

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
SANDRO JACOMINI**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA *SOFT-STARTER* PARA PARTIDA DE MOTORES
ELÉTRICOS TRIFÁSICOS COM TRANSISTORES DE POTÊNCIA**

**CASCADEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
SANDRO JACOMINI**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA *SOFT-STARTER* PARA PARTIDA DE MOTORES
ELÉTRICOS TRIFÁSICOS COM TRANSISTORES DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro
Universitário Assis Gurgacz.

Professor Orientador: Ederson Zanchet

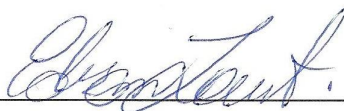
**CASCADEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
SANDRO JACOMINI**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA *SOFT-STARTER* PARA PARTIDA DE MOTORES
ELÉTRICOS TRIFÁSICOS COM TRANSISTORES DE POTÊNCIA**

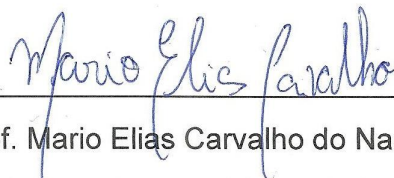
Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Elétrica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Professor Ederson Zanchet.

BANCA EXAMINADORA



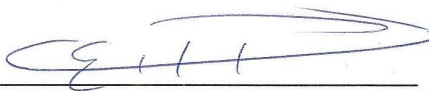
Prof. Ederson Zanchet

Centro Universitário Assis Gurgacz



Prof. Mario Elias Carvalho do Nascimento

Centro Universitário Assis Gurgacz



Prof. Ewerson Luiz Poisk

Centro Universitário Assis Gurgacz

Cascavel, 08 de Dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que confiaram em mim e que me ajudaram de alguma forma a chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, e por me conduzir até aqui.

A minha família, pelo apoio e pela presença em todos os momentos.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo e auxílio em vários momentos.

Aos professores, por todo conhecimento compartilhado. Em especial, aos professores membros da banca, pelas dicas e sugestões construtivas, e ao meu orientador, Professor Ederson Zanchet, que teve papel fundamental na elaboração deste trabalho.

E, por fim, a todas as pessoas que em algum momento da minha vida compartilharam um pouco do seu conhecimento, como amigos e colegas de trabalho. O que sou, e onde cheguei, devo a cada um com quem tive a felicidade de conviver e aprender.

“A única maneira de fazer um ótimo trabalho é amando aquilo que faz.”

Steve Jobs

RESUMO

O trabalho apresentou uma proposta de *soft-starter* para partida de motores elétricos trifásicos, que utiliza transistores do tipo *IGBT*, aplicados no controle de potência em corrente alternada, através de um arranjo com diodos. Os transistores são componentes mais eficientes e apresentam menores perdas em comutação que os tirístores, e também possibilitam a operação em maiores frequências, diminuindo a geração de harmônicas no sistema elétrico. O circuito de controle projetado utiliza um microcontrolador que controla a potência de saída através da leitura do instante de passagem por zero da onda de tensão, e a partir disso varia o tempo para início da condução dos transistores. O protótipo apresentou a possibilidade de operar no modo de variação angular, com um pulso por semiciclo da onda de tensão, e também através de modulação por largura de pulso - *PWM*. Nos testes realizados, o modo de operação por variação angular se mostrou eficiente na partida e parada do motor, porém, apresentou perdas elétricas consideráveis no circuito de amortecimento de transientes de tensão. Já a operação no método *PWM* não obteve sucesso, tendo o motor apresentado torque insatisfatório. Para viabilizar a aplicação desse método, ajustes ainda devem ser realizados no circuito de potência.

Palavra-chave: Motores Elétricos; *Soft-starter*; Transistores de Potência.

ABSTRACT

The work presented a soft-starter proposal for starting three-phase electric motors, that uses IGBT type transistors, applied to AC power control, through a diode arrangement. Transistors are more efficient components and have lower switching losses than the thyristors, and also allow operation at higher frequencies, reducing the generation of harmonics in the electrical system. The designed control circuit utilizes a microcontroller that controls the output power by reading the zero-point of the voltage wave, and from there the time for starting transistors to start varies. The prototype presented the possibility of operating in the angular variation mode, with a pulse per half cycle of the voltage wave, and also through pulse width modulation - PWM. In the tests carried out, the angular range of operation was efficient at starting and stopping the motor, but it presented considerable electrical losses in the voltage transient damping circuit. However the operation in the PWM method was not successful, and the motor presented torque unsatisfactory. To make this method feasible, adjustments must still be made to the power circuit.

Keywords: Electric Motors; Soft-starter; Power Transistors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de motores elétricos	18
Figura 2.2: Motor elétrico trifásico assíncrono de rotor gaiola de esquilo.....	19
Figura 2.3: Enrolamento trifásico e a soma gráfica dos campos magnéticos.....	20
Figura 2.4: Correntes de partida apresentadas por três diferentes métodos	21
Figura 2.5: Diagrama de uma <i>soft-starter</i>	23
Figura 2.6: Forma de onda de tensão aplicada ao motor na aceleração	24
Figura 2.7: Diagrama de uma <i>soft-starter</i> com controle nas três fases	25
Figura 2.8: Rampa de tensão na partida	26
Figura 2.9: Rampa de tensão na parada.....	27
Figura 2.10: Forma de onda de tensão aplicada ao motor na desaceleração.....	28
Figura 2.11: Função pulso de tensão na partida	28
Figura 2.12: Limitação de corrente de partida	29
Figura 2.13: Atuação das proteções por sobre e subcorrente.....	30
Figura 2.14: Distorção da onda fundamental pela presença de uma harmônica.....	30
Figura 2.15: Perdas elétricas devido a DHT de tensão	32
Figura 2.16: Vida útil de um transformador em função da DHT de corrente	33
Figura 2.17: Estrutura e simbologia do diodo	34
Figura 2.18: Estrutura e simbologia do tiristor.....	35
Figura 2.19: Típica forma de onda de corrente durante o desligamento do tiristor ...	36
Figura 2.20: Estrutura e simbologia do transistor bipolar de potência.....	37
Figura 2.21: Simbologia e estrutura do <i>MOSFET</i>	38
Figura 2.22: Simbologia e estrutura do <i>IGBT</i>	39
Figura 2.23: Circuito de acionamento de porta do <i>MOSFET</i>	40
Figura 2.24: Quadrantes de operação de semicondutores	42
Figura 2.25: Topologias para operação de transistores nos quatro quadrantes	43
Figura 2.26: Forma de onda de tensão com <i>PWM</i> em corrente alternada.....	44
Figura 2.27: Diagrama temporal da transferência de dados I ² C.....	46
Figura 3.1: Fluxograma metodológico	47
Figura 3.2: Circuito de potência projetado para a <i>soft-starter</i>	48
Figura 3.3: Plaqueta de identificação do motor utilizado	48
Figura 3.4: Circuito com <i>MOSFET</i> aplicado em corrente alternada	49
Figura 3.5: Circuito de acionamento do <i>IGBT</i> da fase A	50

Figura 3.6: Circuito de identificação de passagem por zero da onda de tensão	51
Figura 3.7: Circuito de separação das saídas de controle	52
Figura 3.8: <i>LCD</i> 16x2 com módulo de comunicação serial <i>I²C</i> incorporado.....	53
Figura 3.9: Circuito básico do display <i>LCD</i> com módulo de comunicação <i>I²C</i>	54
Figura 3.10: Circuito de entrada dos botões	54
Figura 3.11: <i>Protopoard</i> com botões, <i>LCD</i> e circuitos de controle	55
Figura 3.12: Placas de potência e controle	56
Figura 3.13: Placa de desenvolvimento com o microcontrolador inserido.....	57
Figura 3.14: Estrutura de menus e telas do <i>LCD</i>	59
Figura 4.1: a) Tensão sem amortecimento em modo variação angular; b) Tensão sem amortecimento em modo <i>PWM</i>	66
Figura 4.2: a) Tensão no modo variação angular com amortecimento RC; b) Tensão no modo <i>PWM</i> com amortecimento RC	66
Figura 4.3: a) Forma de onda de corrente com tensão de 30% em modo variação angular; b) Forma de onda de corrente com tensão de 50% em modo variação angular	68
Figura 4.4: a) Forma de onda de corrente com tensão de 30% em <i>PWM</i> ; b) Forma de onda de corrente com tensão e 50% em <i>PWM</i>	68
Figura 4.5: a) Corrente de partida com tensão inicial em 30% no modo variação angular; b) Corrente de partida com tensão inicial em 50% no modo variação angular	69
Figura 4.6: a) Corrente de partida com tensão inicial em 30% no modo <i>PWM</i> ; b) Corrente de partida com tensão inicial em 50% no modo <i>PWM</i>	70
Figura 4.7: a) Corrente de parada no modo variação angular com 5s; b) Corrente de parada no modo variação angular com 10s	71
Figura 4.8: a) Corrente de parada no modo <i>PWM</i> com 5s; b) Corrente de parada no modo <i>PWM</i> com 10s	71
Figura 4.9: Correntes harmônicas geradas durante a partida em modo variação angular	72
Figura 4.10: Correntes harmônicas geradas durante a partida em modo <i>PWM</i>	73
Figura 4.11: Corrente em CA(A), tensão em CA(V) e tensão em CC(mV) respectivamente, com <i>PWM</i>	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔV	Variação da tensão
Δt	Variação do tempo
α	Ângulo de disparo
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor de Junção Bipolar)
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
CA	Corrente alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente Contínua
C_{gd}	Capacitância porta – dreno
C_{gs}	Capacitância porta – fonte
C_i	Conjugado nominal da carga no momento da partida
C_{iss}	Capacitância de entrada
C_{nm}	Conjugado nominal do motor
C_p	Conjugado nominal do motor no momento da partida
C_s	Capacitância do capacitor <i>snubber</i>
CV	Cavalo Vapor
DHT	Distorção Harmônica Total
DHT_i	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHT_v	Distorção Harmônica Total de Tensão
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador digital de sinais)
dt	Derivada do tempo
dv	Derivada da tensão
GHz	gigahertz
GTO	<i>Gate Turn Off</i> (tiristor comutável pela porta)
Hz	Hertz
I_1	Corrente fundamental
I₂C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
I_g	Pulso de corrente de porta
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor bipolar de porta isolada)
I_n	Corrente harmônica de ordem n
J_c	Momento de inércia da carga

J_m	Momento de inércia do motor
kHz	Quilohertz
LCD	<i>Liquid crystal display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
L_s	Indutância parasita
mA	Miliamperes
MHz	megahertz
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i> (Transistor de efeito de campo de óxido de metal semiconductor)
ms	Milissegundos
<i>n</i>	Ordem harmônica
NEMA	<i>National Environment Management Authority</i>
NPT	<i>Non Punch Through</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
P_{rs}	Potência do resistor <i>snubber</i>
PT	<i>Punch Through</i>
RC	Resistor-Capacitor
R_g	Resistência de porta
R_s	Resistência do resistor <i>snubber</i>
s	Segundos
SCL	<i>Serial Clock</i>
SCR	<i>Silicon Control Rectifier</i> (Retificador Controlado de Silício)
SDA	<i>Serial Data</i>
TC	Transformador de Corrente
T_f	Tempo de comutação
T_p	Tempo de partida
T_{pd}	Tempo de partida do motor ligado diretamente à rede
TRIAC	<i>Triode Alternative Current</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
μs	Microssegundos
V	volt
V₁	Tensão eficaz fundamental

V_{ca}	Tensão em corrente alternada
V_{cc}	Tensão em corrente continua
V_{motor}	Tensão eficaz entregue ao motor
V_{nm}	Tensão nominal do motor
V_p	Tensão de partida
V_n	Tensão eficaz de ordem n
V_{rede}	Tensão eficaz de rede

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	MOTORES ELÉTRICOS	18
2.1.1	Motor de indução trifásico – MIT.....	19
2.2	MÉTODOS PARA PARTIDA DE MOTORES ELÉTRICOS	20
2.2.1	Partida direta	22
2.2.2	Partida estrela-triângulo.....	22
2.2.3	Partida através de chave compensadora	22
2.3	<i>SOFT-STARTER</i>	22
2.3.1	Circuito de controle.....	23
2.3.2	Circuito de potência	24
2.3.3	Parâmetros de configuração.....	26
2.3.3.1	Rampa de tensão na partida	26
2.3.3.2	Rampa de tensão na parada	27
2.3.3.3	Pulso de tensão na partida	28
2.3.3.4	Limite de corrente na partida	29
2.3.3.5	Proteções	29
2.4	HARMÔNICAS	30
2.4.1	Distorção harmônica em tensão	31
2.4.2	Distorção harmônica em corrente.....	32
2.5	DISPOSITIVOS RETIFICADORES	33
2.5.1	Diodo	34
2.5.2	Tirístores.....	35
2.5.3	Transistor bipolar de potência	36
2.5.4	Transistor <i>MOSFET</i>	37
2.5.5	Transistor bipolar de porta isolada – <i>IGBT</i>	38
2.6	CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO <i>MOSFET</i>	39
2.7	CIRCUITO DE AMORTECIMENTO - <i>SNUBBER</i>	41
2.8	OPERAÇÃO DOS RETIFICADORES.....	42
2.9	MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO – <i>PWM</i>	43
2.10	MICROCONTROLADORES	44

2.10.1	Microcontroladores <i>dsPIC30F</i> [®]	44
2.10.2	Comunicação serial I ² C	45
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	CIRCUITO DE POTÊNCIA	47
3.1.1	Circuito de acionamento dos <i>IGBT</i> 's	49
3.2	CIRCUITO DE CONTROLE	51
3.2.1	Controle por variação angular - Identificação do instante de tensão zero	51
3.2.2	Portas de saída de controle do microcontrolador	52
3.3	INTERFACE	53
3.3.1	Interface com <i>LCD</i>	53
3.3.2	Interface com botões para entrada de dados	54
3.4	MONTAGEM DO PROTÓTIPO	55
3.4.1	Placas de potência e de controle - instante de tensão zero	55
3.4.2	Placa de desenvolvimento para o microcontrolador	56
3.5	LÓGICA DE CONTROLE	57
3.5.1	Variáveis	57
3.5.2	<i>LCD</i>	58
3.5.3	Lógica de controle	59
3.5.4	Lógica da rampa de partida	60
3.5.4.1	Lógica da rampa de partida no modo de variação angular	60
3.5.4.2	Lógica da rampa de partida no modo <i>PWM</i>	61
3.5.5	Lógica da rampa de parada	61
3.5.5.1	Lógica da rampa de parada no modo de variação angular	62
3.5.5.2	Lógica da rampa de parada no modo <i>PWM</i>	62
3.5.6	Lógica geral do modo de variação angular	63
3.5.7	Lógica geral do modo <i>PWM</i>	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS PARA TESTES	65
4.1.1	Testes e definições iniciais	65
4.2	TESTES DE FUNCIONAMENTO E LEITURA DE DADOS	67
4.2.1	Operação da <i>soft-starter</i>	67
4.2.1.1	Partida do motor	69
4.2.1.2	Parada do motor	70
4.2.2	Harmônicas	72

4.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
5	CONCLUSÃO.....	75
6	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A: CIRCUITOS DA <i>SOFT-STARTER</i> DESENVOLVIDA	79
	APÊNDICE B: PROTÓTIPO DA <i>SOFT-STARTER</i> DESENVOLVIDA	80
	APÊNDICE C: MATERIAIS E ORÇAMENTO.....	81
	APÊNDICE D: FLUXOGRAMA BÁSICO DA LÓGICA DE CONTROLE	82
	APÊNDICE E: CÓDIGO DO MICROCONTROLADOR EM LINGUAGEM C.....	83
	ANEXO A: BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO SERIAL COM O <i>LCD</i>	90

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), a força motriz representa 68% da energia consumida pela indústria no país. Sendo que 30% dos equipamentos que utilizam essa força são operados por motores elétricos [1].

Quando o projeto de aplicação de um motor elétrico é realizado, uma situação importante que deve ser levada em consideração é o método de partida a ser utilizado, visto que nesse momento quando há plena tensão de rede, o motor pode exigir uma corrente entre 6 a 8 vezes a sua nominal. Essa alta corrente absorvida pode vir a causar um afundamento de tensão na rede elétrica local, podendo provocar danos a outros equipamentos, além de poder exigir uma maior bitola dos condutores para a instalação [2]. Para se reduzir essa excessiva corrente na partida de um motor elétrico, podem ser utilizados métodos auxiliares e, entre eles, uma das opções utilizadas é a partida com *soft-starter*.

A *soft-starter* é um equipamento composto por módulos de tirístores na parte de potência e de um circuito eletrônico de controle. Ela opera reduzindo a tensão eficaz aplicada aos terminais do motor através da variação do ângulo de disparo dos tirístores [3].

Apesar dos benefícios em se realizar a partida por *soft-starter*, como o controle do torque aplicado na aceleração e na desaceleração do motor, por se tratar de um equipamento não linear, no qual o controle ocorre pela variação do ângulo de disparo com apenas um pulso por semiciclo da onda de tensão de entrada, tem-se, entretanto, como resultado, a geração de harmônicas de baixa ordem, como a terceira e quinta, e essas correntes harmônicas são as mais difíceis de serem filtradas [4]. Também, devido aos tirístores serem dispositivos de comutação relativamente lentos, se comparados, por exemplo, com os transistores, acabam provocando maiores perdas nesse processo [5].

Diante disso, o objetivo desse trabalho é propor uma opção de *soft-starter* que utilize transistores de potência no lugar dos tirístores, podendo apresentar menores perdas elétricas devido a maior velocidade de comutação. E, de acordo com as características de chaveamento dos transistores, pode-se utilizar o controle através de modulação por largura de pulso (*PWM*). Com o aumento na quantidade de pulsos durante um mesmo semiciclo da forma de onda, pode-se diminuir ou até eliminar as harmônicas de baixa ordem, como as de terceira e quinta ordem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

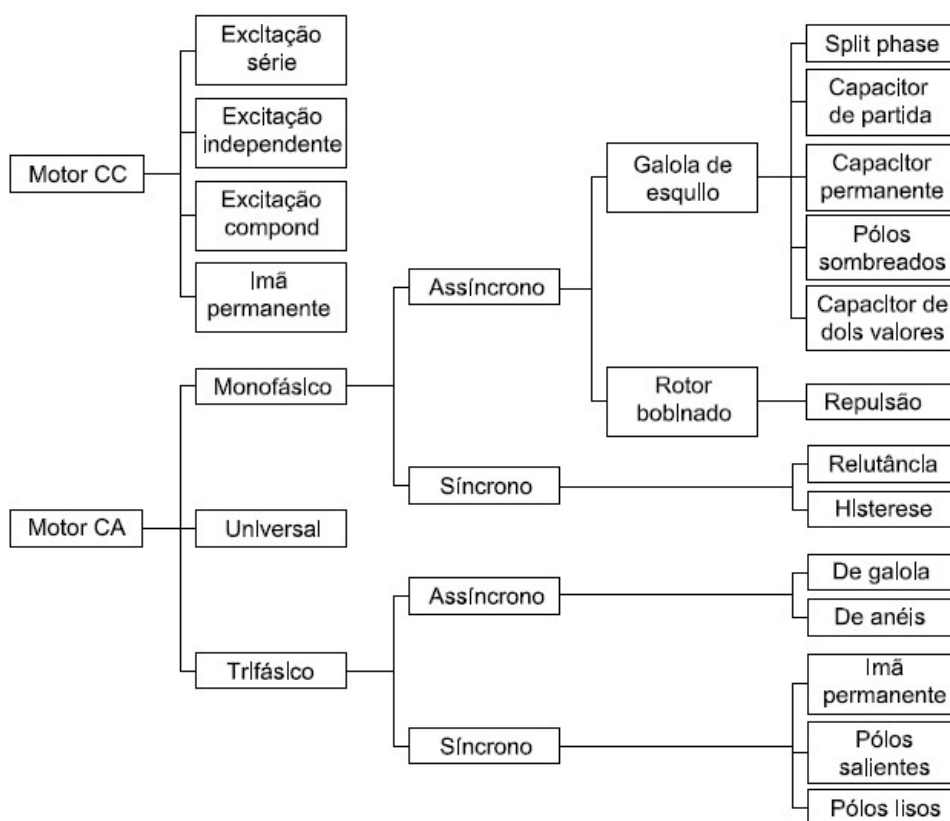
Com o intuito de realizar um referencial teórico, se faz necessária uma revisão bibliográfica a respeito dos assuntos pertinentes a serem aplicados no desenvolvimento do trabalho.

2.1 MOTORES ELÉTRICOS

Segundo estimativas, os motores elétricos movimentam por ano em torno de 10 bilhões de dólares no mercado mundial. E ainda, cerca de 70 a 80% da energia elétrica consumida na indústria é utilizada por motores elétricos. Motores que são em sua maioria operados em corrente alternada (CA) [6].

Os motores elétricos são equipamentos que convertem a energia elétrica em energia mecânica. Através da aplicação de corrente alternada ou contínua, conseguem fornecer movimento a um eixo, e podem ser utilizados de diversas maneiras, de acordo com o seu tipo [6] (Figura 2.1).

Figura 2.1: Tipos de motores elétricos



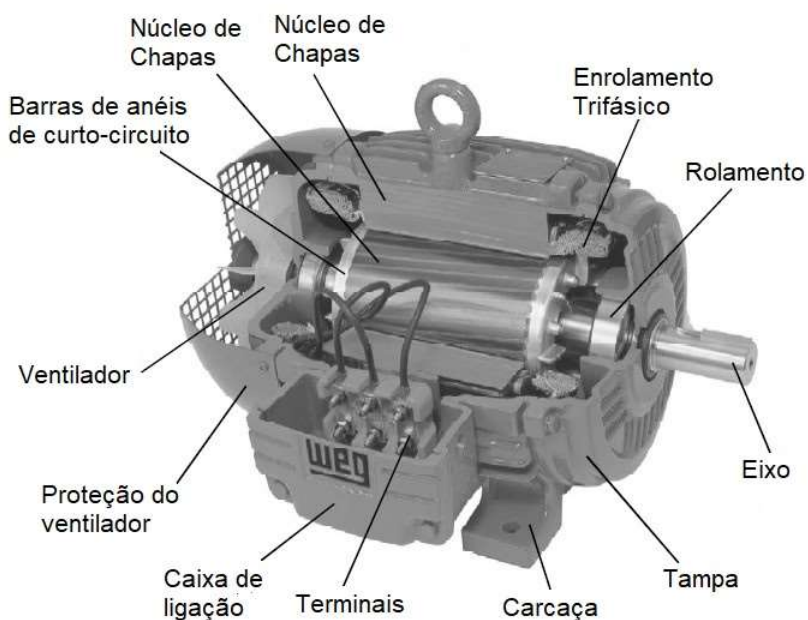
Devido à energia fornecida pelo sistema de distribuição ser em geral trifásico de corrente alternada, o motor elétrico de indução polifásico se tornou o mais usual, tanto em ambiente doméstico como na indústria [6].

2.1.1 Motor de indução trifásico – MIT

O motor de indução trifásico é constituído basicamente por duas partes: estator e rotor. O estator é o corpo do motor, com estrutura robusta e com chapas de aço compondo seu núcleo, onde são acondicionados os enrolamentos das bobinas. Já o rotor, quando do tipo gaiola, é composto por chapas iguais as do estator, mas com barras e anéis em curto circuito, envolvidos em um eixo que transmite força mecânica [7] (Figura 2.2).

Dentre os modelos trifásicos, os mais utilizados são os assíncronos, sendo oferecidos com dois tipos de rotores: o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado, sendo o primeiro mais utilizado por não necessitar do uso de escovas e comutadores [6].

Figura 2.2: Motor elétrico trifásico assíncrono de rotor gaiola de esquilo

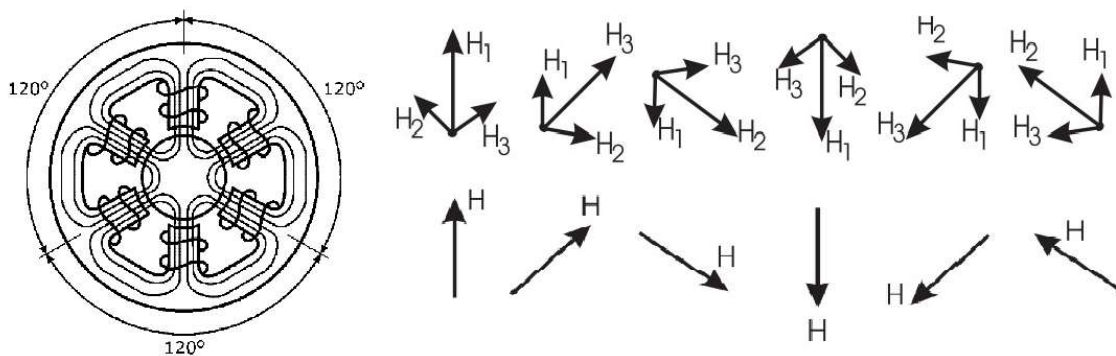


Fonte: [8], adaptado pelo autor (2018)

Os motores trifásicos apresentam vantagens em relação aos monofásicos, principalmente para potências superiores a 2kW, como nível inferior de ruído, partida simplificada, e menor custo [6].

