

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALAN BUDASZEWSKI PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* EM
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E
DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA
MITIGAÇÃO**

Porto Alegre - RS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CARACTERIZAÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* EM
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E
DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA
MITIGAÇÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALAN BUDASZEWSKI PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DE CORRENTES DE *INRUSH* EM
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E
DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA
MITIGAÇÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. MSc. Igor Pasa Wiltuschnig – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

MSc. Ben Hur Bandeira Boff – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, Junho de 2019.

RESUMO

Este projeto de diplomação tem como propósito o estudo e entendimento do comportamento das correntes transitórias de magnetização (*inrush*), especificamente do núcleo de um transformador monofásico, e posterior desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que implemente um processo de acionamento proporcionando uma mitigação desta corrente de *inrush*. O circuito tem seu funcionamento baseado no controle do campo magnético residual do núcleo do transformador através da aplicação de uma corrente CC no enrolamento primário e posterior comando do ângulo de acionamento da fonte alternada da rede de alimentação. O dispositivo desenvolvido pode ter aplicação em manobras de energização de transformadores de subestações se tiver seu projeto adequado. Nesta etapa, o desenvolvimento tem foco didático, pois permite visualizar e controlar o fenômeno da corrente de *inrush*, permitindo produzir desde a pior como a melhor condição de energização.

Palavras-chaves: atenuação de *inrush*, corrente de *inrush*, corrente de magnetização, transformador monofásico.

ABSTRACT

The purpose of this project is to study and understand the behavior of transient magnetizing currents (inrush) specifically of the core of a single-phase transformer and subsequent development of an electronic device that implements a drive process providing an attenuation of this inrush current. The circuit has its operation based on the control of the residual magnetic field of the transformer core by the application of a DC current in the primary winding and subsequent command of the drive angle of the alternating source of the mains. The developed device may have application in energizing maneuvers of substation transformers if it has its proper design. In this stage, the development has didactic focus, since it allows visualizing and controlling the phenomenon of the inrush current, allowing to produce from the worst as the best condition of energization.

Keywords: inrush attenuation, inrush current, magnetizing current, single-phase transformer.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo Geral	13
1.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Divisão do Trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Classificação dos Materiais Magnéticos	14
2.2 Revisão sobre Variáveis e Grandezas Eletromagnéticas.....	16
2.3 Magnetização dos Materiais Ferromagnéticos	18
2.4 Corrente de Excitação do Transformador	21
2.5 A Corrente de <i>inrush</i>	24
2.6 Mitigação da Corrente de <i>inrush</i>	26
2.6.1 Fechamento Rápido	30
2.6.2 Fechamento Atrasado Estratégico	31
2.6.3 Fechamento Simultâneo Estratégico.....	32
2.6.4 Magnetização Forçada do Núcleo e Fechamento Simultâneo.....	32
3 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO DE MITIGAÇÃO PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	34
3.1 Ensaio De Corrente de Excitação	37
3.2 Esquema Simplificado de Funcionamento do Dispositivo	38
3.3 Circuito Completo de Mitigação e seu Projeto	39
3.3.1 Bloco de alimentação.....	41
3.3.2 Bloco display e encoder.....	42
3.3.3 Bloco detector de passagem por zero - TCA785 (<i>Zero Crossing</i>)	44
3.3.4 Bloco Arduino Standalone.....	46
3.3.5 Bloco de controle da corrente CC.....	48
3.3.6 Bloco de controle da corrente CA (REDE 127 V)	49
3.3.7 Bloco entrada de alimentação.....	51
4 RESULTADOS	52
5 CONCLUSÃO.....	59

REFERÊNCIAS60

ANEXOS61

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Circuito magnético composto por um núcleo magnético simples e um enrolamento de N espiras.....	16
Figura 2: Domínios Magnéticos (ou Dipolos Magnéticos). (a) domínios orientados em sentidos aleatórios sem a influência de um campo magnético externo (b) domínios orientados conforme campo magnético externo.....	19
Figura 3: Curva de magnetização inicial de um material ferromagnético. Apresentando sua zona linear e de saturação da densidade do campo magnético (B) em relação à intensidade de campo magnético (H).....	19
Figura 4: Laço de histerese de um material ferromagnético e seus principais pontos de estudo.....	20
Figura 5: Curvas de 3 laços de histerese distintos ($\text{Área} \propto \text{Perdas}$).....	21
Figura 6: Relação entre o fluxo magnético e o laço de histerese de um material ferromagnético para a corrente de excitação exigida	23
Figura 7: Corrente de excitação total de um transformador típico	23
Figura 8: Efeito do fluxo de pico sobre a corrente de magnetização requerida pelo material.....	24
Figura 9: Defasagem de 90° entre a tensão e o fluxo magnético.....	25
Figura 10: Caso ótimo de fechamento da alimentação para transformadores monofásicos. Ambos os instantes do Caso 1 ou do Caso 2 são ideias para a mitigação da corrente de <i>inrush</i>	27
Figura 11: Fechamento ótimo em caso de fluxo residual. Os pontos 1 e 2 indicam os momentos onde o fluxo presumível se iguala ao fluxo residual do núcleo ferromagnético e ambos são ótimos para o chaveamento da fonte de alimentação.	27
Figura 12: Distribuição de fluxo em transformador trifásico com enrolamento em núcleo de três pernas.....	28
Figura 13: Fluxos residuais e dinâmicos após o fechamento da primeira fase (C) e posteriormente das fases (A) e (B). Indicação dos períodos dinâmicos e de regime permanente dos fluxos magnéticos.	29
Figura 14: Correntes de <i>inrush</i> - Transformador Trifásico Y-D. Cada fase apresenta uma situação distinta de corrente em um mesmo momento de chaveamento simultâneo das 3 fases.	29
Figura 15: Fluxo presumível e fluxo dinâmico em transformador trifásico.....	31
Figura 16: Fechamento atrasado estratégico. Chaveamento das fases B e C após estabilização do fluxo magnético, posterior ao período dinâmico.	32
Figura 17: Fechamento com magnetização forçada e simultâneo das três fases.....	33
Figura 18: Exemplos de situações para fechamento ótimo com corrente de <i>inrush</i> nula.....	35

Figura 19: Exemplo de situação para fechamento em 0° com máxima corrente de <i>inrush</i> . O fluxo presumível se encontra exatamente ao contrário do fluxo residual.....	35
Figura 20: Transformador utilizado nos ensaios do projeto.....	36
Figura 21: Placa de identificação do transformador utilizado nos ensaios do projeto. Transformador 127/220 V, 150 VA e 60 Hz.....	36
Figura 22: Circuito para ensaio de corrente de excitação do transformador.....	37
Figura 23: Corrente de excitação do transformador.....	37
Figura 24: Esquemático simplificado de funcionamento.....	38
Figura 25: Esquemático circuito completo.....	40
Figura 26: Esquemático bloco da alimentação.....	42
Figura 27: Esquemático <i>Display e Encoder</i>	43
Figura 28: <i>Display</i> imagem real.....	43
Figura 29: Esquemático CI TCA785 – Detector de Passagem por Zero.....	45
Figura 30: Simulação Sinal de Pulso TCA785 – Software Proteus 8.....	45
Figura 31: Esquemático bloco arduino em configuração <i>standalone</i>	47
Figura 32: Arduino UNO e Microcontrolador ATmega328.....	47
Figura 33: Esquemático bloco de acionamento da corrente CC através do SCR.....	49
Figura 34: Esquemático bloco de Acionamento da corrente CA através do TRIAC (TIC226 ou TIC246).....	50
Figura 35: Esquemático entrada da alimentação do circuito.....	51
Figura 36: Energização em Ângulo 0°	52
Figura 37: Energização em Ângulo 45°	53
Figura 38: Energização em Ângulo 90°	53
Figura 39: Energização em Ângulo 135°	54
Figura 40: Energização em Ângulo 180° - Escala 2.00V.....	54
Figura 41: Energização em Ângulo 180° - Escala 100mV.....	55
Figura 42: Energização em Ângulo 225°	55

Figura 43: Energização em Ângulo 270°.....	56
Figura 44: Energização em Ângulo 315°.....	56
Figura 45: Gráfico do pico da corrente de <i>inrush</i> x ângulo de energização da rede.....	58

1 INTRODUÇÃO

A energia, conforme princípio da conservação de energia, não pode ser criada e nem perdida, apenas transformada em suas diferentes formas. Para isso existem máquinas como motores elétricos, motores à combustão, máquinas à vapor, geradores, refrigeradores, etc. Todos desempenham a função de converter um determinado tipo de energia em outro tipo mais adequado à determinada função desejada.

Transformadores são máquinas elétricas peculiares, pois desempenham a função de conversão de energia elétrica (CA) de uma determinada frequência e nível de tensão em uma energia também elétrica (CA) com a mesma frequência mas de nível de tensão diferente, ou seja, mantém a mesma natureza da energia na conversão, mas com suas características alteradas. Os transformadores, ao contrário da maioria das máquinas de conversão, não possuem partes móveis em suas estruturas, seu funcionamento está baseado na indução de campos magnéticos entre seus enrolamentos, direcionados por um núcleo ferromagnético laminado. Em sua maioria, os transformadores possuem dois enrolamentos independentes, os quais são denominados de enrolamento primário (ou enrolamento de entrada, ligado à fonte de energia) e enrolamento secundário (ou enrolamento de saída, ligado à carga).

O aparecimento de uma diferença de potencial no enrolamento secundário se faz pelo aparecimento de um campo magnético variável em seu interior gerado pela corrente elétrica (CA) injetada no enrolamento primário. O valor eficaz dessa tensão no enrolamento secundário está diretamente relacionado com a variação do fluxo magnético que concatena a bobina do secundário e com o número de espiras que esse enrolamento possui.

Um fenômeno transitório importante que pode ser observado logo após um transformador ser energizado é um pico de corrente no enrolamento primário que tipicamente pode atingir de 10 a 20 vezes o valor da corrente nominal do transformador. Esta corrente é chamada de corrente transitória inicial ou corrente de *inrush*. A origem desta corrente é uma

saturação profunda do núcleo ferromagnético que pode ocorrer no instante da energização. Entretanto, a ocorrência dessa saturação depende da combinação de dois fatores: fluxo magnético residual do núcleo e ângulo elétrico da tensão primária no instante da energização. Portanto, podem ocorrer combinações que geram corrente de *inrush* com amplitudes bastante elevadas, tanto com sinal positivo como negativo, como podem ocorrer situações onde não aparece a corrente de *inrush*.

Fenômenos transitórios muitas vezes são pouco estudados por apresentarem baixa relevância e serem muitas vezes de difícil entendimento e análise, pois com frequência se mostram com características físicas não lineares. Contudo tratando-se da corrente de *inrush* esse panorama se altera, pois seu estudo se faz necessário no dimensionamento de sistemas de proteção devido à semelhança deste pico de corrente com um curto-circuito. Sua atenuação também traz benefícios proporcionando um menor estresse na operação do transformador.

A engenharia sempre busca o aprimoramento de seus projetos. O conhecimento e manipulação da corrente de *inrush* é um exemplo disto, tornando o projeto e operação de transformadores ainda mais robustos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar as correntes de *inrush* em transformadores monofásicos para o posterior desenvolvimento de um circuito capaz de mitigá-las.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Pesquisa teórica sobre o comportamento físico das correntes transitórias iniciais em transformadores;
- b) Montagem de circuito para mitigação das correntes de magnetização em transformadores de baixa potência monofásicos para estudo e entendimento, proporcionando uma base de conhecimento;
- c) Ensaios para a confirmação de resultados e testes do circuito concluído.

1.3 DIVISÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica com foco no entendimento da corrente de *inrush* e na análise das técnicas divulgadas no meio científico para a mitigação da *inrush*. No capítulo 3 é descrito, de forma detalhada, o desenvolvimento do trabalho, o circuito implementado e como ele opera. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais aplicados em transformadores monofásicos comerciais de pequeno porte. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e são apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordados conceitos relativos a propriedades de materiais ferromagnéticos, magnetização por corrente alternada, laço de histerese na magnetização de núcleos envolvendo transformadores, correntes de magnetização, corrente transitória inicial em transformadores monofásicos e métodos de mitigação destas correntes.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

De modo geral, as propriedades magnéticas de um material são classificadas através da susceptibilidade magnética χ_m e da permeabilidade magnética relativa μ_r . A susceptibilidade magnética mede a capacidade do material em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético ao qual é submetido, enquanto que a permeabilidade magnética mensura a facilidade com que o fluxo magnético se estabelece no interior de um material. A permeabilidade magnética do ferro é muito maior que a do ar (tipicamente na ordem de 2000 vezes maior), ou seja, tipicamente podem passar 2000 vezes mais linhas de fluxo magnético por determinado espaço ocupado pelo metal do que quando esse mesmo espaço esteja ocupado apenas pelo ar.

Um material é caracterizado como não magnético quando $\chi_m = 0$ ou $\mu_r = 1$ e é caracterizado como magnético caso esses valores não se verifiquem. A permeabilidade magnética relativa pode ser expressa em função de χ_m e μ_o de acordo com a equação

$$\mu_r = 1 + \chi_m = \mu/\mu_o \quad (1)$$

Onde:

μ : permeabilidade magnética do material

μ_o : permeabilidade magnética do vácuo

Os materiais magnéticos podem ser agrupados em três categorias principais:

- *Paramagnéticos*: são aqueles com permeabilidade magnética relativa é um pouco maior que 1. São materiais levemente atraídos por campos magnéticos, ao ponto de serem considerados não magnéticos. Exemplo: ar, alumínio e madeira;
- *Diamagnéticos*: são aqueles com permeabilidade magnética relativa um pouco menor que 1. São materiais levemente repelidos por campos magnéticos, ao ponto de serem considerados não magnéticos. Exemplo: chumbo, cobre, bismuto, diamante e silício;
- *Ferromagnéticos*: possuem permeabilidade magnética relativa muito maior que 1. São fortemente atraídos por campos magnéticos em geral. Exemplo: ferro, cobalto, níquel e ligas industriais que contém algum destes elementos. Seu nome se refere ao material mais conhecido desta categoria, o ferro. Os materiais ferromagnéticos possuem inúmeras utilidades na prática, apresentando como propriedades:
 - 1- São facilmente magnetizados por campos magnéticos externos;
 - 2- Mantém um alto valor de magnetização remanescente quando é retirada a ação do campo magnético externo;
 - 3- Perdem suas propriedades ferromagnéticas quando aquecidos acima de certa temperatura, conhecida como temperatura de Curie.
 - 4- São não lineares, isto é, a relação constitutiva $\mathbf{B} = \mu_r \mu_o \mathbf{H}$ não se verifica com μ_r constante.

Os materiais ferromagnéticos são largamente usados para construção de núcleos de transformadores.

