

ANÁLISE E MEDIÇÕES DAS SOBRECORRENTES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

Guilherme Vasconcellos Marcelino

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc.
(Orientador)

Profa. Maria Karla Vervloet Sollero, D.Sc.
(Examinadora)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.
(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2011

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado forças para conquistar mais esta etapa de grande importância na minha vida.

Agradeço aos meus pais, Valdir e Angela, por não medirem esforços para que eu pudesse estudar e me dedicar aos meus objetivos, e a minha irmã, Angélica, por todo apoio em mim depositado durante toda essa jornada. Agradeço também a minha avó, Maria de Lourdes, por entender as minhas dificuldades e sempre tentar me ajudar da melhor forma possível.

Agradeço aos meus familiares que sempre se orgulharam do esforço e dedicação que sempre tive na conquista dos meus objetivos.

Agradeço aos meus amigos de faculdade pelas conversas de corredor que por muitas vezes foram de extrema importância para a solução de problemas relacionados aos estudos e, também, pela convivência e diversão durante todo esse tempo que me fizeram encontrar amizades que, certamente, levarei por toda vida. Gostaria de agradecer também aos meus amigos que por vezes não entenderam o porquê da minha ausência durante esse período de graduação.

Agradeço, em especial, a todos os professores que participaram da minha formação profissional e ao meu orientador, Prof. Sebastião de Oliveira, pelo apoio, ensinamentos e pela confiança em mim depositada sem a qual, certamente, não conseguiria concluir este trabalho.

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Máquinas Elétricas da UFRJ André, Sérgio e Jorginho, que me ajudou na execução da parte prática deste trabalho dando todo suporte necessário.

Resumo

Neste trabalho foram medidas e analisadas as correntes transitórias de magnetização (correntes de *inrush*) que surgem no instante da energização de um transformador monofásico. Também, neste trabalho, foi observado o comportamento não senoidal da corrente de excitação do transformador e realizados os ensaios de curto-circuito e ensaio a vazio a fim de se determinar os parâmetros de seu circuito equivalente. E, ainda, foi obtida a curva de histerese do mesmo transformador através da utilização de um circuito integrador acoplado ao osciloscópio digital. Os ensaios foram realizados em um transformador de 1KVA de potência que, apesar de não possuir os valores usuais dos parâmetros encontrados em sistemas de potência de médio e grande porte, apresentou desempenho bastante satisfatório no que diz respeito à observação dos fenômenos aqui discutidos.

Na análise das correntes de *inrush* realizada neste trabalho levou-se em conta o pico máximo atingido por esta de acordo com o nível da tensão aplicada e, também, o percentual dos harmônicos em relação à componente fundamental presentes nesta mesma corrente. A amplitude destes harmônicos tem grande importância para a operação dos esquemas de proteção do transformador de forma a permitir diferenciação segura entre uma corrente de curto-circuito e uma corrente de *inrush* evitando, assim, atuação indevida deste esquema durante o período transitório de energização.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivo.....	2
1.2.	Estrutura	2
2.	Aspectos gerais de desempenho de um transformador	4
2.1.	Considerações iniciais.....	4
2.2.	Características gerais.....	4
2.3.	Histerese magnética	5
2.4.	Princípio de funcionamento	6
2.4.1.	Funcionamento a vazio	7
2.4.2.	Funcionamento sob carga.....	9
2.5.	Circuito equivalente	12
2.5.1.	Resistência dos enrolamentos	13
2.5.2.	Reatâncias de dispersão.....	14
2.5.3.	Impedância de magnetização	15
2.6.	Corrente a vazio ou de excitação	16
2.7.	Ensaio de curto-circuito	17
2.8.	Ensaio em vazio	19
3.	Corrente transitória de magnetização (corrente de <i>inrush</i>).....	21
3.1.	Considerações iniciais.....	21
3.2.	Surgimento da corrente de <i>inrush</i>	22
3.3.	Fatores que influenciam as correntes de <i>inrush</i>	24
3.4.	Principais problemas devido ao aparecimento da corrente de <i>inrush</i>	24
3.5.	Energização de um transformador monofásico.....	25
4.	Proteção de transformadores.....	28

4.1.	Considerações iniciais.....	28
4.2.	Proteção diferencial.....	29
4.2.1.	Proteção diferencial no transformador monofásico.	30
4.2.2.	Proteção diferencial no transformador trifásico.....	30
4.3.	Desempenho dos esquemas de proteção diferencial de transformadores	31
4.4.	Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas.....	32
4.5.	Características dos esquemas de proteção diferencial durante a energização de transformadores.....	33
4.5.1.	Bloqueio da proteção diferencial	33
4.5.2.	Proteção diferencial utilizando atenuadores de transitórios.....	34
4.5.3.	Relé diferencial com retenção de harmônicos	35
4.5.4.	Relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico	36
4.5.5.	Relé diferencial digital	37
5.	Medições e resultados.....	39
5.1.	Considerações iniciais.....	39
5.2.	Transformador utilizado nos estudos	40
5.3.	Determinação da curva de histerese do transformador	41
5.4.	Ensaio em vazio	48
5.5.	Ensaio de curto-circuito	62
5.6.	Ensaio de energização a vazio	64
6.	Conclusões.....	77
7.	Trabalhos futuros.....	78
8.	Bibliografia	79

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Laço de histerese típico de materiais ferromagnéticos [2].....	6
Figura 2.2 - Transformador ideal com o secundário em aberto [2]	8
Figura 2.3 - Transformador ideal com uma carga conectada ao secundário [2].....	10
Figura 2.4 - Circuito equivalente de um transformador em regime permanente [4]	13
Figura 2.5 - Representação esquemática do fluxo mútuo e fluxo disperso presentes nos transformadores[3].....	15
Figura 2.6 - (a) Tensão, fluxo e corrente de excitação; (b) Laço de histerese correspondente [2].....	16
Figura 2.7 - Disposição dos instrumentos de medição na realização do ensaio de curto-circuito [4].....	18
Figura 2.8 - Disposição dos instrumentos de medição na realização do ensaio em vazio [4] ..	20
Figura 3.1 - Forma de onda característica da corrente de <i>inrush</i> e a tensão aplicada no transformador [4]	21
Figura 3.2 - Variação do fluxo em função do tempo logo após a energização de um transformador [5]	24
Figura 3.3 - Circuito utilizado no cálculo da corrente de <i>inrush</i> [5]	25
Figura 3.4 - Fluxo, curva de histerese e corrente de <i>inrush</i> de um transformador [5].....	26
Figura 4.1 - Proteção diferencial percentual no transformador monofásico [6].....	30
Figura 4.2 - Esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios [6]...	34
Figura 4.3 - Relé diferencial com retenção de harmônicos [6].....	35
Figura 4.4 - Unidade de bloqueio por 2º harmônico acoplado ao relé diferencial (87) [6]	37
Figura 5.1 - Painel frontal do osciloscópio digital TPS 2012 da Tektronix	40
Figura 5.2 - Transformador utilizado nos estudos	41
Figura 5.3 - Circuito utilizado para determinação da curva de histerese do transformador em estudo	42

Figura 5.4 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 100 V aplicada ao primário.....	45
Figura 5.5 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 140 V aplicada ao primário.....	46
Figura 5.6 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 180 V aplicada ao primário.....	46
Figura 5.7 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 220 V aplicada ao primário.....	47
Figura 5.8 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 230 V aplicada ao primário.....	47
Figura 5.9 - Curva de magnetização do transformador em estudo	50
Figura 5.10 - Corrente de excitação para uma tensão de 150 V aplicada ao enrolamento primário.....	51
Figura 5.11 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.10	51
Figura 5.12 - Corrente de excitação para uma tensão de 160 V aplicada ao enrolamento primário.....	52
Figura 5.13 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.12	52
Figura 5.14 - Corrente de excitação para uma tensão de 170 V aplicada ao enrolamento primário.....	53
Figura 5.15 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.14	53
Figura 5.16 - Corrente de excitação para uma tensão de 180 V aplicada ao enrolamento primário.....	54
Figura 5.17 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.16	54
Figura 5.18 - Corrente de excitação para uma tensão de 190 V aplicada ao enrolamento primário.....	55
Figura 5.19 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.18	55
Figura 5.20 - Corrente de excitação para uma tensão de 200 V aplicada ao enrolamento primário.....	56
Figura 5.21 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.20	56
Figura 5.22 - Corrente de excitação para uma tensão de 210 V aplicada ao enrolamento primário.....	57
Figura 5.23 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.22	57

Figura 5.24 - Corrente de excitação para uma tensão de 220 V aplicada ao enrolamento primário.....	58
Figura 5.25 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.24	58
Figura 5.26 - Corrente de excitação para uma tensão de 230 V aplicada ao enrolamento primário.....	59
Figura 5.27 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.26	59
Figura 5.28 - Corrente de excitação para uma tensão de 240 V aplicada ao enrolamento primário.....	60
Figura 5.29 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.28	60
Figura 5.30 - Corrente de excitação para uma tensão de 250 V aplicada ao enrolamento primário.....	61
Figura 5.31 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.30	61
Figura 5.32 - Curva de curto-circuito do transformador em estudo	64
Figura 5.33 - Amplitude da tensão em 284V no instante de energização a vazio	65
Figura 5.34 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.33	65
Figura 5.35 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.34	66
Figura 5.36 - Amplitude da tensão em -160V no instante de energização a vazio.....	66
Figura 5.37 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.36	67
Figura 5.38 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.37	67
Figura 5.39 - Amplitude da tensão em 104V no instante de energização a vazio	68
Figura 5.40 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.39	68
Figura 5.41 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.40	69
Figura 5.42 - Amplitude da tensão em -92V no instante de energização a vazio.....	69
Figura 5.43 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.42	70
Figura 5.44 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.43	70
Figura 5.45 - Amplitude da tensão em -4V no instante de energização a vazio.....	71
Figura 5.46 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.45	71

Figura 5.47 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.46	72
Figura 5.48 - Amplitude da tensão em 88V no instante de energização a vazio	72
Figura 5.49 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.48.....	73
Figura 5.50 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.49	73
Figura 5.51 - Amplitude da tensão em 220V no instante de energização a vazio	74
Figura 5.52 - Corrente de <i>inrush</i> para a tensão de energização mostrada na figura 5.51	74
Figura 5.53 - Harmônicos da corrente de <i>inrush</i> mostrada na figura 5.52	75

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Porcentagem dos harmônicos em relação à fundamental presentes na corrente de inrush [6]	22
Tabela 5.1 - Dados de placa do transformador utilizado nos estudos.....	41
Tabela 5.2 - Dados obtidos através do osciloscópio durante a realização do ensaio em vazio	49
Tabela 5.3 - Porcentagem do terceiro e quinto harmônicos em relação ao fundamental de acordo com o nível de tensão	62
Tabela 5.4 - Dados obtidos através do osciloscópio durante a realização do ensaio de curto-circuito	63

1. Introdução

A grande aplicação dos transformadores nos sistemas elétricos existentes pelo mundo se deve à demanda crescente de energia elétrica pelos centros consumidores, tornando necessária, cada vez mais, a transformação desta energia em diferentes níveis. Desta maneira, torna-se indispensável o conhecimento sobre os princípios de funcionamento dos transformadores, um dos equipamentos mais caros do sistema elétrico como um todo. Com isso, os resultados dos estudos de desempenho dos transformadores em situações típicas e atípicas de funcionamento vêm sendo difundidos largamente com o passar dos anos.

Esses estudos são realizados basicamente de duas formas distintas: a primeira delas é pela realização de ensaios práticos em transformador de teste que apresenta características similares às do transformador que será empregado no sistema real. Esses ensaios têm a finalidade de determinar os parâmetros fundamentais para sua operação adequada no sistema elétrico ao qual se apresenta conectado e prever qual será seu comportamento em uma situação adversa que pode ocorrer quando o sistema elétrico está operando. A segunda forma consiste na simulação e análise de seu desempenho eletromagnético, lançando-se mão da utilização de modelos matemáticos inseridos em programas computacionais. Sendo assim, para que se possa implementar estas simulações, é necessários o conhecimento prévio dos elementos básicos de representação, tais como parâmetros do circuito equivalente, curva de saturação e histerese e dados de placa.

Dentre os vários ensaios que podem ser realizados pelos fabricantes e empresas de geração, transmissão e distribuição de energia em transformadores, pode-se destacar o ensaio de energização a vazio. Através da realização deste ensaio pode-se observar a influência da amplitude da tensão no pico da corrente de *inrush* no instante da energização do transformador e, também, extrair resultados de cálculo dos harmônicos presentes nesta corrente durante seus primeiros ciclos de variação. É a partir dos resultados destes cálculos de conteúdo harmônico que os esquemas de proteção diferencial de transformadores conseguem fazer a diferenciação entre uma corrente de

curto e uma corrente de *inrush* evitando, assim, a atuação indevida destes esquemas no instante de energização, evitando dificuldades operativas para o funcionamento de todo sistema ao qual este transformador está conectado.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados dos ensaios básicos implementados para determinação da curva de histerese, parâmetros do circuito equivalente e formas de onda da corrente de excitação de um transformador monofásico. Além dos resultados destes ensaios, são também apresentados e analisados os resultados dos ensaios de energização a vazio deste mesmo transformador, com o intuito de mostrar o comportamento das correntes de *inrush* para diferentes níveis de tensão de alimentação. Será feita uma correlação entre os valores de pico atingidos por essas correntes e os níveis da tensão aplicada ao transformador e serão apresentados, também, os níveis relativos das componentes harmônicas destas correntes. É através dos valores típicos para o conteúdo de harmônicos referido que os sistemas de proteção conseguem diferenciar uma corrente de curto-circuito de uma corrente de *inrush*.

1.2. Estrutura

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

O **Capítulo 1** apresentado anteriormente traz uma introdução sobre os principais aspectos da engenharia elétrica de transformadores, apresenta o objetivo principal do trabalho e mostra como ele foi estruturado.

O **Capítulo 2** apresenta uma descrição dos principais efeitos eletromagnéticos que ocorrem quando um transformador é energizado. Também neste capítulo são mostradas as equações básicas que regem o funcionamento dos transformadores em regime permanente e os ensaios a serem realizados para determinação dos parâmetros do circuito equivalente de um transformador.

O **Capítulo 3** descreve brevemente as correntes transitórias de magnetização que surgem durante a realização de manobras de energização em um transformador e os principais danos causados ao sistema por essas correntes indesejáveis.

O **Capítulo 4** descreve as principais características dos tipos de proteção utilizados em transformadores e que apresentam a capacidade de evitar a atuação indevida do seu sistema de proteção durante sua energização.

O **Capítulo 5** apresenta o transformador estudado neste trabalho e os dados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório. Também neste capítulo é apresentado o osciloscópio digital utilizado na aquisição das formas de onda e medidas utilizadas.

O **Capítulo 6** apresenta a conclusão deste trabalho com referência aos principais aspectos observados na realização destes ensaios.

O **Capítulo 7** apresenta sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2. Aspectos gerais de desempenho de um transformador.

2.1. Considerações iniciais

Devido a grande importância e ao alto custo dos transformadores empregados em sistemas de potência, torna-se indispensável o conhecimento sobre as principais características de funcionamento destes. Tal conhecimento pode reduzir a probabilidade de perda destes equipamentos devido a operações indevidas e ligações incorretas. Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos sobre o funcionamento dos transformadores de potência e a forma de determinação dos parâmetros de seu circuito equivalente. Vale ressaltar aqui que não é objetivo deste trabalho apresentar todos os ensaios necessários para a especificação completa de um transformador de potência.

2.2. Características gerais

Os transformadores são constituídos de um ou três enrolamentos primários e enrolamentos secundários de acordo com o tipo de configuração, monofásico ou trifásico, respectivamente. No entanto, a nomenclatura primário e secundário vem do sentido do fluxo de potência do sistema, ou seja, o enrolamento primário recebe a energia elétrica do sistema e o enrolamento secundário entrega energia elétrica à carga. Deste modo, o enrolamento primário pode ser tanto de alta tensão como de baixa tensão assim como o enrolamento secundário.

O funcionamento do transformador é baseado no fenômeno de indução mútua entre dois enrolamentos eletricamente isolados, porém magneticamente acoplados através de um componente de fluxo magnético comum conhecido por fluxo de magnetização. Assim, quando o enrolamento primário de um transformador é alimentado por uma fonte de tensão alternada, automaticamente surgirá um fluxo magnético alternado em que a amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras do enrolamento. Esse fluxo magnético

alternado, enlaça o enrolamento secundário induzindo neste uma tensão cujo valor dependerá da tensão induzida no enrolamento primário e da relação de espiras entre enrolamentos secundário e primário.

Para que um transformador funcione basta que exista um fluxo magnético comum, variável no tempo, enlaçando dois ou mais enrolamentos. Porém, para facilitar o acoplamento magnético entre estes enrolamentos, utiliza-se um núcleo feito de algum material que apresente alta permeabilidade magnética e baixa perda ôhmica. Este material, denominado de *material ferromagnético*, é tipicamente composto de ferro e ligas de ferro com cobalto, tungstênio, níquel, alumínio e outros metais.

2.3. Histerese magnética

Como foi visto no parágrafo anterior, o núcleo dos transformadores é feito de *materiais ferromagnéticos* que têm como função maximizar o acoplamento entre os enrolamentos e diminuir a corrente de excitação necessária para produzir o fluxo magnético. Tais materiais são compostos por uma grande quantidade de regiões nas quais os momentos magnéticos de todos os átomos estão em paralelo, denominadas domínios.

Quando uma força magnetizante externa é aplicada em um material ferromagnético, os momentos dos domínios magnéticos tendem a se alinhar com o campo magnético aplicado. Como resultado, os momentos magnéticos dos domínios somam-se ao campo aplicado, produzindo um valor muito mais elevado de densidade de fluxo do que aquele que existiria devido apenas à força magnetizante. À medida que a força magnetizante aumenta, cada vez mais momentos dos domínios magnéticos tendem a se alinhar ao campo aplicado. Entretanto, chega um ponto em que não há mais alteração nos momentos do domínio magnético, de forma que a partir deste ponto eles não podem mais contribuir para o aumento da densidade do fluxo magnético. Diz-se então que o material está completamente *saturado* [2].

Ao se reduzir a força magnetizante, os momentos dos domínios magnéticos relaxam-se indo para as direções de mais fácil magnetização próximas da direção do campo aplicado. No entanto, quando o campo aplicado é reduzido até zero, os momentos dos dipolos magnéticos não apresentam mais as orientações aleatórias como quando o material não apresentava nenhuma magnetização. Eles apresentam uma componente de magnetização líquida na direção do campo aplicado. Este efeito em que o material “memoriza” a orientação do campo aplicado é conhecido como *histerese magnética*. Devido a este efeito, a relação B e H em um material ferromagnético é não linear e plurívoca como mostrado na figura 2.1. Esta figura mostra apenas um laço de histerese típico do material ferromagnético, porém no estudo sobre o efeito da histerese em um material obtém-se um conjunto de laços de histerese que permite definir uma curva média de magnetização para descrição apropriada do comportamento do material magnético.

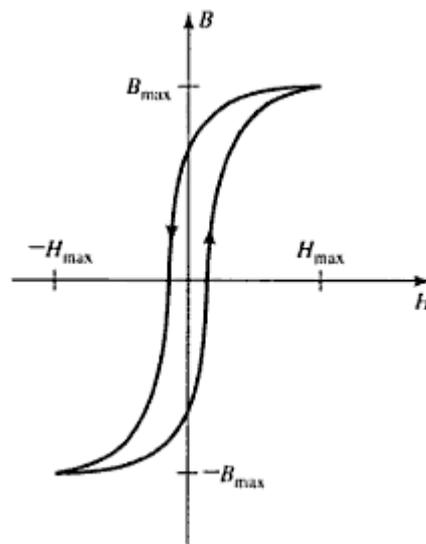


Figura 2.1 - Laço de histerese típico de materiais ferromagnéticos [2]

2.4. Princípio de funcionamento

A fim de facilitar o entendimento do princípio de funcionamento dos transformadores, introduz-se o conceito do transformador ideal em que são consideradas nulas as resistências

elétricas dos enrolamentos, as perdas no núcleo e as dispersões magnéticas. Sendo assim, a análise do transformador ideal apresentada aqui considera duas configurações distintas de funcionamento: funcionamento a vazio e funcionamento sob carga.

2.4.1. Funcionamento a vazio

No funcionamento a vazio aplica-se uma tensão de alimentação ao enrolamento primário e o enrolamento secundário é deixado em aberto. Então, sendo v_1 a tensão alternada com frequência f aplicada ao enrolamento primário, a corrente que circula no enrolamento secundário é nula conforme mostrado na figura 2.2. Como as resistências elétricas dos enrolamentos foram consideradas nulas, o enrolamento primário pode ser aproximado por um circuito puramente indutivo. A corrente que circula pelo primário corresponde a corrente de excitação (i_φ), defasada de 90° em atraso com relação à tensão aplicada v_1 . Esta corrente produzirá um fluxo alternado no circuito magnético, que por hipótese feita anteriormente, fica totalmente canalizado no núcleo [3] e [4]. A fem induzida no enrolamento primário por esse fluxo é dada pela equação 2.1.

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

onde

e_1 = força eletromotriz induzida no enrolamento primário

λ_1 = fluxo concatenado do enrolamento primário

φ = fluxo no núcleo magnético enlaçando ambos os enrolamentos

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

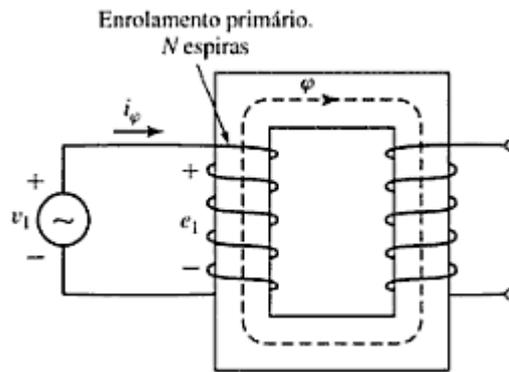


Figura 2.2 - Transformador ideal com o secundário em aberto [2]

Através da figura 2.2 pode-se observar que a tensão aplicada (v_1) pode ser considerada igual à fem induzida no enrolamento primário (e_1) em razão das hipóteses anteriormente referidas. Praticamente, entretanto, a igualdade também se justifica pela corrente de excitação relativamente reduzida e queda de tensão ainda menor sobre a impedância de dispersão do enrolamento primário. Assim, para tensão aplicada senoidal, a onda de fluxo de magnetização também experimentará variação senoidal ao longo do tempo. Portanto, se o fluxo instantâneo for dado pela equação 2.2:

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

a tensão induzida será dada pela equação 2.3

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

onde ϕ_{max} é o valor máximo do fluxo e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular em radianos por segundo.

A fem induzida no primário fica então defasada por 90° em relação ao fluxo, sendo seu valor eficaz dado pela equação 2.4.

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{max} \quad (2.4)$$

Portanto, como a corrente de excitação é normalmente pequena nestas condições e a queda

de tensão na impedância de dispersão do primário pode ser desprezada, a força contra-eletromotriz é muito aproximadamente igual à tensão aplicada. Nessas condições, quando uma tensão senoidal é aplicada a um enrolamento, um fluxo senoidal deve se estabelecer no núcleo com um valor máximo ϕ_{max} , satisfazendo a condição de que E_1 seja igual ao valor eficaz V_1 da tensão aplicada [2]. Assim:

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi f N_1}} \quad (2.5)$$

Analogamente ao que acontece no enrolamento primário, no enrolamento secundário uma fem é induzida pelo fluxo ϕ que enlaça ambos os enrolamentos. Esta fem é dada pela equação 2.6.

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_2 \phi_{max} \quad (2.6)$$

onde

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

Com o transformador idealizado por se considerar desprezíveis a queda de tensão no enrolamento primário na condição sem carga, pode-se assumir que a fem E_2 é igual à tensão que aparece nos terminais do enrolamento secundário V_2 , com o enrolamento secundário em aberto. Dividindo-se E_1 por E_2 , encontra-se a relação direta entre o número de espiras dos enrolamentos, que pode ser representada em termos das tensões V_1 e V_2 [4]. Essa relação é dada pela equação 2.7:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.7)$$

2.4.2. Funcionamento sob carga

No funcionamento sob carga, aplica-se uma tensão de alimentação ao enrolamento primário e

uma carga é ligada ao enrolamento secundário. Como consequência, surge uma corrente i_2 no secundário e uma FMM dada pela equação 2.8.

$$\mathfrak{F}_2 = N_2 i_2 \quad (2.8)$$

onde

\mathfrak{F}_2 = força magnetomotriz presente no secundário

A figura 2.3 mostra esquematicamente o funcionamento de um transformador ideal com uma carga conectada ao secundário.

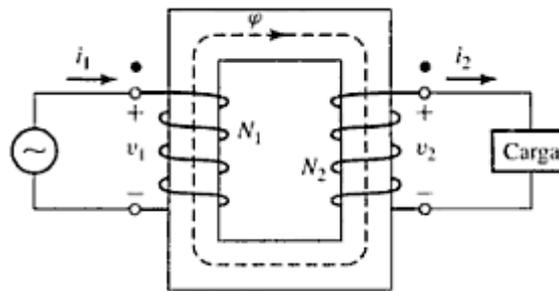


Figura 2.3 - Transformador ideal com uma carga conectada ao secundário [2]

A FMM presente no secundário logo após a conexão da carga, tende a alterar o fluxo produzido pela FMM da corrente de excitação i_ϕ que, por sua vez, altera as fems induzidas em ambos os enrolamentos, produzindo no enrolamento primário um desequilíbrio entre a tensão aplicada, v_1 , e a fem E_1 . Para restabelecer o equilíbrio entre v_1 e E_1 , o enrolamento primário absorve uma corrente mais elevada, denominada i , da fonte de alimentação. Esta corrente é constituída por uma parcela da corrente i_ϕ mais uma parcela i_1 . A corrente i_1 , produz uma FMM no enrolamento primário que se contrapõe a FMM do enrolamento secundário mantendo, assim, a corrente de excitação i_ϕ e o fluxo no núcleo do transformador em seus valores iniciais. Desta

maneira, a FMM resultante no núcleo corresponde à equação 2.9 [4]:

$$\mathfrak{F}_{result.} = N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathfrak{R} \varphi \quad (2.9)$$

onde

$\mathfrak{F}_{result.}$ = força magnetomotriz resultante

\mathfrak{R} = relutância do núcleo do transformador

A relutância do núcleo do transformador é dada pela equação 2.10:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.10)$$

onde

l = comprimento do núcleo do transformador

μ = permeabilidade magnética do material que compõe o núcleo

A = área da seção reta do núcleo do transformador

Supondo-se que a permeabilidade do núcleo seja muito elevada e que o fluxo do núcleo seja estabelecido pela tensão aplicada ao primário, então o fluxo do núcleo não se altera com a presença de uma carga no secundário [2]. Assim, FMM resultante torna-se desprezível e a equação 2.9 pode ser reduzida à equação 2.11:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.11)$$

Mudando de lado a FMM referente ao enrolamento secundário tem-se a equação 2.12

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (2.12)$$

Assim, qualquer mudança na corrente do enrolamento secundário corresponde a uma

mudança proporcional na corrente do enrolamento primário, no sentido de equilibrar a FMM em ambos os lados do transformador. Desta maneira, a relação entre o número de espiras do primário e secundário é inversamente proporcional a relação entre a corrente primária e secundária, conforme mostrado na equação 2.13:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (2.13)$$

Como as perdas foram desprezadas e a corrente de excitação considerada desprezível, conclui-se que a potência instantânea de entrada do primário é igual a potência instantânea de saída do secundário, o que equivale a equação 2.14:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (2.14)$$

2.5. Circuito equivalente

A demonstração do princípio de funcionamento do transformador feita anteriormente foi baseada no conceito do transformador ideal. Entretanto, o conceito de transformador ideal não pode ser utilizado em uma condição geral de carga já que todo equipamento eletromagnético apresenta perdas e dispersões de fluxo inerentes ao tipo de material utilizado na sua construção e ao projeto dos enrolamentos. Assim, as diferenças existentes entre um transformador ideal e um transformador real precisam ser incluídas nos estudos e avaliações de desempenho deste equipamento.

Um modelo mais completo de um transformador deve levar em consideração os efeitos das resistências dos enrolamentos, dos fluxos dispersos e das correntes finitas de excitação devidas à permeabilidade finita e não-linear do núcleo. Em alguns casos, mesmo as capacitâncias dos enrolamentos apresentam efeitos importantes, notadamente em problemas que envolvem o comportamento do transformador em frequências acima da faixa de áudio, ou durante condições transitórias com variações muito rápidas, como as encontradas em transformadores de sistemas de

potência, resultantes de surtos de tensão causados por descargas atmosféricas ou transitórios de manobra [2].