O enrolamento trifásico é composto por três monofásicos espaçados em 120° um do outro. Quando as bobinas do estator são percorridas por corrente elétrica, cria-se um campo magnético orientado conforme o seu eixo, e com valor proporcional à corrente. Como a corrente varia no tempo com defasagem de 120° , os valores dos campos magnéticos também variam. Conforme Figura 2.3, a resultante H será a soma gráfica dos três campos magnéticos H_1 , H_2 e H_3 em determinado instante [7].

Figura 2.3: Enrolamento trifásico e a soma gráfica dos campos magnéticos



Fonte: [7]

Assim cria-se um campo girante no estator, que induz tensões no rotor através das linhas de fluxo magnético que cortam as suas barras em curto-circuito. Gerando, então, no rotor corrente e campo magnético em sentido oposto ao do estator [7].

Como o campo magnético do estator é rotativo, e as cargas de sentido oposto são atraídas, o rotor tende a girar na mesma velocidade que o campo do estator, gerando um conjugado capaz de movimentar alguma carga [7].

2.2 MÉTODOS PARA PARTIDA DE MOTORES ELÉTRICOS

Um ponto que deve ser levado em consideração no momento de operar um motor elétrico é o seu método de partida, pois nesse momento, devido à alteração

no estado de inércia do motor, ocorre uma elevação de corrente que pode variar entre seis a oito vezes a nominal [6].

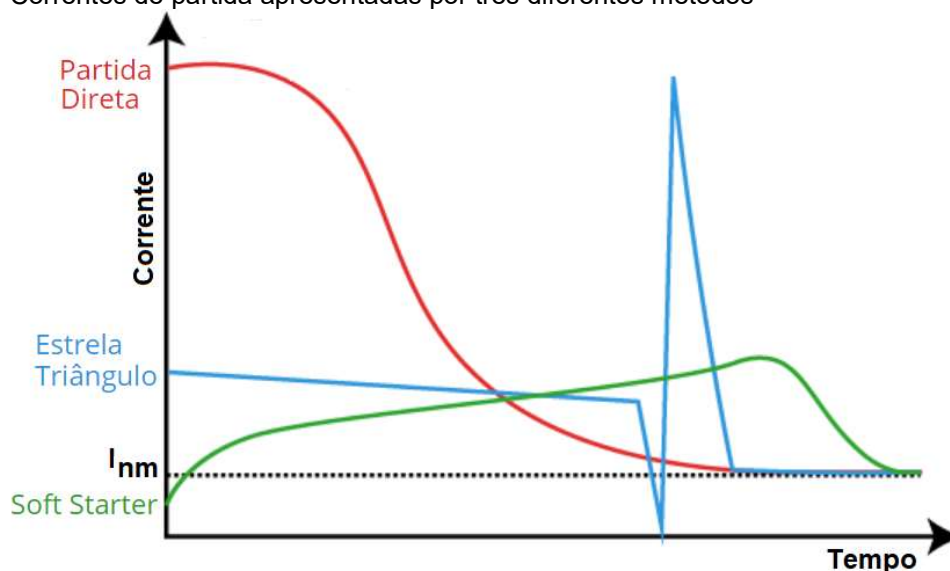
A elevação de consumo de potência pelo motor durante sua partida pode fazer com que a rede elétrica local sofra um afundamento de tensão, principalmente se o sistema de alimentação foi projetado para a corrente nominal do motor. Essa redução de tensão, mesmo que momentânea, pode ocasionar falhas a equipamentos ligados na mesma instalação [2].

O cálculo da inércia que o motor deve superar na partida pode ser calculado através da soma dos momentos de inércia do rotor do motor com o da carga, conforme a Equação (2.1) [2].

$$J_{mc} = J_m + J_c \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad \text{Equação (2.1)}$$

Dentre os métodos de partida de motores de indução trifásicos, podemos citar como os mais usuais a partida direta, a estrela-triângulo, chave compensadora e a *soft-starter*. A Figura 2.4 ilustra um comparativo da corrente consumida em relação ao tempo, no momento da partida de um motor elétrico utilizando diferentes métodos.

Figura 2.4: Correntes de partida apresentadas por três diferentes métodos



Fonte: [12], adaptado pelo autor (2018)

Cada método de partida possui características que, dependendo do motor e da carga a ser acionada, pode ser mais ou menos indicada a sua utilização.

2.2.1 Partida direta

É o método mais simples de se acionar um motor elétrico, onde o motor é conectado diretamente às fases do sistema elétrico [6]. Ela não requer o uso de componentes especiais, somente são necessários contadores e disjuntores. São utilizadas em motores que apresentam corrente de partida irrelevante em relação às características da instalação elétrica, e em geral para motores abaixo de 5 CV [2].

2.2.2 Partida estrela-triângulo

Esta opção apresenta como principal característica a redução do conjugado e da corrente de partida na ordem de $1/3$ dos valores nominais. Também proporciona baixo custo e a possibilidade de um elevado número de manobras [2], sendo utilizada normalmente em motores que partem a vazio ou com baixo conjugado de partida, podendo apenas ser aplicada em motores que tenham disponíveis pelo menos seis terminais de ligação [6].

2.2.3 Partida através de chave compensadora

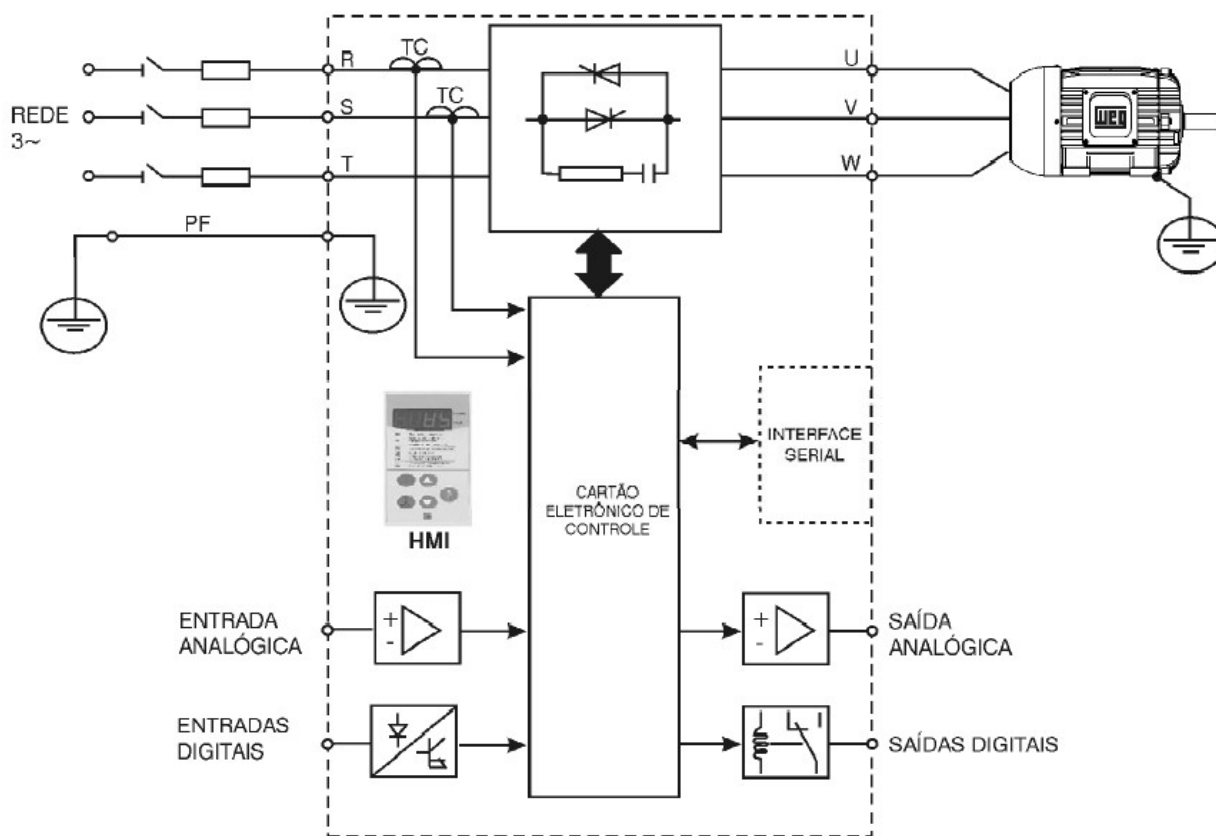
Esta chave se liga em série com as bobinas do motor reduzindo a tensão aplicada [6]. É utilizado um autotransformador com algumas opções de derivação, sendo normalmente de 65 e 80% da tensão nominal. No momento da partida o ponto em estrela do autotransformador é curto-circuitado, permanecendo assim até o fim da partida, quando o motor é então ligado diretamente à rede. Ela proporciona redução da corrente de partida e maior conjugado, porém, apresenta um custo maior e exige mais espaço se comparada a partida estrela-triângulo [2].

2.3 *SOFT-STARTER*

A *soft-starter* é um equipamento destinado basicamente para a partida e parada suave de motores de indução trifásicos (MIT). É constituída por um circuito eletrônico microprocessado, que tem a função de controlar módulos de tiristores de potência. Ela opera através da variação do ângulo de disparo dos tiristores, reduzindo a tensão eficaz aplicada aos terminais do motor e aliviando assim a

elevada corrente exigida na partida. A Figura 2.5 apresenta o diagrama de *uma soft-starter*, com suas etapas de controle e de potência.

Figura 2.5: Diagrama de uma *soft-starter*



Fonte: [8]

Ao se reduzir a tensão aplicada ao motor, também é reduzido o seu conjugado, resultando em uma aceleração suave. Condição ideal para se evitar danos a acoplamentos e às cargas instaladas nos motores elétricos [6].

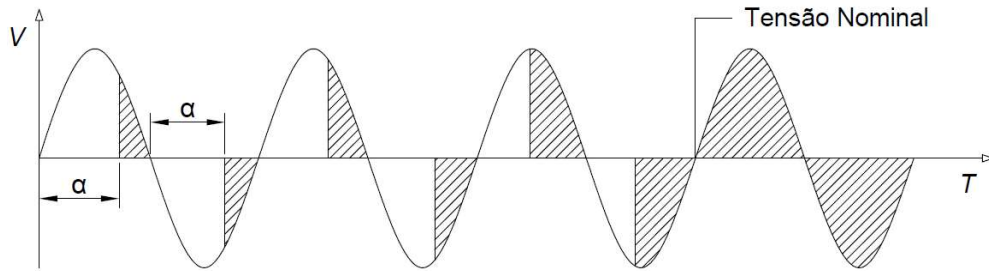
2.3.1 Circuito de controle

O circuito de controle pode envolver entradas e saídas digitais e analógicas. A forma de executar o controle, como o tempo de rampa de partida e parada, varia conforme o modelo da *soft-starter*, podendo ser um circuito analógico para modelos mais simples, até equipamentos mais modernos com circuitos controlados por um processador digital de sinais (do inglês: *Digital Signal Processor - DSP*) e monitoramento contínuo de todas as variáveis de operação e proteção do motor, além de comunicações em rede. Um mesmo módulo de controle pode ser utilizado

para diversas potências de *soft-starters*, sendo necessário apenas um ajuste da corrente nominal do equipamento nesse módulo [8].

O controle trabalha a partir da identificação da passagem por zero da tensão e da corrente, e assim determina o ângulo no qual irá disparar os tirístores em cada semiciclo da forma de onda [3]. (Figura 2.6).

Figura 2.6: Forma de onda de tensão aplicada ao motor na aceleração



Fonte: [6], adaptado pelo autor (2018)

O valor da tensão eficaz entregue ao motor em relação ao ângulo de disparo dos tirístores pode ser calculado através da Equação (2.2).

$$V_{\text{motor}} = \left(\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} V_{\text{rede}})^2 \sin^2 \theta \, d\theta \right)^{1/2} = V_{\text{rede}} \left(\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi} \right)^{1/2} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Pode-se observar que, quão menor for o ângulo de disparo dos tirístores, maior será a tensão eficaz entregue ao motor.

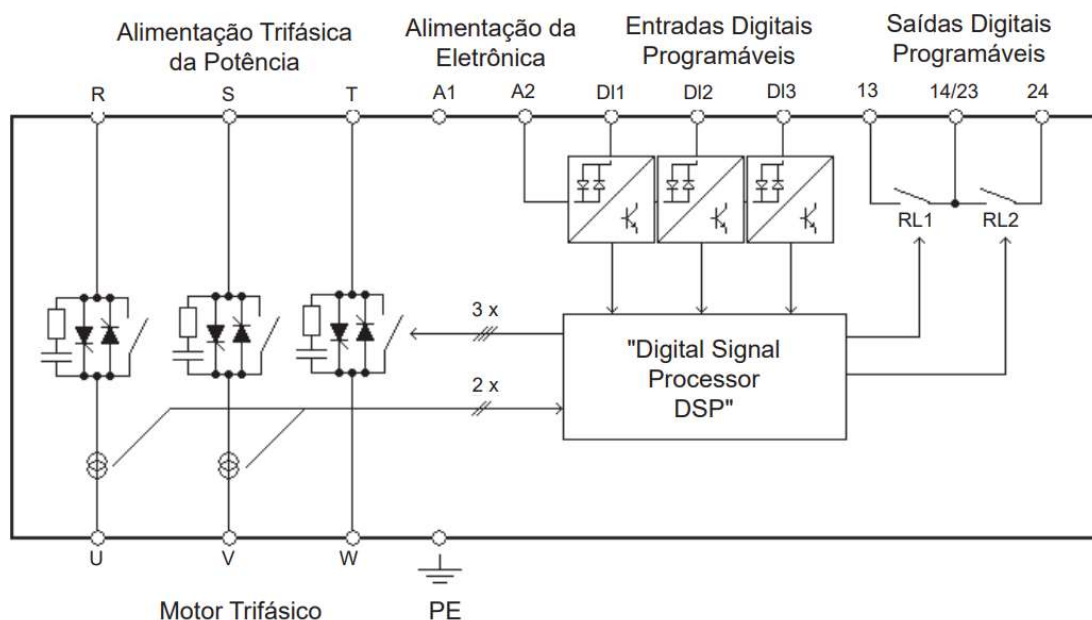
2.3.2 Circuito de potência

Dentre as configurações possíveis do circuito de potência das *soft-starters*, as duas mais usuais encontradas são as com controle em duas e três fases. Opções com circuito semicontrolado, no qual se têm a configuração diodo-SCR em anti-paralelo também é funcional, porém, nesse caso as formas de ondas de corrente se tornam assimétricas, resultando em harmônicas pares nas formas de onda do motor [9].

As *soft-starters* com controle em apenas duas fases são indicadas para aplicação em cargas consideradas leves ou moderadas, como misturadores, bombas centrífugas e compressores a parafuso. Já os modelos com controle total,

ou seja, nas três fases, são indicados para aplicações com cargas pesadas, como é o caso de britadores, ventiladores, exaustores e picadores de madeira [10].

Figura 2.7: Diagrama de uma *soft-starter* com controle nas três fases



Fonte: [11]

A partir da análise do circuito de potência de uma *soft-starter* (Figura 2.7), pode-se perceber que os SCRs encontram-se em pares e dispostos em anti-paralelo entre si e em série com as fases. Normalmente essa disposição está interna a um único invólucro, chamado de módulo (uma *soft-starter* com controle nas três fases possui três módulos). Como o SCR é um componente unidirecional, cada unidade conduz em um semiciclo da forma de onda senoidal [8].

Disposto em paralelo também, existe um circuito *snubber* RC que tem a finalidade de proteção de disparo por dv/dt dos tirístores, e um contator de *bypass* interno, que após o término da rampa de aceleração é atuado para retirar dos SCRs o fluxo de corrente, reduzindo drasticamente as perdas em condução. Quando é iniciada a rampa de parada suave esse contator é aberto, direcionando a carga novamente para os tirístores. Para alguns modelos de *soft-starters* o contator de *bypass* pode ser instalado externamente [8].

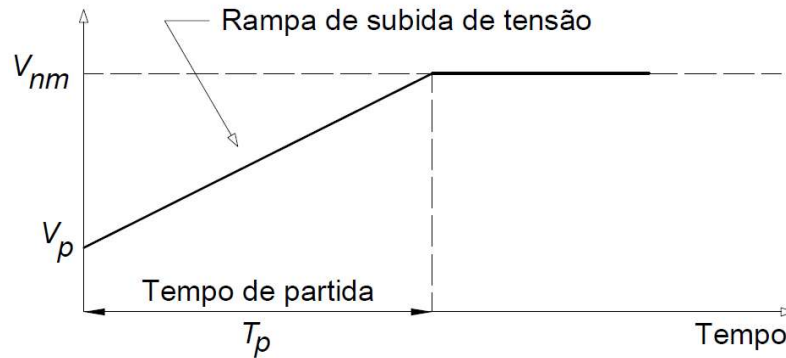
2.3.3 Parâmetros de configuração

As funções de uma *soft-starter* vão além de simplesmente reduzir a corrente de partida de um motor, como visto nos métodos eletromecânicos tradicionais. Elas também oferecem controle de parada e proteções durante todo o regime de operação [11].

2.3.3.1 Rampa de tensão na partida

A *soft-starter* realiza a partida do motor através do aumento linear da tensão aplicada. Porém, essa tensão não se inicia em zero, ela deve ser ajustada a um valor que possa garantir o torque inicial necessário para vencer o conjugado do motor e da carga [2]. (Figura 2.8).

Figura 2.8: Rampa de tensão na partida



Fonte: [11], adaptado pelo autor (2018)

O valor da tensão ideal para o início da rampa de partida pode ser calculado através da Equação (2.3).

$$V_p = V_{nm} \cdot \sqrt{\frac{C_i + 0,15 \cdot C_{nm}}{C_p}} \quad \text{Equação (2.3)}$$

Já o tempo necessário para a realização da partida pode ser calculado pela Equação (2.4).

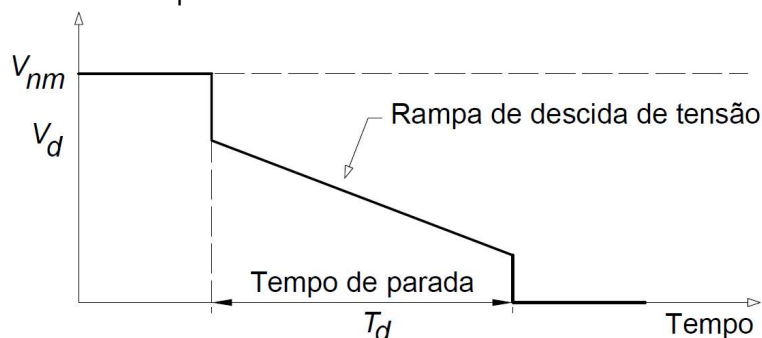
$$T_p = T_{pd} \cdot \frac{V_{nm}}{V_p} \quad \text{Equação (2.4)}$$

Apesar do aumento da tensão entregue ao motor ser linear em relação ao tempo ajustado, devido às características de variação do conjugado do motor, não significa que a aceleração também irá ocorrer de forma linear [2].

2.3.3.2 Rampa de tensão na parada

É importante notar que, não encontra-se nos equipamentos de partida comuns o controle de parada suave, já que ela normalmente se faz apenas por inércia. Porém, com o uso da *soft-starter*, além de se ter a opção de parada por inércia, tem-se também a possibilidade de ajuste de uma rampa de parada suave. Configura-se uma tensão de início da desaceleração a um certo percentual da nominal, e então a tensão começa a decair linearmente em função do tempo, também ajustável, onde então alcançará uma tensão mínima, desligando por completo o motor [2]. (Figura 2.9).

Figura 2.9: Rampa de tensão na parada

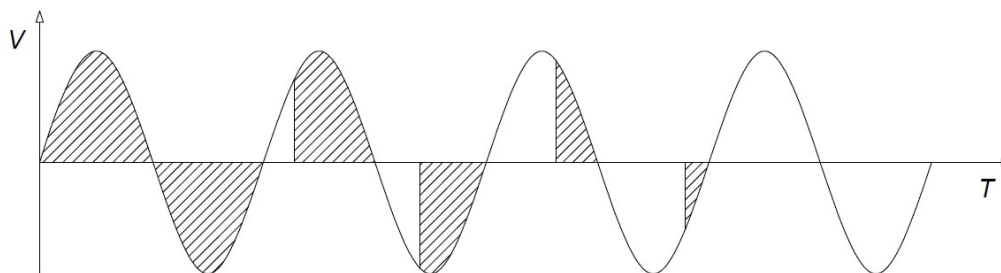


Fonte: [8], adaptado pelo autor (2018)

O tempo de ajuste da rampa de parada varia conforme o tipo de carga, sendo que para uma aplicação com bombas pode ficar entre 5 e 15s, embora as chaves possuam ajustes próprios de cerca de 1 a 20s. A tensão inicial de rampa de parada normalmente é ajustada para 90% da tensão nominal, enquanto que a de final de rampa fica em 85% da tensão que foi ajustada para o início da rampa de partida [2].

A Figura 2.10 apresenta a forma de onda de tensão aplicada ao motor no momento em que ocorre a desaceleração.

Figura 2.10: Forma de onda de tensão aplicada ao motor na desaceleração



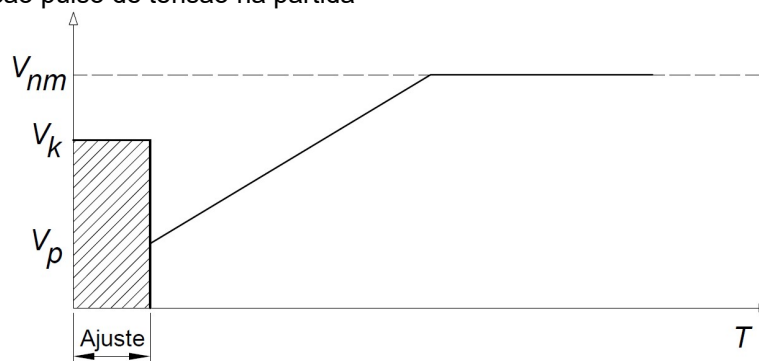
Fonte: [6], adaptado pelo autor (2018)

A utilização de uma parada suave é importante em sistemas que não devem ter paradas bruscas, como é o caso das bombas recalque, onde se sofre com o golpe de aríete, que é uma elevação da pressão na tubulação no momento da parada, pressão essa que pode causar danos como o rompimento da rede [8].

2.3.3.3 Pulso de tensão na partida

Algumas cargas apresentam uma elevada inércia de partida, que pode ser um problema ao se tentar partir com um conjugado muito baixo, como o causado pela redução da tensão. Para contornar isso, através dessa função, a *soft-starter* injeta no motor por um curto espaço de tempo, em torno de 100 a 300ms, uma tensão entre 75 e 90% da nominal, facilitando a partida destas cargas [6]. (Figura 2.11).

Figura 2.11: Função pulso de tensão na partida



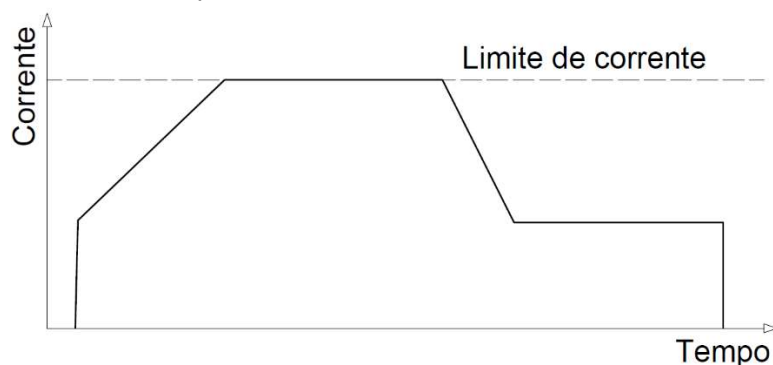
Fonte: [8] adaptado pelo autor (2018)

O inconveniente de se utilizar essa prática é que ocorre um pico de corrente nesse instante, o que acaba minimizando a principal função do equipamento que seria justamente diminuir a corrente de partida [6].

