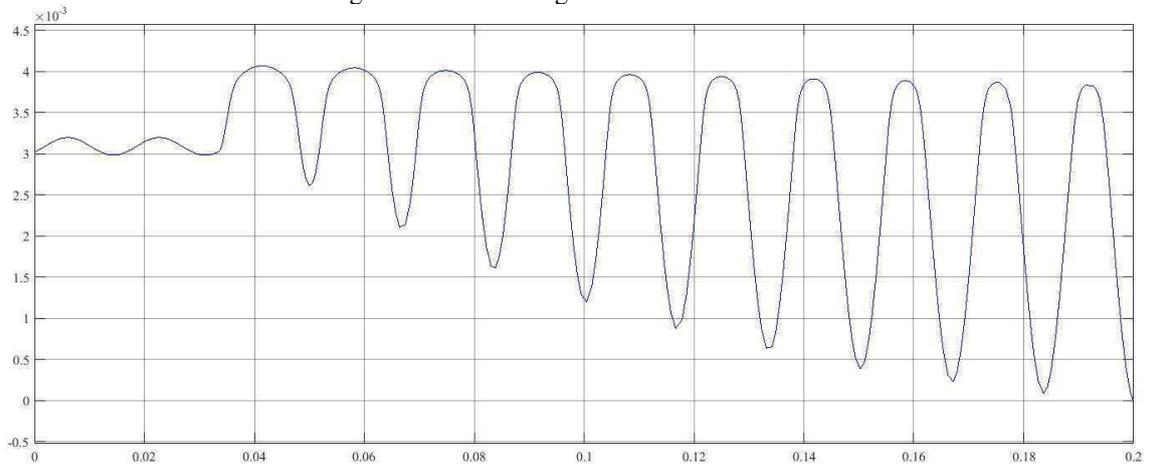
Figura 39 - Corrente no primário (verde) e corrente no secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

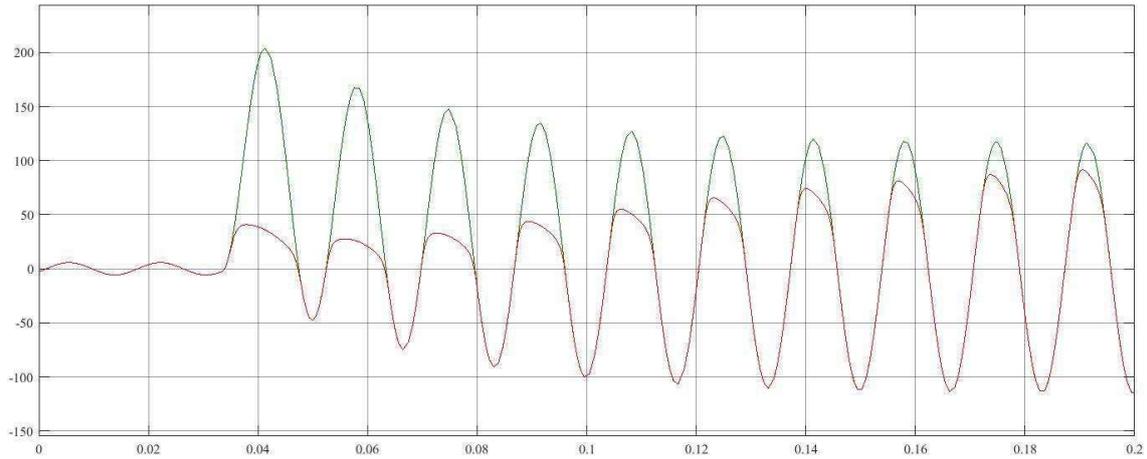
Para o mesmo valor de carga no secundário e um fluxo residual de 0,6 Wb, os resultados alcançados foram:

