

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**NICOLAU BENÊ BERGOLD**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS PARA**  
**BANCADA DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

**São Leopoldo**

**2021**

NICOLAU BENÊ BERGOLD

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS PARA  
BANCADA DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, ênfase em Controle e Automação Industrial, pelo curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Ms. João Olegário Oliveira de Souza

São Leopoldo

2021

Dedico à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Ms. João Olegário Oliveira de Souza pelos ensinamentos transmitidos e pelo auxílio na elaboração e execução deste trabalho. Agradeço também a todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica e pelos conhecimentos adquiridos nesses anos de estudo. À minha família, em especial à minha mãe Deise e minha companheira Caroline, e amigos pelo apoio durante esses longos anos de graduação.

## RESUMO

O acionamento de máquinas elétricas é de grande importância, principalmente nos setores industriais, pois em qualquer sistema elétrico, do mais simples ao mais complexo dentro da cadeia produtiva, há algum tipo de máquina ou equipamento sendo acionado de alguma forma. Motores elétricos, por exemplo, são a forma mais utilizada de conversão de energia elétrica em energia mecânica, e seu controle é imprescindível para a realização das mais diversas atividades. Algumas das funções principais de comando e controle de um motor são a partida, a parada, o sentido de rotação, a regulação da velocidade, a limitação de corrente, entre outros. Este projeto visou o desenvolvimento de um sistema para acionamento de cargas e motores que contempla três dispositivos principais: retificador controlado monofásico em ponte, *softstarter* monofásico e inversor de frequência também monofásico. Os circuitos foram modelados através do software PSIM e parcialmente simulados no software Proteus. Além disso, os layouts dos circuitos foram desenvolvidos através do software Eagle para a confecção das placas de circuito impresso. Após a conclusão dos protótipos, eles foram testados e validados na prática nos laboratórios da Unisinos. O desenvolvimento dos sistemas propostos foi realizado com sucesso, assim como suas simulações prévias. Foram projetados dispositivos de fácil utilização como alternativa para o acionamento de motores, principalmente em aplicações do âmbito acadêmico.

**Palavras-chave:** Motores. Acionamento. Comando. Controle.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Contextualização</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>8</b>
1.2.1 Objetivos Específicos .....	9
<b>1.3 Delimitação do Trabalho</b> .....	<b>9</b>
<b>1.4 Justificativa</b> .....	<b>9</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Conversores Estáticos</b> .....	<b>10</b>
2.1.1 Retificador Controlado (Conversor CA-CC) .....	11
2.1.2 Gradador .....	12
2.1.3 TCA785 .....	12
2.1.4 Acoplamento Magnético .....	13
2.1.5 <i>Softstarter</i> .....	15
2.1.6 Inversor de Frequência (Conversor CC-CA) .....	16
2.1.6.1 Inversor PWM Senoidal .....	17
2.1.6.2 Inversor Multinível .....	19
<b>2.2 Motores</b> .....	<b>20</b>
2.2.1 Motor CC .....	22
2.2.2 Motor CA .....	24
<b>2.3 Tiristores</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4 IR2111 – <i>Bootstrap</i></b> .....	<b>29</b>
<b>2.5 Microcontrolador – Arduino Nano</b> .....	<b>30</b>
<b>2.6 Bancadas Didáticas Comerciais</b> .....	<b>31</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1 Requisitos</b> .....	<b>36</b>
3.1.1 Dimensões .....	36
3.1.2 Motor Universal – Carga da <i>Softstarter</i> .....	38
3.1.3 Motor Monofásico – Carga do Inversor de Frequência .....	39
<b>3.2 Retificador Controlado Monofásico em Ponte</b> .....	<b>39</b>
3.2.2 Modelagem no <i>Software</i> PSIM .....	40
3.2.3 Projeto do Circuito no <i>Software</i> Proteus .....	43
3.2.4 Montagem em Protoboard .....	47

3.2.5 Montagem Mecânica do Frontal .....	47
3.2.6 Desenvolvimento da Placa no <i>Software Eagle</i> .....	49
<b>3.3 <i>Softstarter</i></b> .....	<b>49</b>
3.3.2 Modelagem no <i>Software PSIM</i> .....	51
3.3.3 Diagrama Esquemático e Montagem em Protoboard.....	53
3.3.4 Montagem Mecânica do Frontal .....	57
3.3.5 Desenvolvimento da Placa no <i>Software Eagle</i> .....	58
3.3.6 <i>Firmware</i> do Arduino .....	59
<b>3.4 Conversor CC-CA (Inversor de Frequência)</b> .....	<b>61</b>
3.4.2 Modelagem no <i>Software PSIM</i> .....	62
3.4.3 Diagrama Esquemático e Montagem em Protoboard.....	64
3.4.4 Montagem Mecânica do Frontal .....	68
3.4.5 Desenvolvimento da Placa no <i>Software Eagle</i> .....	69
3.4.6 <i>Firmware</i> do Arduino .....	70
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>73</b>
<b>4.1 Retificador Controlado Monofásico em Ponte</b> .....	<b>73</b>
<b>4.2 <i>Softstarter</i></b> .....	<b>77</b>
<b>4.3 Conversor CC-CA (Inversor de Frequência)</b> .....	<b>80</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>84</b>
<b>5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros</b> .....	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>
<b>ANEXO A – PINAGEM DO TCA785</b> .....	<b>87</b>
<b>ANEXO B – PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DAS BANCADAS WEG</b> .....	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO RETIFICADOR CONTROLADO NO SOFTWARE EAGLE</b> .....	<b>89</b>
<b>APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DA SOFTSTARTER NO SOFTWARE EAGLE</b> ...	<b>90</b>
<b>APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO SOFTWARE EAGLE</b> .....	<b>91</b>
<b>APÊNDICE D – FOTOS DOS ENSAIOS EM BANCADA</b> .....	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Rashid (2014), no que diz respeito às aplicações da eletrônica de potência no setor industrial, os conversores estáticos são, certamente, os métodos de controle mais importantes, principalmente por representarem a maior parte da transformação da energia elétrica em outros tipos de energia, como a mecânica.

É sabido que a indústria concentra a grande maioria das atividades exercidas pelos profissionais da área elétrica, como os Engenheiros Eletricistas, seja trabalhando com projetos de comandos elétricos, instalação de acessórios e equipamentos, ou mesmo em projetos de automação industrial, que é até uma ênfase em cursos desta área.

Dentro desta área de conhecimento situa-se o segmento de acionamentos elétricos, que engloba diversas técnicas e métodos que são empregados para controle e comando de máquinas e equipamentos.

Os dispositivos cuja finalidade é a realização de acionamentos elétricos são compostos, em sua grande maioria, pelo circuito de potência, onde encontram-se as cargas (como motores elétricos, aquecedores, etc) e chaves (tiristores, TRIAC's, MOSFET's, etc); e o circuito de comando, caracterizado pelas lógicas de acionamento, conforme Rashid (2014).

Para o controle ou condicionamento da energia elétrica, é necessária a conversão da potência elétrica de uma forma para outra, e as características de chaveamento dos dispositivos de potência permitem isso. Os conversores estáticos de potência realizam essas funções de conversão de energia. Um conversor pode ser considerado uma matriz de chaveamento em que uma ou mais chaves são ligadas e conectadas à fonte de alimentação para a obtenção da tensão ou da corrente desejada na saída.

Os conversores estáticos podem apresentar diversas configurações para potências diferentes e permitem uma ampla variedade de aplicações, entre as quais estão o uso industrial e em empresas que trabalham com eletricidade em geral.

Segundo Rashid (2014), os conversores estáticos podem ser retificadores a diodo, *choppers* CC ou reguladores chaveados (conversores CC-CC), inversores (conversores CC-CA), retificadores controlados (conversores CA-CC), controladores de tensão CA (conversores CA-CA) e chaves estáticas. A ação de chaveamento de



um conversor pode ser realizada por mais de um dispositivo. A escolha de um dispositivo específico depende das exigências de tensão, corrente e velocidade do conversor.

Existem inúmeras aplicações para os conversores estáticos e a eletrônica de potência em geral, como controle de motores CC e CA, fontes chaveadas, transmissão de energia elétrica, controle de temperatura, iluminação, acionamentos de cargas, automação, robótica entre muitas outras. A maior parte destas aplicações de potência são utilizadas na área industrial.

À medida que a tecnologia para dispositivos semicondutores de potência e circuitos integrados se desenvolve, o potencial para as aplicações da eletrônica de potência torna-se mais amplo. Já existem muitos dispositivos semicondutores de potência disponíveis comercialmente; entretanto, o aprimoramento nessa direção é contínuo.

O projeto de circuitos de eletrônica de potência requer a criação dos circuitos de potência e de controle ou comando. Os dispositivos gerados podem ser sempre melhorados com uma escolha adequada de aprimoramento da estratégia de controle.

## **1.1 Contextualização**

No decorrer do curso de Engenharia Elétrica, somos apresentados às mais variadas ramificações das áreas relacionadas à eletricidade, eletrônica e afins. Entre essas áreas, os comandos elétricos em aplicações da indústria estão extremamente presentes, e diversas formas de acionamento são apresentadas. Tendo isso em vista, é fácil ver que novas soluções para o controle de máquinas rotativas podem ser bastante atraentes. Os dispositivos propostos no desenvolvimento deste trabalho são muito úteis em aplicações de menor escala e âmbito acadêmico.

## **1.2 Objetivos**

Este projeto apresenta o desenvolvimento de um sistema para acionamento de cargas e motores que contemple três dispositivos principais: retificador controlado monofásico em ponte; *softstarter* para motor monofásico; e conversor CC-CA (inversor de frequência) também para motor monofásico.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Para melhor fundamentar o trabalho e permitir uma melhor análise dos dispositivos envolvidos, pretende-se também:

- Modelar os sistemas desenvolvidos no *software* PSIM e realizar a simulação no *software* Proteus;
- Projetar dispositivos de baixo custo e fácil utilização como alternativa para o acionamento de motores, principalmente em aplicações de âmbito acadêmico;
- Construir protótipos em placas de circuito impresso dos dispositivos de acionamento compatíveis com o padrão das bancadas didáticas WEG presentes no laboratório de máquinas elétricas da Unisinos;
- Testar e validar os dispositivos desenvolvidos.

### 1.3 Delimitação do Trabalho

Dentro do vasto campo de dispositivos de acionamento de motores, o trabalho busca ater-se no desenvolvimento de dispositivos de controle como *softstarter*, inversor de frequência e retificadores controlados (monofásicos). A pesquisa será desenvolvida buscando aprofundar os conhecimentos do funcionamento destes dispositivos, contribuindo para o desenvolvimento dos protótipos sugeridos.

### 1.4 Justificativa

Os dispositivos de acionamento de motores presentes no mercado atualmente (como *softstarters* ou inversores de frequência, por exemplo) são, geralmente, soluções caras e complexas, que exigem alto investimento tanto financeiro quanto operacional para realizar a aplicação. Como alternativa, este projeto propõe o desenvolvimento de dispositivos simples e funcionais para realizar o controle do acionamento de cargas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento deste projeto, é importante o embasamento de alguns conhecimentos que dizem respeito aos tópicos abordados, como conversores estáticos, motores, semicondutores específicos (como tiristores), o circuito integrado TCA785, retificadores, dispositivos de controle de motores como *softstarters* e inversores de frequência e o microcontrolador que será utilizado na construção dos circuitos, a plataforma de prototipagem rápida Arduino Nano. Estes conhecimentos servirão de referencial teórico para a etapa de metodologia e, posteriormente, no desenvolvimento propriamente dito dos dispositivos.

### 2.1 Conversores Estáticos

Para o controle ou condicionamento da energia elétrica, muitas vezes é necessária a conversão da potência elétrica de uma forma para outra, e as características de chaveamento dos dispositivos de potência permitem isso. Os conversores estáticos de potência realizam essas funções de conversão de energia. Um conversor pode ser considerado uma matriz de chaveamento em que uma ou mais chaves são ligadas e conectadas à fonte de alimentação para a obtenção da tensão ou da corrente desejada na saída (Rashid, 2014). Segundo Rashid, os circuitos de eletrônica de potência podem ser classificados, basicamente, em seis tipos:

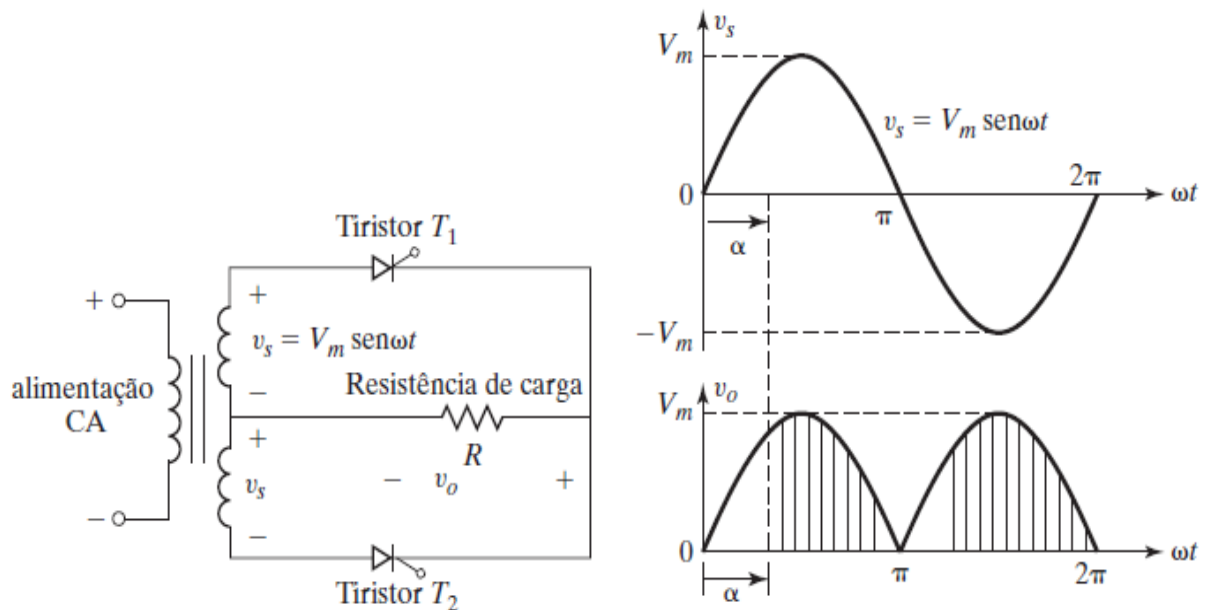
- Retificadores a diodo;
- Conversores CC-CC (*choppers* CC);
- Conversores CC-CA (inversores);
- Conversores CA-CC (retificadores controlados);
- Conversores CA-CA (controladores de tensão CA – “gradador”);
- Chaves estáticas.

Neste trabalho foram abordados mais profundamente três destes conversores: os inversores de frequência, os retificadores controlados e os chamados gradadores.

### 2.1.1 Retificador Controlado (Conversor CA-CC)

Um exemplo de conversor CA-CC com dois tiristores em comutação natural é mostrado na figura 1. Um tiristor permanece normalmente em estado desligado e pode ser ativado pela aplicação de um pulso de porta (gatilho - *gate*). Quando o tiristor T1 é ligado com um ângulo de atraso  $\omega t = \alpha$ , a tensão de alimentação aparece na carga. O tiristor T1 é desligado automaticamente quando sua corrente cai a zero em  $\omega t = \pi$ . Quando o tiristor T2 é ativado com um ângulo de atraso  $\omega t = \pi + \alpha$ , a parte negativa da tensão de alimentação aparece na carga com polaridade positiva. O tiristor T2 é desligado automaticamente quando sua corrente cai a zero em  $\omega t = 2\pi$ . A tensão média de saída pode ser encontrada a partir de  $V_{o(MED)} = (1 + \cos \alpha)V_m/\pi$  (RASHID, 2014).

Figura 1: Conversor CA-CC monofásico.



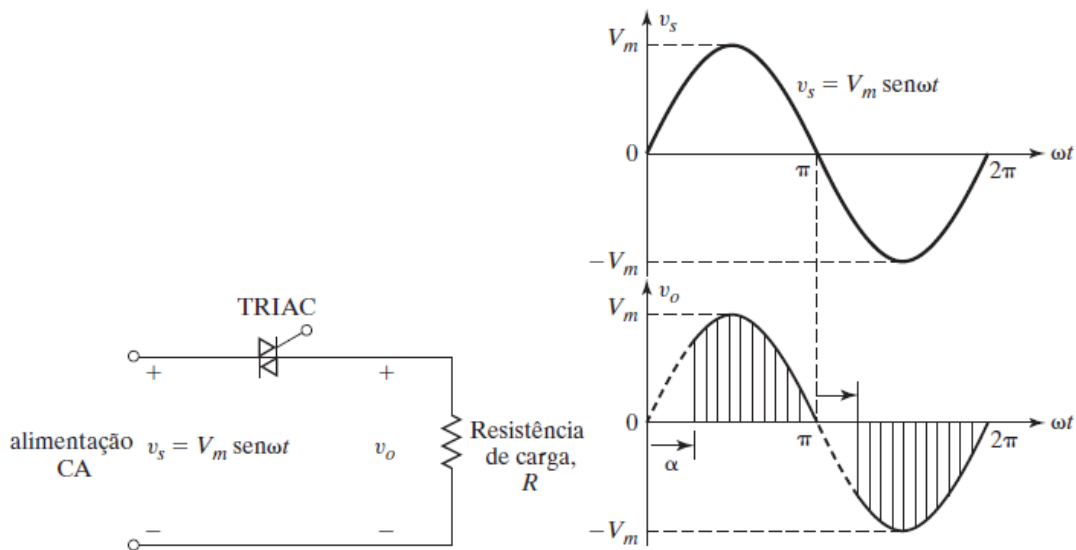
Fonte: Rashid (2014).

Com um ângulo de atraso  $\alpha = 0$ , esse conversor funciona como o retificador a diodo. O valor médio da tensão de saída  $v_o$  pode ser controlado variando-se o tempo de condução dos tiristores, ou seja, o ângulo de disparo  $\alpha$ . A fonte de entrada pode ser monofásica ou trifásica. Esses conversores são também conhecidos como retificadores controlados.

### 2.1.2 Gradador

Esses conversores CA-CA são utilizados para a obtenção de uma tensão CA variável na saída a partir de uma fonte CA fixa. Um conversor monofásico com um TRIAC é mostrado na figura 2. Um TRIAC permite o fluxo de corrente em ambas as direções. Ele pode ser ligado com a aplicação de sinal de comando no gatilho em  $\omega t = \alpha$  para um fluxo de corrente no sentido positivo, e também em  $\omega t = \alpha + \pi$  para um fluxo de corrente no sentido negativo. A tensão de saída é controlada pela variação do tempo de condução de um TRIAC, ou seja, pelo ângulo de disparo  $\alpha$ . Esses tipos de conversor são também conhecidos como controladores de tensão CA ou gradadores (RASHID, 2014).

Figura 2: Gradador monofásico.



