



**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

ELAYNE HOLANDA MADRUGA

**REDUÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH* EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA MONOFÁSICOS**

**João Pessoa - PB
Junho - 2018**

ELAYNE HOLANDA MADRUGA

**REDUÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA MONOFÁSICOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Elétrica como um dos pré-requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.
Dr. Alexandre César de Castro.**

**João Pessoa - PB
Junho - 2018**

**Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

M183r Madruga, Elayne Holanda.

Redução da Corrente de Inrush em Transformadores de Potência Monofásicos / Elayne Holanda Madruga. - João Pessoa, 2018.

67 f.

Orientação: Alexandre César de Castro.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Correntes de Inrush. 2. Transitórios. 3. Chaveamento Controlado. 4. Transformador de Potência. 5. Sistemas de Energia. I. Castro, Alexandre César de. II. Título.

UFPB/BC

ELAYNE HOLANDA MADRUGA

**Redução da Corrente de *Inrush* em Transformadores de Potência
Monofásicos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de Aprovação: ___/___/___

Aprovado por:

**Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Dr. Nady Rocha (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa - PB
Junho - 2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus. Ele foi minha fonte de força e coragem para persistir durante todos os dias ao longo desses 5 anos de curso e, especialmente, nessa reta final. Por meio Dele e por causa Dele, eu cheguei até aqui. Ele, que foi meu refúgio e minha fortaleza, caminhou ao meu lado e, hoje, me faz ver as suas promessas se cumprirem em minha vida. Sou imensamente grata, também, a Maria Santíssima, minha Mãezinha do céu, que me fez sentir seu amor e sua proteção diariamente nas pequenas coisas. Ela me sustentou e me conduziu em todos os momentos até aqui.

Agradeço à minha mãe, Elanne, que é minha grande referência de garra e determinação e sempre foi meu maior exemplo de perseverança. Foi vendo ela lutar que eu aprendi a nunca desistir, por nada nem por ninguém. Devo à ela toda a gratidão do mundo por nunca ter medido esforços para fazer o melhor para mim. Ela é o verdadeiro motivo que me impulsiona a continuar batalhando e lutando sempre pelo melhor, para que, um dia, eu possa retribuir pelo menos um pouco de tudo que ela já fez por mim.

Sou grata, também, ao meu irmão, Neto, que com seu jeito, às vezes meio doce, às vezes meio marrento, me faz ter certeza de que eu nunca estarei sozinha na vida. Agradeço por tantas vezes ele ter assumido responsabilidades em casa com o intuito de aliviar a minha rotina e de me deixar livre para terminar este trabalho de conclusão. Agradeço, ainda, ao meu pai, Bosco, que, mesmo de longe, sempre me incentivou e se orgulhou das minhas conquistas. A torcida dele pelo meu sucesso me estimula a persistir.

Sou infinitamente grata a Alexandre, meu orientador e amigo, por ter me proposto esse tema que foi tão desafiante e por ter acreditado que eu conseguiria estudá-lo e desempenhá-lo com competência. Agradeço pela imensa paciência que teve com as minhas exigências e pela atenção que sempre dedicava ao me ouvir e me orientar. Meus agradecimentos a ele vão muito além deste trabalho de conclusão, sou muito agradecida por tantos conselhos que me auxiliaram no curso e que, certamente, me ajudarão por toda a vida.

Agradeço ao professor Rogério Gaspar, que sempre se mostrou tão solícito em me ajudar no que fosse preciso. Toda a minha gratidão a ele pelo empenho em me auxiliar nas simulações deste trabalho e por sempre direcionar a mim palavras de incentivo e conforto que me davam um novo ânimo. Agradeço, também, ao professor Nady Rocha, por ter aceito, há tanto tempo,

o convite para participar da minha banca e por ser um exemplo de professor humano e íntegro que faz o curso de Engenharia Elétrica na UFPB valer à pena.

Toda a gratidão do mundo ao meu grande amigo Jordan, que foi fundamental para este trabalho acontecer. Com seus conhecimentos de eletrônica, ele me ajudou a desenvolver e a colocar em prática a principal parte deste trabalho. A disponibilidade e a disposição de Jordan em sempre querer me ajudar foram comoventes e me fizeram ter a certeza de que eu saio desse curso com uma amizade que levarei para sempre. Jordan acredita mais em mim do que eu mesma e eu não consigo me recordar de nenhum momento que ele não tenha me incentivado a prosseguir. Jordan é, na minha vida, um anjo que Deus me enviou em forma de amigo.

Agradeço a Fernanda, minha querida amiga, que, embora tenha estado numa rotina tão corrida nesse último semestre, ainda conseguiu tempo para me ajudar neste trabalho com o *layout* da placa que foi projetada. Sou grata a ela pela amizade verdadeira e por se fazer tão presente mesmo com uma rotina tão diferente da minha. Agradeço, ainda, ao meu namorado, Beбето, por ter sido tão compreensivo nesse último semestre e por ter entendido minhas ausências. Sou grata a ele por toda a paciência que a mim dedica, por todo o amor que a mim devota e por toda a confiança que em mim deposita.

Agradeço ao professor Isaac Freitas, por ter sido bastante compreensível com algumas ausências minhas no nosso projeto de iniciação científica, que foram necessárias para a finalização deste trabalho de conclusão, e por continuar confiando plenamente no meu trabalho. Sou grata, também, a tantos professores e técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica que foram imprescindíveis na minha formação e agradeço, principalmente, por muitos deles terem me auxiliado de alguma forma neste trabalho.

Minha gratidão, por fim, é para todas as pessoas que fazem parte do meu dia-a-dia, que entenderam meus sumiços repentinos, mas que sempre estiveram presentes na minha vida durante esse tempo e torceram pelas minhas conquistas: André Lucena, Bruna Denise, Dannyel Delgado, Edward Carvalho, Francisco Lúcio, Hugo Souto, Julienne Pontes, Larissa Dias, Letícia Maia, Luís Andrade, Marcos Victor, Priscilla Gambarra, Thaís Rodrigues. A todos, o meu muito obrigada!

“Eu não falhei. Apenas descobri 10 mil maneiras que não funcionam.”

Thomas Edison.

RESUMO

Corrente de *inrush* é a corrente que surge no instante de energização do transformador. Embora seu tempo de duração seja curto, seu valor pode ser muito superior ao valor de corrente nominal e isso pode ocasionar defeitos que são capazes de diminuir a vida útil do transformador e afetar o funcionamento do sistema elétrico. Devido a isso, foram estudados e apresentados alguns métodos comumente adotados para redução do pico da corrente de *inrush*. Após analisar todas as técnicas, escolheu-se implementar o método para chaveamento controlado com base no valor de pico da tensão. Desenvolveu-se um mecanismo para realizar esse controle; tal mecanismo foi testado por meio de simulações nos *softwares* Proteus e MATLAB® e, posteriormente, através de procedimentos experimentais em laboratório. As simulações e os experimentos realizados comprovaram a eficácia do controle projetado, pois mostraram que, de fato, o *inrush* tem seu valor reduzido quando se energiza o transformador no pico da tensão da rede. Entretanto, apesar da diminuição, percebeu-se que, algumas vezes, o valor do *inrush* não é completamente eliminado devido à existência de magnetismo residual em transformadores previamente energizados.

Palavras-Chaves: Correntes de *Inrush*. Transitórios. Chaveamento Controlado. Transformador de Potência. Sistemas de Energia.

ABSTRACT

Inrush current is the current that arises at the moment of energizing the transformer. Although its duration is short, its value can be much higher than the nominal current value and this can cause defects that are capable of shortening the life of the transformer and affecting the operation of the electrical system. Due to this, some commonly adopted methods for reducing the peak of the inrush current were studied and presented. After analyzing all the techniques, it was decided to implement the method for controlled switching based on the peak voltage value. A mechanism was developed to carry out this control; this mechanism was tested through simulations in the Proteus and MATLAB® software and, later, through experimental procedures in the laboratory. The simulations and the experiments carried out proved the effectiveness of the designed control, since they showed that, in fact, the inrush has its value reduced when the transformer is energized at the peak of the mains voltage. However, in spite of the decrease, it has been observed that, sometimes, the value of the inrush is not completely eliminated due to the existence of residual magnetism in previously energized transformers.

Keywords: Inrush Current. Transitory. Controlled Switching. Power transformer. Power Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito equivalente de um transformador em vazio.....	18
Figura 2 - Comportamento do fluxo em função do tempo.	20
Figura 3 - Relação entre fluxo magnético e corrente de magnetização.....	20
Figura 4 - Defasagem entre formas de onda da tensão, do fluxo e da corrente de magnetização.	21
Figura 5 - Formas de onda quando o transformador é energizado no pico de tensão positivo.	22
Figura 6 - Formas de onda quando o transformador é energizado na tensão zero.	23
Figura 7 - Decaimento da corrente de inrush devido à resistência do enrolamento.....	23
Figura 8 - Circuito com resistores de pré-inserção.....	30
Figura 9 - Instantes de energização para alcance de baixa corrente de inrush.	33
Figura 10 - Diagrama de blocos simplificado do circuito de controle.	35
Figura 11 - Circuito medidor de tensão com amostrador.	35
Figura 12 - Mecanismo de controle projetado para chaveamento na tensão máxima.	37
Figura 13 - Exemplo de corrente lida pelo sensor e tensão proporcional fornecida na saída. .	38
Figura 14 - Exemplo de saída do amplificador operacional em relação à tensão de saída do sensor.....	39
Figura 15 - Exemplo de saída do flip-flop em relação à tensão de saída do amplificador.....	41
Figura 16 - Tensão da rede e gatilho do transformador no ponto de tensão zero.....	44
Figura 17 - Resultado da simulação da corrente i_p sem controle de chaveamento.	45
Figura 18 - Corrente do circuito de comando e saída do sensor em simulação.	46
Figura 19 - Saída do sensor e saída do comparador em simulação.	46
Figura 20 - Saída do comparador e saída do flip-flop em simulação.....	47
Figura 21 - Tensão da rede e disparo do TRIAC em simulação.....	48
Figura 22 - Tensão da rede e disparo do gatilho em simulação no MATLAB®.	48
Figura 23 - Resultado da simulação da corrente i_p com controle de chaveamento.....	49
Figura 24 - Montagem do circuito para energização do transformador sem controle do chaveamento.	50
Figura 25 - Resultado experimental da corrente i_p sem controle de chaveamento.	51
Figura 26 - Placa do circuito projetado para comando do chaveamento.....	52
Figura 27 - Montagem completa do circuito de chaveamento do transformador.....	52

Figura 28 - Corrente do circuito de comando e saída do sensor em experimento.....	53
Figura 29 - Saída do sensor e saída do comparador em experimento.	53
Figura 30 - Saída do comparador e saída do flip-flop em experimento.	54
Figura 31 - Tensão da rede e disparo do TRIAC em experimento.....	55
Figura 32 - Resultado experimental da corrente i_p com controle de chaveamento.....	55
Figura 33 - Resultado experimental da corrente i_p sem controle em transformador recentemente energizado.....	56
Figura 34 - Resultado experimental da corrente i_p com controle em transformador recentemente energizado.....	57
Figura 35 - Resultado em simulação da corrente i_p sem controle em transformador recentemente energizado.....	58
Figura 36 - Resultado em simulação da corrente i_p com controle em transformador recentemente energizado.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	O fenômeno da corrente de <i>inrush</i>	17
2.1.1	O fenômeno de <i>inrush</i> via análise matemática	17
2.1.2	O fenômeno de <i>inrush</i> via análise gráfica	21
2.2	Fatores que alteram as características da corrente de <i>inrush</i>	24
2.3	Efeitos indesejados provocados pela corrente de <i>inrush</i>	26
2.3.1	Fadiga mecânica nos enrolamentos	26
2.3.2	Deterioração da isolação	27
2.3.3	Afundamentos temporários da tensão alimentadora.....	27
2.3.4	Má operação do relé diferencial de proteção	28
3	REVISÃO DA LITERATURA	29
3.1	Resistores de pré-inserção	29
3.2	Termistores NTC	30
3.3	Capacitores em paralelo	31
3.4	<i>Air Gap</i> virtual	32
3.5	Controle do chaveamento	32
3.5.1	Controle do chaveamento por meio do fluxo residual.....	32
3.5.2	Controle do chaveamento por meio do valor da tensão.....	34
4	MÉTODO PROPOSTO PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	37
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	43
5.1	Simulação e resultados sem controle do chaveamento	44
5.2	Simulação e resultados com controle do chaveamento	45

6	MONTAGEM EXPERIMENTAL E RESULTADOS	50
6.1	Montagem experimental e resultados sem controle do chaveamento	50
6.2	Montagem experimental e resultados com controle do chaveamento	51
7	CONCLUSÃO	59
8	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A	64
	APÊNDICE B.....	66
	APÊNDICE C	67

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência possuem importância fundamental para o funcionamento dos sistemas elétricos de corrente alternada. Devido a isso, é necessário protegê-los dos fenômenos que podem comprometer o seu bom desempenho. De acordo com Santilio *et al.*(2013), a energização dos transformadores costuma gerar altos fluxos dinâmicos em seu núcleo, o que ocasiona a saturação de uma ou mais colunas do núcleo e, por consequência, o surgimento de elevadas correntes de magnetização, também conhecidas como correntes de *inrush* ou correntes de partida dos transformadores.

As correntes de *inrush* são transitórias e circulam apenas no enrolamento primário do transformador. Elas possuem vasto espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e produzem efeitos indesejáveis ao transformador. Alguns desses efeitos são: fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração da isolação, afundamentos temporários da tensão alimentadora e má operação do relé diferencial de proteção. Os dois primeiros ocasionam diminuição da vida útil do equipamento, enquanto os dois últimos afetam a qualidade da energia elétrica do sistema (APOLÔNIO *et al.*, 2005).

A forma de onda, a duração e o valor da corrente de *inrush* dependem de fatores como: tamanho do transformador, impedância do sistema atrás do transformador, propriedades magnéticas do material do núcleo, fluxo remanescente (ou residual) no núcleo, valor instantâneo da tensão quando o transformador é energizado e maneira como é realizada a energização. No entanto, independente das características que essa corrente assume, seu valor é muitas vezes superior ao da corrente nominal do transformador e, por isso, é frequentemente confundida com correntes de curto-circuito, o que pode resultar em desligamento indevido na energização (MARDEGAN, 2010).

Devido ao que foi explicitado, muitos pesquisadores como Prikler *et al.*(2003), Arand *et al.* (2013), Mirkalaei e Hashiesh (2015) e Agasti *et al.* (2016) têm se preocupado em estudar maneiras de reduzir a magnitude da corrente de *inrush*. Há, portanto, uma necessidade de se aprofundar nas técnicas de controle da corrente de energização a fim de minimizá-la, para evitar, assim, maiores danos ao sistema elétrico de potência. Por isso, neste trabalho, será abordado, detalhadamente, o fenômeno da corrente de *inrush* e serão estudados diferentes métodos para a diminuição dos seus valores. Um dos métodos estudados, o do chaveamento controlado no pico da tensão, será submetido a simulações computacionais no *software* Proteus e no ambiente *Simulink* do *software* MATLAB® e, em seguida, será verificado experimentalmente em laboratório.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso são divididos em objetivos gerais e específicos conforme descrito nos tópicos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar um método eficiente para diminuição da corrente de *inrush* em transformadores de potência.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar o método de energização dos transformadores no pico de tensão para diminuir o fenômeno de *inrush* em um transformador de potência monofásico;
- Simular, no *software* Proteus e no ambiente *Simulink* do *software* MATLAB®, a energização do transformador monofásico com o método determinado e, em seguida, realizar montagem experimental em laboratório para verificar a efetividade de tal método.

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: São apresentados a introdução e os objetivos do desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 2: É feita uma fundamentação teórica do fenômeno de *inrush*;
- Capítulo 3: É abordada uma revisão da literatura dos principais métodos para diminuição da corrente de *inrush*;
- Capítulo 4: É explicado o método proposto pela autora deste trabalho para redução da corrente de *inrush* em transformadores monofásicos;
- Capítulo 5: São apresentados os modelos e os resultados das simulações do fenômeno de *inrush* e do método proposto para sua redução;
- Capítulo 6: É apresentada a montagem experimental e seus resultados para redução da corrente de *inrush*;

- Capítulo 7: É exposta a conclusão, mostrando os objetivos que foram alcançados;
- Capítulo 8: São exibidas todas as referências utilizadas;
- Por fim, são apresentados os apêndices do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em condições operacionais estacionárias, um transformador possui uma relação definida de tensão, corrente e frequência. No entanto, enquanto ainda não se encontra nessa condição, aparecem situações transitórias que modificam o comportamento do transformador. Como já foi visto, um dos transientes presentes é a corrente de magnetização ou corrente de *inrush*.

Apesar de não ter duração prolongada, esses transientes podem produzir efeitos negativos no núcleo e no isolamento de transformadores devido à alta corrente e fluxo. Isso pode comprometer o sistema elétrico como um todo e, portanto, é necessário que se trabalhe para diminuir a magnitude dessa corrente. Nesta seção, serão explicados, de maneira mais detalhada, o fenômeno da corrente de *inrush* e os efeitos provocados por tal corrente.

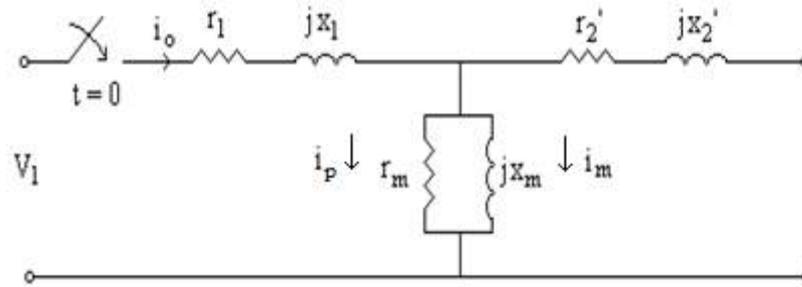
2.1 O fenômeno da corrente de *inrush*

O fenômeno da corrente de *inrush* pode ser explicado de duas formas: via análise matemática ou via estudo gráfico. Nesta seção, serão mostrados os dois casos para que haja maior facilidade de compreensão do fenômeno.

2.1.1 O fenômeno de *inrush* via análise matemática

O circuito equivalente de um transformador em vazio é representado na Figura 1 a seguir. Nela, r_1 e x_1 representam, respectivamente, a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento primário, r_m é a resistência de magnetização que simboliza as perdas no núcleo, x_m a reatância de magnetização e r'_2 e x'_2 indicam, respectivamente, a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento secundário referidas ao primário. V_1 retrata a tensão de alimentação do transformador e t o tempo em que a chave é fechada para que ocorra a energização.

Figura 1 - Circuito equivalente de um transformador em vazio.



Fonte: (Adaptada de Lisita, 2000).

Aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) no circuito da Figura 1, obtém-se a seguinte equação:

$$V_1 = r_1 \cdot i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt'} + N_1 \frac{d\phi'}{dt'} \quad (1)$$

Onde:

i_0 é a corrente de excitação;

L_1 é a indutância do enrolamento primário;

N_1 é o número de espiras do enrolamento primário;

ϕ é o fluxo magnético.

De acordo com Sil (2009), quando o lado secundário do transformador está sem carga, ele drena apenas a corrente de excitação, i_0 , da rede de alimentação. Uma parcela dessa corrente, i_p , é destinada a suprir as perdas magnéticas do núcleo, enquanto a outra parte, i_m , é responsável pela magnetização do núcleo, ou seja, tem a função de auxiliar na produção do fluxo magnético, ϕ . Existe uma relação não-linear entre i_0 e ϕ e, devido a essa não-linearidade, é preciso fazer algumas aproximações para obter a corrente de excitação, i_0 , e, por consequência, a corrente de magnetização, i_m .

Oliveira *et al.* (1984) e Lisita (2000) afirmam que, como aproximação inicial, os dois primeiros termos da equação (1) podem ser desprezados. Nesse caso, a tensão de alimentação, V_1 , será igual à tensão do ramo de magnetização, denominada de e_1 , que também é conhecida como força contra-eletromotriz de um transformador. Assim, tem-se:

$$V_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi'}{dt'} \quad (2)$$

Sabe-se, ainda, que a tensão da fonte, V_1 , pode ser representada, em sua forma senoidal, por $V_{1m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha)$. Ent\~{a}o, pode-se escrever:

$$V_{1m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\phi'}{dt'} \quad (3)$$

Integrando a equa\~{c}\~{a}o (3), tem-se:

$$\int_0^t V_{1m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha) dt' = \int_{\phi_0}^{\phi} N_1 d\phi'$$

$$-\frac{V_{1m\acute{a}x}}{N_1 \cdot \omega} \cdot \cos(\omega t' + \alpha) \Big|_0^t = \phi' \Big|_{\phi_0}^{\phi} \quad (4)$$

No entanto, tem-se o conhecimento da seguinte rela\~{c}\~{a}o:

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{V_{1m\acute{a}x}}{N_1 \cdot \omega} \quad (5)$$

Assim, desenvolvendo a equa\~{c}\~{a}o (4) e substituindo (5) em (4), chega-se a:

$$\phi = \phi_0 + \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\alpha) - \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (6)$$

O termo $\phi_0 + \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\alpha)$ representa o amortecimento para os casos reais, enquanto o $\phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega t + \alpha)$ configura o regime permanente. Segundo Brunke (1998), o primeiro termo tamb\~{e}m simboliza a componente assim\~{e}trica do fluxo e, muitas vezes, o ϕ_0 \~{e} indicado como sendo o fluxo residual (ϕ_{residual}).