2.2 REVISÃO SOBRE VARIÁVEIS E GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS

Para a dedução do fluxo total no interior de um núcleo ferromagnético (Figura 1) parte-se da Lei de Ampere

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{liq} \quad (2)$$

Onde:

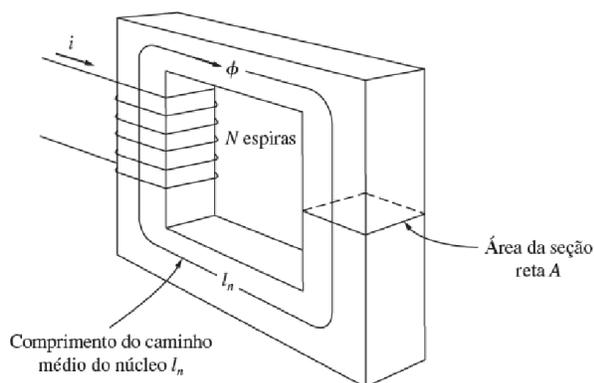
\mathbf{H} : intensidade de campo magnético

$d\mathbf{l}$: elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração

I_{liq} : corrente líquida

Aplicando a Equação (2) ao circuito magnético da Figura 1 e levando em consideração que todo o fluxo magnético produzido pela corrente elétrica i permanece dentro de um caminho fechado, contendo o núcleo ferromagnético, o caminho de integração referente à Lei de Ampère se dá pelo comprimento do caminho médio do núcleo l_n . A corrente líquida será então calculada por Ni , onde N é o número de espiras da bobina.

Figura 1: Circuito magnético composto por um núcleo ferromagnético simples e um enrolamento de N espiras.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Com isso, a Lei de Ampère torna-se $HL_n=Ni$. Então isolando-se H , tem-se

$$H = \frac{Ni}{l_n} \quad (3)$$

Além disso, a densidade de fluxo magnético B produzido no núcleo é dependente do material deste núcleo, e será dependente do campo magnético aplicado, de acordo com a expressão

$$B = \mu H \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4), para o circuito magnético apresentado na Figura 1, tem-se:

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_n} \quad (5)$$

O fluxo magnético total ϕ em uma dada área transversal do núcleo A é dado por:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (6)$$

Caso o vetor de densidade de fluxo \mathbf{B} for perpendicular ao vetor \mathbf{A} e apresentar uma densidade de fluxo uniformemente distribuída em toda a superfície, a integral da (6) se resume em:

$$\phi = BA \quad (7)$$

Sendo assim o fluxo total no núcleo mostrado na Figura (1) é dado por:

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_n} \quad (8)$$

Com isso as principais grandezas envolvendo fluxo magnético de um transformador foram abordadas.

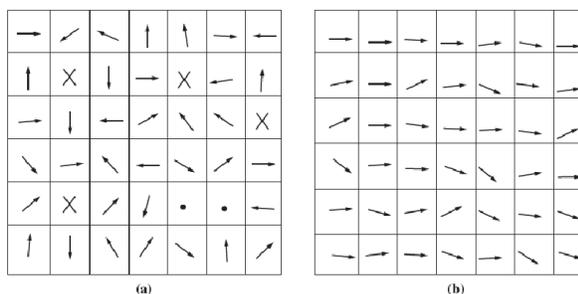
2.3 MAGNETIZAÇÃO DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

O ferromagnetismo ocorre em materiais para os quais os átomos têm momento magnético permanente relativamente grande e a interação entre os momentos dipolares magnéticos tende a alinhá-los todos paralelamente uns aos outros.

Os momentos magnéticos em materiais ferromagnéticos tendem a se organizar em domínios que são regiões onde a magnetização é uniforme, mas esses mesmos domínios se apresentam orientados aleatoriamente, ocasionando assim um cancelamento de campos magnéticos entre si, gerando com isso uma magnetização total nula em todo o material.

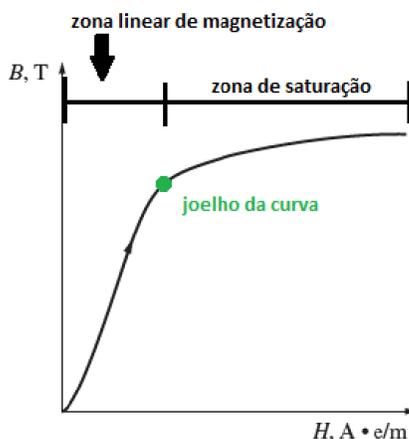
Contudo, estes domínios são sensíveis a campos magnéticos externos, tendendo a se alinharem em direção e sentido com estes campos e produzindo uma magnetização total não nula. Com a aplicação de um campo externo inicial de baixa intensidade (isto é, baixo H) os domínios não irão alinhar-se inicialmente, o que irá acontecer será o aparecimento de domínios cuja magnetização inicial é paralela ao campo. Progressivamente com o aumento da intensidade do campo, todos os domínios já existentes do material tendem a se alinhar no mesmo sentido (Figura 2) ditado pelo campo magnético externo até ao ponto onde todos os domínios se apresentam na mesma direção e sentido, situação essa que é denominada de saturação. A partir daí, um aumento na intensidade do campo magnético (H) não gera mais um aumento significativo na densidade de fluxo magnético (B) como se pode notar na Figura 3.

Figura 2: Domínios Magnéticos (ou Dipolos Magnéticos). (a) domínios orientados em sentidos aleatórios sem a influência de um campo magnético externo (b) domínios orientados conforme campo magnético externo.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

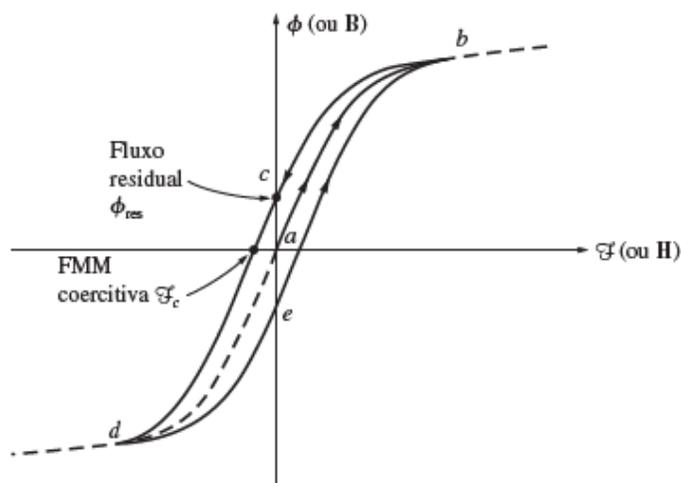
Figura 3: Curva de magnetização inicial de um material ferromagnético. Apresentando sua zona linear e de saturação da densidade do campo magnético (B) em relação à intensidade de campo magnético (H).



Fonte: (CHAPMAN, 2013. Modificado pelo autor).

Considerando, a partir disso, a diminuição gradual do campo externo, o que será observado é uma magnetização remanescente no material, o que significa que o campo magnético proveniente do alinhamento dos domínios irão se manter parcialmente. Quando o campo externo chegar à zero ($H=0$) ainda será constatado a existência de um campo magnético. Para o campo magnético ser anulado novamente será necessária a aplicação de uma FMM no sentido contrário, designado como *FMM coercitiva*. Este comportamento de remanescência e coercitidade pode ser melhor visualizado no laço de histerese através da Figura 4.

Figura 4: Laço de histerese de um material ferromagnético e seus principais pontos de estudo.

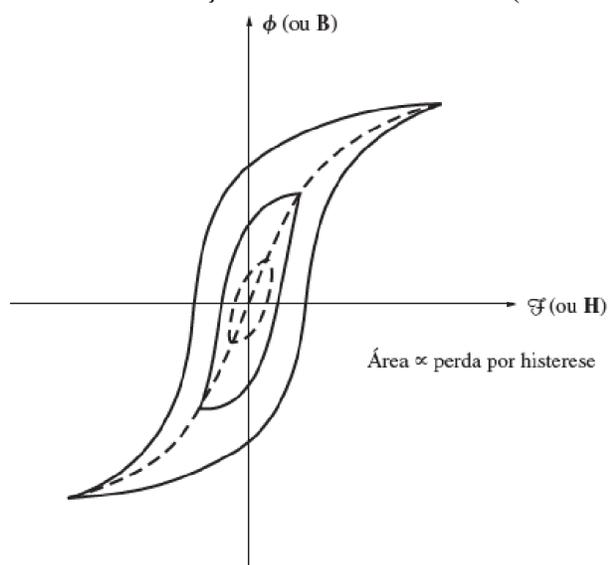


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

A Figura 4 mostra uma magnetização de um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado partindo da posição “a” e chegando até o ponto “b”. A partir daí a intensidade do fluxo magnético vai decaindo junto à intensidade do campo magnético, mas agora o fluxo magnético, quando $H=0$, estará na posição “c” indicando assim que ainda apresenta um fluxo residual. Para que esse fluxo residual seja anulado a intensidade de campo magnético deve ter sua orientação invertida e ser gradativamente aumentada até que se chegue ao ponto de $B=0$. Seguindo a lógica e mantendo a elevação de H o gráfico chegará ao ponto “d” onde terá o mesmo valor em módulo do ponto “b” inicial. Essa característica da relação entre densidade de fluxo magnético e campo magnético, conforme mostrado na Figura 4, é conhecida como laço de histerese.

O laço de histerese está diretamente relacionado às chamadas perdas de energia por histerese. Toda vez que o material tem seu fluxo magnético anulado e seus domínios posteriormente invertidos é despendido para isso certa quantidade de energia para o realinhamento destes mesmos domínios.

Figura 5: Curvas de 3 laços de histerese distintos ($\text{Área} \propto \text{Perdas}$).



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Na Figura 5 são demonstradas as operações de três laços de histerese distintos. Quanto maior a área do laço mais domínios são alinhados, no entanto maiores serão as perdas magnéticas existentes.

2.4 CORRENTE DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR

Ao ser ligada uma fonte de tensão alternada no primário de um transformador, mesmo estando o secundário em aberto, é verificada uma corrente fluindo pela bobina primária. Essa corrente não está realizando trabalho na carga, pois como já mencionado, o transformador está a vazio. A função desta corrente observada é a de gerar fluxo magnético no núcleo do transformador e ela é composta de uma componente relacionada à magnetização e outra componente relacionada às perdas no núcleo. Essas perdas são devido à histerese e às correntes parasitas.

Ignorando os efeitos do fluxo de dispersão e supondo a tensão de alimentação primária $v_p(t) = V_p \cos(\omega)$ [V], o fluxo médio total será:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_p \cos \omega t = \frac{V_p}{\omega N_p} \text{sen} \omega t \quad (9)$$

Onde:

ω = frequência angular

N_p = número de espiras no primário

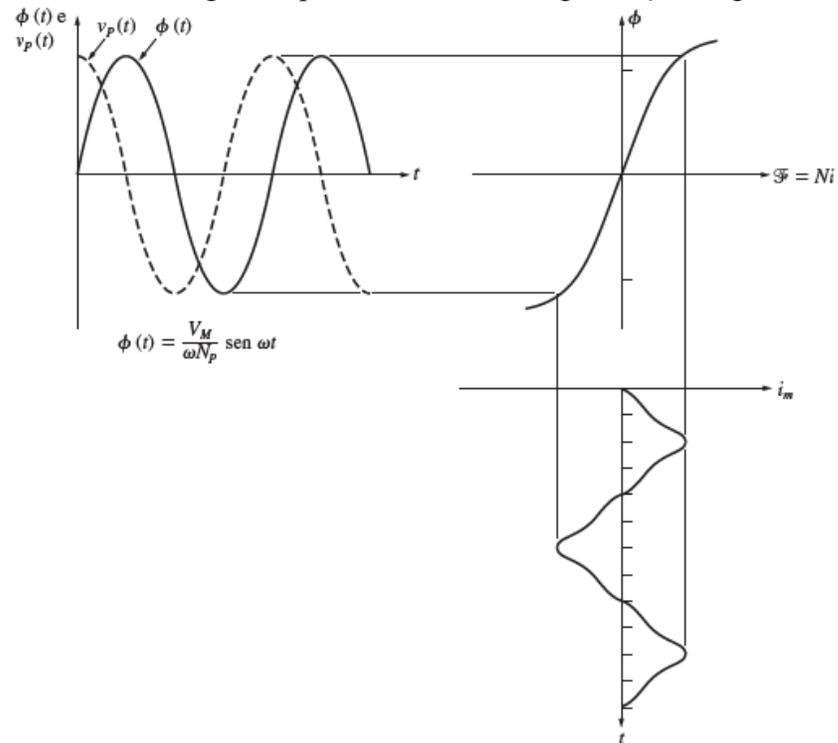
V_p = tensão de pico

Comparando-se os valores da corrente necessária para produzir um determinado fluxo no núcleo do transformador, obtém-se o gráfico da Figura 6. A partir desta figura se pode observar que a corrente de magnetização não é senoidal. Isso acontece devido à não linearidade na curva de magnetização normal do núcleo ferromagnético. Outro ponto importante é a defasagem de 90° em atraso da componente fundamental da corrente de magnetização em relação à tensão aplicada, o que confere à carga uma característica puramente indutiva.

A corrente total sem carga no núcleo é chamada de corrente de excitação i_{exc} do transformador (Figura 7). Ela é a soma da corrente de magnetização i_m e a corrente de perdas (histerese + corrente parasita) i_{h+p} do núcleo, isto é,

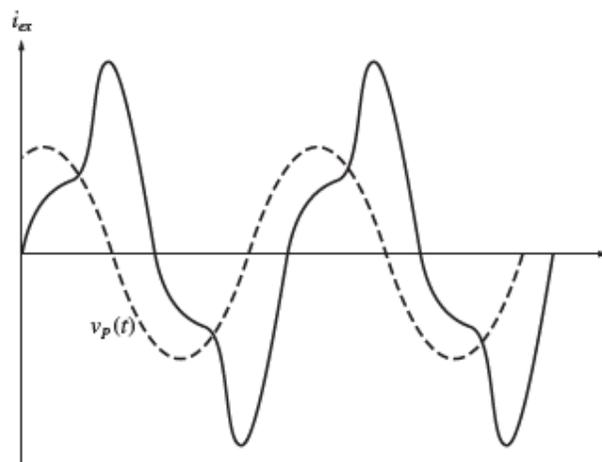
$$i_{exc} = i_m + i_{h+p} \quad (10)$$

Figura 6: Relação entre o fluxo magnético e curva de magnetização normal de um material ferromagnético para a corrente de magnetização exigida.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Figura 7: Corrente de excitação total de um núcleo típico de transformador.



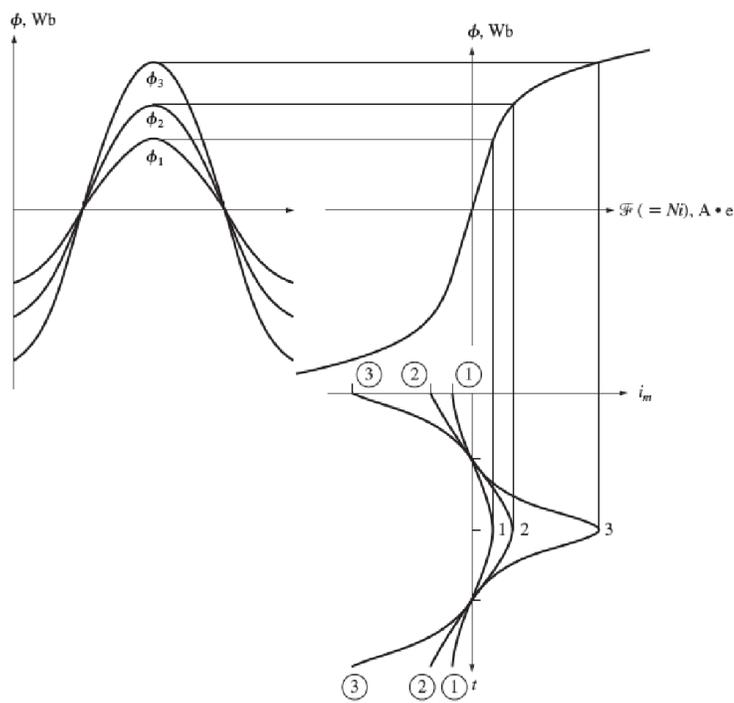
Fonte: (CHAPMAN, 2013).