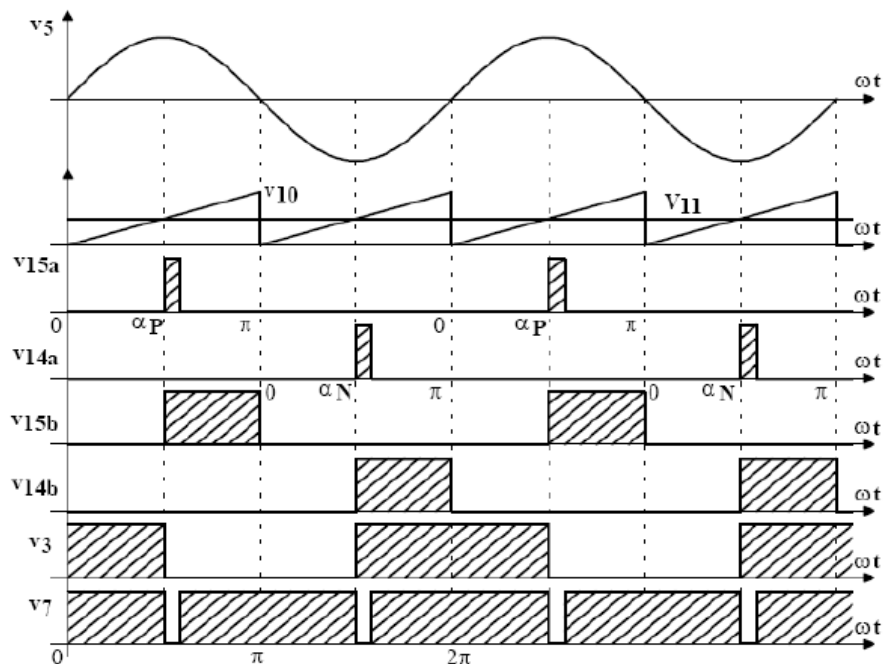
Fonte: Rashid (2014).

### 2.1.3 TCA785

O TCA785 é um circuito integrado dedicado ao controle de tiristores – SCR's e TRIAC's. Ele permite o deslocamento do pulso de gatilho em uma faixa entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . O Anexo A deste relatório apresenta a pinagem deste componente extraída do seu *datasheet*.

Basicamente, o TCA 785 funciona da seguinte forma: o sinal de sincronismo é obtido a partir da rede de alimentação através de um resistor de alta impedância ligado ao pino 5. Um comparador detecta a passagem por zero da tensão de alimentação e informa ao registrador de sincronismo. Este registrador controla um gerador de rampa, composto por um capacitor externo ligado ao pino 10, o qual é carregado por uma corrente constante determinada por um resistor externo ligado ao pino 9. O tempo de subida da rampa é determinado por uma combinação RC. Quando a tensão de rampa  $V_{10}$  excede a tensão de controle  $V_{11}$ , um sinal é enviado a lógica. Dependendo da magnitude da tensão de controle  $V_{11}$ , o ângulo de disparo  $\alpha$  pode ser deslocado numa faixa de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Ao se conectar o pino 6 à terra, inibe-se todas as tensões de saída do módulo. A figura 3 ilustra as principais formas de onda obtidas pelo TCA785:

Figura 3: Principais formas de onda do TCA785.



Fonte: Datasheet TCA785 (SIEMENS, 2019).

#### 2.1.4 Acoplamento Magnético

A maior parte dos circuitos elétricos e eletrônicos podem ser considerados como acoplamento condutivo, pois afetam um ao outro pela condução de

eletricidade por meio físico. Quando dois circuitos com ou sem contato entre eles se afetam por meio do campo magnético gerado por um deles, diz-se que são acoplados magneticamente.

Os transformadores são dispositivos elétricos projetados tendo como base o conceito de acoplamento magnético, pois usam bobinas acopladas magneticamente para transferir energia de um circuito para outro. Também são elementos de circuito fundamentais, utilizados em sistemas de geração de energia elétrica para elevar ou abaixar tensões ou correntes CA, assim como são usados em circuitos como receptores de rádio e televisão para finalidades como casamento de impedâncias, e para isolar uma parte de um circuito de outra, isto é, transferir potência sem qualquer conexão elétrica (ALEXANDER e SADIKU, 2013).

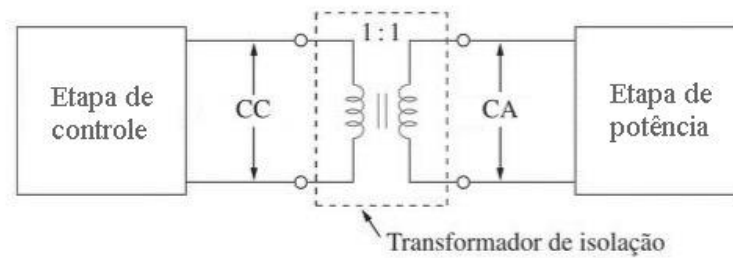
Segundo Alexander e Sadiku (2013), diz-se que existe isolamento elétrico entre dois dispositivos quando não há nenhuma conexão física entre eles. Em um transformador, a energia é transferida por acoplamento magnético, sem conexão elétrica entre o circuito primário e o circuito secundário.

Por seus diversos empregos, existem vários modelos especiais de transformadores: transformadores de tensão, transformadores de corrente, transformadores de potência, transformadores de distribuição, transformadores de áudio, transformadores monofásicos, transformadores trifásicos, transformadores retificadores, transformadores de pulso e muitos outros.

O transformador de pulso tem esse nome porque é alimentado justamente por um pulso de tensão na sua entrada. Geralmente possui quatro terminais (dois no enrolamento primário e dois no secundário) e proporção 1:1. A finalidade desse tipo de transformador é prover isolamento entre a fonte do pulso e o dispositivo (carga) a ser acionado. Pode-se, ainda, corrigir a intensidade do pulso, aumentando ou diminuindo seu valor, de acordo com a necessidade do circuito. Normalmente é utilizado no *gate* de tiristores e transistores em geral.

Diz-se que existe isolamento elétrico entre dois dispositivos quando não há nenhuma conexão física entre eles. Em um transformador, a energia é transferida por acoplamento magnético, sem conexão elétrica entre o circuito primário e o circuito secundário. A figura 4 apresenta um exemplo de isolamento realizado por um transformador.

Figura 4: Transformador fornecendo isolamento entre a etapa de controle e a etapa de potência de um retificador.



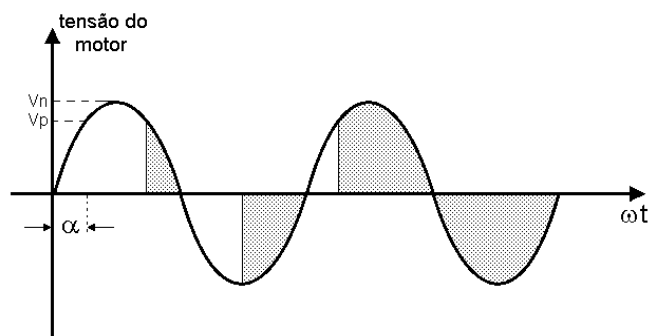
Fonte: Alexander e Sadiku (2013).

### 2.1.5 Softstarter

De acordo com Rashid (2014), para se obter uma partida suave de um motor de indução, deve-se diminuir a tensão aplicada ao motor no instante da partida (tensão de pedestal -  $V_P$ ) a fim de obter o melhor torque, e aumentá-la com o tempo, conforme a carga conectada ao seu eixo, até se atingir a tensão nominal  $V_N$ . Isto pois, para se obter uma partida suave, é necessário um torque de partida reduzido no motor. Para atingir esse objetivo, é necessário controlar a tensão aplicada no motor. Neste tipo de sistema, pode se controlar a partida do motor ajustando-se a rampa de aceleração. Pode-se ajustar também a tensão aplicada ao motor no instante da partida, visando a obtenção do melhor torque.

Para obter a característica desejada do controle de partida, é utilizado um TRIAC para controlar os dois semiciclos da fase. Este deve ser acionado com um ângulo de disparo  $\alpha$  (alfa), que vai variando até seu ângulo mínimo, conforme mostra a figura 5.

Figura 5: Variação do ângulo de disparo  $\alpha$ .

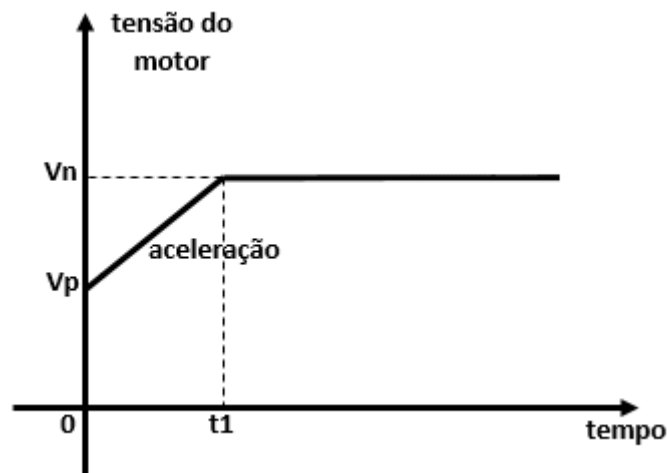


Fonte: Elaborado pelo autor.



A curva característica de um sistema de controle de aceleração pode ser vista na figura 6, onde uma aceleração progressiva é imposta ao motor através de uma rampa no instante da partida do motor. É possível observar que, no momento em que é dado o comando de ligar no instante 0, a tensão sobe instantaneamente até um valor  $V_p$  chamado tensão de pedestal, a partir do qual a rampa irá crescer até chegar na tensão nominal  $V_n$  (em  $t_1$ ). A partir daí, o motor estará em regime permanente.

Figura 6: Curva característica de aceleração de um motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

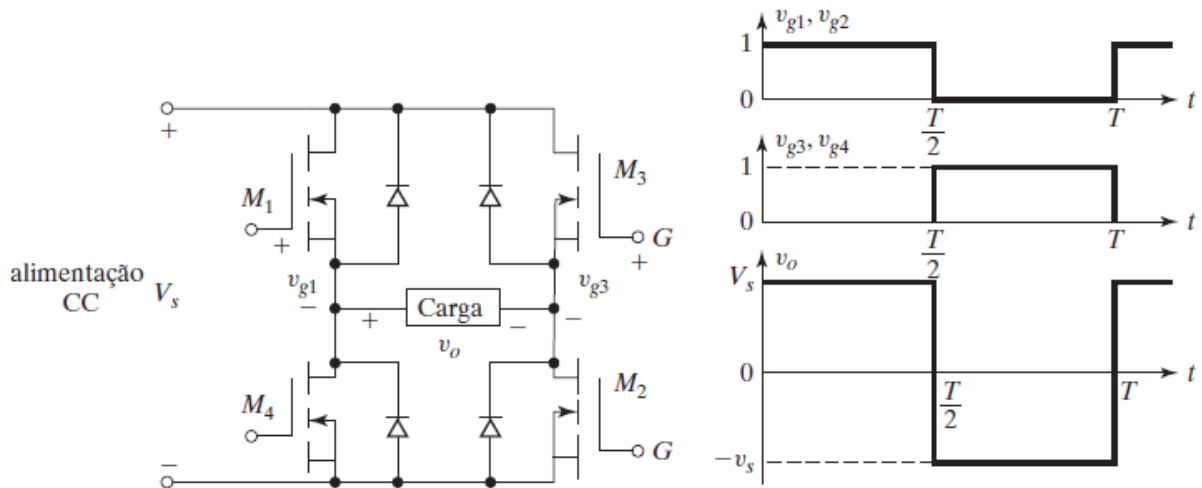
#### 2.1.6 Inversor de Frequência (Conversor CC-CA)

Os conversores CC-CA, normalmente chamados de inversores de frequência, têm como principal função converter uma fonte contínua aplicada à sua entrada em uma fonte alternada na saída do conversor.

Um inversor monofásico com transistor é mostrado na figura 7. Quando os MOSFET's M1 e M2 são ativados pela aplicação de tensões nas suas portas (*gates*), a tensão de alimentação CC  $V_s$  aparece na carga, e a tensão instantânea de saída é  $v_o = +V_s$ . Do mesmo modo, quando os MOSFET's M3 e M4 são ativados pela aplicação de tensões nas suas portas (*gates*), a tensão de alimentação CC  $V_s$  aparece na carga com a polaridade oposta, ou seja, a tensão instantânea de saída é  $v_o = -V_s$ . Se os transistores M1 e M2 conduzem pela metade de um período, e M3 e

M4 conduzem pela outra metade, a tensão de saída tem a forma alternada. O valor RMS da tensão de saída torna-se  $V_{o(RMS)} = V_s$ . No entanto, a tensão de saída contém harmônicas que podem ser filtradas antes de alimentar a carga.

Figura 7: Inversor monofásico e suas formas de onda.



Fonte: Rashid (2014).

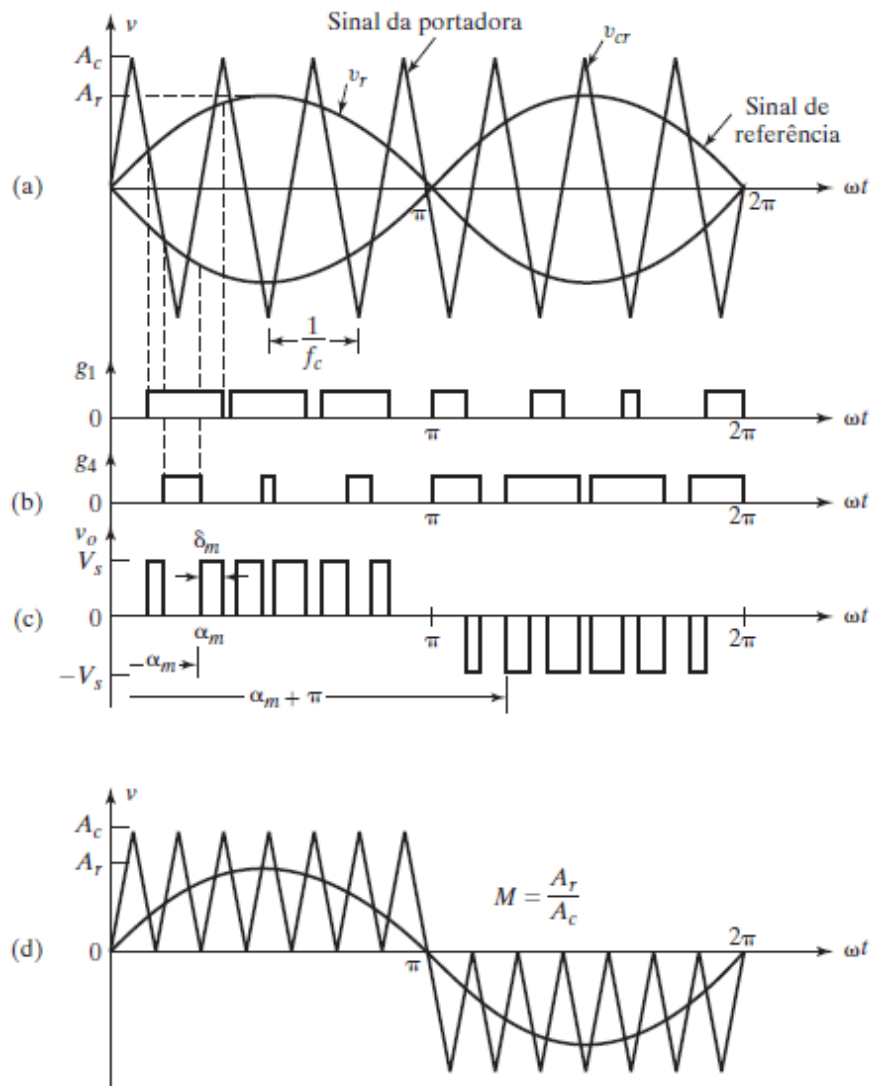
#### 2.1.6.1 Inversor PWM Senoidal

Como a tensão de saída desejada é uma onda senoidal, um sinal senoidal é utilizado como referência. Em vez de manter uma largura constante para todos os pulsos, a largura de cada um varia na proporção da amplitude de uma onda senoidal avaliada no centro do mesmo pulso. Os sinais de acionamento, como mostra a figura 8 (a), são gerados pela comparação de um sinal de referência senoidal com uma onda portadora triangular de frequência  $f_c$ .

Conforme descreve Rashid (2014), a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) é, em geral, empregada em aplicações industriais. A frequência do sinal de referência  $f_r$  determina a frequência de saída do inversor  $f_o$ ; e sua amplitude de pico  $A_r$  controla o índice de modulação  $M$ , que, por sua vez, controla a tensão RMS de saída  $V_o$ . A comparação do sinal bidirecional da portadora  $v_{cr}$  com dois sinais senoidais de referência,  $v_r$  e  $-v_r$ , como ilustra a figura 8 (a), produz os sinais de acionamento  $g_1$  e  $g_4$ , respectivamente, como na figura 8 (b).

Ainda de acordo com Rashid (2014), a tensão de saída é  $v_o = V_s(g1 - g4)$ . Entretanto,  $g1$  e  $g4$  não podem ser liberados ao mesmo tempo. O número de pulsos por semiciclo depende da frequência da portadora. Dentro da restrição em que dois transistores do mesmo braço não podem conduzir ao mesmo tempo, a tensão instantânea de saída é indicada na figura 8 (c).

Figura 8: Modulação PWM senoidal.



Fonte: Rashid (2014).

Os mesmos sinais de acionamento podem ser gerados pela utilização de uma onda portadora triangular unidirecional, como na figura 8 (d). O sinal de acionamento  $g1$ , que é o mesmo que  $g2$ , é gerado através da determinação das intersecções do

sinal triangular da portadora  $V_{cr}$  com o sinal de referência senoidal mostrado na equação abaixo (1).

$$v_r = V_r \text{ sen } \omega t \quad (1)$$

De modo semelhante, o sinal de acionamento  $g_4$  é gerado pela determinação da intersecção do sinal triangular da portadora  $v_{cr}$  com o sinal de referência senoidal negativo ( $v_r = -V_r \text{ sen } \omega t$ ). O algoritmo para geração de sinais de acionamento é semelhante ao do PWM uniforme, exceto pelo fato de o sinal de referência ser uma onda senoidal  $v_r = V_r \text{ sen } \omega t$ , em vez de um sinal CC. A tensão de saída é  $v_o = V_s(g_1 - g_4)$ .