A figura 2.4 mostra o circuito equivalente de um transformador com uma carga conectada ao secundário, funcionando em regime permanente. Os componentes elétricos presentes neste circuito são descritos detalhadamente nos itens que se seguem.

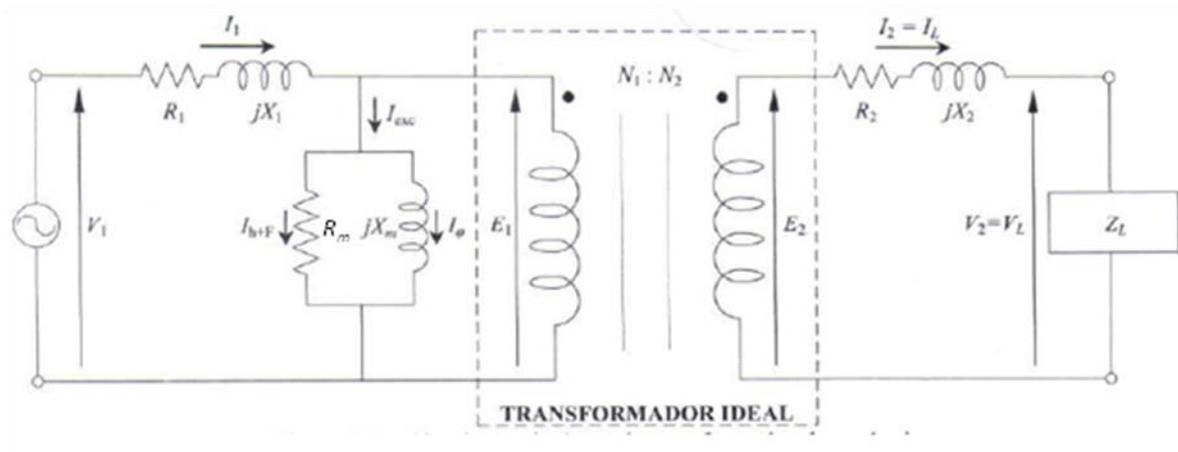


Figura 2.4 - Circuito equivalente de um transformador em regime permanente [4]

2.5.1. Resistência dos enrolamentos

As resistências dos enrolamentos primário e secundário dos transformadores representadas por R_1 e R_2 respectivamente, são responsáveis pelas perdas de energia por efeito Joule e por parte da queda de tensão que ocorre devido a circulação das correntes em ambos os enrolamentos.

A fim de diminuir as perdas por efeito Joule, também chamadas de perdas no cobre, as resistências dos enrolamentos primário e secundário são minimizadas através de uma escolha adequada da seção dos condutores que constituem os enrolamentos. Por adequada, entenda-se a necessidade de maior bitola para suportar a corrente nominal de operação, mas satisfazendo a limitação de custo associada. Assim, o enrolamento de AT que possui um número maior de espiras com menor seção, apresenta sempre uma resistência maior em ohms que a resistência do enrolamento de BT. [3]

2.5.2. Reatâncias de dispersão

Ao se analisar um transformador alimentado através do enrolamento primário e com o enrolamento secundário a vazio, nota-se que o fluxo total que concatena o enrolamento primário pode ser dividido em duas componentes: o fluxo mútuo que fica efetivamente canalizado no núcleo e determina a transferência de energia do enrolamento primário para o secundário; e o fluxo disperso que enlaça apenas o enrolamento primário. Entretanto, como o fluxo disperso se desenvolve no ar, este não está sujeito aos fenômenos de saturação que ocorrem no núcleo e, portanto, varia linearmente com a corrente I_1 do primário que o produz. Sendo assim, este pode ser representado por uma *indutância de dispersão do primário* L_1 . E a correspondente *reatância de dispersão de primário*, X_1 , é dada por: [2]

$$X_1 = 2\pi f L_1 \quad (2.15)$$

Quando um transformador alimenta uma carga surge uma corrente I_2 no secundário deste. Esta corrente gera uma FMM no núcleo que é contrabalançada pela FMM igual e oposta gerada pela corrente primária de reação. Este efeito faz com que o fluxo mútuo no núcleo não sofra alteração importante. No entanto, a corrente secundária produz um fluxo disperso que percorre um caminho no ar enlaçando apenas o enrolamento secundário. E, assim como o fluxo disperso que ocorre no primário, o fluxo disperso do secundário varia linearmente com a corrente I_2 do secundário. Seu efeito pode ser representado por uma *indutância de dispersão do secundário* L_2 relacionada com a *reatância de dispersão de secundário* X_2 por:

$$X_2 = 2\pi f L_2 \quad (2.16)$$

A figura 2.5 representa esquematicamente a distribuição dos fluxos presentes em um

transformador quando este alimenta uma carga.

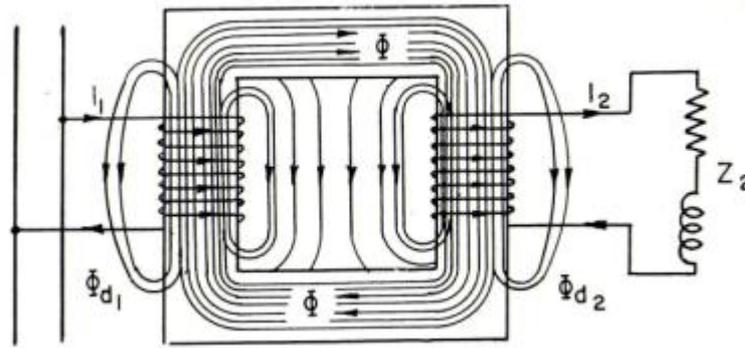


Figura 2.5 - Representação esquemática do fluxo mútuo e fluxo disperso presentes nos transformadores[3]

2.5.3. Impedância de magnetização

A impedância de magnetização do transformador é representada pelo ramo em derivação R_m e X_m em paralelo na figura 2.4. A resistência de magnetização R_m representa as perdas magnéticas que ocorrem no núcleo dos transformadores devidas aos fluxos variáveis no tempo, sendo elas:

- Perdas por *correntes parasitas* ou correntes de Foucault que ocorrem devido à variação no tempo do campo magnético no material ferromagnético originando campos elétricos que induzem *correntes parasitas* no interior do núcleo, causando perdas por efeito Joule. Para minimizar as perdas por correntes de Foucault, os núcleos dos transformadores são compostos de lâminas isoladas entre si através de uma camada de verniz que aumenta a resistência ôhmica dos caminhos de corrente.
- Perdas por histerese magnética que ocorrem devido ao campo magnético variável no tempo aplicado ao núcleo do transformador resultando em consumo de energia, pois o material ferromagnético acompanha a variação cíclica descrita pelo laço de histerese sofrendo, assim, sucessivas imantações em ambos os sentidos e, portanto, gerando calor.

A reatância de magnetização X_m representa a reatância do indutor responsável pelo

estabelecimento do fluxo magnético no núcleo do transformador. Essa reatância varia com a saturação do núcleo, porém, como geralmente é especificada para condições nominais de tensão e frequência, pode-se supor que seu valor permanecerá constante para operação normal.

2.6. Corrente a vazio ou de excitação

O fluxo magnético que aparece no núcleo de um transformador quando se aplica tensão a um de seus enrolamentos é produzido através de uma corrente de excitação i_{φ} que aparece no enrolamento energizado. Em transformadores de potência, as formas de onda da tensão aplicada e do fluxo magnético resultante são praticamente senoidais, porém a forma de onda da corrente de excitação é diferente de uma senóide devido às propriedades magnéticas não-lineares do núcleo do transformador. A figura 2.6 mostra estas formas de onda juntamente com o laço de histerese correspondente do material que compõe o núcleo.

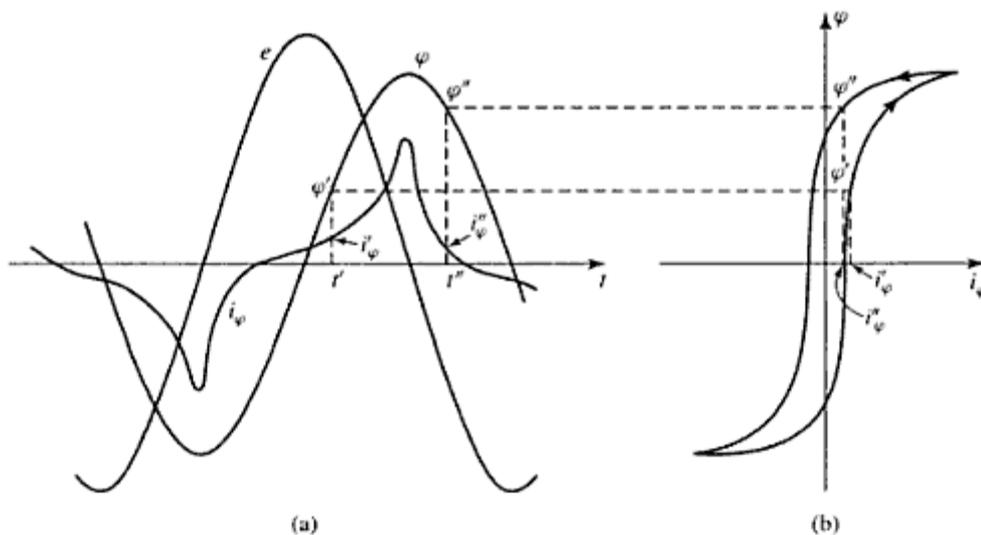


Figura 2.6 - (a) Tensão, fluxo e corrente de excitação; (b) Laço de histerese correspondente [2]

Essa corrente de excitação, i_{φ} , é composta por uma componente fundamental e uma série de harmônicas ímpares. A componente fundamental pode ser decomposta em duas componentes, uma

em fase com a força eletromotriz (fem) E_1 e a outra atrasada 90° em relação à fem. A componente em fase é responsável pela potência absorvida no núcleo pelas perdas por histerese e correntes parasitas. É referida como sendo a *componente de perdas no núcleo* da corrente de excitação. Quando a componente de perdas no núcleo é subtraída da corrente de excitação, o resultado é a chamada *corrente de magnetização* [2].

2.7. Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito possibilita a determinação das perdas no cobre, queda de tensão interna, resistência dos enrolamentos e reatâncias de dispersão. Este ensaio consiste em curto-circuitar o enrolamento de baixa tensão (BT) e alimentar o enrolamento de alta tensão (AT) com uma fonte de tensão senoidal. Embora seja arbitrária a escolha de qual enrolamento curto-circuitar e qual alimentar, é conveniente que a alimentação seja feita pelo enrolamento de alta tensão no qual circulam correntes menores o que reduz a corrente exigida da fonte de alimentação e a capacidade dos instrumentos de medição de corrente.

Com relação ao valor da tensão necessária para a realização do ensaio de curto-circuito, tem-se que aplicando-se a tensão nominal ao enrolamento de alta tensão, estando o enrolamento de baixa tensão em curto, não circulariam as correntes nominais, mas, sim, as altas correntes de curto-circuito. Assim, a tensão necessária para realização do ensaio de curto-circuito, com correntes nos enrolamentos até seus valores nominais, apresenta valores de até 15% da tensão nominal do enrolamento alimentado.

Considerando, o que é verdade na grande maioria dos casos, que a impedância de magnetização é muito maior que a impedância de dispersão do secundário ($R_2 + jX_2$), a impedância equivalente do ensaio de curto-circuito é aproximada pela equação 2.17

$$Z_{eq} \approx R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.17)$$

Sendo assim, em um transformador sob ensaio de curto-circuito, praticamente toda potência fornecida está sendo perdida por efeito Joule em ambos os enrolamentos, ou seja, as perdas no núcleo podem ser desprezadas.

A figura 2.7 mostra o circuito que deve ser montado para determinação dos parâmetros pelo ensaio de curto-circuito. A determinação desses parâmetros é feita pela tensão V registrada pelo voltímetro, pela corrente I medida pelo amperímetro e pela potência P indicada pelo wattímetro, como mostrados na figura 2.7. As equações 2.18, 2.19 e 2.20 podem ser utilizadas.

$$|Z_{eq}| = \frac{V}{I_1} \quad (2.18)$$

$$R_{eq} = \frac{P}{I^2} \quad (2.19)$$

$$X_{eq} = \sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_{eq}^2} \quad (2.20)$$

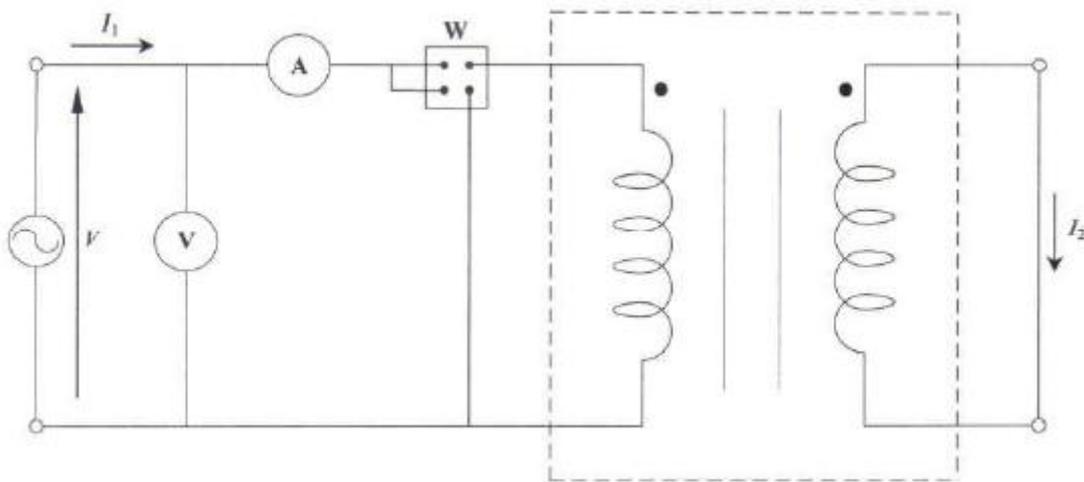


Figura 2.7 - Disposição dos instrumentos de medição na realização do ensaio de curto-circuito [4]

As equações 2.18, 2.19 e 2.20 determinam os valores da resistência do enrolamento equivalente (R_{eq}) e da reatância de dispersão equivalente (X_{eq}), porém em alguns estudos são

necessários os valores individuais desses parâmetros para cada enrolamento, já expressos em por unidade. Esses valores, para a análise em questão, podem ser obtidos supondo que $R_1 = R_2 = 0,5R_{eq}$ e $X_1 = X_2 = 0,5X_{eq}$, com todos os valores referidos ao mesmo lado [2].

2.8. Ensaio em vazio

O ensaio em vazio possibilita a determinação das perdas no núcleo, corrente a vazio, relação de transformação e os parâmetros da impedância de magnetização (R_m e X_m). Este ensaio, consiste em aplicar-se a tensão nominal ao lado de baixa tensão e deixar o lado de alta tensão em aberto. A alimentação pelo lado de baixa tensão é tomada por conveniência para garantir a segurança de quem opera os instrumentos de medição e, também, para facilitar na escolha de instrumentos compatíveis com os níveis de tensão, corrente e potência medidos nesse ensaio.

A alimentação do transformador no ensaio em vazio é feita através da utilização da tensão nominal de operação. Esse fato garante que a reatância de magnetização opere com níveis de fluxo bem parecidos com os que ocorrem em condições normais de operação. Vale ressaltar aqui que, se o transformador for utilizado em níveis de tensão diferentes da nominal, o ensaio deve ser feito para tais níveis de tensão e não para o nível de tensão nominal.

A figura 2.8 mostra a disposição do voltímetro (V), do amperímetro (A) e do wattímetro (W) no circuito utilizado para determinação dos parâmetros no ensaio em vazio. Após a aquisição das leituras indicadas nos instrumentos de medição, as componentes R_m e X_m da impedância de magnetização são determinadas pela aplicação das equações 2.21, 2.22 e 2.23.

$$R_m = \frac{V^2}{P} \quad (2.21)$$

$$|Z_m| = \frac{V}{I_1} \quad (2.22)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_m|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_m}\right)^2}} \quad (2.23)$$

onde

Z_m = impedância de magnetização

R_m = resistência de perdas magnéticas

X_m = reatância de magnetização

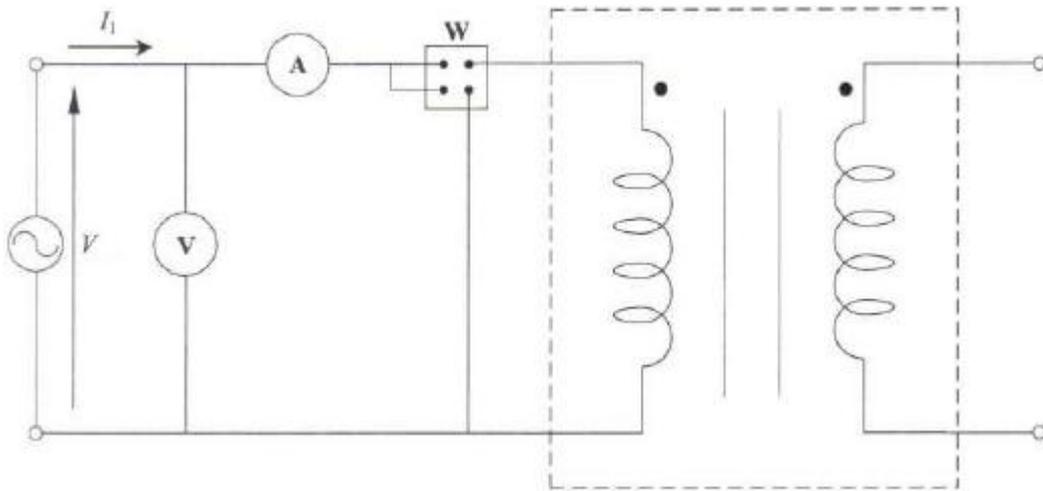


Figura 2.8 - Disposição dos instrumentos de medição na realização do ensaio em vazio [4]

Como a corrente que circula no primário do transformador durante este ensaio é bem pequena, pode-se desprezar a queda de tensão neste enrolamento e, portanto, a relação de transformação pode ser obtida com boa aproximação pela leitura direta das tensões nos terminais dos enrolamentos primário e secundário.

3. Corrente transitória de magnetização (corrente de *inrush*).

3.1. Considerações iniciais

A corrente transitória de magnetização, também conhecida como corrente de *inrush*, é causada pelo sobrefluxo magnético transitório que ocorre no núcleo dos transformadores. Essa corrente apresenta como característica um alto valor de pico inicial conforme mostrado na figura 3.1, podendo este ultrapassar em vinte vezes o valor de pico da corrente nominal. Embora essa corrente apareça tipicamente na energização de transformadores, outros transitórios que ocorram no circuito do transformador podem causar o surgimento desta. Este capítulo apresenta uma breve descrição sobre as principais características dessa corrente indesejável para o transformador e seus circuitos adjacentes.

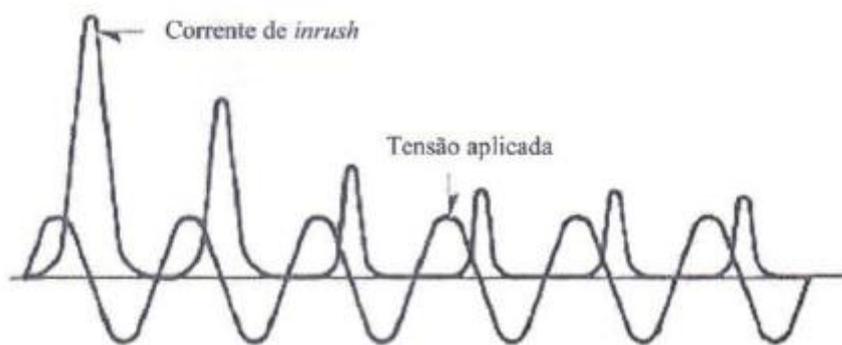


Figura 3.1 - Forma de onda característica da corrente de *inrush* e a tensão aplicada no transformador [4]

A forma de onda da corrente de *inrush* mostrada na figura 3.1 apresenta-se bem distorcida em relação à forma de onda da tensão aplicada. Esta característica da corrente de *inrush* é confirmada pela presença de um alto conteúdo de harmônicos, distribuídos, por exemplo, conforme mostrado na tabela 3.1. Esta tabela também destaca um fato relevante para a aplicação de esquemas de proteção adequados para transformadores que é o predomínio do segundo harmônico nesta corrente.

Tabela 3.1 - Porcentagem dos harmônicos em relação à fundamental presentes na corrente de inrush [6]

Corrente de <i>inrush</i>	
Harmônicos	% em relação a fundamental
2º harmônico	63,0%
3º harmônico	26,8%
4º harmônico	5,1%
5º harmônico	4,1%
6º harmônico	3,7%
7º harmônico	2,4%

3.2. Surgimento da corrente de *inrush*

Ao se aplicar uma tensão alternada ao enrolamento primário de um transformador e estando o secundário em vazio, tem-se:

$$v_1 = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

onde

$R_1 i_0$ = representa a queda de tensão na resistência do enrolamento primário

$L_1 \frac{di_0}{dt}$ = representa a queda de tensão devido ao fluxo de dispersão do enrolamento primário

$N_1 \frac{d\phi}{dt}$ = representa a fem induzida no primário

A solução da equação diferencial 3.1 representa a solução do problema fundamental de avaliação da corrente ao longo do tempo. Isto pode ser obtido a partir da relação existente entre o fluxo ϕ e a corrente a vazio i_0 , dada pela relação não-linear representada pelo ciclo de histerese [1].

Em função desta não-linearidade torna-se necessário alguma aproximação para a obtenção de

i_0 a partir da equação 3.1. Desta maneira, a solução desejada será constituída de duas partes fundamentais: a solução complementar que representa o termo transitório e a solução particular que representa o regime permanente de operação. O termo transitório presente na solução complementar é responsável pela corrente transitória de magnetização (corrente de *inrush*), constatada pela primeira vez por Fleming em 1892.

Então, analisando a equação 3.1 e considerando como primeira aproximação que seus dois primeiros termos podem ser desprezados e que, no instante inicial do processo de energização, a tensão da fonte passa por um valor v_1 , em que α é um ângulo qualquer cujo propósito é definir o valor da tensão da fonte no instante $t = 0$, tem-se que:

$$v_1 = V_{1m} \sin(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Integrando a equação 3.2, tem-se:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cos \alpha - \phi_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.3)$$

onde

ϕ_0 = fluxo residual no instante $t = 0$;

$$\phi_m = V_{1m} / N_1 \omega$$

A equação 3.3 apresenta uma componente transitória unidirecional $(\phi_0 + \phi_m \cos \alpha)$ e que sofre amortecimento detectado matematicamente quando os termos desprezados na equação 3.1 são incorporados e uma componente CA de regime permanente $\phi_m \cos(\omega t + \alpha)$. A figura 3.2 mostra a variação do fluxo mútuo logo após a energização do transformador.

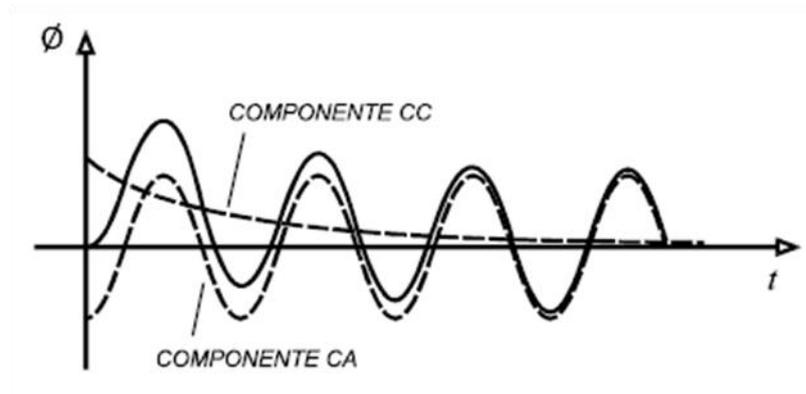


Figura 3.2 - Variação do fluxo em função do tempo logo após a energização de um transformador [5]

3.3. Fatores que influenciam as correntes de *inrush*

Existem vários fatores que influenciam na intensidade e na duração das correntes de *inrush*.

Dentre eles podem ser citados [5]:

- valor instantâneo da tensão aplicada ao transformador no instante da energização;
- magnitude e sinal do fluxo residual no núcleo magnético;
- resistência e indutância equivalentes em série no circuito alimentador;
- resistência e indutância de dispersão do enrolamento primário do transformador;
- características magnéticas e geométricas do núcleo;
- valor da resistência de pré-inserção do disjuntor;
- impedância da carga ligada ao secundário;
- velocidade de fechamento dos contatos do disjuntor;
- existência de enrolamentos terciários ligados em delta nos transformadores trifásicos.

3.4. Principais problemas devido ao aparecimento da corrente de *inrush*

Os principais problemas que ocorrem devido ao aparecimento da corrente de *inrush* são [5]:

- redução da vida útil dos equipamentos do sistema devido às solicitações de natureza

eletromecânica e térmica;

- afundamentos temporários de tensão, com perda da qualidade de energia transmitida;
- atuação indevida dos circuitos de proteção;
- sobretensões causadas por fenômenos de ressonância harmônica em sistemas que contêm filtros elétricos (sistemas industriais e de transmissão em corrente contínua).

3.5. Energização de um transformador monofásico

O circuito da figura 3.3 pode ser utilizado para o estudo do comportamento da corrente de *inrush* de um transformador monofásico alimentado por uma fonte de tensão senoidal, com o secundário em aberto. Nesta figura o indutor L_m variável representa as características não-lineares do núcleo e a chave tem a finalidade de representar o instante de energização deste transformador.

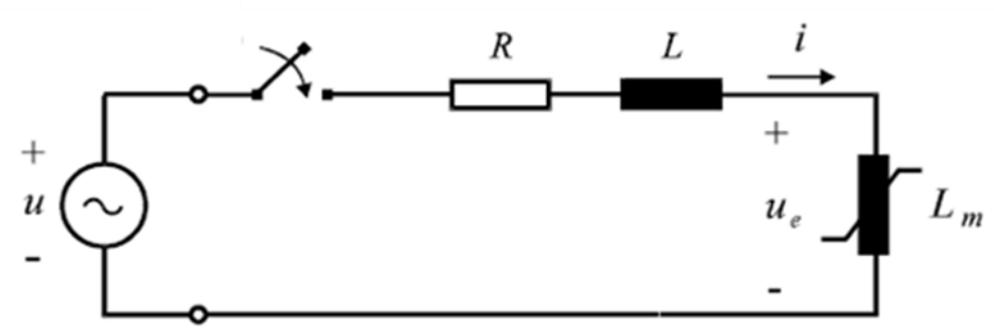


Figura 3.3 - Circuito utilizado no cálculo da corrente de *inrush* [5]

Durante os primeiros instantes de energização de um transformador, os elevados valores de fluxo atingem a região de saturação do laço de histerese do núcleo. Desta maneira, para pequenas variações de ϕ podem ocorrer grandes variações de i de modo a se estabelecer um surto de corrente. A figura 3.4 sintetiza este comportamento, onde ϕ_0 representa o valor de fluxo inicial determinado pela imantação prévia do núcleo. A corrente atinge valores elevados limitados, quando a saturação se torna elevada, pela soma da impedância de dispersão do enrolamento primário com a impedância externa em série.