2.3.3.4 Limite de corrente na partida

Essa função permite o ajuste da corrente máxima que o motor pode absorver da rede no momento da partida. Nesse caso, ao invés da *soft-starter* fazer simplesmente uma rampa linear entre o início e fim do tempo de partida, ela varia a tensão aplicada ao motor, de modo a não ultrapassar o limite de corrente configurado [2]. O gráfico de corrente nesse método pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12: Limitação de corrente de partida



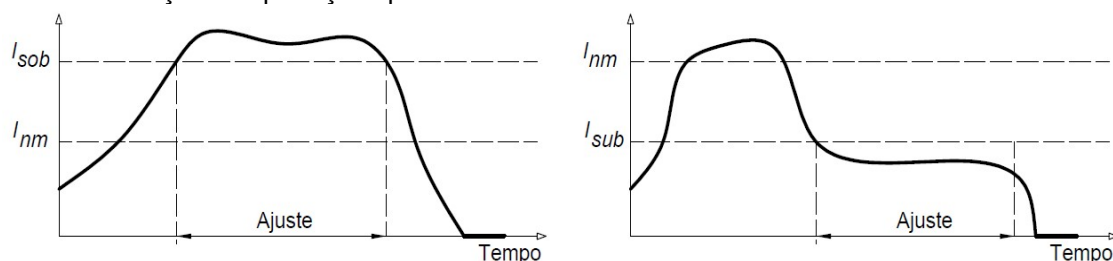
Fonte: [11], adaptado pelo autor (2018)

Essa função é muito útil em um sistema elétrico que possua um baixo nível de corrente de curto circuito. Por outro lado, se a carga aplicada tiver um conjugado de partida muito alto, o motor pode não conseguir vencê-lo para realizar a aceleração no tempo programado, resultando no desligamento da *soft-starter* por proteção [2].

2.3.3.5 Proteções

Além das opções configuráveis de partida e parada, a *soft-starter* também apresenta alguns parâmetros de segurança, e entre os mais importantes estão os de controle de corrente. Uma sobrecorrente pode ser causada por uma sobrecarga no motor, podendo vir a danificá-lo. Já uma subcorrente, pode ter relação com a perda de carga do motor, ocasionado por um dano a um acoplamento, ou no caso de bombas, um rompimento na rede de recalque, por exemplo. Para ambas as situações, o motor deve ser desligado dentro de um tempo pré-programado, se as condições adversas se mantiverem [6]. O gráfico de atuação das proteções pode ser visto na Figura 2.13.

Figura 2.13: Atuação das proteções por sobre e subcorrente



Fonte: [6], adaptado pelo autor (2018)

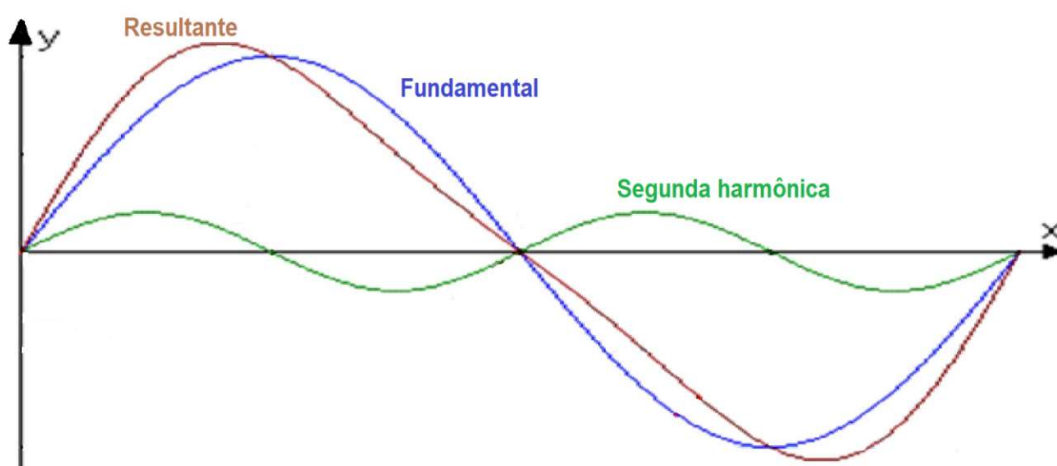
Uma característica inconveniente gerada pelo uso das *soft-starters* está no fato de que, por ser um equipamento não-linear, acaba injetando harmônicas no sistema elétrico durante a atuação dos tiristores. Essa distorção tende a diminuir na medida em que os ângulos de disparo dos tiristores aumentam [13].

2.4 HARMÔNICAS

As harmônicas são formas de onda múltiplas inteiras de uma componente fundamental. Elas são geradas por todas as cargas não-lineares conectadas no sistema elétrico, como conversores CA/CC, inversores de frequência, *soft-starters*, e equipamentos eletrônicos em geral. Essas cargas não possuem linearidade entre suas curvas de corrente e tensão, o que faz com que desenvolvam ondas em frequências múltiplas da fundamental [4].

No sistema elétrico essas frequências acabam se somando, resultando em uma forma de onda distorcida [4], conforme ilustra a Figura 2.14.

Figura 2.14: Distorção da onda fundamental pela presença de uma harmônica



Fonte: [14], adaptado pelo autor (2018)

Em geral, os equipamentos elétricos são construídos para trabalhar a determinados valores constantes de frequência e tensão, porém a existência de harmônicas pode alterar tais características e causar danos, como falhas ou até queima. Internacionalmente aceito, está um valor de distorção na tensão de até 5%, que deve ser suportável por todos os equipamentos sem que ocorra qualquer problema. Esse valor também é aplicado pela norma *NEMA (National Environment Management Authority)* como sendo o máximo aceitável para equipamentos de potência como inversores de frequência, conversores e *soft-starters* [4].

As componentes harmônicas podem ser determinadas individualmente, considerando seus ângulos de fase e amplitudes no espectro, ou também pode-se utilizar uma medida global, que abrange a influência causada por todas as componentes, conhecida como distorção harmônica total (DHT). Quando o valor da DHT for nulo, entende-se que a rede não possui nenhuma componente harmônica [4].

Para o cálculo de expressões relacionadas com a DHT deve ser considerada uma faixa de frequências iniciando na fundamental e indo até pelo menos a 40ª ordem harmônica [21].

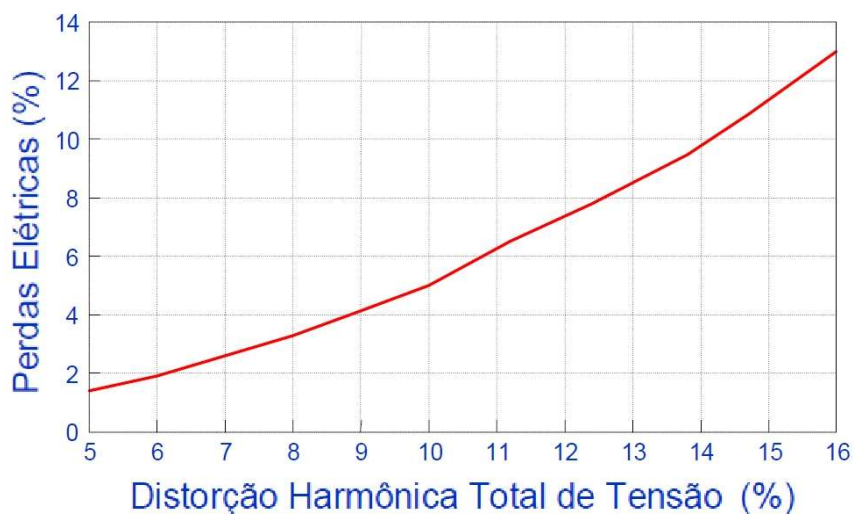
2.4.1 Distorção harmônica em tensão

A DHT em tensão, ou DHT_v , é caracterizada por uma deformação da onda de tensão, sendo considerado um valor normal quando inferior a 5%. A Equação (2.5) é utilizada para calcular o seu valor.

$$DHT_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad \text{Equação (2.5)}$$

A Figura 2.15 demonstra as perdas elétricas que ocorrem em um motor, quando submetido a DHT de tensão.

Figura 2.15: Perdas elétricas devido a DHT de tensão



Fonte: [4]

Mesmo com a presença do valor admissível de 5% da DHT de tensão, o motor elétrico apresenta um considerável percentual de perdas, que pode ser mais significativo em custo de energia nos motores com potências elevadas.

2.4.2 Distorção harmônica em corrente

A DHT em corrente, ou DHT_i , é calculada através da Equação (2.6), sendo caracterizada pela deformação da onda de corrente [15].

$$DHT_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad \text{Equação (2.6)}$$

A Figura 2.16 demonstra a redução de vida útil de um transformador, quando submetido à DHT de corrente.

Figura 2.16: Vida útil de um transformador em função da DHT de corrente



Fonte: [4]

Apesar de ser considerado normal a DHT em corrente de até 10% [15], já se observa nesse percentual uma sensível diminuição na vida útil do transformador.

Com a evolução tecnológica da eletrônica de potência, e o surgimento de novos componentes, alguns equipamentos que anteriormente eram alimentados por métodos lineares, como as fontes de alimentação de rádios e televisores, passaram a utilizar dispositivos retificadores, intensificando a injeção de harmônicas no sistema elétrico.

2.5 DISPOSITIVOS RETIFICADORES

Um dispositivo retificador pode ser definido como aquele que permite o fluxo de corrente elétrica em um sentido, sendo capaz de bloquear a passagem de corrente no sentido contrário até um determinado valor de tensão. Dentre os principais dispositivos utilizados na retificação de potência, pode-se citar os diodos, os tiristores como o *SCR*, o *TRIAC*, e o *GTO*, além de transistores como *BJT*, *IGBT*, e o *MOSFET*. Com exceção do diodo, todos os demais são considerados dispositivos retificadores controlados, pois podem suportar uma determinada diferença de potencial também no sentido de condução [9].

Esses componentes são construídos a partir de elementos semicondutores, como o silício. Esse possui em sua última camada atômica quatro elétrons, onde, através de dopagem, podem ser atribuídas características específicas. Utilizando-se de um elemento pentavalente, se obtém um elétron livre, que possibilita a condução.

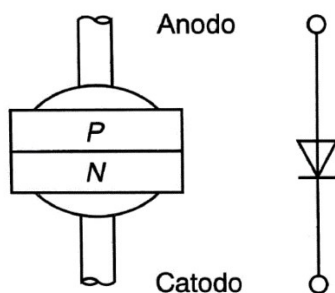
Por ser o elétron uma carga negativa dá-se o nome de semiconductor tipo N a essa estrutura. Porém, se a dopagem for através de um elemento trivalente, tem-se uma lacuna que pode receber elétrons. A essa estrutura dá-se o nome de semiconductor tipo P [9].

Uma característica que demanda atenção nos semicondutores é o coeficiente de temperatura da resistência de condução. Semicondutores como os diodos de potência, os *BJT*, e os *IGBTs* do tipo *PT* (*Punch Through*) possuem coeficiente de temperatura negativo, enquanto que os *MOSFETs* e *IGBTs* do tipo *NPT* (*Non Punch Throught*) possuem coeficiente de temperatura positivo. Semicondutores com coeficiente de temperatura positivo podem ser ligados em paralelo de forma simplificada [16].

2.5.1 Diodo

O diodo é basicamente a junção de uma estrutura tipo P com uma tipo N (Figura 2.17), onde os elétrons livres migram para as lacunas, criando uma barreira de potencial que se mantém em torno de 0,6V [9].

Figura 2.17: Estrutura e simbologia do diodo



Fonte: [9]

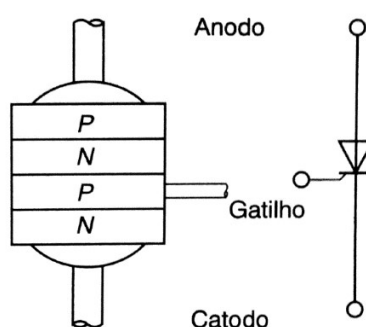
O terminal conectado ao material tipo P chama-se anodo, e o conectado ao tipo N de catodo. Quando a tensão positiva da fonte está conectada ao anodo e a negativa ao catodo, tem-se a polarização direta do diodo, que permite a passagem de corrente após vencida a barreira de potencial interna. Por outro lado, quando em polarização reversa com o positivo da fonte conectado ao catodo e o negativo ao anodo, o componente bloqueia a passagem de corrente até um determinado nível de

tensão. Alguns diodos são fabricados para trabalhar nessa região, conhecida como região de ruptura, como é o caso do diodo *zener* [9].

2.5.2 Tirístores

Os tirístores são estruturas formadas por quatro camadas, duas P e duas N intercaladas, sendo que uma das estruturas do tipo P é conectada a um terminal externo chamado de gatilho (Figura 2.18). Possui como principal característica o suporte a tensões e correntes elevadas, se comparado com os demais retificadores controlados [9].

Figura 2.18: Estrutura e simbologia do tiristor

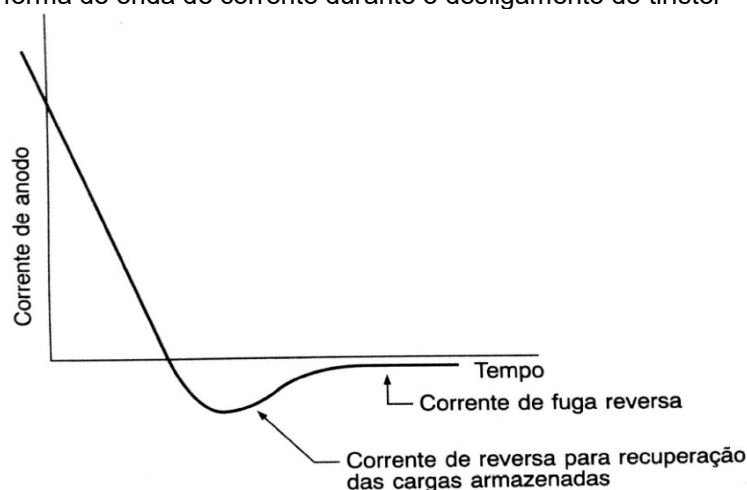


Fonte: [9]

Quando o gatilho está isolado ou sem fluxo de corrente, o componente se comporta como se fossem três diodos em série, de forma que a passagem de corrente fica bloqueada em ambos os sentidos. Porém, quando é injetada corrente no gatilho aumentam-se as lacunas da camada tipo P, aliando isso aos elétrons da camada tipo N, fazendo com que seja vencida a junção central, passando então a conduzir [9].

A corrente de gatilho não é mais necessária a partir do momento que o componente passa a condução, sendo mantida a passagem de corrente entre os terminais de potência até que a corrente atinja um valor abaixo da necessária para a manutenção da condução por um determinado tempo, voltando assim ao estado de bloqueio [9]. A Figura 2.19 apresenta a típica forma de onda de corrente durante o desligamento de um tiristor.

Figura 2.19: Típica forma de onda de corrente durante o desligamento do tiristor



Fonte: [9]

Os tiristores são dispositivos relativamente lentos, pois para iniciarem a condução podem levar de 1 a 5 μ s, e para entrarem em corte podem ser necessários em torno de 10 a 100 μ s. Essa condição característica acaba tornando o componente aplicável apenas para baixas frequências [5].

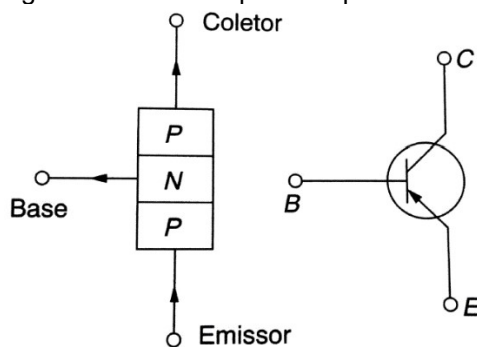
Os tiristores do tipo SCR podem trabalhar a frequências próximas à 100Hz [9].

Um ponto positivo é que seu rendimento em condução é bem elevado, sua queda de tensão interna é da ordem de 1,5V, e se mantém constante até mesmo para tensões mais elevadas, além de ser compacto e com um custo competitivo [17].

2.5.3 Transistor bipolar de potência

O transistor bipolar de potência (Figura 2.20) é um componente formado por três camadas, que podem ser PNP ou NPN, sendo que a primeira configuração se aplica ao controle de correntes positivas, e a segunda de negativas. Uma variação imposta na corrente de base resulta também em uma variação na corrente de coletor. Em média a corrente que circula pelo coletor é da ordem de 15 a 100 vezes a corrente de base. Por ser um componente controlado por corrente, seu circuito de controle se torna mais robusto e exige mais complexidade no projeto [9].

Figura 2.20: Estrutura e simbologia do transistor bipolar de potência



Fonte: [9]

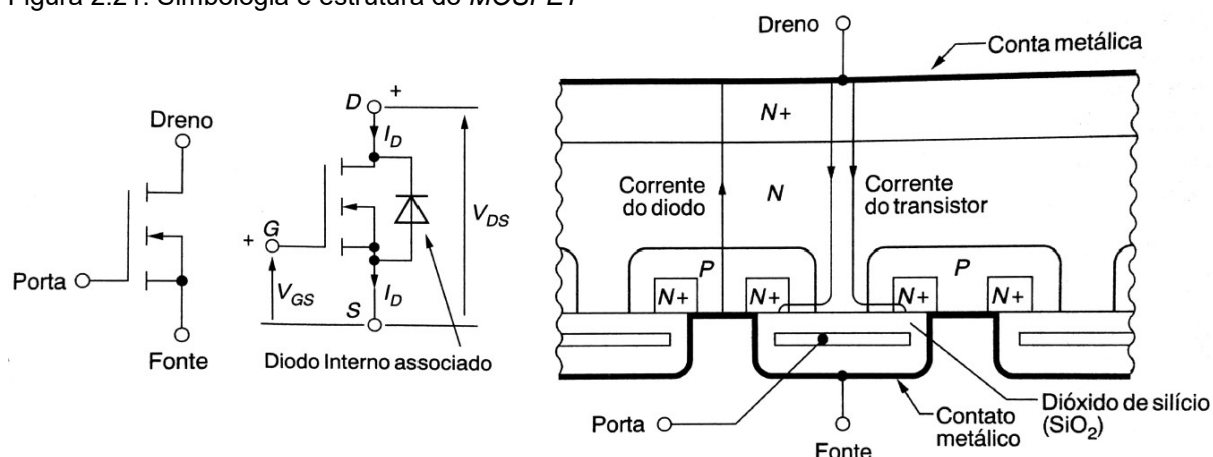
Quando aplicados a circuitos de potência eles são operados geralmente como chaves, ou seja, atuam nos estados de corte e de saturação. Na região de corte a passagem de corrente pelo coletor é bloqueada, já na região de saturação, a condução de corrente é levada a seu nível mais alto. Isso é importante por que se o componente trabalhar em regime de condução controlada, muita potência poderá se dissipar nele, ocasionando uma redução na eficiência do circuito e podendo provocar até a sua queima. Também é importante que a variação entre a região de corte e a de saturação seja realizada no menor tempo possível, pois quanto mais demorado for, maiores também vão ser as perdas sobre o componente. Essas perdas são chamadas de perdas por chaveamento, e tendem a aumentar na medida que a frequência entre corte e saturação também aumenta [9].

Se comparado com os tirístores, o transistor bipolar de potência apresenta uma velocidade de chaveamento muito maior, permanecendo normalmente abaixo de 1 μ s. Essa característica lhe permite trabalhar em circuitos que exijam uma maior frequência. Apesar disso, ele requer uma corrente de base maior, que pode chegar a 20 vezes mais que o necessário para disparar um tiristor, e essa corrente deve ser mantida durante a condução [9].

2.5.4 Transistor *MOSFET*

O transistor de efeito de campo de óxido de metal semicondutor (do inglês: *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor - MOSFET*) (Figura 2.21) de forma diferente do transistor bipolar, não é controlado por corrente, mas sim por tensão. Variando a tensão entre a porta e a fonte varia-se também a corrente entregue a carga pelo dreno [9].

Figura 2.21: Simbologia e estrutura do MOSFET



Fonte: [8]

Em circuitos de potência, o *MOSFET* é geralmente utilizado como chave, sendo sua principal vantagem a velocidade de chaveamento, que é muito elevada. Possui tempos de comutação muito inferiores a 1 μ s, o tornando muito útil para aplicações em alta frequência, podendo atingir 50kHz ou mais.

Este componente exige uma corrente muito pequena em sua porta, devido a sua alta impedância, porém, tensões acima de 20V entre a fonte e a porta podem danificá-lo, devido à fina camada de dióxido de silício que separa a porta do corpo do transistor [9].

Diferente do tiristor e do transistor bipolar, o *MOSFET* não apresenta uma queda de tensão interna, mas sim uma resistência. Essa resistência pode variar em função das tensões suportadas pelo componente, sendo maior para tensões mais elevadas. Operando como chave, o circuito de disparo deve fornecer à porta uma tensão que o coloca diretamente na região de saturação, e para o corte a tensão entre a porta e a fonte deve ser levada a zero [9].

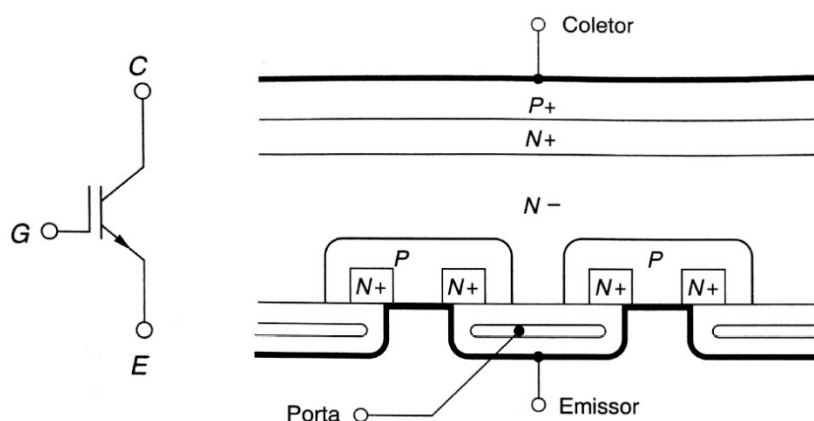
Uma característica do *MOSFET* que pode ser muito útil, é o fato de que ele apresenta intrinsecamente ao seu corpo um diodo reverso, que pode permitir a passagem de corrente reversa entre dreno e fonte [9].

2.5.5 Transistor bipolar de porta isolada – IGBT

O transistor bipolar de porta isolada (do inglês: *Insulated Gate Bipolar Transistor* - IGBT) (Figura 2.22) pode ser comparado com um transistor bipolar acionado por um *MOSFET*. Ele possui as características do *MOSFET*, como controle

por tensão e alta velocidade de chaveamento, aliada com a elevada capacidade de suporte de corrente e tensão do transistor bipolar de potência. Operando como chave, seu tempo de disparo fica na casa de 0,15us, enquanto seu corte leva em média 1us, podendo operar a frequências próximas de 20kHz [9].

Figura 2.22: Simbologia e estrutura do *IGBT*



Fonte: [8]

Assim como o transistor bipolar, o *IGBT* também provoca uma queda de tensão interna durante a condução, porém um pouco superior. As capacidades de suporte de corrente e tensão são similares.

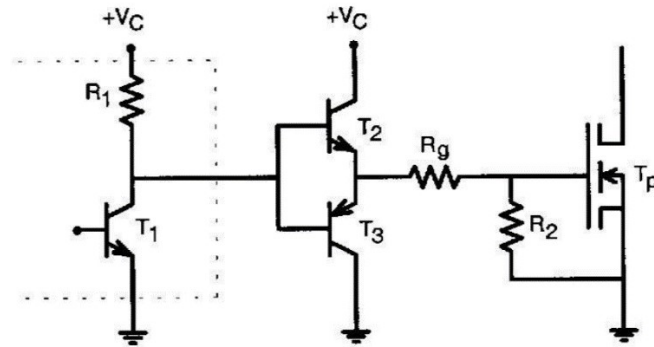
Quando o uso de um *IGBT* for para acionamento de uma carga indutiva, como um motor, devem ser previstos diodos ultrarápidos e com baixa corrente de fuga em paralelo com o componente, para sua proteção [18].

2.6 CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO *MOSFET*

Como a impedância de porta do *MOSFET* é elevada, a corrente necessária para o acionamento é muito baixa. Para o corte também não é necessária uma polarização reversa, apenas deve se levar a zero a diferença de potencial entre a porta e a fonte. Como a porta e fonte são separados por uma fina camada de dióxido de silício, ali é gerada uma capacitância. Os tempos de saturação e corte são relativos a carga e descarga desse capacitor de porta [19].

A Figura 2.23 apresenta uma opção de circuito comumente utilizado para o acionamento de *MOSFET*.