2.5 A CORRENTE DE *INRUSH*

É durante a energização de um transformador que a corrente de *inrush* é observada. Ela se apresenta como uma alta corrente no enrolamento primário que pode chegar entre dez e vinte vezes o valor de corrente nominal do equipamento e tem um caráter transitório, mas que pode gerar problemas de estresse no transformador, erros na averiguação de curto-circuito em equipamentos de proteção, fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração dos isolamentos e afundamentos temporários de tensão. As correntes de *inrush* apresentam um amplo espectro harmônico incluindo as harmônicas pares afetando também a qualidade elétrica do sistema.

Essa corrente é ocasionada devido ao aumento de fluxo magnético no núcleo para a área de saturação (após o joelho visto no laço de histerese), requisitando assim uma alta corrente de magnetização, conforme indicado pela curva 3 mostrada na Figura 8.

Figura 8: Efeito do fluxo de pico sobre a corrente de magnetização requerida pelo material.

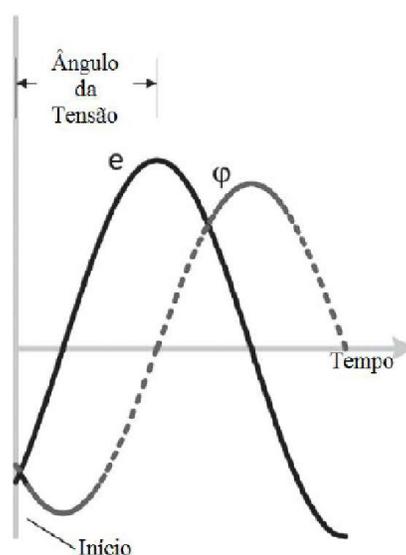


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Através de (11) nota-se a interdependência entre a tensão e o fluxo no núcleo de ferro do transformador. O valor da tensão é máximo quando a derivada do fluxo é zero e vice-versa o que faz a tensão e o fluxo estarem defasados em 90° , como é visto na Figura 9.

$$e = N \frac{d}{dt} (\phi_m \text{sen} \omega t) \quad (11)$$

Figura 9: Defasagem de 90° entre a tensão e o fluxo magnético.



Fonte: (HUNT, SCHAEFER, BENTERT, 2007. Modificado pelo autor).

Em caso da existência de fluxo residual, a corrente de *inrush* é diretamente dependente deste. O aparecimento de um fluxo residual no núcleo ferromagnético se forma no momento do desligamento da alimentação do transformador. Dependendo do instante em que o fluxo magnético se encontra no laço de histerese no momento da desenergização, a magnetização irá decair uma porcentagem em relação ao módulo deste fluxo, o que irá proporcionar um fluxo residual. Quanto mais próximo deste fluxo residual o ângulo elétrico da tensão de alimentação estiver de proporcionar um fluxo equivalente na hora do chaveamento (fluxo presumível), menor será o aparecimento da corrente de *inrush*. Com isso a corrente de *inrush*, quando não controlada, tem um caráter aleatório de surgimento. Pode-se ter sorte e chavear a

tensão em um momento ótimo quando o fluxo residual iguala-se ao fluxo presumível e assim não ocorrer o aparecimento da corrente de *inrush*, como também um chaveamento com os fluxos residual e presumível muito distintos ocasionando uma corrente de *inrush* de grandes proporções.

O sentido da corrente de *inrush* é dependente do sentido do fluxo magnético. O laço de histerese está presente tanto no eixo positivo como no negativo das ordenadas o que indica o sentido do fluxo magnético. Com isso a corrente de *inrush* pode apresentar-se tanto positiva quanto negativa. Seu valor médio é diferente de zero e seu módulo extingue-se com o período da corrente.

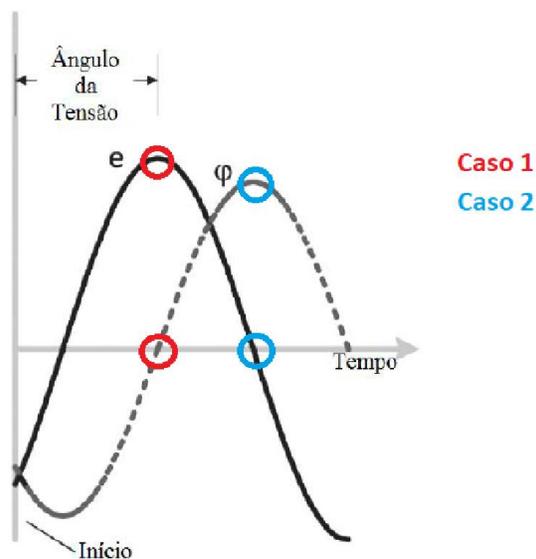
Também é visto que esta corrente é dependente, da resistência total do circuito primário, da impedância da fonte de energia, da indutância do caminho de ar entre o enrolamento energizado e o núcleo do transformador e da geometria e do material do núcleo do transformador.

2.6 MITIGAÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH*

O princípio básico para a eliminação da corrente de *inrush* é garantir que o fluxo residual seja igual ao fluxo presumível. O fluxo presumível é o fluxo que viria a ser criado caso a fonte de suprimento estivesse conectada ao transformador e ele já tivesse atingido as condições de regime permanente. A Figura 10 ilustra a situação de um transformador monofásico. Na condição identificada como “Caso 1”, o fluxo residual é nulo e o instante ótimo para o fechamento da chave ocorre quando a tensão da fonte estiver passando pelo seu valor de pico. Já na condição identificada como “Caso 2”, de fluxo residual máximo, o instante ótimo para o fechamento passa a ser quando a tensão da fonte estiver passando pelo eixo das abscissas no sentido decrescente. Os casos intermediários de fluxo residual terão

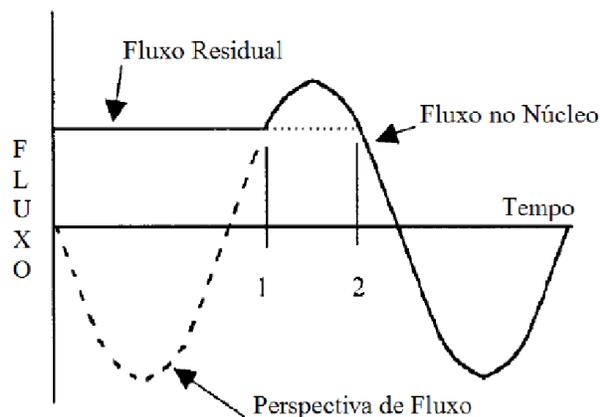
como valores ótimos os pontos entre o valor máximo e mínimo da tensão correspondentes, conforme Figura 11.

Figura 10: Caso ótimo de fechamento da alimentação para transformadores monofásicos. Ambos os instantes do Caso 1 ou do Caso 2 são ideais para a mitigação da corrente de *inrush*.



Fonte: (HUNT, SCHAEFER, BENTERT, 2007. Modificado pelo autor).

Figura 11: Fechamento ótimo em caso de fluxo residual. Os pontos 1 e 2 indicam os momentos onde o fluxo presumível se iguala ao fluxo residual do núcleo ferromagnético e ambos são ótimos para o chaveamento da fonte de alimentação.



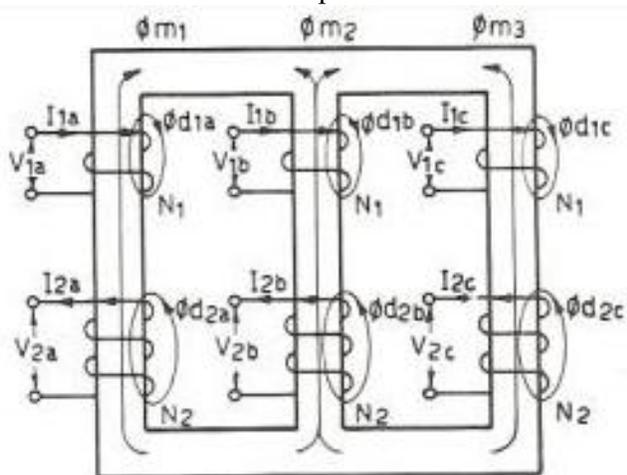
Fonte: (BRUKE, FROHLICH, 2001. Modificado pelo autor).

Em outras palavras, o valor da tensão instantânea aplicada sempre deverá ser aquele que irá criar o mesmo valor de fluxo que se apresenta como fluxo residual no momento do

fechamento. No caso da Figura 11 seria o valor da tensão que resultaria em um fluxo que desse continuidade ao fluxo residual existente. O valor ocorre tanto no ponto 1, quanto no ponto 2, pois não importa qual seja a direção em que o fluxo passará e sim que ele parte do mesmo nível residual deixando a onda simétrica.

Contudo, os transformadores trifásicos constituídos de apenas um núcleo de três colunas (mononuclear), conforme Figura 12, apresentam uma interação entre os fluxos das três fases, presentes nas três pernas do núcleo.

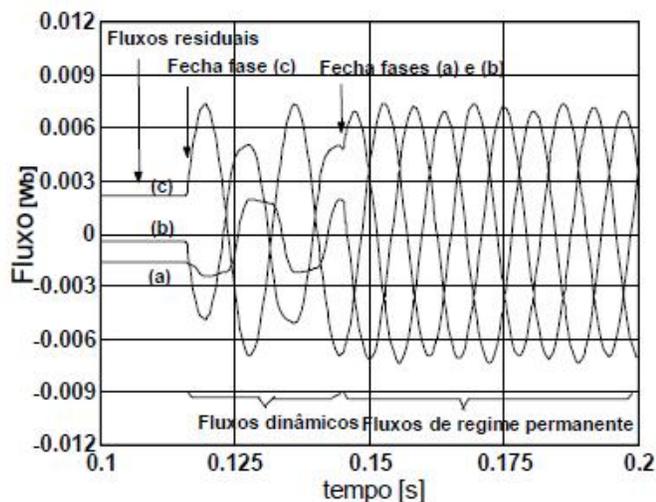
Figura 12: Distribuição de fluxo em transformador trifásico com enrolamento em núcleo de três pernas.



Fonte: (UNIBAN, Apostila de Transformadores)

No caso de transformadores trifásicos após uma ou duas fases (dependendo do tipo de ligação) serem fechadas, um fluxo se estabelece pelas outras colunas, alterando assim o fluxo residual presente nestas outras pernas. Este fluxo transitório é chamado de fluxo dinâmico. Na Figura 13 é visto a simulação de um fechamento da fase C. Logo após o fechamento existe um período transitório de fluxos dinâmicos das fases A e B, que atingiriam uma estabilidade em regime permanente caso não tivessem sido também fechados logo após.

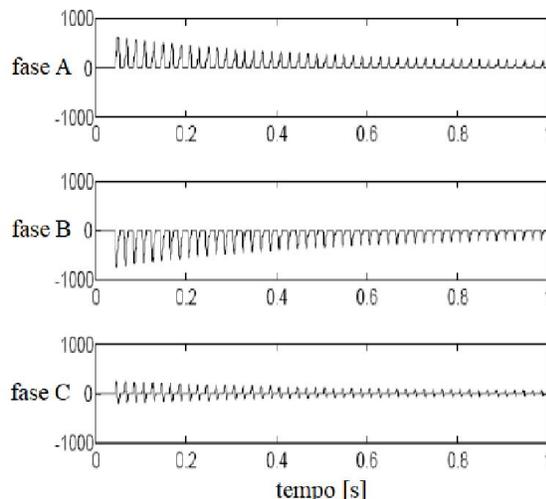
Figura 13: Fluxos residuais e dinâmicos após o fechamento da primeira fase (C) e posteriormente das fases (A) e (B). Indicação dos períodos dinâmicos e de regime permanente dos fluxos magnéticos.



Fonte: (MARIC, NIKOLOVSKI, BAUS, 2006. Modificado pelo autor).

De acordo com simulação (MARIC, NIKOLOVSKI, BAUS, 2006), as correntes de *inrush* por fase tornam-se distintas, uma vez que o ângulo de fase para cada enrolamento está deslocado de 120° e o fluxo residual é diferente para cada perna do núcleo (a soma dos fluxos de todas as pernas em um núcleo trifásico (Figura 14) é sempre zero, com isso não são necessariamente iguais).

Figura 14: Correntes de *inrush* - Transformador Trifásico Yd. Cada fase apresenta uma situação distinta de corrente em um mesmo momento de chaveamento simultâneo das 3 fases.



Fonte: (APOLÔNIO, OLIVEIRA, BRONZEADO, VASCONCELLOS, 2005).

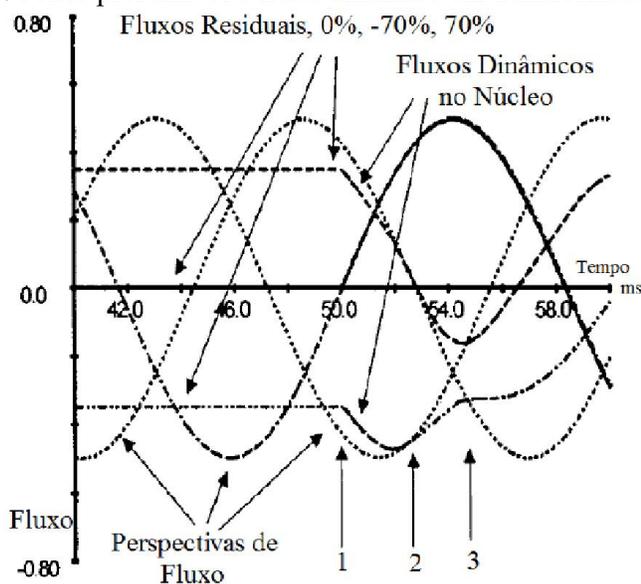
A partir destes critérios para a eliminação da corrente de *inrush* alguns métodos foram desenvolvidos para mitigação. São exemplos: o método do fechamento rápido, método do fechamento estratégico simultâneo, método do fechamento atrasado estratégico e o método da magnetização forçada e fechamento simultâneo.

A maioria dos métodos apresentados a seguir não utilizam o fechamento simultâneo de todas as fases, o que quer dizer que o processo sempre tem início no fechamento de uma ou duas fases simultâneas. Isso irá depender do tipo de configuração de ligação entre os enrolamentos. Para transformadores trifásicos com enrolamentos ligados em estrela, a fase conectada a coluna do transformador contendo o maior fluxo residual, em módulo, deverá ser energizada primeiramente. Em se tratando da ligação em delta, as duas fases ligadas à coluna com maior fluxo residual deverão ser energizadas em primeiro lugar.

2.6.1 FECHAMENTO RÁPIDO

O fechamento rápido consiste no fechamento inicial da fase A no ponto ótimo (ponto 1 – Figura 15), logo após, ainda durante o período transitório de fluxos dinâmicos, existe dois momentos onde a fluxo presumível se iguala ao fluxo dinâmico (pontos 2 e 3 – Figura 15), esses dois instantes são favoráveis para o fechamento da fase B e C. Este fechamento é feito em um quarto de ciclo, por isso recebe o nome de fechamento rápido.

Figura 15: Fluxo presumível e fluxo dinâmico em transformador trifásico.