Para visualizar o fen\~{o}meno da corrente de *inrush* a partir da equa\~{c}\~{a}o (6), faz-se algumas suposi\~{c}\~{o}es arbitr\~{a}rias, como $\phi_0 = 0,27 \cdot \phi_{m\acute{a}x}$ e $\alpha = 64^\circ$. Assim, substituindo esses valores, obt\~{e}m-se:

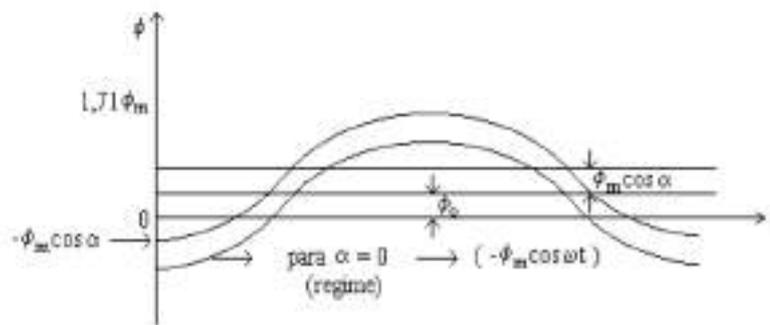
$$\phi = 0,27 \cdot \phi_{m\acute{a}x} + 0,438 \cdot \phi_{m\acute{a}x} - \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega t + 64^\circ) \quad (7)$$

Deseja-se alcançar, a partir da equação (7), o valor de pico. Nesse caso, o termo $\cos(\omega t + 64^\circ)$ será igual a -1. Tem-se, então, aproximadamente:

$$\phi_{\text{pico}} = 1,71 \cdot \phi_{\text{máx}} \quad (8)$$

Diante das suposições feitas e das equações obtidas a partir delas, é possível ilustrar o comportamento do fluxo em função do tempo. Isso pode ser visto na Figura 2.

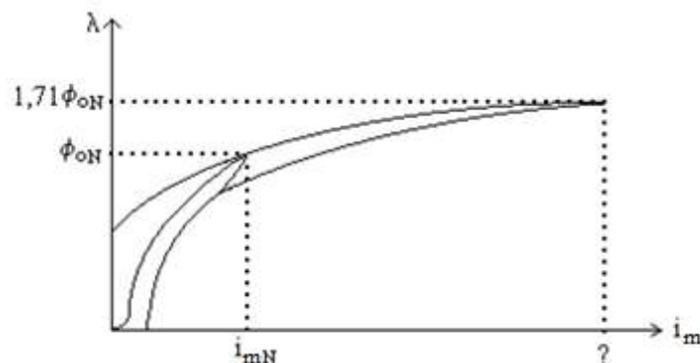
Figura 2 - Comportamento do fluxo em função do tempo.



Fonte: (Lisita, 2000).

Como já foi mencionado, o fluxo deve ser produzido pela corrente de magnetização, i_m , e, na Figura 2, vê-se que o valor de pico do fluxo é relativamente alto; assim, pela relação $\phi = f(i_m)$, observa-se que é necessária uma grande corrente nos primeiros instantes da energização do transformador. Para um pequeno aumento de fluxo no núcleo, precisa-se de uma grande corrente, devido ao fenômeno de saturação, que pode ser visto na Figura 3. A grande corrente exigida é denominada corrente de *inrush* ou corrente de avalanche.

Figura 3 - Relação entre fluxo magnético e corrente de magnetização.



Fonte: (Adaptada de Lisita, 2000).

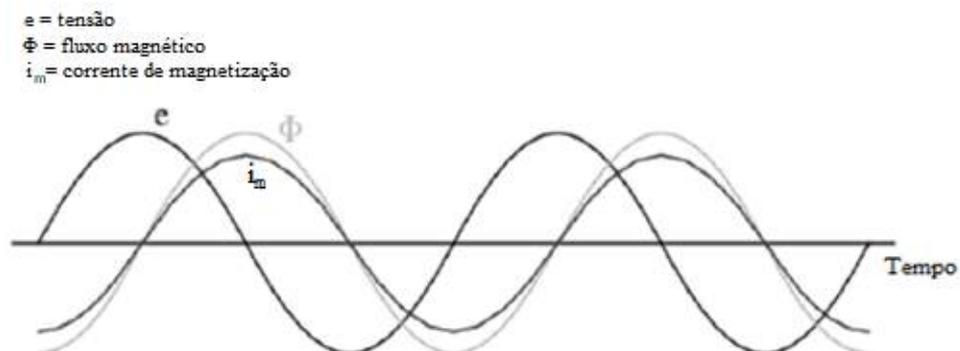
Assim, foi possível visualizar, através do equacionamento desenvolvido, a forma como surgiu a corrente de *inrush*. Com os dados desse exemplo, o fluxo alcançou um valor 1,71 vezes maior que o original, mas poderia ter sido ainda maior dependendo do ângulo de chaveamento e do fluxo residual. Quanto maior o fluxo, maior a corrente de *inrush*, cujo valor de pico é, comumente, várias vezes superior ao da corrente nominal do transformador.

2.1.2 O fenômeno de *inrush* via análise gráfica

Para fazer uma análise gráfica do aparecimento da corrente de *inrush*, é necessário conhecer as formas de onda assumidas pela tensão, pelo fluxo e pela corrente de magnetização ao longo do tempo. Antes de falar sobre as formas de onda propriamente ditas, é preciso saber que o valor preciso da tensão senoidal aplicada no instante em que o interruptor é fechado para energização do transformador pode ser qualquer coisa entre zero e seu pico, dependendo do instante de comutação. Além disso, a tensão pode estar subindo ou caindo e pode ter qualquer polaridade num determinado instante (SIL, 2009).

Sil (2009) afirma, ainda, que a taxa de variação de fluxo instantâneo em um núcleo de transformador é proporcional à tensão instantânea aplicada no enrolamento primário. A forma de onda de tensão é a derivada do tempo da forma de onda do fluxo e, em um transformador de operação contínua, essas duas formas de onda são defasadas em 90° . Uma vez que o fluxo é proporcional à força magnetomotriz no núcleo, e a força magnetomotriz é proporcional à corrente de magnetização, a forma de onda da corrente está em fase com a forma de onda do fluxo, e ambos estão atrasados em 90° em relação à forma de onda da tensão. Isso é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Defasagem entre formas de onda da tensão, do fluxo e da corrente de magnetização.



Fonte: (Adaptada de Sil, 2009).

Conhecendo essas formas de onda, serão feitas, agora, duas análises distintas, de acordo com o instante de tempo em que a chave é fechada para energização. Supõe-se, inicialmente, que o enrolamento primário do transformador é repentinamente conectado a uma fonte de tensão alternada no exato momento em que a tensão está em seu valor de pico positivo. Segundo Sil (2009), para que o transformador gere uma tensão oposta a fim de se equilibrar com a tensão aplicada, um fluxo magnético de valor crescente deve ser gerado. O resultado é que a corrente de enrolamento, inicialmente com valor nulo, também aumenta junto com o fluxo. Isso pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Formas de onda quando o transformador é energizado no pico de tensão positivo.

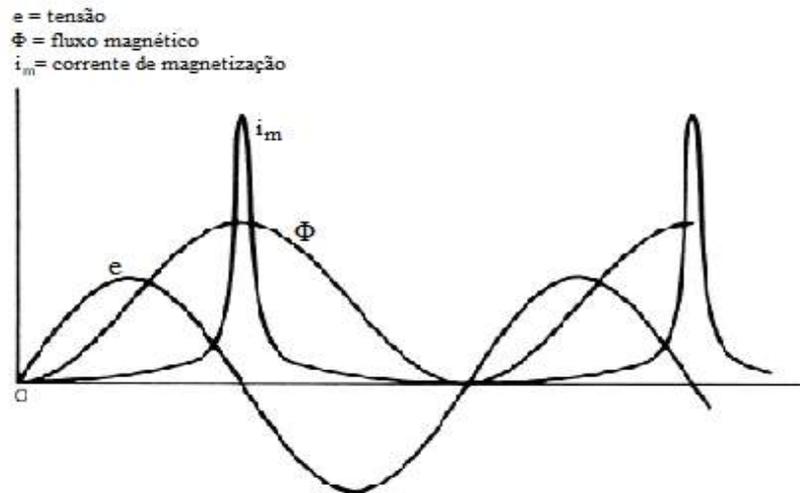


Fonte: (Adaptada de Sen, 2013).

Nesse caso, tanto o fluxo do núcleo quanto a corrente da bobina começam a partir do zero e apresentam os mesmos valores de pico que possuem durante o funcionamento normal contínuo, ou seja, não há transiente no fluxo e na corrente. Dessa forma, pelo fato de as ondas de fluxo e corrente estarem defasadas em 90° da onda de tensão, quando o transformador é energizado com a tensão no pico, os valores de fluxo e corrente estão em zero; assim, não há surgimento de *inrush* neste cenário e o sistema está em estado estacionário desde o começo (SIL, 2009).

Supõe-se, agora, uma segunda situação em que o enrolamento primário do transformador é repentinamente conectado a uma fonte de tensão alternada no momento em que a tensão está em seu valor zero. De acordo com Sil (2009), com o passar do tempo, à medida que a tensão começa a aumentar para atingir o pico positivo, o fluxo e a corrente se acumulam a taxas de mudanças positivas e, quando atingem seus picos positivos, a tensão desce para um nível zero. Isso pode ser visto na Figura 6.

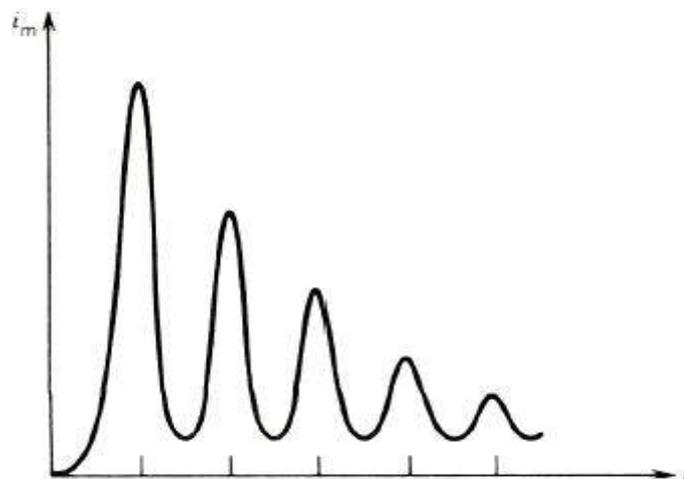
Figura 6 - Formas de onda quando o transformador é energizado na tensão zero.



Fonte: (Adaptada de Sen, 2013).

Segundo Sen (2013), ao final da primeira metade do ciclo de tensão, o fluxo atinge o dobro do seu valor de pico normal e a corrente de magnetização é muito grande por causa da saturação do núcleo. Dessa forma, para essa segunda suposição, os valores de fluxo e corrente são muito altos, surgindo, assim, a corrente de *inrush* nesta situação. Na prática, devido à resistência do enrolamento, a corrente de *inrush* irá decair rapidamente. No entanto, mesmo que ela decaia rapidamente, ela pode provocar danos e comportamentos inesperados no transformador e no sistema elétrico, como, por exemplo, a atuação errônea do dispositivo de proteção. Uma ilustração do seu decaimento pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Decaimento da corrente de *inrush* devido à resistência do enrolamento.



Fonte: (Sen, 2013).

Embora decaiam rapidamente na maior parte das vezes, as correntes de *inrush* podem durar dezenas de segundos e, de maneira geral, os responsáveis por instalações que contenham transformadores, especialmente as concessionárias de energia elétrica, estão mais interessados em conhecer o seu valor máximo (AZEVEDO, 2007). Aos transformadores monofásicos, pode-se aplicar uma equação que estima a máxima corrente de *inrush* que circula pelo enrolamento energizado. Segundo Kulkarni e Khaparde (2004), essa expressão é dada pela equação (9) a seguir:

$$i_{m_m\acute{a}x} = \frac{H \cdot h_w}{N} \quad (9)$$

Em que:

$i_{m_m\acute{a}x}$ = Pico da corrente de *inrush*;

H = Intensidade de campo magnético;

h_w = Altura do enrolamento energizado;

N = Número de espiras do enrolamento energizado.

A equação (9) também pode ser utilizada em transformadores trifásicos, mas não para determinar seu pico. Ela deve ser usada como parâmetro para analisar o desempenho das correntes de *inrush* em função do tipo de conexão dos enrolamentos. (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

2.2 Fatores que alteram as características da corrente de *inrush*

Após conhecer a maneira como se forma a corrente de *inrush* e descobrir seu valor de pico, é necessário fundamentar sobre os fatores que afetam as suas características, ou seja, sobre sua forma de onda, sua duração e seu valor. Já foram citados, no capítulo 1 deste trabalho, alguns desses fatores, no entanto, é preciso conhecê-los de maneira mais profunda para que se possa facilitar o estudo para a diminuição da magnitude dessa corrente.

O tamanho do transformador e a impedância do sistema atrás do transformador são dois dos aspectos que interferem nas características da corrente de *inrush*. Mardegan (2010) assegura que o valor da corrente é muito maior quando o transformador é menor; em contrapartida, a corrente se mantém por mais tempo em transformadores maiores. No que diz respeito à impedância do sistema atrás do transformador, Mardegan (2010) garante que a corrente de

inrush é maior quando a potência de curto-circuito do sistema que fica atrás do transformador é maior; no entanto, caso a potência de curto-circuito seja baixa, a duração pode aumentar.

Outros dois fatores que influenciam nas características da corrente são as propriedades magnéticas do material do núcleo e o fluxo remanescente do núcleo. Em relação ao primeiro, atesta-se que a corrente de magnetização será mais severa quando a qualidade da chapa usada na confecção do núcleo for ruim. Em relação ao segundo, sabe-se que, quando um transformador é desenergizado, um fluxo remanescente continua no núcleo e pode ter a mesma polaridade do fluxo original. Ao reenergizar o transformador, as densidades de fluxo podem atingir valores altos devido ao acréscimo do fluxo residual. Quanto maior o fluxo, maior será a corrente de magnetização (MARDEGAN, 2010).

O valor instantâneo da tensão quando o transformador é energizado também é um aspecto que causa interferência nas características da corrente, de acordo com Mardegan (2010). No momento da energização, o transformador é quase puramente indutivo e, nesse tipo de circuito, a corrente está atrasada da tensão em 90° . Assim, quando a tensão está no valor zero, a corrente atinge o valor máximo e, por isso, quando o chaveamento ocorre no valor de tensão zero, a corrente de *inrush* será muito alta. Essa é a pior situação de chaveamento em relação a valores dessa corrente.

A maneira como ocorre a energização do transformador também influi no valor da corrente. Ocorrem valores maiores de *inrush* quando o enrolamento interno (de menor diâmetro) é energizado primeiro, isso porque o valor da corrente de *inrush* depende da área de seção entre o núcleo e o enrolamento que está sendo energizado. Os enrolamentos de menor tensão são comumente projetados para serem internos e os de maior tensão para serem externos, por questões de isolamento. Dessa forma, quando os transformadores são abaixadores, as correntes de magnetização atingem magnitudes menores do que quando são elevadores (MARDEGAN, 2010).

Para finalizar, considera-se, para os transformadores trifásicos, um fator adicional que altera o valor da corrente de *inrush*: a maneira como o transformador é ligado. Segundo Margedan (2010), quando o transformador é abaixador, se o seu enrolamento primário está conectado em delta, a corrente atinge um valor inferior em relação a quando está conectado em Y aterrado. Por sua vez, quando o transformador é elevador, se o seu primário está ligado em delta, a corrente de *inrush* alcança um valor semelhante ao que se obtém quando se conecta em Y no abaixador, porém, aqui no elevador, quando se conecta o primário em Y aterrado, a corrente alcança os maiores valores de todos os casos.

2.3 Efeitos indesejados provocados pela corrente de *inrush*

A corrente transiente de *inrush* é importante para ajudar a estabelecer o campo magnético do transformador, no entanto ela ocasiona muitos efeitos que não são desejáveis a esse equipamento e, conseqüentemente, ao sistema elétrico. No capítulo 1, foram citados alguns desses efeitos e eles serão abordados de maneira mais detalhada a seguir.

2.3.1 Fadiga mecânica nos enrolamentos

As forças eletromagnéticas e o estresse mecânico procedentes das altas correntes de *inrush* têm sido, nas últimas décadas, objetos de estudo das concessionárias de energia elétrica e das comunidades científicas do mundo. As altas correntes de energização dos transformadores a vazio ocasionam forças eletromagnéticas que apresentam efeitos prejudiciais aos enrolamentos desses equipamentos (AZEVEDO, 2007).

Steurer e Fröhlich (2002) investigaram o impacto das correntes de *inrush* nos estresses eletromecânicos nas bobinas de alta tensão dos transformadores de potência. Eles verificaram que, mesmo com picos 30% menores que os provocados pelas correntes de curto-circuito, as correntes de *inrush* podem originar forças eletromagnéticas com amplitude de mesma ordem de grandeza que as correntes de falta. Dessa forma, os enrolamentos dos transformadores podem estar sujeitos a forças de intensidades equivalentes ou maiores que as causadas pelas correntes de falta.

Um estudo computacional foi realizado para comparar as forças decorrentes das situações de *inrush* e de curto-circuito em um transformador monofásico. Foram considerados, para isso, os maiores picos possíveis de ocorrência de *inrush* e de curto-circuito, a fim de que fosse possível verificar o comportamento nas piores situações transitórias dos dois fenômenos. Como resultado, verificou-se que as forças eletromagnéticas nos enrolamentos decorrentes da ocorrência de transitórios de energização foram maiores que as forças para a situação de curto-circuito (ADDLY, 2001).

De acordo com Fonseca (2016), essas forças eletromagnéticas transitórias, tanto nas direções radiais quanto nas axiais, produzem tensões mecânicas nos enrolamentos dos transformadores. Assim, pelo fato de as altas correntes de energização gerarem elevadas forças, elas podem submeter o enrolamento energizado a estresses mecânicos que se constituem em importantes causadores de falhas em transformadores.

2.3.2 Deterioração da isolação

Zirbes *et al.* (2005) asseguram que, em equipamentos de alta tensão, a isolação elétrica tem como principal função diminuir o fluxo de corrente entre condutores submetidos a diferenciais de potencial elétrico. O problema é que, ao longo do tempo, os isolamentos sofrem redução da sua capacidade, mesmo que estejam submetidos a condições normais de projeto.

Quando o transformador é submetido a condições mais severas, a vida útil estimada é reduzida mais rapidamente. Ao passo que ocorre a redução gradativa da vida útil, vários processos podem ser desencadeados para acelerar essa redução, o que acarreta numa incapacidade de realizar a função, ou seja, leva à falha do isolamento. Uma das condições severas que ocasiona esse efeito é a corrente de *inrush* (ZIRBES *et al.*, 2005).

Segundo Zirbes *et al.* (2005), os principais fatores que levam à degradação do material de isolamento – na maioria das vezes composto por papel (celulose) impregnado com óleo isolante – são os de natureza térmica (aquecimento), hidrolítica (umidade) e oxidativa (oxigênio). A corrente de *inrush* atua no fator de aquecimento, uma vez que uma corrente mais alta leva a um aquecimento maior.

Muitos processos químicos e físicos que interagem entre si estão envolvidos na degradação da característica isolante da celulose e do óleo isolante. A interação aumenta a influência de um processo sobre o outro, o que, conseqüentemente, reflete nas características do isolamento. Assim, quanto maior o aquecimento provocado pela corrente de *inrush*, mais deteriorado estará o material isolante e menor será a vida útil do transformador (ZIRBES *et al.*, 2005).

2.3.3 Afundamentos temporários da tensão alimentadora

Afundamentos temporários de tensão são definidos como sendo a redução entre 0,1 e 0,9 p.u. do valor eficaz da tensão, na frequência fundamental, entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Na maioria das vezes, esse distúrbio está relacionado a curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição, mas pode, também, ser causado pela corrente de *inrush* de um transformador (ARRUDA, 2003).