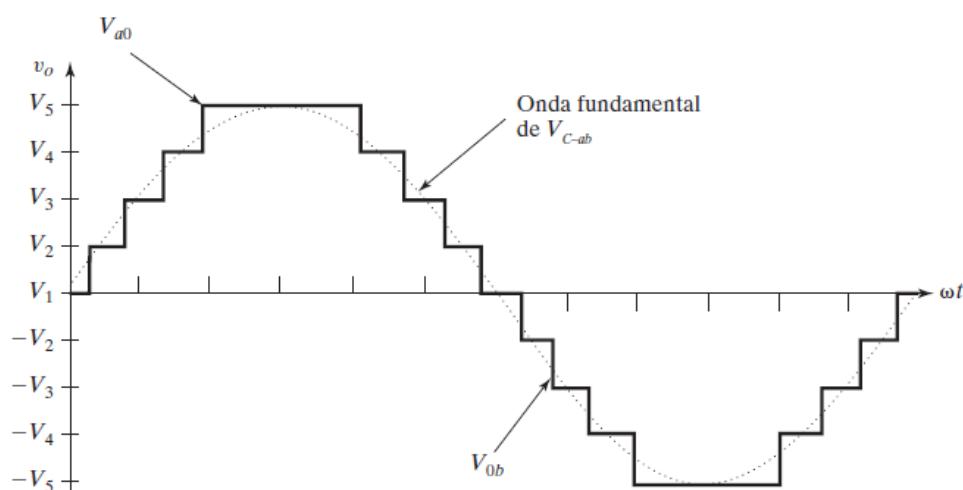
#### 2.1.6.2 Inversor Multinível

Os inversores do tipo fonte de tensão produzem uma tensão ou corrente de saída com níveis 0 ou  $\pm V_{CC}$ . Eles são conhecidos como inversores de dois níveis. De acordo com Rashid (2014), para se obter uma tensão de saída de qualidade ou uma forma de onda de corrente com uma quantidade mínima de conteúdo de ondulação, esses dispositivos necessitam de uma frequência de chaveamento elevada com várias estratégias de modulação por largura de pulso (*PWM – Pulse Width Modulation*). Em aplicações de potência e tensão altas, esses inversores de dois níveis têm, no entanto, algumas limitações para operar em alta frequência, principalmente por conta das perdas por chaveamento e restrições quanto às especificações dos dispositivos. Além disso, as chaves semicondutoras devem ser usadas de forma a evitar os problemas associados com as suas combinações série-paralelo, que são necessárias para aumentar a capacidade de lidar com altas tensões e correntes.

Rashid (2014) coloca que os inversores multiníveis têm atraído grande interesse nos setores de energia, transporte e energia renovável. Eles apresentam um novo conjunto de características que são muito adequadas para a compensação de potência reativa. Pode ser mais fácil produzir um inversor de potência e tensão altas com estrutura multinível por causa da maneira como os esforços de tensão no dispositivo são controlados na estrutura. Na figura 9 é possível observar um exemplo

de tensão de saída típica de um inversor multinível de cinco níveis. O aumento do número de níveis de tensão no inversor sem necessidade de especificações mais elevadas nos dispositivos individuais pode aumentar a faixa de potência. A estrutura única dos inversores multinível de fonte de tensão lhes permite alcançar tensões elevadas com baixas harmônicas sem o uso de transformadores ou chaves sincronizadas ligadas em série. À medida que o número dos níveis de tensão aumenta, o conteúdo harmônico das formas de onda da tensão de saída diminui significativamente. A entrada é CC e a saída, em termos ideais, deve ser uma onda senoidal. Os parâmetros de desempenho dos inversores multinível são semelhantes aos dos inversores PWM.

Figura 9: Tensão de saída típica de um inversor multinível de cinco níveis.



Fonte: Rashid (2014).

## 2.2 Motores

Nos motores, também chamado de máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando estes giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada (UMANS, 2014).

Um grupo dessas bobinas, conectadas em conjunto, é referido normalmente como enrolamento de armadura. Em geral, o termo enrolamento de armadura de uma máquina rotativa é usado para se referir a um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzam corrente alternada.

Segundo Umans (2014), em máquinas CA, tais como as síncronas ou as de indução, os enrolamentos de armadura alojam-se geralmente na parte estacionária do motor conhecida como estator, caso em que esses enrolamentos podem ser referidos também como enrolamentos de estator.

Em uma máquina CC, o enrolamento de armadura encontra-se na parte rotativa conhecida como rotor. O enrolamento de armadura de uma máquina CC consiste em muitas bobinas conectadas entre si para formar um laço fechado. Quando o rotor está girando, um contato mecânico rotativo (escova) é usado para fornecer corrente ao enrolamento de armadura.

Umans (2014) ainda coloca que, na maioria das máquinas rotativas, o estator e o rotor são feitos de aço elétrico e os enrolamentos são instalados em ranhuras alojadas nessas estruturas. O uso deste tipo de material, de alta permeabilidade, maximiza o acoplamento entre as bobinas e aumenta a densidade de energia magnética associada com a interação eletromecânica. Também permite que o projetista de máquinas dê forma aos campos magnéticos e distribua-os de acordo com as exigências de projeto de cada máquina em particular. O fluxo variável no tempo, presente nas estruturas da armadura dessas máquinas, tende a induzir correntes, conhecidas como correntes parasitas (ou corrente de Foucault), no aço elétrico. As correntes parasitas podem ser uma grande fonte de perdas nessas máquinas e podem reduzir significativamente o seu desempenho. Para minimizar os efeitos das correntes parasitas, a estrutura da armadura é construída muitas vezes com chapas delgadas de aço elétrico isoladas entre si.

Em algumas máquinas, tais como máquinas de relutância variável e motores de passo, o rotor não tem enrolamentos. Umans (2014) explica que a operação dessas máquinas depende da não uniformidade da relutância de entreferro, associada às variações de posição do rotor e das correntes variáveis no tempo que são aplicadas aos seus enrolamentos de estator. Em tais máquinas, tanto as estruturas do estator como as do rotor estão sujeitas a um fluxo magnético variável no tempo e, como resultado, ambas podem necessitar de chapas para reduzir as perdas por correntes parasitas.

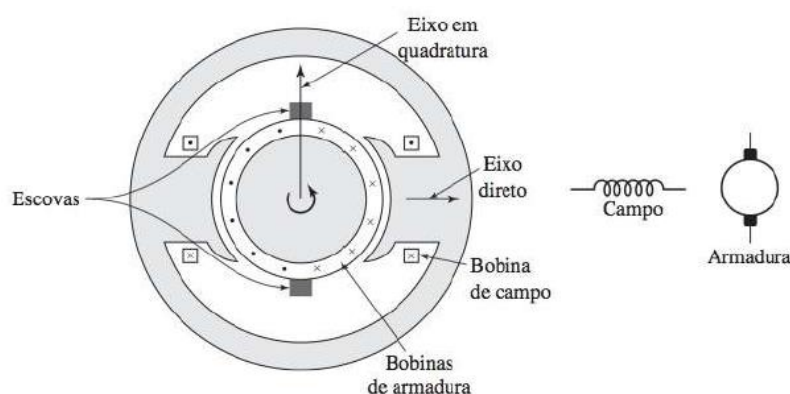
As máquinas elétricas rotativas assumem diversas formas e são conhecidas por diversos nomes: CC, síncronas, de ímã permanente, de indução, de relutância variável, de histerese, sem escovas (*brushless*) e assim por diante. Embora essas máquinas aparentem ser bastante diferentes, os princípios físicos que regem o seu comportamento são muito similares e frequentemente é útil pensar nelas em termos de um mesmo ponto de vista físico. Por exemplo, a análise de uma máquina CC mostra que, associadas tanto ao rotor como ao estator, há distribuições fixas de fluxo magnético no espaço e que a característica de produção de torque da máquina CC provém da tendência desses fluxos a se alinhar entre si. Uma máquina de indução, apesar de muitas diferenças fundamentais, trabalha exatamente de acordo com o mesmo princípio. De acordo com Umans (2014), é possível identificar distribuições de fluxo associadas ao rotor e o estator. Embora não sejam estacionárias, mas estejam na realidade girando em sincronismo, exatamente como no motor CC, elas estão distanciadas entre si por uma separação angular constante, e o conjugado (torque) é produzido pela tendência dessas distribuições de fluxo a se alinhar entre si.

### 2.2.1 Motor CC

As máquinas CC caracterizam-se por sua versatilidade. Umans (2014) destaca que, por meio das diversas combinações de enrolamentos de campo, excitados em derivação, série ou independentes, elas podem ser projetadas de modo a apresentar uma ampla variedade de características de tensão x corrente ou de velocidade x conjugado, para operações dinâmicas e em regime permanente. Devido à facilidade com que podem ser controladas, sistemas de máquinas CC têm sido usados com frequência em aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidades ou de controle preciso da saída do motor. Ainda de acordo com Umans (2014), a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos sistemas de acionamento CA desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas CC em aplicações antes associadas quase exclusivamente à estas últimas. Entretanto, a versatilidade das máquinas CC, em combinação com a relativa simplicidade dos seus sistemas de acionamento, irá assegurar o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações.

As características essenciais de uma máquina CC estão mostradas esquematicamente na figura 10. O estator tem polos salientes e é excitado por uma ou mais bobinas de campo. A distribuição do fluxo criado pelos enrolamentos de campo no entreferro é simétrica em relação à linha central dos polos de campo. Esse eixo é denominado eixo de campo ou eixo direto. Esse eixo é denominado eixo de campo ou eixo direto.

Figura 10: Características básicas de uma máquina CC.



Fonte: Umans (2014).

A tensão CA, gerada em cada bobina de armadura rotativa, é convertida em CC nos terminais externos da armadura por meio de um comutador rotativo e de escovas estacionárias, às quais os condutores da armadura estão conectados. A combinação de comutador e escovas forma um retificador mecânico, resultando em uma tensão CC de armadura e uma onda de FMM (força magneto-motriz) de armadura que está fixa no espaço.

As escovas estão posicionadas de modo que a comutação ocorra quando os lados da bobina estão na zona neutra, a meio caminho entre os polos de campo. O eixo da onda de FMM de armadura estará então distanciado 90 graus elétricos do eixo dos polos de campo, isto é, no eixo em quadratura. Na representação esquemática mostrada na figura 10 as escovas estão mostradas no eixo em quadratura porque essa é a posição das bobinas às quais elas estão conectadas. A onda de FMM de armadura estará então ao longo do eixo das escovas, como está mostrado. A posição geométrica das escovas em uma máquina real localiza-se a aproximadamente 90 graus elétricos da posição mostrada no diagrama esquemático, devido à forma das conexões de terminação até o comutador (UMANS, 2014).

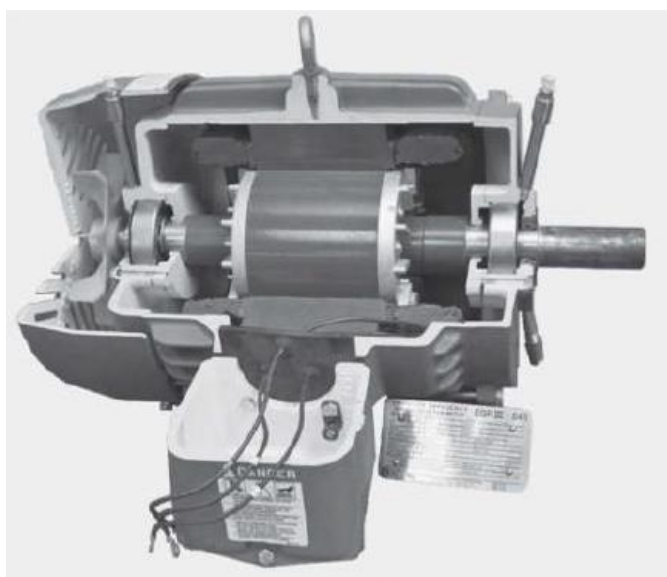


### 2.2.2 Motor CA

De acordo com Umans (2014), as máquinas CA tradicionais classificam-se, basicamente, em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas diretamente na parte estacionária do motor através de contatos rotativos. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator.

Em uma máquina de indução, os enrolamentos do estator são basicamente os mesmos de uma máquina síncrona. Entretanto, os enrolamentos do rotor são eletricamente ligados e muitas vezes não apresentam conexões externas. As correntes são induzidas por ação de um transformador a partir dos enrolamentos do estator. Uma vista em corte longitudinal de um motor de indução com gaiola de esquilo (rotor) está mostrada na figura 11. Os "enrolamentos" do rotor são, na realidade, barras sólidas de alumínio que são fundidas nas ranhuras do rotor e colocadas em curto-circuito por anéis de alumínio fundido localizados em cada extremidade do rotor. Esse tipo de construção de rotor resulta em motores de indução que são relativamente baratos e altamente confiáveis, fatores que contribuem à sua imensa popularidade e ampla aplicação (UMANS, 2014).

Figura 11: Motor de indução CA.



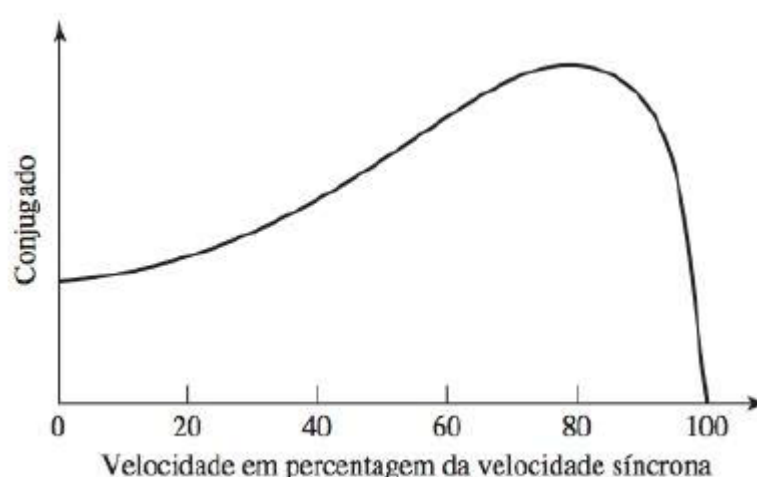
Fonte: Umans (2014).

Diferentemente de uma máquina síncrona, na qual um enrolamento de campo no rotor é excitado com corrente CC e o rotor gira em sincronismo com a onda de fluxo produzida pelas correntes CA de armadura, os enrolamentos do rotor de uma máquina de indução não são excitados por uma fonte externa. Em vez disso, correntes são induzidas nos enrolamentos em curto-circuito do rotor quando este atravessa a onda de fluxo da armadura sincronicamente. Assim, as máquinas de indução são máquinas assíncronas e produzem conjugado (torque) apenas quando a velocidade do rotor é diferente da velocidade síncrona.

Umans (2014) destaca que, embora o rotor opere de forma assíncrona, a onda de fluxo produzida pelas correntes induzidas do rotor gira em sincronismo com a onda de fluxo do estator. De fato, isso é um requisito e está coerente com a capacidade de uma máquina de indução produzir conjugado líquido. Os motores de indução operam com velocidades abaixo da velocidade mecânica síncrona, caso em que o fluxo de armadura no motor de indução está à frente daquele do rotor, produzindo um conjugado eletromecânico que puxa o rotor como no caso de um motor síncrono.

Uma curva característica comum de velocidade versus conjugado para um motor de indução está mostrada na figura 12.

Figura 12: Curva velocidade x conjugado de um motor de indução.



Fonte: Umans (2014).

Como as correntes do rotor são produzidas por indução, uma máquina de indução pode ser vista com um transformador genérico no qual a potência elétrica é

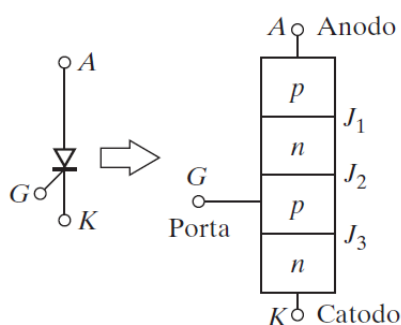
transformada entre o rotor e o estator juntamente a uma mudança de frequência e um fluxo de potência mecânica. Embora as máquinas de indução sejam usadas basicamente como motores, estes geradores de indução são bem adequados em aplicações que envolvem energia eólica.

## 2.3 Tiristores

Os tiristores compõem uma família de dispositivos semicondutores de potência. Eles são amplamente utilizados em circuitos eletrônicos de potência e operados como chaves biestáveis, passando do estado de não condução para o de condução. Podem ser considerados chaves ideais para muitas aplicações, mas, na prática, apresentam certas características e limitações.

O tiristor é um dispositivo semicondutor de quatro camadas de estrutura PNPN com três junções  $pn$ . Ele tem três terminais: anodo, catodo e porta (gatilho - *gate*). A figura 13 mostra o símbolo do tiristor e a seção transversal das três junções  $pn$ . Os tiristores são fabricados por difusão.

Figura 13: Tiristor (simbologia e seção transversal).



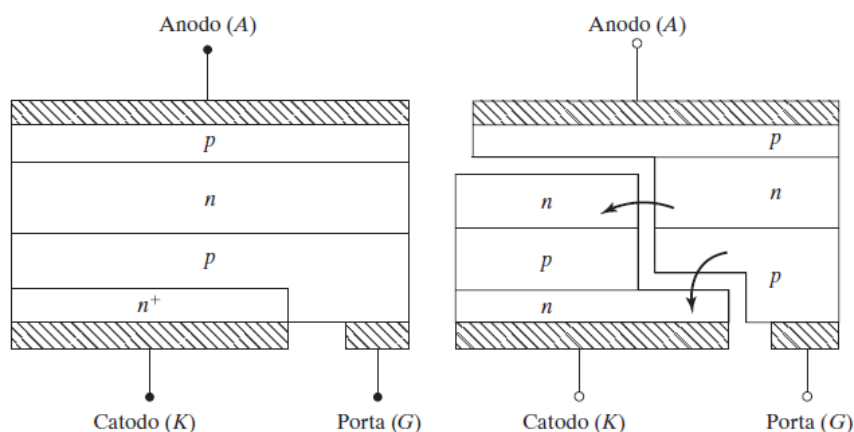
Fonte: Rashid (2014).

Os tiristores convencionais são projetados sem a capacidade de desligamento controlado pela porta e, assim, conseguem passar de seu estado de condução para o de não condução somente quando sua corrente é levada a zero por outros meios. Os tiristores de desligamento pela porta (GTO's) são projetados para conseguir controle tanto de entrada em condução quanto de desligamento.

Conforme descrito por Rashid (2014), os tiristores têm perdas menores no estado de condução e maior capacidade de potência quando comparados aos transistores. Por outro lado, os transistores geralmente apresentam desempenho superior no chaveamento em termos de maior rapidez e perdas menores por comutação. Tem havido um contínuo avanço no sentido de se obter dispositivos com as melhores características dos dois tipos (isto é, perdas menores por chaveamento e no estado ligado, e ao mesmo tempo uma maior capacidade de potência).

A seção transversal de um tiristor é ilustrada na figura 14, e ela pode ser dividida em duas seções: NPN e PNP. Quando a tensão de anodo é positiva em relação à de catodo, as junções  $J_1$  e  $J_3$  estão diretamente polarizadas. A junção  $J_2$  está inversamente polarizada, e somente uma pequena corrente de fuga flui do anodo para o catodo. Diz-se, então, que o tiristor está na condição de bloqueio direto ou em estado desligado (*off-state*), e a corrente de fuga é conhecida como corrente de estado desligado,  $I_D$ . Se a tensão anodo-catodo,  $V_{AK}$ , for aumentada para um valor elevado o suficiente, a junção inversamente polarizada  $J_2$  se rompe. Isso é conhecido como ruptura por avalanche, e a tensão correspondente é chamada de tensão de ruptura direta,  $V_{BO}$ . Como as junções  $J_1$  e  $J_3$  já estão diretamente polarizadas, há um movimento livre de portadores pelas três junções, o que resulta em uma grande corrente de anodo no sentido direto. O dispositivo está, então, no estado de condução ou estado ligado (*on-state*). A queda de tensão se deve à queda da resistência nas quatro camadas e é pequena, em geral de 1 V.