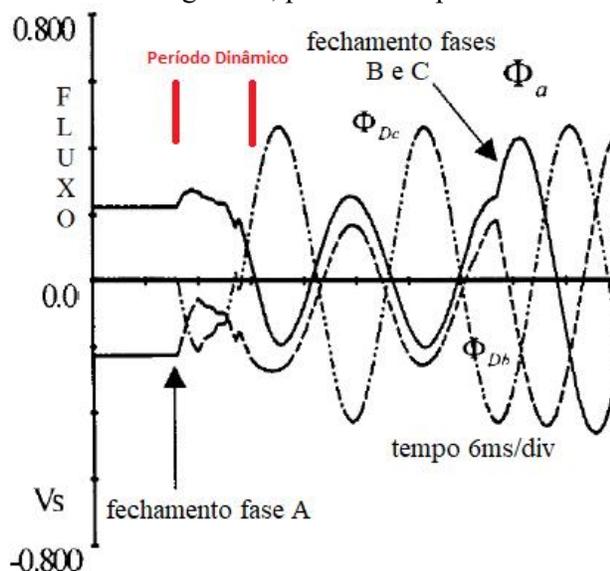


Fonte: (BRUKE, FROHLICH, 2001. Modificado pelo autor).

2.6.2 FECHAMENTO ATRASADO ESTRATÉGICO

O fechamento atrasado estratégico deriva do método de fechamento rápido, visto no item anterior. A diferença é que o chaveamento da fase B e C são feitas alguns ciclos após o chaveamento da primeira fase. Esse tempo serve para que o fluxo residual das fases B e C sejam eliminados pelo novo fluxo da fase A. O fechamento então não é realizado no período dinâmico transitório e sim após a estabilização dos novos fluxos estabelecidos nas pernas da fase B e C do transformador. Um exemplo de aplicação do método de fechamento estratégico atrasado é mostrado na Figura 16.

Figura 16: Fechamento atrasado estratégico. Chaveamento das fases B e C após estabilização do fluxo magnético, posterior ao período dinâmico.



Fonte: (BRUKE, FROHLICH, 2001. Modificado pelo autor).

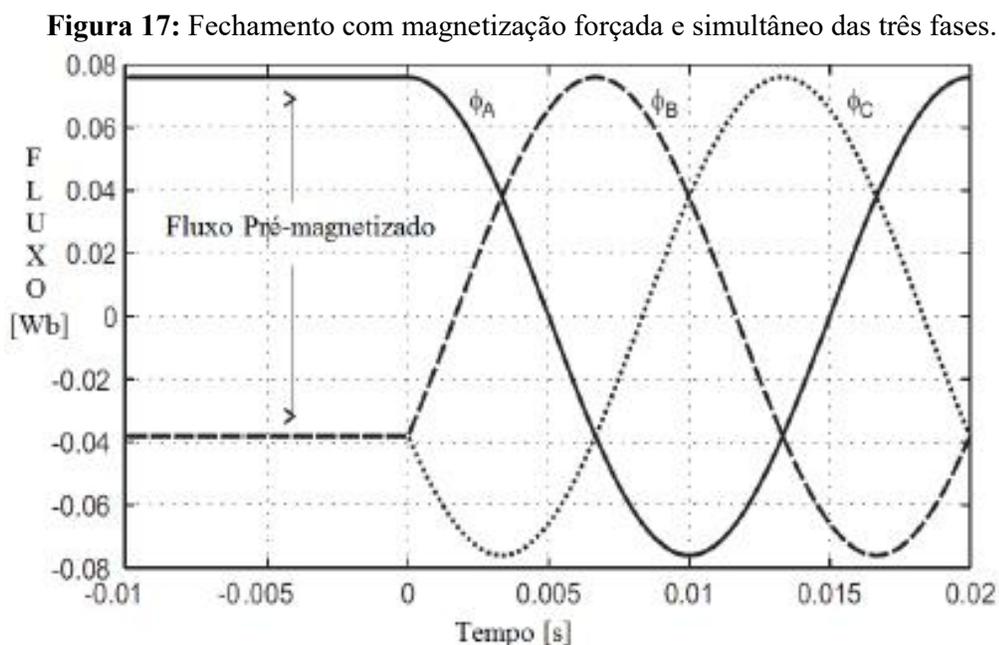
2.6.3 FECHAMENTO SIMULTÂNEO ESTRATÉGICO

Este método consiste no fechamento simultâneo das três fases. É indicado para casos onde não exista chave para controle individual de energização dos enrolamentos. A técnica escolhe o ponto menos crítico para o fechamento de todas as fases. Este instante está presente no ponto 1 da Figura 15. Neste momento o fluxo residual está levemente maior que o fluxo presumível para as outras duas fases, tornando o instante adequado para o chaveamento de todas elas.

2.6.4 MAGNETIZAÇÃO FORÇADA DO NÚCLEO E FECHAMENTO SIMULTÂNEO

O método consiste em inicialmente acoplar uma fonte de corrente contínua para estabelecer um fluxo magnético residual conhecido. A fonte CC irá alimentar apenas uma das fases enquanto as outras duas terão a corrente limitada por resistores. A fonte de corrente fica permanentemente conectada e só será desligada quando a alimentação da rede for estabelecida.

O fechamento ocorre quando a fase A cruza por zero em sentido ao semi-ciclo oposto à magnetização das duas outras fases, este é o ponto ótimo quando o fluxo na fase A é máximo e a tensão passando por zero é a ideal. Os enrolamentos B e C partem do mesmo valor, porém cada um para uma direção de magnetização. Um exemplo da aplicação do método de magnetização forçada e fechamento simultâneo é mostrado na Figura 17.



Fonte: (NOVAK, 2010. Modificado pelo autor).

Este método é eficaz para todas as configurações de núcleo e ligações, a magnetização forçada garante as condições ideais para a energização perfeita.

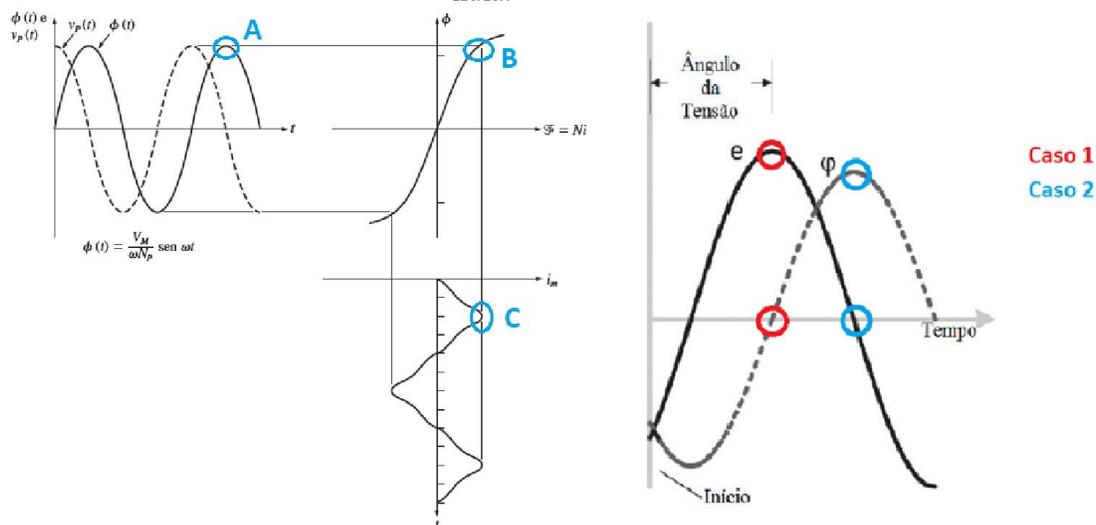
3 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO DE MITIGAÇÃO PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

O desenvolvimento do circuito para mitigação terá como base o método de magnetização forçada do núcleo e fechamento simultâneo abordado no item 2.6.4 aplicado agora para um transformador monofásico.

Como já abordado na Figura 10, dois casos ótimos para o fechamento da alimentação para transformadores se encontra nos casos 1 e 2 da Figura 18. A situação do caso 2 é escolhida como base para o desenvolvimento do circuito de mitigação, pois é mais fácil garantir um fluxo magnético residual máximo no transformador através da alimentação por uma fonte CC do que garantir que esse mesmo fluxo residual no transformador seja zero de alguma forma. Nela um chaveamento no ângulo da tensão de 180° com um campo magnético máximo forçado resulta em uma corrente de *inrush* igual a zero, enquanto que um chaveamento em 0° resulta em máxima corrente de *inrush* por estar exatamente no pior caso, quando o fluxo presumível é ao contrário do fluxo residual como visto na Figura 19.

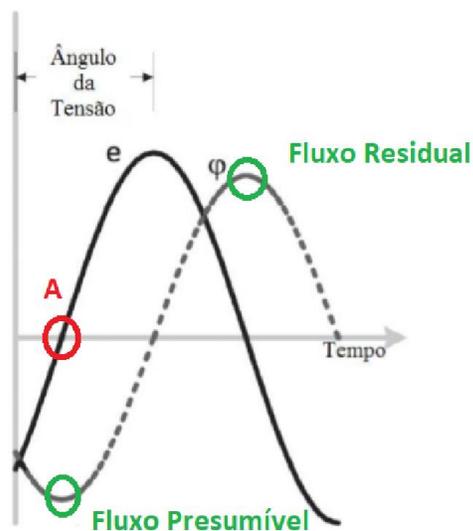
Para isso é preciso conhecer o valor de pico da corrente de excitação (ponto C da Figura 18), pois ela indica o maior fluxo magnético do transformador (ponto B da Figura 18) para a alimentação de 127 V, usada para energizar o transformador. O valor de pico da corrente de excitação será o valor da CC que deverá ser aplicado inicialmente no transformador para chegar ao valor do fluxo magnético forçado máximo. Este fluxo é máximo para 127 V e corresponde ao caso 2 da Figura 18, conseqüentemente o ângulo ideal para essa situação será o fechamento no ângulo de 180° .

Figura 18: Exemplos de situações para fechamento ótimo com corrente de *inrush* nula.



Fonte: (HUNT, SCHAEFER, BENTERT, 2007. Modificado pelo autor) / (CHAPMAN, 2013. Modificado pelo autor).

Figura 19: Exemplo de situação para fechamento em 0° com máxima corrente de *inrush*. O fluxo presumível se encontra exatamente ao contrário do fluxo residual.



Fonte: (HUNT, SCHAEFER, BENTERT, 2007. Modificado pelo autor).

O transformador utilizado para os ensaios (Figura 20) é da marca INTRAL (ind. Brasileira / Caixas do Sul - RS). O enrolamento utilizado será sempre o de 127 V com

alimentação de igual valor. A figura 21 mostra a placa de identificação do transformador monofásico utilizado para o estudo

Figura 20: Transformador utilizado nos ensaios do projeto.



Fonte: (Próprio autor).

Figura 21: Placa de identificação do transformador utilizado nos ensaios do projeto.
Transformador 127/220 V, 150 VA e 60 Hz.

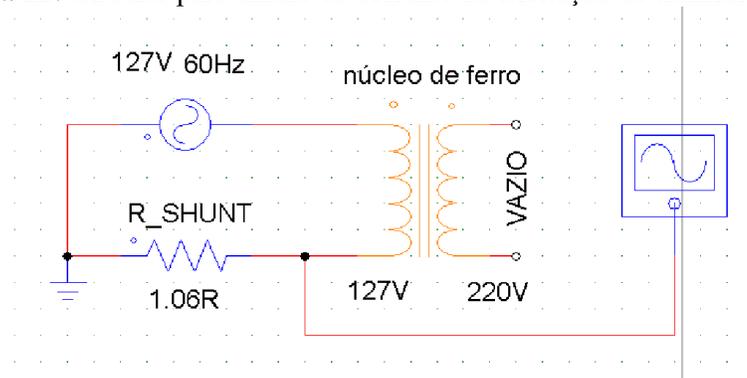


Fonte: (Próprio autor).

3.1 Ensaio De Corrente de Excitação

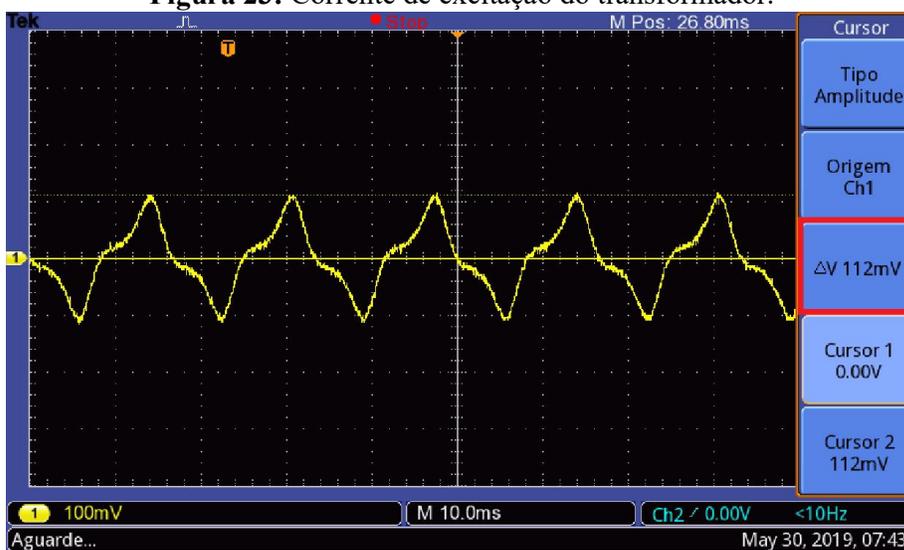
O circuito de ensaio da corrente de excitação do transformador é mostrado na Figura 22. A corrente de excitação obtida experimentalmente pode ser visualizada na Figura 23. A corrente é medida de forma indireta por meio da medida da tensão sobre o resistor shunt valendo-se da Lei de Ohm. A tensão de pico sobre o resistor, conforme mostra a Figura 23, tem valor de 112 mV, sobre o resistor shunt que é de $1,06 \Omega$. Portanto, o valor de pico da corrente de excitação é aproximadamente 105 mA.

Figura 22: Circuito para ensaio de corrente de excitação do transformador.



Fonte: (Próprio autor).

Figura 23: Corrente de excitação do transformador.