A corrente de *inrush* é considerada uma das principais fontes de afundamentos de tensão em circuitos e barramentos à montante e em sistemas de distribuição típicos de concessionárias.

Como já foi mencionado, seu valor pode ser maior que a corrente nominal e, quanto maior o seu valor, maior será o afundamento da tensão. (STAROSTA, 2014).

Os afundamentos de tensão são os principais responsáveis por grandes prejuízos financeiros e transtornos operacionais devido a interrupções em processos produtivos. Segundo Rocha (2016), o afundamento prejudica o funcionamento de equipamentos sensíveis, como eletro-eletrônicos. Isso resulta, portanto, numa má qualidade de energia elétrica, que pode ser definida como qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio na frequência que acarrete a falha ou má operação dos equipamentos.

2.3.4 Má operação do relé diferencial de proteção

Para grandes transformadores de potência, a proteção diferencial é o principal método de proteção. Ela baseia-se no fato de que, quando se opera em situações normais, as correntes dos lados primário e secundário do transformador serão praticamente iguais após a passagem pelos transformadores de corrente. No entanto, quando ocorre uma falta interna, isso não se verifica, e a diferença entre essas correntes torna-se significativa e sensibiliza o relé, que envia um comando de operação para o disjuntor com o intuito de isolar o transformador do sistema (BERNARDES, 2006).

De acordo com Bernardes (2006), a energização é usualmente realizada com o transformador sem carga, o que indica que a corrente do lado secundário é nula. Por outro lado, a corrente primária é alta, pois, como já se sabe, as correntes de *inrush* atingem valores muito elevados. Assim, há uma grande diferença entre a corrente do primário e do secundário e esse efeito transitório pode permanecer por vários segundos enquanto a condição de regime permanente não é alcançada. Essa situação é, muitas vezes, confundida com uma condição de falta, o que pode sensibilizar o relé e causar um acionamento indevido do sistema de proteção do transformador.

Nesse caso, a atuação não é correta porque deve-se entender que a corrente de *inrush* é uma grandeza prevista no transformador. Assim, Verney (2012) afirma que se a atuação da proteção for indevidamente acionada, não se tem conhecimento se houve ou não falha interna no transformador. Será necessário, então, realizar testes e inspeções para localizar o problema e isso pode levar tempo no restabelecimento do transformador no sistema. O isolamento do transformador no sistema pode, assim, proporcionar perda da qualidade de energia e má funcionamento do sistema elétrico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Após conhecer um pouco mais o fenômeno de *inrush* e identificar os efeitos indesejados provocados pela corrente, é necessário que sejam estudados métodos para sua redução. Nesta seção, serão abordados procedimentos existentes na literatura que são comumente utilizados para diminuição da sua amplitude; alguns dos métodos não eliminarão o efeito da corrente, mas reduzirão consideravelmente.

3.1 Resistores de pré-inserção

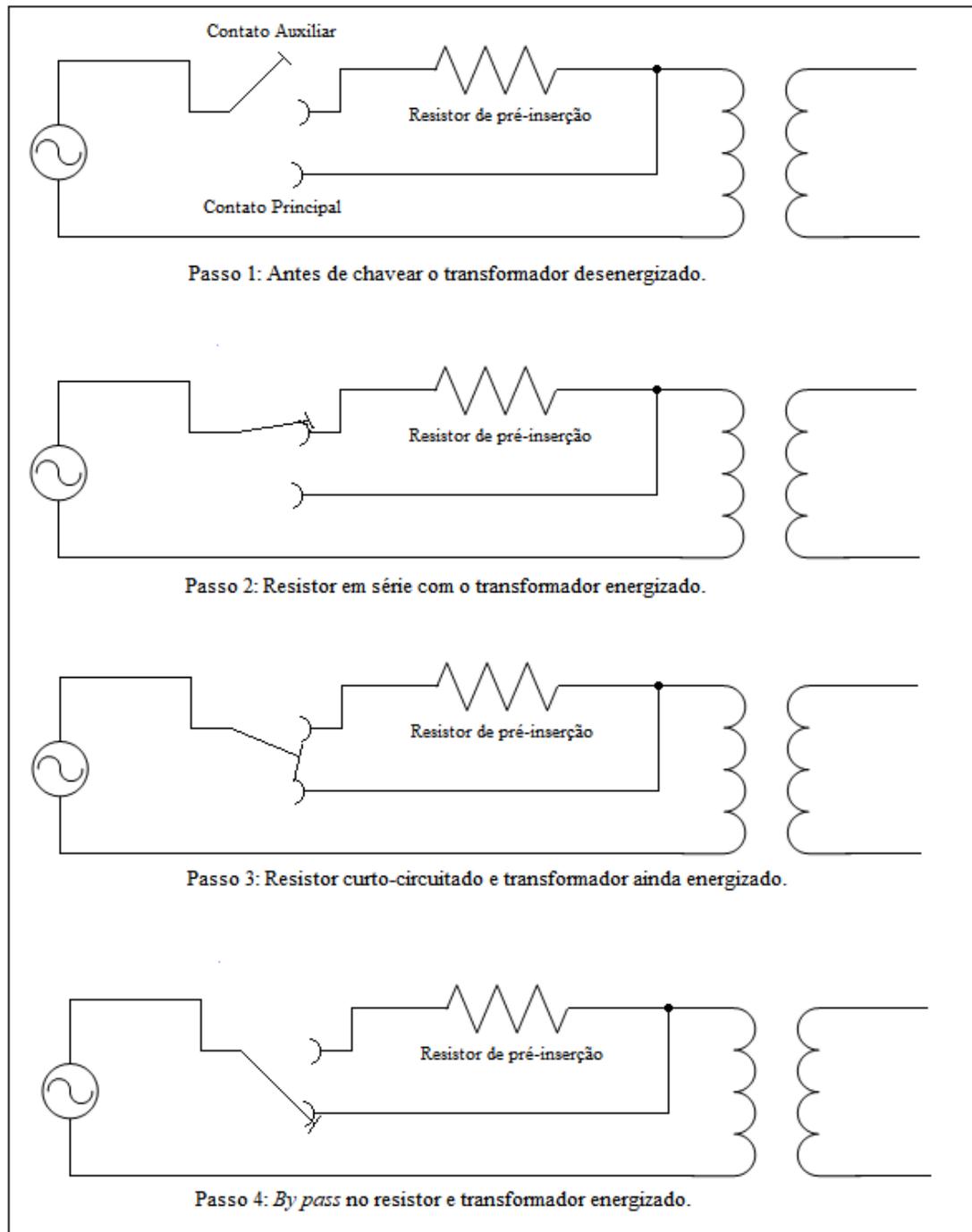
De acordo com Raffo (2010), um dos métodos para reduzir o efeito da corrente de *inrush* é a pré-inserção de resistores em série com o transformador. Pedrazoli (2011) confirma essa informação e relata que o resistor em série, denominado resistor de pré-inserção, funciona como um divisor de tensão que limita a corrente de *inrush*. Segundo Brunke (1998), esses resistores são inicialmente inseridos em série com a fonte de energia e o transformador e, após um período de alguns milissegundos, são submetidos a um *by-pass*.

Normalmente, já existe um resistor destinado ao controle de sobretensão de comutação na linha. O que difere tal resistor do resistor de pré-inserção é que esse último apresenta maior magnitude e possui tempo de inserção mais longo do que o normal. Em termos numéricos, o resistor de fechamento típico do disjuntor usado para a linha possui magnitudes entre 300 e 400 ohms e é inserido por 8 ms. Por outro lado, o valor do resistor de pré-inserção está, geralmente, entre 3000 e 7000 ohms e tem tempo de inserção de 15 ms para que haja tempo de reduzir a corrente (BRUNKE, 1998).

Na Figura 8, é possível verificar o circuito com o resistor de pré-inserção. Os contatos auxiliares são adiantados, fecham um pouco antes dos contatos principais e se mantêm assim por pouco tempo, até que os contatos principais fechem. Nesse tempo em que os contatos auxiliares permanecem fechados, o resistor fica em série com o transformador e a presença da resistência diminui o efeito da corrente transitória durante a energização (PEDRAZOLI, 2011).

Como é possível observar, esse método é bastante simples, pois aborda apenas o conceito de diminuição da corrente devido ao aumento da resistência. A desvantagem desse procedimento é que a inserção do resistor provoca a queda na corrente, mas ocasiona também a queda da tensão, o que não é uma característica desejável ao sistema.

Figura 8 - Circuito com resistores de pré-inserção.



Fonte: (Adaptada de Pedrazoli, 2011).

3.2 Termistores NTC

Termistores são dispositivos elétricos que variam sua resistência elétrica em função da sua temperatura, ou seja, possuem um valor de resistência para cada temperatura absoluta. Eles são classificados em PTC e NTC. O PTC (*Positive Temperature Coefficient* – Coeficiente

Positivo de Temperatura) aumenta a resistência de maneira proporcional à variação da temperatura, enquanto o NTC (*Negative Temperature Coefficient* – Coeficiente Negativo de Temperatura) diminui a resistência à medida que aumenta a temperatura (PEDRAZOLI, 2011).

Dessa forma, Pedrazoli (2011) assegura que o NTC pode ser usado para diminuir os efeitos da corrente de *inrush*. No momento em que o circuito é energizado, o NTC encontra-se com uma temperatura baixa e irá funcionar como uma resistência em série com o transformador. Isso promoverá a limitação de corrente e, portanto, acarretará, também, a diminuição da corrente de *inrush*. Após certo tempo, devido à passagem de corrente, o NTC irá aquecer e sua resistência irá diminuir, possibilitando, então, um maior fluxo de corrente para o transformador.

O problema desse método é que, para que ocorra uma reenergização do transformador acoplado ao NTC, é preciso esperar o esfriamento desse componente para uma temperatura que permita a eficácia dele para a função que se deseja (PEDRAZOLI, 2011). Além disso, como no caso do resistor, a queda na corrente produz uma queda na tensão, que é uma situação indesejável.

3.3 Capacitores em paralelo

O valor de pico para o fluxo do núcleo e, portanto, para a corrente de *inrush*, pode ser reduzido através da diminuição da magnitude do fluxo residual no núcleo. O método mais comum para redução do fluxo residual é a conexão permanente de um capacitor em paralelo com o transformador, de maneira que o fluxo possa ser reduzido pela descarga do capacitor após a desenergização (BRUNKE, 1998).

De acordo com Peterson (1951), o valor desse capacitor em kVA deve ser cerca de 40% do valor em kVA necessário para magnetizar o transformador. Esse capacitor produz uma descarga amortecida que pode reduzir a magnitude do magnetismo residual do núcleo e, por consequência, da corrente de *inrush*. Como se sugere que o capacitor esteja permanentemente conectado ao sistema de potência, muitas vezes esse método é empregado em conjunto com o método de chaveamento controlado para que o capacitor seja inserido no sistema no momento correto.

Como desvantagem, a redução do fluxo residual pela adição de capacitores é uma solução cara para um transformador. Além disso, se não estiver associado a outro método de redução, os capacitores conseguem reduzir o fluxo máximo a um valor apenas 2 vezes menor que o valor normal. Só existe uma redução drástica do valor do fluxo quando se associa a algum

outro método. Assim, essa solução com capacitores não consegue apresentar um grande potencial se for aplicada isoladamente (BRUNKE, 1998).

3.4 *Air Gap* virtual

Air Gap, ou entreferro, é o termo usado, em circuitos magnéticos, para denominar o espaço de ar entre o indutor e o circuito ferromagnético a que está acoplado. A ideia para utilizar esse conceito na diminuição da corrente de *inrush* é usar um *air gap* virtual em que se possa controlar a espessura equivalente (HAGH e ABAPOUR, 2007).

Para efetivar esse método, necessita-se de um enrolamento auxiliar dentro do núcleo magnético. Uma corrente contínua é, então, injetada no enrolamento auxiliar para gerar uma saturação magnética local com permeabilidade próxima à do vácuo. Assim, a zona saturada fica semelhante a um espaço livre. Ao inserir o *air gap* virtual no núcleo magnético, reduz-se o fluxo residual e diminui-se, portanto, o valor de pico da corrente de *inrush* (HAGH e ABAPOUR, 2007).

Segundo Hagh e Abapour (2007), o problema desse método de redução é que ele precisa de uma fonte de corrente contínua e, também, necessita de um projeto complexo de transformador, o que aumenta o custo. Além disso, o enrolamento auxiliar torna-se redundante após a inicialização do transformador.

3.5 Controle do chaveamento

Uma solução muito eficaz para mitigar as correntes de *inrush* é realizar a energização controlada do transformador. Com o auxílio de chaves estáticas e de controladores, pode-se energizar o transformador no momento adequado para que haja uma corrente de *inrush* praticamente nula (PEDRAZOLI, 2011).

3.5.1 Controle do chaveamento por meio do fluxo residual

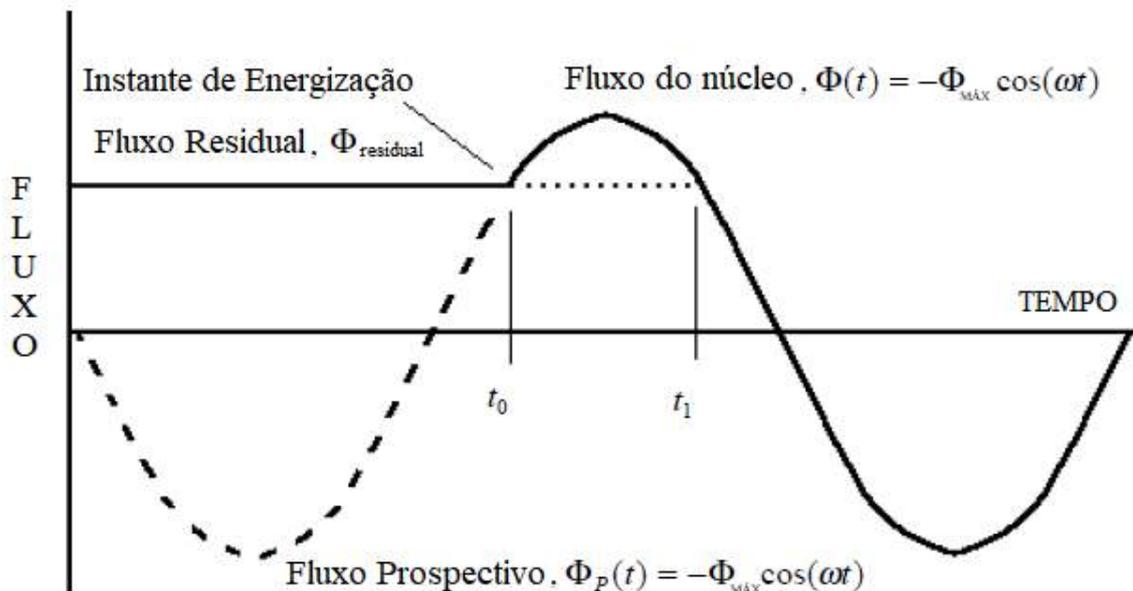
Brunke e Fröhlich (2001) utilizam o conceito de fluxo residual para fundamentar uma das teorias sobre controle do chaveamento. Segundo eles, o fluxo induzido, que é dado pela integral da tensão aplicada, deve ser igual ao fluxo residual no momento da energização. Nesse

cenário, a assimetria do fluxo do núcleo será eliminada e o valor do fluxo irá reduzir. Isso é explicado através da equação (6) citada anteriormente que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Phi = \Phi_{\text{residual}} + \Phi_{\text{máx}} \cdot \cos(\omega t_0) - \Phi_{\text{máx}} \cdot \cos(\omega(t + t_0)) \quad (10)$$

Como visto, o termo $\Phi_{\text{residual}} + \Phi_{\text{máx}} \cdot \cos(\omega t_0)$ representa a componente assimétrica do fluxo. Deseja-se que o termo assimétrico seja eliminado para que o valor do fluxo diminua e, por consequência, o da corrente também decresça. Para entender melhor essa teoria, deve-se observar a Figura 9.

Figura 9 - Instantes de energização para alcance de baixa corrente de inrush.



Fonte: (Adaptada de Brunke, 1998).

Pela Figura 9, vê-se que, antes da energização, não há fluxo no núcleo e utiliza-se o termo fluxo prospectivo para indicar um fluxo virtual que representa o que realmente apareceria no núcleo se a fonte de tensão estivesse conectada e o transformador já tivesse atingido as condições de regime permanente. A partir do momento que o transformador é energizado, o fluxo no núcleo se torna uma continuação do fluxo prospectivo (BRUNKE, 1998).

Como é possível observar, pela forma de onda, o fluxo prospectivo (futuro fluxo do núcleo), é indicado por $-\Phi_{\text{máx}} \cdot \cos(\omega t)$. Assim, para eliminar a componente assimétrica da equação (10), é necessário que a igualdade $\Phi_{\text{residual}} = -\Phi_{\text{máx}} \cdot \cos(\omega t)$ seja verdadeira. Na

Figura 9, vê-se que isso ocorre nos instantes t_0 e t_1 . Esses são os pontos em que a energização deve ser realizada para que a componente assimétrica seja eliminada e, assim, o fluxo e a corrente de *inrush* sejam reduzidos (BRUNKE, 1998). Bukubukwana e Zivanovic (2005) ratificam essa metodologia e asseguram que ela diminui em até cerca de 80% o valor da corrente de *inrush*.

3.5.2 Controle do chaveamento por meio do valor da tensão

Um dos métodos para mitigar a corrente de *inrush* é controlar o chaveamento para energizar o transformador no valor máximo de tensão. Como já foi visto na subseção 2.1.2 deste trabalho, se o chaveamento para energização do transformador ocorrer no instante em que a tensão de suprimento estiver passando por 0 V, os valores da corrente de *inrush* serão máximos; por outro lado, se o chaveamento ocorrer no momento em que a tensão de suprimento estiver passando pelo valor de pico, os valores da corrente de *inrush* serão mínimos (SANTILIO *et al.*, 2013).

Apolônio (2005) confirma essa teoria e assegura que, em um transformador monofásico com fluxo residual nulo, o instante ótimo para o fechamento da chave ocorre quando a tensão da fonte de suprimento estiver passando pelo seu valor de pico, uma vez que a corrente está defasada da tensão em 90° e, portanto, quando a tensão for máxima, a corrente será mínima. Essa condição é suficiente para suprimir todo o transitório de energização, pois diferentemente dos outros casos, esse método não irá apenas diminuir o valor da corrente; ele irá, também, acabar com a causa do fenômeno.

Para que o chaveamento seja adequado e o transformador seja energizado no valor de pico da tensão, algumas técnicas de controle são comumente estudadas. Uma delas foi proposta por Pedrazoli (2011), que realizou um estudo para redução de *inrush* em banco de capacitores e que pode ser adotado de maneira análoga para transformadores. Segundo ele, o circuito de controle do chaveamento pode ser desenvolvido com medidor de tensão, comparador de tensão e tiristores.

O diagrama de blocos da Figura 10 a seguir representa uma simplificação do circuito de controle proposto por Pedrazoli (2011). Em resumo, o medidor afere a tensão em tempo real da rede, o comparador, como o próprio nome diz, compara a tensão medida com o pico de tensão da fonte, e os tiristores enviam um sinal de comando aos contatos digitais.

Figura 10 - Diagrama de blocos simplificado do circuito de controle.

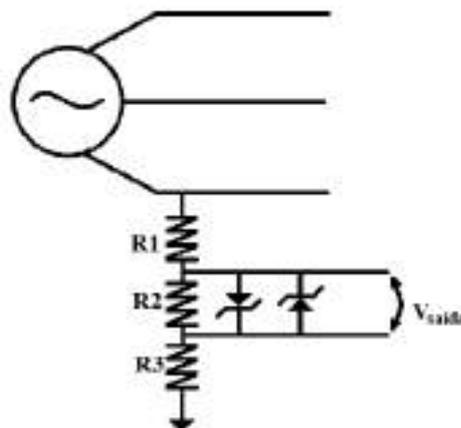


Fonte: (Pedrazoli, 2011).

O medidor de tensão leva a tensão medida a ser comparada com o valor de pico de tensão da fonte, uma vez que, quando o chaveamento ocorre na tensão máxima, a corrente de *inrush* é mínima. Para esta aplicação, não há interesse nos diversos valores instantâneos da tensão, apenas deseja-se identificar se ela está no valor máximo em módulo ou se está passando por zero (PEDRAZOLI, 2011).

Segundo Pedrazoli (2011), o circuito comparador, que vem após o medidor, é eletrônico e, portanto, não é capaz de suportar tensões e potências muito altas. Devido a isso, utiliza-se um divisor de tensão para o circuito amostrador. No divisor, as formas de onda dos sinais de entrada e saída mudam apenas em amplitude em relação aos originais, mas mantêm a fase e frequência. O circuito medidor com o amostrador pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Circuito medidor de tensão com amostrador.