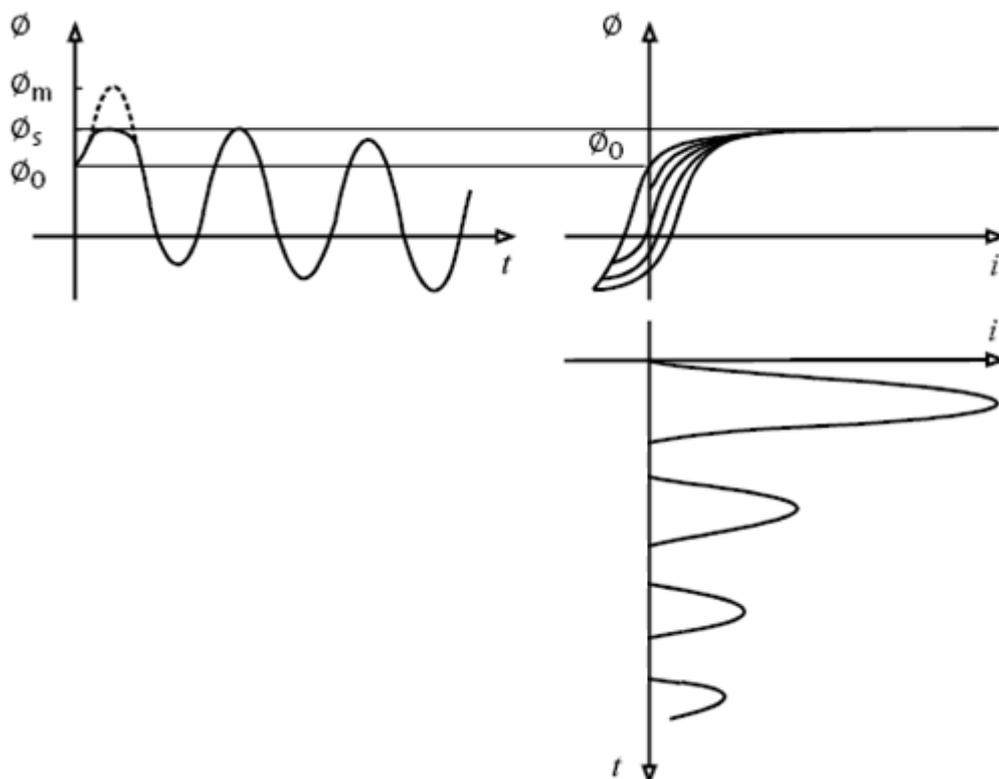


Figura 3.4 - Fluxo, curva de histerese e corrente de *inrush* de um transformador [5]

Para avaliar a influência do fluxo residual (ϕ_0), na figura 3.4 foi considerado um núcleo com *histerese magnética*. Assim, se o fluxo residual no núcleo apresentar o mesmo sinal do fluxo imposto pela fonte, a região de saturação pode ser atingida mais rapidamente, com maior intensidade, resultando em maior assimetria da onda de fluxo e em valores de pico de corrente *inrush* mais elevados. Por outro lado, se os citados fluxos apresentarem sinais contrários, a corrente *inrush* será atenuada [5]. Com isto, conclui-se que o fenômeno de histerese pode afetar mais severamente a amplitude da corrente de inrush quando há um fluxo residual inicial presente na magnetização do núcleo do transformador.

Sendo assim, em estudos de fenômenos transitórios, em que são alcançados graus de saturação elevados e o fluxo residual no núcleo magnético é pequeno ou não constitui objeto de interesse, pode-se desprezar o efeito de histerese. Esta simplificação tem por base o fato de que as ligas de ferro-silício de grãos orientados que constituem o material do núcleo dos transformadores

mais recentes apresentarem laços de histerese estreitos, verificando-se um afinilamento à medida que a saturação torna-se mais intensa, de modo a haver uma tendência em se confundirem com a curva de saturação [7] e [5].

4. Proteção de transformadores

4.1. Considerações iniciais

A aplicação de esquemas de proteção em equipamentos elétricos de potência é extremamente importante para o aumento dos índices de disponibilidade de energia aos consumidores e para a redução das taxas de incidência de falha no sistema elétrico. Desta maneira os esquemas de proteção atuam isolando a parte do sistema em que ocorre a falta evitando, assim, maiores danos aos equipamentos e riscos a segurança dos operadores destes sistemas.

Para que um esquema de proteção seja considerado adequado para um sistema elétrico de potência, este deve apresentar as seguintes características:

Confiabilidade – todos os fatores que impactam na atuação da proteção devem ser levados em conta, tornando-a confiável. Fatores como falha na elaboração do projeto, instalação e ajuste incorretos e deterioração podem levar a operações indevidas, prejudicando a confiabilidade do esquema de proteção.

Seletividade – a proteção é organizada em zonas de proteção que devem cobrir todo sistema de potência, sem deixar nenhuma parte desprotegida. Na ocorrência de uma falta, a proteção deve selecionar e mandar atuar os disjuntores mais próximos.

Estabilidade – o sistema de proteção deve apresentar a capacidade de permanecer inerte a todas as condições de carga e faltas externas à zona relevante de atuação.

Velocidade – a proteção deve isolar as faltas no sistema de potência no menor tempo possível, evitando a perda por completo do equipamento protegido e o desligamento de todo sistema no seguimento à perdas de sincronismo e assegurando a continuidade no fornecimento.

Sensibilidade – um esquema de proteção deve apresentar uma corrente primária de operação baixa, para que este seja dito sensível.

As proteções utilizadas em transformadores de potência podem ser dos seguintes tipos [6]:

- Proteção diferencial (87)
- Proteção de terra restringida
- Proteção de gás (63)
- Válvula de alívio de pressão (20)
- Proteção térmica (26, 49)
- Proteção de baixo nível de óleo (71)
- Proteção de sobrecorrente (50, 51)
- Proteção de sobreexcitação (24)

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais esquemas de proteção diferencial utilizados em transformadores de potência e, também, as características que estes esquemas apresentam para evitar a atuação indevida destes durante o instante de energização do transformador protegido.

4.2. Proteção diferencial

Na proteção diferencial, as faltas são detectadas pela comparação do sinal de corrente que entra com o sinal de corrente que sai da zona protegida. Assim, neste esquema de proteção as formas de onda da corrente do primário e secundário são constantemente monitoradas. Para a aquisição destas grandezas elétricas utiliza-se de Transformadores de Correntes (TCs) ligados em série com os ramos primário e secundário do transformador protegido. Estas grandezas são então transferidas para o relé cuja função é analisá-las e, no caso de falta, desconectar o transformador do sistema caso a corrente diferencial que o atravessa seja maior que um limiar estipulado no ajuste.

Caso ocorra uma falta interna ao transformador, haverá um desbalanceamento dos sinais de corrente medidos pelos TCs e a diferença entre esses sinais sensibiliza o relé que, por sua vez, envia um comando de operação ao disjuntor associado com a finalidade de isolar o transformador do

sistema como um todo.

Tem-se que, neste esquema, a zona de proteção é claramente definida pelo posicionamento dos transformadores de corrente e devido a atuação rápida e seletiva do mesmo, ele é utilizado como proteção principal dos transformadores de potência.

4.2.1. Proteção diferencial no transformador monofásico.

A figura 4.1 mostra um esquema de proteção diferencial percentual utilizado em um transformador monofásico.

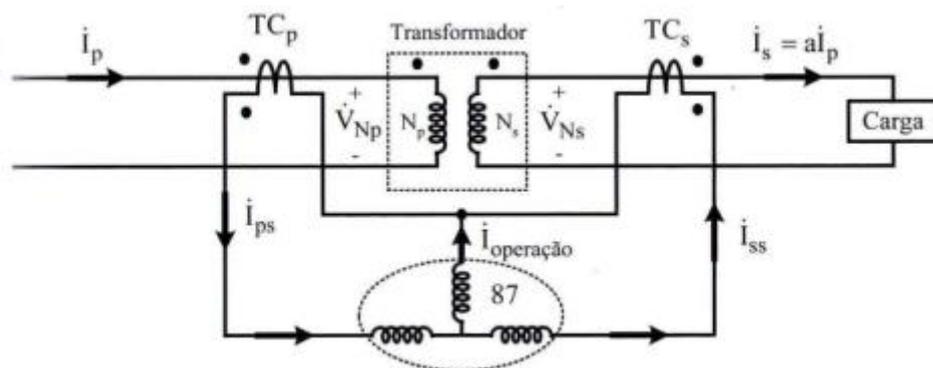


Figura 4.1 - Proteção diferencial percentual no transformador monofásico [6]

Para que o esquema de proteção mostrado na figura 4.1 seja bem projetado, as correntes secundárias dos TCs que passam pelas bobinas de restrições do relé 87 devem ser iguais em módulo e ângulo, ou seja, $i_{ps} = i_{ss}$. Desta maneira, desconsiderando-se os erros de cada TC, na operação normal do transformador e em caso de defeitos fora da zona protegida pelos dois TCs, a corrente que passa na bobina de operação do relé 87 é nula [6].

4.2.2. Proteção diferencial no transformador trifásico.

Do mesmo modo que no transformador monofásico, a proteção diferencial 87 no transformador trifásico é ligada em cada fase do transformador, como se fossem três esquemas de proteção em três transformadores monofásicos. Nos secundários dos TCs utilizados no esquema de

proteção para comparar os sinais de corrente, podem ser adotados ligação em “ Δ ” ou “Y”, porém a ligação em “Y” pode ser em geral mais utilizada.

No esquema de proteção diferencial para transformadores trifásicos, o defasamento angular entre as correntes de linha do primário e secundário que aparece depende do tipo de ligação utilizada e deve ser levado em conta no projeto do esquema de proteção. Esse defasamento angular pode gerar dois tipos de problemas, quais são:

- Diferenças nas correntes no relé diferencial 87, o que pode causar a operação deste para as condições de carga do transformador.
- Defasamento nas correntes das bobinas de restrição do relé 87, prejudicando sua característica de desempenho

Basicamente, na proteção de transformadores monofásicos ou trifásicos, a regra fundamental para o funcionamento do relé 87 é que na condição normal de operação ou de curto-circuito fora da zona de proteção, a equação 4.1 seja atendida:

$$i_{BR1} = i_{BR2} \quad (4.1)$$

onde

i_{BR1} = corrente na bobina de restrição 1

i_{BR2} = corrente na bobina de restrição 2

4.3. Desempenho dos esquemas de proteção diferencial de transformadores

A operação normal dos esquemas de proteção diferencial pode ter seu desempenho afetado pelos fatores descritos abaixo:

- Localização dos transformadores de corrente que aquiritam as grandezas para a utilização dos relés. A zona de proteção é definida pela localização desses TCs;

- Tipo de ligação do transformador protegido, o que estabelece o tipo de conexão dos TCs, objetivando o balanço das correntes passantes em função da defasagem angular e da relação de transformação do transformador protegido;
- Fenômenos de saturação e erro de relação dos TCs que podem provocar correntes diferenciais muito altas para as condições de carga ou de defeitos externos;
- A existência de corrente transitória de magnetização na energização do transformador;
- A existência de corrente diferencial devido aos desequilíbrios provocados pelas relações de transformação dos TCs e do transformador protegido.

4.4. Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas

Algumas manobras operacionais realizadas nos transformadores podem provocar o surgimento de correntes diferenciais que não representam defeito, mas que podem sensibilizar o esquema de proteção diferencial. Entretanto, em algumas dessas situações, não é desejável que o esquema de proteção atue desativando o sistema, pois as mesmas não representam defeitos internos ao transformador. Algumas dessas situações são descritas logo abaixo:

- Corrente transitória de magnetização (corrente de *inrush*) que foi descrita detalhadamente no capítulo 3 deste trabalho;
- A saturação dos TCs devido aos valores elevados de corrente e ao fluxo residual existente no núcleo destes produz distorções na forma de onda da corrente secundária. Desta maneira, quando ocorre a saturação do TC, a sua corrente secundária não representa exatamente a corrente que passa no seu enrolamento primário, prejudicando o bom funcionamento do esquema de proteção;
- A sobreexcitação do transformador que ocorre quando um transformador está operando com um valor de tensão muito maior que o valor da tensão nominal causa distorções nas correntes. Como consequência ocorre um aumento da corrente de magnetização e um

aumento, também, na corrente diferencial que atravessa o relé.

Este trabalho tem por objetivo a análise apenas do comportamento da proteção diferencial na ocorrência da corrente de *inrush*.

4.5. Características dos esquemas de proteção diferencial durante a energização de transformadores.

Como foi citado anteriormente, um dos problemas causados pelo aparecimento das correntes de *inrush* é a atuação indevida dos circuitos de proteção, em especial aqueles que operam com relés de operação rápida. Para evitar este comportamento indesejado para o sistema elétrico, os relés diferenciais utilizam-se do critério de avaliação do conteúdo de harmônicos da corrente, para distinguir uma corrente de *inrush* de uma corrente de curto-circuito. Assim, durante a energização de um transformador em condições normais de operação, os harmônicos são filtrados e analisados com a finalidade de evitar a operação do relé de proteção neste instante.

Para evitar que a proteção diferencial atue no instante da energização do transformador, pode-se [6]:

1. Bloquear a operação do relé diferencial por 0,1 s durante a energização do transformador;
2. Usar atenuadores de transitórios;
3. Utilizar relés diferenciais com retenção de harmônicos;
4. Utilizar relés digitais com lógicas de detenção de harmônicos.

4.5.1. Bloqueio da proteção diferencial

A corrente de *inrush* apresenta, durante os primeiros 6 ciclos (0,1 s), alto conteúdo de harmônicos o que a torna bastante distorcida nesse período. Esse fato pode resultar na sensibilização da proteção diferencial instantânea utilizada, geralmente em transformadores de grande porte ou localizados próximos à geração, causando a atuação indevida da mesma. Para evitar

este problema, a proteção diferencial instantânea é bloqueada durante o instante de energização do transformador. Entretanto, o recurso de se fazer o bloqueio da atuação da proteção diferencial instantânea é um grande problema caso a energização ocorra em um transformador que apresente um curto-circuito interno. Pois, neste caso, a energização ocorrerá simultaneamente com o curto-circuito e o tempo de bloqueio da proteção diferencial instantânea, apesar de ser pequeno, já é o suficiente para produzir danos ao transformador [6]. Assim, outros esquemas de proteção diferencial foram criados para evitar este tipo de problema. Alguns destes esquemas são descritos abaixo.

4.5.2. Proteção diferencial utilizando atenuadores de transitórios

A figura 4.2 mostra um esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios.

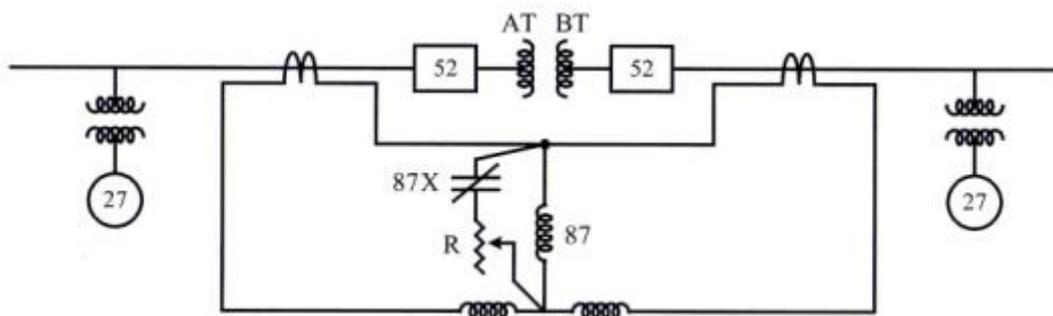


Figura 4.2 - Esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios [6]

Neste esquema, o uso de atenuadores de transitórios tem por objetivo derivar à corrente que passa na bobina de operação do relé 87 durante o instante de energização do transformador. Deste modo a corrente de *inrush* não passa por completo na bobina de operação, evitando, assim, a operação do relé 87 temporariamente.

A derivação da corrente de *inrush* no esquema da figura 4.2, é feita através do relé auxiliar temporizado 87X que apresenta seu contato normalmente fechado quando, este, encontra-se

A sequência de operação da proteção diferencial com retenção de harmônicos é mostrada logo abaixo [6]:

- A corrente de *inrush* só aparecerá no lado de AT do transformador, pois inicialmente foi considerado que apenas o disjuntor do lado de AT encontrava-se fechado durante a energização;
- A corrente de *inrush* secundária do TC conectado ao lado de AT do transformador passará pela bobina de restrição 1 e pela bobina primária do TC de operação do relé diferencial;
- No secundário da bobina de restrição 1, a corrente de *inrush* será retificada e passará totalmente na bobina de restrição;
- A corrente de *inrush* secundária do TC de operação do relé diferencial terá dois caminhos para seguir:
 - A componente fundamental de 60Hz passará pelo filtro correspondente alimentando a bobina de operação;
 - O restante da corrente de *inrush*, sem a parcela da componente fundamental de 60Hz, passará pelo filtro de bloqueio de 60Hz, e será retificada na ponte de diodo e logo após passará na bobina de restrição.

Desta maneira, o efeito de restrição é maior que o efeito de operação o que faz com que o relé não opere no instante de energização do transformador.

4.5.4. Relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico

O relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico é composto de um relé diferencial 87 acoplado a uma unidade de observação do 2º harmônico. Essa unidade de observação bloqueia a operação do esquema de proteção na ocorrência de uma corrente de *inrush*, ou seja, na

energização do transformador.

A figura 4.4 mostra o esquema de proteção descrito no parágrafo acima. Vale ressaltar aqui que, nesta figura, a proteção diferencial (87) é mostrada só para uma fase e a unidade de bloqueio de 2º harmônico é trifásica.

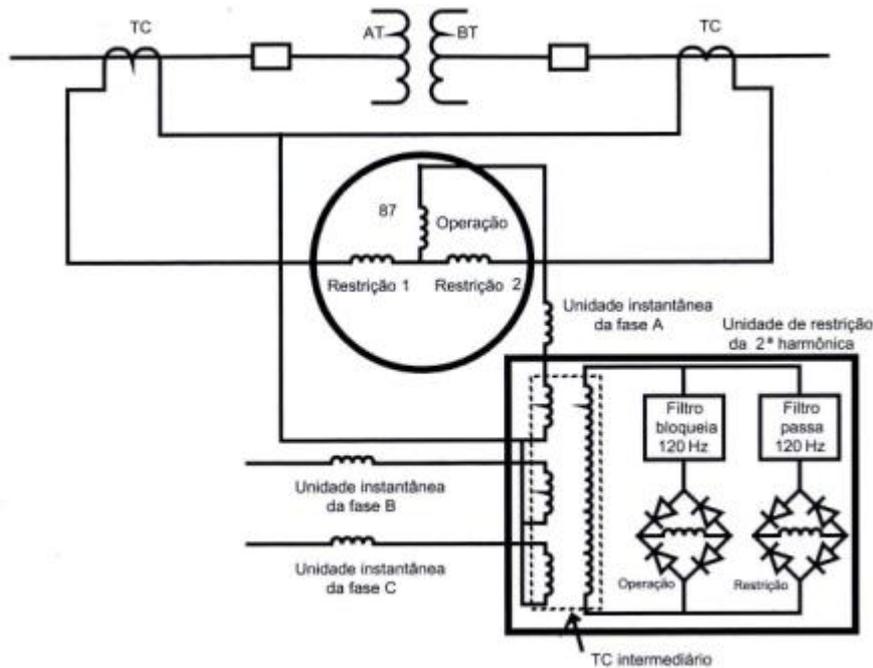


Figura 4.4 - Unidade de bloqueio por 2º harmônico acoplado ao relé diferencial (87) [6]

O funcionamento do esquema da figura 4.4 ocorre da seguinte forma: quando a corrente presente na bobina de restrição apresentar a componente de 2º harmônico menor ou igual a 15% da componente fundamental, ocorre a operação do esquema de proteção. Caso contrário, quando a corrente apresentar a componente de 2º harmônico maior que 15% da componente fundamental, a unidade de observação de 2º harmônico bloqueia a operação do relé 87, assim não ocorrendo o desligamento do transformador durante o instante de energização.

4.5.5. Relé diferencial digital

Os relés diferenciais digitais para proteção de transformadores trabalham com a utilização dos valores discretos das ondas de corrente analisadas. Desta maneira, estes relés possuem algoritmos

internos capazes de distinguir correntes de curto-circuito de correntes de *inrush*. Dentre esses algoritmos de atuação, pode-se destacar:

- A aplicação da transformada de Fourier sobre a corrente diferencial de operação obtendo, assim, o componente fundamental e o 2º harmônico desta corrente. Caso o 2º harmônico seja relativamente grande se comparado com o fundamental, o relé não opera.
- A medição do tempo decorrido entre os picos sucessivos da corrente diferencial de operação e, com isso, o relé decide se deve atuar ou não.

5. Medições e resultados

5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os ensaios realizados em um transformador monofásico para determinação dos gráficos e parâmetros apresentados nos capítulos anteriores deste trabalho. A curva de histerese deste transformador será obtida facilmente através da utilização de um circuito RC integrador. O comportamento não-senoidal da corrente de excitação deste mesmo transformador para diferentes níveis de tensão aplicada será mostrado através do osciloscópio digital. Com o ensaio de energização a vazio seremos capazes de observar o pico máximo atingido pela corrente de *inrush* de acordo com a amplitude da tensão no instante de energização e, também, as componentes dos harmônicos presentes nesta corrente.

Foi proposto que para o desenvolvimento deste trabalho, seria utilizado um osciloscópio para adquirir os dados necessários para determinação dos parâmetros e as formas de onda da corrente de excitação, da curva de histerese e da corrente de *inrush* para uma análise dos fundamentos teóricos aqui apresentados.

O osciloscópio utilizado foi o modelo TPS2012 fabricado pela Tektronix cujo painel frontal está mostrado na figura 5.1. Este osciloscópio de armazenamento digital apresenta 2 canais de entrada com uma largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 1,0 GS/s e, dentre suas principais funções, pode-se destacar:

- Canais independentes isolados sem compartilhamento do terra;
- Aplicativo de análise de potência TPS2PWR1;
- Suporte para pontas de prova de tensão e de corrente compatíveis;
- Comprimento do registro de 2500 pontos para cada canal;
- Onze medições automáticas;
- Média e detecção de pico da forma de onda;

- Transformação de Fourier rápida (FFT);
- Configuração e armazenamento da forma de onda;
- Portas de comunicação RS-232 e Centronics;
- Software OpenChoice PC Communications.

Os dados apresentados neste trabalho foram obtidos através do osciloscópio digital e enviados para um computador através da porta de comunicação RS-232. Estes dados foram analisados e documentados através do aplicativo WaveStar Software for Oscilloscopes (WSTRO).

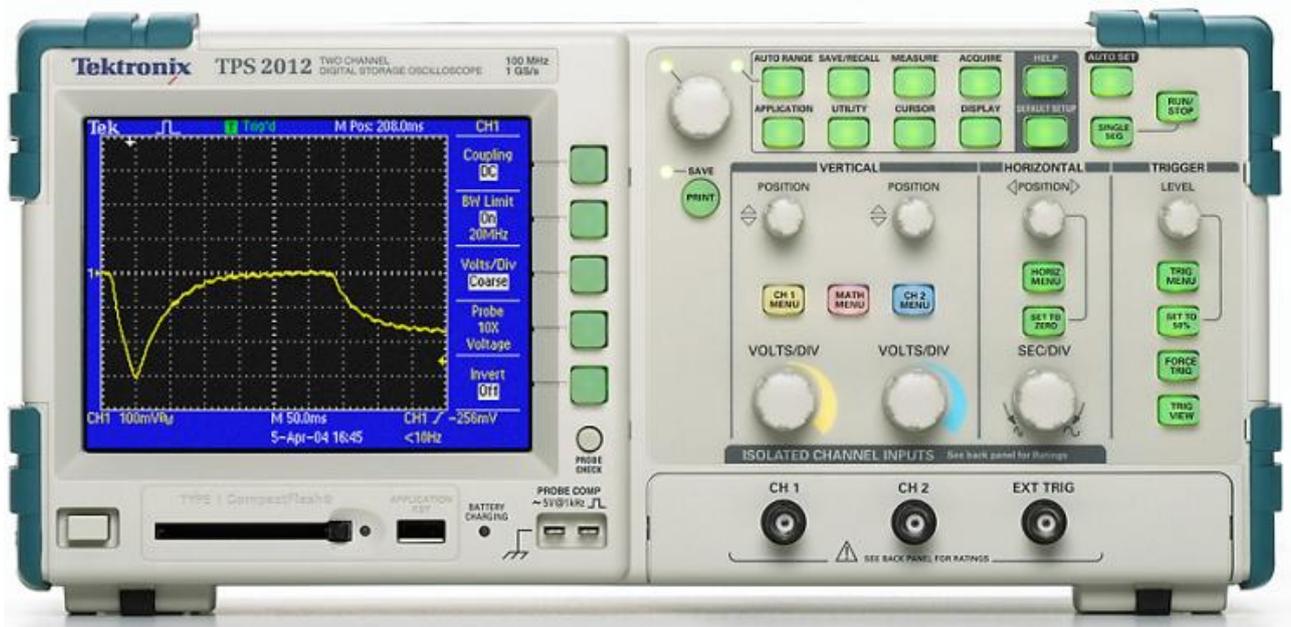


Figura 5.1 - Pannel frontal do osciloscópio digital TPS 2012 da Tektronix

5.2. Transformador utilizado nos estudos

A figura 5.2, mostra o transformador utilizado para obtenção dos dados analisados neste trabalho e, logo a seguir, na tabela 5.1, são mostrados os dados de placa deste. Este transformador pertence ao laboratório de máquinas elétricas da UFRJ e o seu número de patrimônio está mostrado na tabela de dados.



Figura 5.2 - Transformador utilizado nos estudos

Tabela 5.1 - Dados de placa do transformador utilizado nos estudos

Dados do Transformador Monofásico	
Patrimônio	44424
Tensão de entrada	220V
Tensão de saída	220V
Potência	1000VA
Comprimento do núcleo	50 cm
Seção reta do núcleo	32,8 cm ²

5.3. Determinação da curva de histerese do transformador

Os fundamentos teóricos descritos nesta seção têm a finalidade de mostrar os procedimentos adotados para a obtenção da curva de histerese do transformador em estudo. A forma típica desta curva para um transformador qualquer foi mostrada na figura 2.1 deste trabalho e nada mais é que a

relação $B \times H$. Desta maneira, para que se possa verificar esta curva em um osciloscópio convencional se faz necessário a construção de um circuito que forneça esta relação.

O circuito aqui utilizado contém um filtro RC, que pode ser utilizado como um integrador passivo simples, conectado ao secundário. A figura 5.3 mostra o diagrama esquemático deste circuito.

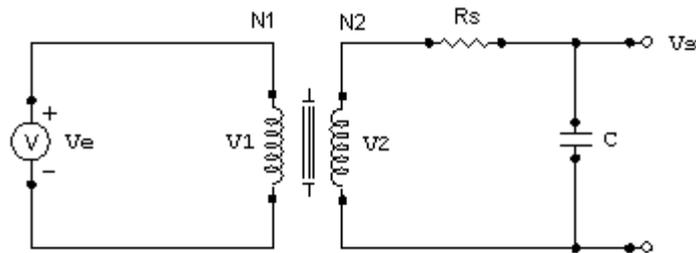


Figura 5.3 - Circuito utilizado para determinação da curva de histerese do transformador em estudo

A relação $B \times H$ da curva de histerese, onde H representa a *intensidade do campo magnético* e B representa a *densidade de fluxo magnético*, é determinada através das equações mostradas a seguir. A intensidade do campo magnético pode ser estimada a partir da Lei de Ampère, equação 5.1.

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = i \quad (5.1)$$

onde

i = corrente total enlaçada pelo percurso C de comprimento l ao longo do núcleo do transformador

Considerando-se desprezível a corrente que circula no enrolamento secundário, ou seja, $N_1 i_1 \gg N_2 i_2$. Representando-se por \bar{H} o valor médio da *intensidade do campo magnético* ao longo do percurso C de comprimento l , resulta na equação 5.2.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \bar{H}l \cong N_1 i_1 \quad (5.2)$$

A equação 5.2 indica que \bar{H} é proporcional a corrente i_1 que circula no primário do transformador.

Analisando-se o que acontece nestas mesmas condições com o enrolamento secundário do circuito da figura 5.3, pode-se afirmar que a tensão induzida neste enrolamento é resultante da variação do fluxo magnético produzida pelo enrolamento primário. O fluxo que atravessa cada espira pode ser expresso pela seção reta A do núcleo multiplicada pelo valor médio da densidade de fluxo magnético \bar{B} . Então, utilizando-se a Lei de Faraday, podemos escrever a equação 5.3 [9].

$$V_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \cong N_2 A \frac{d\bar{B}}{dt} \quad (5.3)$$

Integrando-se a equação 5.3, resulta na equação 5.4:

$$\bar{B} \cong \frac{1}{N_2 A} \int V_2 dt \quad (5.4)$$

Assim, se a frequência angular das tensões de entrada e saída for muito maior que a frequência de corte do filtro composto por R_s e C na figura 5.3, este realiza a integração de V_2 conforme mostrado na equação 5.5.

$$V_s = \frac{1}{R_s C} \int V_2 dt \quad (5.5)$$

Substituindo-se a equação 5.5 na equação 5.4, resulta na equação 5.6:

$$\bar{B} \cong \frac{R_s C}{N_2 A} V_s \quad (5.6)$$

Resumindo, a corrente no primário é proporcional a \bar{H} e a tensão no capacitor é proporcional

a \bar{B} . Sendo assim, um gráfico $V_s(i_1)$ representa com boa aproximação o gráfico $B(H)$ da curva de histerese do transformador, a menos dos fatores de escala convenientes para os eixos.