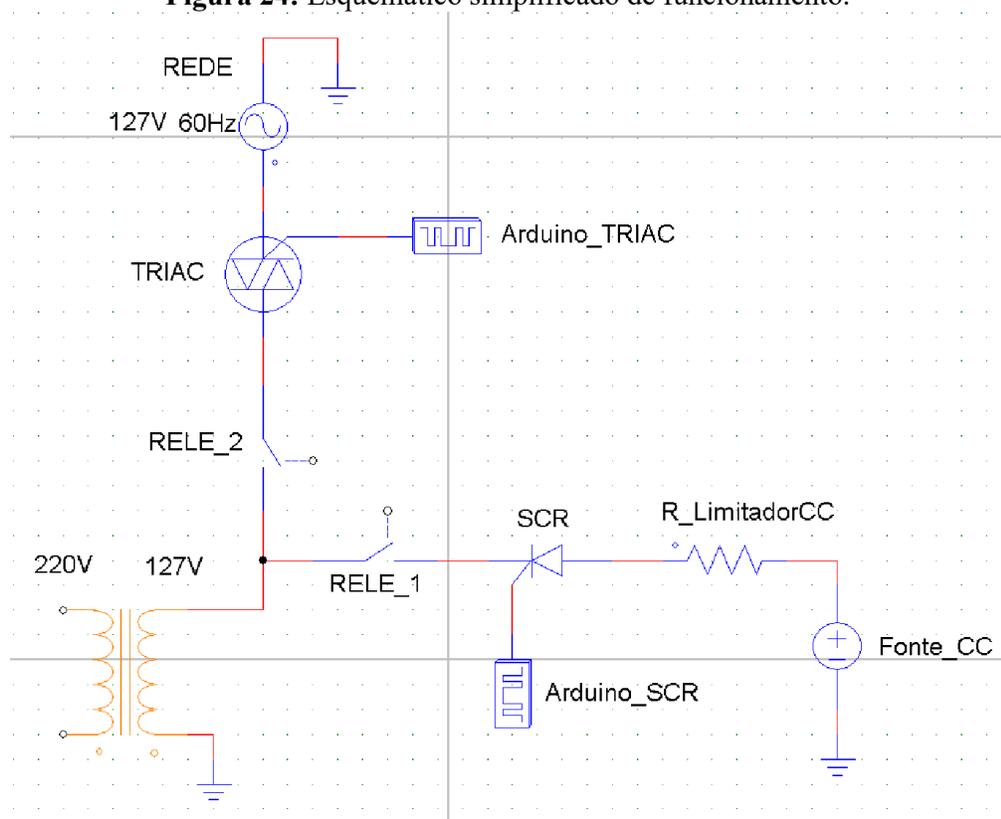


Fonte: (Próprio autor).

3.2 Esquema Simplificado de Funcionamento do Dispositivo

Para melhor entendimento será apresentado na Figura 24 um esquema simplificado de lógica de funcionamento do circuito onde serão omitidos componentes de alimentação, proteção, controles, etc.

Figura 24: Esquemático simplificado de funcionamento.



Fonte: (Próprio autor).

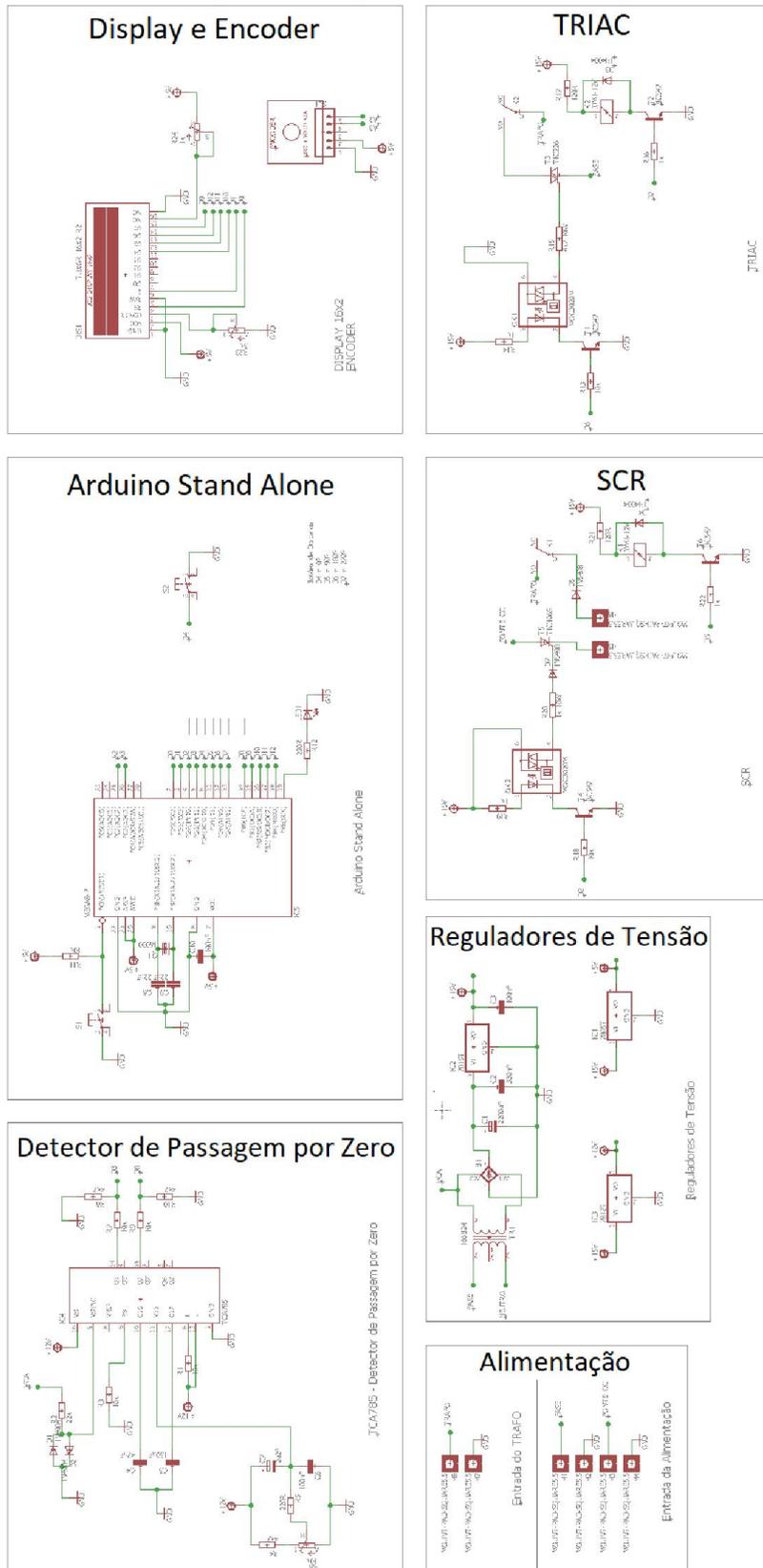
O funcionamento do circuito tem início com o fechamento da chave RELE_1 e alimentação do transformador apenas pela Fonte_CC pelo tempo de 3s. Um sinal vindo do microcontrolador aciona o *gate* do SCR deixando passar uma corrente CC limitada pelo resistor R_LimitadorCC de 105 mA. Essa corrente CC de 105 mA foi determinada anteriormente como sendo o valor de pico da corrente de excitação quando o primário é alimentado com tensão nominal. Neste momento o transformador está pronto para ser energizado pela rede com tensão de 127 V no ângulo de 180° para ter *inrush* igual a zero ou

ângulo de 0° para máxima corrente de *inrush*. Ângulos intermediários de acionamento resultam em correntes de *inrush* entre os valores de máximo e zero. Em seguida a chave RELE_2 é fechada, mas o TRIAC ainda não está conduzindo, pois não recebeu nenhum sinal no *gate*. O microcontrolador monitora o acionamento do ângulo desejado, no momento certo irá abrir a chave RELE_1 e enviar o pulso de disparo para o TRIAC. A alimentação CA no transformador dura em torno de 3,5s, suficiente para a visualização do fenômeno da corrente de *inrush*. Após esse tempo a chave RELE_2 é aberta e o circuito volta ao estado inicial de funcionamento.

3.3 Circuito Completo de Mitigação e seu Projeto

O circuito real implementado se mostra mais complexo do que o simplificado da Figura 24 e será apresentado em blocos para melhor entendimento. Uma imagem de todos os blocos é apresentada na Figura 25:

Figura 25: Esquemático circuito completo.



Fonte: (Próprio autor).

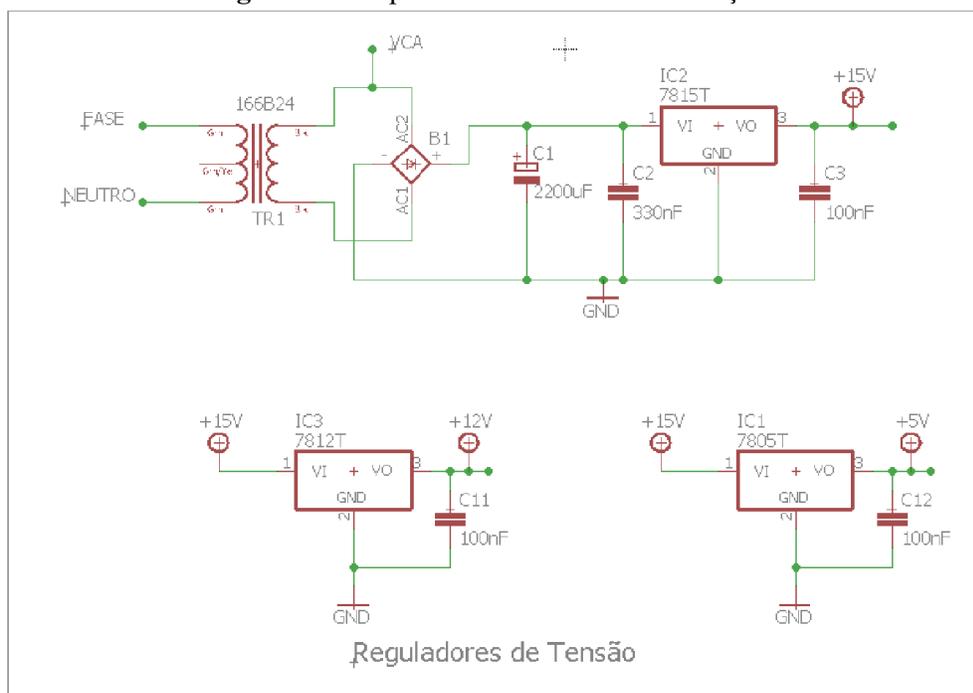
3.3.1 Bloco da alimentação

O bloco da alimentação fornece as tensões necessárias para o funcionamento dos diversos setores do circuito. Componentes específicos precisam de tensões de alimentação distintas, são elas:

- 15 V – pulsos de *gate* e relés;
- 12 V – alimentação do CI TCA785 (detector de passagem por zero);
- 5 V – microcontrolador, *display*, *encoder*;

Observando a Figura 26, a energização pela rede de 127 V passa por um transformador abaixador TR1 com saída de 16 V. O sinal sofre uma retificação completa pela ponte B1 e é filtrado pelo capacitor C1 para uma atenuação da tensão de *ripple*. O regulador de tensão 7815 é utilizado para a obtenção da tensão de 15 V estabilizada. Os capacitores C2 e C3 tem a função de filtragem de possíveis ruídos e são recomendados pelo próprio *datasheet* da família 78XX. A partir da tensão de 15 V gerada, dois reguladores, 7812 e 7805, são utilizados para a obtenção das tensões de 12 V e 5 V respectivamente. Um detalhe importante fica para o GND que precisa estar com uma boa condução para o fluxo de corrente reverso das bobinas dos relés no instante de abertura durante o processo de chaveamento do circuito, caso contrário uma queda de tensão é verificado e ruídos podem ser observados.

Figura 26: Esquemático bloco da alimentação.



Fonte: (Próprio autor).

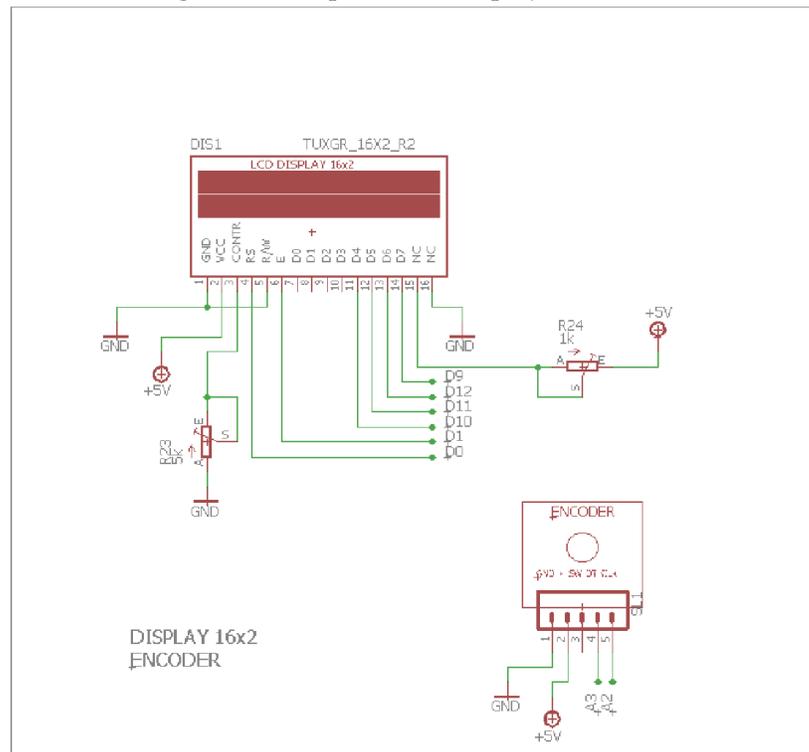
3.3.2 Bloco *display* e *encoder*

A interface com o usuário é feita através de um display de cristal líquido (tela 16X2) e um *encoder* rotativo para a seleção dos ângulos de interesse.

O *encoder* seleciona os ângulos disponíveis para disparo, são eles: 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, 112.5°, 135°, 157.5°, 180°, 202.5°, 225°, 247.5°, 270°, 292.5°, 315°, 337.5°, 360°. Começando em zero e seguindo com um passo de 22,5° até 360°.

Como vista na Figura 27, os ajustes de brilho e contraste do display são feitos através dos *trimpots* R24 e R23 respectivamente. Na Figura 28 está a foto real do display e a disposição do texto com o ângulo de 0° selecionado como exemplo.

Figura 27: Esquemático *Display e Encoder*.



Fonte: (Próprio autor).

Figura 28: *Display* imagem real.



Fonte: (Próprio autor).

3.3.3 Bloco detector de passagem por zero – TCA785 (*Zero Crossing*)

Um dos pontos fundamentais para a mitigação da corrente de *inrush* é o chaveamento no ângulo correto. Para isso um constante monitoramento da senoide da rede elétrica de energização do transformador deve ocorrer. A técnica mais usada para isso é a utilização de um circuito chamado detector de passagem por zero. Ele identifica o instante que o valor da tensão passa por 0 V, gerando um pulso de reconhecimento. Vários projetos de detecção de passagem por zero são vistos na literatura, aqui é utilizado um circuito integrado projetado especificamente para isso, o TCA785 conforme Figura 29.

Este circuito integrado tem como função gerar pulsos de tensão igual à sua alimentação quando o sinal alternado amostrado (VCA) passa por zero. O pino 14 gera pulsos na passagem por zero na subida da senoide, enquanto o pino 15 gera pulsos na passagem por zero na descida da senoide. Pode-se visualizar seu funcionamento através da simulação feita no *software* Proteus 8, Figura 30.

Os resistores R7 e R8, assim como os resistores R9 e R10, fazem um divisor de tensão para o ajuste do pico de tensão do pulso ficar aproximadamente 5 V, tensão aceitável para o microcontrolador para onde os sinais D3 e D8 são direcionados.