Figura 2.23: Circuito de acionamento de porta do MOSFET



Fonte: [19]

Quando o componente é aplicado para operar como chave deve ser fixada a tensão de gatilho a um valor alto o suficiente para levar a corrente de dreno acima da corrente de carga, fazendo com que o componente opere sempre com resistência constante. A tensão entre a porta e fonte não deve exceder o valor máximo aproximado de 20V.

A capacitância de entrada pode ser calculada através da Equação (2.7).

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad \text{Equação (2.7)}$$

O valor da corrente necessária para carregar o capacitor de porta em função do tempo e da tensão é obtido pela Equação (2.8).

$$I_g = C_{iss} \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \quad \text{Equação (2.8)}$$

Essa mesma corrente também pode ser exigida quando o componente vai para a região de corte, no momento em que o capacitor de porta é descarregado.

O tempo de comutação pode ser ajustado através de um resistor de porta, dado pela Equação (2.9).

$$R_g = \frac{T_f}{2,2C_{iss}} \quad \text{Equação (2.9)}$$

Devido à características de porta do *MOSFET* e do *IGBT* serem similares, sendo que ambos são controlados por tensão, os circuitos mencionados podem ser empregados para o acionamento desses dois tipos de dispositivos [19].

2.7 CIRCUITO DE AMORTECIMENTO - *SNUBBER*

Quando a carga alimentada é indutiva e ocorre a interrupção da corrente de saída, é provocada uma força contra-eletromotriz sobre a chave eletrônica, que pode ser danificada por sobretensão nesse instante [3].

Para resolver esse problema podem ser utilizados componentes que suportem a sobretensão gerada, ou então ser aplicado um amortecedor – *snubber*, em paralelo com a chave. O *snubber* é um circuito que dispõe de um caminho paralelo a chave, permitindo que corrente indutiva gerada na abertura, seja desviada e dissipada [3]. Existem várias configurações de circuitos *snubber*, sendo mais comuns os tipos RC (resistor e capacitor) e RCD (resistor, capacitor e diodo).

Para o caso de aplicação do circuito tipo RC, a capacitância mínima necessária pode ser calculada através da Equação (2.10), sendo relativa a indutância parasita, a corrente da carga e da tensão de alimentação.

$$C_s \geq L_s \cdot \left(\frac{I}{V_{CC}} \right)^2 \quad \text{Equação (2.10)}$$

O resistor em série com o capacitor serve para limitar a corrente de carga e descarga, e pode ser calculado através da Equação (2.11), sendo seu valor relativo a tensão de alimentação e a corrente da carga.

$$R_s = 1,3 \cdot \frac{V_{CC}}{I} \quad \text{Equação (2.11)}$$

E a potência dissipada no resistor, pode ser calculada através da Equação (2.12), sendo ela relativa ao valor do capacitor, da tensão de alimentação e da frequência em que ocorre o chaveamento do interruptor.

$$P_{Rs} = C_s \cdot V_{CC}^2 \cdot f \quad \text{Equação (2.12)}$$

Quanto maior for indutância parasita apresentada pelo circuito, maior será o valor do capacitor mínimo necessário, e maior será a potência dissipada no resistor.

2.8 OPERAÇÃO DOS RETIFICADORES

Os componentes semicondutores de potência funcionam como chaves com polaridade de tensão e corrente definidas. Sendo assim, sempre que se deseja usar algum componente específico para operação em um quadrante de polaridade ao qual ele não está apto a operar por questões intrínsecas, deve ser realizado algum tipo de arranjo no circuito que permita com que ele trabalhe da forma desejada.

A Figura 2.24 apresenta os quadrantes e as características de tensão e corrente para operação em cada um deles.

Figura 2.24: Quadrantes de operação de semicondutores



Fonte: [20], adaptado pelo autor (2018)

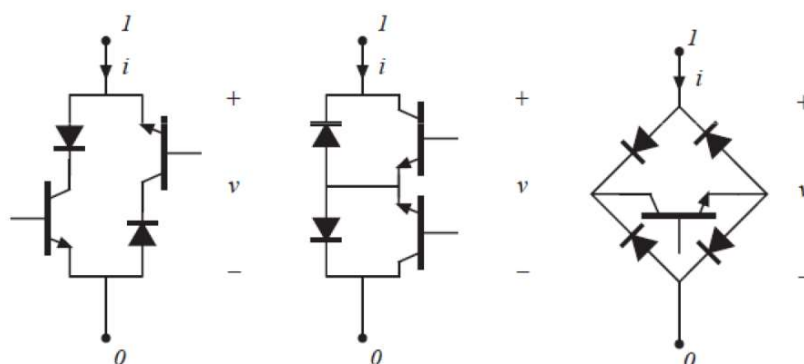
Dentre os arranjos possíveis para aplicação dos retificadores, nos itens de a até d, cita-se alguns que permitem a operação em relação aos quadrantes de tensão e corrente [20].

- Operação em um quadrante: Diodo operando com bloqueio reverso, *SCR* com bloqueio direto, transistor bipolar e *IGBT*.
- Operação em dois quadrantes com corrente bidirecional: *SCR*, *IGBT* e transistor bipolar, todos com um diodo em anti-paralelo, e o *MOSFET* (já possui intrínseco ao seu corpo um diodo em anti-paralelo).
- Operação em dois quadrantes com tensão bidirecional: *SCR* com bloqueio direto e reverso, e transistor bipolar com diodo em série.

- d) Operação nos quatro quadrantes com tensão e corrente bidirecional: circuito formado por um arranjo de diodos e transistores bipolares.

A Figura 2.25 apresenta alguns dos arranjos possíveis com o uso de diodos, que permitem a utilização de transistores nos quatro quadrantes.

Figura 2.25: Topologias para operação de transistores nos quatro quadrantes



Fonte: [20]

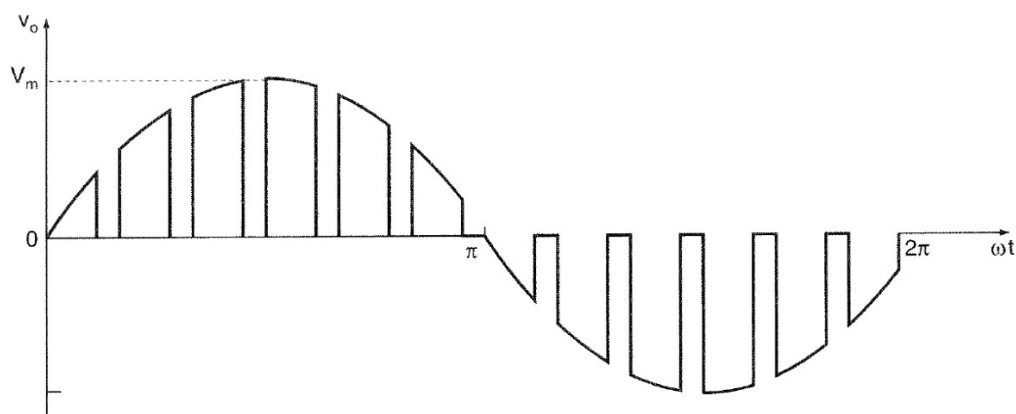
Para se trabalhar em corrente alternada, devem ser utilizadas topologias que permitam a operação dos transistores nos quatro quadrantes, ou seja com ambas as polaridades de tensão e de fluxo de corrente.

2.9 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO – PWM

Na operação de equipamentos não lineares, como a *soft-starter*, em que o controle ocorre pela variação do ângulo de disparo com apenas um pulso por semiciclo da corrente de entrada, tem-se como resultado a geração de harmônicas de baixa ordem, como a terceira, e essas correntes harmônicas são as mais difíceis de serem filtradas [4].

Com a utilização da modulação por largura de pulso (do inglês: *pulse width modulation* – PWM) consegue-se realizar vários pulsos dentro de um mesmo semiciclo de corrente através do chaveamento dos semicondutores (Figura 2.26), e assim eliminando ou reduzindo a geração de harmônicas de baixa ordem. Em contrapartida, na medida que a frequência de chaveamento se eleva, se tem um aumento na geração de harmônicas de ordem superior, porém, essas harmônicas podem ser facilmente filtradas [3].

Figura 2.26: Forma de onda de tensão com *PWM* em corrente alternada



Fonte: [3]

Através da variação da largura dos pulsos pode-se controlar a tensão entregue a carga. A largura máxima de cada pulso, com p pulsos iguais por semiciclo, será de π/p . De acordo com a escolha da largura dos pulsos, certas harmônicas podem ser eliminadas. Com quatro pulsos por semiciclo a menor ordem harmônica apresentada é a quinta, já com seis pulsos, a harmônica de ordem mais baixa é a sétima [3].

2.10 MICROCONTROLADORES

Os microcontroladores são dispositivos utilizados para o controle de circuitos, e que podem ser programados de forma específica para cada aplicação. Sua estrutura interna apresenta processador, memória e periféricos de entradas e saídas. Como geralmente são encontrados dentro de outros equipamentos, são conhecidos como controladores embutidos. Eles operam com frequências de *clock* de poucos MHz, sendo bem inferiores aos valores em GHz encontrados nos processadores atuais. Porém, a maioria das aplicações comuns é adequada como controle de sensores e equipamentos domésticos [22].

2.10.1 Microcontroladores *dsPIC30F*[®]

Os *dsPIC30F*[®] são uma família de controladores de sinais digitais produzidos pela *Microchip*[®], que combinam características de um microcontrolador tradicional de 16 *bits*, com um processador digital de sinais (*DSP*). Possui uma alta velocidade e

capacidade de processamento, e possibilidade de aplicação em ambientes agressivos, devido a sua robustez e suporte a temperaturas elevadas, como as encontradas em indústrias e veículos [23].

Dentre as características mais relevantes encontradas nessa família de microcontroladores, pode-se citar os itens de a até j:

- a) Faixa de operação entre 2,5 a 5,5Vcc.
- b) Até 64 pinos, com grande quantidade de entradas e saídas.
- c) Temporizadores programáveis de 16 *bits*.
- d) Entradas e saídas com suporte a correntes de até 25mA.
- e) Oferece de 6 a 8 saídas de controle *PWM*.
- f) Conversor analógico-digital de 12 *bits*.
- g) Comunicações embarcadas, como *CAN*, *UART* e *I²C*.
- h) Pode operar a temperaturas de até 125°C.
- i) Capacidade de processamento digital de sinais.
- j) Alta confiabilidade.

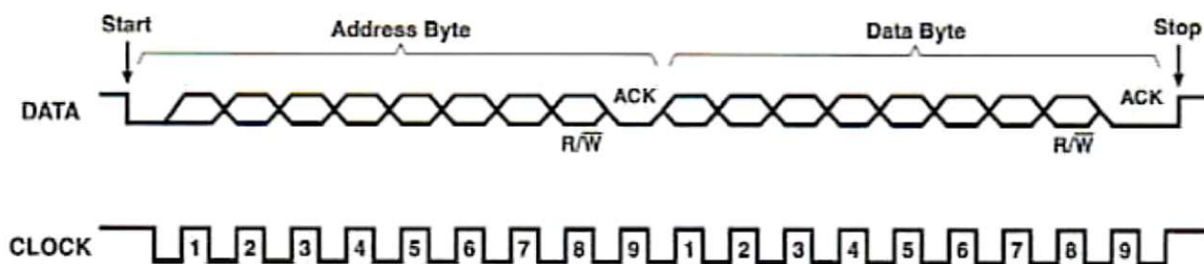
Essa família de microcontroladores também apresenta uma otimização no seu conjunto de instruções para a utilização de compiladores de linguagem C, característica que pode melhorar, e também facilitar o processo de programação. Ademais, as opções presentes de comunicação embarcada, como a serial *I²C*, se torna bastante útil para simplificar a conexão de periféricos [23].

2.10.2 Comunicação serial *I²C*

O *I²C* (*Inter-Integrated Circuit*) é uma tecnologia de barramento serial desenvolvida pela *Philips*[®], utilizado para conectar periféricos em baixa velocidade.

O uso dessa tecnologia simplifica a ligação entre dispositivos, pois utiliza apenas dois pinos para a comunicação. O pino *SCL* (*Serial Clock*) é responsável por gerar um sinal de *clock*, servindo como temporizador entre os dispositivos e gerando maior confiabilidade de comunicação do pino *SDA* (*Serial Data*), que é o que realiza efetivamente a transferência de dados [26]. O diagrama temporal da transferência de dados é exibido na Figura 2.27.

Figura 2.27: Diagrama temporal da transferência de dados I²C



Fonte: [26]

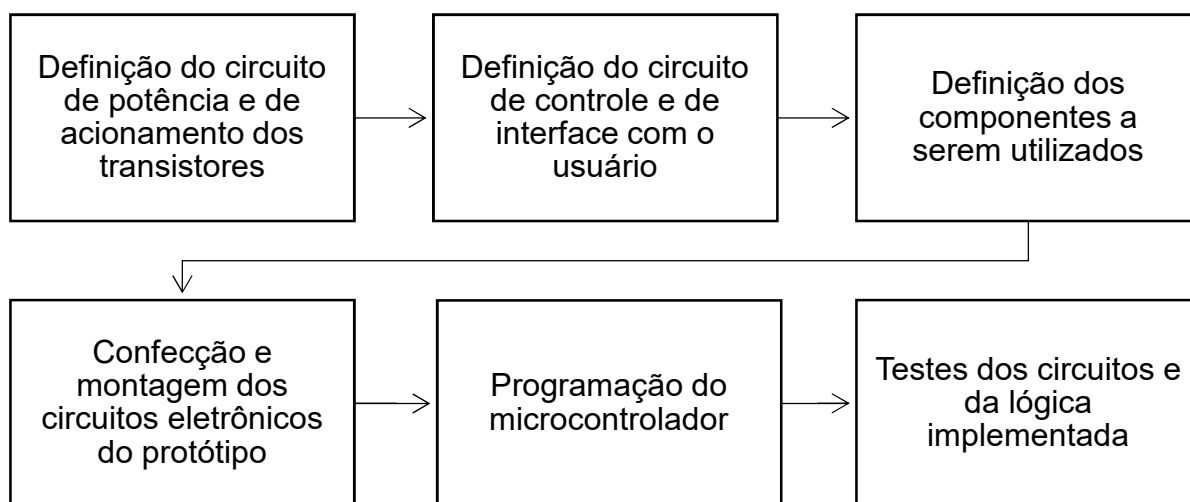
A comunicação é do tipo mestre-escravo, onde o mestre envia uma informação para o endereço do escravo, e aguarda resposta. Também é possível somente enviar informação ao escravo, sem esperar resposta.

Nesse sistema, podem ser conectados vários dispositivos em paralelo, sendo apenas que eles estejam configurados em endereços diferentes.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do protótipo, seguiu-se conforme o fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1: Fluxograma metodológico



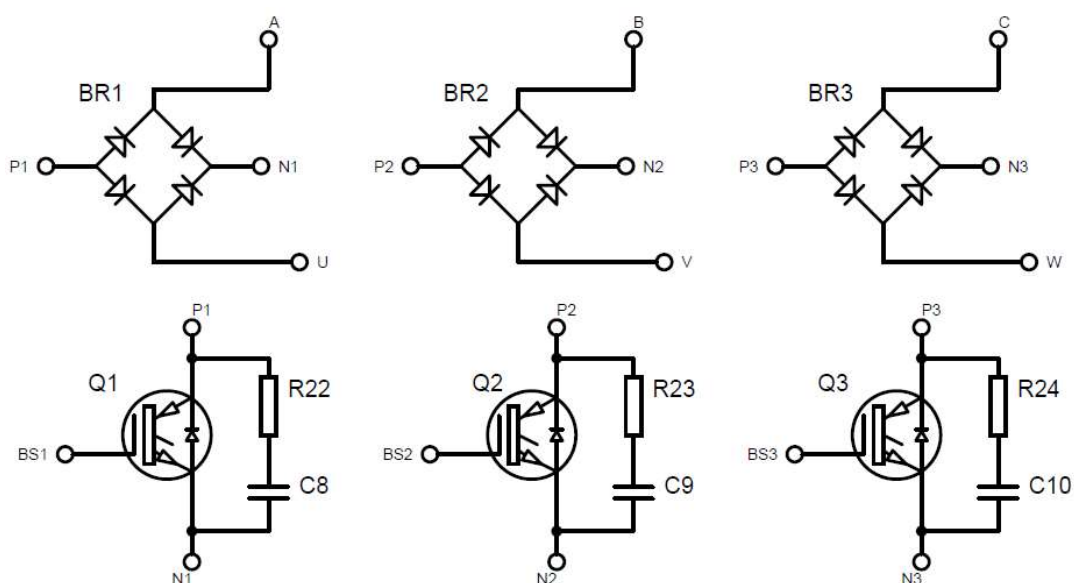
Fonte: Do Autor

Para realizar os desenhos dos circuitos utilizados neste trabalho, assim como algumas simulações, utilizou-se o *software* de simulação *Proteus®* da *Labcenter Electronics®*.

3.1 CIRCUITO DE POTÊNCIA

Na pesquisa bibliográfica realizada, abordou-se três diferentes métodos de aplicação de transistores em corrente alternada, sendo que em função do número de componentes a serem utilizados e, a princípio, maior simplicidade de montagem, optou-se por utilizar o método com quatro diodos e um transistor por fase.

Como circuito de amortecimento (*snubber*), utilizou-se um arranjo de capacitor e resistor, formando um circuito RC, aplicados sobre os transistores. O arranjo dos componentes pode ser visto na Figura 3.2.

Figura 3.2: Circuito de potência projetado para a *soft-starter*

Fonte: Do Autor

Para dimensionar os componentes de potência, se utilizou do método de máxima corrente. Através da consulta da plaqueta de identificação do motor (Figura 3.3) a ser utilizado, com 0,25 CV de potência, se obteve o valor de corrente nominal como sendo de 1,14A, na tensão de 220V.

Figura 3.3: Plaqueta de identificação do motor utilizado

WEG		CE	
NBR.7094			
3~63		10FEV04 GK58514	
MOTOR INDUÇÃO - GAIOLA		INDUCTION MOTOR-SQUIRREL CAGE	
Hz		60	CAT N
kW(HP-cv) 0.18(0.25)		RPM 1710	
IS	1.15	ISOL	B Δ
INSUL	B Δ	K	I _p /I _n 4.5
220/380 V		1.14/0.660 A	
REG DUTY S1		MAX AMB 40°C ALT 1000 m	
REND.% 64.0		COS Φ 0.65	

Fonte: Do Autor

Levando em consideração o fator de serviço desse motor que é de 1,15 e tendo como referência a *soft-starter* modelo SSW-07® do mesmo fabricante do motor, que suporta em sua partida correntes de até 3 vezes a nominal durante 30

segundos [10], chega-se ao valor de corrente que o equipamento projetado deve suportar como sendo de até 3,93A.

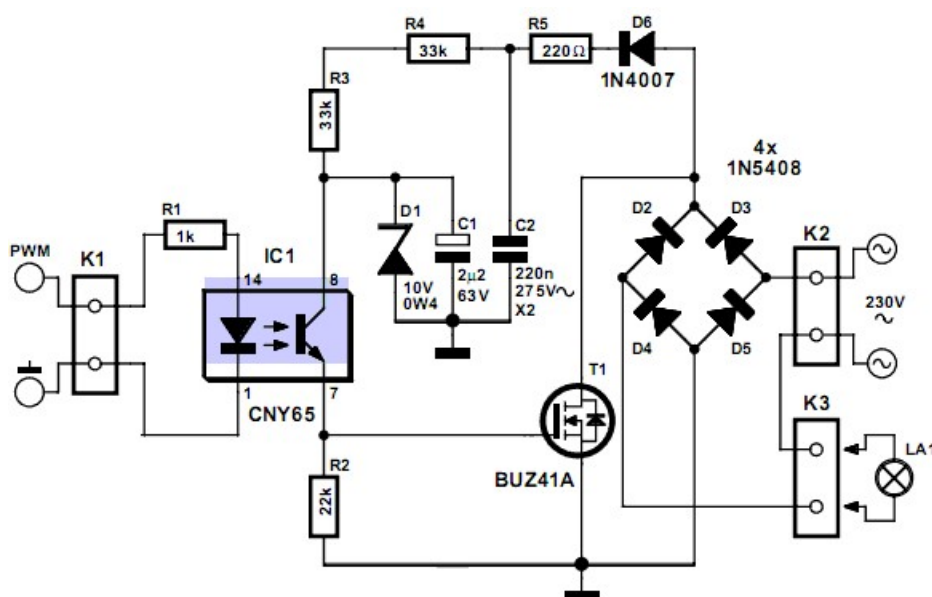
Como a opção foi utilizar transistores de potência do tipo *IGBT*, e tendo em vista a corrente projetada, optou-se pelo modelo *FGA25N120ANTD*, pois possui um custo reduzido, e segundo seu *datasheet* suporta correntes de até 50A e tensão de 1200V, características que atendem com folga ao projeto.

O mesmo valor de corrente calculado para os transistores, também deve ser suportado pelos diodos a serem utilizados. Diante disso, e devido ao menor custo, optou-se por utilizar uma ponte retificadora ao invés de quatro diodos individuais, sendo selecionada o modelo *KBPC3510*, que suporta correntes de até 35A e tensão de 1000V, atendendo também com folga ao projeto.

3.1.1 Circuito de acionamento dos *IGBT*'s

Os *IGBT*'s, assim como os *MOSFET*'s, são dispositivos controlados pela tensão presente entre a porta e o emissor, devendo essa tensão se manter acima do valor mínimo indicado pelo fabricante durante a condução em estado de saturação. Essa condição é simples de obter quando em corrente contínua, porém, no caso deste trabalho em que se utiliza corrente alternada, passa a ser um pouco mais complexo, exigindo um circuito que retifique e regule a tensão de porta do *IGBT*.

Figura 3.4: Circuito com *MOSFET* aplicado em corrente alternada



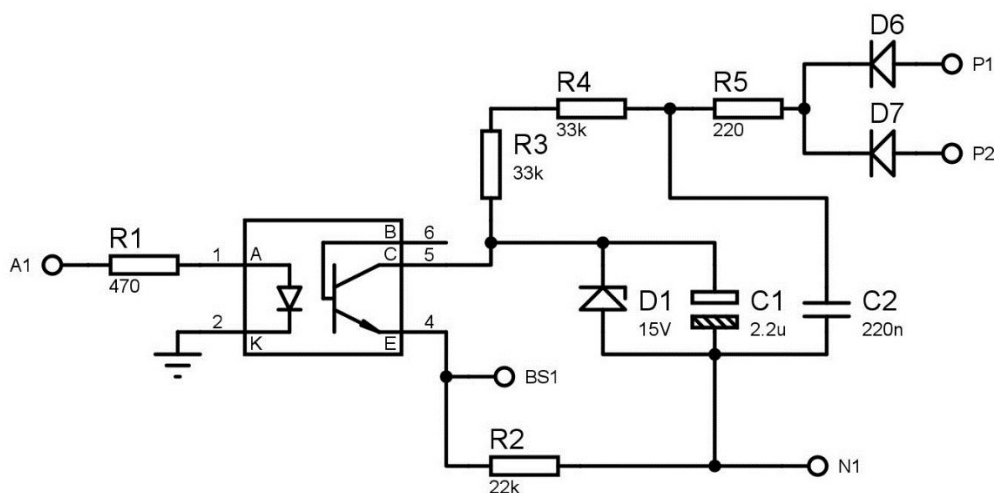
Fonte: [25]

Uma opção encontrada é a apresentada na Figura 3.4, que sugere um circuito para acionamento de *MOSFET's* em corrente alternada, para uso como variador de intensidade luminosa em lâmpadas incandescentes.

Nesse circuito o diodo D6, o resistor R5 e o capacitor C2 formam um retificador. O resistor R5 limita os pulsos de corrente no diodo D6 em aproximadamente 1,5A. A tensão no capacitor C2 é regulada em 10V pelos resistores R3 e R4, capacitor C1 e diodo *zener* D1. O opto-acoplador IC1 e o resistor R2 são utilizados para a condução do *gate* do *MOSFET* [25]. Porém, além de ser monofásico, o circuito apresentado possui o limitante de poder ser aplicado apenas em sinal *PWM*, com *duty-cycle* máximo de 88% [25]. Acima disso, devido à baixa tensão encontrada sobre o transistor T1, começa a ocorrer queda de tensão no circuito de acionamento, reduzindo-a para menos de 10V e retirando o componente da operação em regime de saturação, o que acaba causando variações na tensão de saída.

Como o circuito em que a *soft-starter* será aplicada trata-se de um sistema trifásico e com transistores do tipo *IGBT*, com base no circuito anterior, foram realizadas alterações após algumas simulações utilizando o *software Proteus®*, as quais devem suprir as deficiências encontradas. O diodo *zener* de 10V foi substituído por um de 15V, satisfazendo o exigido pelo transistor do tipo *IGBT* que será aplicado. Também houve a adição de mais um diodo na retificação, sendo esse conectado a outra fase, que deve manter, mesmo com o componente saturado, a tensão de porta em 15V, conforme circuito da Figura 3.5.