Figura 40 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

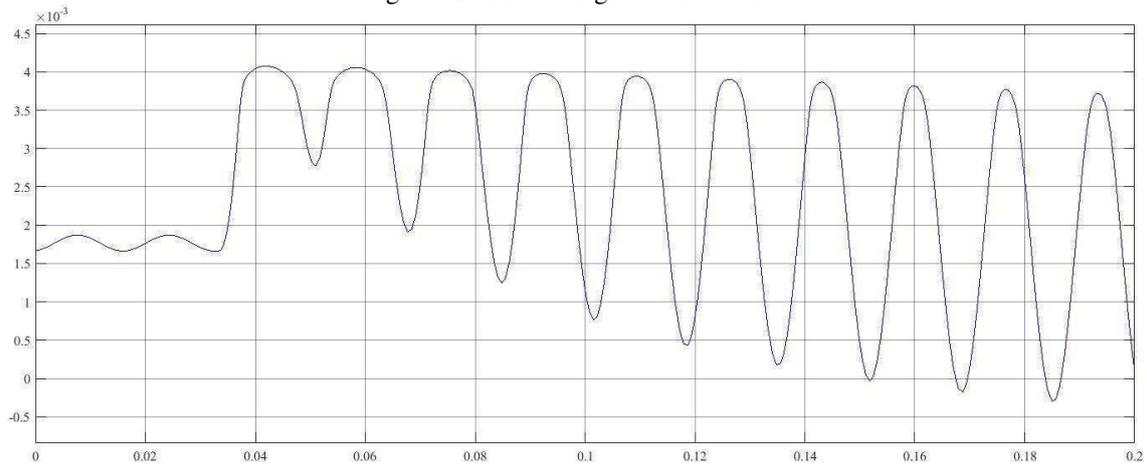
Figura 41 - Corrente primária (verde) e corrente secundária (vermelha).



Fonte: Próprio Autor.

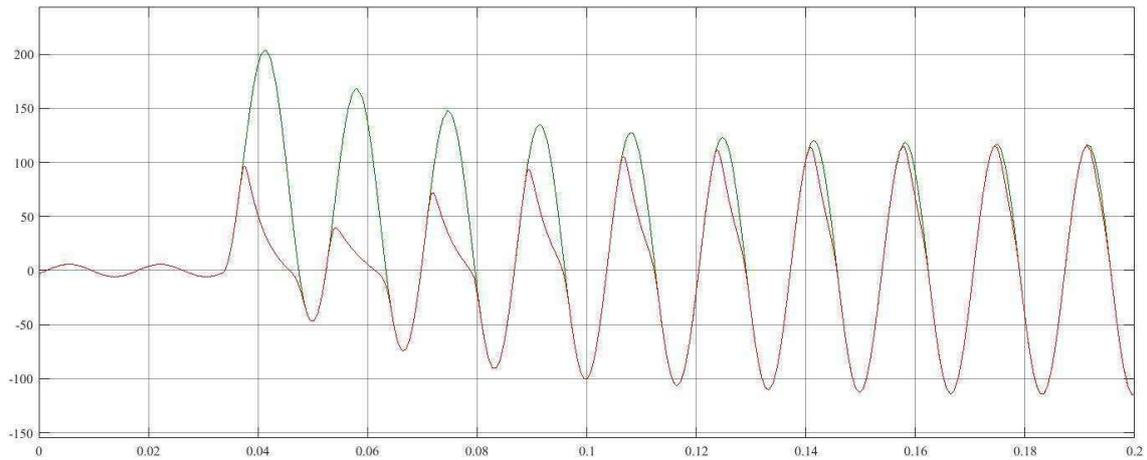
Para a carga $Z_{2,3} = 0,88 + j0,88 \Omega$, com um fluxo residual de 0,3 Wb, a simulação gerou as seguintes imagens:

Figura 42 - Fluxo Magnético no núcleo.



Fonte: Próprio Autor.

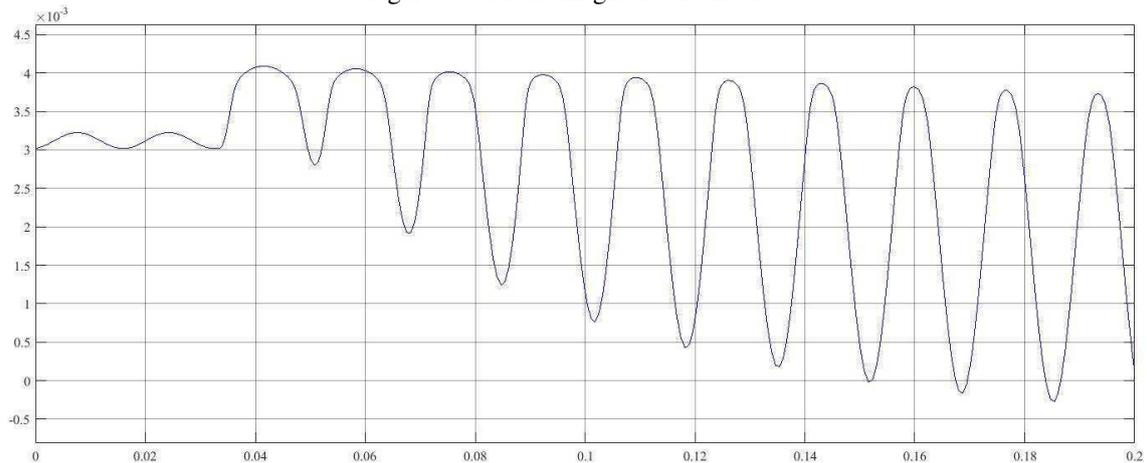
Figura 43 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