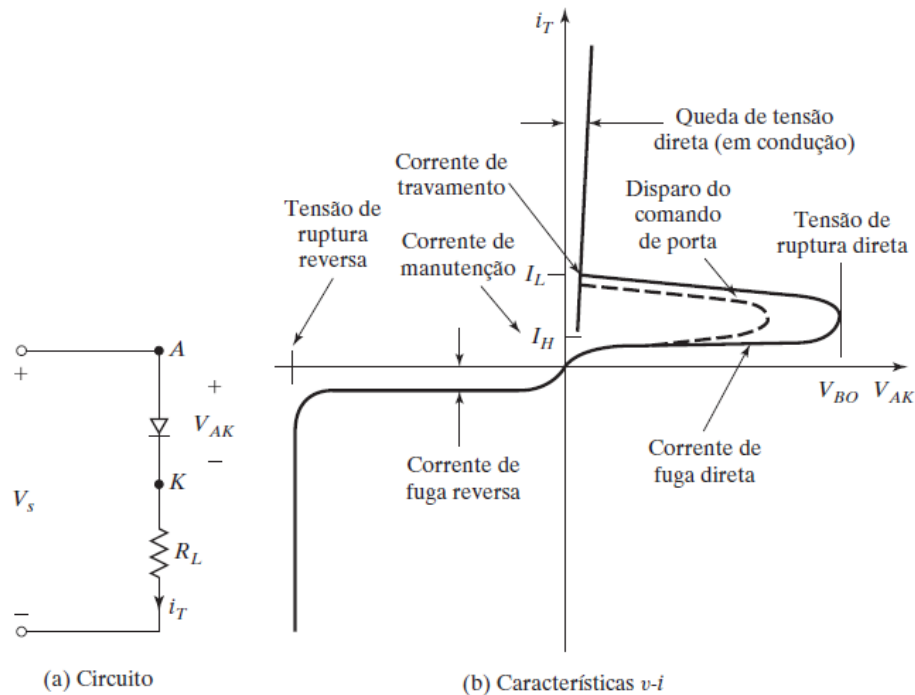
Figura 14: Seção transversal de um tiristor.



Fonte: Rashid (2014).

No estado ligado, a corrente de anodo é limitada pela impedância ou pela resistência externa  $R_L$ , como mostra a figura 15. A corrente de anodo deve ser superior a um valor conhecido como corrente de travamento (*latching current*),  $I_L$ , para manter a quantidade necessária do fluxo de portadores na junção; caso contrário, o dispositivo volta para a condição de bloqueio à medida que a tensão anodo-catodo é reduzida. A corrente de travamento,  $I_L$ , é a mínima corrente de anodo necessária para manter o tiristor no estado de condução imediatamente após ele ter sido ligado e o sinal de acionamento ter sido removido. A curva característica  $v-i$  típica de um tiristor também é indicada na figura 15.

Figura 15: Circuito básico de um tiristor e curva característica  $v \times i$ .



Fonte: Rashid (2014).

Quando um tiristor conduz, ele se comporta como um diodo em condução, e não há controle sobre o dispositivo. Ele continua a conduzir porque não existe camada de depleção na junção  $J_2$  por conta do movimento livre de portadores. No entanto, se a corrente direta de anodo for reduzida abaixo de um nível conhecido como corrente de manutenção (*holding current*),  $I_H$ , uma região de depleção se desenvolverá em torno da junção  $J_2$  em virtude do número reduzido de portadores, e o tiristor passará para a condição de bloqueio. A corrente de manutenção é da

ordem de miliamperes (mA), e é menor do que a de travamento  $I_L$ . Ou seja,  $I_L > I_H$ . A corrente de manutenção,  $I_H$ , é a corrente mínima de anodo que mantém o tiristor no estado ligado.

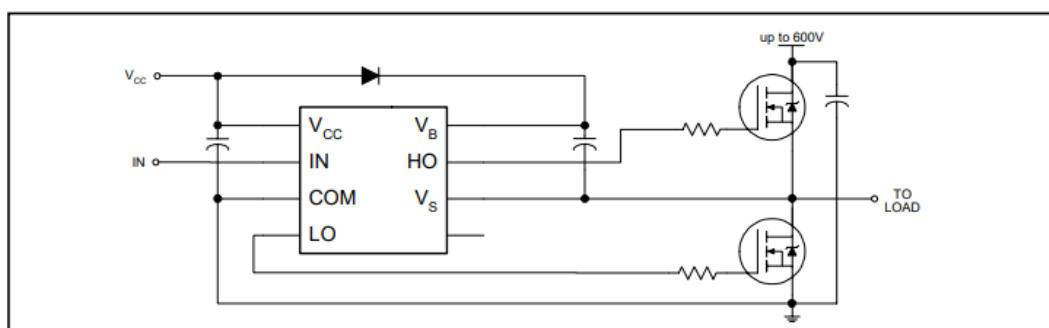
Quando a tensão de catodo é positiva com relação à do anodo, a junção  $J_2$  está diretamente polarizada, mas as junções  $J_1$  e  $J_3$  estão inversamente polarizadas. Isso funciona como dois diodos ligados em série com tensão reversa sobre eles. O tiristor está, então, no estado de bloqueio reverso, e uma corrente reversa de fuga conhecida como corrente reversa,  $I_R$ , flui através do dispositivo.

Um tiristor pode ser ligado a partir do aumento da tensão direta  $V_{AK}$  acima de  $V_{BO}$ , mas esse procedimento pode ser destrutivo. Na prática, a tensão direta é mantida abaixo de  $V_{BO}$ , e o tiristor é ligado pela aplicação de uma tensão positiva entre a porta e o catodo. Quando um tiristor é ligado por um sinal de acionamento e sua corrente de anodo é maior do que a de manutenção, o dispositivo continua a conduzir por conta da realimentação positiva, mesmo que o sinal de acionamento seja removido. Um tiristor é um dispositivo de retenção ou travamento.

## 2.4 IR2111 – *Bootstrap*

O circuito de *bootstrap* é responsável por gerar o tempo “morto” (*dead time*) entre os acionamentos dos MOSFET's em uma ponte H, utilizada no inversor de frequência. Para isso, é utilizado o circuito integrado IR2111, cuja aplicação típica pode ser vista na figura 16.

Figura 16: Aplicação típica do IR2111.



Fonte: Datasheet IR2111 (*International Rectifier*, 2019).

O objetivo é impedir que dois MOSFET's sejam acionados ao mesmo tempo de maneira indesejável, o que geraria um curto circuito na alimentação.

## 2.5 Microcontrolador – Arduino Nano

O Arduino Nano é uma placa pequena, completa e fácil de usar, baseada na família de microcontroladores ATmega328P. Possui mais ou menos as mesmas funcionalidades do Arduino Uno, mas em um encapsulamento diferente a com algumas limitações de pinos de entrada e saída.

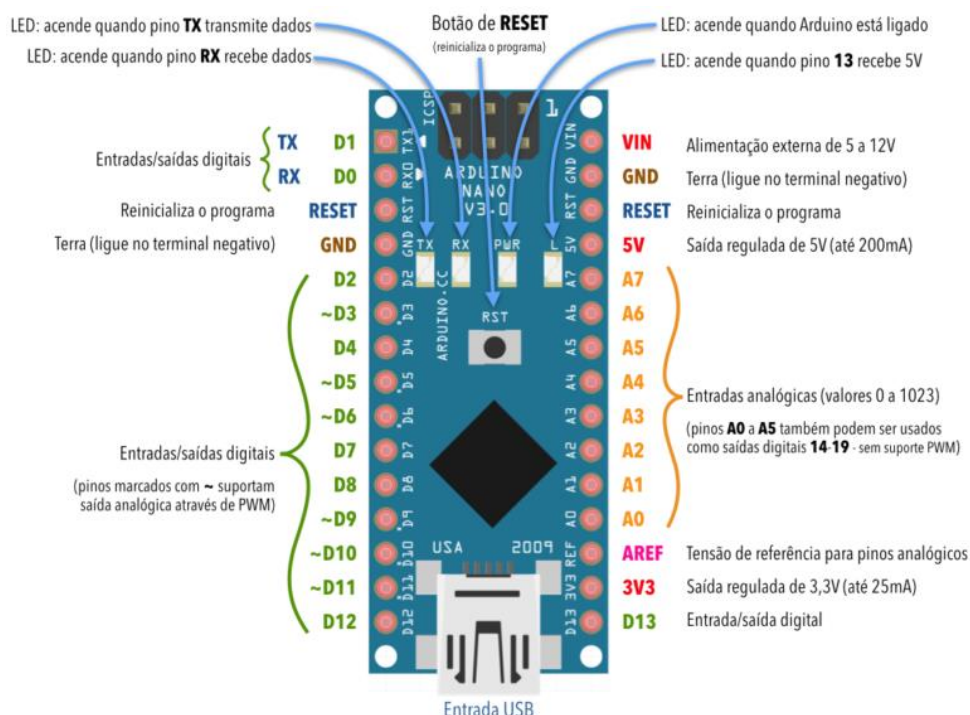
Cada um dos 14 pinos digitais no Nano pode ser usado como entrada ou saída, usando as funções *pinMode ()*, *digitalWrite ()* e *digitalRead ()*. Eles operam a 5 volts. Cada pino pode fornecer ou receber no máximo 40 mA e possui um resistor de *pull-up* interno (desconectado por padrão) de 20-50 kΩ. Além disso, alguns pinos possuem funções especializadas:

- Serial: pinos 0 (RX) e 1 (TX). Utilizados para receber (RX) e transmitir (TX) dados seriais TTL. Esses pinos são conectados aos pinos correspondentes do chip serial *USB-to-TTL*.
- Interrupções externas: pinos 2 e 3. Esses pinos podem ser configurados para acionar uma interrupção em nível baixo, em uma borda de descida, em uma borda de subida ou em uma mudança de valor.
- PWM: pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11. Fornece saída PWM de 8 bits com a função *analogWrite ()*.
- SPI: pinos 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Esses pinos suportam a comunicação SPI, que, embora fornecida pelo hardware subjacente, atualmente não está incluída na linguagem do Arduino.
- LED: pino 13. Há um LED embutido conectado ao pino digital 13. Quando o pino está em nível alto, o LED está aceso, e quando o pino está em nível baixo, o LED está apagado.

O Arduino Nano possui 8 entradas analógicas, cada uma com 10 bits de resolução (ou seja, 1024 valores diferentes). Por padrão, elas medem de 0 a 5 volts, embora seja possível alterar o nível alto de seu intervalo usando a função *analogReference ()*. Os pinos analógicos 6 e 7 não podem ser usados como pinos digitais.

A figura 17 ilustra um esquemático dos pinos do Arduino Nano com um resumo de suas funcionalidades:

Figura 17: Esquemático do Arduino Nano.



Fonte: Arduino Store (2019).

O Arduino Nano pode ser alimentado via conexão USB Mini-B, fonte de alimentação externa não regulada de 6 a 20 V (pino 30) ou fonte de alimentação externa regulada de 5 V (pino 27). A fonte de energia é selecionada automaticamente para a fonte de tensão mais alta.

## 2.6 Bancadas Didáticas Comerciais

Existem no mercado algumas empresas voltadas ao desenvolvimento de bancadas e kits didáticos para as mais variadas áreas de atuação dentro da Engenharia, como a eletrônica de potência.

A De Lorenzo, por exemplo, fundada em 1951, é uma empresa líder italiana e uma das primeiras no mundo em design, desenvolvimento e produção de equipamentos de treinamento técnico e profissional. A Engenharia Elétrica está entre os mais diversos campos em que a De Lorenzo desenvolve equipamentos.

Dentro do ramo da eletrônica de potência, a De Lorenzo desenvolveu componentes industriais montados em painéis didáticos, que abrange as principais configurações de circuitos eletrônicos de potência, como conversores CA-CC



(retificadores), conversores CA-CA (CA fixa para CA variável na mesma frequência de entrada ou para CA com frequência variável), conversores CC-CC (*choppers*), conversores CC-CA (inversores) e aplicações como acionamento de motores CC e CA. Estes componentes geralmente são dedicados ao ensino médio e aos primeiros anos da universidade. Um exemplo de bancada didática da De Lorenzo é mostrado na figura 18.

Figura 18: Bancada didática da De Lorenzo.



Fonte: De Lorenzo (2019)

Outra empresa que trabalha, entre outras coisas, com o desenvolvimento de bancadas e kits para eletrônica de potência é a Zilocchi. Atuando no mercado desde 2003, tanto na indústria como no mercado educacional, ela desenvolve projetos e equipamentos para empresas da área da Engenharia.

Entre os serviços oferecidos pela Zilocchi, destacam-se a fabricação de relés supervisores de bobinas para disjuntores, fontes e trips capacitivos, bornes para painéis, equipamentos para laboratórios escolares (módulos / kits didáticos), entre outros produtos e soluções para a indústria.

O módulo didático para estudo de eletrônica de potência da Zilocchi, que pode ser visto na figura 19, é composto por um rack metálico de 19 polegadas, no qual podem ser acoplados simultaneamente vários cartões para realização das experiências. O conjunto completo é capaz de abordar, por exemplo, retificadores de

meia onda, retificadores com tap central, retificadores de onda completa, ponte trifásica de diodos e de tiristores, sequência de comutação, filtro capacitivo, influência de cargas indutivas, gradadores monofásicos e trifásicos, controle do *duty cycle* do PWM, inversor monofásico com onda quadrada e com onda senoidal em 60 Hz, entre outros.

Figura 19: Módulo de eletrônica de potência Zilocchi.



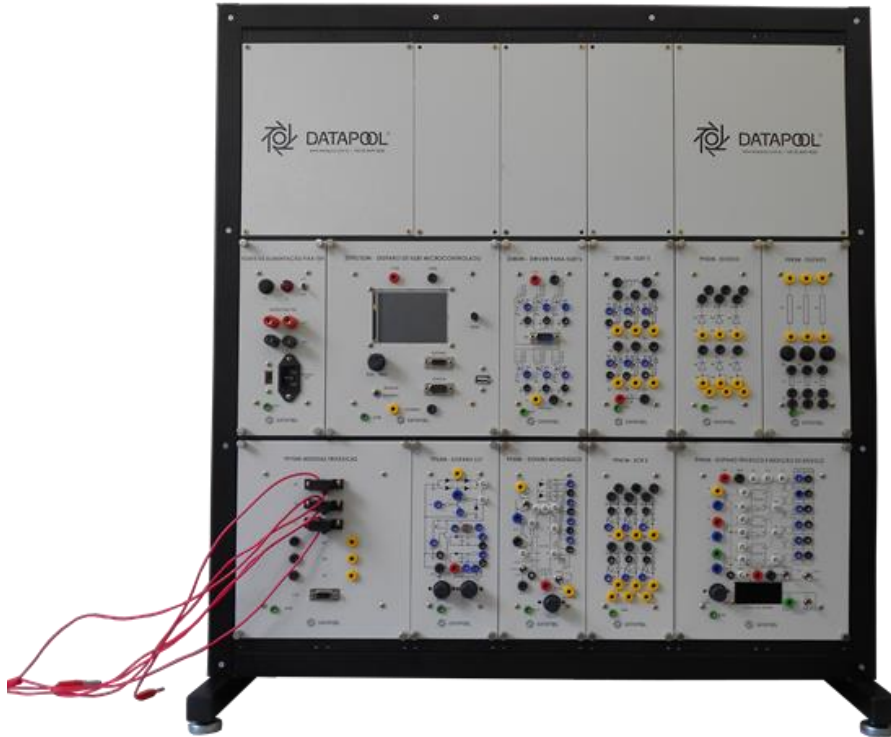
Fonte: Zilocchi (2019).

A Datapool é um terceiro exemplo de companhia que se dedica ao desenvolvimento e fabricação de módulos didáticos para a difusão de conhecimento técnico em diversas áreas, entre elas a eletroeletrônica (eletricidade, eletrônica básica, analógica, digital e de potência).

A Datapool oferece diversos kits didáticos para executar todo tipo de experiências na área de eletrônica de potência, como controle, disparo, cargas e conversores. Os seus equipamentos didáticos são facilmente interligáveis, o que permite que a configuração seja feita pelo usuário por conexão e interligação entre os módulos e cartões através de cabos com pinos banana. Alguns de seus módulos são: módulo de retificadores de potência, módulo de disparo trifásico de tiristores e medição de ângulo, módulo de disparo monofásico com TCA785, módulo inversor

de frequência e módulo *softstarter*. Uma bancada com módulos Datapool pode ser vista na figura 20.

Figura 20: Bancada com módulos Datapool.



Fonte: Datapool (2019).

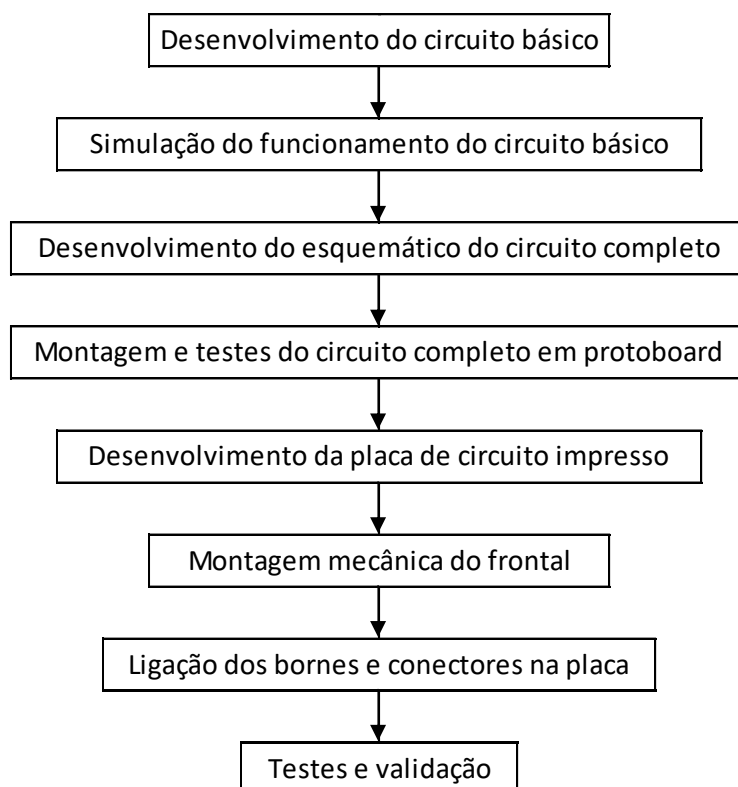
Os protótipos desenvolvidos no decorrer deste trabalho visam atender estas áreas de acionamentos elétricos. A proposta foi criar alternativas de fácil utilização e baixo custo para suprir o controle de cargas.