As figuras a seguir, mostram as curvas de histerese obtidas no laboratório para diversos níveis de tensão aplicados ao primário. Essas curvas foram obtidas com o canal 1 do osciloscópio ligado ao primário do circuito da figura 5.3 e o canal 2 ligado aos terminais do capacitor da mesma figura. Desta maneira, no canal 1 foi conectada uma ponteira de corrente para medir a corrente do primário e no canal 2 foi conectada uma ponteira de tensão para medir a tensão no capacitor. Os valores de R_s e C do circuito integrador utilizado na determinação das curvas de histerese que se seguem, são mostrados logo abaixo.

- $R_s = 39\text{K}\Omega + 33\text{K}\Omega + 27\text{K}\Omega = 99\text{K}\Omega$
- $C = 2\mu\text{F} // 2\mu\text{F} = 4\mu\text{F}$

De posse desses valores, junto com os valores do comprimento médio e seção reta do núcleo do transformador medidos no laboratório e mostrados na tabela 5.1, calculam-se os valores da *intensidade do campo magnético* e da *densidade de fluxo magnético* através das equações 5.2 e 5.6. Esses parâmetros ficarão em função do número de espiras do transformador devido à dificuldade na determinação desse número. Assim, as equações abaixo mostram os valores utilizados no cálculo da *intensidade do campo magnético* e da *densidade de fluxo magnético*.

$$N = N_1 = N_2$$

$$\bar{H} = 2Ni_1$$

$$\bar{B} = \frac{120,73V_s}{N}$$

onde

\bar{H} em Ampère espira por metro [Ae/m]

i_1 em Ampère [A]

B em Tesla [T]

V_s em Volts [V]

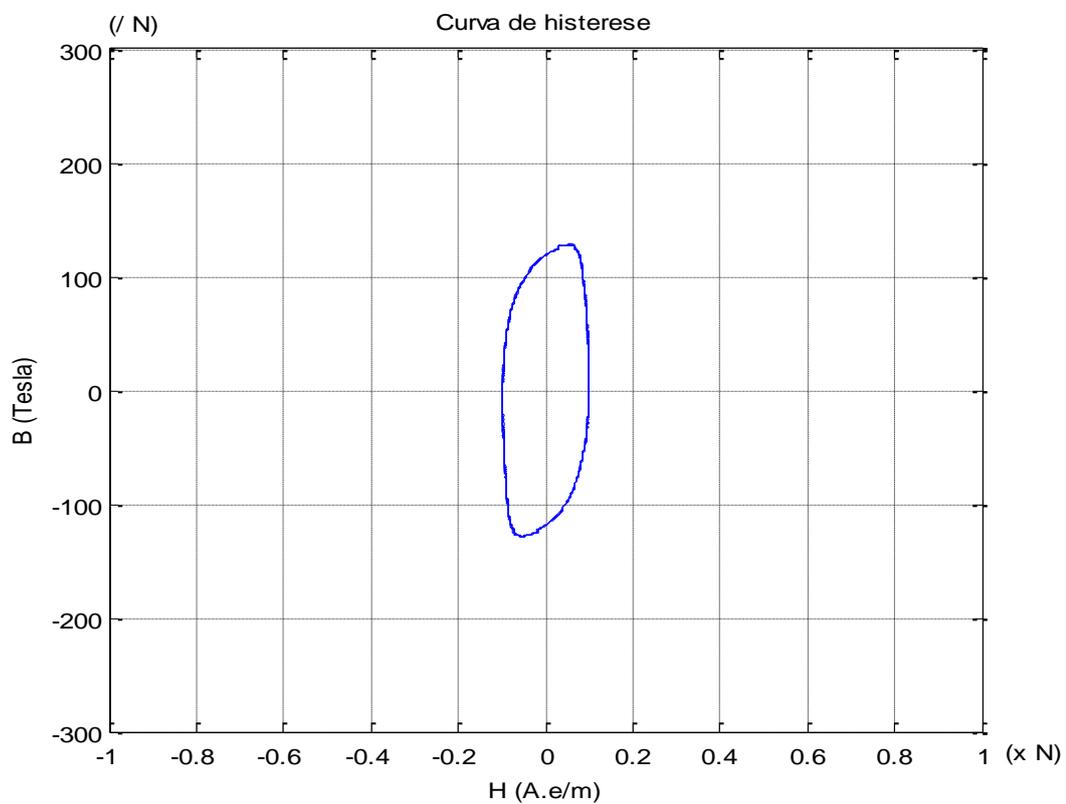


Figura 5.4 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 100 V aplicada ao primário

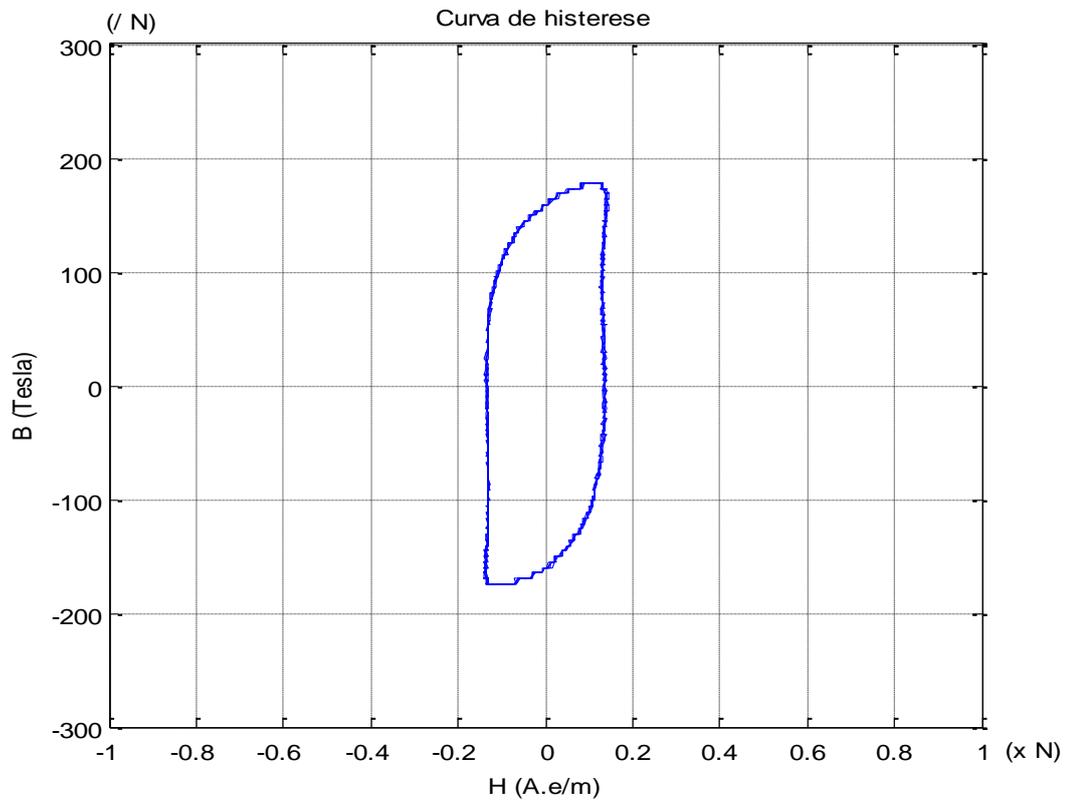


Figura 5.5 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 140 V aplicada ao primário

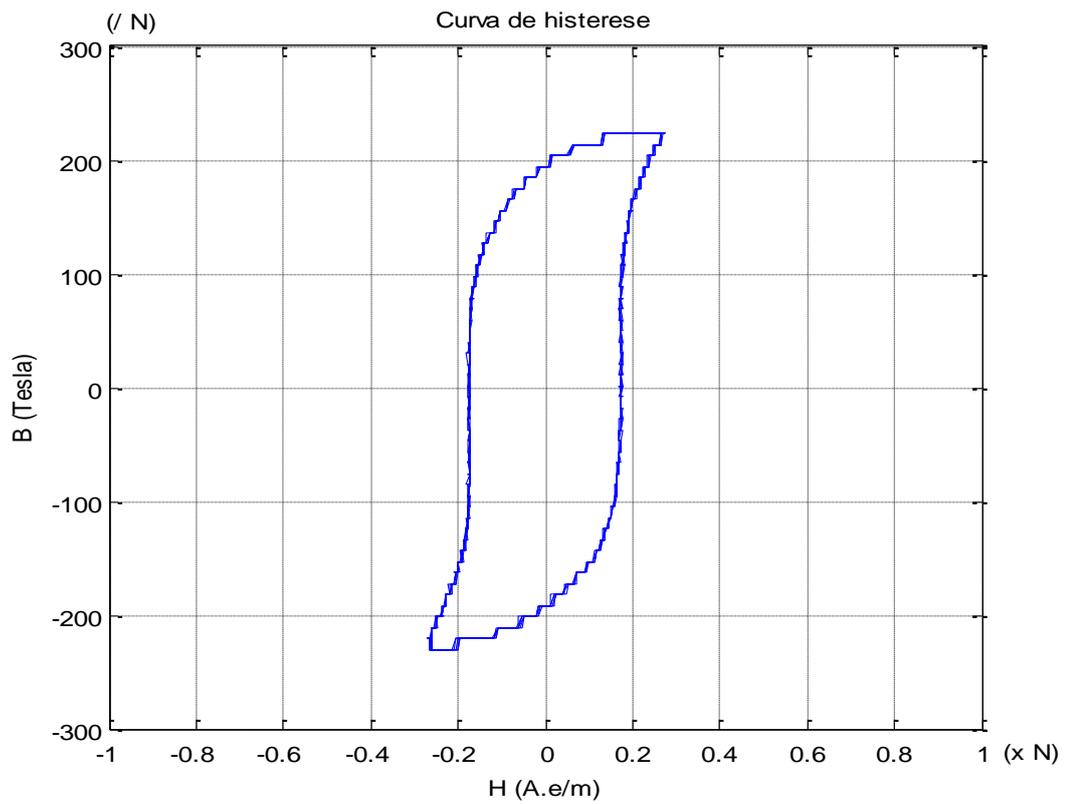


Figura 5.6 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 180 V aplicada ao primário

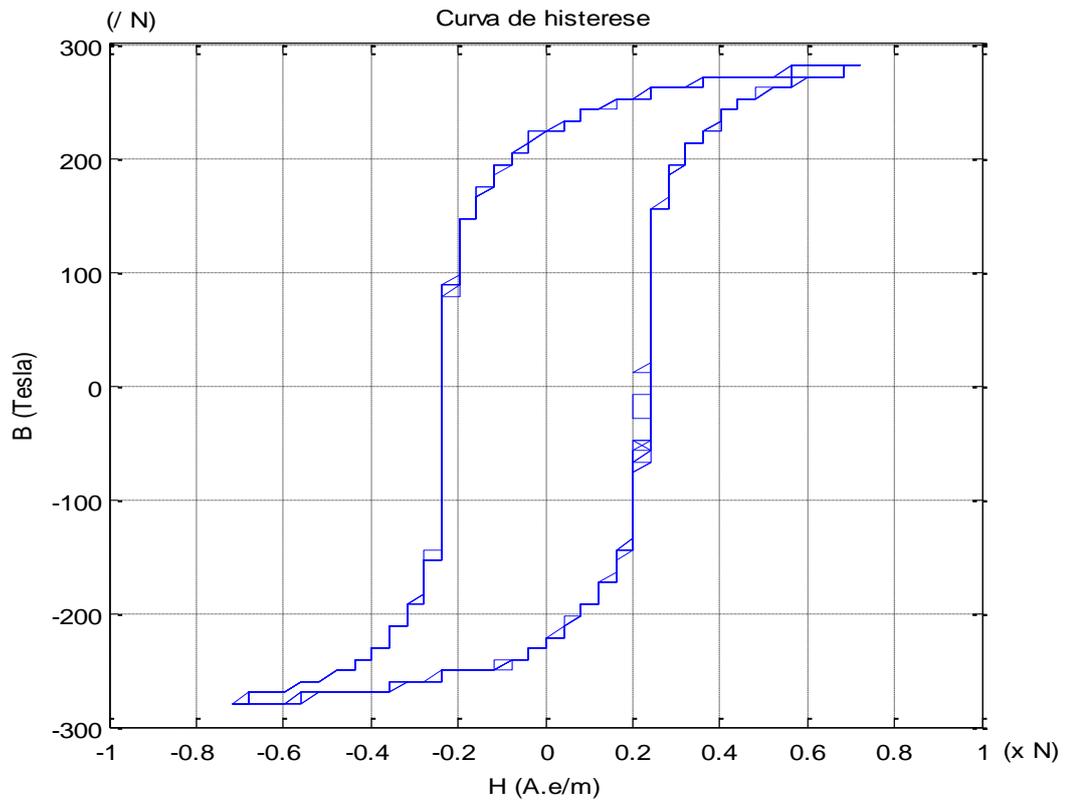


Figura 5.7 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 220 V aplicada ao primário

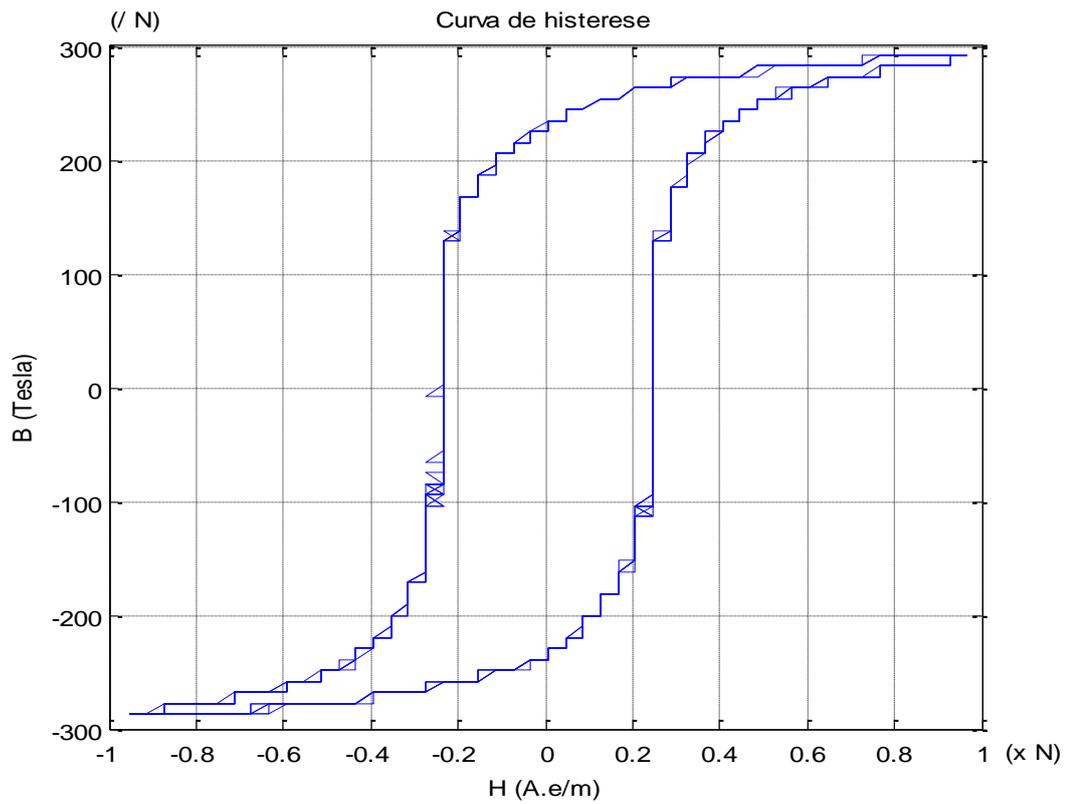


Figura 5.8 - Curva de histerese obtida com uma tensão de 230 V aplicada ao primário

Analisando as figuras 5.4, 5.5 e 5.6, pode-se observar que as curvas de histerese não apresentam suas formas típicas. Esse fato se deve a tensão aplicada ao primário possuir valores abaixo da tensão nominal de operação e, com isso, as perdas por histerese são menores também. Analisando agora as figuras 5.7 e 5.8, podem-se observar as curvas de histerese típicas de um transformador com tensão nominal de operação e com alguma sobretensão aplicada ao enrolamento primário. Pode-se observar a saturação do núcleo do transformador, este comportamento sendo representado pelos afunilamentos das extremidades das curvas.

Vale ressaltar aqui que o circuito utilizado na determinação das curvas de histerese do transformador ensaiado no laboratório atendeu às expectativas da teoria discutida no início desta seção. Sendo assim, a utilização do circuito integrador permitiu fácil determinação da curva de histerese típica do transformador ensaiado, evitando-se assim o esforço da determinação dessa curva ponto a ponto.

5.4. Ensaio em vazio

No ensaio em vazio foram feitas medidas de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência e essas medidas foram anotadas na tabela 5.2. De posse desses valores, determinou-se a impedância de magnetização R_m e X_m do transformador para os diversos níveis de tensão de alimentação mostrados nesta mesma tabela. Os parâmetros R_m , X_m e Z_m foram determinados através da utilização das equações 2.21, 2.22 e 2.23 mostradas no capítulo 2 deste trabalho.

Tabela 5.2 - Dados obtidos através do osciloscópio durante a realização do ensaio em vazio

ENSAIO EM VAZIO							
Vrms (V)	Irms (mA)	P (W)	Q (VAR)	f.p.	Rm (Ω)	Zm (Ω)	Xm (Ω)
150,00	98,00	6,80	12,80	0,469	3308,82	1530,61	1726,43
160,00	102,00	7,72	14,60	0,468	3316,06	1568,63	1780,42
170,00	108,00	8,40	16,20	0,461	3440,48	1574,07	1770,21
180,00	114,00	9,18	18,30	0,450	3529,41	1578,95	1765,47
190,00	125,00	10,30	21,40	0,435	3504,85	1520,00	1686,89
200,00	135,00	11,30	24,80	0,414	3539,82	1481,48	1631,21
210,00	144,00	11,30	28,40	0,371	3902,65	1458,33	1572,23
220,00	168,00	12,40	34,90	0,335	3903,23	1309,52	1390,09
230,00	182,00	13,40	39,80	0,320	3947,76	1263,74	1333,93
240,00	225,00	14,80	52,90	0,268	3891,89	1066,67	1109,14
250,00	276,00	15,90	67,80	0,226	3930,82	905,80	930,85

A curva de magnetização do transformador foi obtida através dos dados mostrados na tabela 5.2 e está mostrada na figura 5.9. Nesta mesma figura, traçou-se uma reta tangente a esta curva com a finalidade de representar o desvio sofrido por esta após a saturação do núcleo do transformador. Esta variação não-linear da curva de magnetização que ocorre após a saturação do transformador faz com que variações pequenas na tensão do transformador ocasionem grandes variações de corrente. A impedância de magnetização pode ser obtida pela tangente do ângulo entre a reta tangente à curva de excitação e o eixo horizontal do gráfico desta mesma curva.

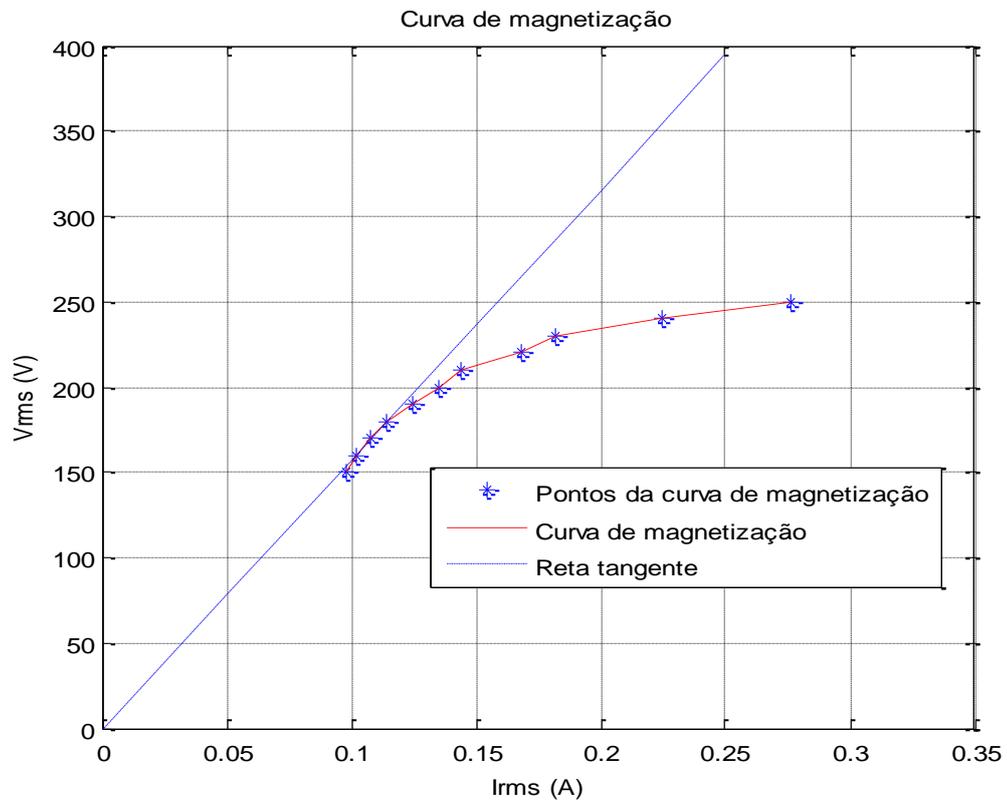


Figura 5.9 - Curva de magnetização do transformador em estudo

As curvas a seguir mostram a corrente de excitação do transformador (incluindo a componente de perdas) para os diversos níveis de tensão aplicada ao primário e o resultado da determinação das componentes harmônicas desta corrente.

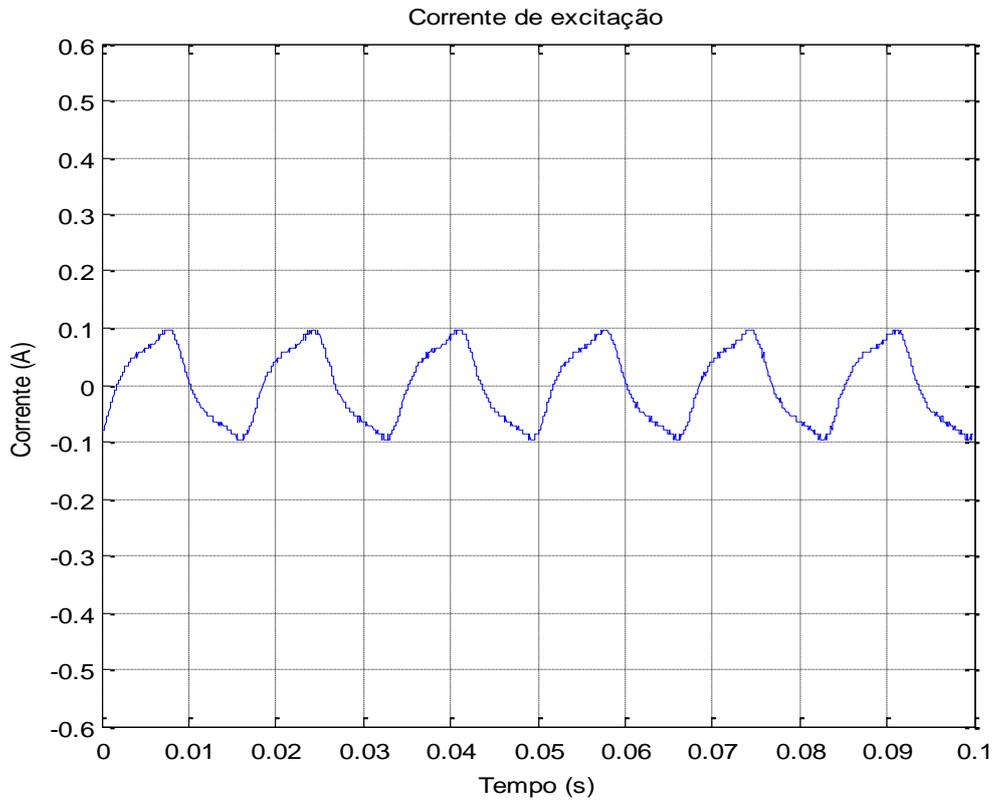


Figura 5.10 - Corrente de excitação para uma tensão de 150 V aplicada ao enrolamento primário

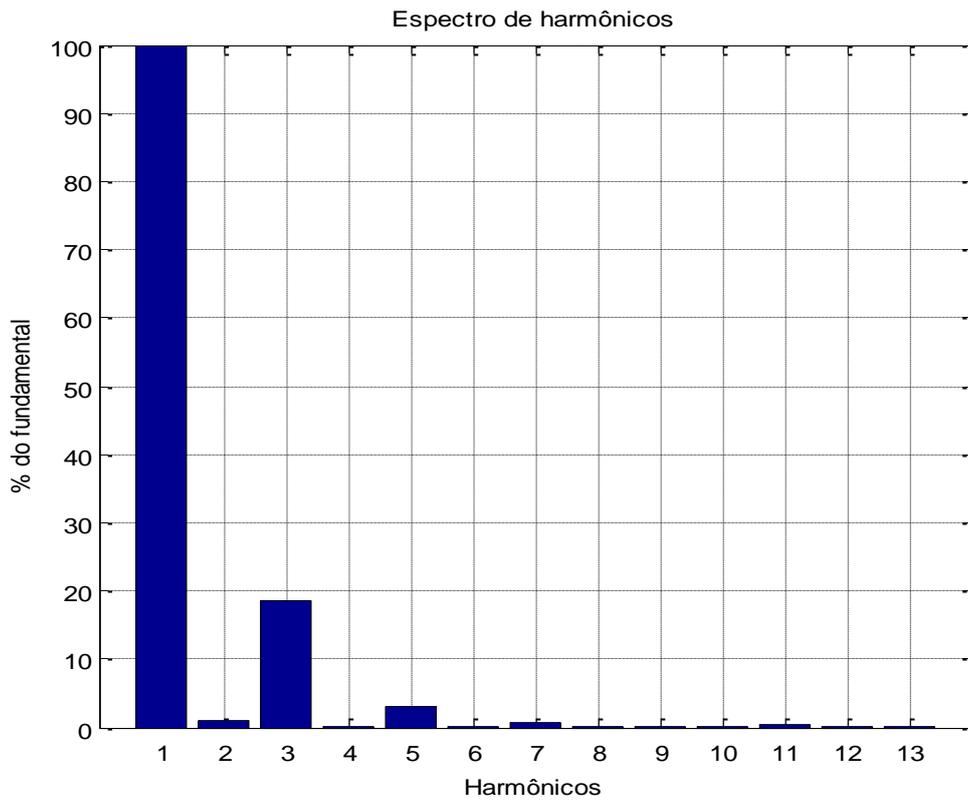


Figura 5.11 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.10

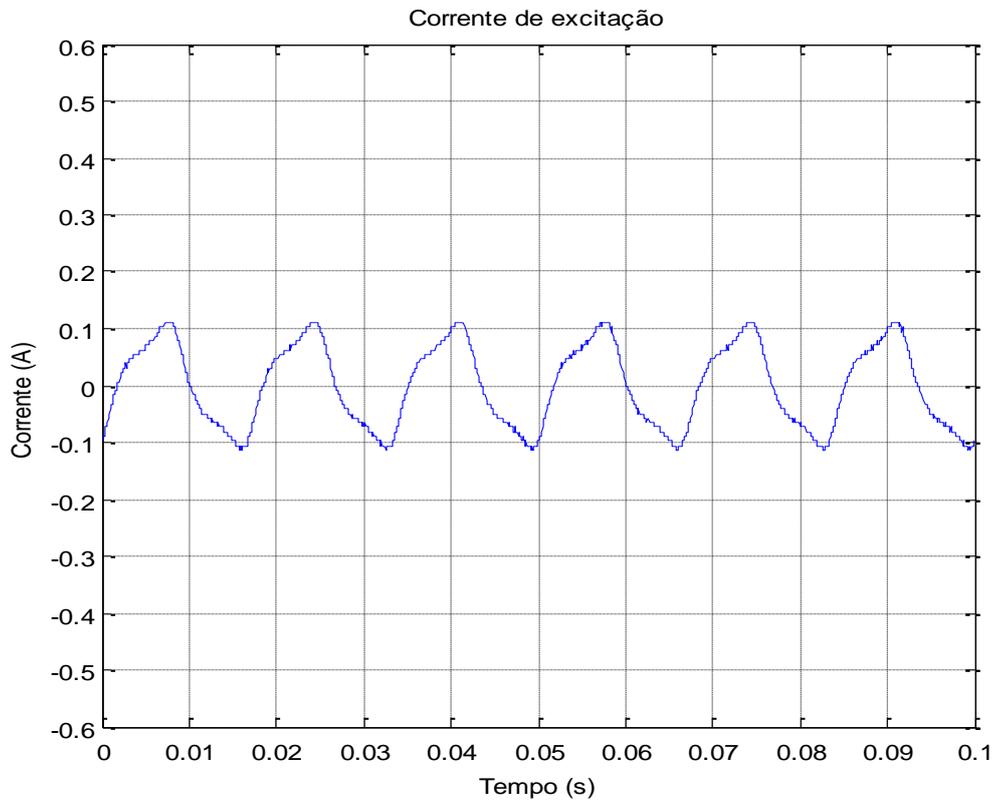


Figura 5.12 - Corrente de excitação para uma tensão de 160 V aplicada ao enrolamento primário