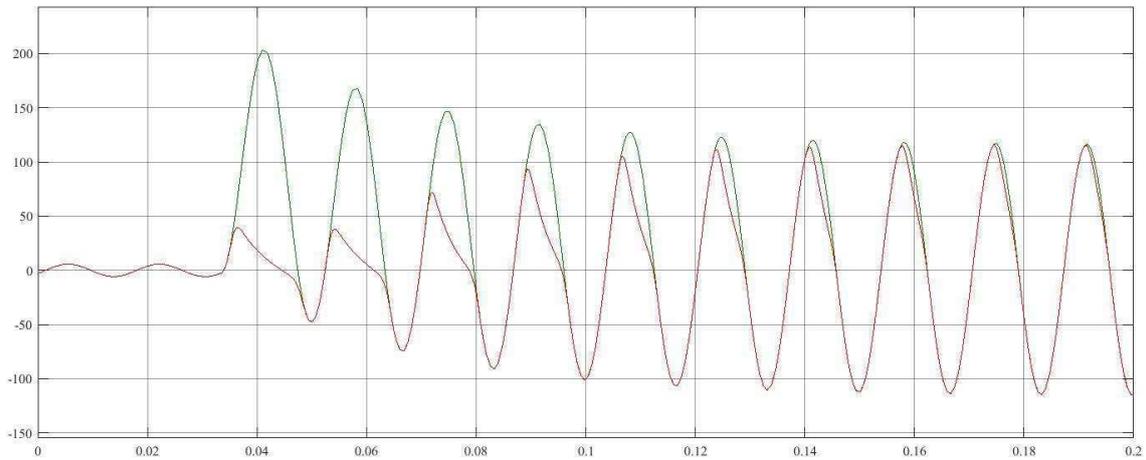
Para a mesma carga, mas agora com um fluxo remanescente de 0,6 Wb, os resultados foram:

Figura 44 - Fluxo magnético no núcleo.



Fonte: Próprio Autor.

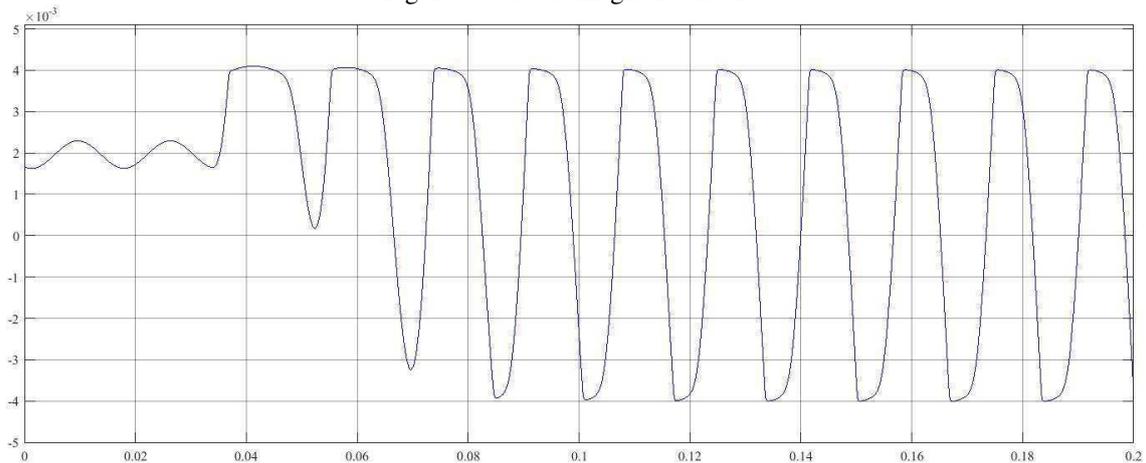
Figura 45 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