Figura 3.5: Circuito de acionamento do *IGBT* da fase A



Fonte: Do Autor

Outros componentes, como os capacitores, também sofreram alterações de modelo ou tensão suportada, porém, os valores nominais e as características específicas foram mantidas.

3.2 CIRCUITO DE CONTROLE

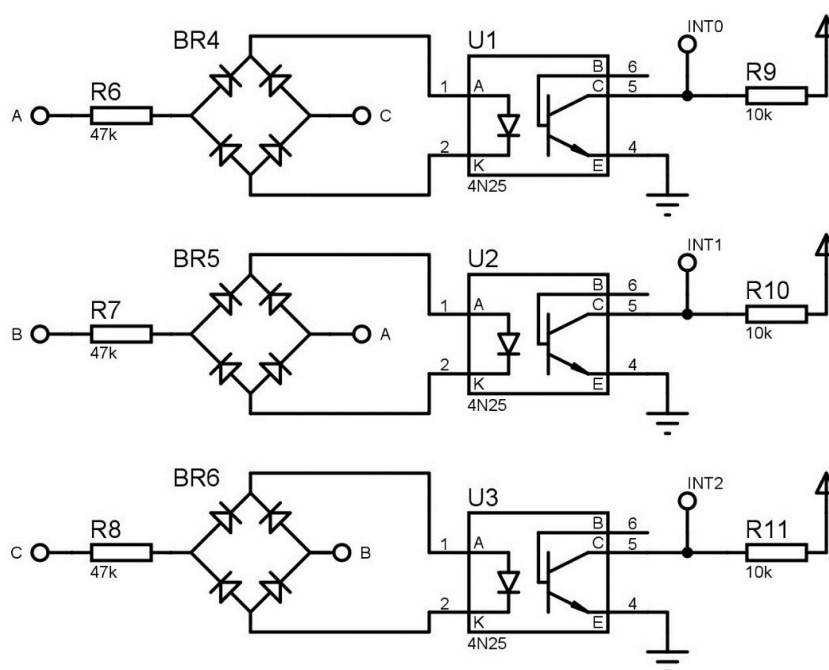
Definiu-se duas formas de controle para a *soft-starter*, sendo uma por variação angular e outra por *PWM*.

3.2.1 Controle por variação angular - Identificação do instante de tensão zero

Para se realizar o controle de disparo por variação angular, primeiramente necessita-se identificar em qual ângulo a tensão está, e para isso utilizou-se um circuito que permite identificar o momento em que o ângulo das fases é zero ou 180 graus. Esses ângulos são os quais ocorrem a inversão do sentido da corrente, sendo que a tensão nesse instante é igual a zero.

Para essa identificação, foi utilizado o circuito da Figura 3.6, composto por ponte retificadora, resistores e opto-acoplador.

Figura 3.6: Circuito de identificação de passagem por zero da onda de tensão



Fonte: Do Autor

Esse circuito gera um pulso de tensão positiva com duração de alguns microssegundos sempre que a tensão entre as fases for zero, permitindo então ao microcontrolador identificar e, a partir daí, definir o momento de disparar os transistores.

Tendo em vista que em uma rede elétrica de frequência 60Hz a duração de cada ciclo é de aproximadamente 16,666 milissegundos, e para meia onda 8,333 milissegundos, cada grau então equivale ao tempo aproximado de 46,294 microssegundos.

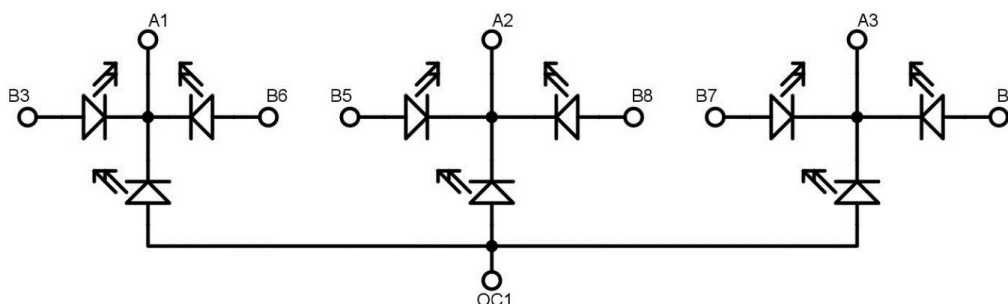
Após a identificação da passagem por zero, o microcontrolador deve contar o tempo relativo ao ângulo de disparo e então acionar as saídas respectivas a cada transistor.

3.2.2 Portas de saída de controle do microcontrolador

Para acionar os transistores foram utilizadas sete portas do microcontrolador, sendo seis para o controle por variação angular e uma para o *PWM*.

Como as portas são acionadas em momentos diferentes, não podem ser ligadas diretamente uma à outra. Então, para contornar essa situação, utilizou-se diodos emissores de luz – *LED* em série com cada saída, que impedem o fluxo de corrente para os pinos de saída do microcontrolador quando esses estão em níveis de tensão diferentes, e também servem para auxiliar o usuário na identificação visual das saídas ativas (Figura 3.7).

Figura 3.7: Circuito de separação das saídas de controle



Fonte: Do Autor

Esse circuito acaba gerando uma queda de tensão nos *LEDs*, entretanto, isso não interfere no funcionamento de forma significativa, pois a corrente de saída

também deve ser limitada, onde já são utilizados resistores em série com os opto-acopladores.

3.3 INTERFACE

Para controlar a *soft-starter* optou-se por utilizar o microcontrolador *dsPIC30F4013*[®] da *Microchip*[®], operando com frequência de *clock* de 20 MHz.

Para facilitar a configuração e a leitura de *status*, optou-se por adicionar alguns componentes complementares ao projeto, como um *LCD* e botões para entrada de dados.

3.3.1 Interface com *LCD*

De maneira a facilitar a programação da *soft-starter*, optou-se por utilizar um *display* de cristal líquido – *LCD* (Figura 3.8) de 16 linhas por 2 colunas (16x2), onde o usuário pode visualizar os tempos da rampa de partida e parada ao configurar, assim como a tensão inicial e a forma que se realizará o controle, se por variação angular ou por *PWM*.

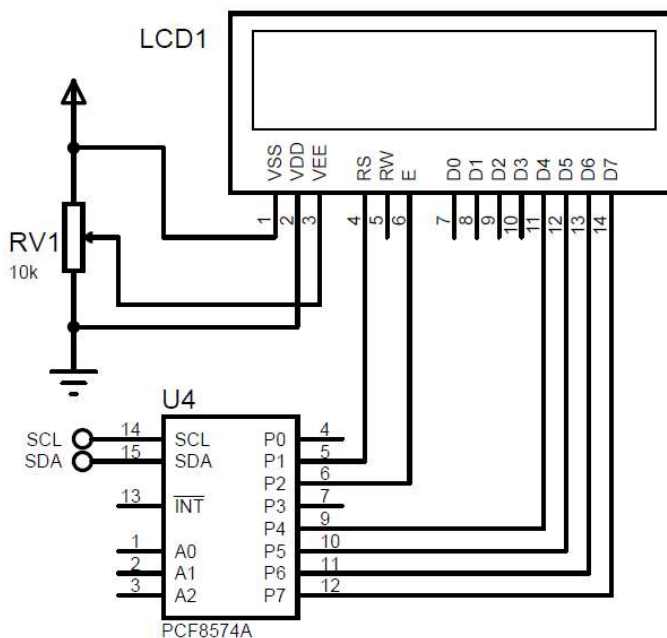
Figura 3.8: *LCD* 16x2 com módulo de comunicação serial I₂C incorporado



Fonte: [24]

Para a comunicação entre o microcontrolador e o *LCD* optou-se por utilizar a serial I²C.

Figura 3.9: Circuito básico do display *LCD* com módulo de comunicação I²C



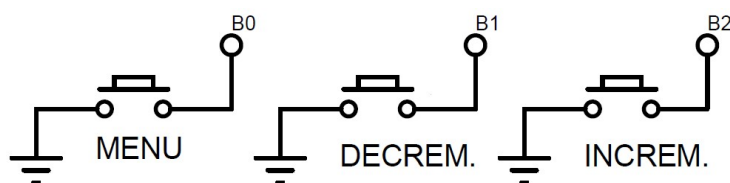
Fonte: Do Autor

O microcontrolador oferece essa opção nativa, já para o *display* é necessário um módulo adicional, que deve ser acoplado ao mesmo (Figura 3.9).

3.3.2 Interface com botões para entrada de dados

Como entrada de dados e configuração, foram adicionados três botões, sendo basicamente um para acesso aos menus, outro para decremento e um terceiro de incremento de valores, conforme Figura 3.10.

Figura 3.10: Circuito de entrada dos botões



Fonte: Do Autor

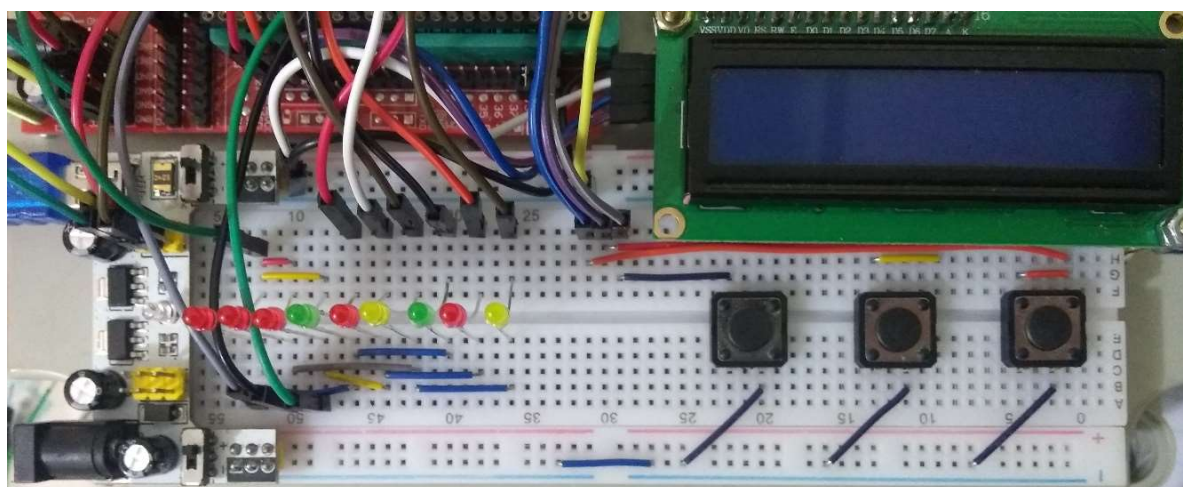
Como o microcontrolador utilizado possui internamente resistores de *pull-up* nas portas utilizadas pelos botões, optou-se por usá-los ao invés de adicionar resistores externos para essa função. Nessa configuração basta apenas definir no programa os *bits* internos respectivos a cada porta utilizada.

3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento e impressão das placas de circuito impresso, utilizou-se o software *Eagle® PCB Design Software*, da *Autodesk®*. Foram confeccionadas duas placas, sendo uma do circuito de potência e outra para controle, que realiza a leitura do instante em que a tensão é zero entre as fases.

Também foi utilizada uma *protoboard* (Figura 3.11), na qual foram instalados os botões de entrada de dados e o circuito de separação das saídas do microcontrolador e sinalização visual.

Figura 3.11: *Protoboard* com botões, *LCD* e circuitos de controle



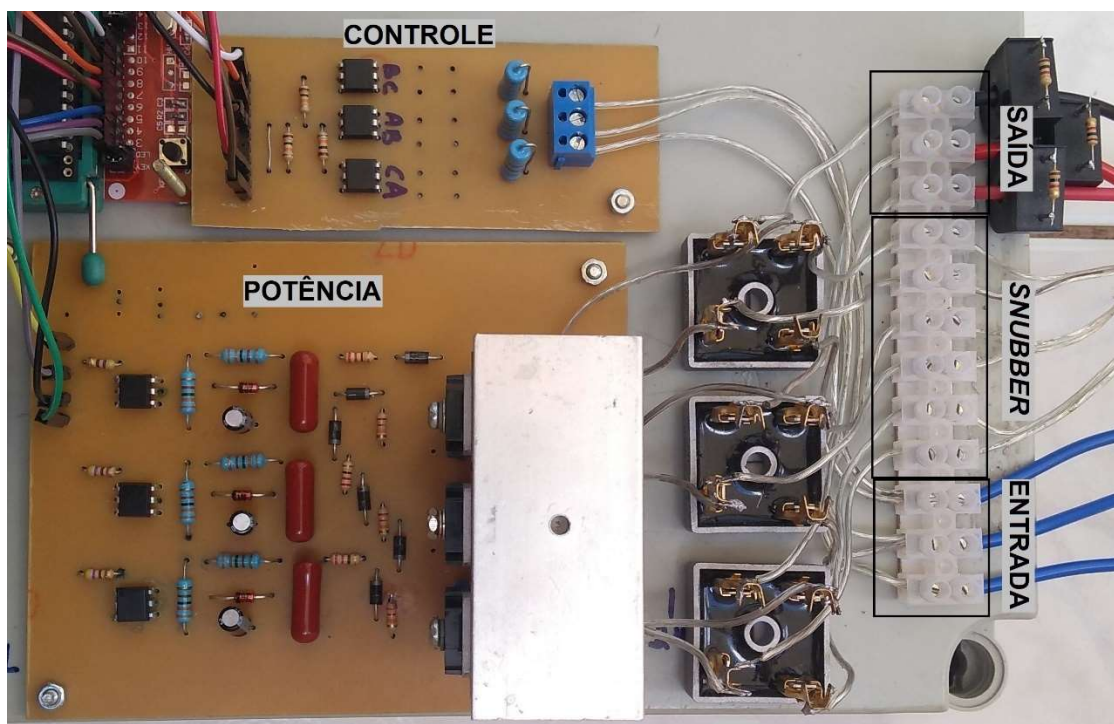
Fonte: Do Autor

Para a alimentação dos circuitos de controle, optou-se por utilizar uma fonte externa, que deve fornecer a tensão de 5Vcc aos componentes.

3.4.1 Placas de potência e de controle - instante de tensão zero

As placas com os componentes já soldados podem ser vistas na Figura 3.12.

Figura 3.12: Placas de potência e controle



Fonte: Do Autor

A placa de potência contém os *IGBTs* e os seus circuitos de polarização de base. Ela também contém opto-acopladores que isolam os sinais do microcontrolador com os de potência. Para simplificar e também facilitar a montagem, optou-se por deixar as pontes de diodos externas a placa, assim como o circuito de amortecimento (*snubber*) e as conexões de entrada e saída de potência.

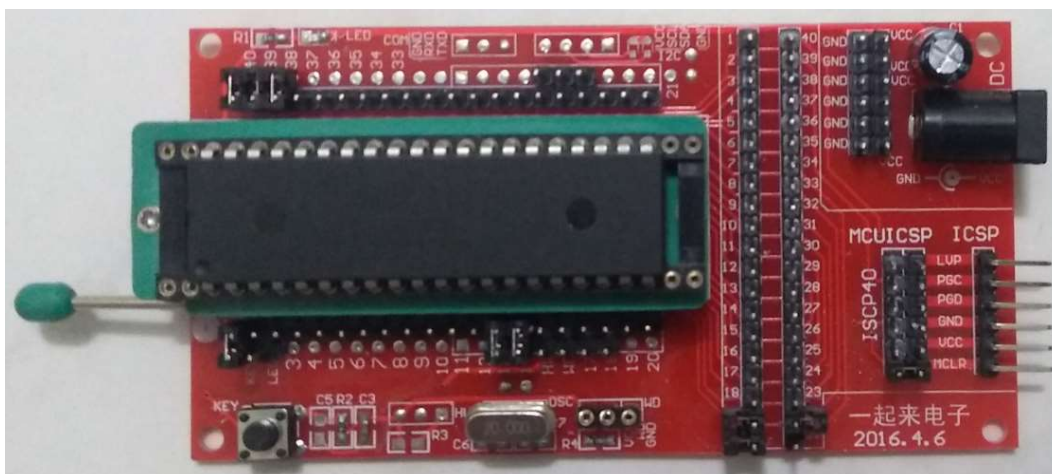
Para a identificação do instante em que a tensão entre as fases é zero, foi construída uma placa contendo basicamente o circuito da Figura 3.6.

Conforme o controle implementado, no modo *PWM* não é realizada a leitura da passagem por zero da tensão, portanto essa placa não é necessária para esse modo de operação.

3.4.2 Placa de desenvolvimento para o microcontrolador

Para aplicação do microcontrolador, optou-se por utilizar uma placa de desenvolvimento própria (Figura 3.13), sendo que ela já possui de forma integrada todas as conexões dos pinos de entradas e saídas, e também do cristal de *clock*.

Figura 3.13: Placa de desenvolvimento com o microcontrolador inserido



Fonte: Do Autor

Devido ao caráter de protótipo do projeto, e para o caso de necessidade de ajustes durante o desenvolvimento, não foi construída uma placa específica para o microcontrolador.

A lista com os materiais utilizados e o seu respectivo orçamento de custo encontra-se no Apêndice C.

3.5 LÓGICA DE CONTROLE

Como ambiente de desenvolvimento do programa para o microcontrolador, utilizou-se o pacote de *software PCWHD IDE compiler* da CCS®, com compilador C otimizado. Na versão de demonstração, o *software* permite ter acesso a todas as funções pelo período de 45 dias.

O código completo do programa desenvolvido pode ser encontrado no Apêndice E.

3.5.1 Variáveis

Durante a programação foram utilizadas algumas variáveis, sendo elas apresentadas a seguir:

```

unsigned int16 PWM = 0;
unsigned char menu = 1;
unsigned int16 saida_on = 0;
unsigned int16 conta_tempo = 0;
unsigned int16 ciclos_tempo = 1;
unsigned int16 tensao_inicio = 3;
unsigned int16 rampa_partida = 0;
unsigned int16 rampa_parada = 0;
unsigned char tensao_inicial = 30;
unsigned char tempo_partida = 5;
unsigned char tempo_parada = 5;
int16 modo_opera = 0;
unsigned char operacao = 1;
int16 imprimir_lcd = 0;

```

Os tipos das variáveis foram definidos em função dos valores que elas podem assumir, minimizando o espaço utilizado na memória do microcontrolador.

3.5.2 LCD

Para controle do *LCD*, utilizou-se uma biblioteca de instruções própria para essa finalidade, a *lcd_i2c.h*. As configurações utilizadas na comunicação serial I²C do microcontrolador, que será o mestre, e a definição da biblioteca para controle do *LCD*, são realizadas através do código a seguir:

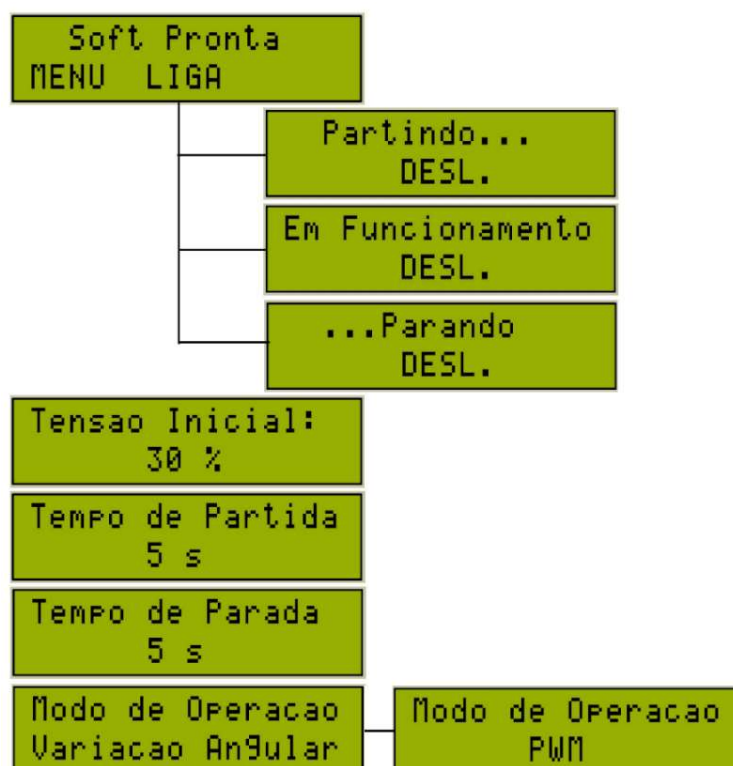
```

#use i2c(MASTER, I2C1, FAST, stream=I2C_PORT1)
#include <lcd_i2c.h>

```

De maneira a melhor organizar as configurações, elas foram divididas em algumas telas do display, sendo necessária a navegação entre elas para selecionar e alterar parâmetros. A estrutura segue a sequência da Figura 3.14, e pode ser alterada com o pressionar do botão menu.

Figura 3.14: Estrutura de menus e telas do LCD



Fonte: Do Autor

Em cada tela, o valor da variável selecionada pode ser alterado com o pressionar dos botões de incremento e de decremento. Na tela inicial, o botão de decremento alterna entre a partida e parada da *soft-starter*.

3.5.3 Lógica de controle

Quando a *soft-starter* está com o *status: em funcionamento*, após finalizada a rampa de partida, as saídas respectivas ao modo de operação *PWM* ou variação angular permanecem constantes em nível alto. E quando desligada, no *status: soft pronta*, elas permanecem em nível baixo.

O modo de operação *PWM* apresenta uma lógica de operação menor que a de variação angular por não depender da identificação do instante de tensão zero entre as fases.

No Apêndice D é apresentado um fluxograma básico contendo as principais etapas executadas no microcontrolador através do algoritmo desenvolvido.

3.5.4 Lógica da rampa de partida

Para o controle da rampa de partida pode ser selecionado o tempo em que ela será realizada, que varia de 1 a 60 segundos. Já a tensão inicial pode variar de 30 a 70% da tensão de rede, configurável com incrementos de 10%. Essa configuração é aplicada para ambos os modos de operação: *PWM* e variação angular.

Para ambos os modos também, o código referente à rampa de partida é executado a cada 0,2 segundos, através da interrupção gerada por um dos temporizadores internos do microcontrolador.

3.5.4.1 Lógica da rampa de partida no modo de variação angular

A seguir, mostra-se o código implementado para realizar a rampa de partida no modo de variação angular:

```
if(operacao == 2) {
    if(saida_on < 3465){
        tensao_inicio = tensao_inicial * 346;
        ciclos_tempo = tempo_partida / 0.2 ;
        conta_tempo = (3465 - tensao_inicio) / ciclos_tempo;
        rampa_partida = rampa_partida + conta_tempo;
        saida_on = tensao_inicio + rampa_partida;
        if (saida_on >= 3465){
            saida_on = 3465; }}
    else{ operacao = 6;
        saida_on = 3465;}}
else {rampa_partida = 0;}
```

Nesse código, o valor máximo atribuído à variável *saída_on* é de 3465, que equivale a 5,555ms e ao ângulo de 120 graus em uma rede com frequência de 60Hz. O tempo atribuído à variável *tensao_inicio* é relativo ao valor configurado como tensão inicial, na variável *tensao_inicial*. A variável *ciclos_tempo* identifica o número de ciclos da lógica que deverão ser executados até que se atinja a tensão máxima de saída, que é múltipla de 0,2. A variável *conta_tempo* define o valor correspondente a cada ciclo. A variável *rampa_partida* incrementa em si o valor

correspondente a variável *conta_tempo* a cada ciclo. E, por fim, a variável *saída_on* soma os valores atribuídos a cada ciclo com a tensão inicial configurada.

Quando atingido o valor máximo da variável *saída_on*, o acionamento das saídas passa a ser constante e a rampa é finalizada.

3.5.4.2 Lógica da rampa de partida no modo *PWM*

A rampa de partida no modo *PWM* é similar ao modo de variação angular, apenas com alteração na variável final e seu valor, que deve ser compatível com a frequência de *PWM* desejada. Para esse trabalho optou-se por utilizar a frequência de 480Hz, por ser a frequência que apresentaria a quinta harmônica com menor ordem. O código desenvolvido é apresentado a seguir:

```
if(operacao == 2) {
    if(PWM < 8500){
        tensao_inicio = tensao_inicial * 50;
        ciclos_tempo = tempo_partida / 0.2 ;
        conta_tempo = (8500 - tensao_inicio) / ciclos_tempo;
        rampa_partida = rampa_partida + conta_tempo;
        PWM = tensao_inicio + rampa_partida;
        set_pwm_duty(1, PWM);
        if (PWM >= 8500){
            PWM = 8500;
            set_pwm_duty(1, 10400);}}
    else{ operacao = 6;}}
else {rampa_partida = 0; }
```

A frequência *PWM* pode ser alterada modificando-se os valores atribuídos ao temporizador interno do microcontrolador relativo a essa função, porém, essa alteração só é possível com a edição do código e nova gravação. Caso seja alterada, o valor atribuído a variável *PWM* dentro do código poderá sofrer variação.