Fonte: (Pedrazoli, 2011).

A existência dos 3 resistores permite que qualquer valor de tensão seja encontrado ao mudar a relação entre R1, R2 e R3. Os diodos zener asseguram que a tensão de saída esteja sempre limitada a seus valores de tensão reversa; isso protege o circuito principal, pois evita

que os picos de tensão ou a queima de algum dos resistores aumente drasticamente a tensão de saída (PEDRAZOLI, 2011).

O circuito comparador sinaliza quando a tensão medida da fonte está passando pelo valor de pico, indicando, assim, o melhor momento para a energização do transformador. Esse circuito utiliza como valor de referência o valor de pico, que será referência para a energização do transformador (PEDRAZOLI, 2011). Ao identificar o valor de pico, o sinal é enviado para o circuito de comando dos tiristores.

O circuito de comando dos tiristores deve enviar pulsos de ativação aos tiristores de potência, ou chaves estáticas. Tal circuito interpretará o sinal de saída do amplificador operacional e irá gerar, no momento ótimo de energização dos transformadores, um pulso que fará com que os tiristores disparem, conectando o transformador à fonte de energização (PEDRAZOLI, 2011). Assim, energizados no instante correto, isto é, quando a tensão é máxima, não será observada a presença de corrente de *inrush*.

Outros métodos para chaveamento na tensão máxima são estudados e a maioria deles aborda transformadores trifásicos. Brunke e Fröhlich (2001), Prikler *et al.* (2003), Oliveira e Bronzeado (2005), Arand *et al.* (2013), Santilio *et al.* (2013) e Mirkalaei e Hashiesh (2015) realizaram estudos em trifásicos e concluíram que, quando a energização é feita mediante o controle estabelecido, a corrente de energização do transformador resulta na mesma corrente que circula com o transformador operando a vazio, eliminando, assim, o problema de *inrush*.

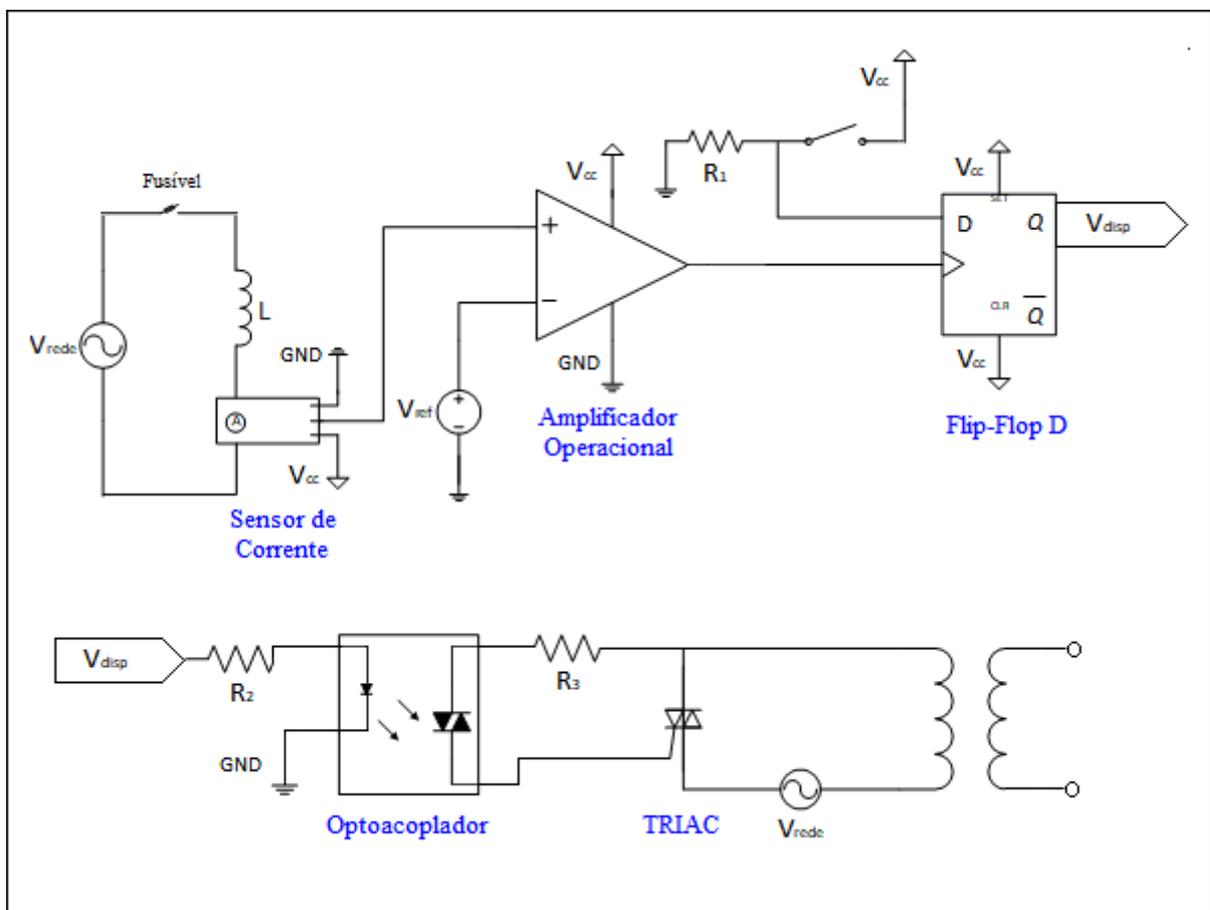
De todos os estudos citados, percebeu-se que o entendimento para trifásicos e monofásicos segue a mesma linha de raciocínio. A grande diferença é que, nos monofásicos, só há necessidade de verificar o ponto de tensão máxima, enquanto nos trifásicos é preciso analisar, também, os ângulos e a interação de fluxo entre as fases para que cada uma delas seja energizada no instante ótimo.

Como este trabalho se propõe a adotar um método de energização para diminuir as correntes de *inrush* em um transformador de potência monofásico, o estudo sobre a mitigação dessas correntes para transformadores trifásicos não será detalhado. No próximo capítulo, será mostrado e explicado o método desenvolvido para a realização de simulações e experimentos no transformador monofásico. Esse método foi baseado na teoria do chaveamento no pico da tensão.

4 MÉTODO PROPOSTO PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE INRUSH EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Após analisar os métodos mostrados na seção 3 deste trabalho, verificou-se que o controle de chaveamento é o procedimento mais eficaz e com menos implicações negativas ao sistema elétrico como um todo. Dos dois tipos apresentados, escolheu-se o método de chaveamento na tensão máxima e desenvolveu-se um novo mecanismo de controle para seu funcionamento. Na Figura 12, é possível observar o circuito que foi projetado para realizar o controle.

Figura 12 - Mecanismo de controle projetado para chaveamento na tensão máxima.



Fonte: (Da autora, 2018).

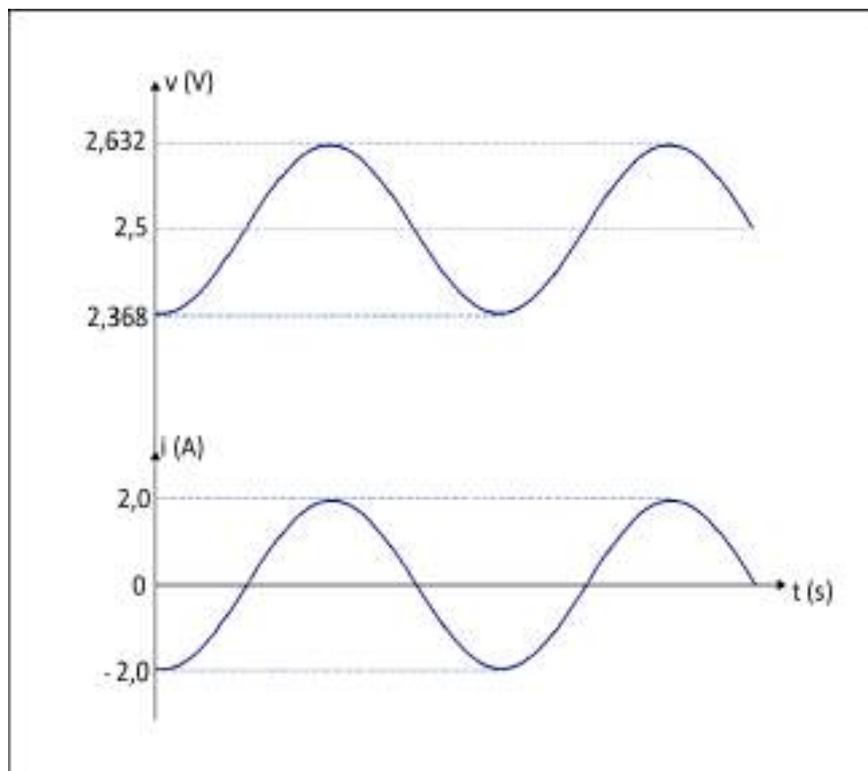
O circuito proposto consiste, inicialmente, na tensão da rede, V_{rede} , um fusível, um indutor, L , e um sensor de corrente, modelo ACS712 - 30A, em série entre si. O fusível de 4 A foi utilizado para efeitos de proteção do circuito. Como a resistência do fusível é muito baixa, a tensão da rede estará praticamente toda no indutor. Como se sabe, no indutor, tensão e corrente

estão defasadas de 90° e, portanto, quando a corrente estiver passando no zero, a tensão assumirá o valor máximo em módulo. Como nesse circuito existe um fusível com baixa resistência, a tensão não assumirá exatamente o valor máximo no indutor, porém será muito próximo dele. É exatamente nesse instante que se deseja realizar o chaveamento.

O sensor de corrente ACS712 – 30 A é capaz de medir correntes elétricas de até 30 A. Quando uma corrente passa pelos seus terminais, há alteração na tensão de saída, ou seja, o sensor oferece como saída uma tensão proporcional ao valor da corrente de entrada. Essa proporcionalidade é de 66 mV/A, o que significa que, a cada 1 A, haverá um incremento ou decremento de 66mV. É importante saber, também, que esse sensor apresenta uma tensão *offset* de saída bastante estável no valor de 2,5 V. Assim, no momento em que a corrente lida estiver passando pelo zero, a tensão de saída do sensor indicará 2,5 V.

Para que fique mais claro o que foi explicado, é interessante que se dê um exemplo. Suponha um circuito cuja corrente seja 2 A; como a proporcionalidade do sensor é de 66 mV/A, para uma corrente de 2 A, o equivalente será ± 132 mV. Uma vez que o valor de *offset* da tensão é 2,5 V, o valor máximo da tensão será $2,5 \text{ V} + 132 \text{ mV} = 2,632 \text{ V}$ e o valor mínimo será $2,5 \text{ V} - 132 \text{ mV} = 2,368 \text{ V}$. Esse exemplo pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Exemplo de corrente lida pelo sensor e tensão proporcional fornecida na saída.



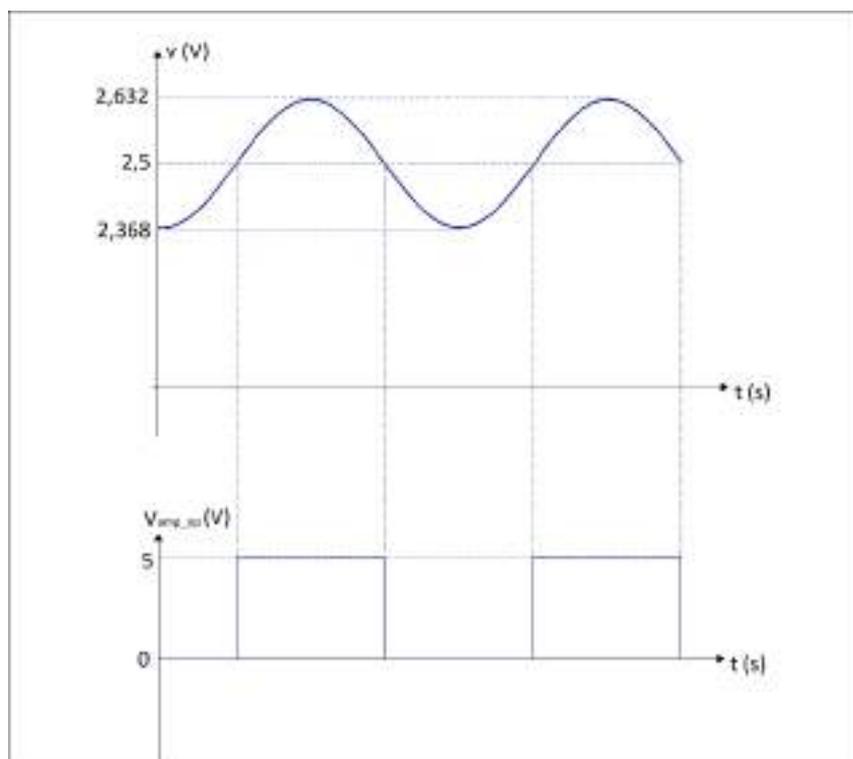
Fonte: (Da autora, 2018).

Pela Figura 13, pode-se perceber, então, que, quando a tensão está no ponto de 2,5 V, a corrente lida pelo sensor está em 0 A, que é o valor em que se deseja realizar o chaveamento. Como já foi mencionado, a corrente no indutor está defasada de 90° da tensão e, portanto, no valor 0 A da corrente, a tensão do indutor estará no máximo. Como a tensão no indutor é praticamente a tensão da rede, esta tensão, que irá energizar o transformador, também estará no seu valor máximo.

Diante disso, percebeu-se que era preciso realizar o chaveamento no instante em que a tensão de saída do sensor fosse igual a 2,5 V. Para identificar esse exato momento, utilizou-se, então, um amplificador operacional com função de comparador; o modelo escolhido foi o LM324N. No comparador, colocou-se, na extremidade negativa, uma tensão de referência $V_{ref} = 2,5 \text{ V}$, enquanto na extremidade positiva foi colocada a tensão de saída do sensor. Assim, sempre que essa tensão fosse igual à tensão de referência, a tensão de saída do amplificador seria igual à V_{cc} (5 V).

Para que fique mais claro, o exemplo que gerou a Figura 13 será retomado. Nesse caso, para o período de tempo mostrado na figura, existirão dois patamares de saída com tensão igual à V_{cc} . O amplificador só muda de estado quando encontra um novo valor de 2,5 V. Na Figura 14, é possível visualizar o resultado da saída do amplificador para o exemplo abordado.

Figura 14 - Exemplo de saída do amplificador operacional em relação à tensão de saída do sensor.



Fonte: (Da autora, 2018).

Pela Figura 14, vê-se que a saída do amplificador apresenta bordas (de subida ou de descida) exatamente nos 2,5 V, que indica o momento de corrente mínima, isto é, de tensão máxima da rede. O pulso na tensão máxima deve ser enviado para a chave, para que ela possa fechar e permitir a energização do transformador. No entanto, ainda não é possível enviar o sinal que sai do amplificador direto para a chave, pois a saída do amplificador fornece vários pulsos, o que faria a chave mudar de estado todas as vezes que a tensão do sensor fosse 2,5 V.

Deseja-se, portanto, que ocorra apenas um pulso em algum dos instantes em que a tensão da rede seja máxima. Assim, necessita-se de outro dispositivo que identifique um pulso nos 2,5 V e mantenha a tensão a partir desse pulso. Para exercer essa função, escolheu-se um flip-flop tipo D; o modelo utilizado foi o 74HCT4N. Como é possível observar na Figura 12, o flip-flop tipo D apresenta os seguintes terminais: entrada (indicado por D), *clock* (indicado pela seta), *reset* (indicado por SET), *clear* (indicado por CLR), saída principal (indicada por Q) e saída barrada (indicada por \bar{Q}).

Assim, nota-se que o flip-flop tipo D possui somente uma entrada, D, que pode assumir apenas dois valores: 0 ou 1. Quando $D=0$, a saída Q também será igual a 0, enquanto a saída \bar{Q} será 1. Por outro lado, quando $D=1$, Q é igual a 1 e \bar{Q} vale 0. Para o flip-flop assumir um desses estados de saída (0 ou 1), é preciso que haja uma combinação da variável de entrada com o pulso de controle (*clock*). Após esse pulso, o flip-flop irá permanecer em um mesmo estado até a chegada de um novo pulso de *clock* e, então, de acordo com as variáveis de entrada, mudará ou não de estado.

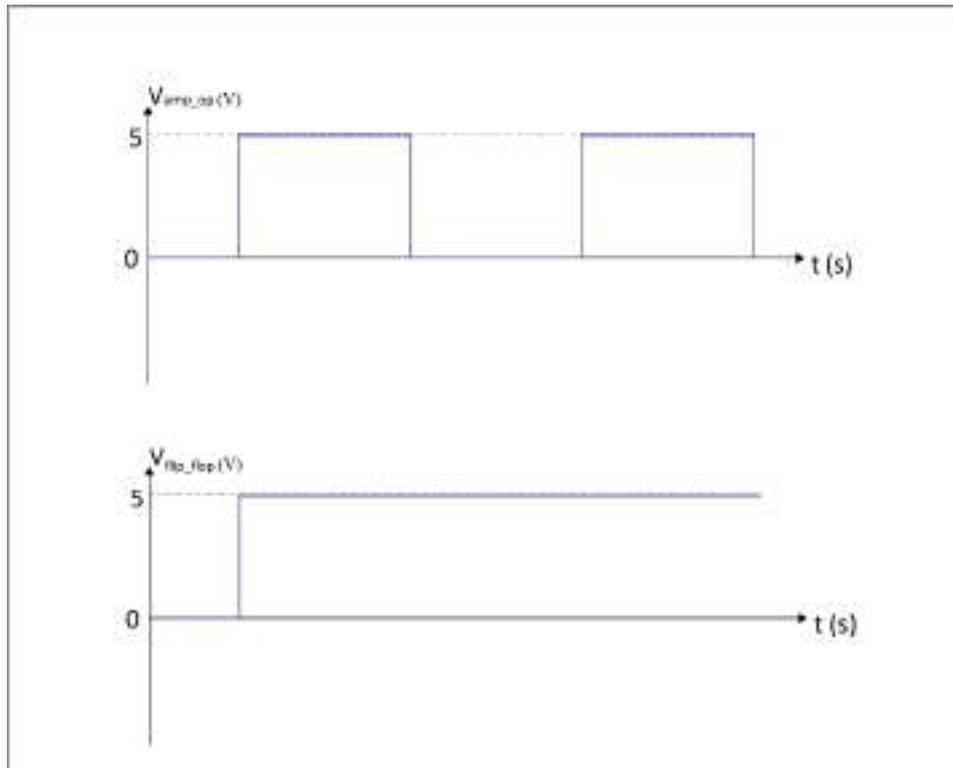
Pela Figura 12, vê-se que a entrada D do flip-flop é acionada a partir do momento em que uma chave é fechada. Na prática, a chave será um botão *on-off*. Quando o botão estiver em *on*, a entrada D terá nível lógico 1. É possível notar, também, nessa figura, que há um resistor ligado à chave. A presença desse resistor é necessária pois, se ele não existisse, quando a chave estivesse aberta, a entrada do flip-flop ficaria flutuando, não estaria nem em 0 V nem em 5 V, o que faria o circuito ficar chaveando desordenadamente.

Para que ocorra o correto chaveamento, é necessário garantir que os dois estados, *on* (5 V) e *off* (0 V), estejam bem definidos. Com o resistor, quando a chave estiver aberta, garante-se que o pino está indo para 0 V, pois ele é um resistor de *pull-down*, que sempre puxa para 0 V. Dessa forma, com a presença do resistor, será alcançado o cenário desejado: com chave fechada, 5 V na entrada do flip-flop, com chave aberta, resistor garante 0 V na entrada do flip-flop.

A saída do comparador será o pulso de controle (*clock*), enquanto a entrada, D, será 0 V ou 5 V, a depender do acionamento do botão. Quando o botão estiver em *on*, o flip-flop estará

em funcionamento. Para um melhor entendimento, retoma-se o exemplo que vem sendo adotado para a explicação do circuito de comando. É possível ver, na Figura 15, o resultado do funcionamento do flip-flop para esse exemplo.

Figura 15 - Exemplo de saída do flip-flop em relação à tensão de saída do amplificador.



Fonte: (Da autora, 2018).

A saída do comparador havia apresentado dois patamares de 5 V nos momentos em que a tensão do sensor era zero; o flip-flop identifica, então, o pulso do primeiro patamar visto após o acionamento do botão e, com os terminais de *reset* e *clear* ligados em 5 V, ele mantém o pulso em 5 V durante todo o tempo até que se deseje que o circuito seja desativado (por meio da seleção do botão de *off*).