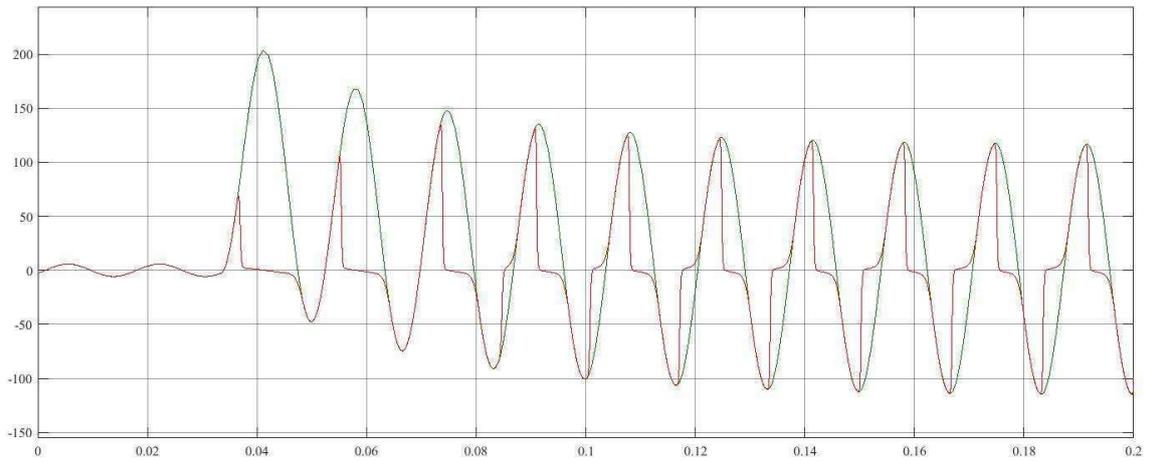
A resposta da simulação para um fluxo residual de 0,3 Wb e uma carga no secundário de $Z_{2,4} = 4 + j0,1 \Omega$ é mostrada a seguir:

Figura 46 - Fluxo magnético no TC.



Fonte: Próprio Autor.

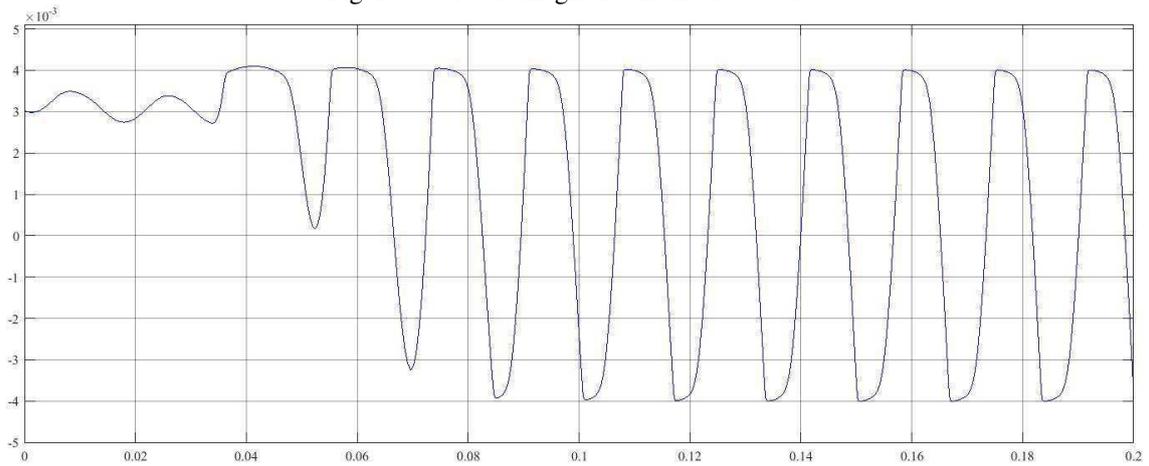
Figura 47 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