### 3 METODOLOGIA

Os dispositivos desenvolvidos no decorrer deste projeto foram montados em protoboard e produzidos em placas de circuito impresso formando protótipos que visam atender alguns requisitos básicos. De uma maneira geral, a *softstarter* e o inversor de frequência tratam-se de circuitos híbridos compostos por um microcontrolador responsável pela geração de sinais e controle das etapas digitais, e estágios de controle analógicos com TCA785, tiristores (SCR's e TRIAC's), transistores, MOSFET's e demais componentes passivos necessários para a execução das tarefas, enquanto o retificador controlado monofásico em ponte é totalmente analógico tendo como base o controle do TCA785.

O fluxograma 1 apresenta um panorama geral de como foram desenvolvidos cada um dos três dispositivos que compõem este projeto – o retificador controlado monofásico em ponte, a *softstarter* para motor monofásico e o inversor de frequência também monofásico.

Fluxograma 1: Fluxo do desenvolvimento dos dispositivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 Requisitos

Os dispositivos desenvolvidos respeitam alguns requisitos relacionados às suas dimensões, cargas (lâmpadas, resistores, motores, etc) e demais características relevantes, que serão descritas no decorrer do trabalho.

#### 3.1.1 Dimensões

Os dispositivos desenvolvidos respeitam as dimensões para encaixe nas bancadas didáticas da WEG disponíveis no laboratório de eletrônica de potência da Unisinos. A figura 21 traz o exemplo de uma destas bancadas, enquanto o Anexo B deste relatório mostra um exemplo de placa de identificação das bancadas WEG.

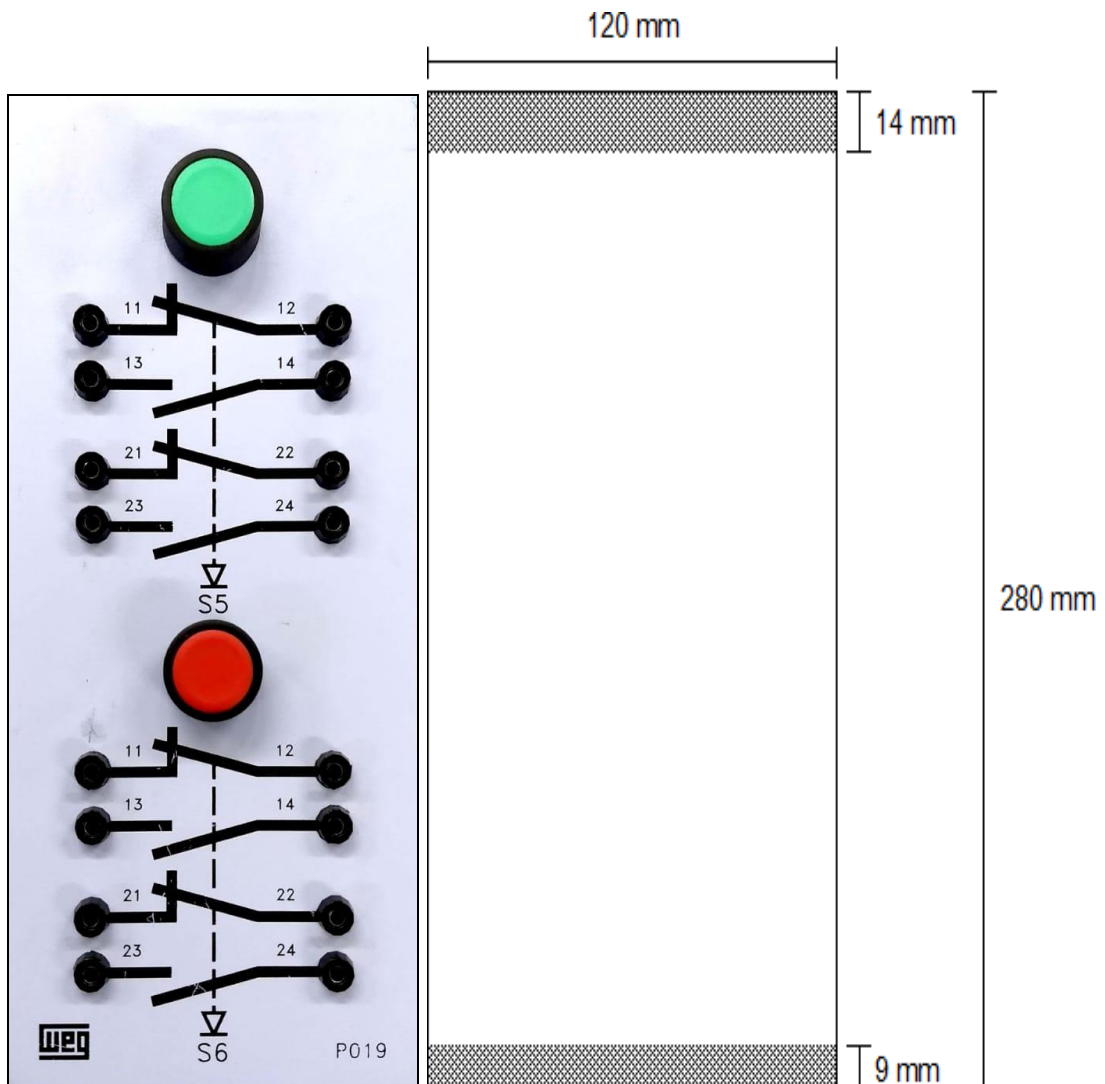
Figura 21: Bancada didática WEG do laboratório da Unisinos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As bancadas possuem três fileiras para a colocação de placas com dispositivos (botoeiras, contadoras, sinalizadores, etc). As placas são retangulares nas dimensões de 120 mm de largura x 280 mm de altura. Deve-se respeitar também as áreas de encaixe na bancada que contemplam 14 mm na parte superior da placa e 9 mm na parte inferior. A figura 22 ilustra um exemplo de placa de botões padrão para este tipo de bancada e as suas dimensões, conforme citadas anteriormente.

Figura 22: Exemplo de placa de botões e dimensões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada uma das três fileiras das bancadas WEG comporta até 8 placas padrão, sendo que a primeira fileira possui fixa a placa contendo seu disjuntor geral, botão

de emergência, saída das fases e sinalização de bancada energizada. Algumas placas que necessitam de mais espaço possuem largura superior a 120 mm, mas sempre um múltiplo inteiro deste valor. A profundidade máxima que a placa do dispositivo pode possuir é de 70 mm.

Além de respeitar as dimensões das placas e as áreas livres para encaixe nas bancadas, estão previstos espaços para a colocação de bornes para entrada e saída de tensões e para a coleta de sinais.

### 3.1.2 Motor Universal – Carga da *Softstarter*

Para a carga da *softstarter* foi escolhido um motor do tipo universal, modelo SSR-100D, da marca *Sun Special*, que possui baixa potência (aproximadamente 100 W) e está disponível no laboratório de elétrica da Unisinos. Este motor pode ser ligado na rede de corrente contínua ou na rede de corrente alternada, uma vez que os campos no estator e no rotor se invertem simultaneamente quando a corrente inverte o seu sentido, fazendo com que a rotação fique sempre a mesma. Suas especificações estão a seguir e uma imagem do motor pode ser vista na figura 23:

- Tensão de trabalho: 220 V;
- Potência: ~ 100 W;
- Corrente nominal: 0,45 A;
- Velocidade nominal: 6000 RPM;
- Frequência: 60 Hz.

Figura 23: Motor universal utilizado como carga da *softstarter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Motor Monofásico – Carga do Inversor de Frequência

Para a carga do inversor de frequência foi escolhido um motor de indução monofásico de baixa potência, modelo JB2N021N da marca *Universal Electric*, disponível no laboratório de elétrica da Unisinos, cuja imagem pode ser vista na figura 24. Suas características são as seguintes:

- Tensão de trabalho: 120 V;
- Corrente nominal: 0,77 A;
- Velocidade nominal: 1440 / 1740 RPM;
- Frequência: 50 / 60 Hz.

Figura 24: Motor monofásico utilizado como carga do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

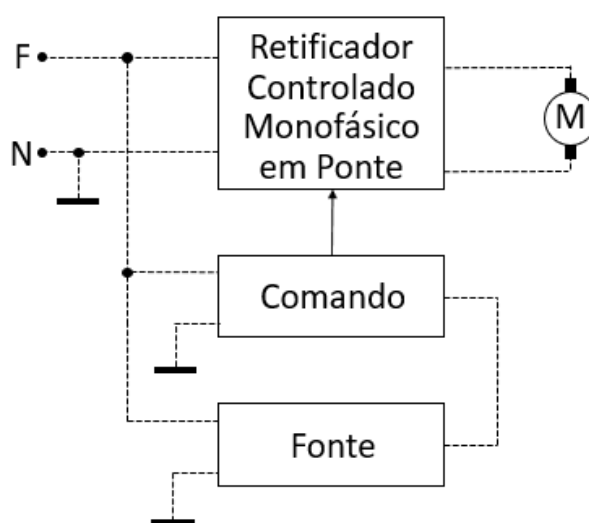
### 3.2 Retificador Controlado Monofásico em Ponte

O retificador controlado monofásico em ponte desenvolvido no decorrer deste projeto possui, basicamente, quatro etapas principais: o controle do ângulo de



disparo dos tiristores, realizado pelo circuito integrado TCA785; o acoplamento magnético, realizado por 4 transformadores de pulso; a geração de um sinal em alta frequência para o funcionamento dos transformadores de pulso; e o estágio de potência, composto por quatro tiristores ligados em ponte. A figura 25 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido para o retificador controlado monofásico em ponte.

Figura 25: Diagrama de blocos do retificador controlado monofásico em ponte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

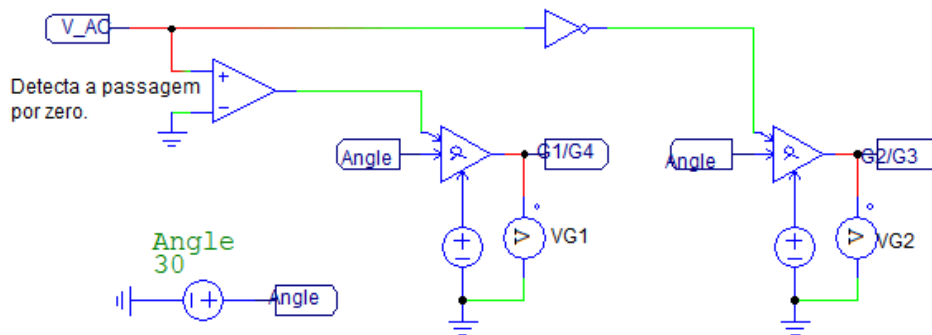
O retificador controlado monofásico em ponte foi desenvolvido e testado tendo como carga uma lâmpada de tensão nominal 12 V e potência de, aproximadamente, 10 W. Foi utilizada uma chave (*ON/OFF*) no formato botão para ligar o sistema e dois potenciômetros para ajuste dos sinais de rampa e controle, responsáveis por determinar o ângulo de disparo dos tiristores.

### 3.2.2 Modelagem no *Software* PSIM

A base do retificador controlado monofásico em ponte foi modelada para simulação através do *software* PSIM. A etapa de comando foi desenvolvida modelando o funcionamento do TCA785 através de um comparador para detecção da passagem da senóide por zero, comparando a tensão senoidal em relação ao terra, e entregando a onda retangular resultante ao pino de sincronismo do controlador alpha. É colocado um nível positivo no pino de *enable* para acionar o

controlador e um sinal CC equivalente ao ângulo alpha (ângulo de disparo) no pino correspondente. A saída do controlador alpha é conectada ao pino *gate* dos tiristores. Este conjunto é repetido para o outro semiciclo da senoide utilizando-se uma porta inversora na saída do detector de passagem por zero. O circuito de comando modelado através do *software* PSIM pode ser visto na figura 26.

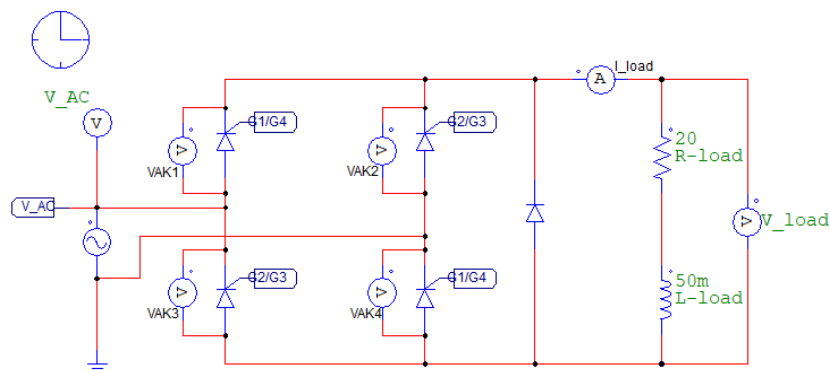
Figura 26: Circuito de comando do retificador monofásico modelado através do *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa de potência contém a fonte de alimentação CA e os quatro tiristores ligados em configuração ponte, de modo que cada par de tiristores conduz em um semiciclo da senoide de entrada. A carga foi modelada como um resistor de 20  $\Omega$  e um indutor de 50 mH para simular uma carga indutiva. O circuito de potência modelado através do *software* PSIM pode ser visto na figura 27.

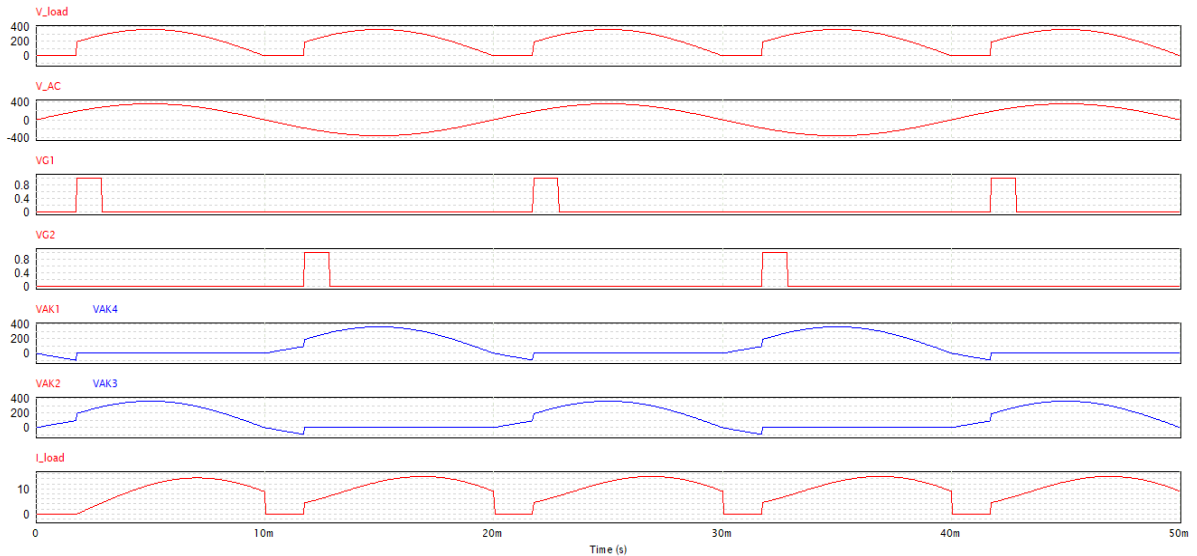
Figura 27: Circuito de potência do retificador monofásico modelado através do *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a simulação do circuito, algumas formas de onda de interesse foram plotadas. Podem ser vistos, na figura 28, os gráficos da tensão sobre a carga, tensão AC de entrada, pulsos de disparo dos tiristores, tensões sobre os tiristores e corrente sobre a carga, para um ângulo de disparo de  $30^\circ$ .

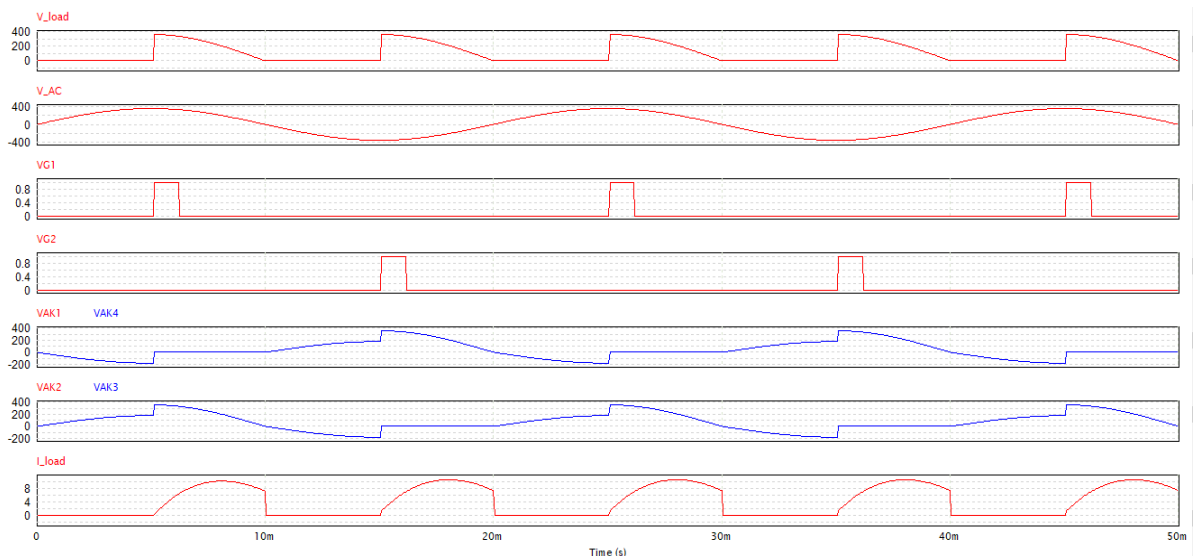
Figura 28: Formas de onda para um ângulo de disparo de  $30^\circ$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 29, por sua vez, apresenta as forma de onda de interesse para um ângulo de disparo de  $90^\circ$ .

Figura 29: Formas de onda para um ângulo de disparo de  $90^\circ$ .