O sinal de saída do flip-flop é enviado para um circuito com optoacoplador; o modelo escolhido deste elemento foi o MOC3022. O optoacoplador é um componente que funciona como isolador entre circuitos de controle e de potência e é utilizado no disparo de TRIACs. Internamente, ele é constituído por um diodo emissor de luz (LED) e um diodo para corrente alternada (DIAC).

Para um correto funcionamento, o pino 1 do optoacoplador é ligado em série com um resistor limitador de corrente que adequa a corrente aos valores de funcionamento do LED,

enquanto o pino 2 é ligado ao terra do amplificador e do flip-flop para evitar diferenças de potencial entre terras num mesmo circuito. O pino 4, por sua vez, é ligado ao gatilho do TRIAC, enquanto o pino 6 é conectado a um resistor limitador de corrente que irá para o terminal 2 do TRIAC. Os pinos 3 e 5 não estão conectados a nada.

Após conhecer as devidas conexões, é importante saber que o optoacoplador funciona com base no efeito fotoelétrico. Um feixe de luz infravermelha, produzido pelo LED, atua diretamente sobre o DIAC, que é ativado na presença da radiação. Quando isso ocorre, as características de disparo do DIAC fazem com que o TRIAC seja disparado e possa conduzir a corrente para o circuito de carga (BRAGA, 2004).

O TRIAC é um triodo para corrente alternada e é usado como uma chave bidirecional capaz de conduzir corrente elétrica em dois sentidos. O modelo de TRIAC escolhido para o circuito projetado foi o BTA16. No momento em que se dá o pulso no gatilho do TRIAC, ele passa a conduzir e o transformador é energizado. Assim, ao final de todo esse circuito, consegue-se energizar o transformador no momento de pico da tensão da rede. O transformador utilizado, tanto na simulação quanto na prática, foi de 500 VA, 220V/50V.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O método de chaveamento apresentado no capítulo anterior foi simulado e, em seguida, testado experimentalmente. Nesta seção, alguns resultados importantes da simulação serão mostrados. É fundamental que se saiba que o transformador utilizado na simulação possui os mesmos parâmetros do transformador usado no experimento prático. Foram realizados dois ensaios para determinar os parâmetros de um transformador 500 VA, 220 V/50 V: ensaio a vazio e ensaio de curto-circuito. Os resultados desses ensaios estão no Apêndice A ao final deste trabalho. Também levantou-se a curva de magnetização para simular um transformador saturado com valores reais. Essa curva está no Apêndice B.

O circuito de comando foi simulado no *software* Proteus, pois o ambiente *Simulink* do *software* MATLAB® não permite a simulação de circuitos de eletrônica em conjunto com circuitos de potência. Já a análise do *inrush* foi feita no *Simulink*, pois o Proteus é um simulador eletrônico que não permite alterações nos elementos de potência, assim, não era possível adequar o transformador simulado ao transformador disponível em laboratório. Por causa dessas limitações, a simulação desse trabalho foi dividida nos dois *softwares*.

Primeiro, simulou-se o circuito de comando no *software* Proteus com o intuito de verificar se o circuito projetado estava realizando o chaveamento no pico da tensão da rede. Ao ser atestado que esse comportamento estava ocorrendo, concluiu-se que o circuito projetado era válido e atendia ao que se queria. Assim, bastava conectá-lo ao circuito com o transformador para que houvesse o chaveamento no momento de pico da tensão.

Como já foi dito, não era possível simular o comando eletrônico no *Simulink*, mas, como já havia conseguido se comprovar a eficácia do circuito de comando no Proteus, reproduziu-se apenas o comportamento desse circuito no *Simulink*. Colocou-se um amperímetro em série com a rede, o fusível e o indutor e, por meio de um bloco de controle, comparou-se o valor zero com a corrente lida. No momento em que a corrente do circuito se igualou ao valor zero, enviou-se o comando para fechamento da chave e energização do transformador.

Para o circuito de comando, de acordo com a Figura 12, usou-se uma indutância $L = 300$ mH. Esse valor foi utilizado, pois, para efeitos de segurança, desejava-se trabalhar com correntes menores; esse era o maior valor disponível de indutância em laboratório e era capaz de suportar até 4 A em 220 V. Para que se tenha conhecimento dos demais valores usados no circuito, ainda da Figura 12, usou-se: $R_1 = 10$ k Ω , $R_2 = 560$ Ω e $R_3 = 330$ Ω . Os modelos dos

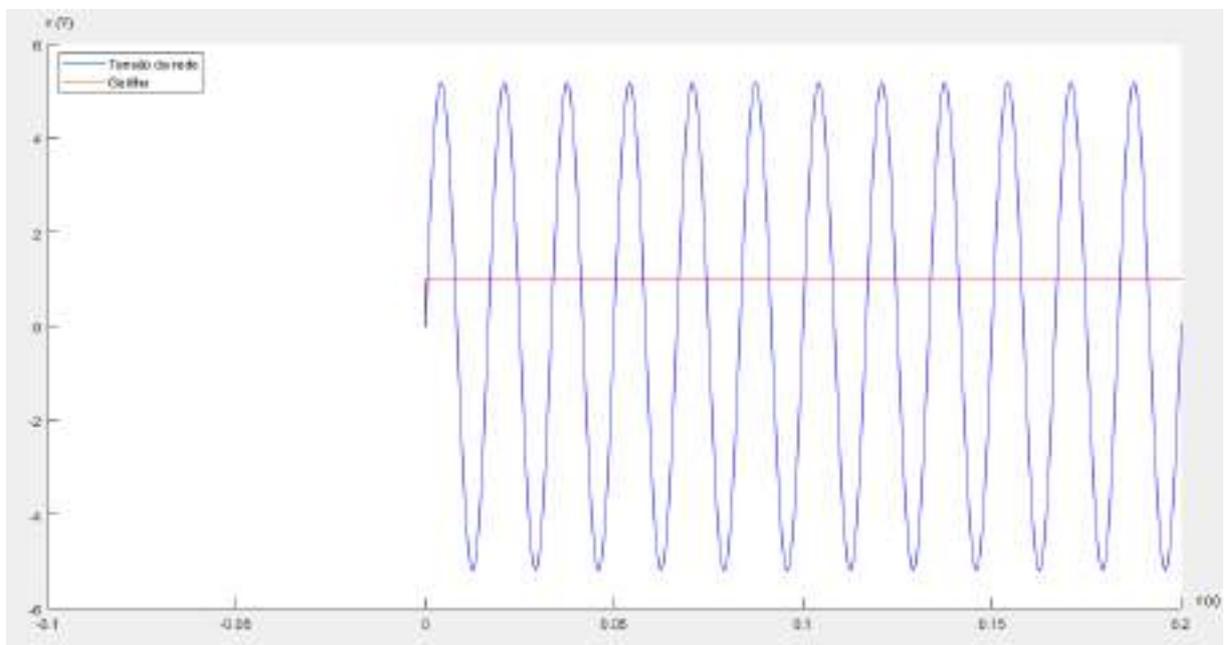
componentes usados (sensor, amplificador, flip-flop, optoacoplador e TRIAC) já foram citados na seção anterior.

A apresentação das simulações será dividida em duas partes. Inicialmente, serão mostrados os resultados da simulação realizada sem controle do chaveamento, para que seja possível observar a presença da corrente de *inrush*. Em seguida, serão mostrados os resultados da simulação com controle do chaveamento, para que se visualize a eficácia desse método escolhido.

5.1 Simulação e resultados sem controle do chaveamento

Como já foi dito, a corrente de *inrush* pode assumir valores distintos a depender do ponto em que ocorre o chaveamento do transformador. No entanto, o pior caso ocorre quando há chaveamento no momento em que a tensão passa por zero. Assim, para verificar a corrente em sua pior situação, realizou-se o chaveamento na tensão zero. Na Figura 16, é possível visualizar o instante em que o transformador é energizado.

Figura 16 - Tensão da rede e gatilho do transformador no ponto de tensão zero.

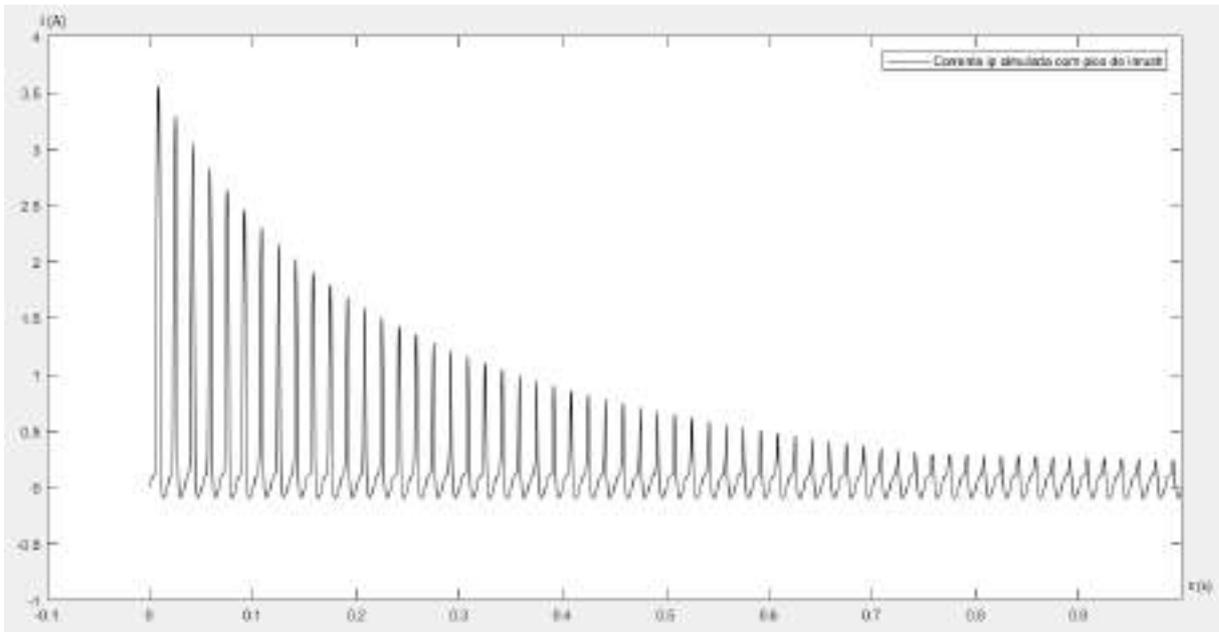


Fonte: (Da autora, 2018).

Na Figura 16, o pulso da curva vermelha indica o instante em que ocorre o chaveamento, enquanto a curva azul representa a tensão da rede dividida por um fator $k=60$, que foi utilizado para adequação de escala a fim de melhorar a visualização dos dois gráficos conjuntamente.

Nota-se, pela curva vermelha, que o chaveamento se deu exatamente no valor zero da tensão. Espera-se, portanto, que, nesse instante, ocorra o maior pico de corrente de *inrush*. Para verificar isso, tem-se, na Figura 17, a corrente de *inrush* resultante dessa energização.

Figura 17 - Resultado da simulação da corrente ip sem controle de chaveamento.



Fonte: (Da autora, 2018).

Na Figura 17, nota-se que, no instante da energização, a corrente atingiu um pico de 3,55 A. Percebe-se que esse valor de corrente de *inrush* foi, aproximadamente, 14 vezes maior que o da corrente nominal de excitação em regime. O valor atingido pelo *inrush* também foi maior que a corrente nominal do transformador, que é de 2,27 A.

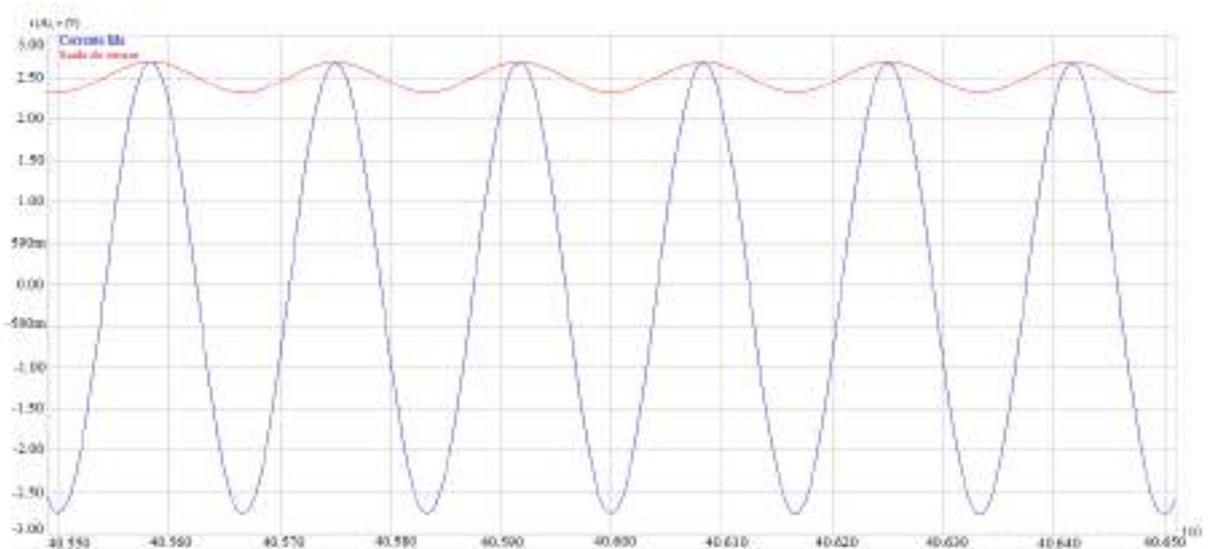
5.2 Simulação e resultados com controle do chaveamento

Devido ao valor de *inrush* mostrado no tópico anterior, desenvolveu-se a simulação com chaveamento controlado. O princípio dessa simulação seguiu a explicação já realizada no capítulo 4. Antes de mostrar o resultado final, ou seja, antes de apresentar a corrente de *inrush* reduzida, é importante que sejam apresentados alguns gráficos de medições fundamentais para o controle do chaveamento.

Inicialmente, é interessante observar os gráficos gerados pelo circuito de comando no Proteus. Ativou-se o circuito de comando no simulador em um tempo arbitrário de 40 segundos. É interessante que sejam vistos os resultados de cada etapa que foi explicada no capítulo 4, ou

seja: saída do sensor, saída do amplificador e saída do flip-flop. Inicialmente, vê-se a saída do sensor. Para ter certeza de que ela estava se comportando como esperado, plotou-se, junto com ela, a corrente do circuito do indutor. Esses dois gráficos podem ser vistos na Figura 18.

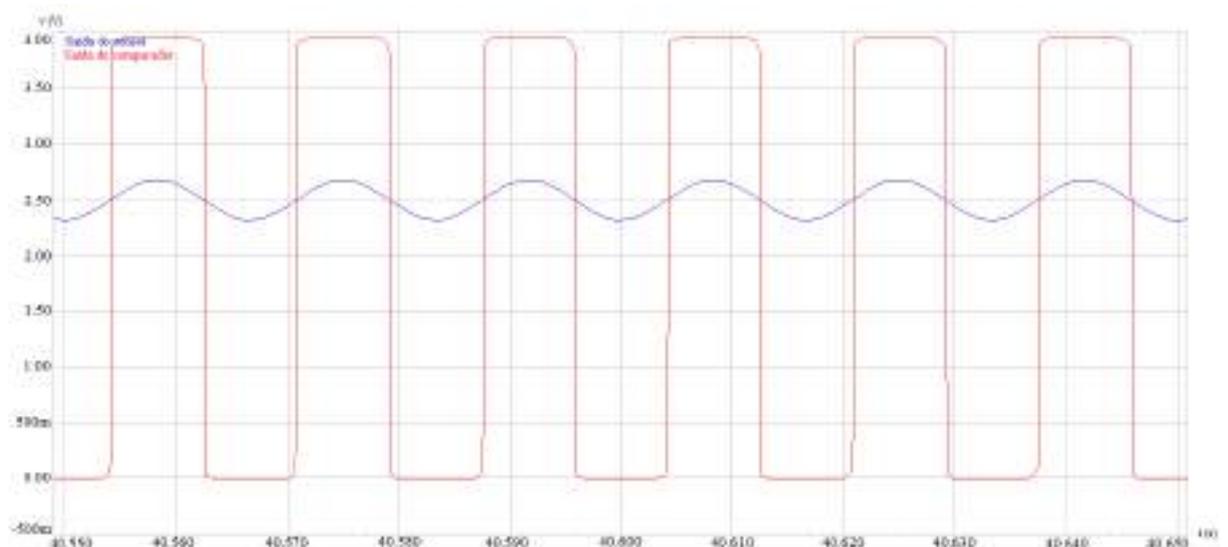
Figura 18 - Corrente do circuito de comando e saída do sensor em simulação.



Fonte: (Proteus, 2018).

Vê-se que, no momento em que a corrente está passando pelo valor zero, a tensão fornecida pelo sensor está em 2,5 V. Como já foi explicado, essa é a situação desejada para o ponto do chaveamento. Assim, verificada essa etapa, passou-se para a análise do gráfico da saída do comparador. Ele pode ser visto, juntamente com a saída do sensor, na Figura 19.

Figura 19 - Saída do sensor e saída do comparador em simulação.

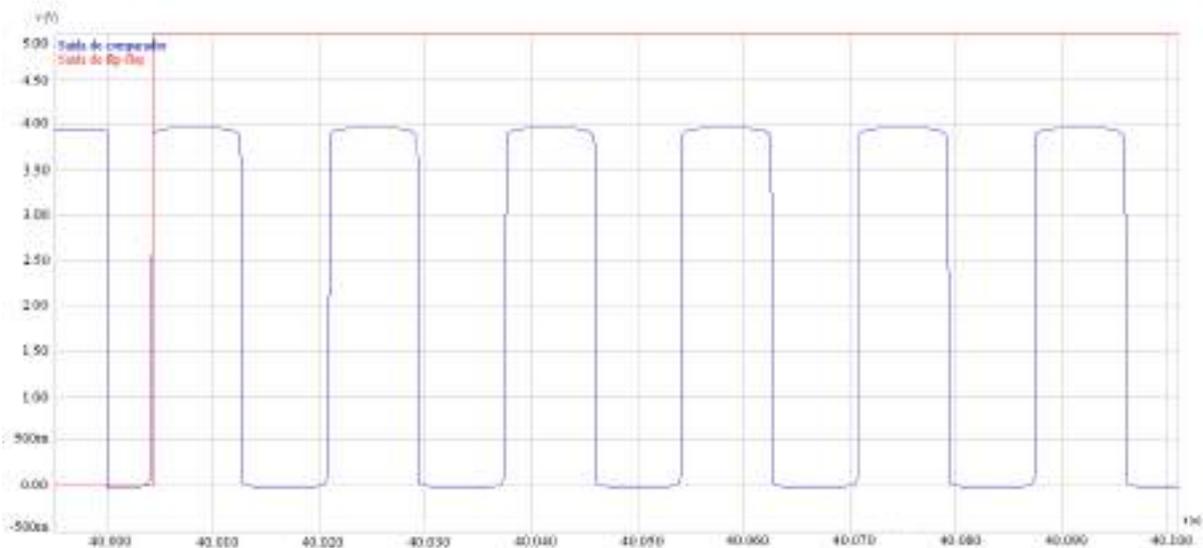


Fonte: (Proteus, 2018).

Nota-se que, no momento em que a tensão de saída do sensor passa pelos 2,5 V, há um pulso de aproximadamente 4 V na saída do amplificador. Como também já foi explicado, esse era o comportamento esperado. Na realidade, pela teoria, esperava-se um valor de 5 V na saída do amplificador, porém isso só ocorre quando ele é ideal. Quando se associa o restante do circuito ao amplificador, esse valor de tensão costuma diminuir.

Agora, deseja-se que ocorra apenas um pulso no momento em que o flip-flop é acionado. Na Figura 20, pode-se visualizar a saída do amplificador bem como a saída do flip-flop. Como é possível observar, aconteceu o que se esperava, isto é, no momento em que se acionou o flip-flop, ele identificou o primeiro pulso visto após o acionamento e manteve 5 V durante todo o tempo. Esse comportamento garante, então, que o transformador foi energizado em um momento de mínimo da corrente do indutor e, conseqüentemente, de máximo da tensão da rede.