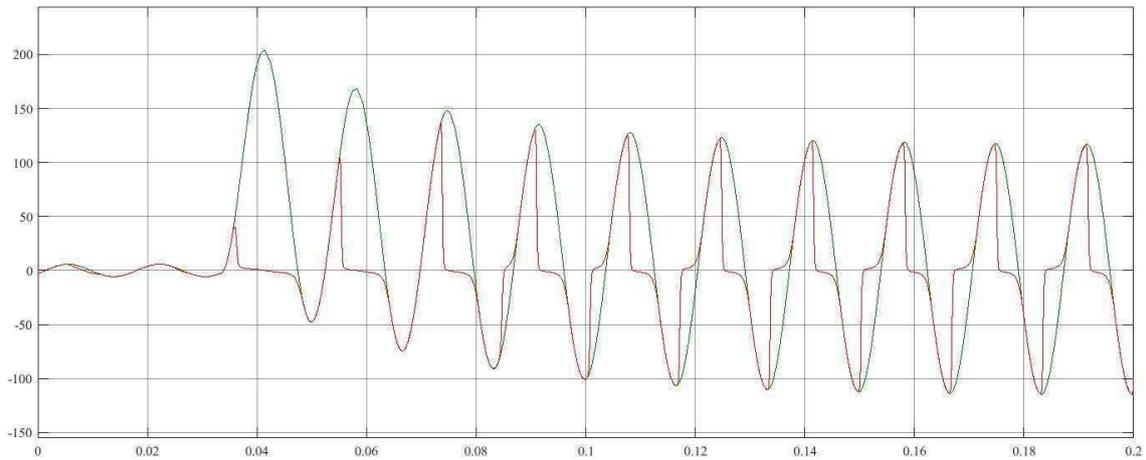
Para a mesma carga, mas uma remanência de 0,6 Wb, os resultados são:

Figura 48 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 49 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).

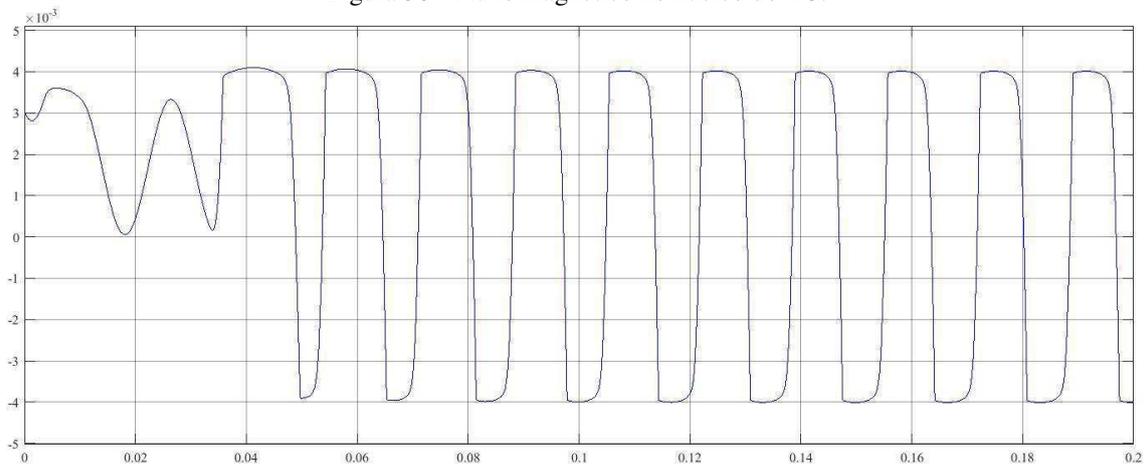


Fonte: Próprio Autor.

Percebe-se que para a carga $Z_{2,4}$ que o fluxo torna-se cada vez mais semelhante a uma onda quadrada, sendo limitada pela saturação do núcleo, nessa situação surgem impulsos de tensão que ocasionam perigo de destruição da isolação devido as severas solicitações elétricas e térmicas.