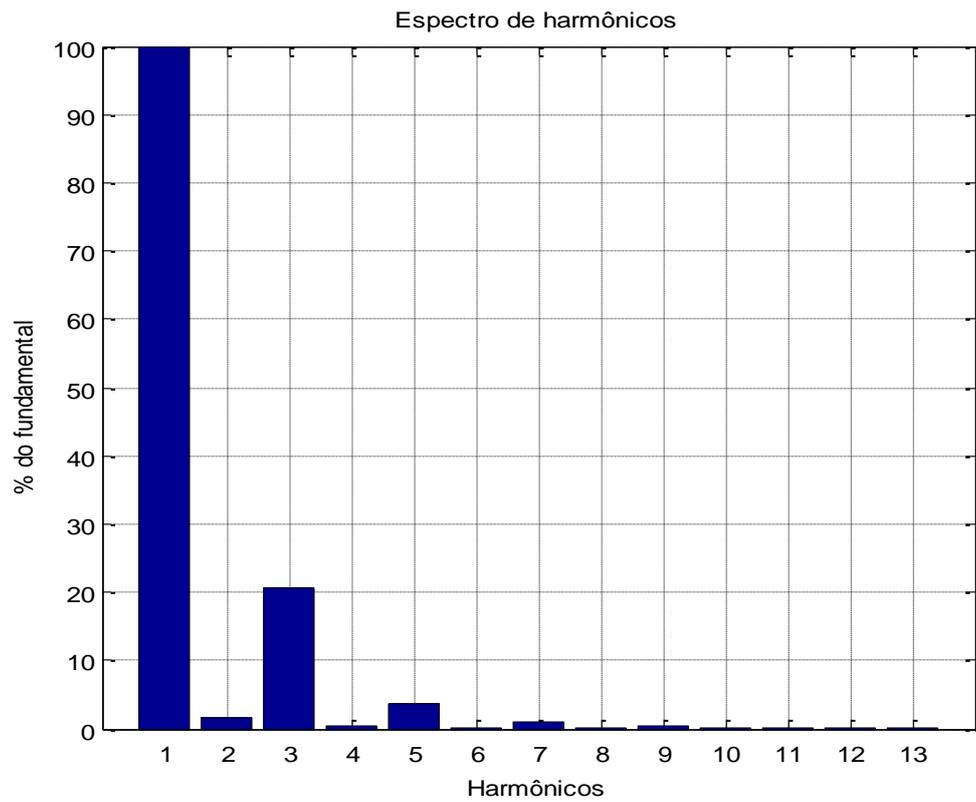


Figura 5.13 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.12

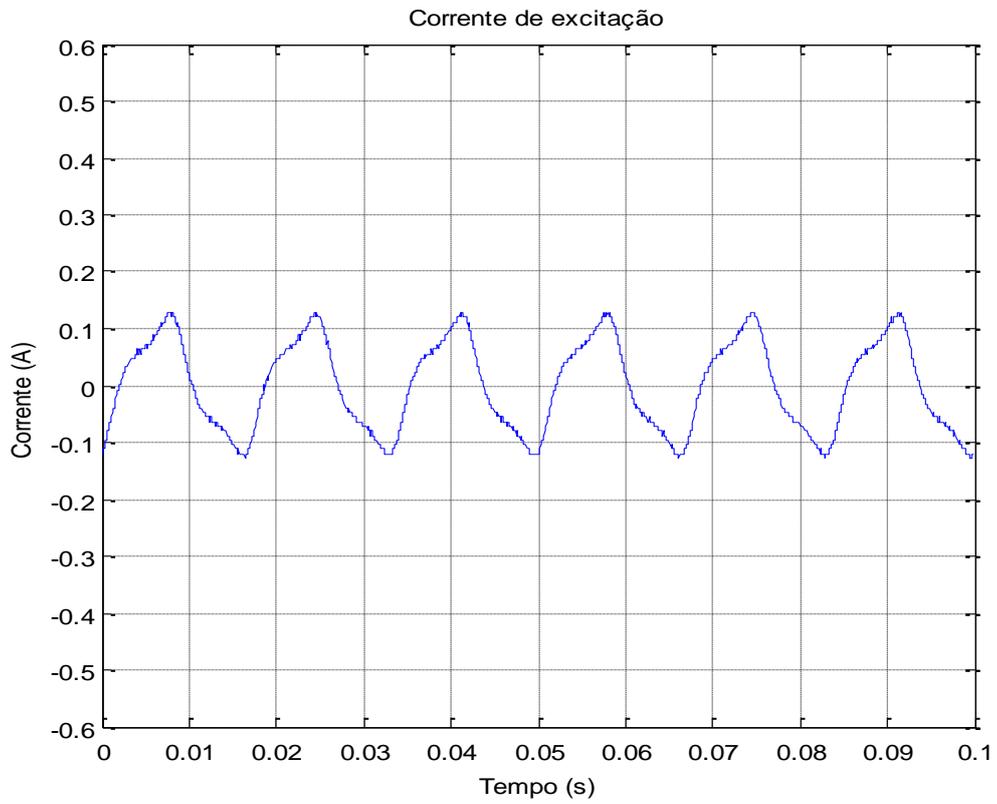


Figura 5.14 - Corrente de excitação para uma tensão de 170 V aplicada ao enrolamento primário

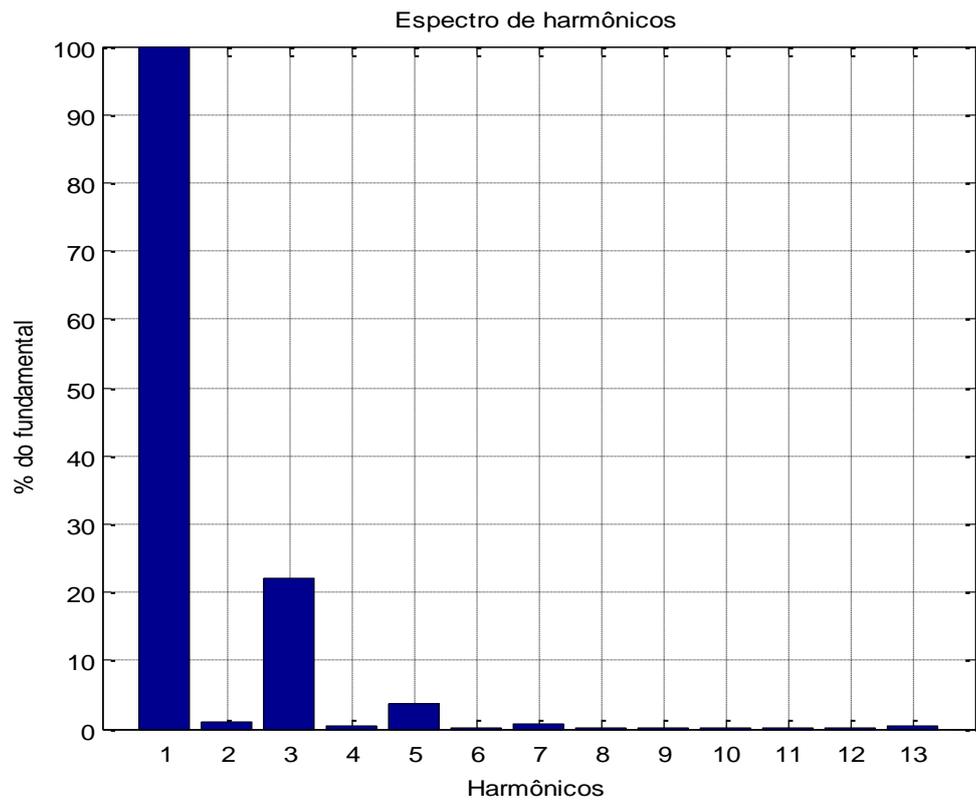


Figura 5.15 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.14

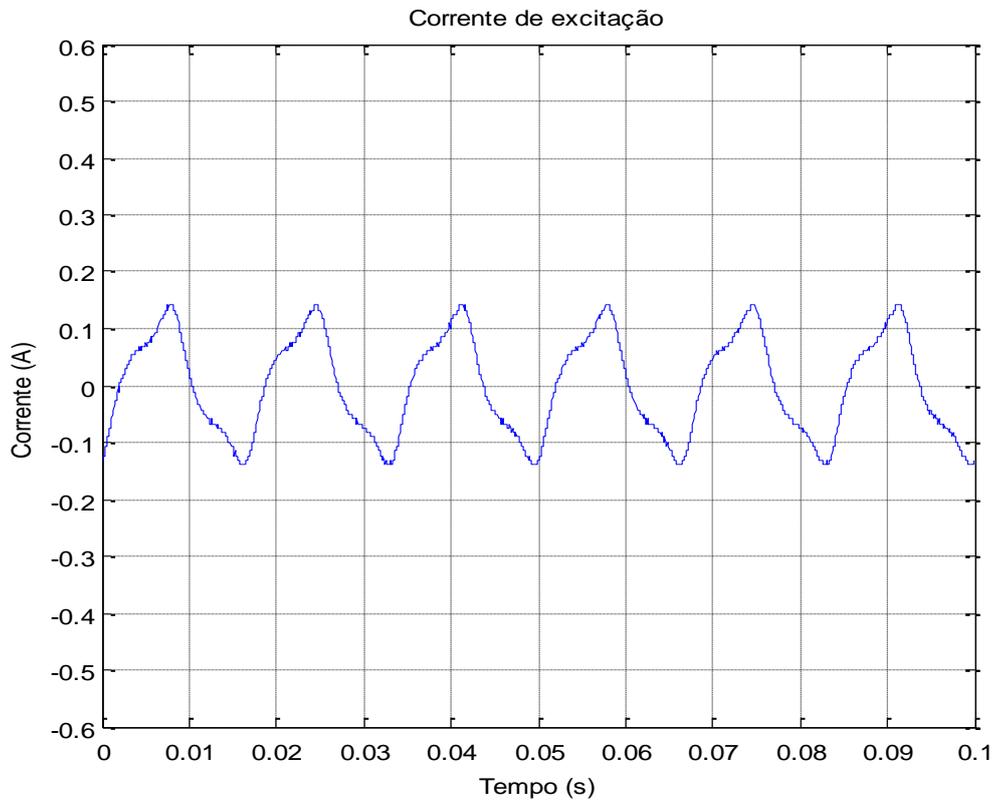


Figura 5.16 - Corrente de excitação para uma tensão de 180 V aplicada ao enrolamento primário

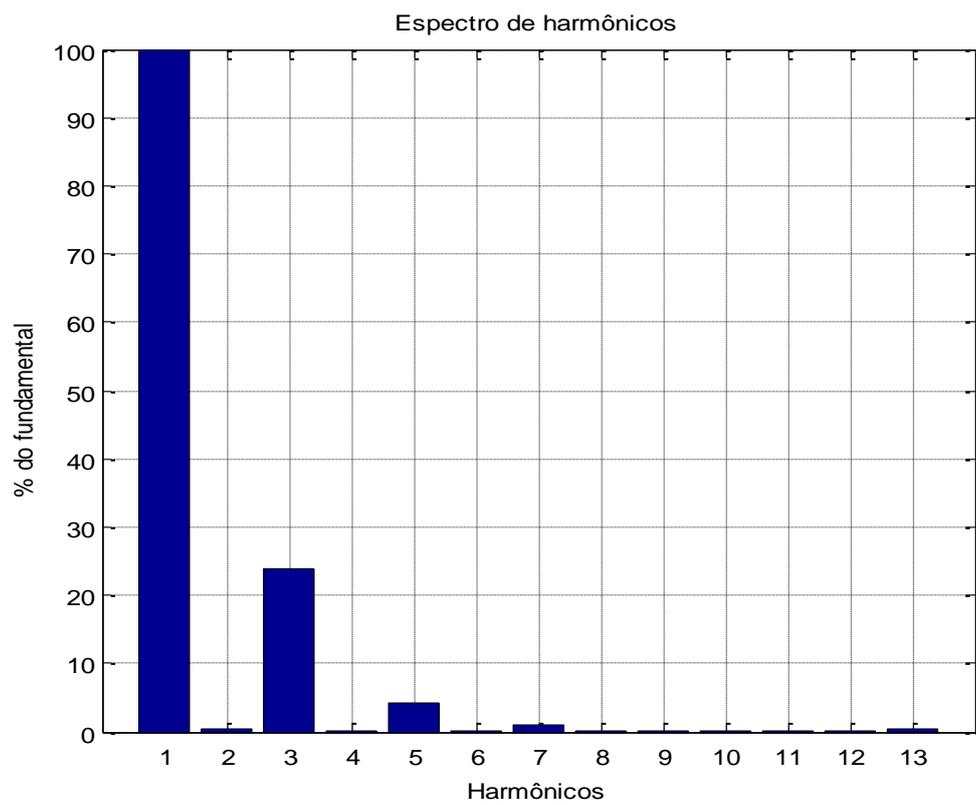


Figura 5.17 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.16

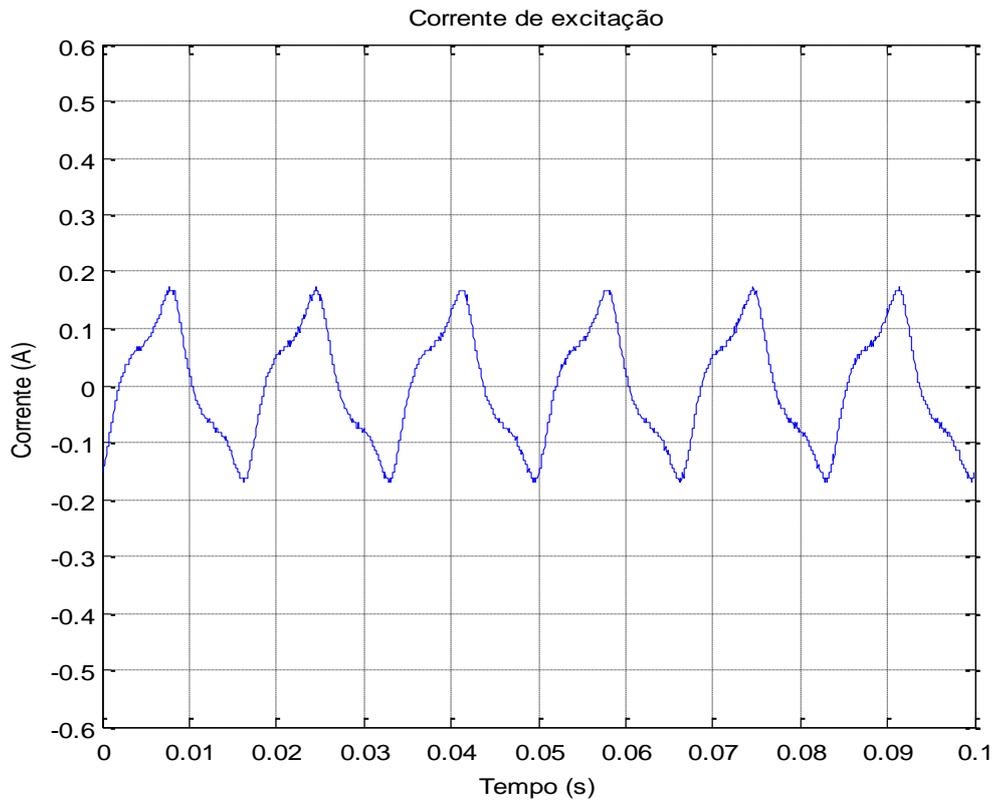


Figura 5.18 - Corrente de excitação para uma tensão de 190 V aplicada ao enrolamento primário

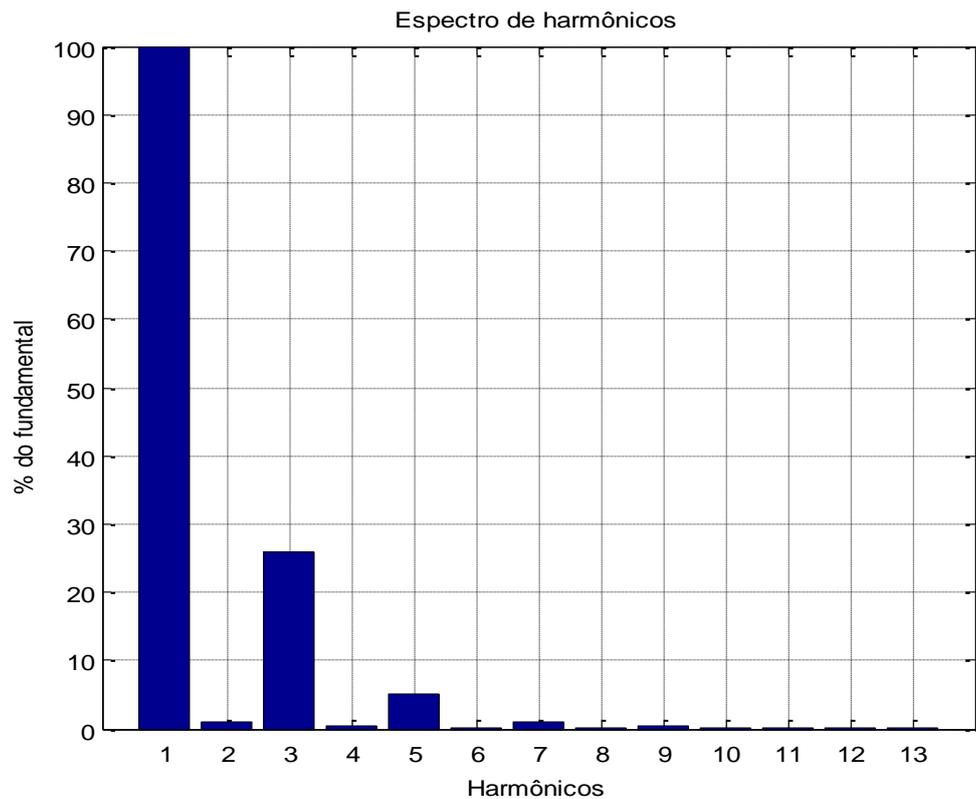


Figura 5.19 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.18

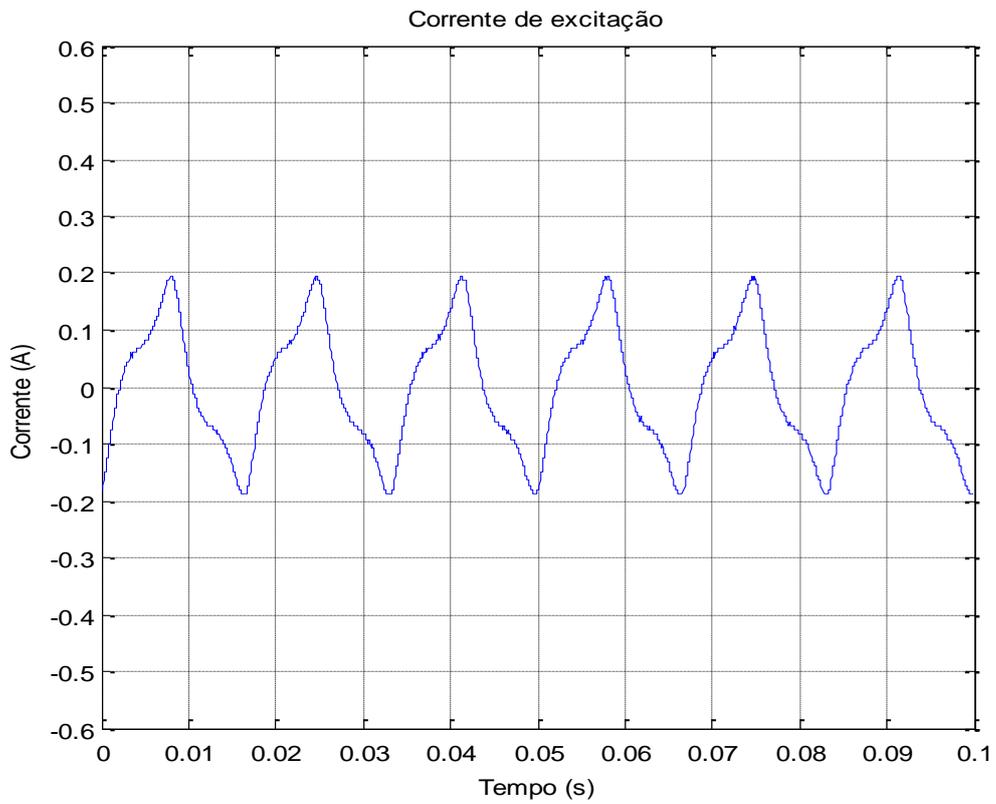


Figura 5.20 - Corrente de excitação para uma tensão de 200 V aplicada ao enrolamento primário

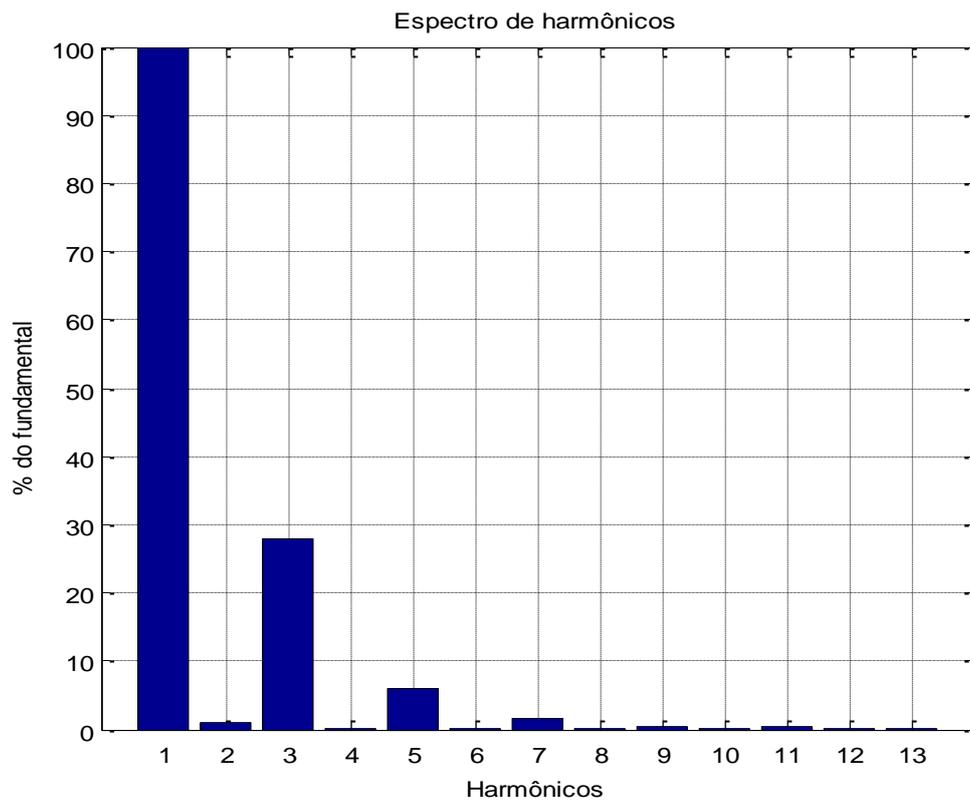


Figura 5.21 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.20

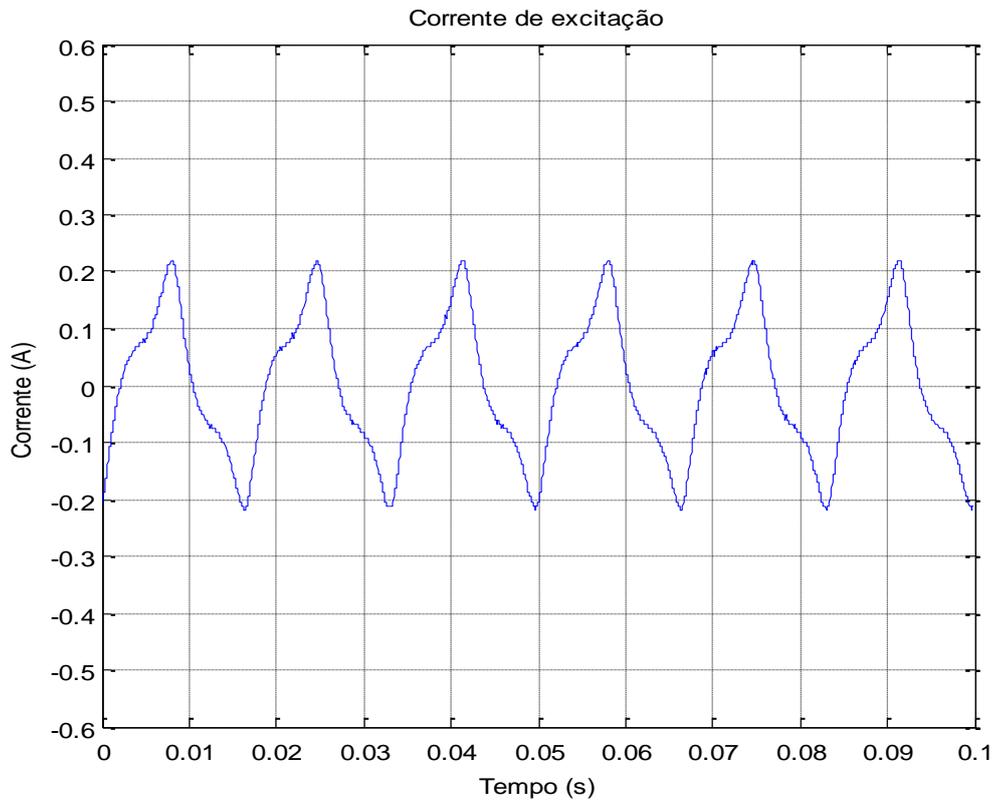


Figura 5.22 - Corrente de excitação para uma tensão de 210 V aplicada ao enrolamento primário