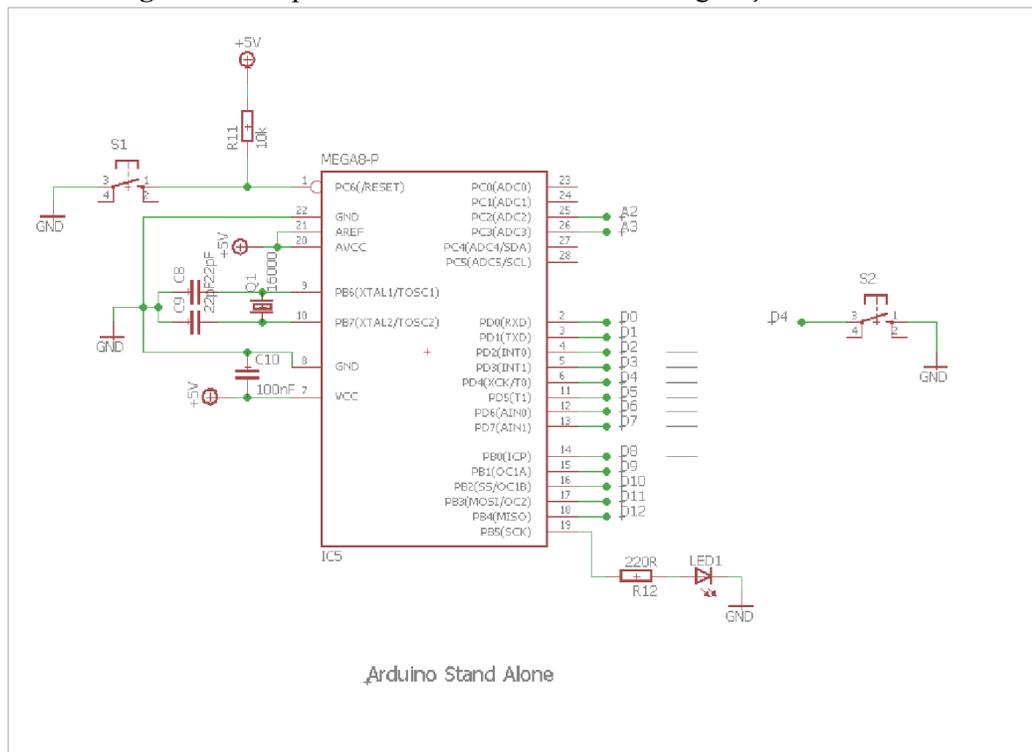
Ambos os sinais do pino 14 e pino 15 são usados pelo microcontrolador para gerar os pulsos de gatilhamento para o *gate* do TRIAC de forma sincronizada.

3.3.4 Bloco Arduino Standalone

O modelo Arduino UNO (Figura 32) possibilita a retirada de seu microcontrolador ATmega328, pois ele está conectado a um soquete de 28 pinos. Assim, pode-se conectar ele na própria placa do projeto final, bastando apenas que componentes essenciais para seu funcionamento sejam inseridos no esquemático do projeto como na Figura 31. O *push-button* S1 é de fundamental importância, pois tem a função de reset do microcontrolador caso necessário. É visto também a presença de um cristal oscilador Q1 de 16 MHz, referência para o *clock* do dispositivo.

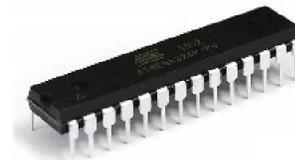
Outro cuidado está em sua alimentação que precisa ser garantida por um bom regulador de tensão, neste caso é usado o modelo 7805 como já descrito no bloco de alimentação, pois não possui mais o regulador de tensão da placa original. Esta tensão serve de referência para as portas analógicas e não apenas para a alimentação, por isso sua importância.

Figura 31: Esquemático bloco arduino em configuração *standalone*.



Fonte: (Próprio autor).

Figura 32: Arduino UNO e Microcontrolador ATmega328.



Fonte: Fonte: (Site Oficial Arduino. Modificado pelo autor).

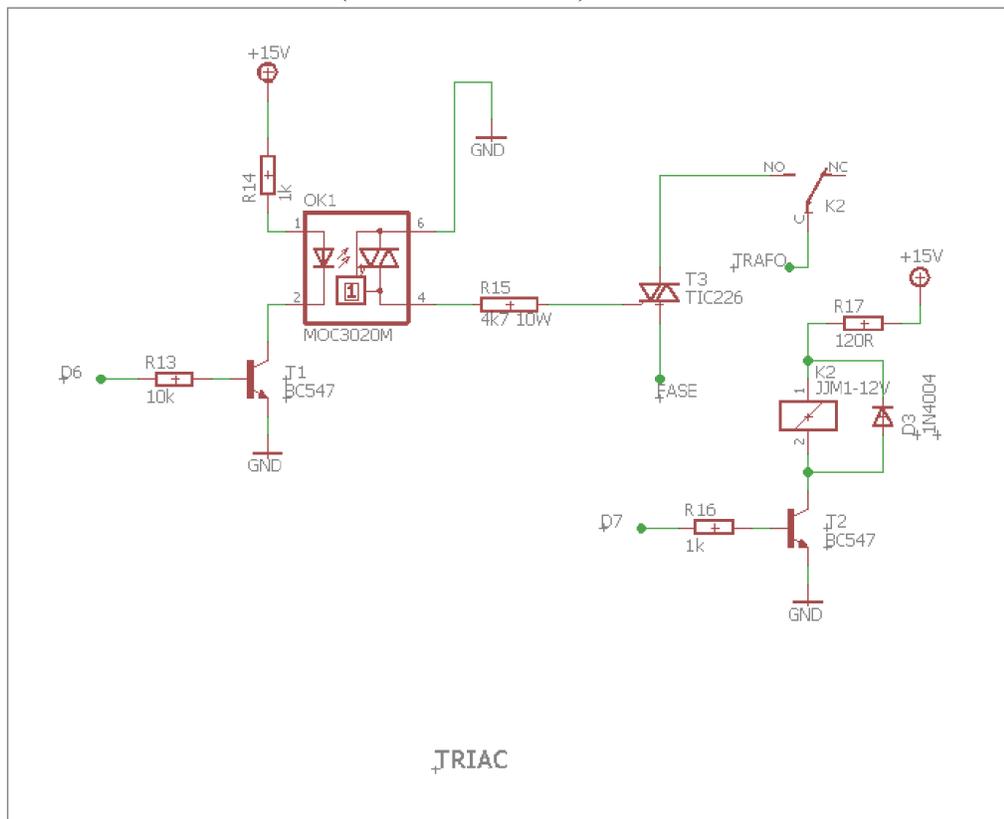
3.3.5 Bloco de controle da corrente CC

O funcionamento do circuito de mitigação da corrente de *inrush* tem início com a energização do transformador por uma corrente contínua conhecida. Esse procedimento precisa ser controlado para segurança da operação e de seus componentes, pois existe uma tensão de 127 V que logo irá ser conectada ao circuito. Este processo é realizado pelo circuito da Figura 33, seu funcionamento é descrito a seguir.

A parte de baixa tensão (controle, microcontroladores, botões, encoder, etc.) precisa estar isolada da parte do circuito da rede. Um optoacoplador MOC3020 (ou MOC3021) é utilizado para isolar o sinal D2 (sinal digital de disparo do SCR pelo microcontrolador) do *gate* do SCR T5 (TIC106) que está ligado ao sistema de tensão da rede. Os diodos D7 e D5, modelo 1N5408, também estão sendo usados para proteção de um eventual curto-circuito entre o *gate* e o catodo ou possível retorno de corrente advindo da fonte CA em um possível defeito do relé. O sinal D5 (sinal digital de acionamento do relé pelo microcontrolador) também não pode estar ligado diretamente na alimentação da bobina do relé, pois a porta digital do microcontrolador não possui corrente suficiente para isso. Um pequeno driver usando um transistor BC547 (T6) é utilizado. O diodo D4, modelo 1N4004 (ou equivalente), é utilizado como diodo de roda livre entre os terminais da bobina do relé.

pois a porta digital do microcontrolador não possui corrente suficiente para isso. Um pequeno driver usando um transistor BC547 (T6) é utilizado. O diodo D3, modelo 1N4004 (ou equivalente) é utilizado como diodo de roda livre entre os terminais da bobina do relé.

Figura 34: Esquemático bloco de Acionamento da corrente CA através do TRIAC (TIC226 ou TIC246).

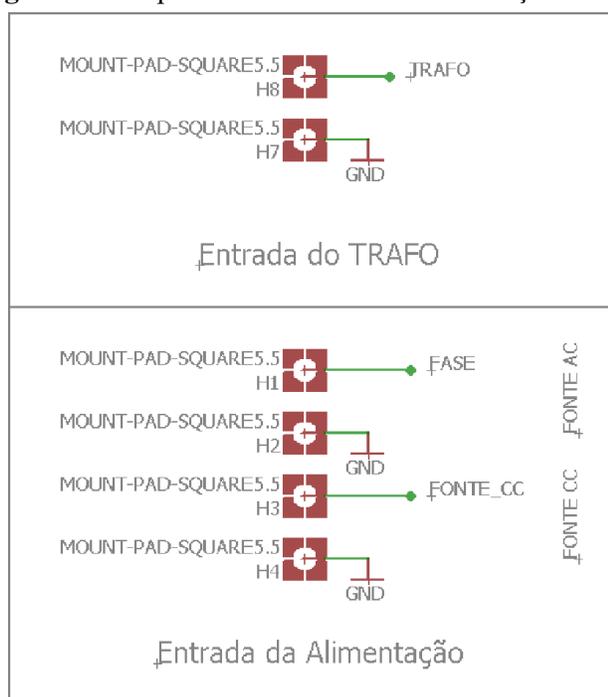


Fonte: (Próprio autor).

3.3.7 Bloco entrada de alimentação

Conforme Figura 35, este bloco possui os bornes de conexões da alimentação e do transformador a ser energizado. A fonte CC de energização utilizada no acionamento do transformador é uma fonte externa independente do circuito por questões de segurança e isolamento. A fonte CA é a rede de energização do transformador de 127 V.

Figura 35: Esquemático entrada da alimentação do circuito.



Fonte: (Próprio autor).

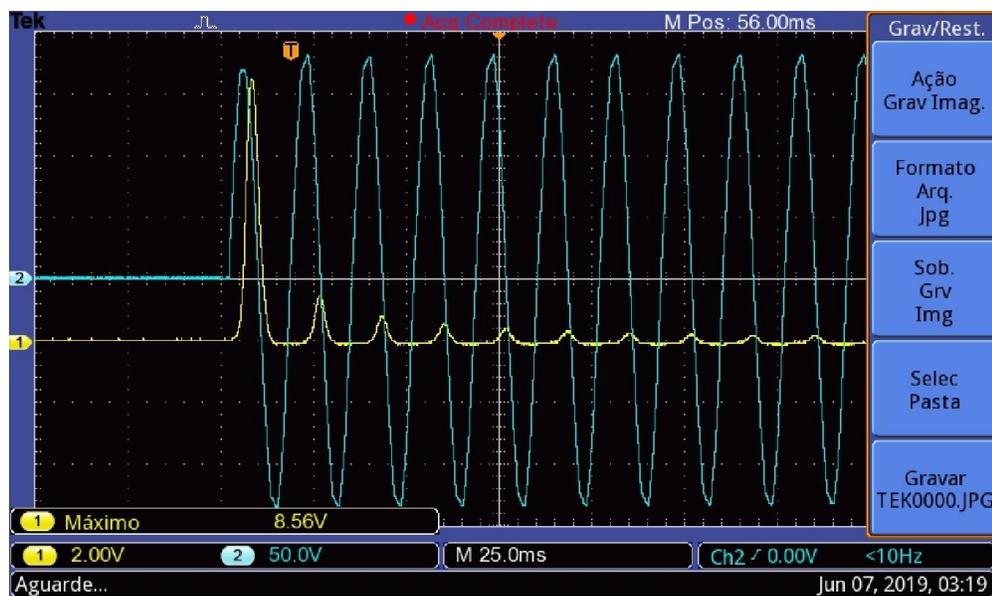
4 RESULTADOS

As Figuras 36 até 44 foram adquiridas através do osciloscópio da Tektronix modelo TBS1052B e ilustram os resultados do circuito de mitigação da corrente de *inrush*.

A corrente de *inrush* foi medida indiretamente através de um resistor shunt de $1,06 \Omega$, que deve ser considerado nos cálculos. A tensão de energização é de 127 V eficaz.

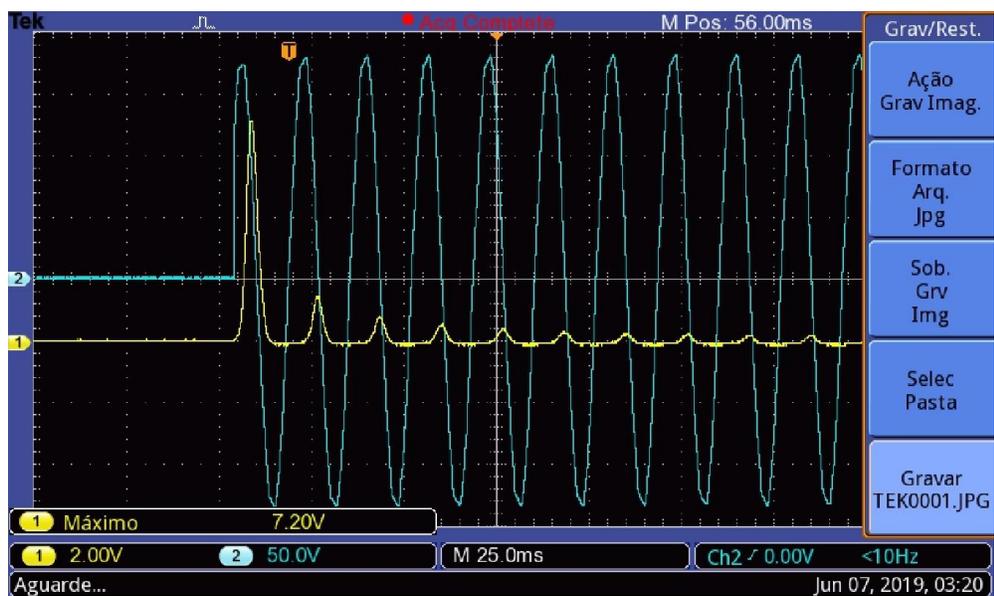
Os resultados serão apresentados nos ângulos de 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° .

Figura 36: Energização em ângulo 0° . Observa-se a tensão de pico de 8,56 V, o que corresponde a uma corrente de pico de 8,1 A.



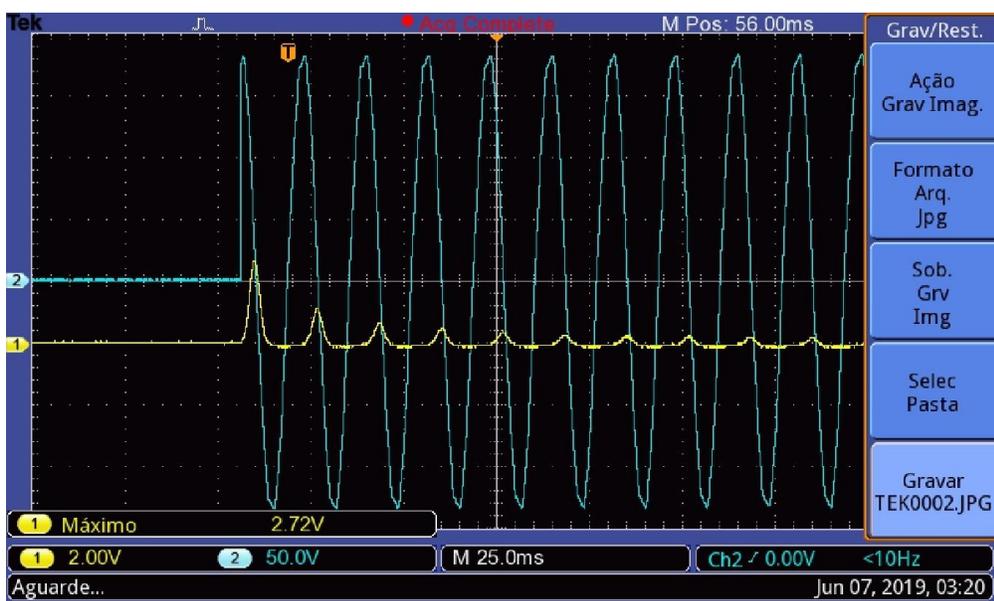
Fonte: (Próprio autor).