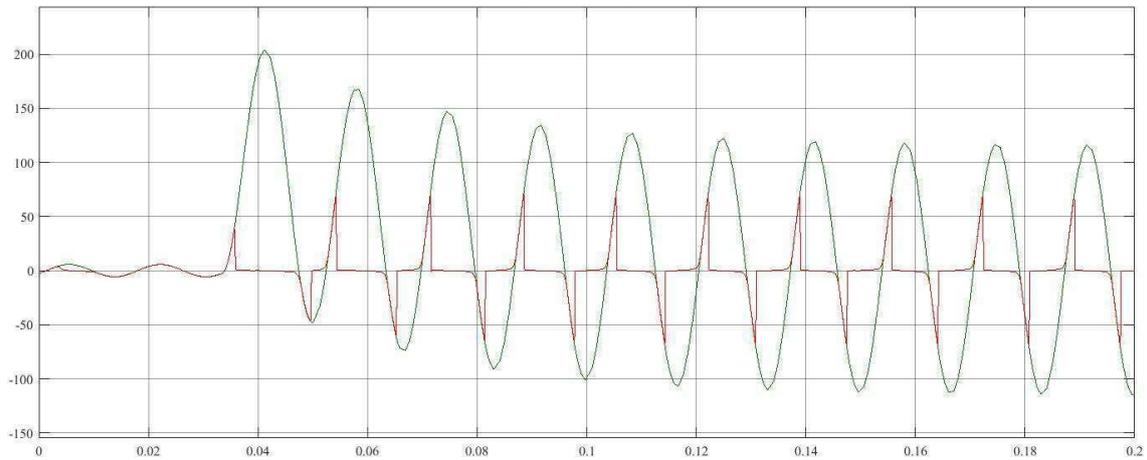
Fazendo mais uma simulação para um caso extremo de $Z_{2,5} = 20 \Omega$ e um fluxo residual de 0,6 Wb para observar melhor esse efeito nas Figuras 66, 67 e 68:

Figura 50 - Fluxo magnético no núcleo do TC.



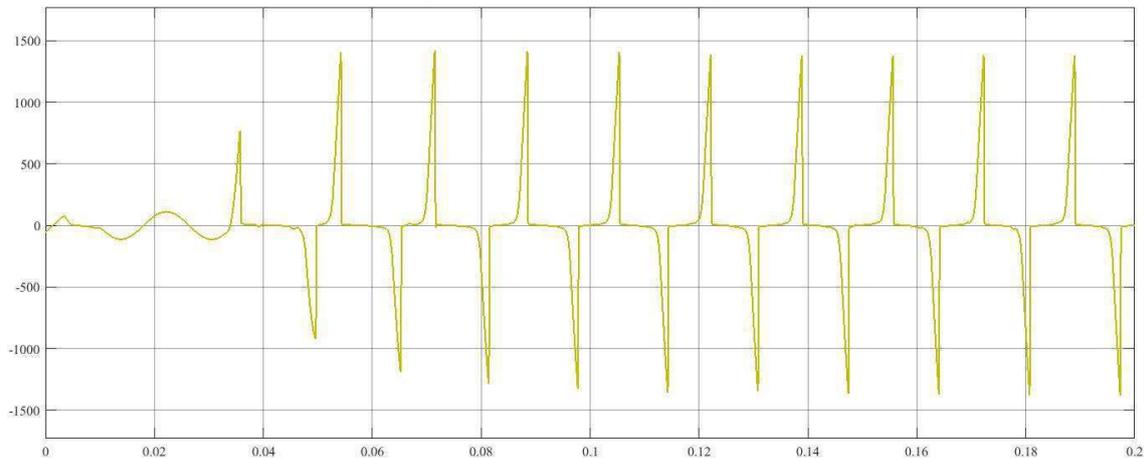
Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 - Corrente do primário refletida no enrolamento secundário (verde) e corrente do secundário (vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 52 - Tensão de excitação.



Fonte: Próprio Autor.

A medida que a impedância de carga aumenta, o núcleo passa a operar na região de saturação, que é caracterizada por indutâncias diferenciais L_m muito baixas. Isto faz com que a grande parte da corrente do secundário passe a circular por L_m , de forma a ocorrer pronunciadas distorções na forma de onda do secundário do TC.

Quanto maior for a componente resistiva ligada ao secundário do TC, maior será a indução magnética no TC, fazendo com que haja saturação mais rápida, conforme pode-se observar na equação 2.19.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Apresentou-se nesse capítulo simulações utilizando os algoritmos do Simscape, Matlab. Verificou-se os efeitos da carga secundária e da amplitude da corrente de falta simétrica na saturação do TC. Observa-se que para elevados valores da impedância 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.