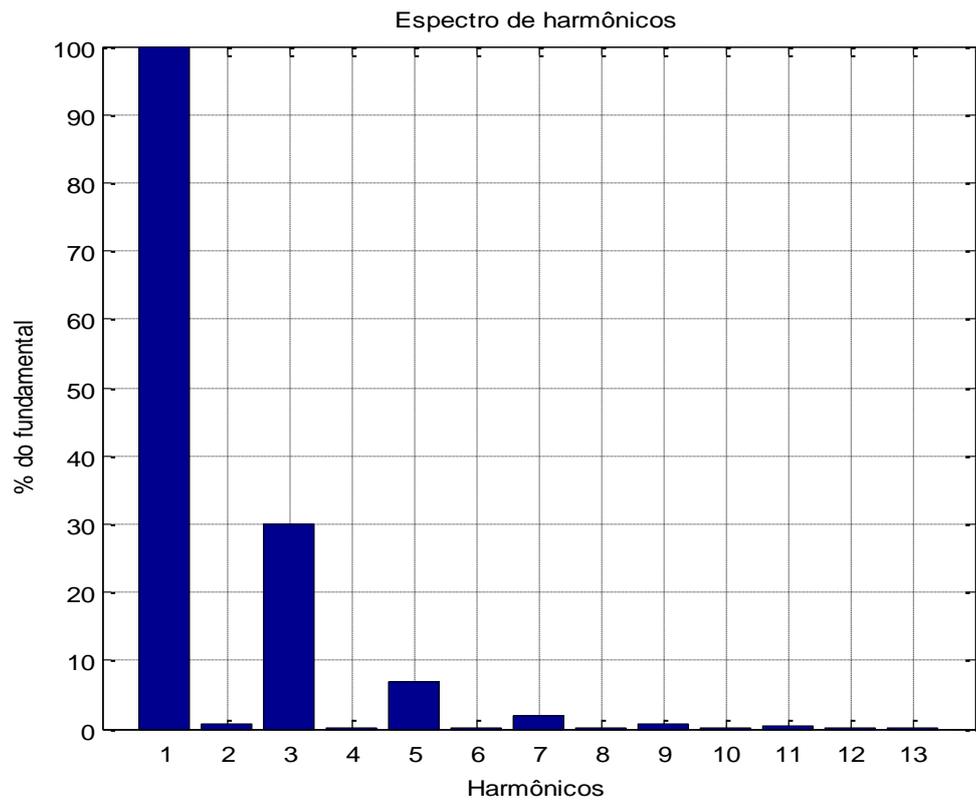


Figura 5.23 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.22

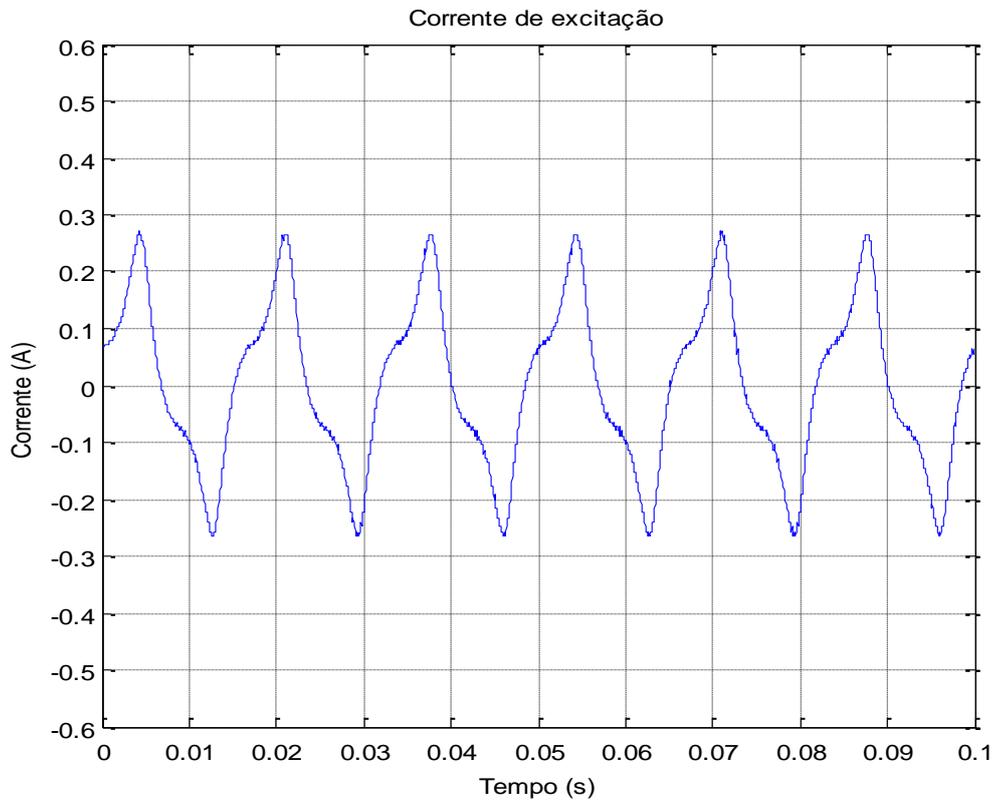


Figura 5.24 - Corrente de excitação para uma tensão de 220 V aplicada ao enrolamento primário

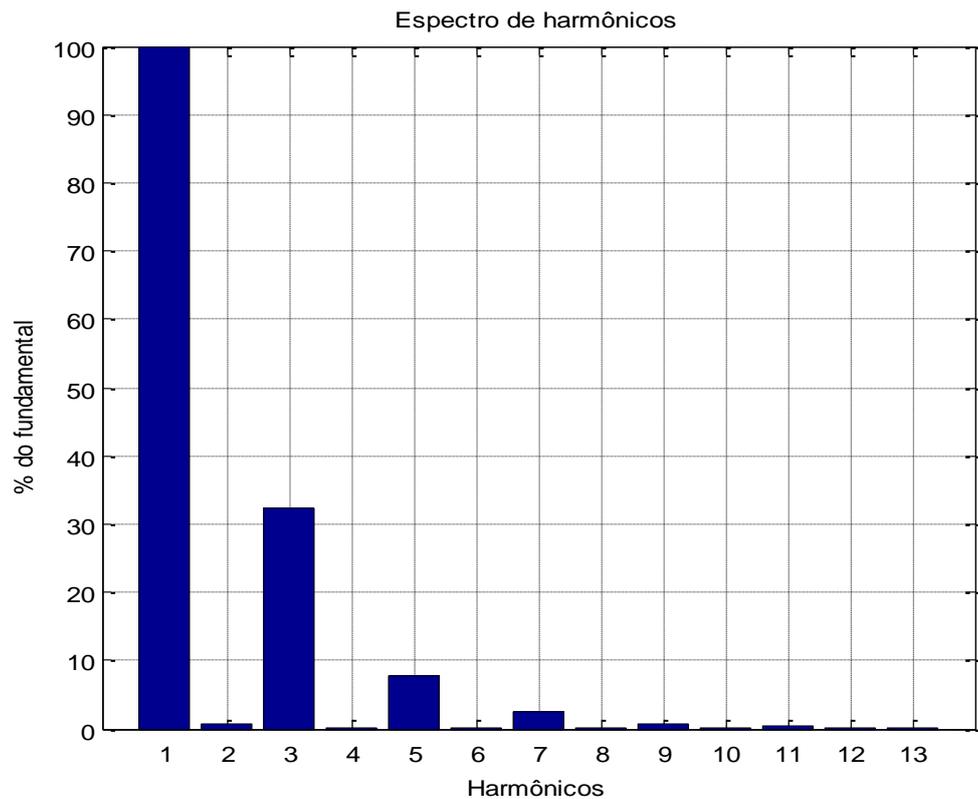


Figura 5.25 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.24

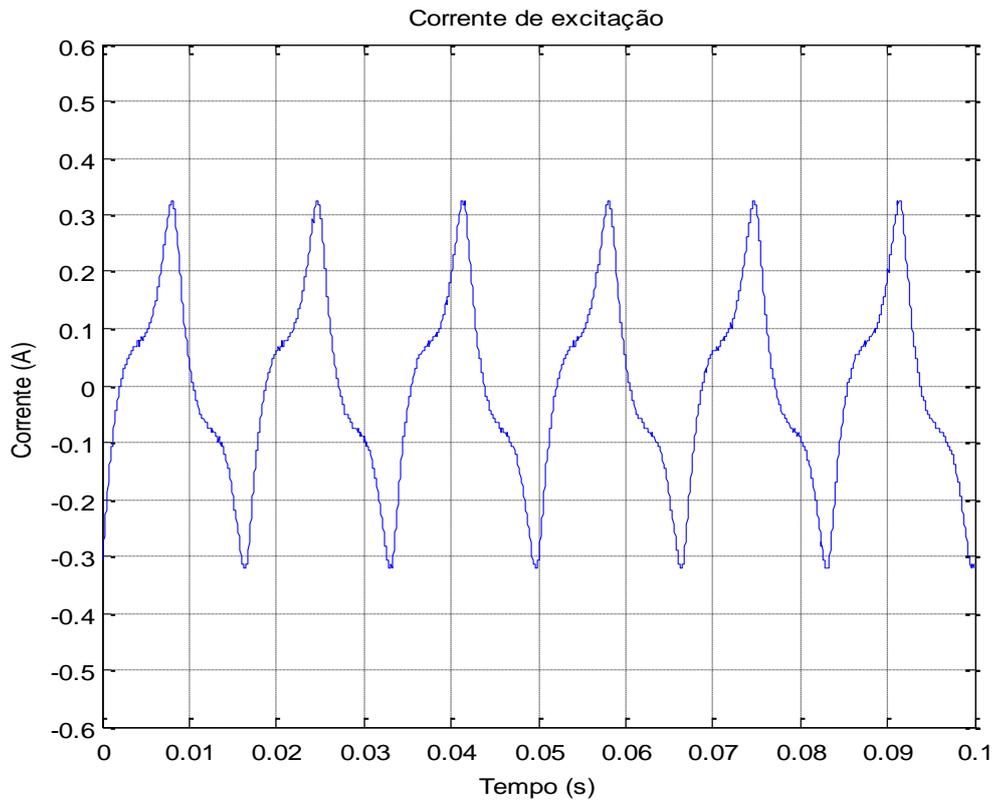


Figura 5.26 - Corrente de excitação para uma tensão de 230 V aplicada ao enrolamento primário

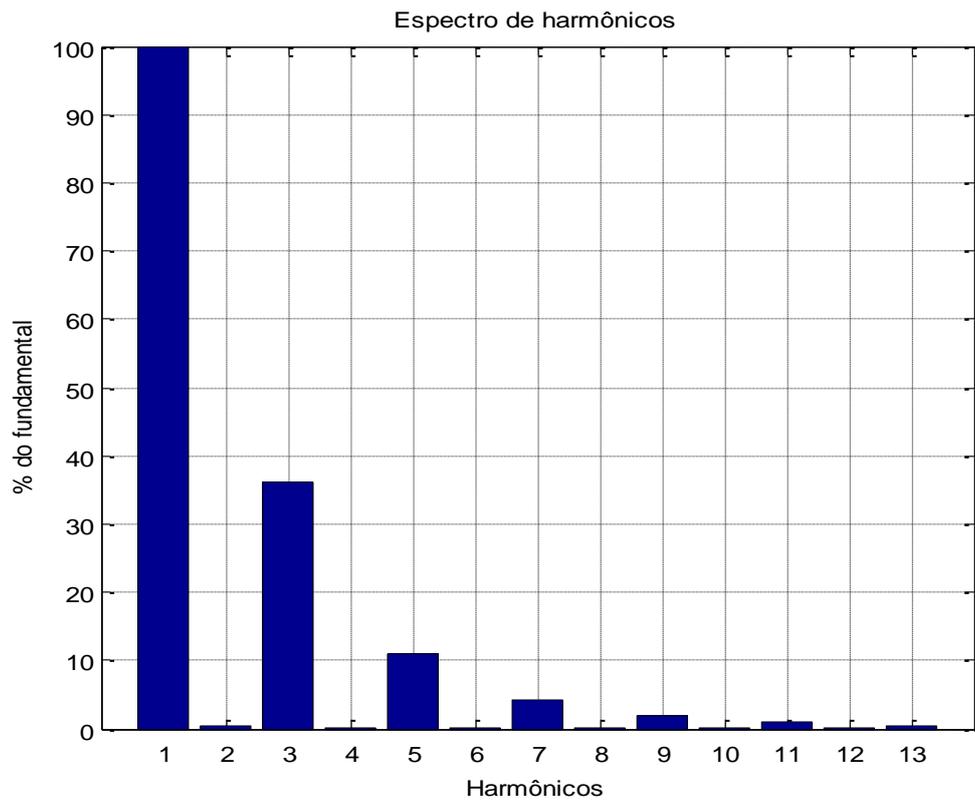


Figura 5.27 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.26

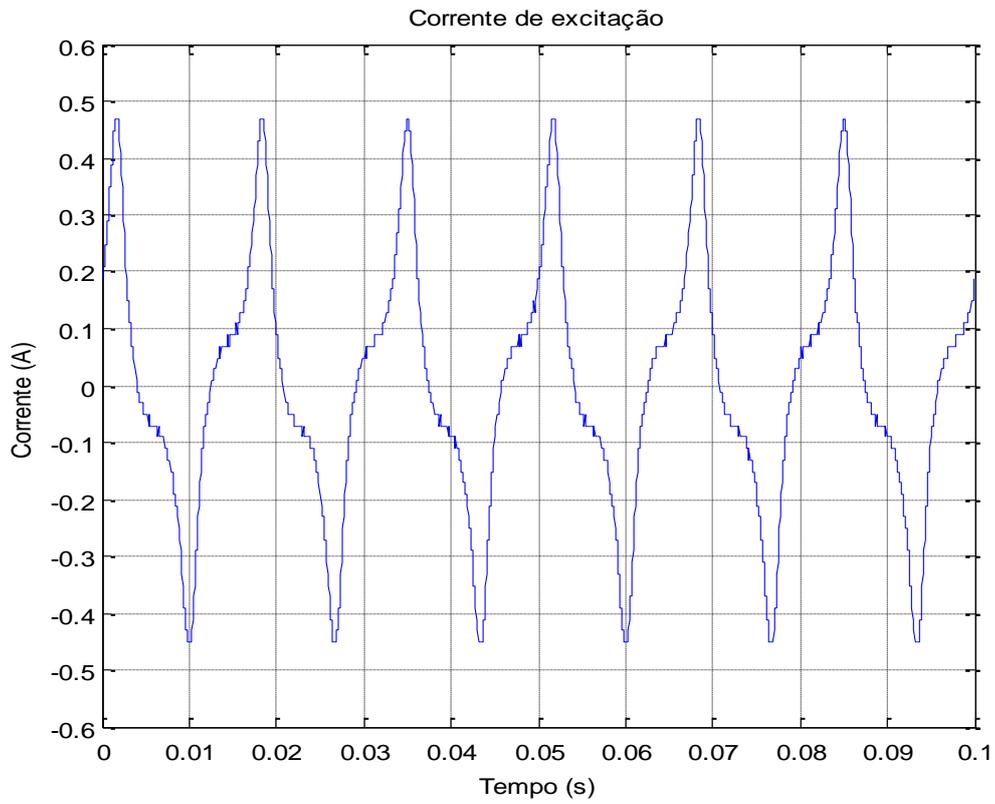


Figura 5.28 - Corrente de excitação para uma tensão de 240 V aplicada ao enrolamento primário

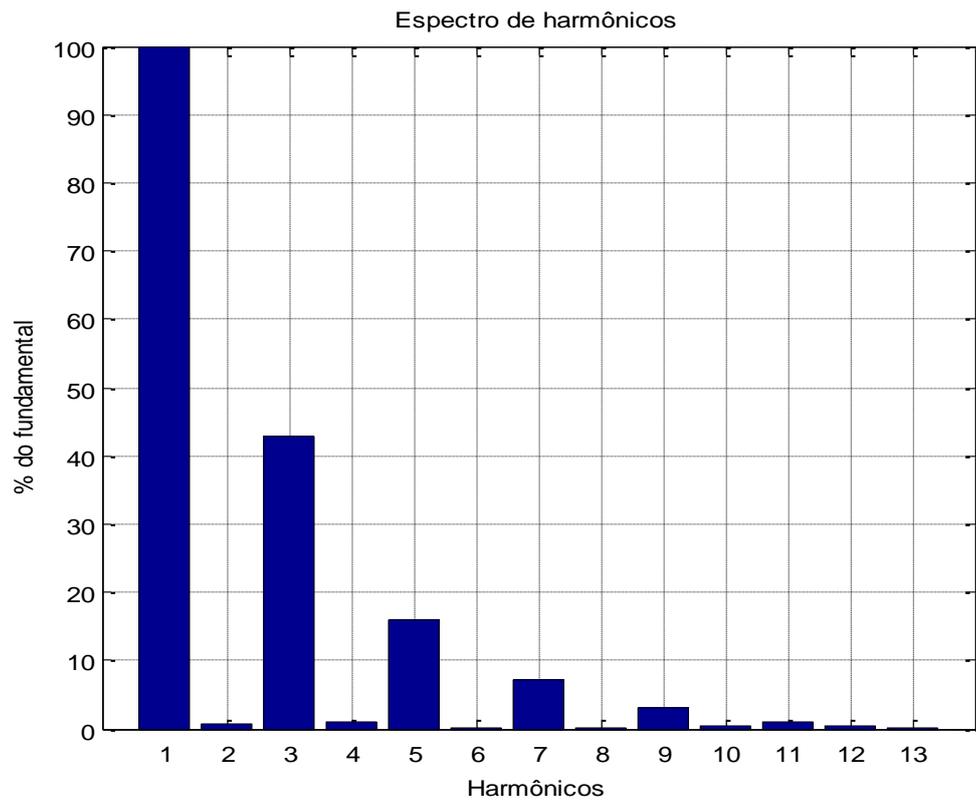


Figura 5.29 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.28

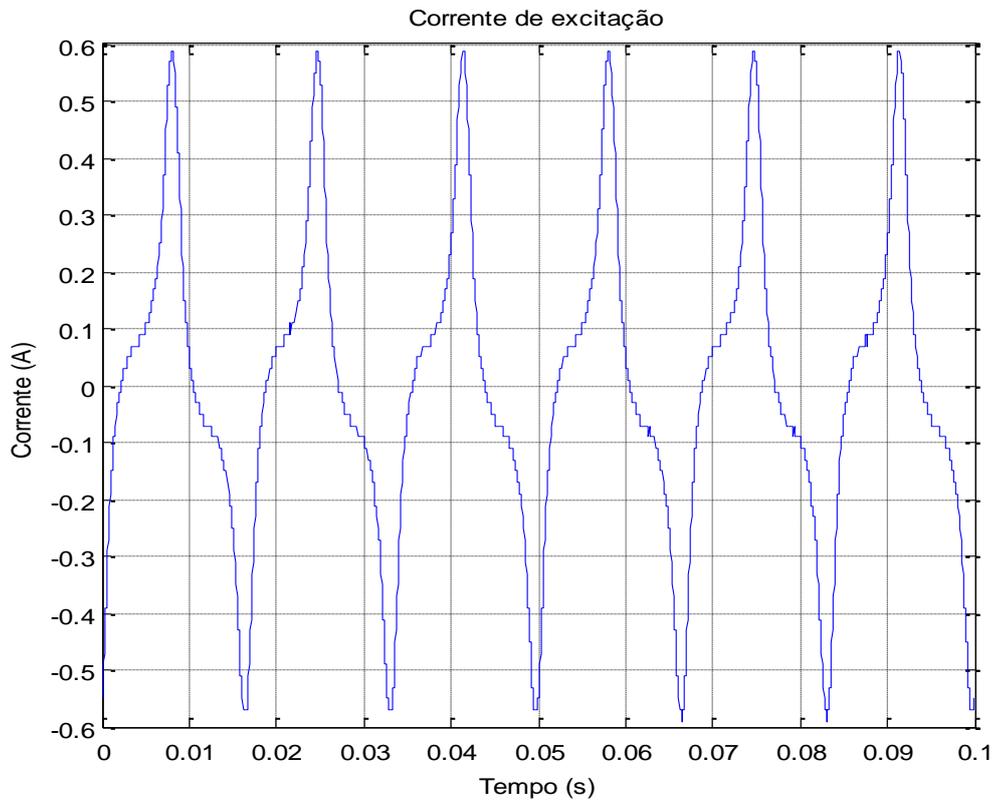


Figura 5.30 - Corrente de excitação para uma tensão de 250 V aplicada ao enrolamento primário

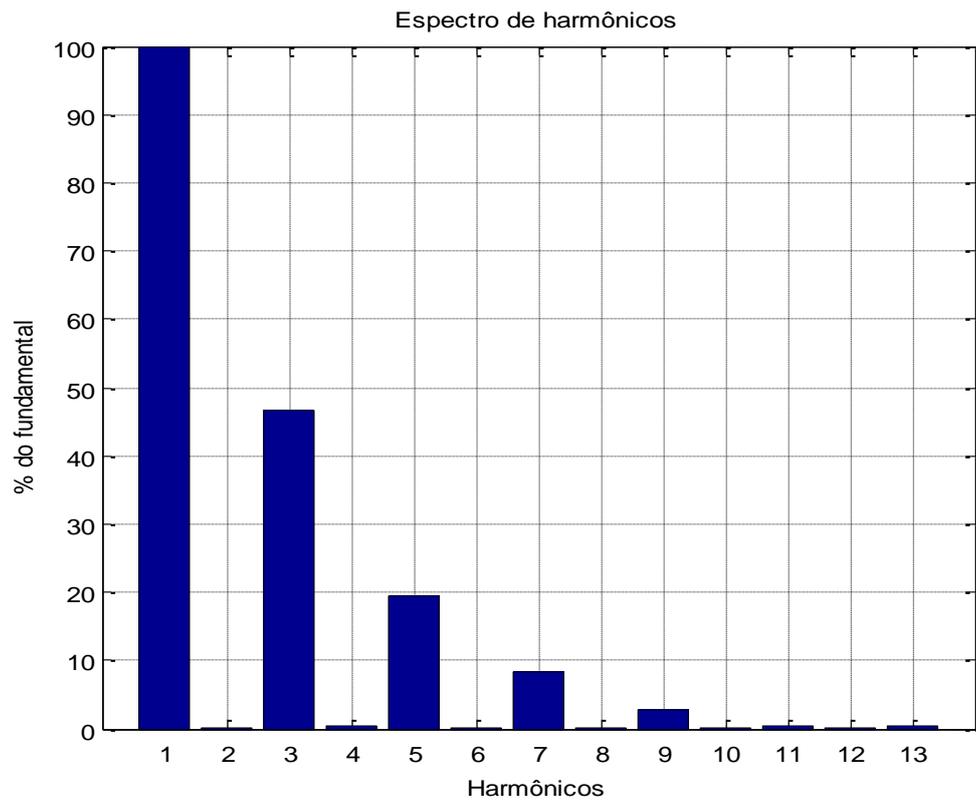


Figura 5.31 - Harmônicos da corrente de excitação mostrada na figura 5.30

Analisando-se as formas de onda da corrente de excitação pode-se perceber o comportamento não senoidal desta devido à não-linearidade existente no núcleo do transformador. A inspeção do conteúdo harmônico referido à amplitude da componente fundamental a 60 Hz mostra ausência de harmônicos pares e uma predominância do terceiro harmônico, e a seguir do quinto harmônico. Estes resultados são sumarizados na tabela 5.3

Tabela 5.3 - Porcentagem do terceiro e quinto harmônicos em relação ao fundamental de acordo com o nível de tensão

Tensão (V)	% do 3º harmônico	% do 5º harmônico
150,00	18,57	3,20
160,00	20,68	3,56
170,00	22,07	3,54
180,00	23,85	4,37
190,00	25,96	5,00
200,00	27,89	5,98
210,00	29,88	6,80
220,00	32,20	7,83
230,00	36,14	10,87
240,00	42,76	15,90
250,00	46,57	19,46

5.5. Ensaio de curto-circuito

A tabela 5.4, mostra as medidas de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência, obtidas durante o ensaio de curto-circuito. Com estas medidas determinou-se os valores dos parâmetros R_{eq} , X_{eq} e Z_{eq} através das equações 2.18, 2.19 e 2.20 mostradas no capítulo 2. Na tabela 5.4 também estão mostrados os valores desses parâmetros para cada nível de tensão aplicada.

Tabela 5.4 - Dados obtidos através do osciloscópio durante a realização do ensaio de curto-circuito

ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO							
Vrms (V)	Irms (A)	P (W)	Q (VAR)	f.p.	Req (Ω)	Zeq (Ω)	Xeq (Ω)
2,20	1,40	2,76	1,27	0,890	1,41	1,57	0,70
3,40	2,36	7,29	3,84	0,886	1,31	1,44	0,60
4,56	3,33	14,50	4,58	0,953	1,31	1,37	0,41
5,55	4,09	21,10	8,00	0,938	1,26	1,36	0,50
6,05	4,40	26,40	7,61	0,961	1,36	1,38	0,18
6,31	4,55	27,30	8,50	0,954	1,32	1,39	0,43
6,38	4,61	27,20	10,20	0,938	1,28	1,38	0,53
6,78	4,99	32,00	8,99	0,963	1,29	1,36	0,44

De posse dos valores de R_{eq} e X_{eq} , pode-se calcular o valor da resistência e reatância de dispersão para cada enrolamento supondo igualdade destes valores quando expressos em pu ou referidos a um dos dois enrolamentos, conforme citado anteriormente.

A figura 5.32 mostra a curva de curto-circuito obtida através dos dados da tabela 5.3. Analisando-se esta curva, observa-se a ausência de saturação na faixa escolhida para o ensaio. A impedância de curto-circuito pode ser obtida através da tangente do ângulo da reta de curto-circuito.

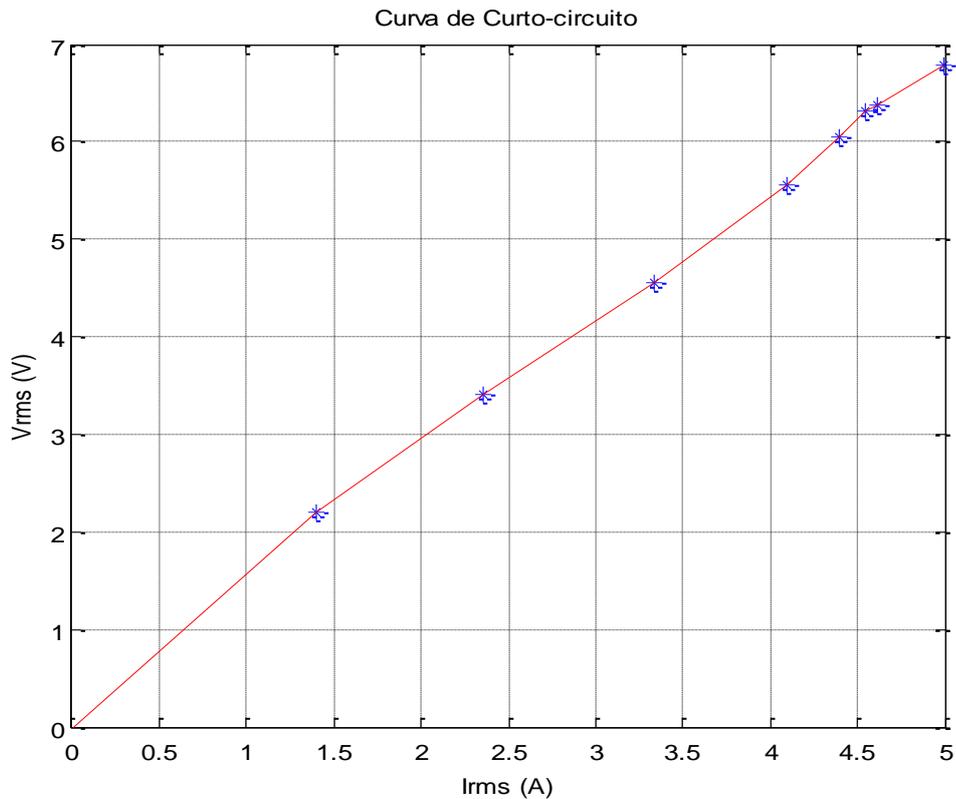


Figura 5.32 - Curva de curto-circuito do transformador em estudo

5.6. Ensaio de energização a vazio

As curvas mostradas abaixo referem-se à energização a vazio do transformador monofásico ensaiado no laboratório. A partir destas curvas obtidas por medição de regime transitório foi possível determinar os níveis atingidos pela corrente de *inrush* de acordo com o nível da tensão no instante da energização e, também, a amplitude dos harmônicos em relação ao harmônico fundamental presentes nesta corrente. O valor da tensão eficaz aplicada ao enrolamento primário é de 220V.