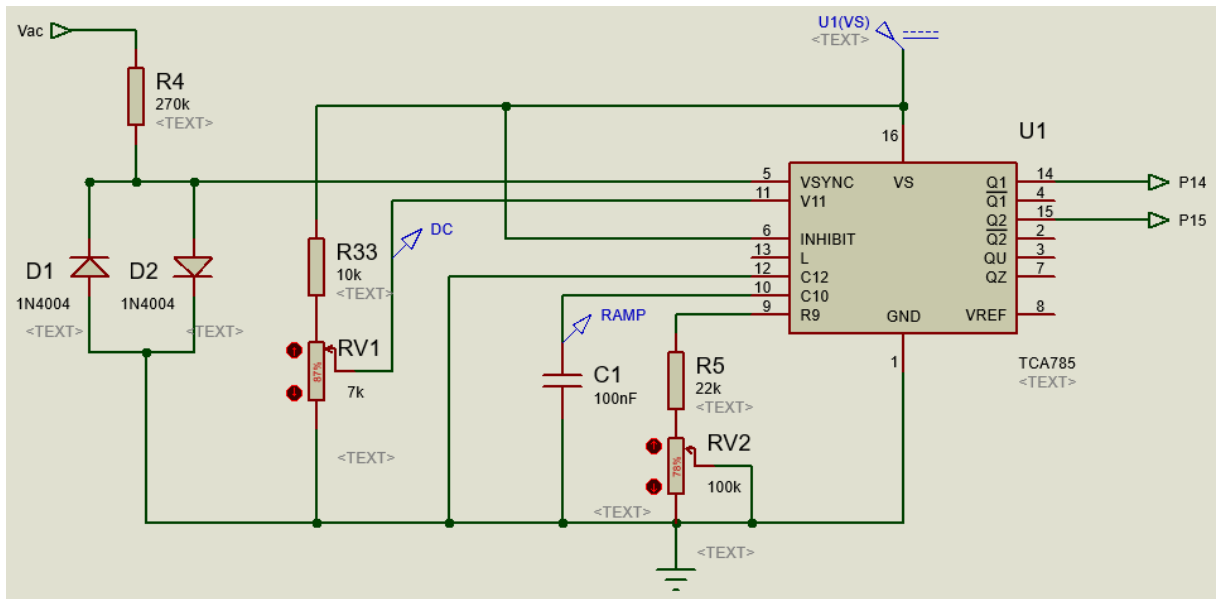
Fonte: Elaborado pelo autor.

As formas de onda ilustram a tensão sobre a carga ( $V_{load}$ ) para dois diferentes ângulos de disparo ( $30^\circ$  - figura 28 e  $90^\circ$  - figura 29). Quando comparada com a tensão de alimentação  $V_{AC}$ , é possível observar que a tensão sobre a carga está retificada e sendo chaveada pelos MOSFET's tanto no semiciclo negativo quanto no positivo. Isto ocorre devido à condução aos pares dos MOSFET's (em um semiciclo atuam G1 e G4 e no outro atuam G2 e G3). Os sinais  $VG1$  e  $VG2$  apresentam os trens de pulsos defasados  $180^\circ$  entre si, que seriam as saídas 14 e 15 do TCA785. As formas de onda  $VAK1$  e  $VAK4$  representam a tensão sobre os MOSFET's 1 e 4, respectivamente (as ondas estão sobrepostas pois os sinais são iguais), enquanto as formas de onda  $VAK2$  e  $VAK3$  representam a tensão sobre os MOSFET's 2 e 3, respectivamente (as ondas também estão sobrepostas pois os sinais são iguais). Por último temos a forma de onda da corrente sobre a carga, que inicia-se no momento do pulso e se encerra quando ocorre a passagem por zero da alimentação CA. O sinal é cortado ali devido à presença do diodo de roda livre, que impede que ocorra um continuidade na condução, que aconteceria devido ao caráter indutivo da carga.

### 3.2.3 Projeto do Circuito no *Software* Proteus

O circuito do retificador monofásico de onda completa em ponte também foi simulado através do *software* Proteus. O circuito de comando foi desenvolvido baseado no TCA785. O sinal de sincronismo é obtido a partir da rede de alimentação através de um resistor  $270\text{ k}\Omega$  ligado ao pino 5. Um comparador detecta a passagem por zero da tensão de alimentação e informa ao registrador de sincronismo. Este registrador controla um gerador de rampa, composto por um capacitor de  $100\text{ nF}$  ligado ao pino 10, o qual é carregado por uma corrente constante determinada por uma resistência variável ligada ao pino 9. O tempo de subida da rampa é determinado pela combinação RC. Quando a tensão de rampa  $V10$  excede a tensão de controle  $V11$ , um sinal é enviado a lógica. Dependendo da magnitude da tensão de controle  $V11$ , o ângulo de disparo  $\alpha$  pode ser deslocado numa faixa de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Os sinais pulsantes de saída são obtidos nos pinos 14 e 15. A figura 30 apresenta o esquemático deste circuito.

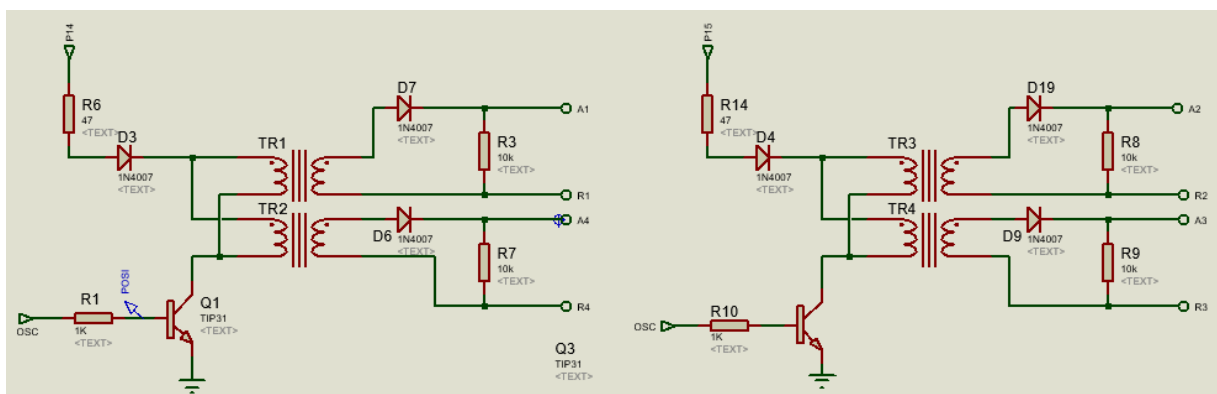
Figura 30: Circuito de comando do retificador monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito de acoplamento magnético para isolar a etapa de comando da etapa de potência foi desenvolvido com quatro transformadores de pulso 1:1, sendo dois conjuntos idênticos, cada um com um par de transformadores recebendo cada um dos sinais pulsantes provenientes do TCA785. O sinal passa por um resistor de baixa impedância, um diodo e atravessa a bobina do primário, fazendo com que o campo magnético gerado induza o pulso na bobina do secundário. Este sinal passará por um diodo e será direcionado aos pinos de *gate* dos tiristores. Este circuito de acoplamento pode ser visto na figura 31.

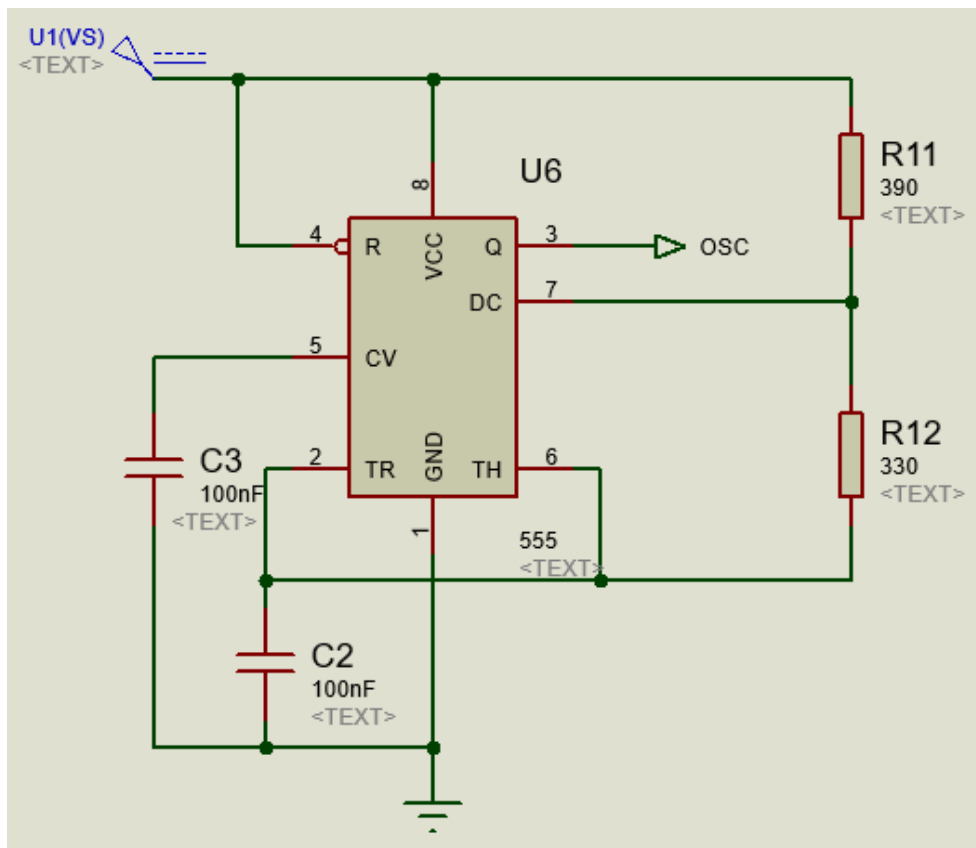
Figura 31: Circuito de acoplamento magnético do retificador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A frequência dos pulsos gerados pelo TCA785 não foi suficiente para excitar adequadamente as bobinas dos primários dos transformadores de pulso utilizados. Então foi montado um circuito oscilador de alta frequência utilizando o circuito integrado NE555N. A saída do oscilador é ligada na base do transistor que aciona o sinal que passa pela bobina do primário dos transformadores. O circuito de oscilação está sendo exibido na figura 32.

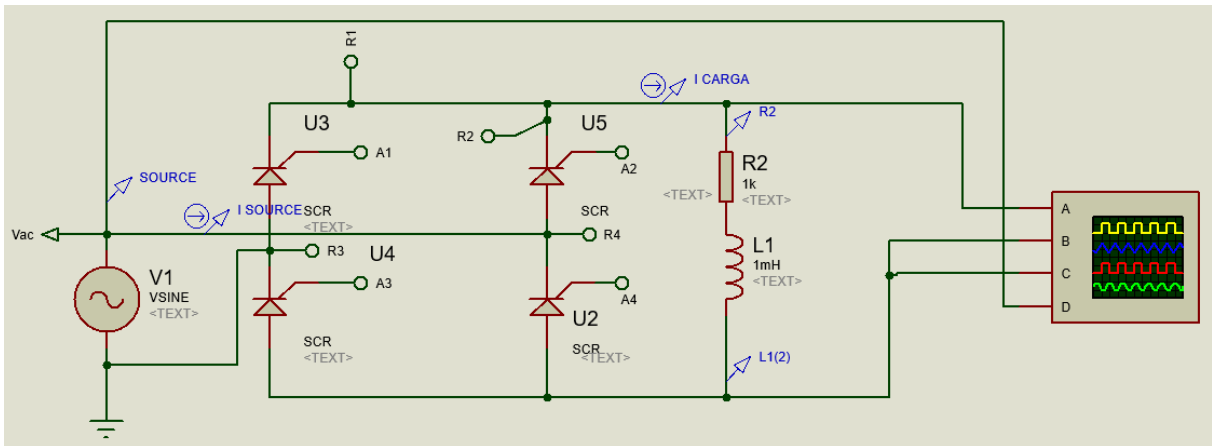
Figura 32: Circuito de oscilação para os transformadores de pulso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, temos a etapa do circuito de potência, composto pelo sinal CA e pelos tiristores BT151 ligados em ponte, de modo que cada par de tiristores é acionado em um semiciclo do sinal de entrada. Para melhor visualização dos sinais, foram utilizados como carga um resistor de 1 k $\Omega$  em série com um indutor de 1 mH. O circuito de potência pode ser visto na figura 33.

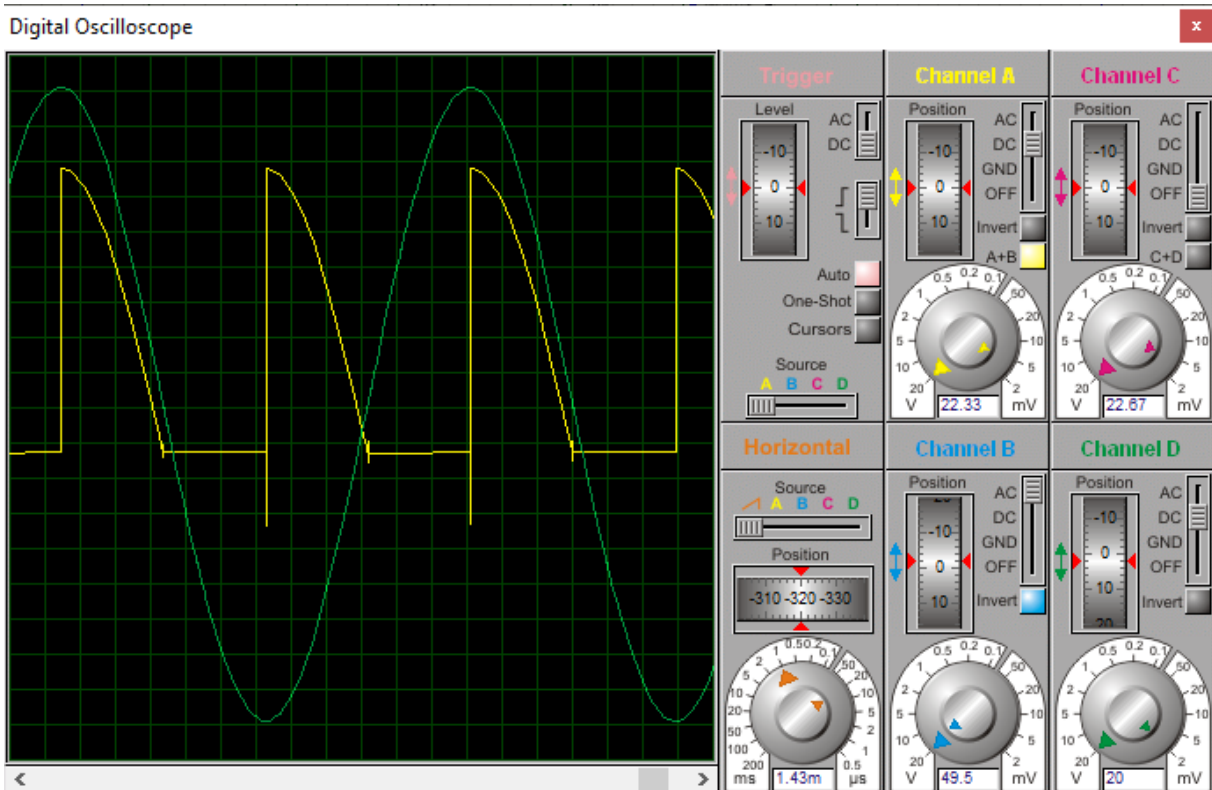
Figura 33: Circuito de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma de onda do sinal de saída do circuito, sobre a carga, pode ser vista na figura 34. O ângulo de disparo neste caso é de, aproximadamente,  $90^\circ$ .

Figura 34: Sinal de saída (amarelo) em comparação com o sinal de entrada (verde).

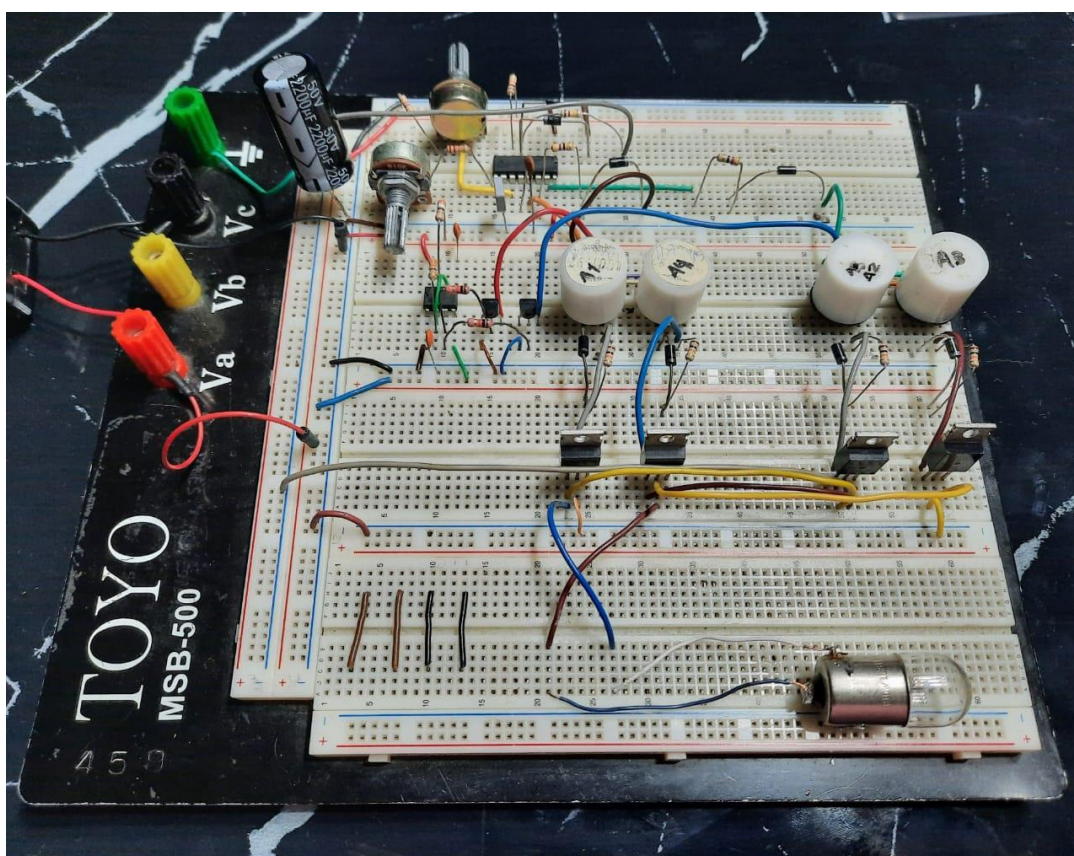


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Montagem em Protoboard

Mesmo com a modelagem e a simulação do circuito, não há nada como uma montagem prática para certificar a funcionalidade do sistema. Para isso, foi realizada a montagem dos circuitos simulados em protoboard e testes. A figura 35 apresenta uma imagem da montagem do circuito em protoboard.

Figura 35: Montagem do retificador monofásico em protoboard.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.5 Montagem Mecânica do Frontal

O circuito foi desenvolvido para ser utilizado nas bancadas de acionamento elétrico do laboratório de potência. Para tal, é necessária uma estrutura mecânica para acoplar na bancada e terminais de acesso para alimentação do circuito e monitoramento dos sinais de interesse. Foi desenvolvida uma placa de acrílico com 2 mm de espessura nas dimensões de 120 mm x 280 mm. Foram necessários



bornes para alimentação CA, alimentação CC e saída. Além disso, foi utilizada uma chave para ligar e desligar o circuito, LED de sinalização, dois potenciômetros para ajuste da rampa e da tensão de controle, e terminais para o acesso aos sinais de sincronismo, rampa, controle e pulsos de saída do TCA785.