3.5.5 Lógica da rampa de parada

Na rampa de parada pode ser selecionado o tempo em que ela será realizada, podendo variar de 1 a 60 segundos.

Quando o motor está em operação com plena tensão de rede e é iniciada a parada, automaticamente nesse instante a tensão de saída se reduz para 90% do valor nominal, reduzindo a partir daí linearmente até chegar a 30%, onde então a tensão é cortada totalmente. Essas configurações são aplicadas para ambos os modos de operação: *PWM* e variação angular.

Para ambos os modos também, o código referente a rampa de parada é executado a cada 0,2 segundos, através da interrupção gerada por um dos temporizadores internos do microcontrolador, sendo o mesmo utilizado na partida.

3.5.5.1 Lógica da rampa de parada no modo de variação angular

O código implementado para realizar a parada no modo de variação angular, é o que segue:

```
if(operacao == 3){
    if(saida_on > 1040){
        ciclos_tempo = tempo_parada / 0.2;
        conta_tempo = 2080 / ciclos_tempo;
        rampa_parada = rampa_parada + conta_tempo;
        saida_on = 3120 - rampa_parada; }
    else{ saida_on = 0;
        operacao = 1;}}
else { rampa_parada = 0;}}
```

Ao ser habilitada essa rampa de parada, a mesma é executada enquanto a tensão de saída se manter acima dos 30%. Quando abaixo disso a saída é desabilitada e a tensão para o motor é cortada.

Sua lógica é similar à rampa de partida, tendo como principal diferença que aqui os valores são decrementados da variável *saida_on*, que se inicia com valor máximo.

3.5.5.2 Lógica da rampa de parada no modo *PWM*

A rampa de parada no modo *PWM* é similar ao modo de variação angular, tendo apenas alteração na variável final e seu valor, que deve ser compatível com a frequência *PWM* desejada. O código utilizado é apresentado a seguir:

```

if(operacao == 3){
    if(PWM > 600){
        ciclos_tempo = tempo_parada / 0.2 ;
        conta_tempo = 5000 / ciclos_tempo;
        rampa_parada = rampa_parada + conta_tempo;
        PWM = 6000 - rampa_parada;
        set_pwm_duty(1, PWM);}
    else{ operacao = 1;
        set_pwm_duty(1, 0);}}
else { rampa_parada = 0;}

```

Caso seja alterada a frequência de operação, o valor atribuído à variável *PWM* dentro do código também poderá sofrer alteração.

3.5.6 Lógica geral do modo de variação angular

Ao ser selecionado o modo de operação por variação angular, o controle passa a operar através da identificação da passagem por zero da onda de tensão entre as fases.

Essa passagem é identificada através do acionamento dos pinos de interrupção externa do microcontrolador, habilitando então a respectiva interrupção e executando o código a seguir:

```

#INT_EXT0
void ext0_isr(void){
    if(modos_operacao == 0){
        if((operacao == 2) || (operacao == 3)){
            output_low(pin_b3);
            output_low(pin_b4);
            set_timer1(saida_on);
            enable_interrupts(INT_TIMER1);}
        else if (operacao == 6){
            output_high(pin_b3);
            output_high(pin_b4);}
        else if (operacao == 1){
            output_low(pin_b3);
            output_low(pin_b4);}}}

```

Após a execução do código é habilitada outra interrupção, a de um temporizador interno do microcontrolador, que contará então o tempo relativo ao ângulo que deve disparar os transistores, tendo como base o tempo instantâneo armazenado na variável de rampa de partida e parada (*saida_on*). O código executado quando a interrupção do temporizador ocorre é apresentado a seguir:

```
#INT_TIMER1
void timer1_isr(void){
    set_timer1(0);
    output_high(pin_b3);
    output_high(pin_b4);
    disable_interrupts(INT_TIMER1);}
```

Os códigos apresentados são relativos a apenas uma das fases do sistema, porém, as outras duas são similares, contendo apenas alteração nas interrupções externa e de temporizador utilizadas, que são individuais para cada fase. O código de programação completo pode ser encontrado no Apêndice E.

3.5.7 Lógica geral do modo *PWM*

Nesse modo, o controle também é executado tendo como base o tempo instantâneo armazenado na respectiva variável de rampa de partida e parada (*PWM*), todavia, o valor se aplica alterando o valor do *duty-cycle*. Esses comandos já estão inseridos dentro da lógica das rampas, e podem ser vistos nos respectivos códigos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realização dos testes de funcionamento, a *soft-starter* desenvolvida foi aplicada a um motor de 0,25 CV de potência. Também, utilizou-se um variador de tensão trifásico de 0 a 220V. O uso do variador é importante para controlar a tensão de entrada, ajudando a identificar possíveis falhas no projeto sem que ocorram maiores danos aos circuitos em caso de erro.

4.1 MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS PARA TESTES

Na bancada de testes, a *soft-starter* foi conectada ao variador de tensão trifásico e ao motor. A alimentação do circuito de controle se realiza de maneira independente, através de uma fonte externa de 5V em corrente contínua.

Para a realização dos testes com o motor, a sua carga foi ajustada para exigir a potência máxima, mantendo a corrente no valor nominal. Para a medição das correntes de fase foram utilizados transformadores de corrente com relação de transformação de 1A/1V, conectados à alimentação do motor, e os seus respectivos sinais ao osciloscópio. E para a medição de tensão, utilizou-se um divisor de tensão com resistores, devido ao limite de tensão máximo aceitável pelo osciloscópio, que é baixo.

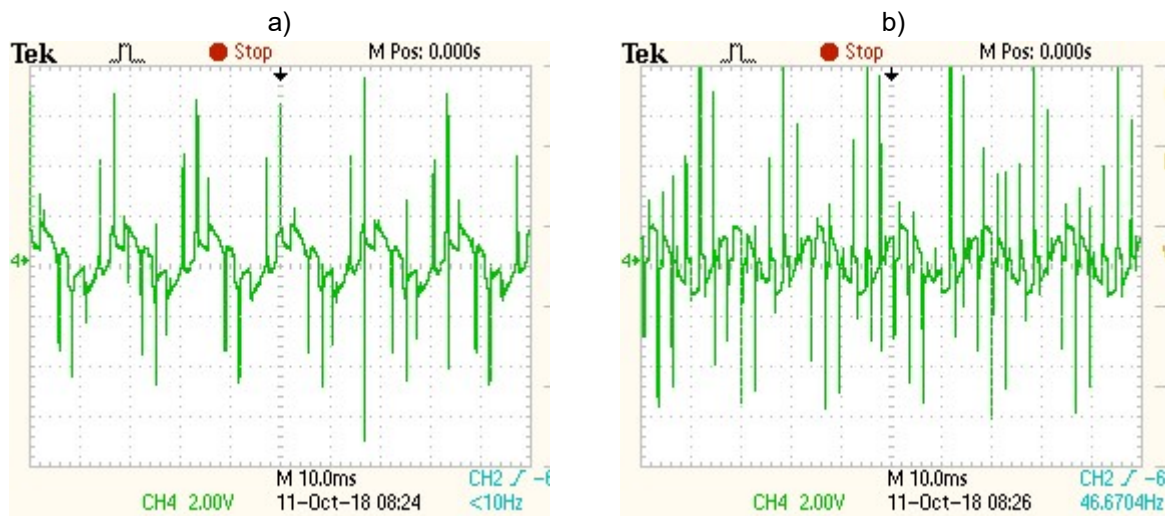
4.1.1 Testes e definições iniciais

Antes da realização dos testes efetivos de partida e parada, foram realizados alguns testes iniciais. Primeiramente, aplicou-se a *soft-starter* ao motor, e utilizando o variador de tensão foi selecionada a tensão de saída em 100V.

Durante a partida do motor verificou-se a presença de grande quantidade de transientes de tensão, no momento da passagem da zona de condução para o corte. Esses transientes eram intensificados ainda mais quando a opção de operação selecionada era a *PWM*.

A Figura 4.1a apresenta os transientes sobre a onda de tensão durante a operação no modo de variação angular, e a Figura 4.1b no modo *PWM*.

Figura 4.1: a) Tensão sem amortecimento em modo variação angular; b) Tensão sem amortecimento em modo *PWM*

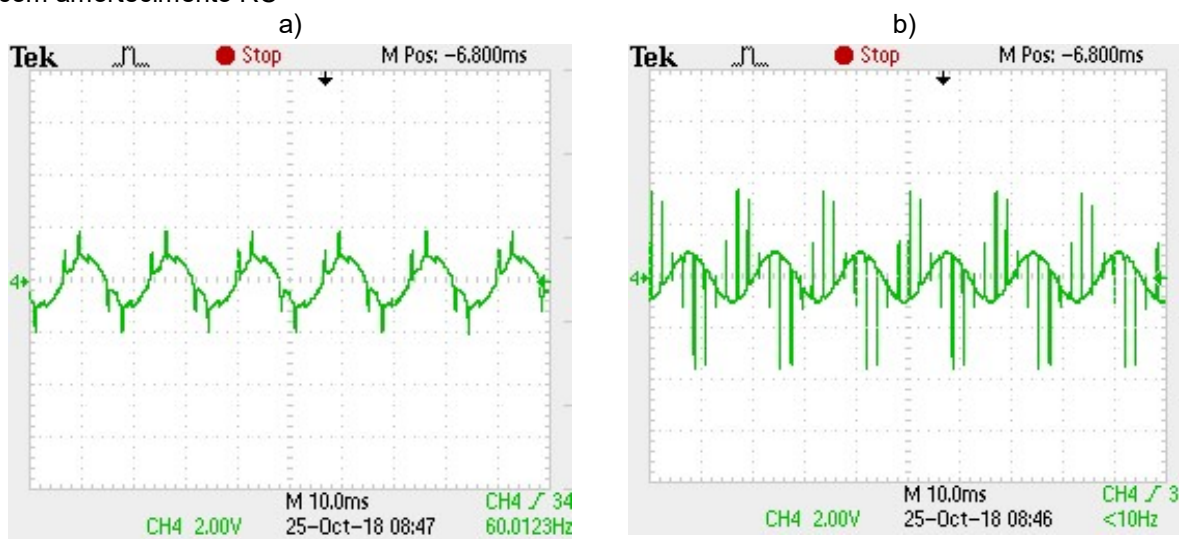


Fonte: Do Autor

Se a tensão for elevada ainda mais através do variador, os transientes também devem aumentar, e caso não sejam reduzidos ou eliminados podem vir a danificar os transistores de maneira irreversível.

Para tentar contornar essa situação, foram utilizadas várias combinações de capacitores e resistores aplicados aos circuitos de amortecimento RC, calculados através da Equação (2.10) e da Equação (2.11), sendo o que melhor surtiu efeito com o uso de capacitores de 733nF (3 de 2,2uF em série) e resistores de 120 ohms.

Figura 4.2: a) Tensão no modo variação angular com amortecimento RC; b) Tensão no modo *PWM* com amortecimento RC



Fonte: Do Autor

A Figura 4.2a apresenta os transientes de tensão após a inserção dos componentes de amortecimento no modo variação angular, e a Figura 4.2b no modo *PWM*.

Pôde-se perceber uma melhora em ambos os modos de operação, porém, no de variação angular ela foi mais significativa.

Apesar de funcional, esse circuito de amortecimento acaba dissipando potência, que para esse caso, de acordo com o cálculo da Equação (2.12) pode passar de 4W por fase, ou de 12W com a soma das três, fazendo com que a eficiência do equipamento seja reduzida.

Como os transientes de tensão no modo *PWM* permaneceram elevados, optou-se por manter a tensão em 100V e retirar a carga do motor nos testes com esse modo de operação, evitando danos eventuais aos componentes que poderiam inviabilizar os demais testes. Para o modo de variação angular podem ser utilizados os valores nominais de tensão e corrente do motor.

4.2 TESTES DE FUNCIONAMENTO E LEITURA DE DADOS

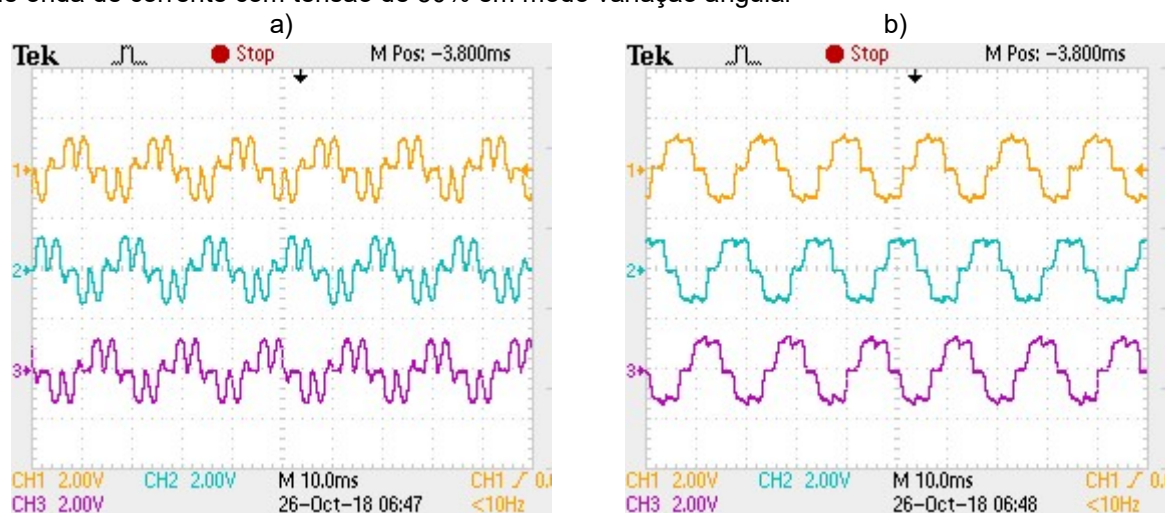
Para a realização dos testes foram utilizadas diferentes configurações do tempo de partida e parada, e tensão inicial, de modo a se verificar o comportamento da corrente em cada situação.

4.2.1 Operação da *soft-starter*

Primeiramente, para se verificar as formas de onda da corrente, em ambos os modos de operação, fixou-se a tensão de saída em 30% e depois em 50%, aplicando-se ao motor.

A Figura 4.3a apresenta as formas de onda de corrente nas três fases para o modo de operação por variação angular, configurado com tensão de saída em 30%, e a Figura 4.3b com a tensão configurada em 50%.

Figura 4.3: a) Forma de onda de corrente com tensão de 30% em modo variação angular; b) Forma de onda de corrente com tensão de 50% em modo variação angular

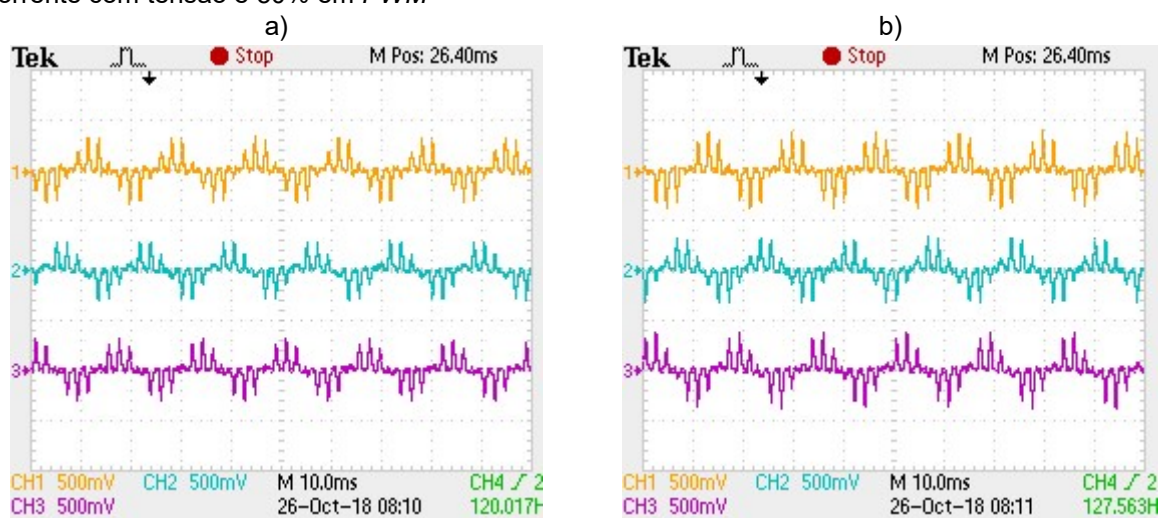


Fonte: Do Autor

Conforme a Figura 4.3a e a Figura 4.3b, pode-se observar que as formas de onda da corrente entre as três fases são similares, indicando um consumo de potência equilibrado. Também, a corrente absorvida pelo motor é menor com 30% da tensão de saída, tendo em vista as diferenças em amplitude nas formas de onda.

Na Figura 4.4a são apresentadas as formas de onda de corrente nas três fases para o modo de operação *PWM* configurado com 30% da tensão de saída, e na Figura 4.4b configurado com 50%. Lembrando que tais medidas foram realizadas com o motor sem carga e com a tensão de entrada em 100V.

Figura 4.4: a) Forma de onda de corrente com tensão de 30% em *PWM*; b) Forma de onda de corrente com tensão e 50% em *PWM*



Fonte: Do Autor

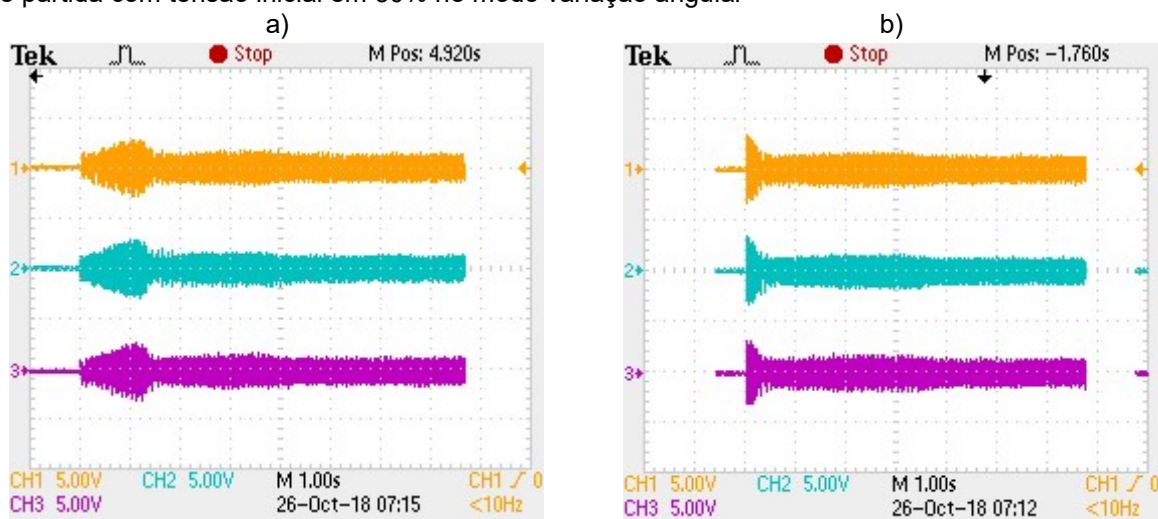
Pelas formas de onda da Figura 4.4a e da Figura 4.4b, pode-se perceber que houve pouca diferença na corrente absorvida pelo motor entre os valores de tensão de saída em 30 e 50%, sendo que suas amplitudes são similares.

4.2.1.1 Partida do motor

Para os testes de partida foram seleccionados arbitrariamente dois casos para se analisar. No primeiro caso, foi configurada a tensão inicial em 30% da nominal e o tempo de partida em 5s. No segundo caso, a tensão inicial foi de 50% mantendo-se os 5s.

A Figura 4.5a apresenta o resultado obtido na partida com tensão inicial em 30%, e a Figura 4.5b com tensão inicial em 50%, no método de variação angular.

Figura 4.5: a) Corrente de partida com tensão inicial em 30% no modo variação angular; b) Corrente de partida com tensão inicial em 50% no modo variação angular



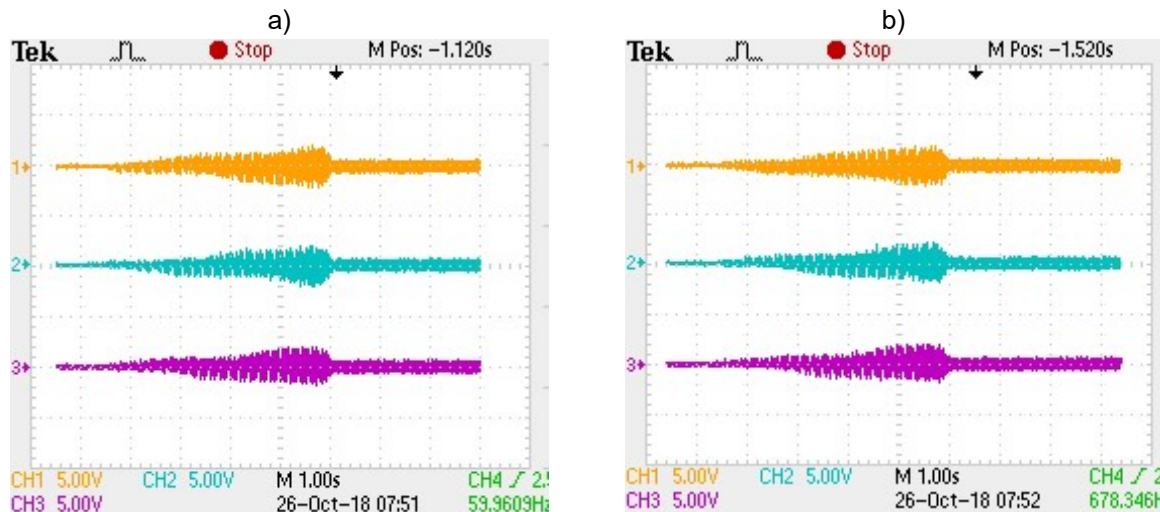
Fonte: Do Autor

Através da análise da Figura 4.5a e da Figura 4.5b, pode-se observar que em ambos os casos a corrente de partida se manteve bem inferior a normalmente encontrada quando se realiza uma partida direta. Também, quando seleccionada a tensão inicial de 30%, que é mais baixa, o pico de corrente no momento da partida também é menor, entretanto, ela se mantém elevada por mais tempo, reduzindo na medida que o motor vai ganhando velocidade.

Durante os testes práticos, o motor apresentou uma aceleração suave e satisfatória.

A Figura 4.6a apresenta o resultado obtido durante a partida pelo método *PWM*, com tensão inicial em 30%, e a Figura 4.6b apresenta o resultado com tensão inicial de 50%.

Figura 4.6: a) Corrente de partida com tensão inicial em 30% no modo *PWM*; b) Corrente de partida com tensão inicial em 50% no modo *PWM*



Fonte: Do Autor

Na Figura 4.6a e Figura 4.6b, percebe-se pouca diferença na corrente absorvida na partida entre a tensão inicial em 30 e 50%.

Durante os testes de partida, também percebeu-se que o torque desenvolvido pelo motor era muito baixo, sendo que o mesmo só começava a ganhar velocidade próximo do final da rampa de partida. Tal situação não ocorreu quando realizada a partida pelo método de variação angular nas mesmas condições, tendo esse funcionado normalmente.

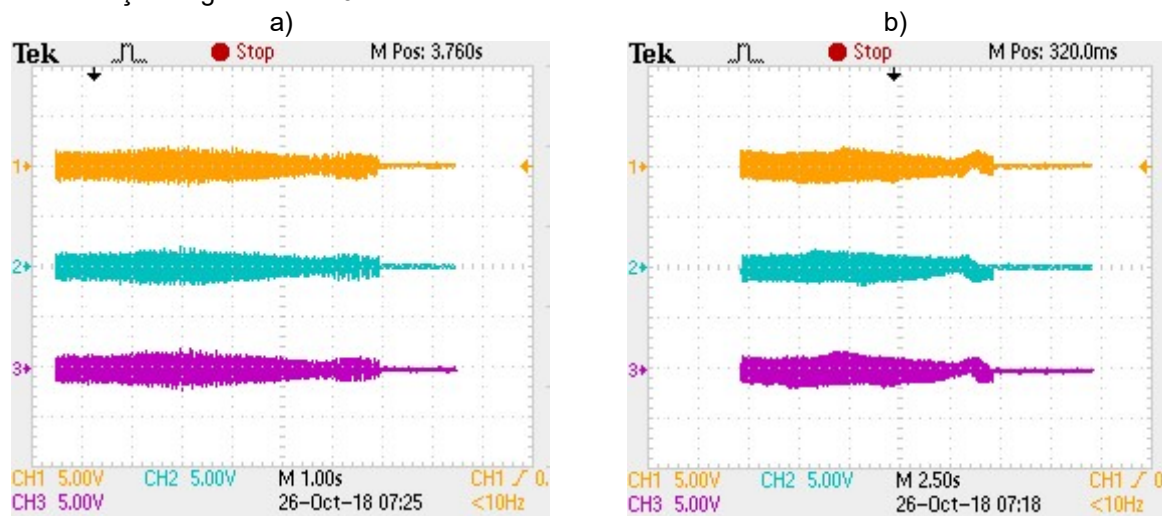
4.2.1.2 Parada do motor

Para os testes de parada foram configurados dois tempos de rampa, sendo uma de 5s e outra de 10s. Lembrando que o degrau de tensão no momento da parada é fixo em 90% da tensão nominal, e o fim da rampa é em 30% da tensão.