Figura 37: Energização em ângulo 45° . Observa-se a tensão de pico de 7,20 V, o que corresponde a uma corrente de pico de 6,8 A.



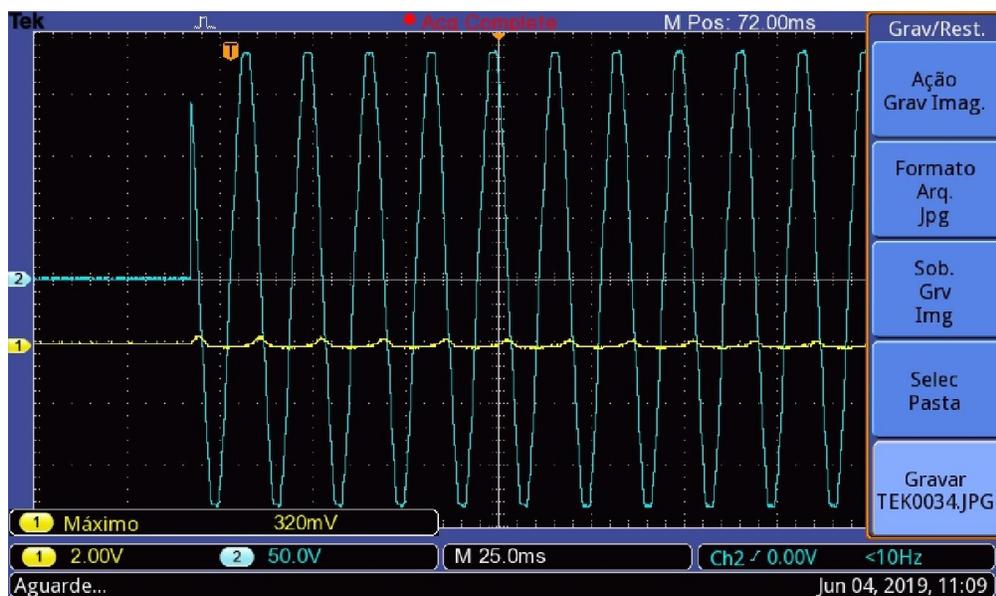
Fonte: (Próprio autor).

Figura 38: Energização em ângulo 90° . Observa-se a tensão de pico de 2,72 V, o que corresponde a uma corrente de pico de 2,56 A.



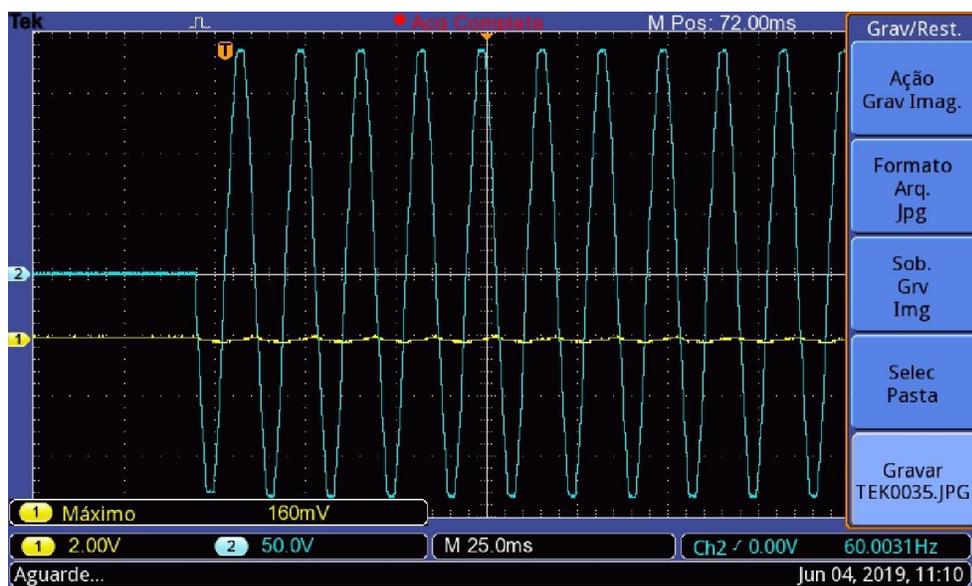
Fonte: (Próprio autor).

Figura 39: Energização em ângulo 135°. Observa-se a tensão de pico de 320 mV, o que corresponde a uma corrente de pico de 301,9 mA.



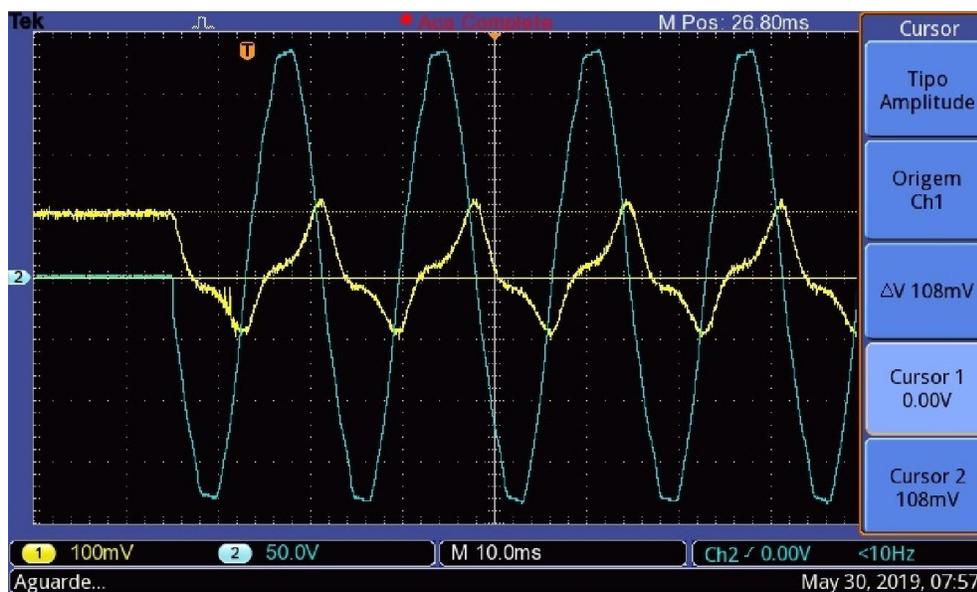
Fonte: (Próprio autor).

Figura 40: Energização em ângulo 180° - Escala 2.00 V. Observa-se a tensão de pico de 160 mV, o que corresponde a uma corrente de pico de 150,9 mA.



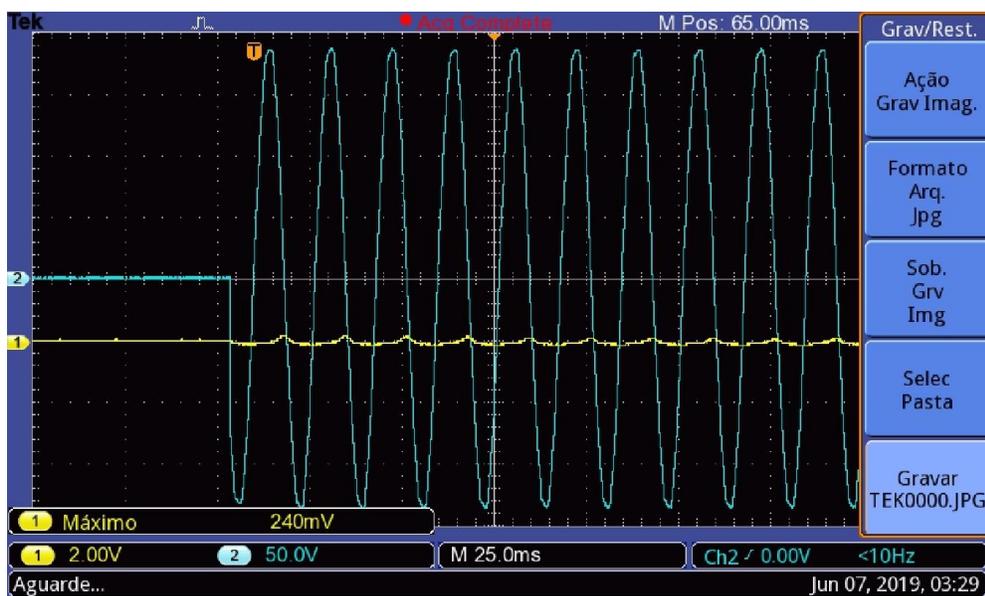
Fonte: (Próprio autor).

Figura 41: Energização em ângulo 180° - Escala 100 mV. Observa-se a tensão de pico de 108 mV, o que corresponde a uma corrente de pico de 101,9 mA.



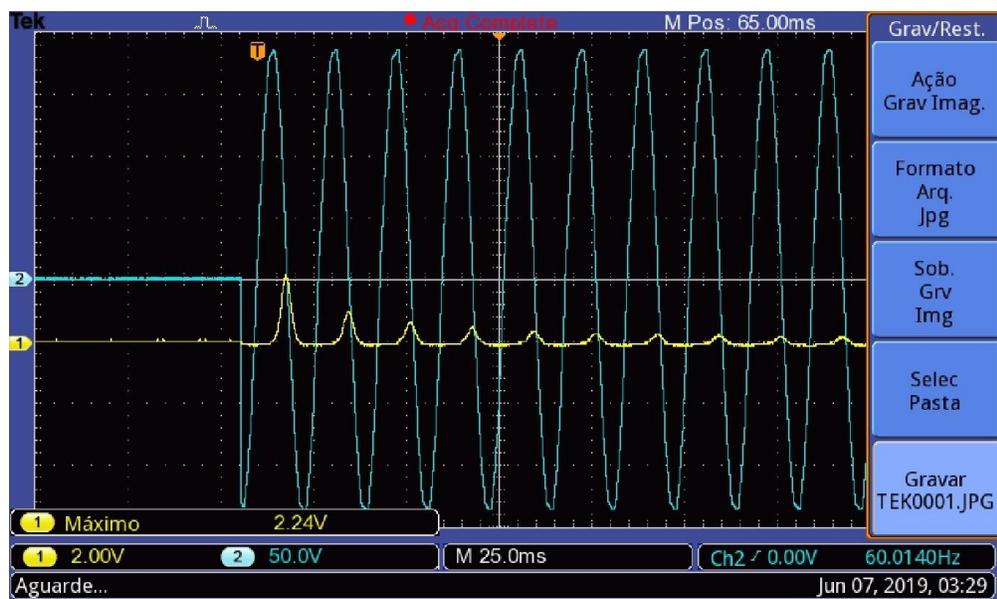
Fonte: (Próprio autor).

Figura 42: Energização em ângulo 225° . Observa-se a tensão de pico de 240 mV, o que corresponde a uma corrente de pico de 226,4 mA.



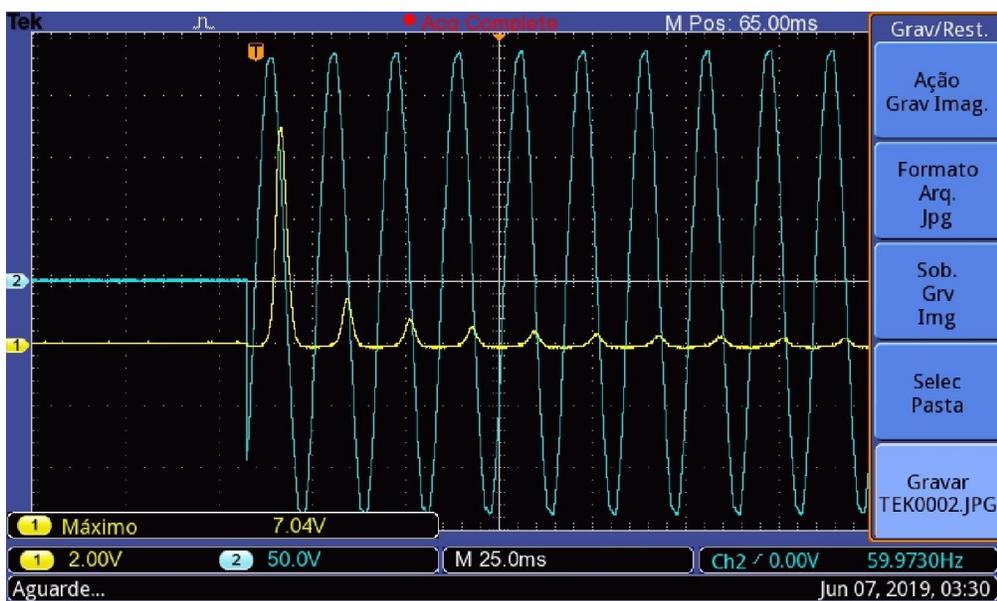
Fonte: (Próprio autor).

Figura 43: Energização em ângulo 270° . Observa-se a tensão de pico de 2,24 V, o que corresponde a uma corrente de pico de 2,1 A.



Fonte: (Próprio autor).

Figura 44: Energização em ângulo 315° . Observa-se a tensão de pico de 7,04 V, o que corresponde a uma corrente de pico de 6,6 A.



Fonte: (Próprio autor).

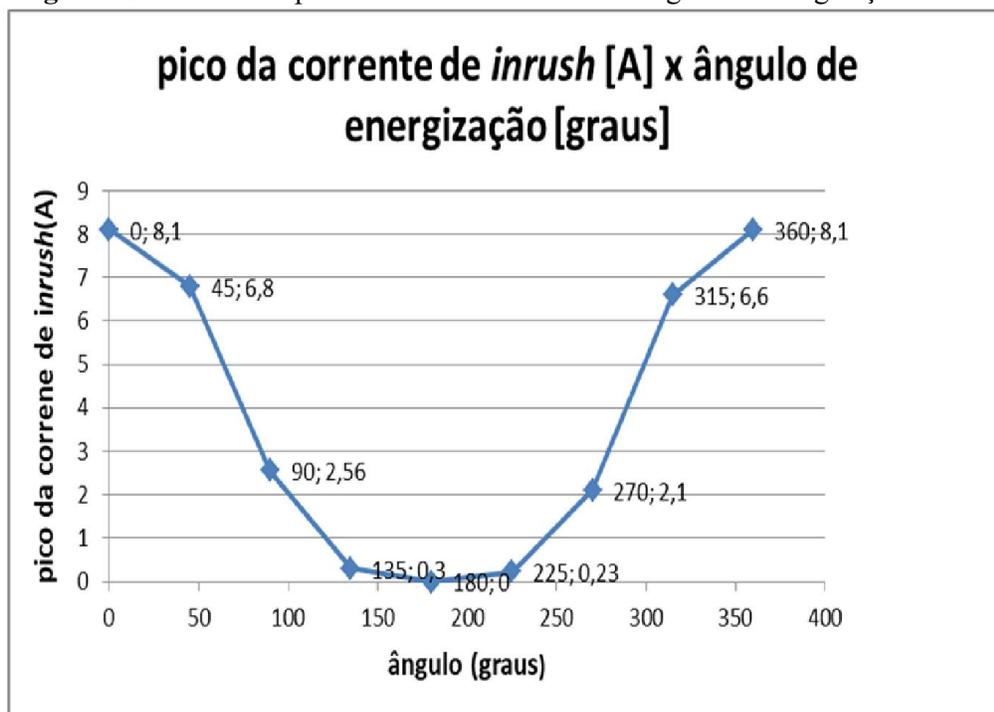
O fenômeno da corrente de *inrush* pode resultar em picos de 10 a 20 vezes o valor da corrente nominal do transformador. A corrente nominal do transformador utilizado nos ensaios é de aproximadamente 1 A e a corrente de pico de excitação ficou em 105 mA (capítulo 3.1). Na situação de máxima corrente de *inrush* (Figura 36), o valor observado foi de 8,1 A, o que resulta em um valor 8 vezes maior que a corrente nominal e 77 vezes maior que o valor da corrente de pico de excitação do transformador.