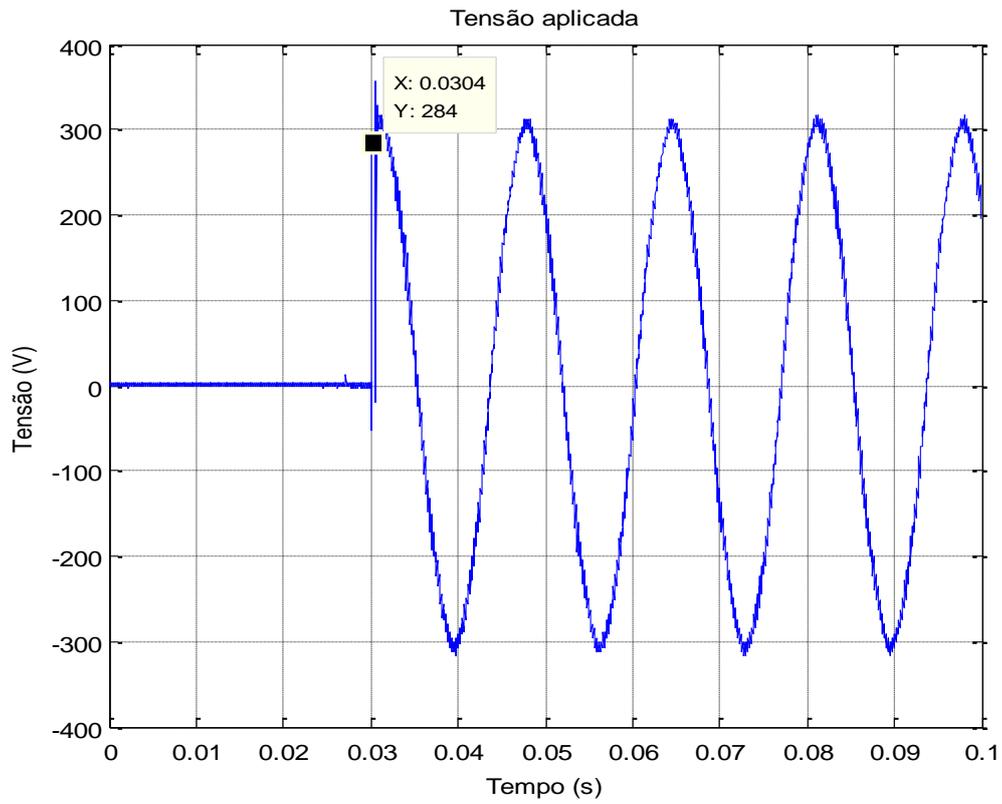


Figura 5.33 - Amplitude da tensão em 284V no instante de energização a vazio

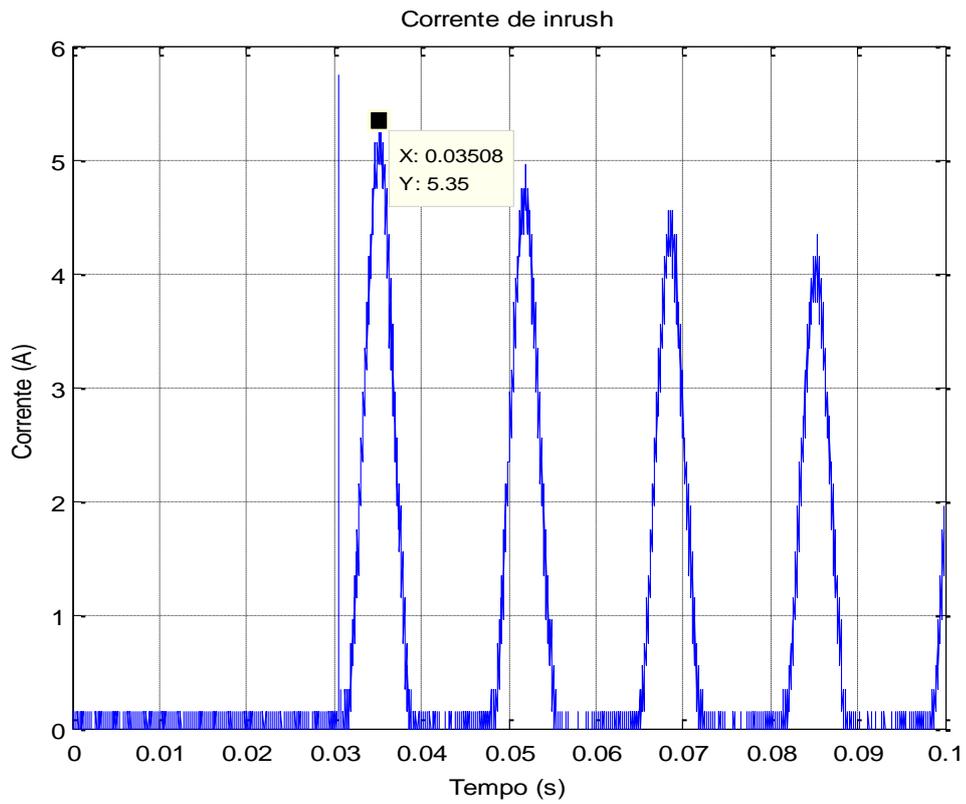


Figura 5.34 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.33

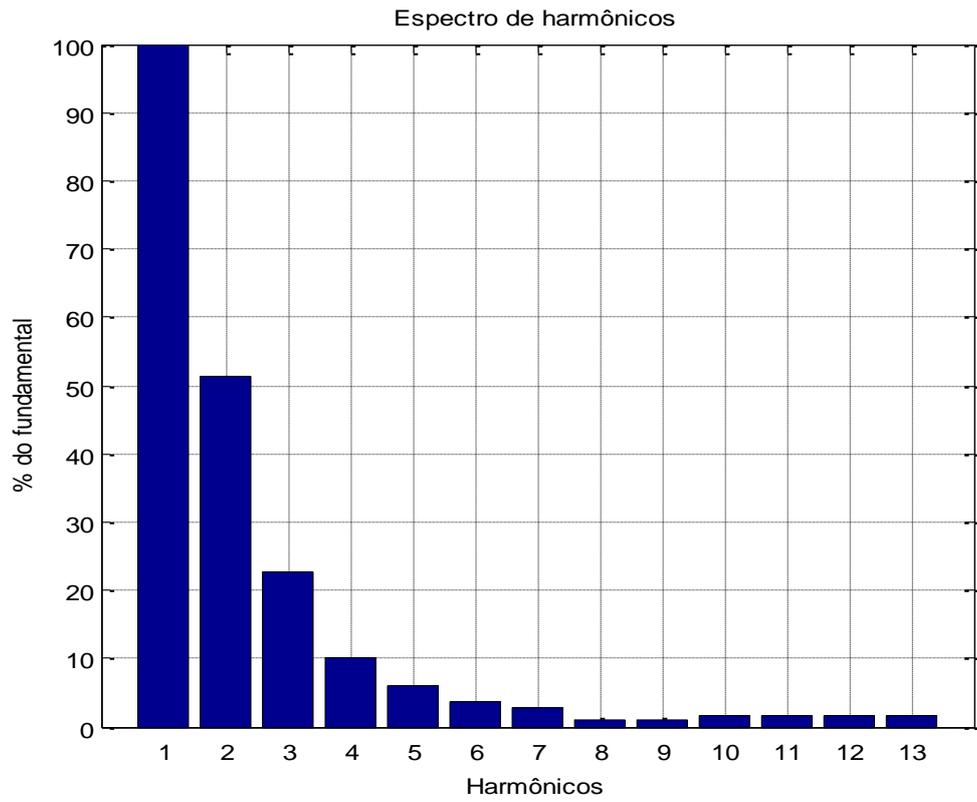


Figura 5.35 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.34

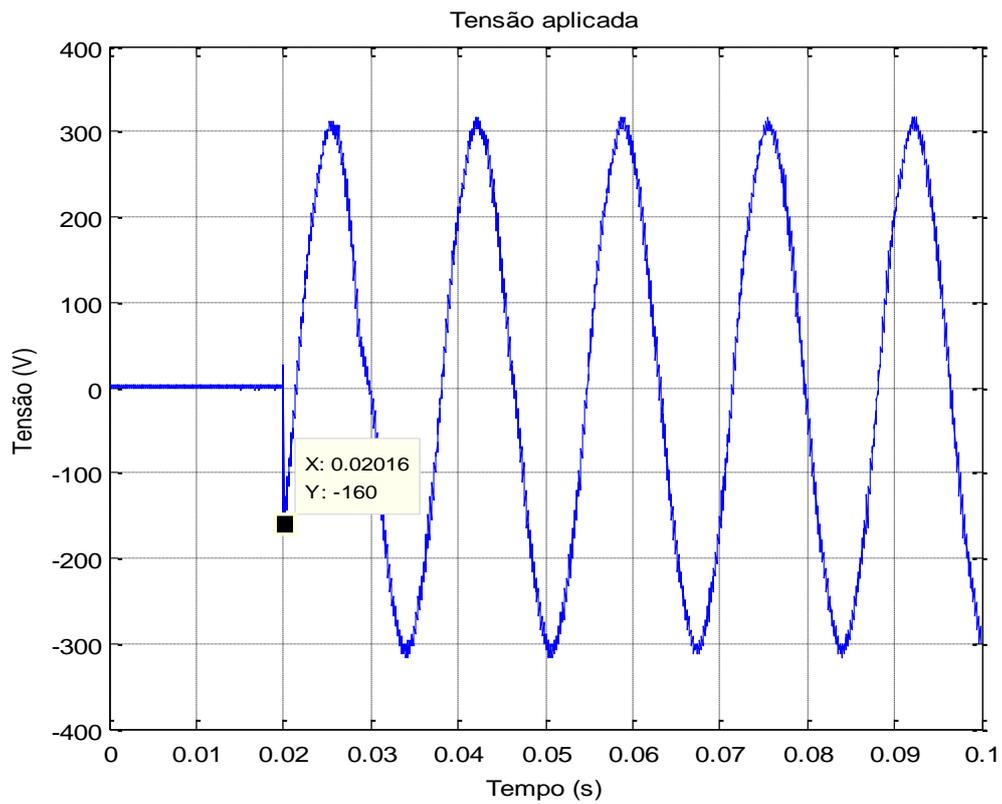


Figura 5.36 - Amplitude da tensão em -160V no instante de energização a vazio

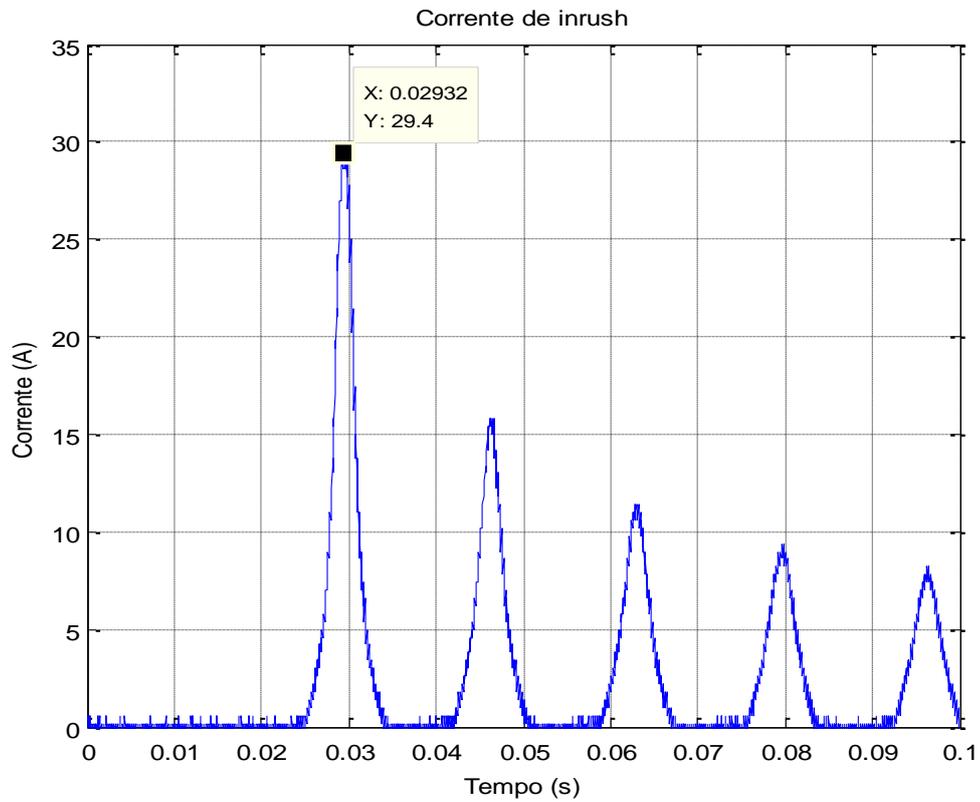


Figura 5.37 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.36

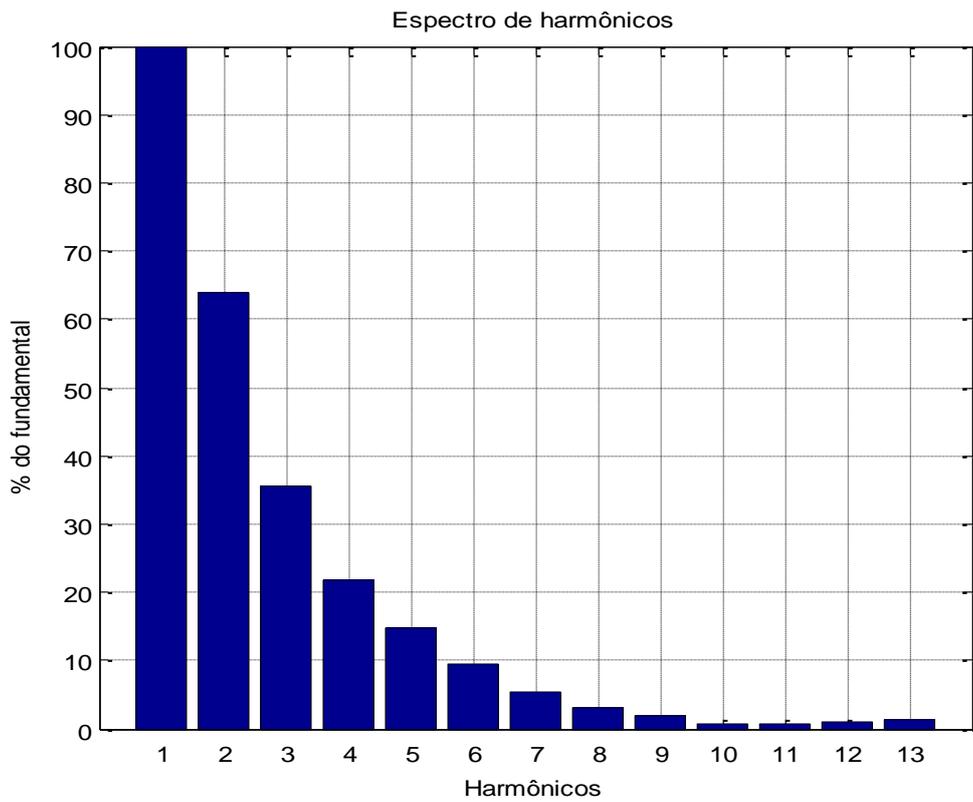


Figura 5.38 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.37

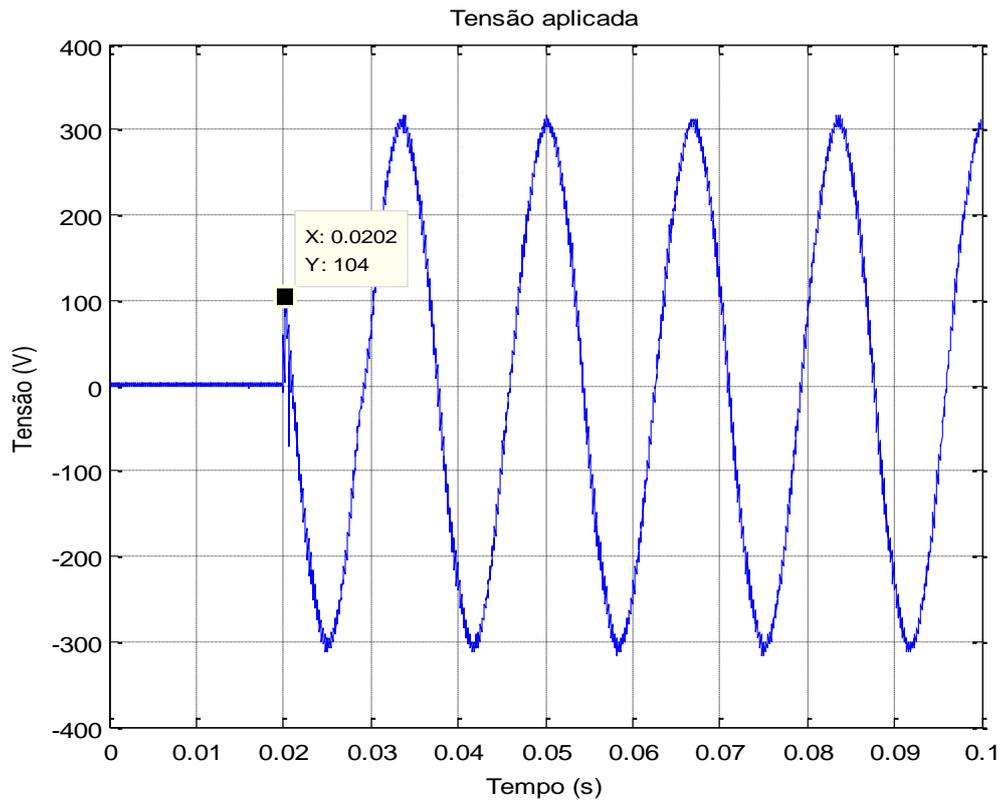


Figura 5.39 - Amplitude da tensão em 104V no instante de energização a vazio

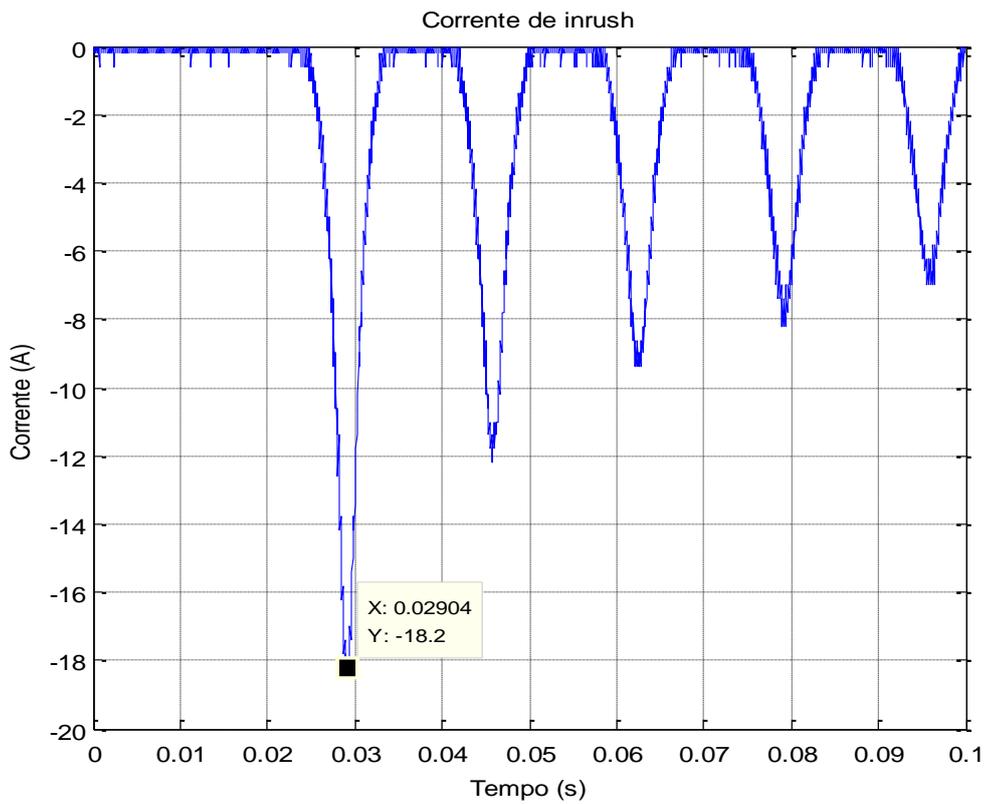


Figura 5.40 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.39

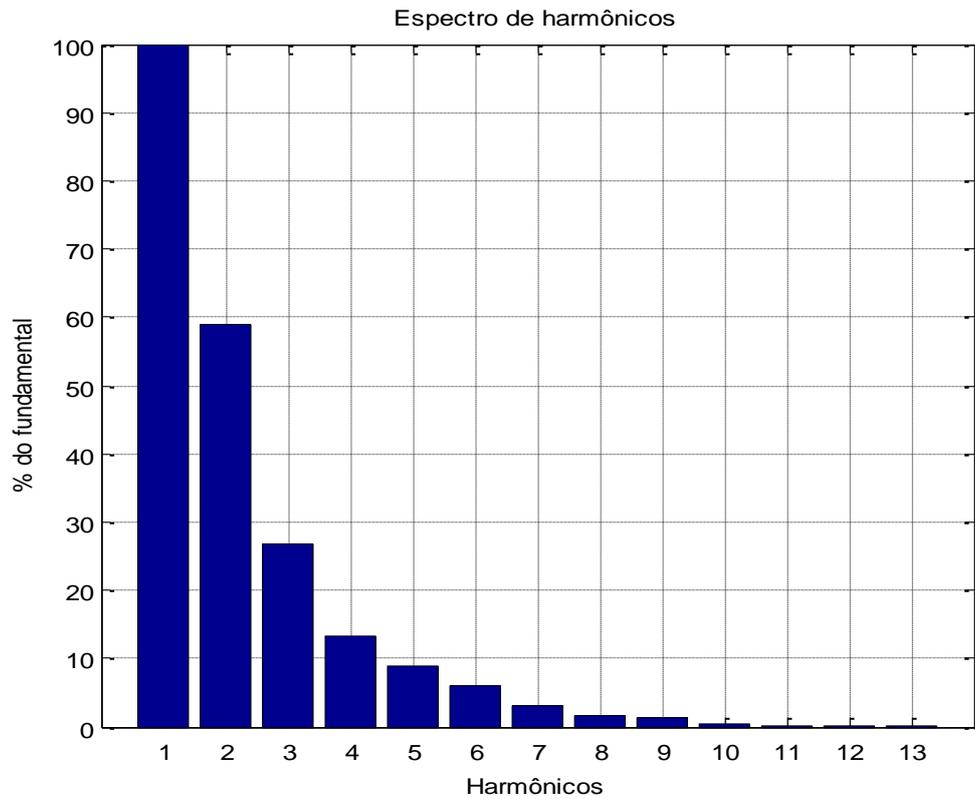


Figura 5.41 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.40

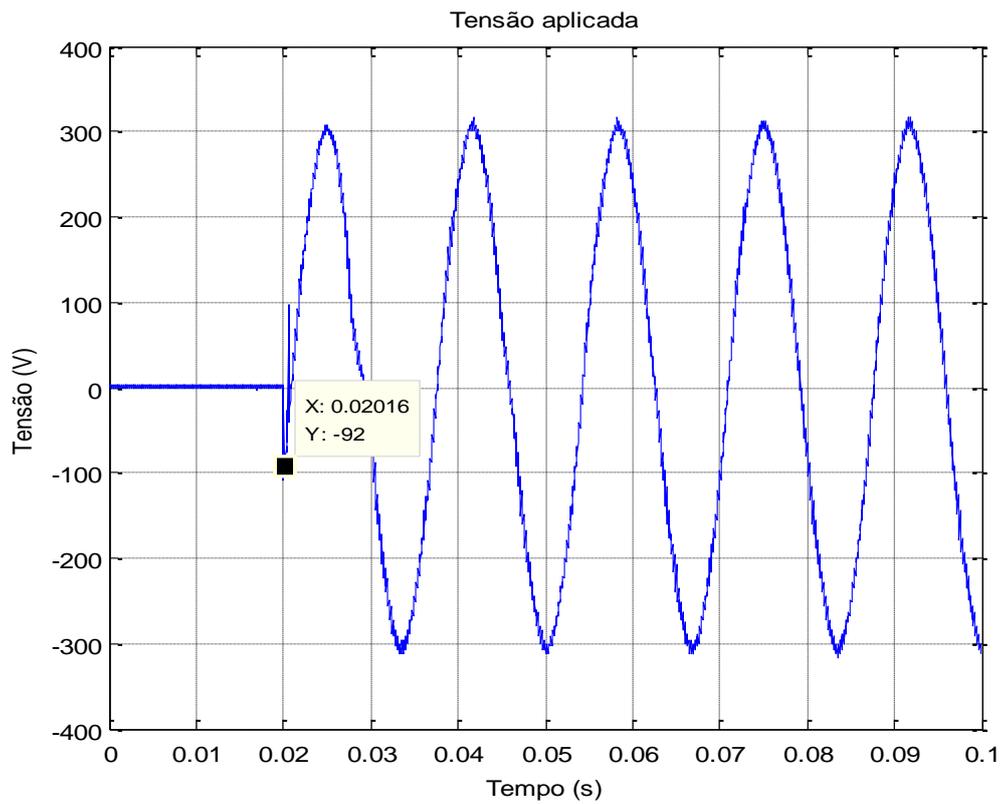


Figura 5.42 - Amplitude da tensão em -92V no instante de energização a vazio

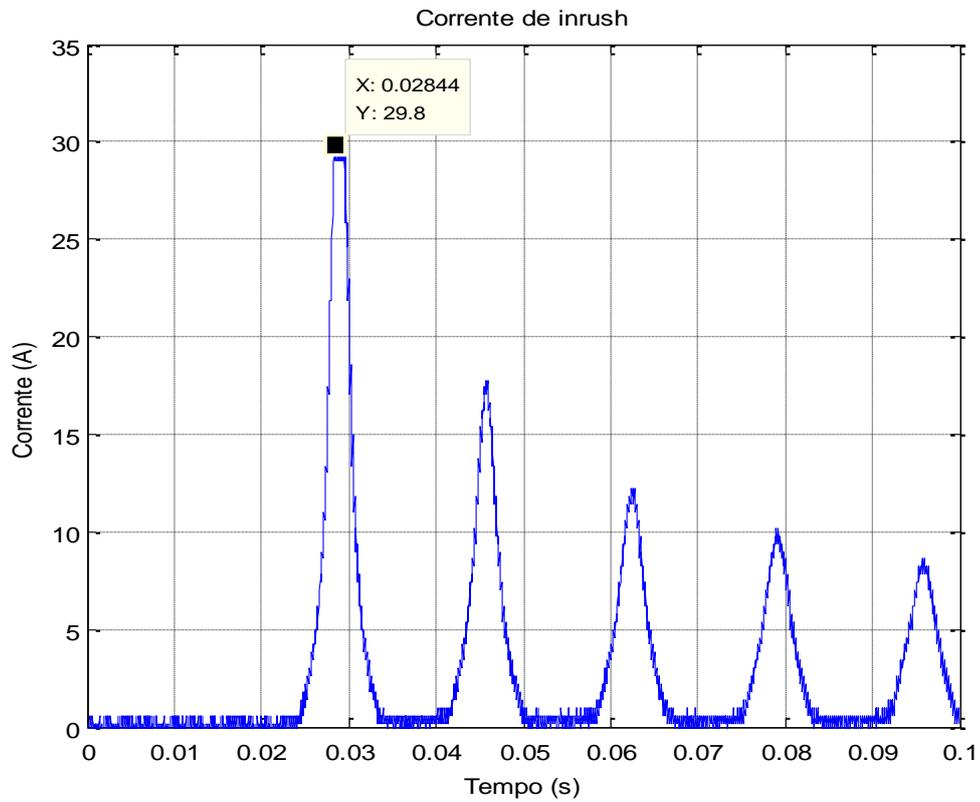


Figura 5.43 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.42

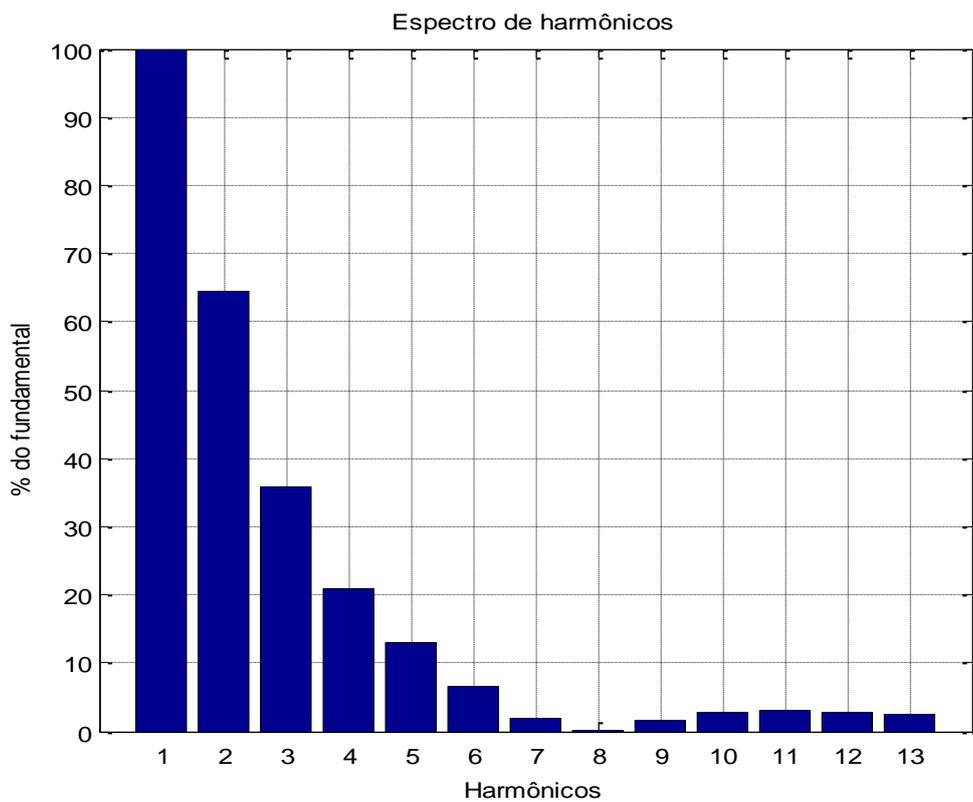


Figura 5.44 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.43

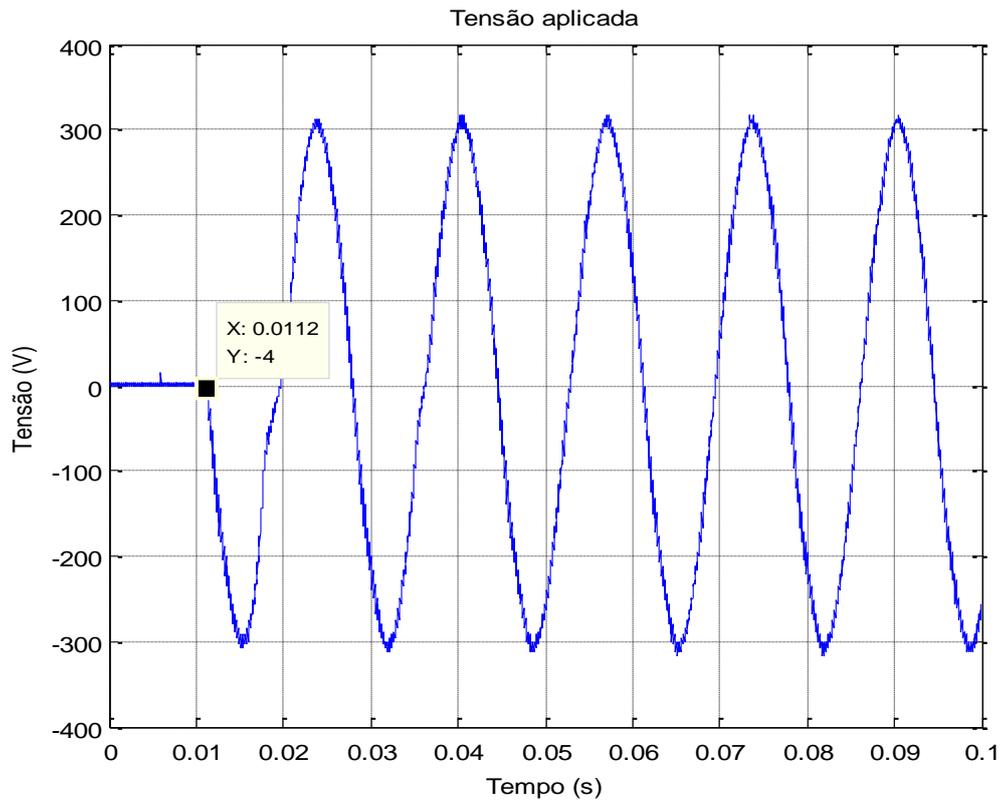


Figura 5.45 - Amplitude da tensão em -4V no instante de energização a vazio

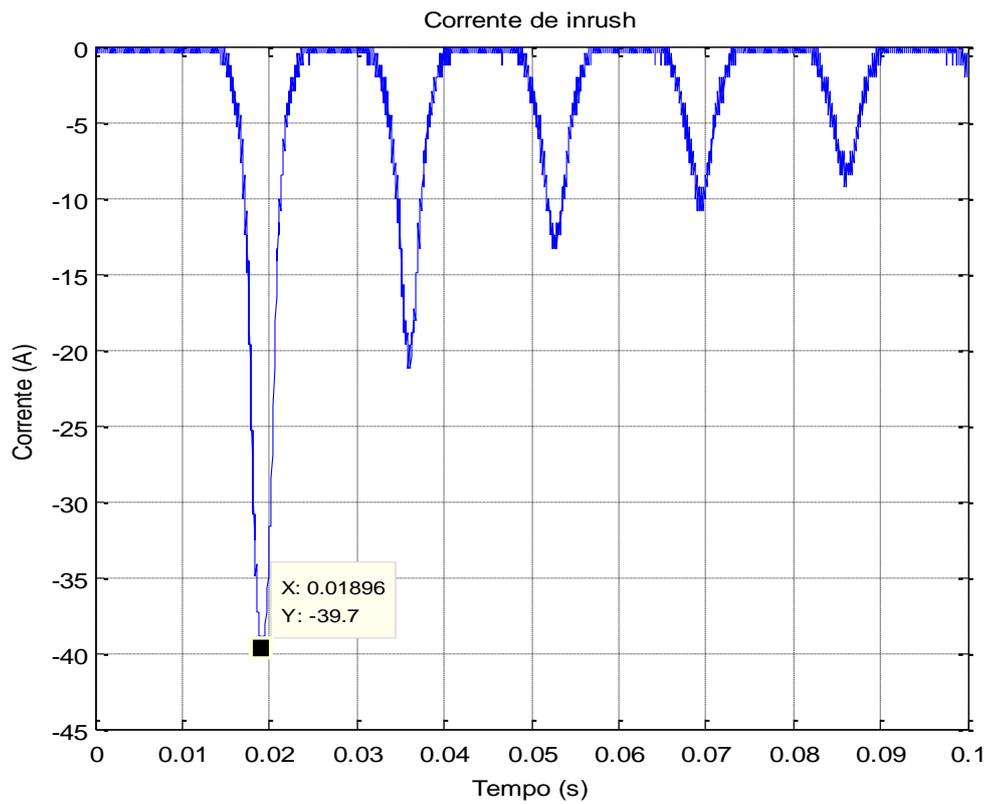


Figura 5.46 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.45

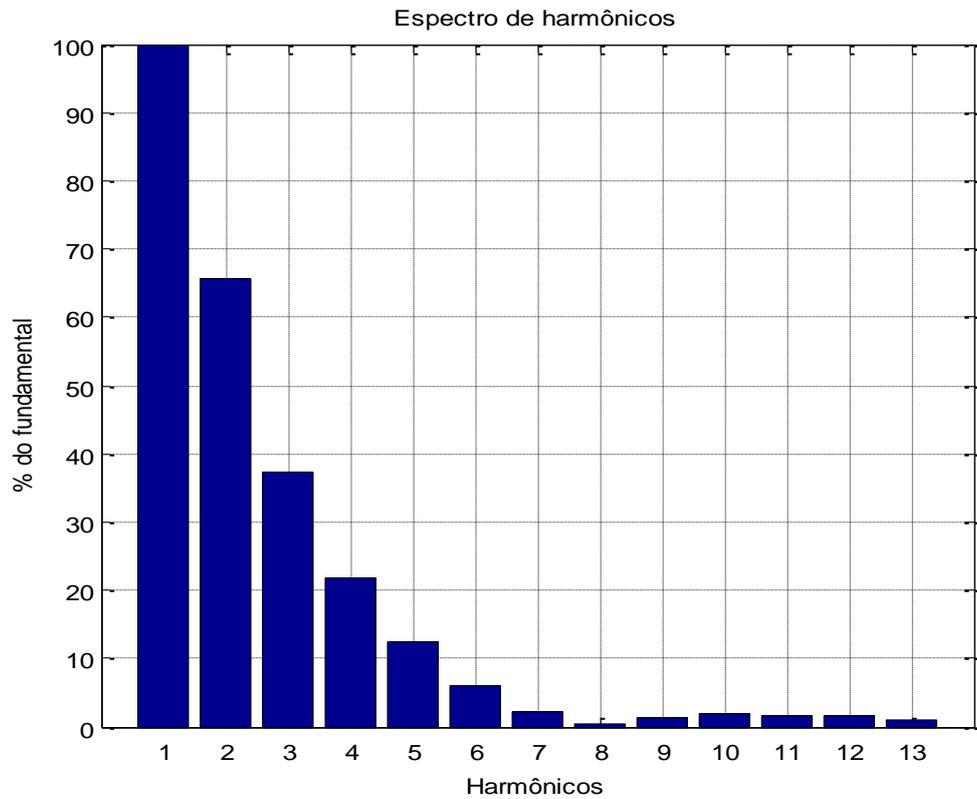


Figura 5.47 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.46

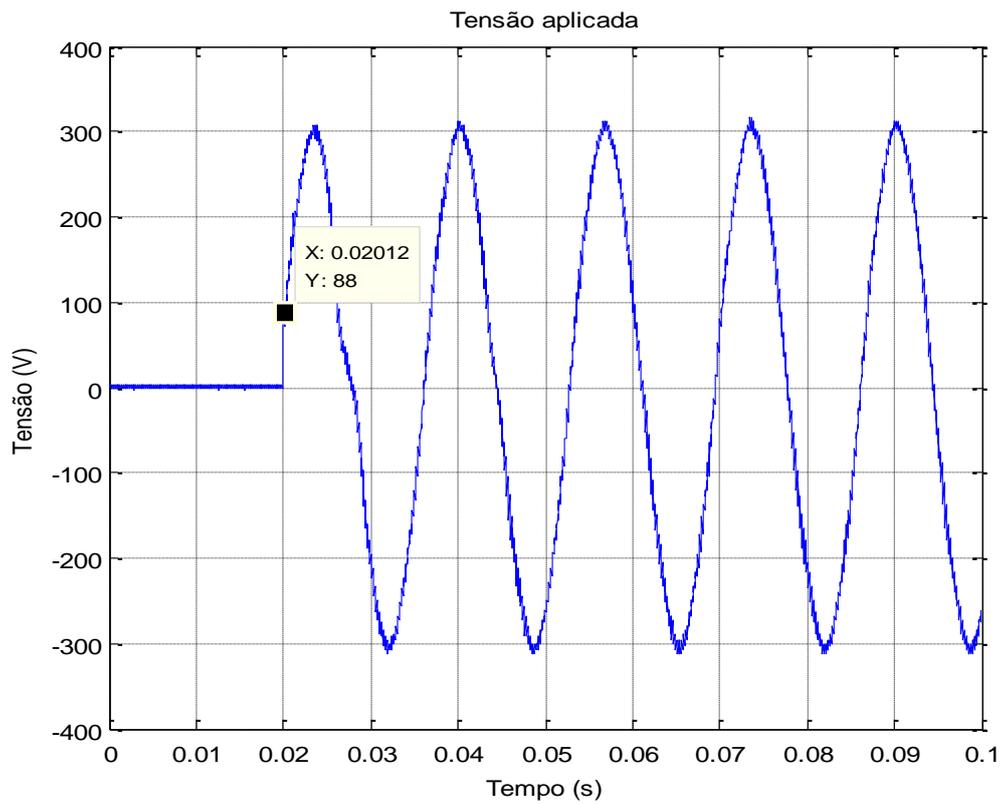


Figura 5.48 - Amplitude da tensão em 88V no instante de energização a vazio

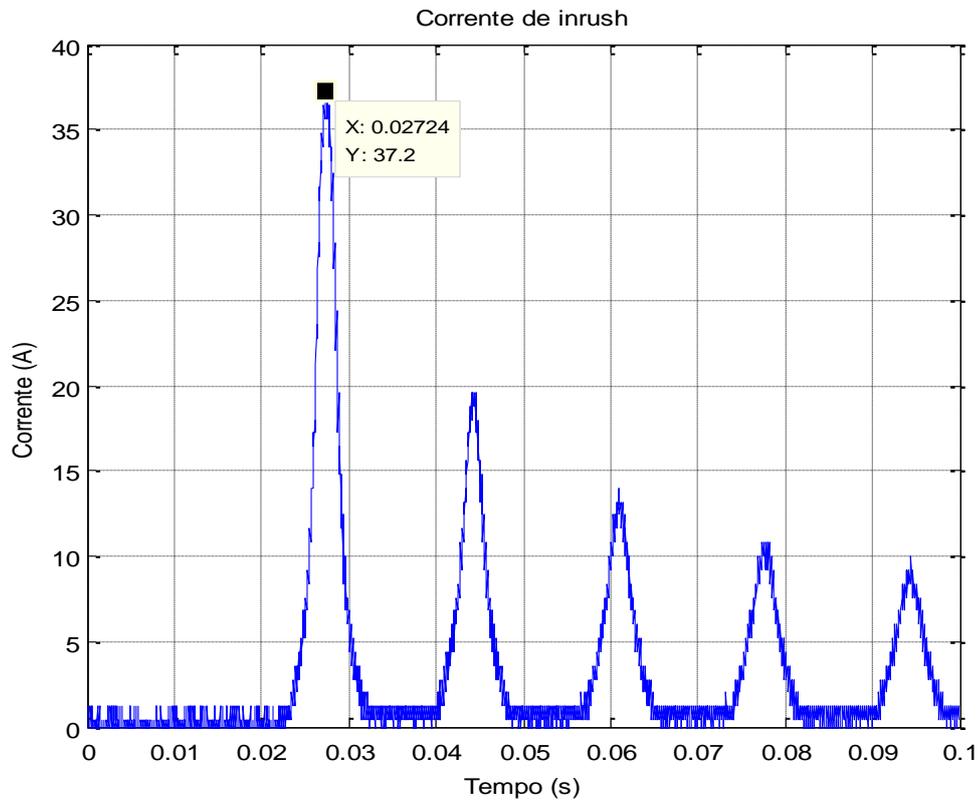


Figura 5.49 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.48

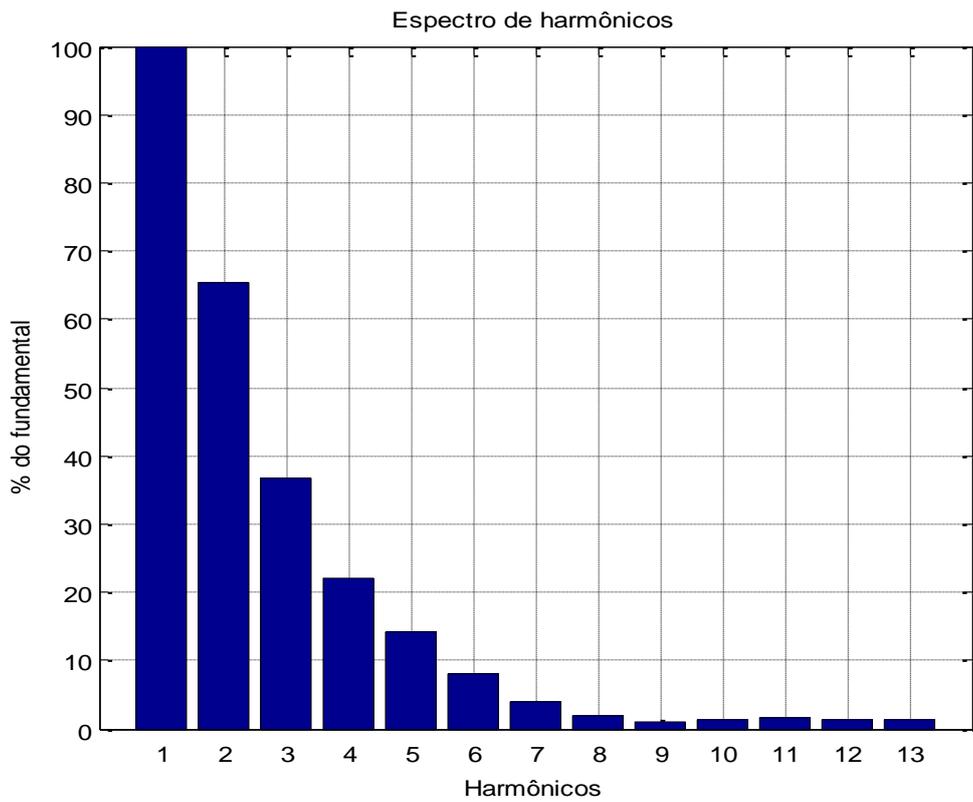


Figura 5.50 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.49

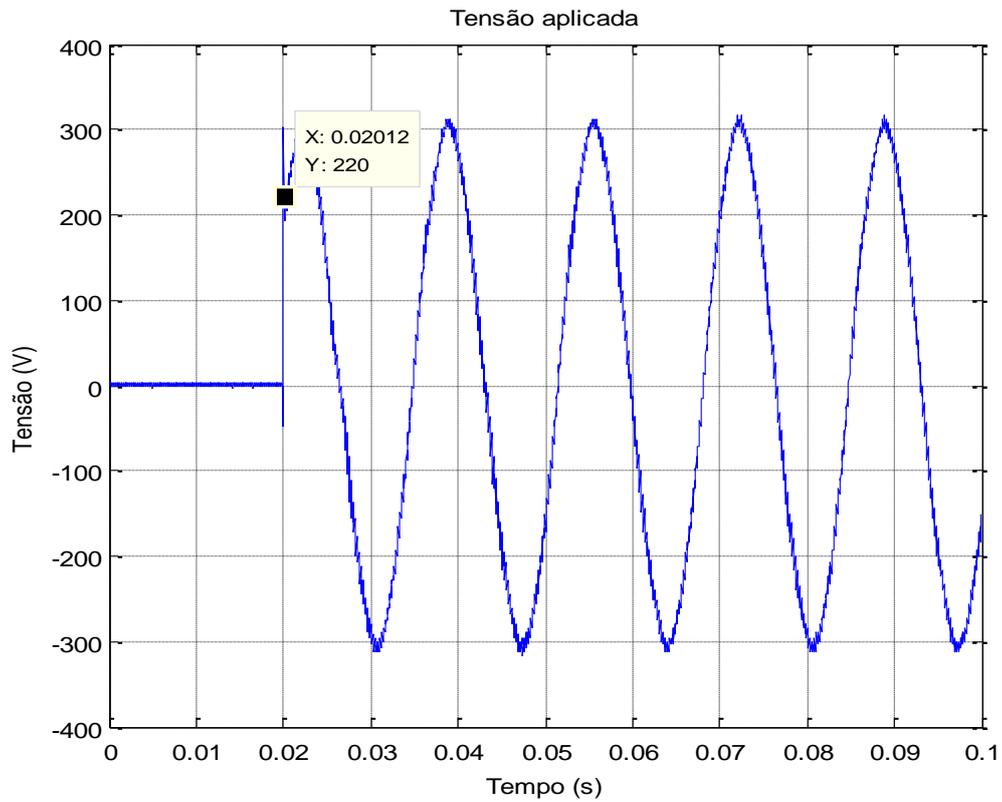


Figura 5.51 - Amplitude da tensão em 220V no instante de energização a vazio

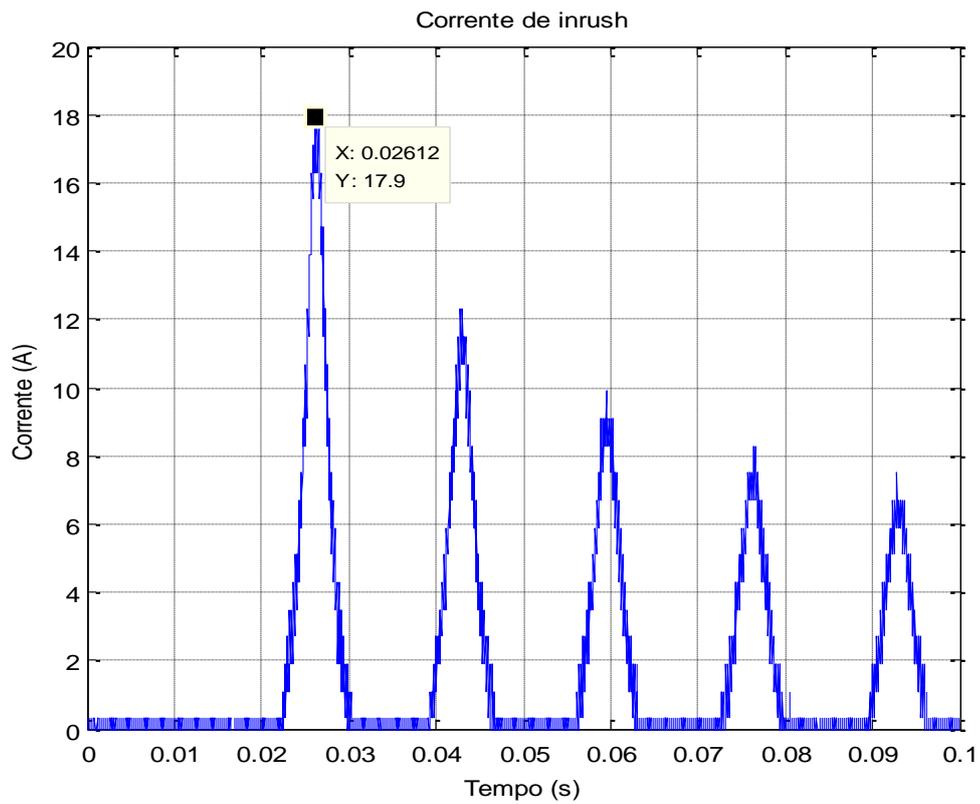


Figura 5.52 - Corrente de *inrush* para a tensão de energização mostrada na figura 5.51

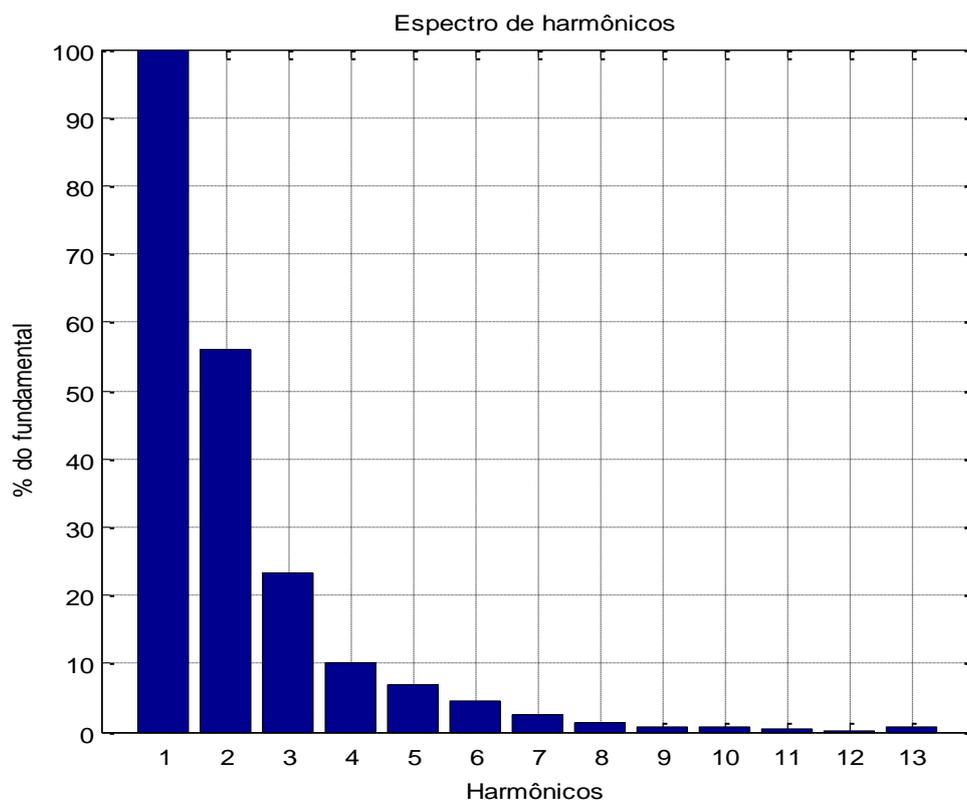


Figura 5.53 - Harmônicos da corrente de *inrush* mostrada na figura 5.52

Analisando-se os gráficos acima que mostram os ensaios de energização a vazio do transformador monofásico utilizado neste trabalho, pode-se observar:

- A influência do nível da tensão no instante da energização sobre o pico máximo atingido pela corrente de *inrush*. Sendo assim, observou-se que quando o nível da tensão estava próximo do seu valor de pico a corrente de *inrush* alcançou os menores valores de pico, ou seja, valores próximos aos nominais de operação do transformador. Este fato pôde ser observado nas figuras 5.33 e 5.34. Entretanto, quando o nível da tensão estava próximo ao seu valor mínimo a corrente de *inrush* alcançou os maiores valores de pico, chegando a atingir um valor pico de mais de oito vezes da corrente nominal de operação para o caso mostrado na figura 5.46 em que a amplitude da tensão estava em -4V no instante de energização.
- O rápido decaimento dos picos das correntes de *inrush* tendendo a atingir valores

nominais de operação em cerca de 0,1s. Esse fato é utilizado em esquemas de proteção para bloquear a atuação dos relés diferenciais nesse tempo de 0,1s, evitando-se assim a atuação indevida deste esquema durante a energização do transformador

- O predomínio do segundo harmônico nas correntes de *inrush*. Fato esse utilizado para que os esquemas de proteção que possuem relés com unidades de bloqueio de harmônicos possam fazer a diferenciação entre uma corrente de curto-circuito e uma corrente de *inrush*. Desta maneira, todos os casos de energização a vazio mostrados nas figuras acima apresentam no mínimo 50% de 2º harmônico em relação à amplitude da componente fundamental. Então, se neste transformador fosse empregado um esquema de proteção com um relé com unidade de bloqueio de harmônico, este não atuaria para nenhum dos casos mostrados acima, pois como foi citado anteriormente este relé só atua quando a componente de 2º harmônico for menor que 15%.