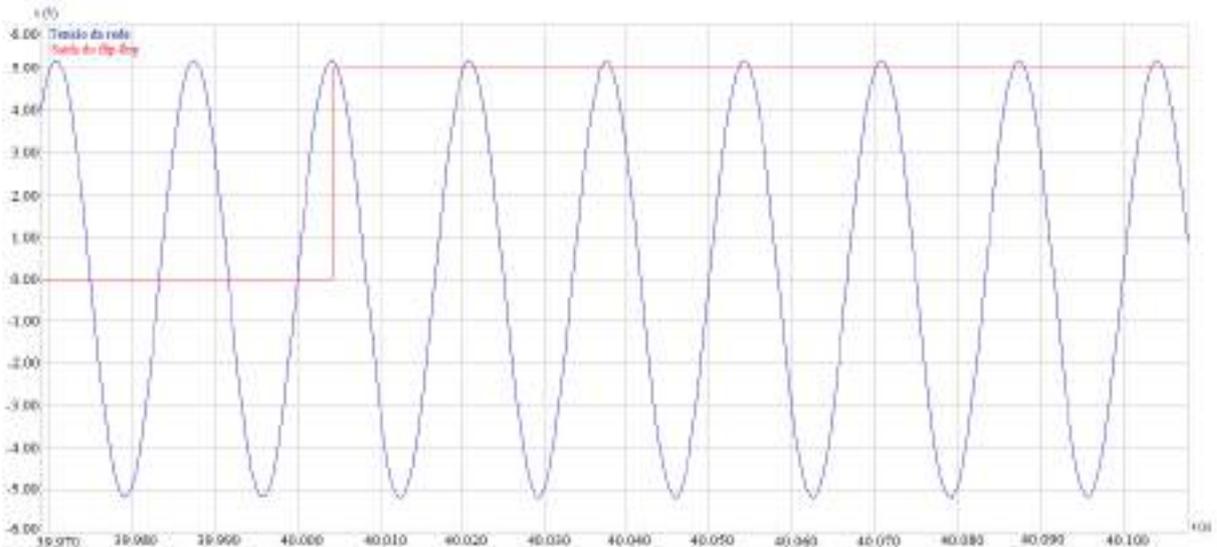
Figura 20 - Saída do comparador e saída do flip-flop em simulação.



Fonte: (Proteus, 2018).

Assim, é possível, agora, visualizar o momento do fechamento da chave juntamente com a tensão da rede. O fechamento da chave foi realizado no momento em que o flip-flop deu o pulso. Nesse instante, o TRIAC entrou em condução e permitiu a energização do transformador. Na Figura 21, pode-se ver, em vermelho, o gatilho do circuito e, em azul, a tensão da rede dividida por uma constante $k=60$ para melhor visualização dos gráficos conjuntamente. Como é possível notar, o circuito de comando enviou o disparo para o TRIAC conduzir exatamente no momento de valor máximo da tensão da rede.

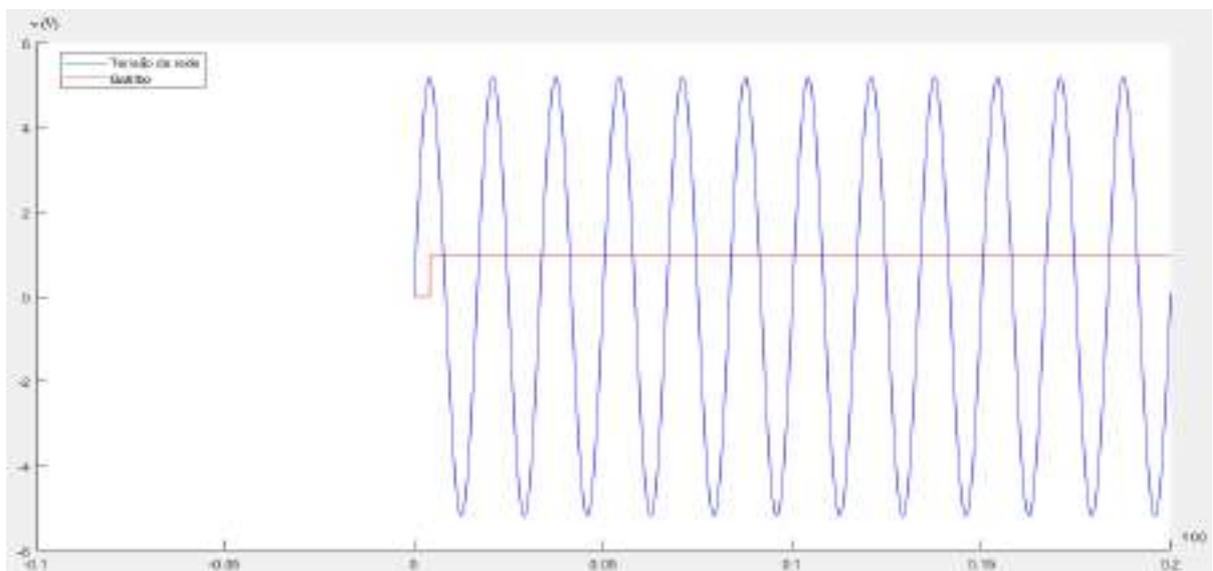
Figura 21 - Tensão da rede e disparo do TRIAC em simulação.



Fonte: (Proteus, 2018).

Verificou-se, assim, que todos os resultados intermediários do circuito de comando simulado no Proteus foram condizentes com o que era esperado. Como já foi dito, o comportamento da corrente de *inrush* depois de o circuito ser acionado com o comando projetado foi analisado no *Simulink*. Antes disso, porém, realizou-se uma verificação para conferir se o circuito realmente estava sendo chaveado no máximo de tensão nesse *software*, assim como estava ocorrendo no Proteus. Na Figura 22, pode-se observar a tensão da rede (dividida por $k=60$), em azul, e o ponto de gatilho, em vermelho, simulados no *Simulink*.

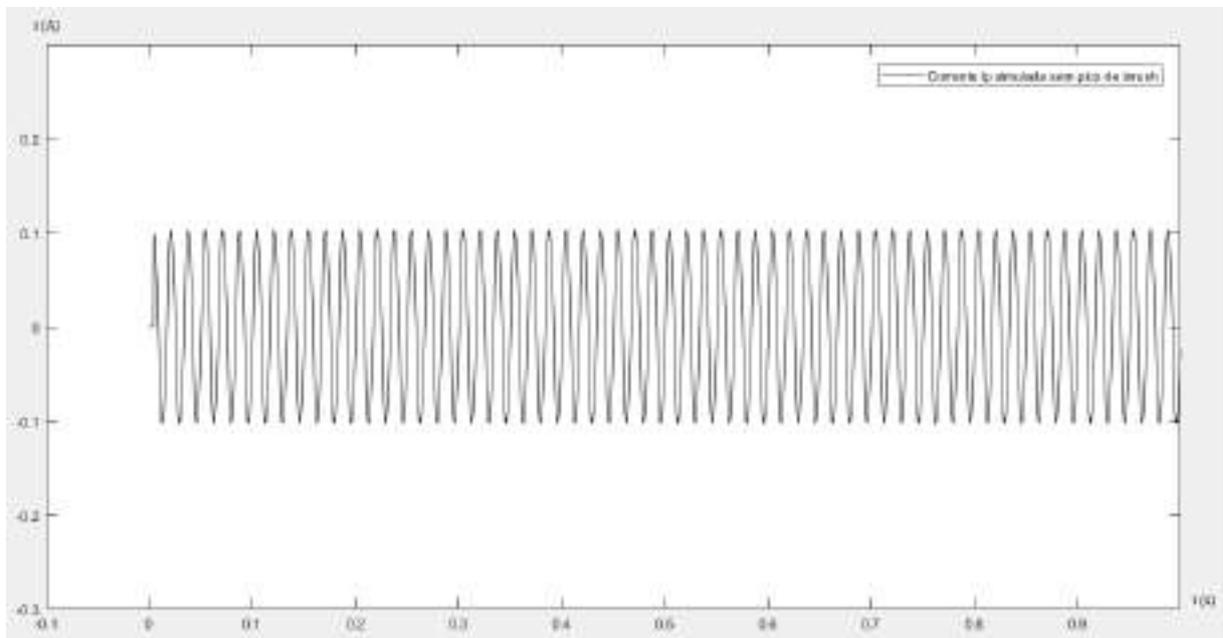
Figura 22 - Tensão da rede e disparo do gatilho em simulação no MATLAB®.



Fonte: (Da autora, 2018).

Depois da certificação de que o chaveamento realmente estava ocorrendo no máximo de tensão no *Simulink*, pode-se verificar o comportamento do *inrush* nesse instante. Na Figura 23, é possível ver a corrente do lado primário do transformador, i_p , após chaveamento no máximo da tensão. Nota-se que, de fato, houve diminuição da corrente de *inrush* após o controle do chaveamento. Como se pode perceber, os picos elevados de corrente de *inrush* são, agora, inexistentes e a corrente assume o valor de excitação em regime permanente desde o início do chaveamento. Assim, todos os resultados foram condizentes e o controle realizado foi bastante eficiente, pois diminuiu a magnitude da corrente de *inrush*.

Figura 23 - Resultado da simulação da corrente i_p com controle de chaveamento.



Fonte: (Da autora, 2018).

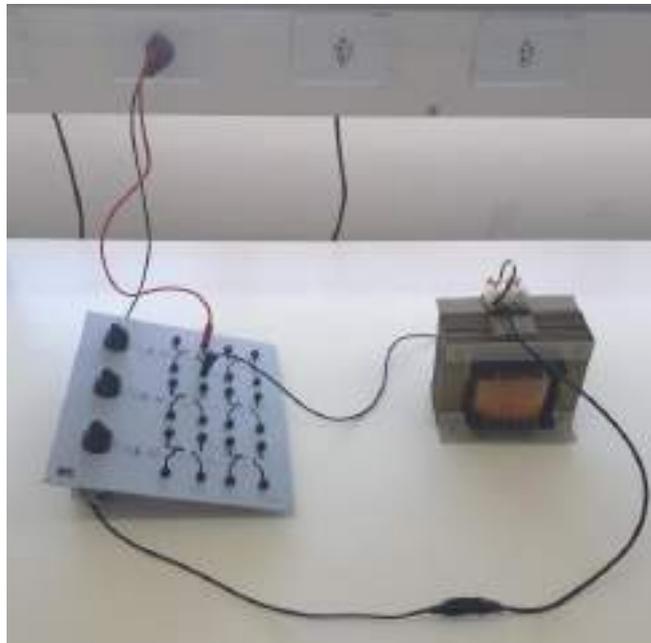
6 MONTAGEM EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Como já foi mencionado, o circuito de comando também foi testado experimentalmente. Assim como na seção anterior, a apresentação da montagem experimental também será dividida em duas partes. Inicialmente, serão mostrados os resultados do experimento realizado sem controle do chaveamento, para que seja possível observar a presença da corrente de *inrush* e, em seguida, serão mostrados os resultados do experimento com controle do chaveamento.

6.1 Montagem experimental e resultados sem controle do chaveamento

Primeiramente, energizou-se o transformador sem nenhum tipo de controle. A montagem do circuito para esse tipo de energização pode ser vista na Figura 24. Conectou-se a fase da tensão da rede a uma chave, a chave foi ligada a uma das extremidades do primário do transformador, enquanto a outra extremidade foi ligada ao neutro da rede. O secundário ficou em vazio, como na simulação.

Figura 24 - Montagem do circuito para energização do transformador sem controle do chaveamento.

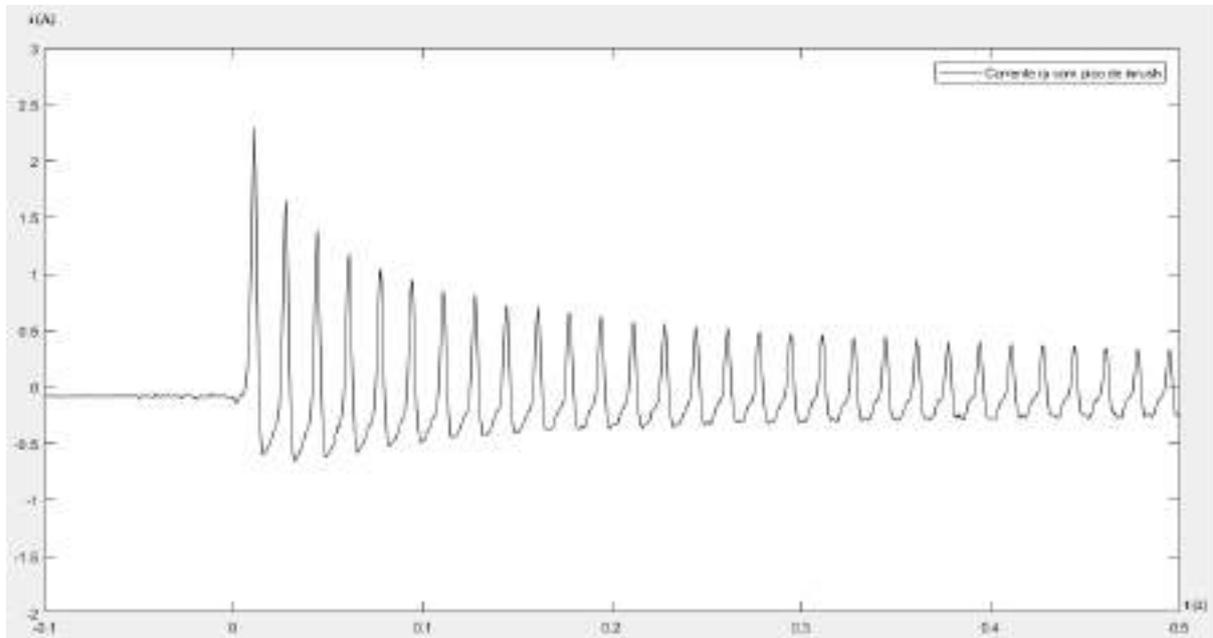


Fonte: (Da autora, 2018).

Feito isto, para energizar o transformador, bastava fechar a chave em um momento qualquer. Na prática, não foi possível energizar exatamente no ponto zero de tensão como na simulação, pois o circuito de comando foi projetado para energizar no máximo de tensão, então

não poderia ser usado aqui. Assim, energizou-se em um ponto aleatório definido pelo fechamento da chave e verificou-se a presença da corrente vista na Figura 25.

Figura 25 - Resultado experimental da corrente i_p sem controle de chaveamento.



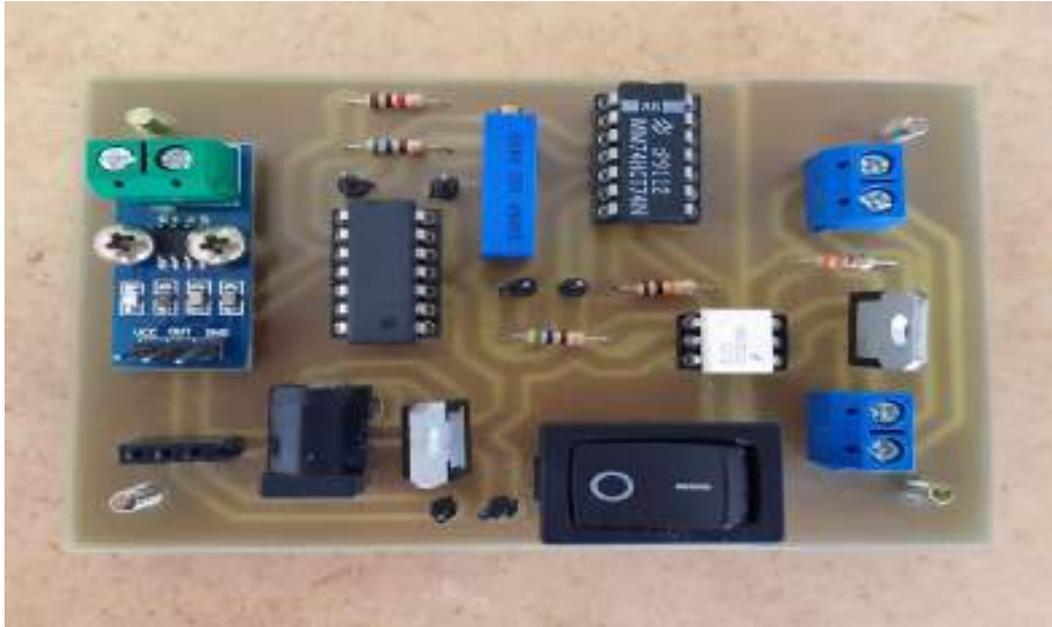
Fonte: (Da autora, 2018).

Como é possível observar, a corrente de *inrush*, se comparada à de excitação, assumiu um pico muito elevado, atingindo um valor de 2,31 A. Apesar de ter sido usado um transformador com os mesmos parâmetros do da simulação, o valor de pico do *inrush* deu diferente na prática porque não se chaveou no mesmo instante da simulação e, além disso, os aspectos construtivos do transformador impedem que a prática seja exatamente igual à simulação. Viu-se que, no experimento sem controle do chaveamento, a corrente de *inrush* foi muito maior que a de excitação nominal e também ultrapassou o valor da corrente nominal do transformador, que era de 2,27 A.

6.2 Montagem experimental e resultados com controle do chaveamento

Com o objetivo de diminuir o alto valor de *inrush* visto na Figura 23, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso com o circuito de comando projetado. Nela, foram colocados quase todos os componentes da Figura 12, desde o sensor até o TRIAC. Embora o fusível e o indutor também façam parte do circuito de controle, eles ficaram fora da placa devido ao tamanho. A placa pode ser vista na Figura 26. O *layout* da placa é apresentado no apêndice C.

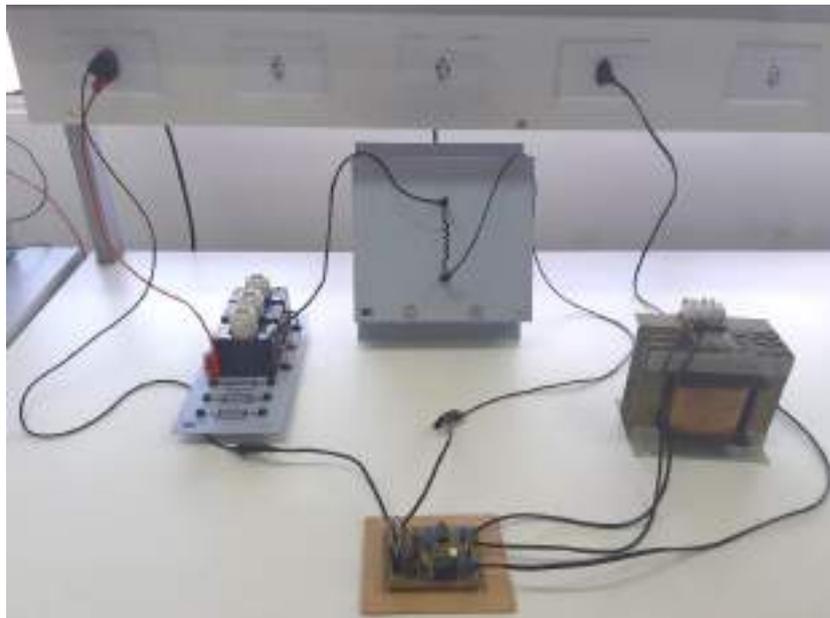
Figura 26 - Placa do circuito projetado para comando do chaveamento.



Fonte: (Da autora, 2018).

O circuito completo, já com o transformador, pode ser visualizado na Figura 27. Esse é exatamente o circuito que foi mostrado na Figura 12.

Figura 27 - Montagem completa do circuito de chaveamento do transformador.

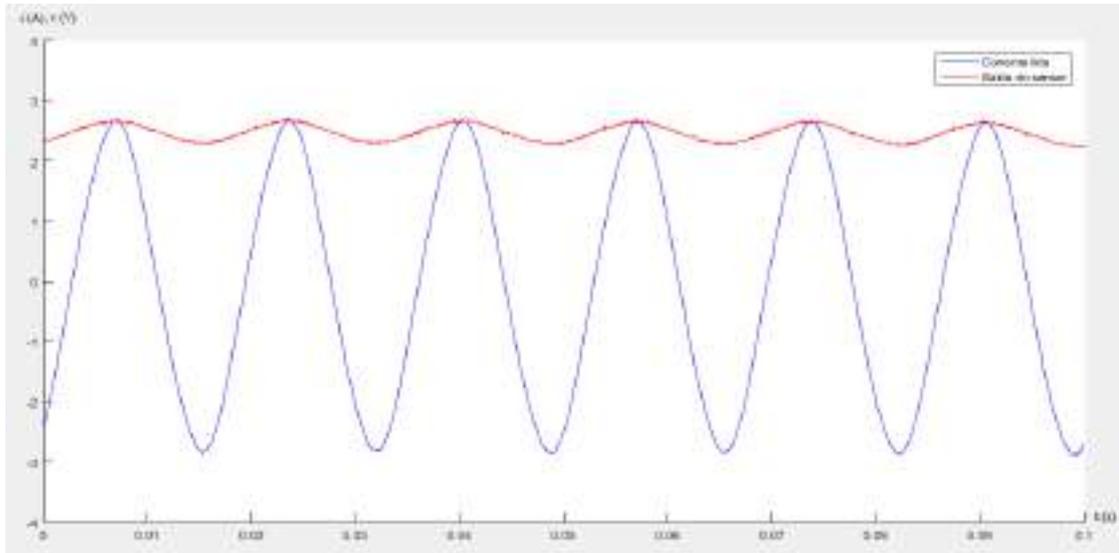


Fonte: (Da autora, 2018).