Para observar melhor a influência de cada tipo de carga na saturação, todas as simulações foram realizadas sob as mesmas condições, modificando-se apenas a carga ligada ao secundário entre uma carga apenas com componente resistiva, e três cargas com componentes resistivas e indutivas, e o fluxo residual no núcleo do TC.

Através dos gráficos obtidos para a corrente no enrolamento secundário, verificou-se que a carga $Z_{2,4}$ apresentou uma maior deformação, enquanto a carga $Z_{2,2}$ foi a que obteve a menor deformação, devido ao alto valor da componente indutiva e sua característica de se opor a variações bruscas de corrente. Assim, percebe-se que com o aumento da componente resistiva no secundário, maior será a indução magnética no TC, fazendo com que haja saturação mais rápido. Para o mesmo módulo de impedância, quanto maior for a componente indutiva, mais lentamente o TC satura, uma vez que a indutância proporciona baixa impedância para componentes contínuas das correntes de faltas assimétricas.

Temos que $|Z_{2,1}| = 1,25$; $|Z_{2,2}| \approx 1,24$; $|Z_{2,3}| \approx 1,27$ e $|Z_{2,4}| = 4$. Para as três primeiras cargas há uma grande aproximação no seu módulo, embora os valores das componentes indutivas e resistivas sejam muito diferentes, percebe-se que das três, $Z_{2,1}$ apresentou maior deformação na corrente secundário e um maior valor de fluxo, seguido por $Z_{2,3}$ e por $Z_{2,2}$. A carga $Z_{2,4}$ apresentou a maior deformação na corrente secundária, e por mais tempo, e seu fluxo aproximou-se bastante de uma forma quadrada, afirmando que para maiores impedâncias e maiores componentes resistivas o TC apresentará maior saturação, durante um intervalo maior de tempo.

Também foi observado que a saturação tende a reduzir a amplitude da corrente esperada, como foi bem visualizado em $Z_{2,5}$, isso faz com que os relés do sistema de proteção vejam uma corrente menor, afetando o desempenho do mesmo. Por exemplo, relés de distância atuam fazendo uma comparação da impedância aparente da linha, como $Z = V/I$, uma estimativa menor da corrente causa um aumento da impedância esperada

pelo relé, fazendo com que esse tenha um sub-alcance na proteção da linha. Dependendo do tipo de aplicação, é possível que mesmo o núcleo do TC saturando, a corrente secundária vista pelo relé não afete sua operação.

Se o fluxo residual for elevado, o desempenho do TC fica comprometido, pois uma corrente de defeito baixa poderá levar o TC a um estado de saturação idêntico ao causado por uma corrente de valor bem maior, a qual se estabeleça com o núcleo inicialmente desmagnetizado.

6 CONCLUSÃO

Ficou evidenciado que 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.

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 elétricos de potência, de modo a ser possível levar em consideração diferentes configurações de sistemas além de diversos parâmetros que influenciam na atuação da proteção do sistema.

Este trabalho procurou elaborar rotinas computacionais de fácil manuseio, com uma ferramenta relativamente nova que possibilita de maneira simples representar o comportamento não linear do núcleo magnético do TC, sem e com fluxo residual, e através disso simular para estudar o funcionamento de um TC com diferentes tipos de cargas conectadas ao seu enrolamento secundário.

Disciplinas vistas ao longo do curso de graduação, como Equipamentos Elétricos e Proteção de Sistemas Elétricos foram de fundamental importância para escrever este trabalho.

Assim, 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*.

BIBLIOGRAFIA

GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. Transformadores de Corrente – Aspectos Básicos. In: GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. 1ª. ed. Campina Grande: [s.n.], 2015. cap. 3, p. 44-63.

GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. Transformadores de Corrente em Regime Transitório. In: GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. 1ª. ed. Campina Grande: [s.n.], 2015. cap. 4, p. 64-84.

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

PEREIRA, Fagner de Araújo. Dissertação de Mestrado: **Modelagem de Transformadores de Corrente e Correção de Correntes Distorcidas no Enrolamento Secundário**. 2012. 84 f. Dissertação (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA)- Campus Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. 1.

SOARES, Fellipe Souto. **Estudo do Comportamento de Transformadores de Corrente em Regime Transitório**. 2015. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)- Campus Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

STEVENSON JR., William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2ª . ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 458 p.