Na Figura 41, em que a situação é de corrente de *inrush* nula, no momento da energização do transformador é observado apenas a corrente de excitação, não apresentando nenhum transitório de outro valor, confirmando a eficácia do circuito de mitigação desenvolvido.

Nas Figuras 36 e 41 estão os casos mais importantes onde a corrente de *inrush* é máxima e nula, respectivamente. Nas outras figuras a corrente de *inrush* sempre assumirá valores intermediários a esses dois valores extremos. Ângulos próximos de 0° apresentarão correntes de *inrush* maiores, pois serão casos onde o fluxo residual estará distante do fluxo presumível, enquanto que ângulos próximos de 180° apresentarão correntes de *inrush* pequenas, pois serão casos onde o fluxo residual estará próximo do fluxo presumível.

Na Figura 45, um gráfico do pico da corrente de *inrush* em relação ao ângulo de energização da rede.

Figura 45: Gráfico do pico da corrente de *inrush* x ângulo de energização da rede



Fonte: (Próprio autor).

Fica visível um aprofundamento do gráfico na região próxima ao ângulo de 180°.

Regiões próximas a esse ângulo de chaveamento apresentam um valor de corrente de pico de *Inrush* de baixa magnitude.

5 CONCLUSÃO

O conhecimento do fenômeno da corrente de *inrush* é de grande importância em manobras de subestações e distribuição de energia onde os transformadores são de alta potência e o fechamento de vários transformadores ao mesmo tempo deve ser realizado levando em consideração essa corrente de magnetização. Circuitos de proteção também se beneficiam disto, pois um alto pico de corrente pode atuar semelhante a um curto circuito causando equívocos no acionamento dos dispositivos de proteção.

O estudo teórico da ocorrência da corrente de *inrush* e dos métodos de mitigação foi fundamental para o posterior desenvolvimento do circuito. O projeto funcionou como esperado possibilitando a melhor compreensão e estudo deste assunto. O controle das duas variáveis que tem influência sobre a corrente de *inrush* (fluxo magnético residual e ângulo de energização da rede) proporcionou o controle absoluto sobre a ocorrência e severidade dessa corrente.

O circuito desenvolvido funciona simultaneamente em tensões contínua e alternada da rede. Projetos desta natureza sempre merecem cuidados e possuem problemas característicos como ruído e interferência entre ambas as partes, o que torna necessário a realização de muitos testes ao decorrer do seu desenvolvimento.

O trabalho envolveu diversas áreas da engenharia elétrica como, eletrônica, eletrônica de potência, programação, microcontroladores, conversão de energia, *softwares* CAD, mostrando a importância da interação entre assuntos distintos de um mesmo campo de estudo.

Como trabalho futuro, que dá sequência a este, sugere-se o desenvolvimento de uma plataforma que permita o uso didático do circuito desenvolvido para o estudo do fenômeno da corrente de *inrush* em transformadores para alunos da graduação. Sugere-se também o desenvolvimento de um circuito mitigador de *inrush* para circuitos trifásicos que se baseia em injeção de corrente contínua antes da energização.

REFERÊNCIAS

- APOLÔNIO, Roberto; OLIVEIRA, José; BRONZEADO, Herivelto; VASCONSELLOS, Arnulfo. **Energização Controlada de Transformadores Trifásicos: Estratégia para Redução da Corrente de “Inrush”**. In: XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SNPTEE, 2005, Curitiba.
- BRUKE, John H.; FROHLICH, Klaus J. **Elimination of Transformer *Inrush* Current by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, Abr. 2001.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5 ed. Porto Alegre. AMGH, 2013, 648 pg.
- FERRONATO, Guilherme. **Caracterização de Correntes de *Inrush* em Transformadores e Desenvolvimento de um Dispositivo para Mitigação**. 2014. 99f. Dissertação (Graduação em Eng. Elétrica) – Centro de Ciências Exatas da Natureza e de Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul.
- FITZGERALD, A. E.; JR, Charles K.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 6 ed. Porto Alegre. Brookman, 2006. 648 pg.
- KETABI, Abbas; ZAVAREH; Ali. **New Method for *Inrush* Current Mitigation Using Series Voltage-Source PWM Converter for Three Phase Transformer**. University of Kashan. 2011. IEE Xplore.
- MARIC, Predrag; NIKOLOVSKI, Srete; BAUS Zoran. **Simulation of 300MVA Transformer Energization in new Substation 400/110kV “Ernestinovo” using ATP-EMTP**. In: European ATP EEUG Meeting, Volume: 1, 2006, Dresden, Proceedings of EEUG Meeting 2006.
- NOVÁK, Miroslav. **Elimination of three-phase transformer *inrush* current through core forced magnetization and simultaneous closing**. Technical University of Liberec, FM-MTI, Studentská. 2010. IEEE Xplore.

Anexo B: Código do Arduino

```

bool flag2, flag3;
int i, pulsoSD, newPos = 0;
float angulo = 0;

#include <LiquidCrystal.h>
#include <RotaryEncoder.h>

RotaryEncoder encoder(A2, A3); //cria o objeto encoder com conexão nas portas A2 e A3

#define pulso_SCR 2
#define botao_A 4
#define pulso_triac 6
#define rele_triac 7
#define rele_SCR 5
#define TCA785_S 3 //pulso subida
#define TCA785_D 8 //pulso descida

/////Funções_Inicio////////////////////////////////////

LiquidCrystal lcd( 0, //RS
                  1, //EN
                  10, //D4
                  11, //D5
                  12, //D6
                  9); //D7

void pulso(int a) { //Função que gera o pulso de gatilhamento para o TRIAC e também para
o SCR de 700us
  digitalWrite(a, HIGH);
  delayMicroseconds(700); //largura do pulso
  digitalWrite(a, LOW);
}

void led_teste (void) { //Função que pisca o led do arduino
  delay(100);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(400);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(100);
}

```

```

void updateLCD(void) { //Função que atualiza o display LCD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("Angulo Disparo");
  lcd.setCursor(5, 1);
  lcd.print(angulo, 1); //escreve a variável "angulo"
  lcd.setCursor(10, 1);
  lcd.write(B11011111); // simbolo de graus
  lcd.setCursor(10, 1);
}

void gatilho_TRIAC(float angulo_disparo, char a) { //Função que gerencia o gatilhamento do
TRIAC

  if (a == 's')
    pulsoSD = TCA785_S; //usa o pulso de subida do TCA785 como referência (pino 14
TCA785 - D3)
  else if (a == 'd')
    pulsoSD = TCA785_D; //usa o pulso de descida do TCA785 como referência (pino 15
TCA785 - D8)

  //acerta os angulos simétricos para a referência de descida do TCA785 pois a laço
switch/case
  //compreende somente os angulos de 0° até 180°, mas como os tempos são iguais
  //basta usar a mesma programação mas com a referencia de pulso trocada do TCA785
  if (angulo_disparo == 202.5)
    angulo_disparo = 22.5;
  if (angulo_disparo == 225)
    angulo_disparo = 45;
  if (angulo_disparo == 247.5)
    angulo_disparo = 67.5;
  if (angulo_disparo == 270)
    angulo_disparo = 90;
  if (angulo_disparo == 292.5)
    angulo_disparo = 112.5;
  if (angulo_disparo == 315)
    angulo_disparo = 135;
  if (angulo_disparo == 337.5)
    angulo_disparo = 157.5;
  if (angulo_disparo == 360) {
    angulo_disparo = 0;
    pulsoSD = TCA785_S; //pulso subida
  }

  int angulo_disparo_int = angulo_disparo; //o laço switch/case trabalha apenas com variável
int
  //então pra acertar isso cria-se uma nova variável
  //para ser usada apenas nesta situação

```

switch (angulo_disparo_int) { //para cada angulo o tempo de disparo e de manutenção do sinal alterando será diferente

```

case 0: //-----
  flag3 = 1;
  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) { //pulso de subida/descida do TCA785
      digitalWrite(rele_SCR, LOW); //sinal abre relé do SCR para cortar corrente CC
      pulso(pulso_triaco); // gatilha o TRIAC para entrar em condução
      delay(8.333); // espera meia período passar
      pulso(pulso_triaco); //gatilha novamente pois quando a onda muda de sentido o TRIAC
é cortado e precisa ser regatilhado
      flag3 = 0;
    }
  }
}

```

//o "for" abaixo mantém os pulsos a cada mudança de sentido da onda para que o sinal alternado se complete

```

for (i = 0; i < 200; i++) {
  flag2 = 1;
  while (flag2 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {

      pulso(pulso_triaco);

      delay(8.033); //8.333-0.300 (descontar o tempo do pulso)
      pulso(pulso_triaco);
      flag2 = 0;
    }
  }
}
break;

```

```

case 22: //-----
  flag3 = 1;

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(1.2);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triaco);
      delay(8.033 - 1.2 + 0.4);
      pulso(pulso_triaco);

      flag3 = 0;
    }
  }
}

```

```

for (i = 0; i < 200; i++) {
  flag2 = 1;
  while (flag2 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033);
      pulso(pulso_triac);
      flag2 = 0;
    }
  }
}
break;

```

```

case 45: //-----
  flag3 = 1;

```

```

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(2.4);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033 - 2.4 + 0.6);
      pulso(pulso_triac);

      flag3 = 0;
    }
  }

```

```

for (i = 0; i < 200; i++) {
  flag2 = 1;
  while (flag2 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033);
      pulso(pulso_triac);
      flag2 = 0;
    }
  }
}
break;

```

```

case 67: //-----
  flag3 = 1;

```

```

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(3.6);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
    }
  }

```

```

    delay(8.033 - 3.6 + 0.6);
    pulso(pulso_triac);

    flag3 = 0;
  }
}

for (i = 0; i < 200; i++) {
  flag2 = 1;
  while (flag2 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033);
      pulso(pulso_triac);
      flag2 = 0;
    }
  }
}
break;

case 90: //-----
  flag3 = 1;

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(4.8);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033 - 4.8 + 0.8);
      pulso(pulso_triac);

      flag3 = 0;
    }
  }

  for (i = 0; i < 200; i++) {
    flag2 = 1;
    while (flag2 == 1) {
      if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
        pulso(pulso_triac);
        delay(8.033);
        pulso(pulso_triac);
        flag2 = 0;
      }
    }
  }
  break;

case 112: //-----
  flag3 = 1;

```

```

while (flag3 == 1) {
  if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
    delay(5.7);
    digitalWrite(rele_SCR, LOW);
    pulso(pulso_triac);
    delay(8.033 - 5.7 + 0.9);
    pulso(pulso_triac);

    flag3 = 0;
  }
}

for (i = 0; i < 200; i++) {
  flag2 = 1;
  while (flag2 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033);
      pulso(pulso_triac);
      flag2 = 0;
    }
  }
}
break;

case 135: //-----
  flag3 = 1;

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(6.6);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033 - 6.6 + 0.9);
      pulso(pulso_triac);

      flag3 = 0;
    }
  }

  for (i = 0; i < 200; i++) {
    flag2 = 1;
    while (flag2 == 1) {
      if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
        pulso(pulso_triac);
        delay(8.033);
        pulso(pulso_triac);
        flag2 = 0;
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }
  break;

case 157: //-----
  flag3 = 1;

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(7.5);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033 - 7.5 + 0.9);
      pulso(pulso_triac);

      flag3 = 0;
    }
  }

  for (i = 0; i < 200; i++) {
    flag2 = 1;
    while (flag2 == 1) {
      if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
        pulso(pulso_triac);
        delay(8.033);
        pulso(pulso_triac);
        flag2 = 0;
      }
    }
  }
  break;

case 180: //-----
  flag3 = 1;

  while (flag3 == 1) {
    if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
      delay(8.4);
      digitalWrite(rele_SCR, LOW);
      pulso(pulso_triac);
      delay(8.033 - 8.4 + 1.1);
      pulso(pulso_triac);

      flag3 = 0;
    }
  }

  for (i = 0; i < 200; i++) {
    flag2 = 1;

```

```

while (flag2 == 1) {
  if (digitalRead(pulsoSD) == HIGH) {
    pulso(pulso_triac);
    delay(8.033);
    pulso(pulso_triac);
    flag2 = 0;
  }
}
break;

} //switch
} //função gatilho_TRIAC

//////////////////////////////////////Funções_Fim//////////////////////////////////////

void setup() {

  //inicializações e configurações das portas do arduino

  lcd.begin(16, 2);
  updateLCD();

  pinMode(TCA785_S, INPUT);
  pinMode(TCA785_D, INPUT);

  pinMode(botao_A, INPUT_PULLUP);

  pinMode(pulso_SCR, OUTPUT); //pulso de gatilho
  pinMode(pulso_triac, OUTPUT); //pulso de gatilho triac
  pinMode(rele_SCR, OUTPUT); //relé CC
  pinMode(rele_triac, OUTPUT); //relé CA
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); //porta do led do arduino D13

  //inicização dos sinais de controle em zero
  digitalWrite(pulso_SCR, LOW);
  digitalWrite(pulso_triac, LOW);
  digitalWrite(rele_SCR, LOW);
  digitalWrite(rele_triac, LOW);

}

void loop() {

```

```

////////////////////////////////ENCODER////////////////////////////////////////
static int pos = 0;
encoder.tick();
newPos = encoder.getPosition();

if (pos < newPos) {
  pos = newPos;
  angulo = angulo + 22.5;
  if (angulo >= 360)angulo = 360; //travar o angulo em 360° no máximo
  updateLCD();
}
else if (pos > newPos) {
  pos = newPos;
  angulo = angulo - 22.5;
  if (angulo <= 0)angulo = 0; //travar o angulo em 0° no mínimo
  updateLCD();
}

////////////////////////////////ENCODER_FIM////////////////////////////////////////

if (digitalRead(botao_A) == LOW) { //botão de start do processo de energização do
transformador acionado

  led_teste();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(5, 0);
  lcd.print("Angulo");
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("Selecionado");

  digitalWrite(rele_SCR, HIGH); //fecha relé SCR
  delay(10); //tempo para fechamento do relé acima
  pulso(pulso_SCR); //pulso gate SCR para acionamento
  delay(3000); //3 segundos de alimentação de corrente CC no transformador
  digitalWrite(rele_triac, HIGH); //fecha relé TRIAC
  delay(10); //tempo para fechamento do relé TRIAC

  //seleciona a referência do pulso de TCA785 s= subida , d=descida
  if (angulo >= 0 && angulo <= 180)
    gatilho_TRIAC(angulo, 's');
  else if (angulo >= 195 && angulo <= 360)
    gatilho_TRIAC(angulo, 'd');

  lcd.noDisplay();
  delay(2000);
}

```

```
lcd.display();  
updateLCD();  
digitalWrite(rele_triacle, LOW); //abre relé TRIAC  
led_teste();  
}  
  
} //loop
```