Através do circuito mostrado na Figura 27, foi possível energizar o transformador no momento de pico da tensão da rede, mas, antes de mostrar o resultado final, serão mostrados,

assim como na simulação, os resultados intermediários que asseguram a funcionalidade do circuito. Inicialmente, é possível visualizar a corrente lida pelo sensor juntamente com a tensão de saída fornecida por ele. Isso pode ser visto na Figura 28.

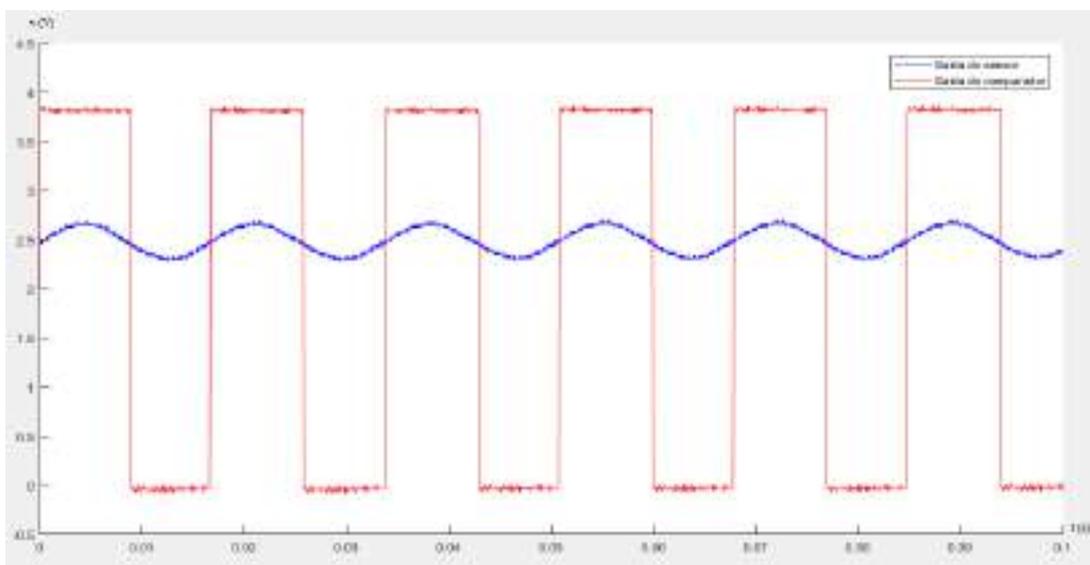
Figura 28 - Corrente do circuito de comando e saída do sensor em experimento.



Fonte: (Da autora, 2018).

Vê-se que, no instante em que a corrente passa por 0 V, a tensão fornecida pelo sensor é 2,5 V. Isso garante que a tensão de saída está em conformidade com o que era esperado. Para dar prosseguimento, é importante que se veja, também, a saída do comparador em conjunto com a tensão de saída do sensor. Vê-se esse resultado na Figura 29.

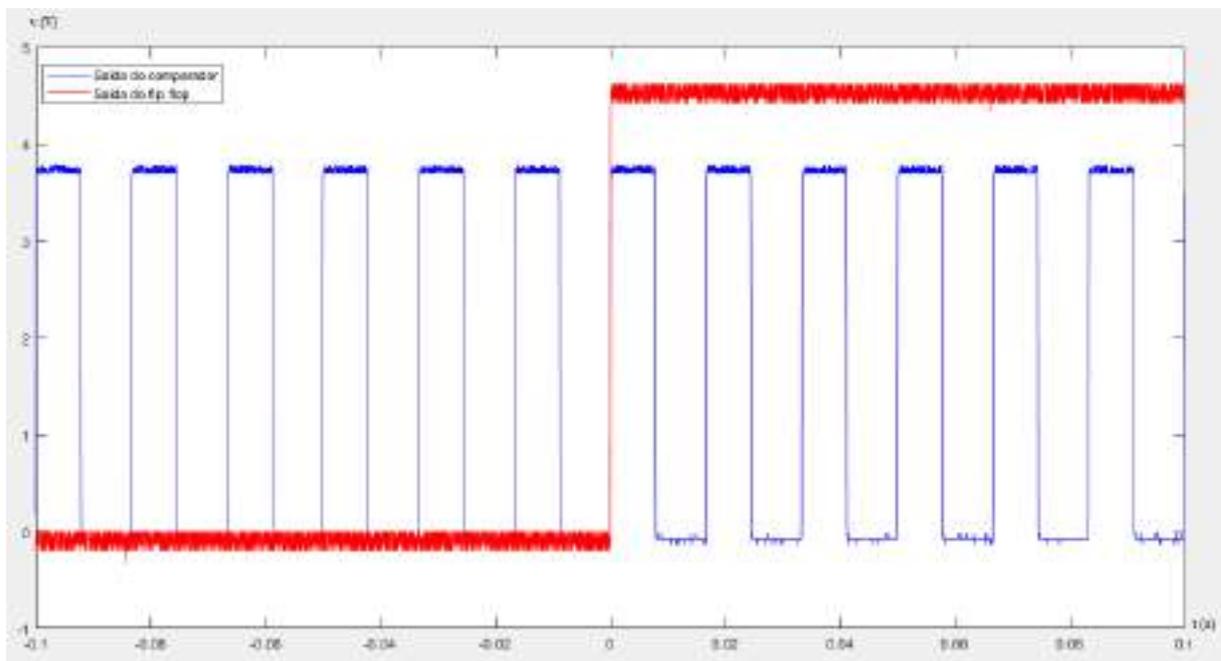
Figura 29 - Saída do sensor e saída do comparador em experimento.



Fonte: (Da autora, 2018).

Nota-se que, nos exatos momentos em que a tensão fornecida pelo sensor passa pelo ponto de 2,5 V, o amplificador fornece pulsos de tensão próximos a 4 V. A tensão não foi exatamente 5 V na saída do amplificador pelo mesmo motivo já explicado na simulação. Esse comportamento condiz com o que era esperado. Pode-se, agora, ver a tensão de saída do flip-flop juntamente com a tensão de saída do amplificador para comparar os momentos dos pulsos. Isto é observado na Figura 30.

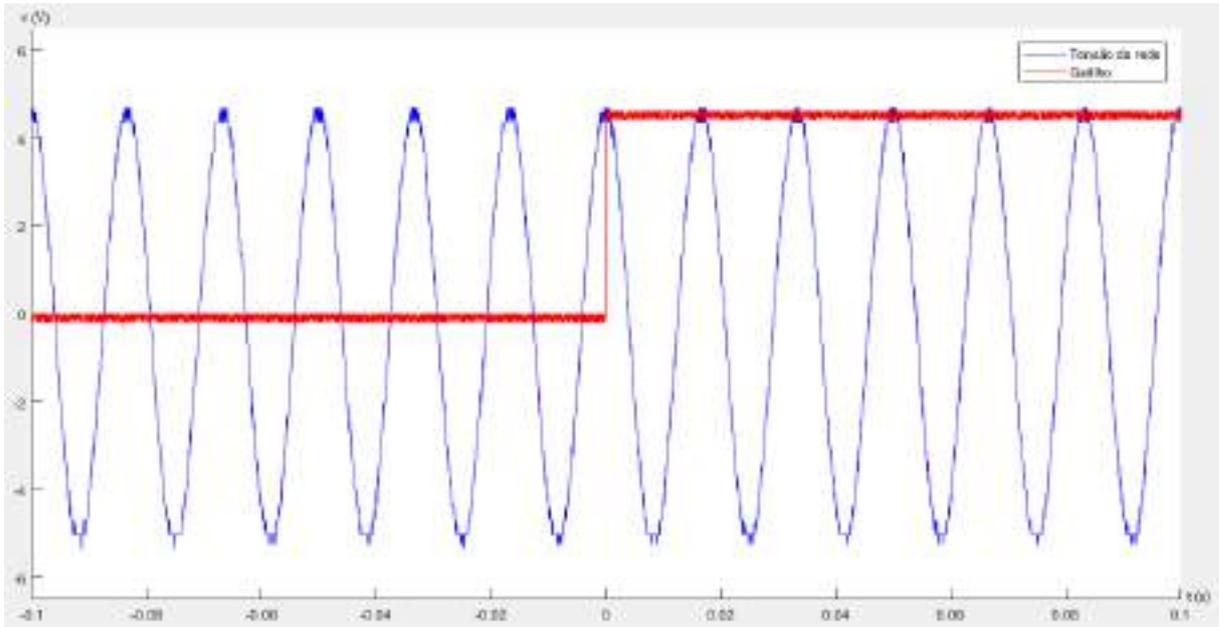
Figura 30 - Saída do comparador e saída do flip-flop em experimento.



Fonte: (Da autora, 2018).

Percebe-se que, a partir do momento que o botão *on-off* foi ativado, o flip-flop entrou em operação, identificou, após seu acionamento, o primeiro pulso do amplificador e manteve uma tensão próxima de 5 V durante todo o tempo. Esse comportamento garante que o circuito projetado está funcionando como se esperava. Apenas para efeitos de comprovação, vê-se, na Figura 31, a tensão da rede (dividida por um valor $k=60$) juntamente com o momento do gatilho (saída do flip-flop) para o TRIAC. Nota-se que o gatilho ocorreu exatamente no momento de valor máximo da rede.

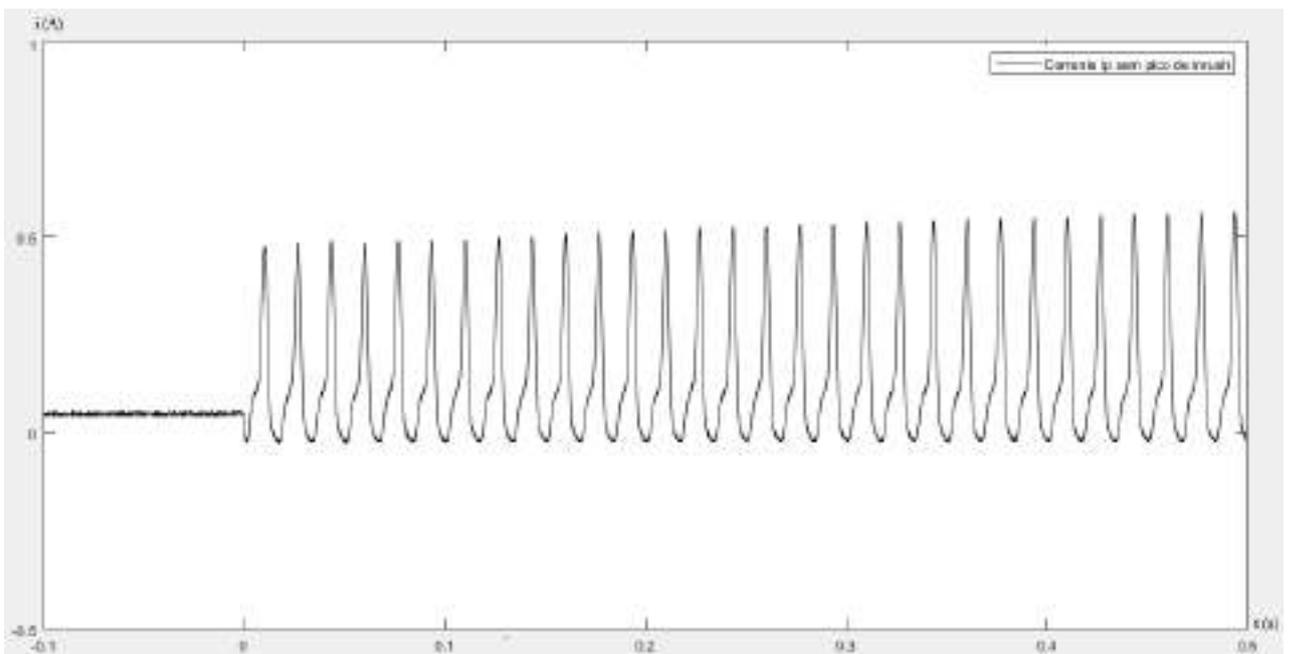
Figura 31 - Tensão da rede e disparo do TRIAC em experimento.



Fonte: (Da autora, 2018).

Após verificar que todas as etapas apresentavam um correto funcionamento, foi possível visualizar a corrente do primário do transformador, i_p . Ela pode ser vista na Figura 32.

Figura 32 - Resultado experimental da corrente i_p com controle de chaveamento.



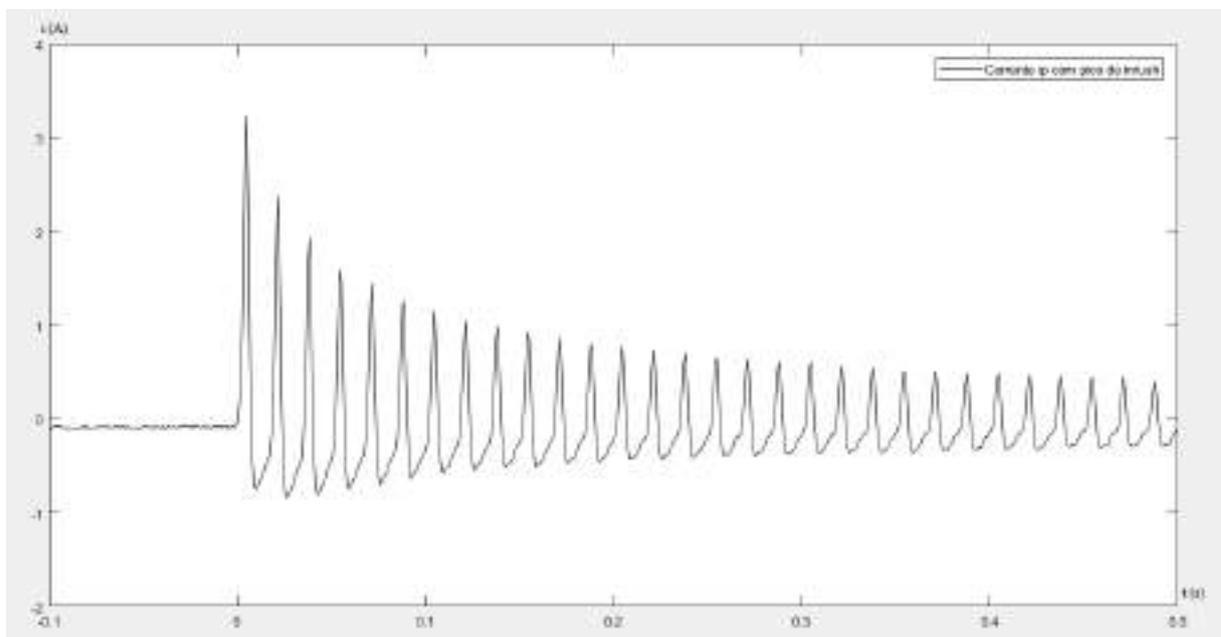
Fonte: (Da autora, 2018).

Percebe-se que a corrente de *inrush* não possui mais o pico que havia sido visto quando houve uma energização não controlada do transformador. Nota-se que os valores iniciais da corrente do primário do transformador foram até menores, mas muito próximos do valor de excitação em regime permanente. Assim, foi possível perceber que o circuito projetado foi bastante eficiente para o propósito de diminuição da corrente de *inrush* na energização de um transformador de potência monofásico.

Esses resultados foram alcançados para um transformador 500 VA, 220V/50V que nunca havia sido energizado. Então, para efeitos de comprovação, o circuito de comando foi testado com outros transformadores existentes em laboratório. Em alguns casos, quando o transformador havia sido energizado recentemente, notou-se que, apesar de uma diminuição, não houve eliminação completa da corrente de *inrush*.

Realizou-se um teste com num transformador 500 VA, 220V/110V que havia sido recentemente energizado. Inicialmente, levantou-se a curva de *inrush* desse transformador sem controle do chaveamento. O resultado pode ser visto na Figura 33. O pico de corrente alcançado foi de 3,242 A.

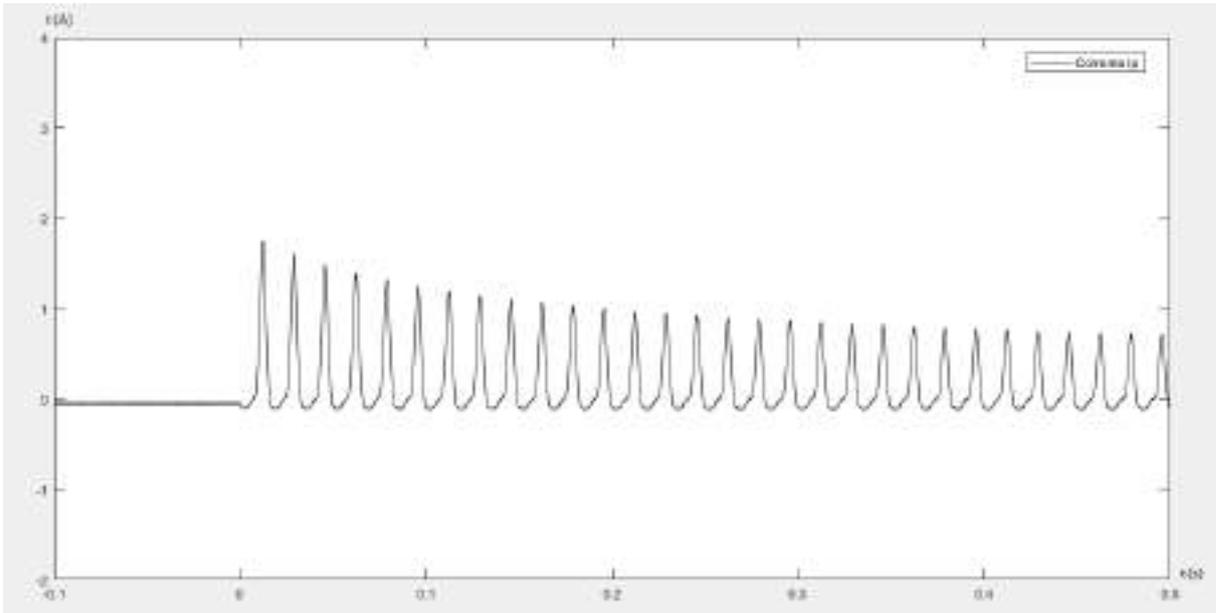
Figura 33 - Resultado experimental da corrente i_p sem controle em transformador recentemente energizado.



Fonte: (Da autora, 2018).

Em seguida, plotou-se a curva de *inrush* desse transformador com controle do chaveamento. Isso pode ser visto na Figura 34. Percebe-se que o pico alcançado foi de 1,74 A, menor do que o valor sem controle, porém o pico não foi eliminado.

Figura 34 - Resultado experimental da corrente i_p com controle em transformador recentemente energizado.



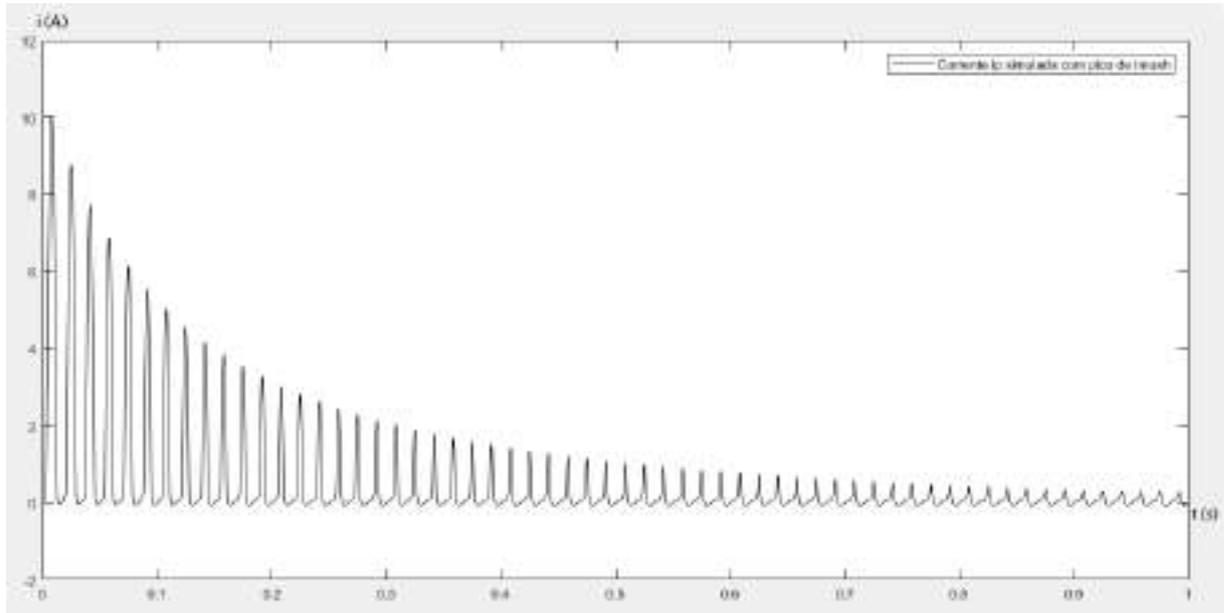
Fonte: (Da autora, 2018).