Tendo em vista essas informações, foi desenvolvido o croqui da parte frontal da placa do dispositivo com suas identificações, conforme mostra a figura 36 (a).

Após a produção da placa de acrílico e do adesivo frontal, o conjunto foi montado com os bornes de entrada e saída, chave de acionamento (do tipo botão), potenciômetros e terminais do tipo olhal para acesso e medição dos sinais. A placa frontal do retificador montada pode ser vista na figura 36 (b).

Figura 36 (a): Croqui da parte frontal da placa do retificador.



Figura 36 (b): Placa frontal do retificador controlado monofásico.

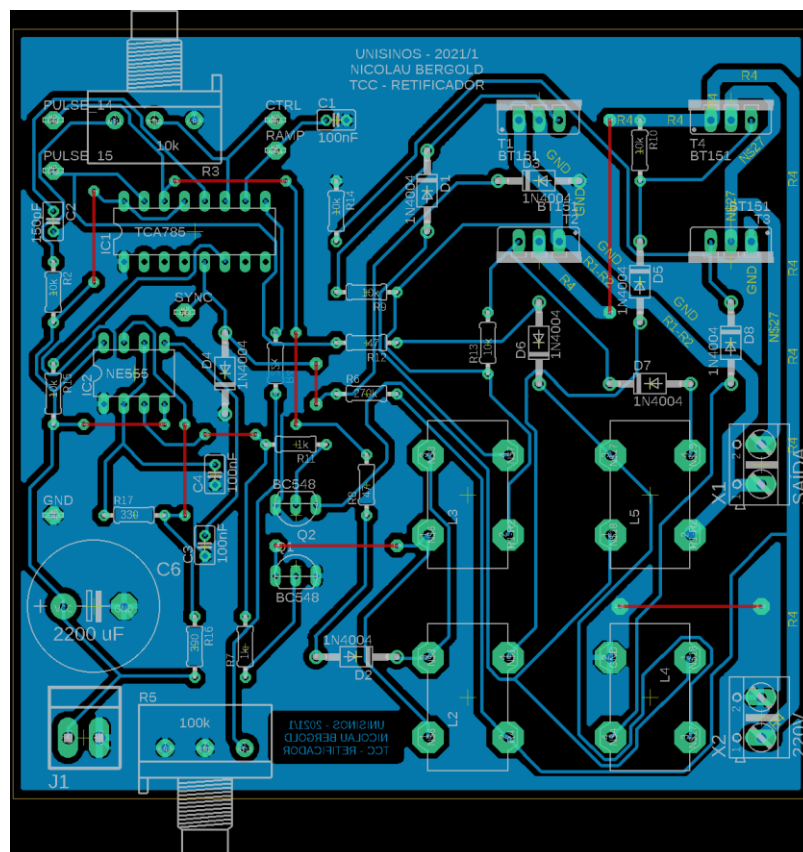


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.6 Desenvolvimento da Placa no *Software Eagle*

Após a confirmação do funcionamento do circuito do retificador monofásico através da montagem prática em protoboard, ele foi desenvolvido no *software Eagle* para elaboração do *layout* da placa de circuito impresso. O esquemático do circuito no *software Eagle* pode ser visto no Apêndice A deste relatório. Foi realizado, então, o roteamento do esquemático para desenvolvimento da placa de circuito impresso, cujo *layout* pode ser visto na figura a seguir.

Figura 37: Placa de circuito impresso do retificador.



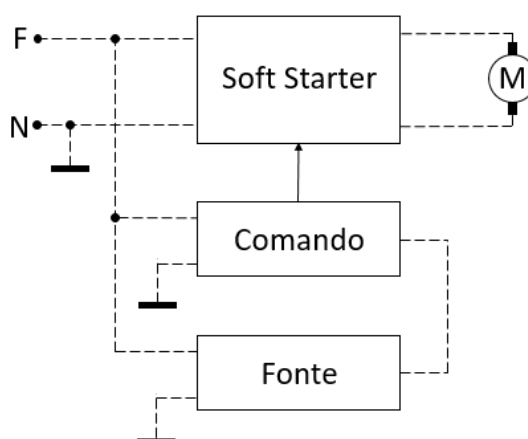
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Softstarter

A *softstarter* desenvolvida no decorrer deste projeto trata-se de um circuito híbrido composto, basicamente, de quatro etapas principais: o *Arduino Nano*, que contém o microcontrolador responsável por gerar a rampa de tensão (que atua no

controle do ângulo de disparo do TRIAC), assim como monitorar e controlar o botão *ON/OFF*, os potenciômetros de ajuste do tempo das rampas de aceleração e desaceleração e os LEDs; a regulação de tensão em 5V (para alimentação da placa do Arduino), implementada com o regulador LM7805; o filtro passa-baixas com amplificador não-inversor implementado com LM358, para tratar do sinal da saída PWM de oito bits do Arduino; e o controle propriamente dito do ângulo de disparo do TRIAC, realizado pelo circuito integrado TCA785. A figura 38 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido para a *softstarter*.

Figura 38: Diagrama de blocos da *softstarter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco da *softstarter* faz o controle propriamente dito do ângulo de disparo do TRIAC, realizado pelo circuito integrado TCA785. O TCA785 recebe o sinal da rampa de tensão, gerada pelo microcontrolador na etapa de comando. A etapa de comando, que tem como principal dispositivo o microcontrolador Arduino Nano, monitora os comandos de início e parada do motor, os potenciômetros de ajuste dos tempos das rampas de aceleração e desaceleração, além, claro, de gerar o sinal principal para o controle do ângulo de disparo do TRIAC por parte do TCA785. O bloco da fonte é responsável por realizar a regulação da alimentação de toda a etapa de comando.

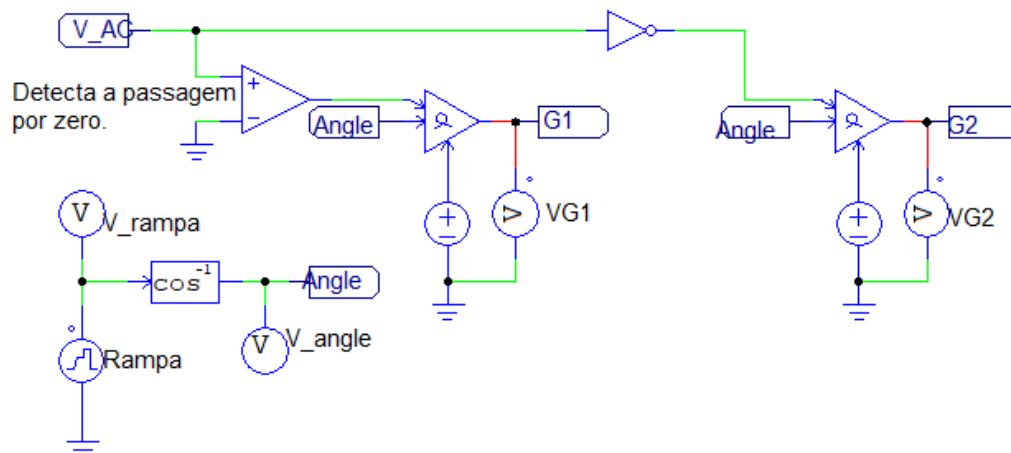
A *softstarter* foi desenvolvida para realizar o acionamento de um motor universal, conforme descrito no item 3.1.2 deste relatório. Esta carga possui uma potência baixa, aproximadamente 100 W. Foi utilizado um botão (*ON/OFF*) para dar a partida e para desligar o motor. Na partida e no desligamento do motor é possível

o ajuste do tempo entre 5 s e 15 s via potenciômetros. O ângulo da tensão de pedestal definido é em torno de 120 graus. Há ainda quatro sinalizações por LED: motor ligado, motor desligado, durante a rampa de aceleração até o motor atingir a tensão nominal; e durante a rampa de desaceleração até a tensão no motor chegar a zero.

### 3.3.2 Modelagem no *Software* PSIM

A base da *softstarter* também foi modelada para simulação através do *software* PSIM. A etapa de comando foi desenvolvida modelando o funcionamento do TCA785 através de um comparador para detecção da passagem da senoide por zero, comparando a tensão senoidal em relação ao terra, e entregando a onda retangular resultante ao pino de sincronismo do controlador alpha. É colocado um nível positivo no pino de *enable* para acionar o controlador e um sinal DC equivalente ao ângulo alpha (ângulo de disparo) no pino correspondente. A saída do controlador alpha é conectada ao pino *gate* dos tiristores. Este conjunto é repetido para o outro semiciclo da senoide utilizando-se uma porta inversora na saída do detector de passagem por zero. Para realizar a variação do ângulo de disparo dos tiristores até a condução completa foi utilizada uma rampa de tensão “invertida” na entrada alpha. O circuito de comando modelado através do *software* PSIM pode ser visto na figura 39.

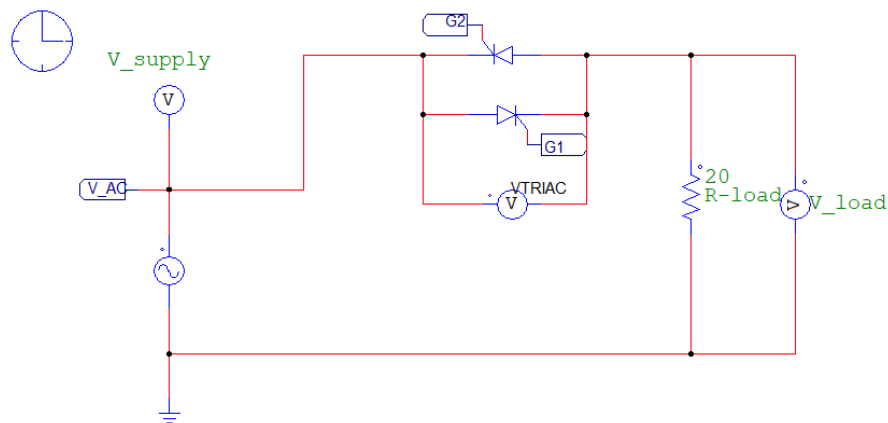
Figura 39: Circuito de comando da *softstarter* modelado através do *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa de potência da *softstarter* contém a fonte de alimentação CA e dois tiristores ligados em configuração antiparalelo (simulando um TRIAC), de modo que cada tiristor conduz em um semiciclo da senoide de entrada. Foi utilizada como carga um resistor de 20  $\Omega$ . O circuito de potência modelado através do *software* PSIM pode ser visto na figura 40.

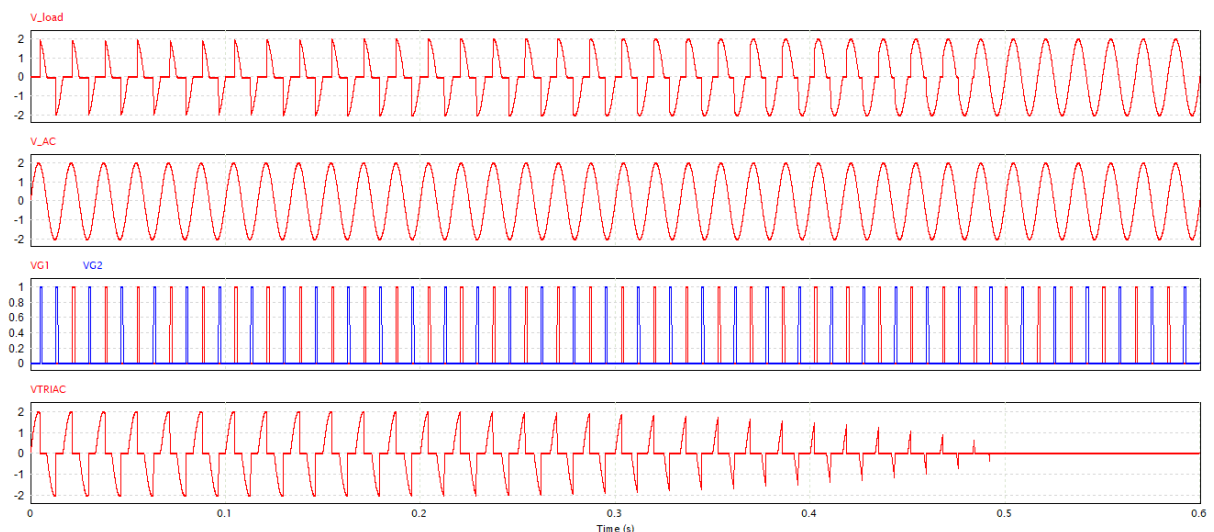
Figura 40: Circuito de potência da *softstarter* modelado através do *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a simulação do circuito, algumas formas de onda de interesse foram plotadas. Podem ser vistos na figura 41 os gráficos da tensão sobre a carga, tensão AC de entrada, pulsos de disparo dos tiristores e tensão sobre os tiristores.

Figura 41: Formas de onda da *softstarter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

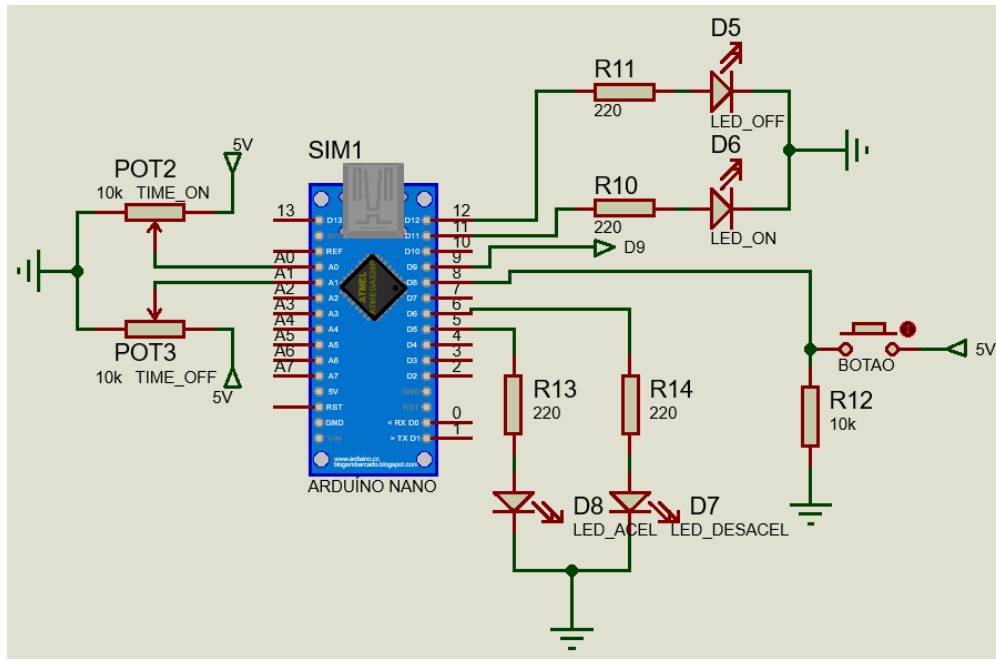
Através da forma de onda da tensão sobre a carga ( $V_{load}$ ), é possível observar que o sinal parte de um valor bem baixo (definido pela tensão de pedestal) e, com o passar do tempo, vai sendo incrementado (devido à rampa invertida). Após o tempo definido pela rampa, a tensão sobre a carga chega ao valor máximo, definido pela senóide de alimentação  $V_{AC}$ . Os sinais  $VG1$  e  $VG2$  apresentam os trens de pulsos defasados  $180^\circ$  entre si, que seriam as saídas 14 e 15 do TCA785. A cada pulso os ângulos de disparo vão sendo alterados, fazendo com que os semiciclos positivo cheguem ao seu valor máximo. Por último temos a forma de onda da tensão sobre o TRIAC, que inicia-se no valor máximo (forma de onda complementar à presente na carga) e vai caindo conforme a tensão sobre a carga cresce, até chegar ao valor zero quando a tensão sobre a carga for máxima.

### 3.3.3 Diagrama Esquemático e Montagem em Protoboard

No caso da *softstarter*, optou-se por utilizar o *software* Proteus apenas para desenho e análise do esquemático do circuito, sem realizar as simulações. Isso porque o bloco do Arduino Nano apresenta algumas falhas e instabilidades no *software*, e então o funcionamento foi verificado diretamente na montagem prática.

O microcontrolador utilizado para controle da *softstarter* foi o Arduino Nano. Ele é responsável por gerar a rampa de tensão (que atua no controle do ângulo de disparo do TRIAC), cuja saída está localizada no pino D9. O Arduino também monitora e controla o botão *ON/OFF* responsável por acionar e desligar o sistema. Este botão está na entrada digital D8 com um resistor de *pull down*. As entradas analógicas A0 e A1 recebem os potenciômetros de ajuste do tempo das rampas de aceleração e desaceleração. E ainda há quatro LED's de sinalização nas saídas digitais D11, D12, D5 e D6, sendo elas, respectivamente, as indicações de motor ligado, motor desligado, rampa de aceleração em curso e rampa de desaceleração em curso. A figura 42 apresenta esta etapa do circuito.

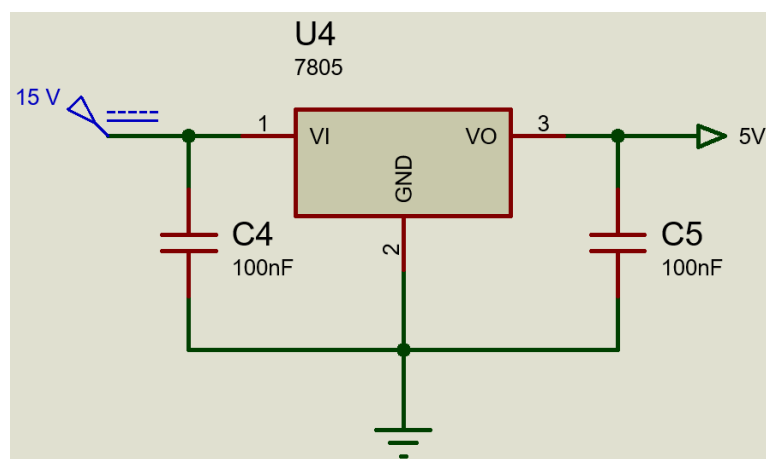
Figura 42: Etapa de controle da *softstarter* através do Arduino Nano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar a alimentação do Arduino, há uma etapa de regulação de tensão de 5 V. Trata-se de um circuito simples com regulador LM7805, conforme mostra a figura 43.

Figura 43: Regulador de 5 V para alimentação do Arduino.