Vale lembrar que a rampa de parada não está disponível nos métodos eletromecânicos tradicionais, como partida direta e estrela-triângulo.

A Figura 4.7a apresenta os resultados obtidos durante a parada com tempo de 5s, e a Figura 4.7b com o tempo de 10s, no modo de variação angular.

Figura 4.7: a) Corrente de parada no modo variação angular com 5s; b) Corrente de parada no modo variação angular com 10s

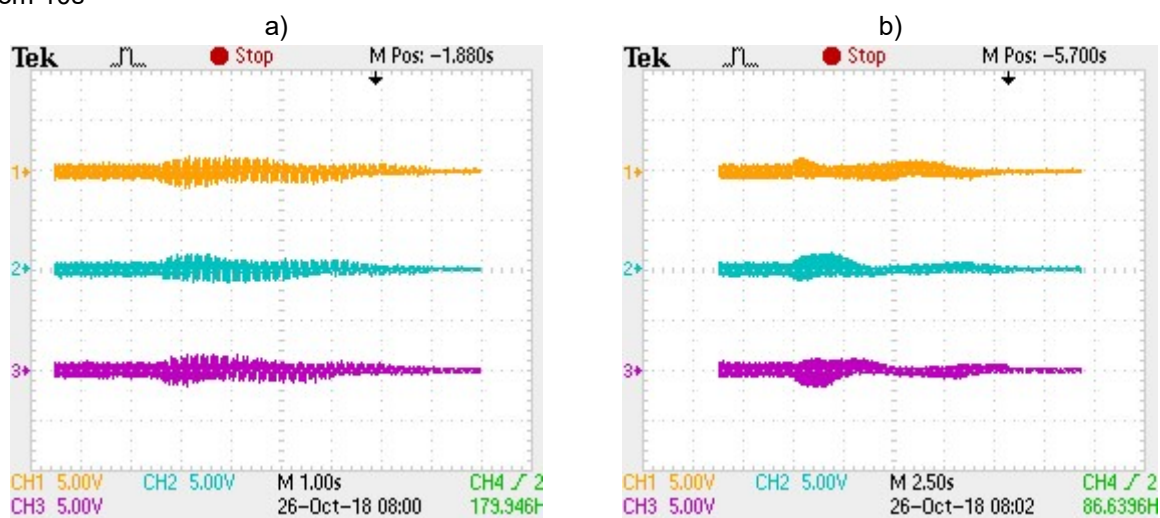


Fonte: Do Autor

De acordo com a Figura 4.7a e Figura 4.7b, pode-se verificar que para ambos os casos a corrente absorvida é similar durante a rampa de parada. Tendo em vista que a carga aplicada ao motor possui um valor quase constante, com pouca inércia, o resultado era esperado. A principal diferença aqui, se deu pelo tempo que levou para o motor parar completamente de girar, sendo menor no menor tempo programado.

Na Figura 4.8a são apresentados os resultados obtidos durante a parada com tempo de 5s, e na Figura 4.8b com tempo de 10s, no método *PWM*.

Figura 4.8: a) Corrente de parada no modo *PWM* com 5s; b) Corrente de parada no modo *PWM* com 10s



Fonte: Do Autor

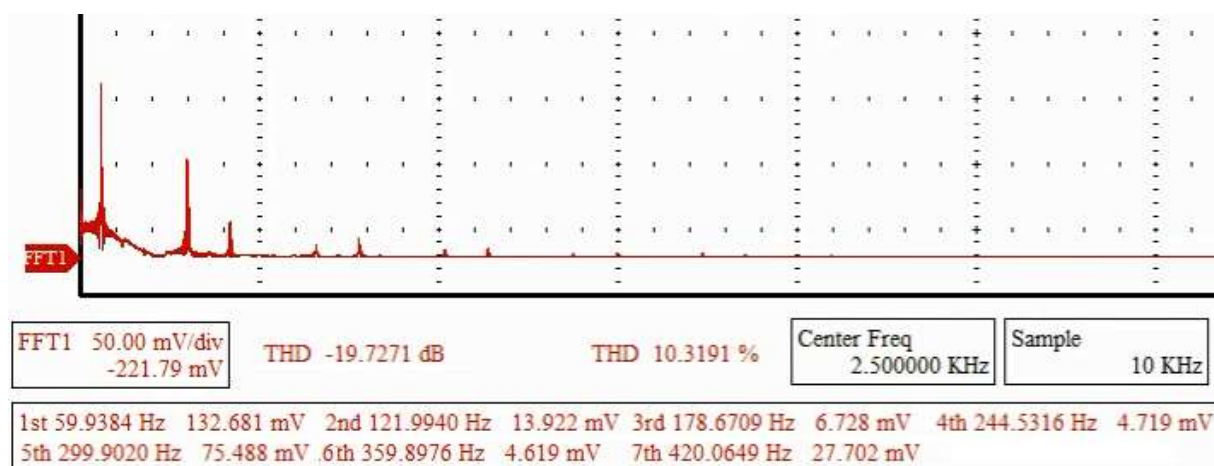
Na Figura 4.8a e Figura 4.8b, percebe-se que para ambos os casos ocorre distorção na corrente absorvida pelo motor durante a parada. Também, ela não se deu de maneira satisfatória, apresentando baixo torque e fazendo o motor parar rapidamente, muito antes do final da rampa, em ambos os casos.

4.2.2 Harmônicas

Com auxílio do osciloscópio, foram medidas as correntes harmônicas geradas durante a partida do motor em ambos os modos de operação. Essas medidas foram realizadas com o motor sem carga e com tensão de entrada de 100V.

Na Figura 4.9 pode-se observar as harmônicas medidas durante a partida no modo de variação angular, na sua pior situação, registrada no início da rampa.

Figura 4.9: Correntes harmônicas geradas durante a partida em modo variação angular

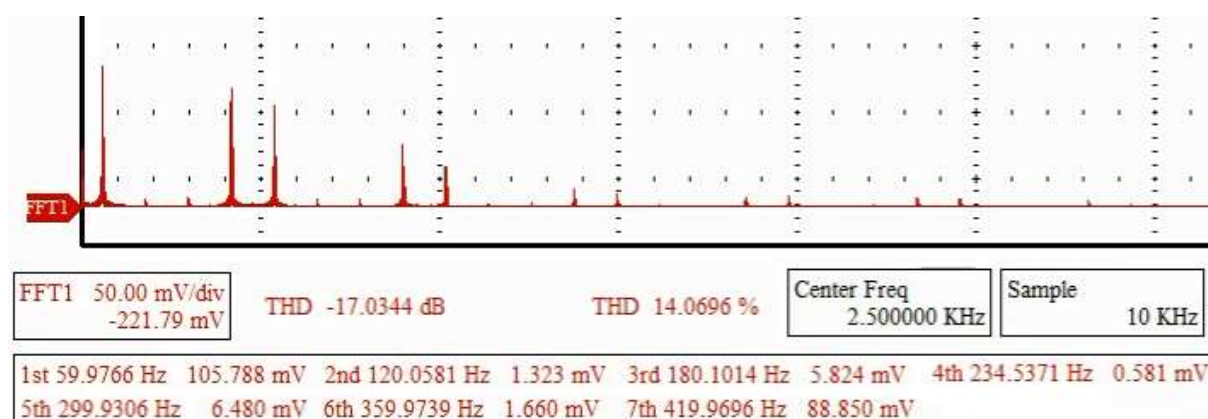


Fonte: Do Autor

De acordo com a Figura 4.9, a ordem harmônica mais baixa e significativa é a quinta, com a sétima também apresentando valor considerável. Nesse instante a DHT é de 10,31%.

Já na Figura 4.10 pode-se visualizar as harmônicas medidas durante a partida no modo *PWM*, também na sua pior situação, registrada no início da rampa.

Figura 4.10: Correntes harmônicas geradas durante a partida em modo *PWM*



Fonte: Do Autor

A partir da análise da Figura 4.10, observa-se que a ordem harmônica mais baixa e significativa é a sétima, sendo que a nona, a décima quinta e a décima sétima também apresentam valores consideráveis. Nesse instante a DHT é de 14,06%.

Também, durante a partida no modo *PWM* foram realizadas medições da tensão contínua presente sobre os terminais do motor, sendo notada a sua presença pelo multímetro. A medida realizada na pior condição encontrada, com seu valor mais elevado, é apresentada na Figura 4.11, sendo os dados nela apresentada da direita para a esquerda: corrente em amperes, tensão CA em volts, e tensão CC em milivolts.

Figura 4.11: Corrente em CA(A), tensão em CA(V) e tensão em CC(mV) respectivamente, com *PWM*



Fonte: Do Autor

Essa medida de tensão foi realizada tendo em vista a atuação percebida do motor nesse método de partida, onde a *soft-starter* funcionou como um freio para o motor, mantendo-o parado no início da partida e também no final da parada. Característica essa compatível com a presença de corrente contínua nas bobinas do motor, e comprovada pelo multímetro.

4.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se calcular e aplicar um circuito de amortecimento que permita trabalhar com o equipamento em tensão nominal no modo *PWM*. Também, identificar as componentes de frequência responsáveis pela geração de corrente CC nesse modo de operação, e aplicar por exemplo, filtros ativos para a sua correção.

Também, sugere-se aplicar o circuito desenvolvido aqui no controle de cargas puramente resistivas, como sistemas de aquecimento.

5 CONCLUSÃO

A partir dos testes realizados no protótipo, pôde-se comprovar a eficiência dos circuitos de controle e de potência, assim como do programa desenvolvido para o microcontrolador, para ambos os modos de operação. Além disso, a placa de controle utilizada na identificação da passagem por zero da onda de tensão e o programa desenvolvido para o modo de operação por variação angular, podem ser utilizados também em *soft-starters* comuns, aplicados no controle de tirístores.

Nos testes operacionais, verificou-se eficiência no método de variação angular, que cumpriu sua função de limitar a tensão entregue aos terminais do motor e proporcionar uma partida e parada suave. Já o método utilizando *PWM* não obteve sucesso, apresentado uma tensão transiente elevada e de difícil controle sobre os transistores, podendo ocasionar a destruição dos mesmos caso a tensão de entrada fosse mais elevada. Também, esse método não mostrou-se eficiente para a partida do motor, que apresentou torque muito baixo e ganho de velocidade somente no final da rampa de partida, devido à presença de componentes CC nos enrolamentos do motor. Entretanto, houve a redução da geração de harmônicas, tendo se apresentada a sétima harmônica como a de menor ordem, para a frequência de 480Hz utilizada, enquanto o método por variação angular apresentou a quinta.

A eficiência energética era uma das premissas para se utilizar os transistores, porém, essa vantagem não se confirmou. Devido às perdas elétricas existentes no circuito de amortecimento dos transientes de tensão, a eficiência do protótipo ficou reduzida. Tendo em vista que para a aplicação em motores de potência mais elevada, a perda tende a ser maior, apesar de funcional, essa opção de *soft-starter* pode não ser a melhor escolha.

Conclui-se que, ambos os métodos abordados são funcionais e desempenham o papel de controlar a tensão entregue à carga. Porém, só o método por variação angular se mostrou eficiente e pode ser utilizado na operação de motores elétricos trifásicos. Para o uso do método por *PWM*, necessita-se ainda a aplicação de filtragem, de maneira a minimizar as componentes CC geradas no motor.

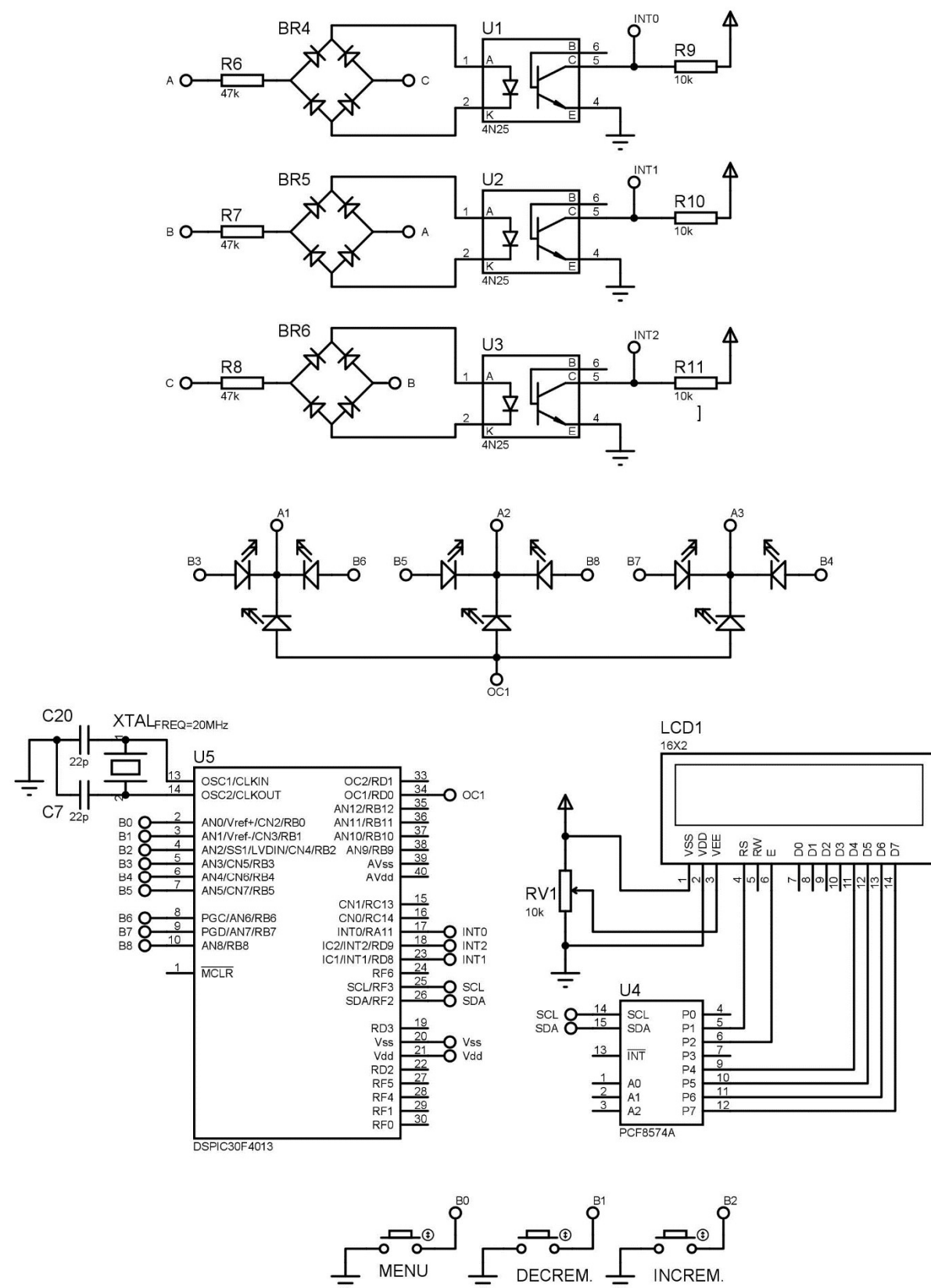
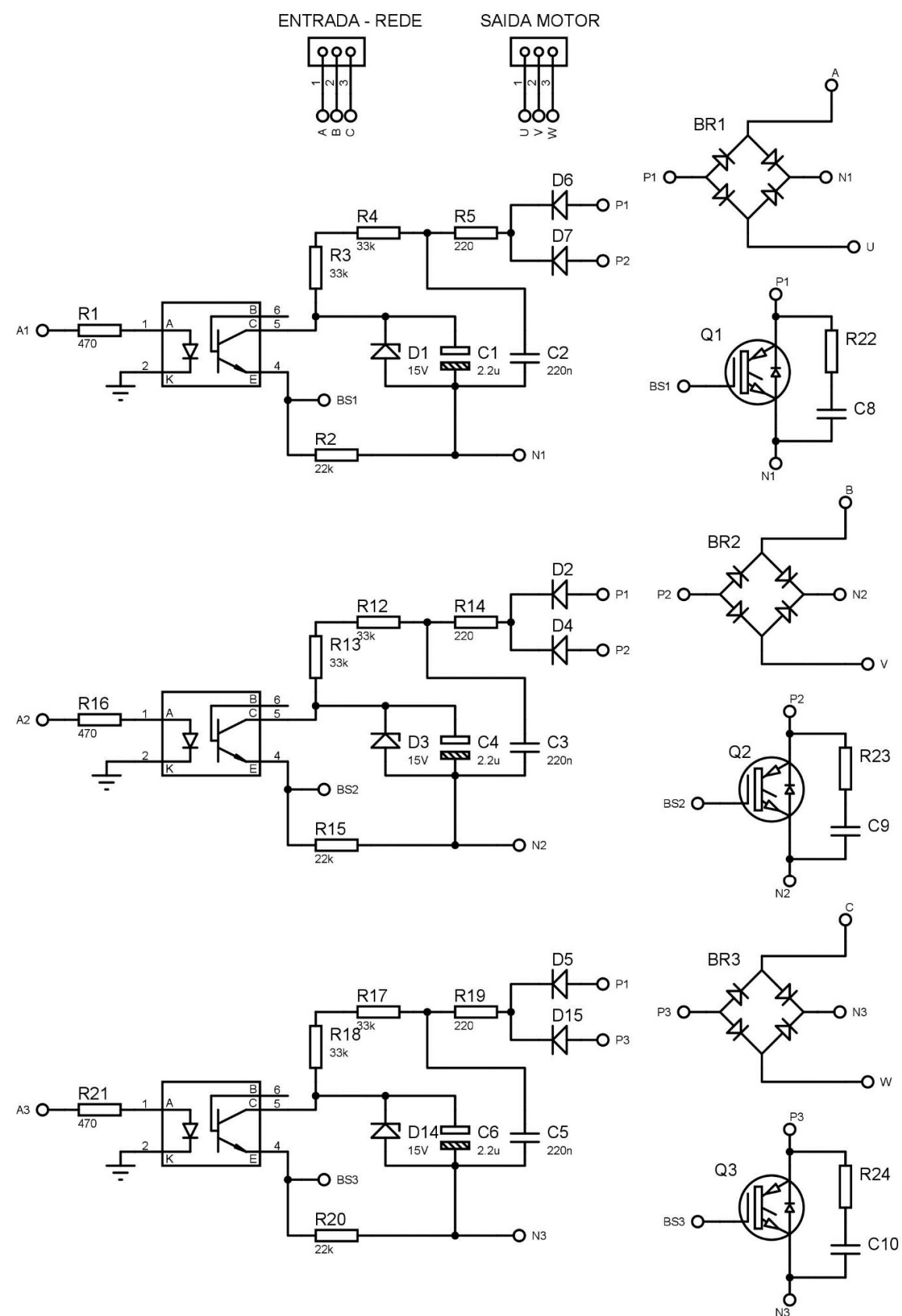
6 REFERÊNCIAS

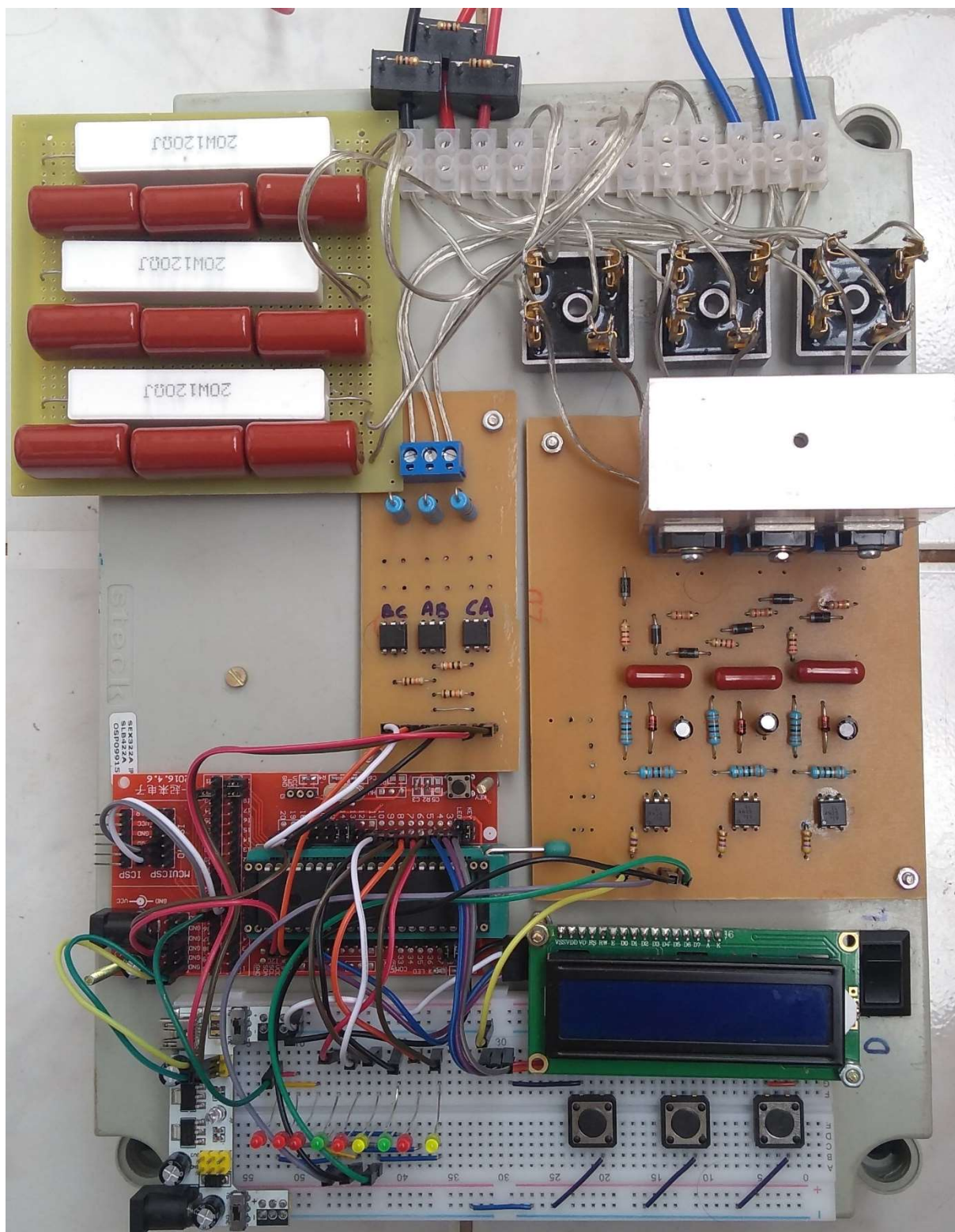
- [1] MME. Aneel estimula troca de motores elétricos para promover eficiência energética. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2015/11/aneel-estimula-troca-de-motores-eletricos-para-promover-eficiencia-energetica>> Acesso em: 30 jul. 2018.
- [2] MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- [3] RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência : circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- [4] ENGEMATEC. **Harmônicos em sistemas de potência: entenda os fundamentos**. Disponível em <<http://www.engematec.com.br>> Acesso em: 10 abr. 2018.
- [5] BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 6.ed. Santa Catarina: Sagra, 2006.
- [6] FRANCHI, Claiton M. **Acionamentos elétricos**. 4.ed. São Paulo: Érica, 2008.
- [7] WEG. **Motores elétricos - Guia de especificação**. Disponível em <<http://www.weg.net>> Acesso em: 07 abr. 2018.
- [8] WEG. **Guia de aplicação de soft-starters**. 2.ed. Disponível em <<http://www.weg.net>> Acesso em: 07 abr. 2018.
- [9] LANDER, Cyril W. **Eletrônica industrial : teoria e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Pearson, 1996.
- [10] WEG. **Automação: soft-starters SSW07 e SSW08**. Disponível em <<http://www.weg.net>> Acesso em: 07 abr. 2018.
- [11] WEG. **Manual do usuário da soft-starter SSW07**. Disponível em <<http://www.weg.net>> Acesso em: 11 abr. 2018.
- [12] ANDRADE, Camila. **8 passos para você entender melhor o que é a soft starter**. Disponível em <<https://www.saladaeletrica.com.br/o-que-e-um-soft-starter/>> Acesso em: 11 abr. 2018.