Verificou-se que a não eliminação do pico do *inrush* aconteceu devido ao magnetismo residual que persiste no transformador durante um tempo. Como já se sabe, se o fluxo residual possuir o mesmo sentido que o fluxo original do transformador, ele irá contribuir para o aumento da corrente de *inrush*. O circuito de comando projetado identifica o ponto máximo de tensão da rede, que indica o fluxo original mínimo, mas ele não detecta o fluxo residual.

Apenas para comprovar que a não diminuição completa do pico da corrente de *inrush* nesse transformador ocorreu, de fato, pela existência do magnetismo residual, simulou-se o transformador 500 VA, 220V/110V e colocou-se, na simulação, um valor inicial de magnetismo. Na Figura 35, é possível ver a corrente alcançada nesse transformador, sem controle do chaveamento, e com um magnetismo inicial arbitrário de 0.8 V·s. Como se pode observar, para esse valor de magnetismo residual, a corrente de *inrush* atingiu um pico de quase 10 A.

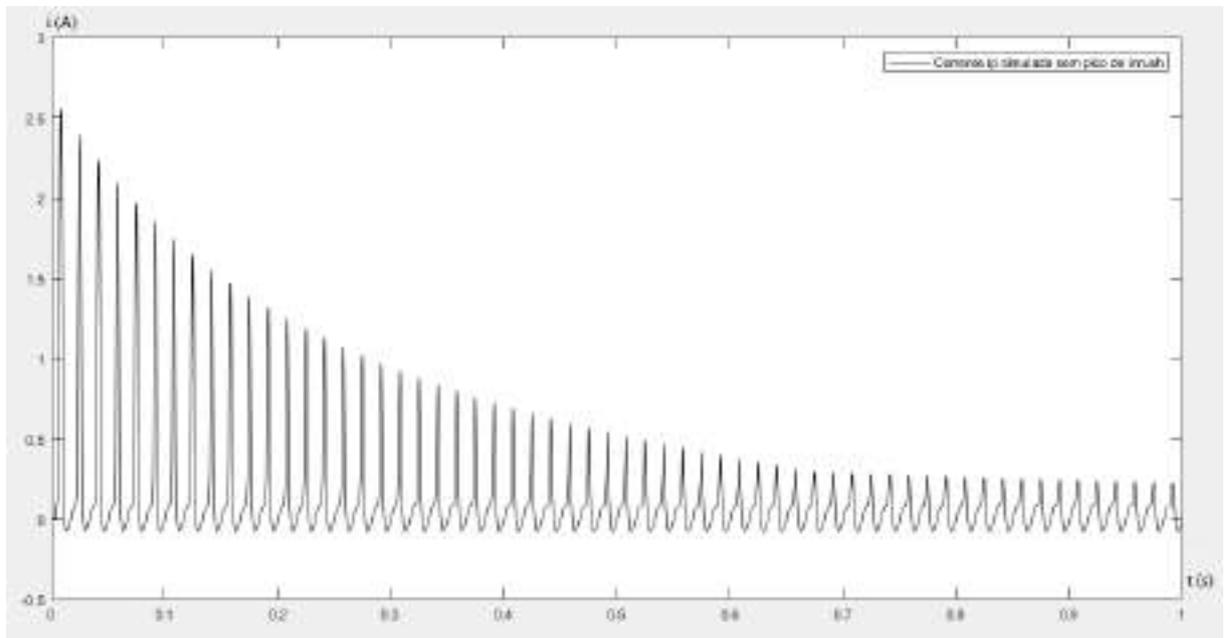
Em seguida, simulou-se esse mesmo transformador, já magnetizado inicialmente, porém agora controlado pelo circuito de comando projetado. O resultado dessa simulação pode ser visto na Figura 26. Como se pode notar, a corrente ficou próxima de 2,5 A, ou seja, diminuiu em relação à simulação sem controle, uma vez que se chaveou no máximo da tensão da rede, mas não eliminou completamente o pico elevado devido à presença inicial do magnetismo residual.

Figura 35 - Resultado em simulação da corrente i_p sem controle em transformador recentemente energizado.



Fonte: (Da autora, 2018).

Figura 36 - Resultado em simulação da corrente i_p com controle em transformador recentemente energizado.



Fonte: (Da autora, 2018).

Para que o circuito de comando desenvolvido também funcione em transformadores que foram recentemente energizados, é necessário que se estude uma maneira de eliminar o fluxo residual antes de energizar o transformador com o circuito projetado. Esse estudo, porém, não está no escopo deste trabalho e será abordado em trabalhos futuros.

7 CONCLUSÃO

A corrente de *inrush*, devido aos seus altos valores de pico, pode ocasionar efeitos não desejáveis que prejudicam os transformadores e, por consequência, o sistema elétrico como um todo. Existem alguns métodos para reduzir o valor dessa corrente, mas o mais eficiente e que possui menos consequências negativas é o método do chaveamento controlado. Uma das maneiras de se realizar esse chaveamento é através do controle de energização do transformador no pico da tensão.

De acordo com a literatura existente sobre o assunto, no momento de pico da tensão da rede, o fluxo magnético é zero e, portanto, a corrente também é zero. Devido a isso, o momento ideal para energizar um transformador é quando a tensão da rede está no seu valor máximo. Com base nesse conhecimento, projetou-se um circuito capaz de identificar o pico da tensão da rede e energizar o transformador nesse instante. O circuito desenvolvido foi composto por alguns componentes eletrônicos, tais como: sensor de corrente, amplificador operacional, flip-flop, optoacoplador e TRIAC. Tal circuito foi testado em simulação e em laboratório.

Percebeu-se que, quando não há o controle do chaveamento, isto é, quando se energiza o transformador em um ponto qualquer de tensão da rede diferente do valor máximo, a corrente de *inrush* assume picos muito maiores do que a corrente de excitação do transformador e maiores, também, do que a corrente nominal. Foi possível notar, ainda, que, nas simulações, os valores de *inrush* alcançados são um pouco diferentes dos valores vistos na prática devido a aspectos construtivos do transformador que não podem ser simulados.

Ao controlar o chaveamento com o circuito projetado, notou-se que, de fato, a corrente de *inrush* reduziu drasticamente o seu valor, ficando próxima à corrente de excitação. Para o transformador de 500 VA, 220V/50V utilizado neste trabalho, a corrente perdeu totalmente seu valor de pico elevado, tanto na simulação quanto na prática. Verificou-se, porém, que o alto valor de pico não foi completamente eliminado em todos os transformadores existentes no laboratório.

O elevado valor de pico do *inrush* foi totalmente extinto apenas em transformadores que nunca haviam sido energizados – e, portanto, não possuíam fluxo residual – e em transformadores que tinham sido energizados, mas já haviam perdido o magnetismo residual. Isso ocorreu porque, nos transformadores recentemente energizados, a presença do fluxo residual impede que o fluxo magnético do transformador seja totalmente nulo no momento do chaveamento. No entanto, mesmo nos transformadores previamente energizados, embora não

tenha ocorrido a eliminação completa do pico, houve uma redução no valor dele, pois o fluxo original do transformador, no momento do chaveamento, estava nulo e existia, apenas, fluxo residual.

O objetivo deste trabalho foi cumprido, pois pretendia-se criar um mecanismo de energização do transformador no pico máximo de tensão da rede para atestar a veracidade da teoria existente sobre esse assunto. Apesar da limitação causada pela presença do fluxo residual, o circuito desenvolvido atendeu ao que se desejava: realizar o chaveamento no pico da tensão da rede e verificar que, realmente, ocorre uma diminuição do valor de *inrush* com chaveamento no pico, embora, em alguns casos, seja necessário, antes da energização, eliminar o fluxo residual para que o pico seja totalmente extinto.

8 REFERÊNCIAS

- ADDLY, A. A. **Computation of inrush current forces on transformer windings.** *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 37, n.4, p. 2855-2857, 2001.
- AGASTI, S. K.; NARESH, R.; GHOSH, N. **Investigation of various affecting factors and reduction technique of transformer magnetizing inrush current.** International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication, Himachal Pradesh, 2016.
- APOLÔNIO, R.; OLIVEIRA, J. C.; BRONZEADO, H. S.; VASCONCELLOS, A. B. **Energização controlada de transformadores trifásicos: estratégia para redução da corrente de “inrush”.** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2005.
- ARAND, S. J.; SAEEDI, M.; MASOUDI, S. **Transformer inrush current mitigation using controlled switching and magnetic flux shunts.** International Journal of Energy and Power Engineering, Dehdasht, 2013.
- ARRUDA, E. F. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada *Wavelet*.** Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2003.
- AZEVEDO, A. C. **Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos “passantes” e correntes de energização.** Tese de Doutorado. Uberlândia, 2007.
- BERNARDES, A. P. **Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital.** Dissertação de Mestrado. São Carlos, 2006.
- BRAGA, N. C. **Acopladores e Chaves Ópticas.** Revista Saber Eletrônica, n. 380, 2004.
- BRUNKE, J. H. **Elimination of transiente inrush currents when energizing unloaded power transformers.** Tese de Doutorado. Zurich, 1998.
- BRUNKE, J. H.; FRÖHLICH, K. J. **Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 2, 2001.
- BUKUBUKWANA, M.; ZIVANOVIC, R. **Inrush current transients during energization of an unloaded transformer on the eskom network.** 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 2005.
- FONSECA, W. S. **Análise de esforços eletromagneto-mecânicos nos enrolamentos de um transformador sob condições de correntes de *inrush*.** Tese de Doutorado. Belém, 2016.
- HAGH, M. T.; ABAPOUR, M. **DC reator type transformer inrush current limiter.** *IET Electr. Power Appl.*, 2007.
- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering – Design and Practice.** 1 ed. New York, 2004.
- LISITA, L. R. **Conversão Eletromecânica de Energia.** p. 11-13, 2000.

MARDEGAN, C. **Proteção dos transformadores.** O Setor Elétrico, p. 26-39, 2010.

MIRKALAEI, S.A. M.; HASHIESH, F. **Controlled Switching to Mitigate Power Transformers Inrush Current Phenomenon.** Power Engineering Conference (UPEC) 50th International Universities, IEEE, Stoke on Trent, 2015.

OLIVEIRA, J. C.; BRONZEADO, H. S. **Energização Controlada de Transformadores Trifásicos: Estratégia para Redução da Corrente de Inrush.** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. **Transformadores: teorias e ensaios.** Itajubá, 1984.

PEDRAZOLI, G. Z. **Banco de Capacitores sem Corrente de Inrush.** Trabalho de Conclusão de Curso. Guaratinguetá, 2011.

PETERSON, H. A. **Transients in Power Systems.** Dover Publications, New York, p. 288-296, 1951.

PRIKLER, L.; BÁNFAI, G.; BÁN, G.; BECKER, P. **Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers.** International Conference on Power System Transients, New Orleans, 2003.

RAFFO, G. V. **Análise da Corrente de Inrush em Transformadores de Potência.** Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre, 2010.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica.** Curitiba, 2016.

SANTILIO, F. P.; VELASCO, L.N.; SILVA, T.V.; REZENDE, P. H. O.; VASCONCELOS, L. E.; BARBOSA JUNIOR, J. A. F.; SOUZA, A. C. **Verificação dos fatores que influenciam a corrente de inrush: Apresentação de uma proposta para a mitigação desse fenômeno e análise do efeito sympathetic.** XI CEEL, Uberlândia, 2013.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics.** Ontário, 2013.

SIL, A. K. **Experimental Study on Inrush Current of a Single Phase Transformer.** Tese de Doutorado. Calcutá, 2009.

SILVA, P. H. G. L. **Proteção Diferencial de Transformadores usando a Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira, 2014.

STAROSTA, J. **Quando as “coisas” partem.** O Setor Elétrico. 2014.

STEURER, M.; FRÖHLICH, K. **The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n.1, p. 155-160, 2002.

VERNEY, L. H.C. **Desempenho da proteção diferencial em transformadores de potência perante condições especiais de operação.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2012.

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. **Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral.** Revista Controle & Automação, vol.16, n. 3, Campinas, 2005.

APÊNDICE A

A seguir, serão mostrados os resultados dos ensaios em aberto e de curto-circuito realizados num transformador monofásico 500 VA, 220V/50V. O ensaio em aberto foi realizado com o lado de baixa tensão em aberto, enquanto o ensaio de curto-circuito foi feito com o lado de baixa tensão curto-circuitado. Na Tabela A-1, observa-se os dados do ensaio em aberto, enquanto na Tabela A-2 vê-se os resultados do ensaio de curto-circuito.

- **Ensaio em aberto**

Tabela A-1 - Dados do ensaio em aberto.

Grandeza	Valor
Tensão Nominal (V_N)	220 V
Corrente em Aberto (I_A)	0,1616 A
Potência (P)	14 W

Fonte: (Da autora, 2018).

- **Ensaio de curto-circuito**

Tabela A-2 - Dados do ensaio de curto-circuito.

Grandeza	Valor
Corrente Nominal (I_N)	2,27 A
Tensão de Curto (V_{CC})	13,32 V
Potência (P)	28 W

Fonte: (Da autora, 2018).

Por meio desses valores, foi possível calcular os parâmetros necessários à simulação do transformador. As resistências do lado primário e do secundário foram medidas diretamente no transformador por meio de um multímetro, enquanto os demais parâmetros foram calculados a partir dos ensaios acima. Na tabela A-3, é possível ver os valores dos parâmetros do transformador.

Tabela A-3 - Valores dos parâmetros do transformador.

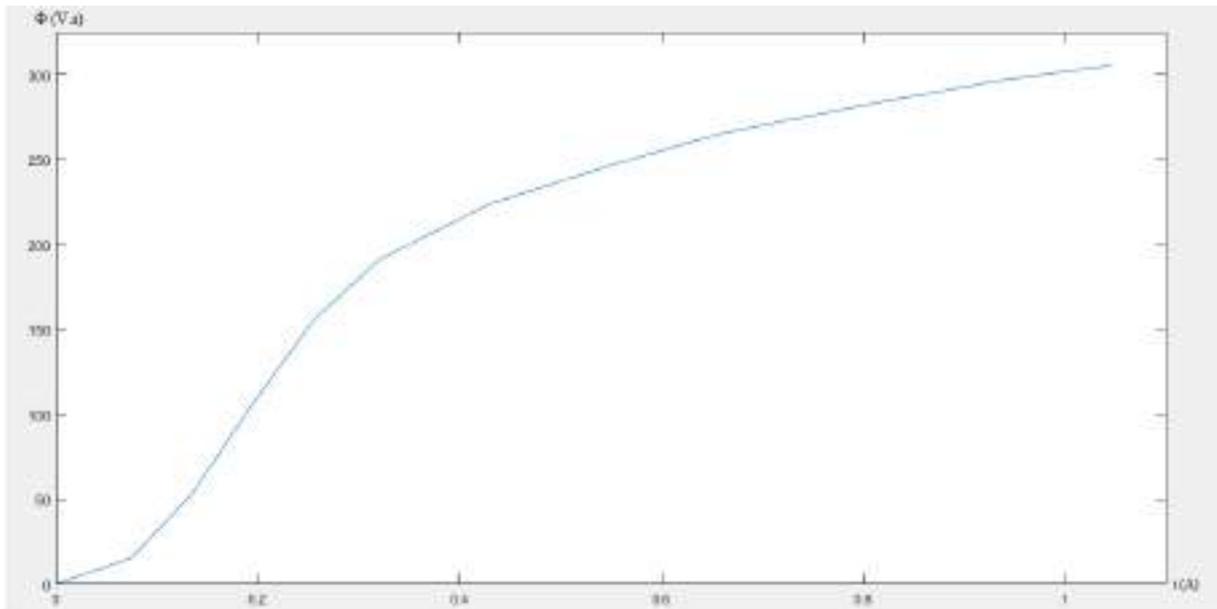
Parâmetro	Valor
Resistência do primário (R_1)	2,4 Ω
Indutância do primário (L_1)	2,958 mH
Resistência do secundário (R_2)	0,2 Ω
Indutância do secundário (L_2)	152,790 μ H
Resistência de magnetização (R_m)	3457 Ω
Indutância de magnetização (L_m)	3,917 H

Fonte: (Da autora, 2018).

APÊNDICE B

A curva de magnetização foi encontrada por meio da energização do transformador 500 VA, 220/50 V em vazio. Variou-se a tensão de entrada no lado de baixa tensão e mediu-se os valores de pico da corrente de entrada e da tensão de saída. Assim, considerando que a tensão é a variação do fluxo em um intervalo de tempo e assumindo um intervalo de tempo de 1 s, foi possível plotar a curva fluxo (V.s) *versus* corrente (I) e verificar o comportamento da curva que tendeu à saturação.

Figura B-1 - Curva de magnetização do transformador 500 VA, 220 V/50 V.

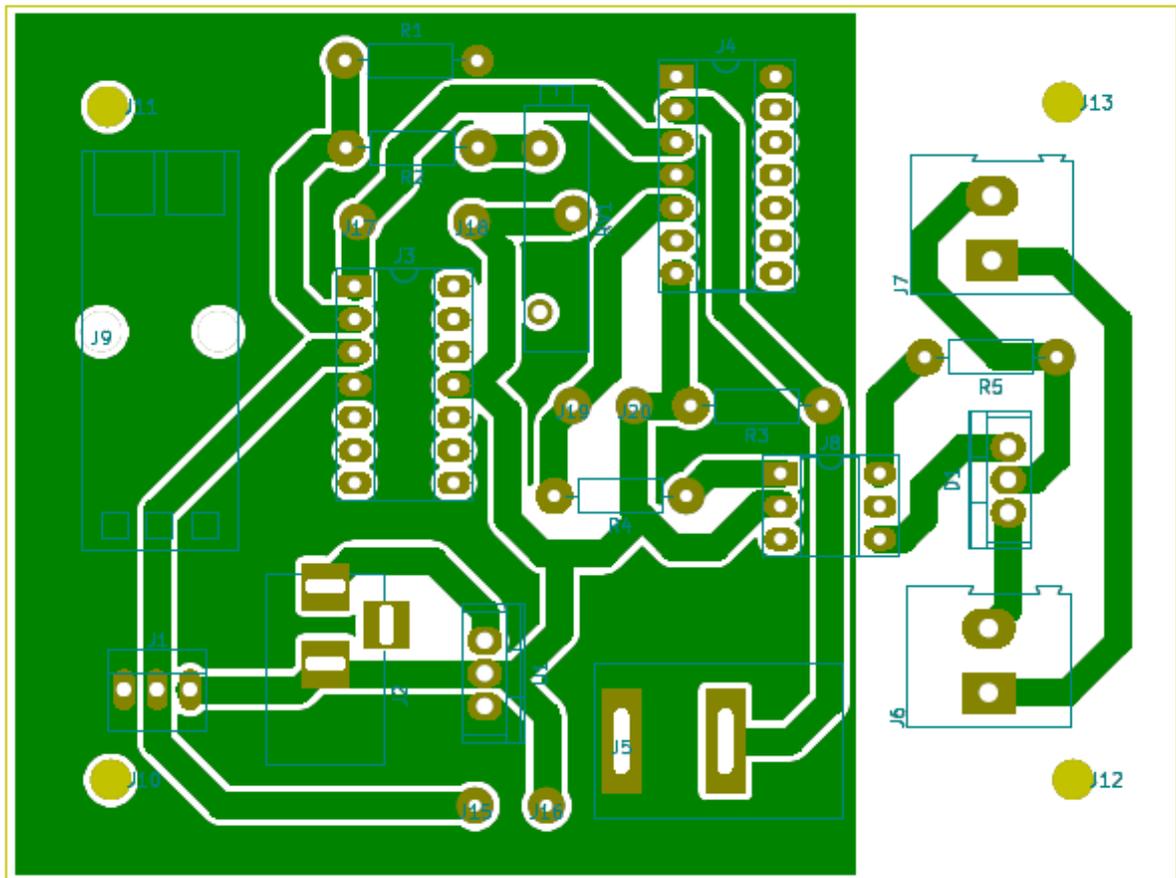


Fonte: (Da autora, 2018).

APÊNDICE C

A seguir, é apresentado o *layout* da placa que foi desenvolvida para circuito de comando do transformador.

Figura C-1 – *Layout* da placa projetada para comando do transformador.



Fonte: (Da autora, 2018).