6. Conclusões

Com este trabalho foi possível observar a curva de histerese típica do transformador monofásico utilizado nos estudos e a variação desta de acordo com a tensão aplicada. Com isso pôde-se comprovar a eficácia do circuito RC integrador na determinação da curva de histerese de transformadores de pequeno porte.

Os parâmetros do circuito equivalente deste transformador foram determinados facilmente com a utilização do osciloscópio digital e suas medições automáticas. A análise da forma de onda da corrente de excitação mostrou o seu comportamento não-senoidal estando de acordo com os fundamentos teóricos discutidos neste trabalho. E, a análise dos harmônicos desta corrente comprovou que ela é composta de uma componente fundamental e uma série de harmônicos ímpares com predomínio do 3º e do 5º harmônico.

A análise das correntes de *inrush* mostrou a influência da amplitude da tensão no instante da energização no valor máximo de pico desta corrente podendo este, ser maior ou menor dependendo desta amplitude da tensão. Com a análise dos harmônicos dessa corrente foi comprovado o predomínio do segundo harmônico, utilizado para diferenciar uma corrente de *inrush* de uma corrente de curto-circuito nos esquemas de proteção. Com isso pôde-se comprovar a grande importância dos circuitos de avaliação de harmônicos de corrente, presentes nos esquemas de proteção, na função de evitar o desligamento indevido do transformador no instante de sua energização evitando, assim, a perda na qualidade da energia transmitida.

Pode-se destacar que, apesar do transformador utilizado nos ensaios ser um transformador de pequeno porte, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios para efeitos dos estudos em engenharia. Também vale ressaltar aqui a importância da precisão do osciloscópio digital na aquisição dos dados e gráficos utilizados neste trabalho.

7. Trabalhos futuros

Como trabalho futuro sugere-se a realização dos ensaios de energização em transformadores trifásicos, pois o presente estudo limitou-se a análise de um transformador monofásico. Dentre as possibilidades para estudos futuros pode-se destacar a realização de uma análise detalhada das correntes transitórias de magnetização em cada fase de um transformador trifásico. Como complemento, pode-se destacar a análise dos níveis de corrente para transformadores com diferentes níveis de potência.

8. Bibliografia

- [1] Oliveira, J.C., Cogo, J.R., Abreu, J.P.G. Transformadores Teoria e Ensaio. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984
- [2] Fitzgerald, A.E., Kingsley, C., Umans, S.D. Electric Machinery. 6ª ed. Nova Iorque: McGraw hill, 2003.
- [3] Martignoli, Alfonso. Transformadores. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.
- [4] Delgado, R.S. Estudo dos Requisitos Essenciais a Especificação de Transformadores de Potência em Condições Normais de Operação, Projeto de Graduação DEE – UFRJ, Março de 2010.
- [5] Guerra, F.C.F., Araújo, L.L., Medeiros, L.D.C. Correntes Transitórias de Magnetização em Transformadores de Potência – UFCG.
- [6] Kindermann, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 1ª ed. Florianópolis: Ed do autor, 2006. v.2.
- [7] León, F., Semlyen, A. A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995
- [8] Flach, Elton. Desempenho da Proteção Diferencial de Transformadores em Sistemas de Potência, Tese de Mestrado – COPPE, Setembro de 2008.
- [9] Toginho Filho, D.O., Laureto, E. Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral, Departamento de Física – Universidade Estadual de Londrina, Março de 2009
- [10] Manual do usuário do osciloscópio de armazenamento digital série TPS2000