- [13] FREITAS, Stefani C. L. SOUTO, Olívio C. N. SILVA, Wander G. OLIVEIRA, Luis C. O. **Estudo de harmônicas de corrente geradas na partida suave de motores de indução trifásicos**. Disponível em <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96673.pdf>> Acesso em: 14 abr. 2018.
- [14] NETTO, Luiz F. **Onda senoidal : Parte 3**. Disponível em <http://www.feiradeciencias.com.br/sala14/14_T05.asp> Acesso em: 14 abr. 2018.
- [15] ENGEPARC. **Distorções harmônicas – uma revisão de conceitos gerais**. Disponível em <<http://www.engeparc.com.br>> Acesso em: 10 abr. 2018.
- [16] ZAHYKA, Mykhaylo V. **Comando e proteção de IGBTs em paralelo**. Disponível em <<https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/5927/1/Dissertação.pdf>> Acesso em: 14 abr. 2018.
- [17] FIGINI, Gianfranco. **Eletrônica industrial : circuitos e aplicações**. Curitiba: Hemus, 2002.
- [18] PINTO, Luiz F. T. **Eletrônica: eletrônica analógica**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.
- [19] BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência : projetos de fontes chaveadas**. Edição do autor. Santa Catarina.
- [20] ASSEF, Amauri. **Eletrônica de Potência: Aula 19 - Chaves eletrônicas**. Disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Eletr_Pot1_19.pdf> Acesso em: 10 abr. 2018.
- [21] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **PRODIST, Módulo 8 Qualidade da energia elétrica**. Disponível em <www.aneel.gov.br> Acesso em: 10 abr. 2018.
- [22] ROBOLIV. Microcontroladores. Disponível em <<http://www.roboliv.re/conteudo/microcontroladores>> Acesso em: 18 abr. 2018.
- [23] BRAGA, Newton C. Conheça o dsPIC. Disponível em <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontroladores/141-microchip-pic/3472-mic029>> Acesso em: 18 abr. 2018.
- [24] CADEIRA TECH. **Módulo Display Lcd 16x2 C/ Comunicação I2c, P/ Arduino / Pic**. Disponível em <<https://www.caldeiratech.com/componentes/modulo-display-lcd-16x2-c-comunicacao-i2c-p-arduino-pic>> Acesso em: 28 ago. 2018.
- [25] GIESBERTS, Ton. **Dimmer with a MOSFET**. Elektor Electronics, 2004.

[26] GOOSSENS, Paul. **I₂C and SMBus**. Elektor Electronics, 2004.

APÊNDICE A: CIRCUITOS DA SOFT-STARTER DESENVOLVIDA

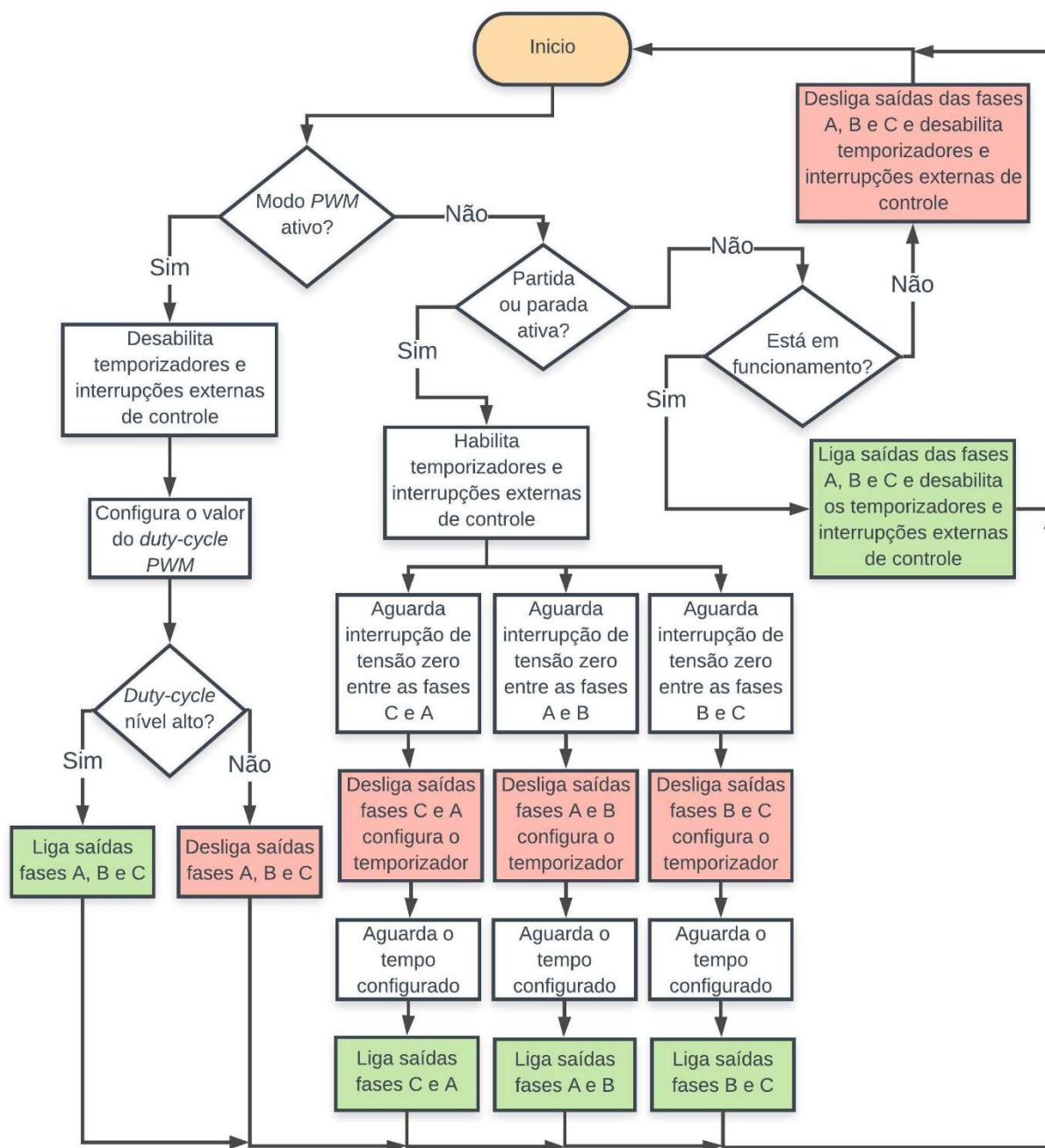


APÊNDICE B: PROTÓTIPO DA *SOFT-STARTER* DESENVOLVIDA

APÊNDICE C: MATERIAIS E ORÇAMENTO

Componente	Preço	Quantidade	Total
Microcontrolador <i>dsPIC30F4013</i> ®	R\$ 35,00	1	R\$ 35,00
Placa de desenvolvimento para microcontroladores <i>PIC</i> ®	R\$ 40,00	1	R\$ 40,00
Gravador <i>PICkit3</i> ®	R\$ 45,00	1	R\$ 45,00
<i>LCD</i> 16x2 com interface I ₂ C	R\$ 40,00	1	R\$ 40,00
Placa de circuito impresso	R\$ 8,00	2	R\$ 16,00
<i>Protoboard</i> e acessórios	R\$ 25,00	1	R\$ 25,00
<i>IGBT</i> FGA25N120ANTD	R\$ 16,00	3	R\$ 48,00
Resistor de 20W	R\$ 4,20	3	R\$ 12,60
Capacitor 2,2uF - 400V	R\$ 2,80	9	R\$ 25,20
Capacitores e resistores	R\$ 0,20	40	R\$ 8,00
Optoacoplador 4N25	R\$ 2,50	6	R\$ 15,00
LED	R\$ 0,20	9	R\$ 1,80
Ponte retificadora KBPC3510	R\$ 6,00	3	R\$ 18,00
Botões	R\$ 0,80	3	R\$ 2,40
Total	-	-	R\$ 332,00

APÊNDICE D: FLUXOGRAMA BÁSICO DA LÓGICA DE CONTROLE



APÊNDICE E: CÓDIGO DO MICROCONTROLADOR EM LINGUAGEM C

```

/*****
/***** DESENVOLVIMENTO DE UMA SOFT-STARTER PARA PARTIDA DE MOTORES
ELETRICOS TRIFASICOS COM TRANSISTORES DE POTENCIA *****/

/***** CENTRO UNIVERSITARIO ASSIS GURGACZ *****/
/***** TRABALHO DE TCC 2 DO CURSO DE ENGENHARIA ELETRICA *****/

// ALUNO: SANDRO JACOMINI
// ORIENTADOR: PROF. EDERSON ZANCHET

/*****
/***** PROGRAMACAO - MICROCONTROLADOR dsPIC30F4013 *****/
/***** SOFTWARE COMPILADOR CCS C COMPILER *****/

// VERSAO: 1.0

#include <30F4013.h>

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES CKSFSM          //Clock Switching is enabled, fail Safe clock monitor is enabled
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset

#device ICSP=1
#use delay(crystal=2000000) // CRISTAL DE 20MHZ

/***** MODULO LCD I2C *****/
#use i2c(MASTER, I2C1, FAST, stream=I2C_PORT1)
#include <lcd_i2c.h>
/*****

/***** DECLARACAO DE VARIAVEIS *****/
unsigned int16 PWM = 0;
unsigned char menu = 1;
unsigned int16 saida_on = 0;
unsigned int16 conta_tempo = 0;
unsigned int16 ciclos_tempo = 1;
unsigned int16 tensao_inicio = 3;
unsigned int16 rampa_partida = 0;
unsigned int16 rampa_parada = 0;
unsigned char tensao_inicial = 30;
unsigned char tempo_partida = 5;
unsigned char tempo_parada = 5;
int1 modo_opera = 0;
unsigned char operacao = 1;
int1 imprimir_lcd = 0;
/*****

/***** ESTRUTURA DE CONTROLE DE TEMPO DE PARTIDA E PARADA *****/
void controle(){

if(operacao == 2) { // STATUS DE RAMPA DE ACELERACAO ATIVO
    if(saida_on < 3465){
        tensao_inicio = tensao_inicial * 346;
        ciclos_tempo = tempo_partida / 0.2 ;
        conta_tempo = (3465 - tensao_inicio) / ciclos_tempo; // tempo de cada pulso
    }
}
}

```

```

        rampa_partida = rampa_partida + conta_tempo;
        saida_on = tensao_inicio + rampa_partida;
        if (saida_on >= 3465){
            saida_on = 3465; }}
    else{ operacao = 6;
        saida_on = 3465;}}
else {rampa_partida = 0;}

if(operacao == 3){ // STATUS DE RAMPA DE DESACELERACAO ATIVO
    if(saida_on > 1040){
        ciclos_tempo = tempo_parada / 0.2 ;
        conta_tempo = 2080 / ciclos_tempo;
        rampa_parada = rampa_parada + conta_tempo;
        saida_on = 3120 - rampa_parada; }
    else{ saida_on = 0;
        operacao = 1;}}
else { rampa_parada = 0;}}

/*****

/***** ESTRUTURA DE CONTROLE MODO PWM *****/

void controle_PWM(){

    if(operacao == 2) { // STATUS DE RAMPA DE ACELERACAO ATIVO
        if(PWM < 8500){
            tensao_inicio = tensao_inicial * 50;
            ciclos_tempo = tempo_partida / 0.2 ;
            conta_tempo = (8500 - tensao_inicio) / ciclos_tempo; // tempo de cada pulso
            rampa_partida = rampa_partida + conta_tempo;
            PWM = tensao_inicio + rampa_partida;
            set_pwm_duty(1, PWM);
            if (PWM >= 8500){
                PWM = 8500;
                set_pwm_duty(1, 10400);}}
        else{ operacao = 6;}}
    else {rampa_partida = 0; }

    if(operacao == 3){ // STATUS DE RAMPA DE DESACELERACAO ATIVO
        if(PWM > 600){
            ciclos_tempo = tempo_parada / 0.2 ;
            conta_tempo = 5000 / ciclos_tempo;
            rampa_parada = rampa_parada + conta_tempo;
            PWM = 6000 - rampa_parada;
            set_pwm_duty(1, PWM);}
        else{ operacao = 1;
            set_pwm_duty(1, 0);}}
    else { rampa_parada = 0;}

    if(operacao == 1){
        set_pwm_duty(1, 0);
        PWM = 0;}
    if(operacao == 6){set_pwm_duty(1, 10410);
        PWM = 8500;}

}

/*****

/**** IDENTIFICACAO DA PASSAGEM POR ZERO PARA CONTROLE DA FASE CA **/

```

```

#INT_EXT0
void ext0_isr(void){
    if(modos_operacao == 0){
        if((operacao == 2) || (operacao == 3)){
            output_low(pin_b3);
            output_low(pin_b4);
            set_timer1(saida_on);
            enable_interrupts(INT_TIMER1);}
        else if (operacao == 6){
            output_high(pin_b3);
            output_high(pin_b4);}
        else if (operacao == 1){
            output_low(pin_b3);
            output_low(pin_b4);}}}

/*****

/** IDENTIFICACAO DA PASSAGEM POR ZERO PARA CONTROLE DA FASE AB **/

#INT_EXT1
void ext1_isr(void)
{
    if(modos_operacao == 0) {
        if((operacao == 2) || (operacao == 3)){
            output_low(pin_b5);
            output_low(pin_b6);
            set_timer4(saida_on);
            enable_interrupts(INT_TIMER4);}
        else if (operacao == 6){
            output_high(pin_b5);
            output_high(pin_b6); }
        else if (operacao == 1){
            output_low(pin_b5);
            output_low(pin_b6); }}
    }

/*****

/** IDENTIFICACAO DA PASSAGEM POR ZERO PARA CONTROLE DA FASE BC **/
#INT_EXT2
void ext2_isr(void)
{
    if(modos_operacao == 0){
        if((operacao == 2) || (operacao == 3)){
            output_low(pin_b7);
            output_low(pin_b8);
            set_timer5(saida_on);
            enable_interrupts(INT_TIMER5);}
        else if (operacao == 6){
            output_high(pin_b7);
            output_high(pin_b8); }
        else if (operacao == 1){
            output_low(pin_b7);
            output_low(pin_b8); }}
    }

/*****

/** TEMPORIZADOR PARA CONTROLE DO TEMPO ON/OFF DA FASE AC *****/

```

```

#INT_TIMER1
void timer1_isr(void){
    set_timer1(0);
    output_high(pin_b3);
    output_high(pin_b4);
    disable_interrupts(INT_TIMER1);}

/*****
**** TEMPORIZADOR PARA CONTROLE DO TEMPO ON/OFF DA FASE AB *****/

#INT_TIMER4
void timer4_isr(void)
{
    set_timer4(0);
    output_high(pin_b5);
    output_high(pin_b6);
    disable_interrupts(INT_TIMER4);
}

/*****
**** TEMPORIZADOR PARA CONTROLE DO TEMPO ON/OFF DA FASE BC *****/

#INT_TIMER5
void timer5_isr(void)
{
    set_timer5(0);
    output_high(pin_b7);
    output_high(pin_b8);
    disable_interrupts(INT_TIMER5);
}

/** TEMPORIZADOR PARA CONTROLE DO LCD E DE TEMPO EM PARTIDA/PARADA **/
#INT_TIMER2
void timer2_isr(void)
{
    imprimir_lcd = 1;

    if(modo_opera == 0){
        if((operacao == 2) || (operacao == 3)){
            enable_interrupts(INT_EXT0);
            enable_interrupts(INT_EXT1);
            enable_interrupts(INT_EXT2);}
        else {
            disable_interrupts(INT_EXT0);
            disable_interrupts(INT_EXT1);
            disable_interrupts(INT_EXT2); }}
    if(modo_opera == 0){
        controle();}
    if(modo_opera == 1){
        controle_PWM();}
}

/*****
**** PROGRAMA *****/

void main()
{

//----- CONFIGURACOES INICIAIS -----/

```

```
set_pullup(TRUE,PIN_B0);
set_pullup(TRUE,PIN_B1);
set_pullup(TRUE,PIN_B2);
```

```
setup_timer1(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_8, 5200);
setup_timer4(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_8, 5200);
setup_timer5(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_8, 5200);
setup_timer2(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_64, 15624);
```

```
setup_timer3(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_1, 10415);
setup_compare(1, COMPARE_PWM | COMPARE_TIMER3);
set_pwm_duty(1, 0);
```

```
disable_interrupts(INT_EXT0);
disable_interrupts(INT_EXT1);
disable_interrupts(INT_EXT2);
disable_interrupts(INT_TIMER1);
enable_interrupts(INT_TIMER2);
disable_interrupts(INT_TIMER4);
disable_interrupts(INT_TIMER5);
enable_interrupts(INTR_GLOBAL);
```

```
lcd_init(); //COMANDO DE INICIALIZAÇÃO DO LCD
lcd_backlight=on; //LIGA LUZ DE FUNDO DO LCD
```

```
lcd_gotoxy(3, 1);
printf(LCD_PUTC, "SOFT-STARTER");
lcd_gotoxy(2, 2);
printf(LCD_PUTC, "PROJETO TCC 2");
delay_ms(1000);
```

```
lcd_gotoxy(1, 1);
printf(LCD_PUTC, "\fSANDRO JACOMINI");
lcd_gotoxy(5, 2);
printf(LCD_PUTC, "FAG 2018");
delay_ms(1000);
```

```
//----- COMANDOS ABAIXO SAO DE EXECUCAO CONTINUA -----/
```

```
while(TRUE) {
```

```
//----- CONTROLE DA ENTRADAS DOS BOTOES DE COMANDO -----/
```

```
if(operacao == 1){
    if(input(pin_b0) == 0){ // BOTAO MENU
        delay_ms(500);
        menu ++;}}

if(!input(pin_b1)){ // BOTAO DECREMENTA
    delay_ms(250);
    if(menu == 1){
        if(operacao < 4){
            operacao ++;}
        else if (operacao == 6){
            operacao = 3;}
        else {operacao = 1;}}
    if (menu == 2){
        tensao_inicial --;}
    else if(menu == 3){
        tempo_partida --;}
    else if(menu == 4){
```

```

        tempo_parada --;}
    else if(menu == 5){
        modo_opera ++;}}

if(!input(pin_b2)){ // BOTAO INCREMENTA
    delay_ms(250);
    if (menu == 2){
        tensao_inicial ++;}
    else if(menu == 3){
        tempo_partida ++;}
    else if(menu == 4){
        tempo_parada ++;}
    else if(menu == 5){
        modo_opera ++;}}

//----- AJUSTE DA FAIXA DE VALORES POSSIVEIS DAS VARIABEIS-----/

if(tensao_inicial < 3){
    tensao_inicial = 7; }
else if(tensao_inicial > 7){
    tensao_inicial = 3; }

if(tempo_partida < 1){
    tempo_partida = 60; }
else if(tempo_partida > 60){
    tempo_partida = 1; }

if(tempo_parada < 1){
    tempo_parada = 60; }
else if(tempo_parada > 60){
    tempo_parada = 1; }

//----- CONTROLE DE IMPRESSAO NO LCD -----/

if (imprimir_lcd == 1){

switch(menu)
{
    case 1:
        lcd_clear();
        if(operacao == 1){
            lcd_gotoxy(3, 1);
            printf(LCD_PUTC, "Soft Pronta"); }
        else if(operacao == 2){
            lcd_gotoxy(3, 1);
            printf(LCD_PUTC, "Partindo...");}
        else if(operacao == 3) {
            lcd_gotoxy(3, 1);
            printf(LCD_PUTC, "...Parando");}
        else if(operacao == 6){
            lcd_gotoxy(1, 1);
            printf(LCD_PUTC, "Em Funcionamento");}
        else {operacao = 1;}

        lcd_gotoxy(1, 2);
        if(operacao == 1) {
            printf(LCD_PUTC, "MENU LIGA");}
        else {printf(LCD_PUTC, "  DESL.");}
        break;

```

```

case 2:
    lcd_gotoxy(1, 1);
    printf(LCD_PUTC, "\fTensao Inicial:");
    lcd_gotoxy(7, 2);
    printf(LCD_PUTC, "%d0 %%", tensao_inicial);
    break;

case 3:
    lcd_gotoxy(1, 1);
    printf(LCD_PUTC, "\fTempo de Partida");
    lcd_gotoxy(7, 2);
    printf(LCD_PUTC, "%d s", tempo_partida);
    break;

case 4:
    lcd_gotoxy(1, 1);
    printf(LCD_PUTC, "\fTempo de Parada");
    lcd_gotoxy(7, 2);
    printf(LCD_PUTC, "%d s", tempo_parada);
    break;

case 5:
    lcd_gotoxy(1, 1);
    printf(LCD_PUTC, "\fModo de Operacao");

    if(modos_operacao == 0){
        lcd_gotoxy(1, 2);
        printf(LCD_PUTC, "Variacao Angular");
    }
    else if(modos_operacao == 1){
        lcd_gotoxy(7, 2);
        printf(LCD_PUTC, "PWM");
    }
    else{ modos_operacao = 0; }
    break;

default :
    menu = 1;

    imprimir_lcd = 0;

}}}

/***** FIM *****/
/*****/

```

ANEXO A: BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO SERIAL COM O LCD

```

/***** BIBLIOTECA lcd_i2c.h *****/

#define LCD_ADDR    0x4E //I2C slave address for LCD module

#define ON          1
#define OFF         0
#define RS          0b00000001 //P0 - PCF8574T Pin connected to RS
#define RW          0b00000010 //P1 - PCF8574T Pin connected to RW
#define EN          0b00000100 //P2 - PCF8574T Pin connected to EN
#define BACKLIGHT_LED 0b00001000 //P3 - PCF8574T Pin connected to BACKLIGHT LED
#define lcd_line_one 0x80 // LCD RAM address for line 1
#define lcd_line_two 0xC0 // LCD RAM address for line 2
#define lcd_line_three 0x94 // LCD RAM address for line 3
#define lcd_line_four 0xD4 // LCD RAM address for line 4

byte address;
int1 lcd_backlight=ON;

void i2c_send_nibble(unsigned char data)
{
    i2c_start();
    delay_us(20);
    i2c_write(LCD_ADDR); //the slave addresse
    delay_us(20);
    i2c_write(data);
    delay_us(20);
    i2c_stop();
    delay_us(20);
}

void lcd_send_byte(unsigned char data)
{
    if (lcd_backlight) data=data|EN|BACKLIGHT_LED; else data=data|EN; //set pin EN
    i2c_send_nibble(data);
    data=data-4; //toggle EN back to 0
    i2c_send_nibble(data);
}

void lcd_clear()
{
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0x10);
    delay_ms(2);
}

void lcd_init()
{
    delay_ms(200); //LCD power up delay

    //Request works on the command by set the RS = 0 RW = 0 write
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0x10);
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0x10);
    //First state in 8 bit mode
    lcd_send_byte(0x30);

```

```

    lcd_send_byte(0x30);
    //Then set to 4-bit mode
    lcd_send_byte(0x30);
    lcd_send_byte(0x20);
    //mode 4 bits, 2 lines, characters 5 x 7 (28 h)
    lcd_send_byte(0x20);
    lcd_send_byte(0x80);
    //no need cursor on (0Ch)
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0xC0);
    //the cursor moves to the left (06 h)
    lcd_send_byte(0x00);
    lcd_send_byte(0x60);
    //clears the display
    lcd_clear(); }

void lcd_gotoxy( byte x, byte y)
{
static char data;

    switch(y)
    {
        case 1: address= lcd_line_one;   break;
        case 2: address= lcd_line_two;   break;
        case 3: address= lcd_line_three;  break;
        case 4: address= lcd_line_four;   break;
        default: address= lcd_line_one;   break;
    }

    address+=x-1;
    data=address&0xF0;
    lcd_send_byte(data);
    data=address&0x0F;
    data=data<<4;
    lcd_send_byte(data);
}

//Display the character on LCD screen.
void LCD_PUTC(char in_data)
{
char data;
switch(in_data)
{
    case '\f': lcd_clear() ; break;
    case '\1': lcd_gotoxy(1,1); break;
    case '\2': lcd_gotoxy(1,2); break;
    case '\3': lcd_gotoxy(1,3); break;
    case '\4': lcd_gotoxy(1,4); break;

    default:
        data=in_data&0xF0;
        data=data|RS; //set RS pin to 1
        lcd_send_byte(data);
        data=in_data&0x0F;
        data=data<<4;
        data=data|RS; //set RS pin to 1
        lcd_send_byte(data);
        break;
    } }
}
/***** FIM *****/

```