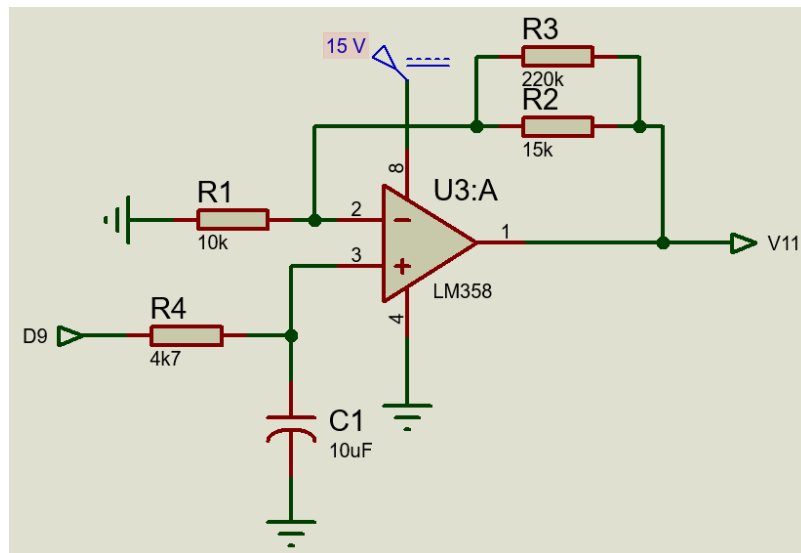


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para filtrar e isolar o sinal da rampa de tensão gerada pelo Arduino em sua saída D9, é utilizada uma etapa de amplificação com LM358. Trata-se de um

amplificador não inversor com ganho alto (em torno de 15) e um filtro passa-baixa em sua entrada para filtrar ruídos de alta frequência. A etapa do amplificador está sendo exibida na figura 44.

Figura 44: Etapa do amplificador do sinal gerado pelo Arduino.

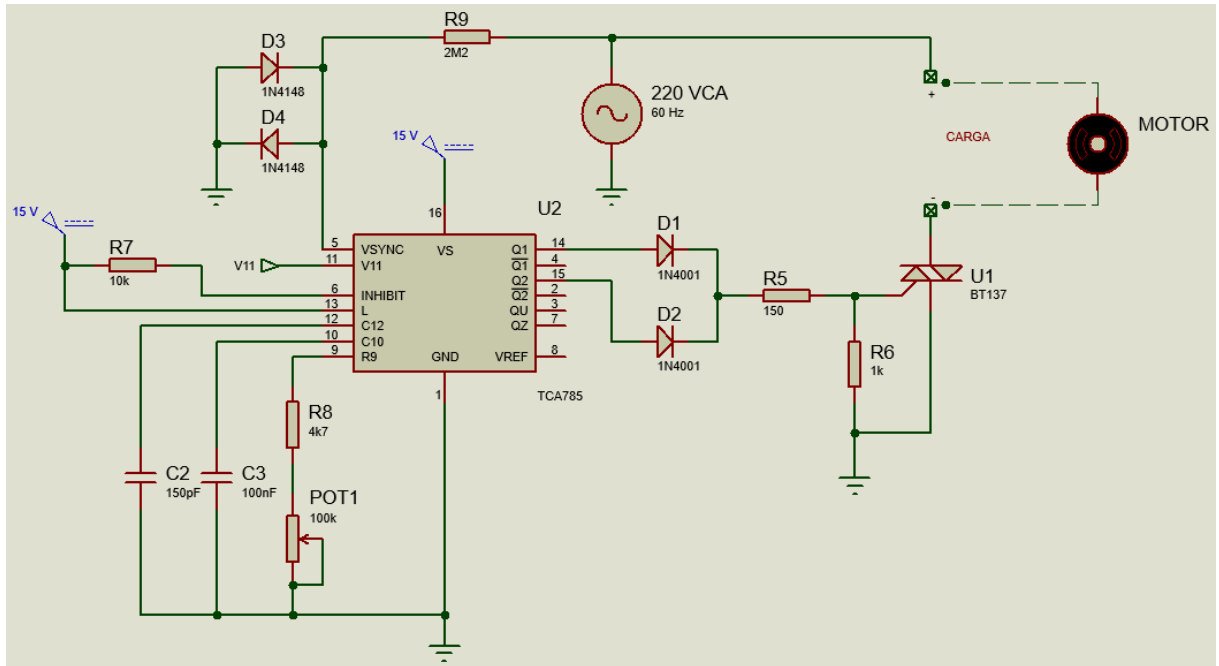


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, há a etapa de ajuste propriamente dito do ângulo de disparo do TRIAC BT137, realizado pelo circuito integrado TCA785. O sinal de sincronismo é obtido a partir da alimentação CA através de um resistor de alto valor conectado ao pino 5 do TCA785. Um comparador detecta a passagem por zero da tensão de alimentação e informa ao registrador de sincronismo. Este registrador controla um gerador de rampa composto pelo capacitor conectado ao pino 10, o qual é carregado por uma corrente determinada pela resistência variável conectado ao pino 9. O tempo de subida da rampa é determinado pela combinação RC. Quando a tensão de rampa V10 excede a tensão de controle V11, proveniente da rampa gerada pelo Arduino amplificada, um sinal é enviado para a lógica. Dependendo da magnitude desta tensão de controle V11, o ângulo de disparo  $\alpha$  pode ser deslocado numa faixa de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Os pinos 14 e 15 do TCA785, que contém os pulsos de disparo, são conectados ao *gate* do TRIAC BT137, que fará o chaveamento da tensão sobre a carga. Este circuito está sendo mostrado na figura 45.



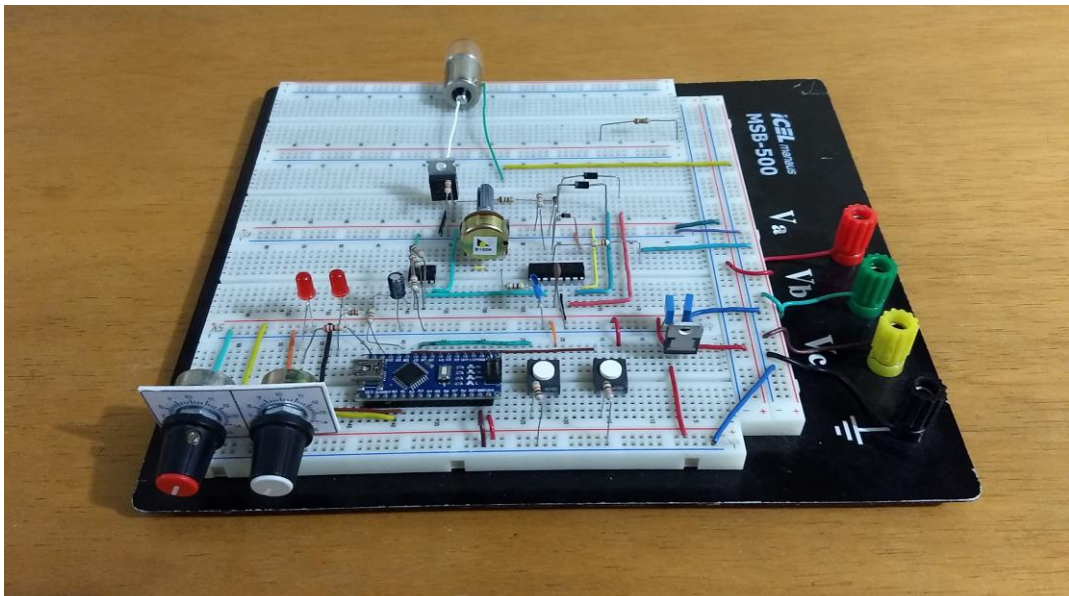
Figura 45: Controle do ângulo de disparo do TRIAC através do TCA785.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente foi realizada uma montagem prática para certificar a funcionalidade do sistema. Para isso, foi realizada a montagem dos circuitos simulados em protoboard e testes. Na figura 46 está uma imagem da montagem do circuito em protoboard.

Figura 46: Montagem da *softstarter* em protoboard.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.4 Montagem Mecânica do Frontal

Este circuito também foi desenvolvido para ser utilizado nas bancadas de acionamento elétrico do laboratório de potência. Então também é necessária uma estrutura mecânica para acoplar na bancada e terminais de acesso para alimentação do circuito e monitoramento dos sinais de interesse. Foi desenvolvida uma placa de acrílico com 2 mm de espessura nas dimensões de 120 mm x 280 mm. Foram necessários bornes para alimentação CA, alimentação CC e saída. Além disso, foi utilizado um botão para ligar e desligar o circuito, quatro LED's de sinalização, dois potenciômetros para ajuste dos tempos da rampa de aceleração e de desaceleração, e terminais para o acesso aos sinais de sincronismo, rampa, controle, pulsos de saída do TCA785 e tensão sobre o tiristor (TRIAC).

Tendo em vista essas informações, foi desenvolvido o croqui da parte frontal da placa do dispositivo com suas identificações, conforme mostra a figura 47 (a).

Após a produção da placa de acrílico e do adesivo frontal, o conjunto foi montado com os bornes de entrada e saída, botão de acionamento, potenciômetros e terminais do tipo olhal para acesso e medição dos sinais. A placa frontal da *softstarter* montada pode ser vista na figura 47 (b).

Figura 47 (a): Croqui da parte frontal da placa da *softstarter*.

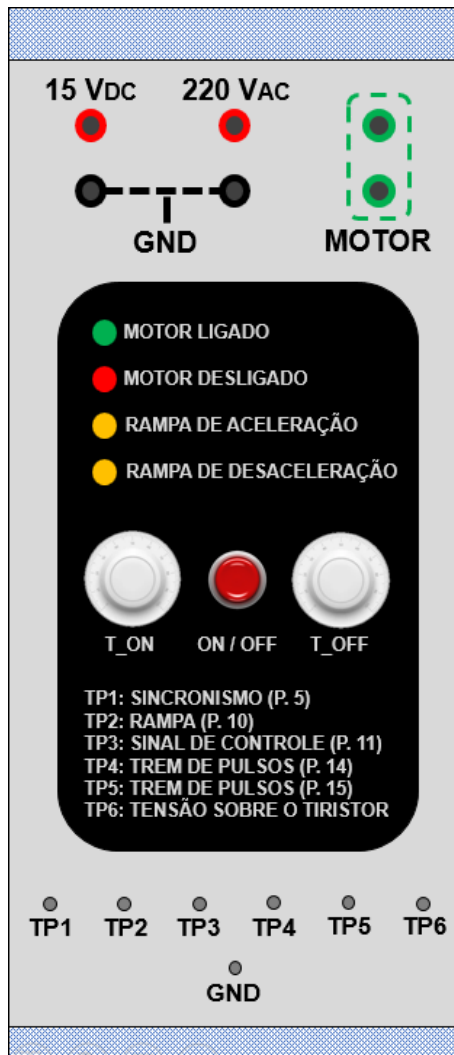


Figura 47 (b): Placa frontal da *softstarter* montada.

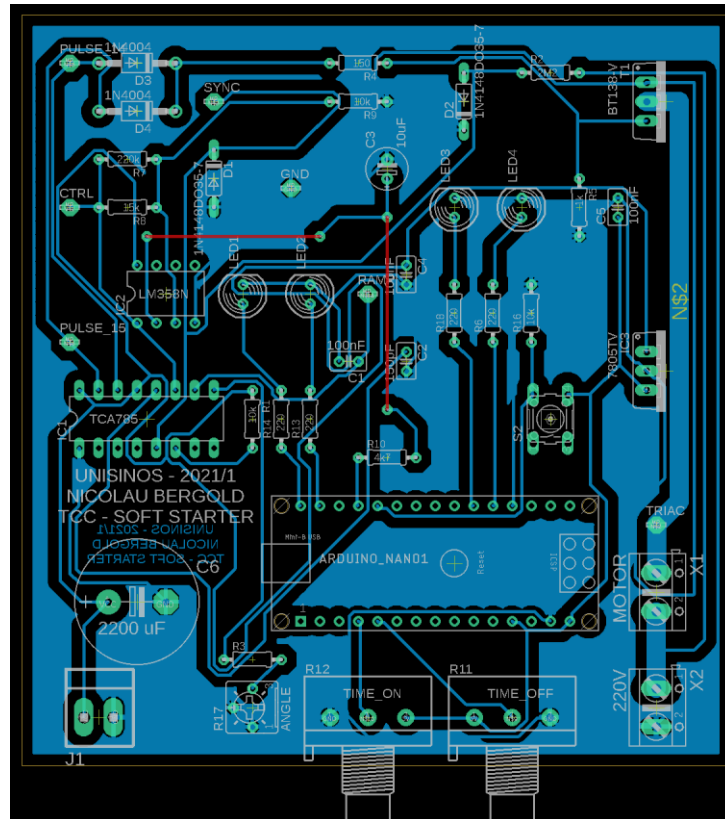


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.5 Desenvolvimento da Placa no *Software Eagle*

Após a confirmação do funcionamento do circuito da *softstarter* através da montagem prática em protoboard, ele foi desenvolvido no *software Eagle* para elaboração do *layout* da placa de circuito impresso. O esquemático do circuito no *software Eagle* pode ser visto no Apêndice B deste relatório. Foi realizado, então, o roteamento do esquemático para desenvolvimento da placa de circuito impresso, cujo *layout* pode ser visto na figura 48.

Figura 48: Placa de circuito impresso da *softstarter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.6 Firmware do Arduino

O programa (*firmware*) desenvolvido para controle da *softstarter* é composto por uma entrada digital que recebe o sinal do botão para acionar e desligar o motor; duas entradas analógicas que recebem os sinais dos níveis de tensão dos potenciômetros que determinam os tempos das rampas de aceleração e desaceleração (entre 5 e 15 segundos); quatro saídas digitais que recebem os quatro LED's de sinalização (motor ligado, motor desligado, rampa de aceleração ativa e rampa de desaceleração ativa); e a saída PWM responsável pela rampa gerada. É importante ressaltar que as entradas analógicas do Arduino Nano são de 10 bits, ou seja, possibilitam a contagem de 0 até 1023, sendo 0 (zero) o nível mais baixo de sinal (GND - 0 V) e 1023 o nível mais alto de sinal (5 V). O Arduino Nano não produz sinal analógico verdadeiro, mas o simula através de PWM. Essas "saídas analógicas" simuladas através de PWM são de 8 bits e, portanto, podem

realizar a contagem de 0 até 255, sendo 0 (zero) o nível mais baixo de sinal (GND - 0 V) e 255 o nível mais alto de sinal (5 V).

O programa se inicia colocando o valor 255 na saída PWM (5V) para garantir um ângulo de disparo de 180° no tiristor, ou seja, sem tensão na carga. Também é ativado o LED de indicação do motor desligado.

Em seguida, inicia-se o laço infinito do programa. Primeiramente, ele fica em espera aguardando o pressionamento do botão de acionamento do sistema. Ao pressionar o botão, o LED indicativo de motor desligado é desativado e os LED's de motor ligado e rampa de aceleração em curso são ativados. O tempo de aceleração é lido através do potenciômetro correspondente em uma das entradas analógicas. O nível baixo (0 V) representa o tempo de 5 segundos e o nível alto (5 V) representa o tempo de 15 segundos. Este tempo, em milissegundos, é calculado dividindo-se o valor lido na entrada analógica por 102,3, somando-se 5 ao resultado e, por fim, multiplicando-se por 1000.

Após isso, diminui-se a tensão de 5 V para 3,33 V na saída, valor equivalente a um ângulo de disparo de 120°. Isto forma uma tensão de pedestal de 1,67 V (60°). Essa tensão de 3,33 V é proporcional ao valor 170 dos 8 bits da saída PWM. Na sequência, o valor da tensão de saída é decrementado dentro de um laço 'for' de 170 ciclos levando o tempo determinado pelo potenciômetro da rampa de aceleração.

Ao final deste ciclo, tem-se 0 V na saída (ângulo de disparo de 0° - tensão máxima na carga). O LED responsável por sinalizar a rampa de aceleração é desligado e permanece apenas o LED indicativo de motor ligado.

Com o motor ligado, o programa permanece aguardando um novo pressionamento do botão para desativar o sistema. Ao pressionar o botão, o LED indicativo de rampa de desaceleração em curso é ativado. O tempo de desaceleração é lido através do potenciômetro correspondente na outra entrada analógica. Da mesma forma que ocorre com a rampa de aceleração, o nível baixo (0 V) representa o tempo de 5 segundos e o nível alto (5 V) representa o tempo de 15 segundos. Este tempo, em milissegundos, é calculado outra vez dividindo-se o valor lido na entrada analógica por 102,3, somando-se 5 ao resultado e, por fim, multiplicando-se por 1000.

Após isso, o valor da tensão da saída PWM é incrementado de 0 (0 V) até 170 (3,33 V) dentro de outro laço 'for' de 170 ciclos que leva o tempo determinado

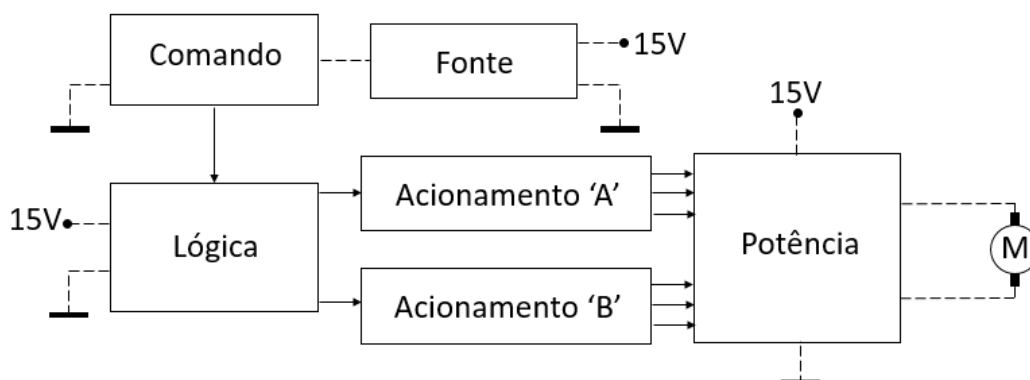
pelo potenciômetro da rampa de desaceleração. Ao chegar em 3,33 V, valor equivalente a um ângulo de disparo de 120°, a saída é levada a 5 V, correspondente a ângulo de disparo de 180° e, garantindo assim, que não haja mais tensão sobre a carga. Isto forma outra vez uma tensão de pedestal de 1,67 V (60°).

Por fim, os LED's de motor ligado e rampa de desaceleração em curso são desativados e o LED de motor desligado é ativado novamente, fazendo com que o sistema volte ao seu estado inicial, aguardando um novo pressionamento do botão para reiniciar.

### 3.4 Conversor CC-CA (Inversor de Frequência)

O inversor de frequência desenvolvido no decorrer deste projeto também trata-se de um circuito híbrido composto, basicamente, de cinco etapas principais: o estágio de comando que contém o *Arduino Nano*, microcontrolador responsável por gerar o sinal PWM, assim como monitorar e controlar o botão *ON/OFF*, o potenciômetro de ajuste da frequência e os LED's indicativos; a fonte de regulação de tensão em 5V (para alimentação da placa do Arduino); o estágio de lógica, responsável pela inversão dos sinais gerados; os estágios de acionamento A e B (*bootstrap*), responsáveis por gerar o “tempo morto” necessário entre os acionamentos dos MOSFET's; e o estágio de potência formado pelo inversor ponte completa propriamente dito. A figura 49 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido para o inversor de frequência.

Figura 49: Diagrama de blocos do inversor de frequência.



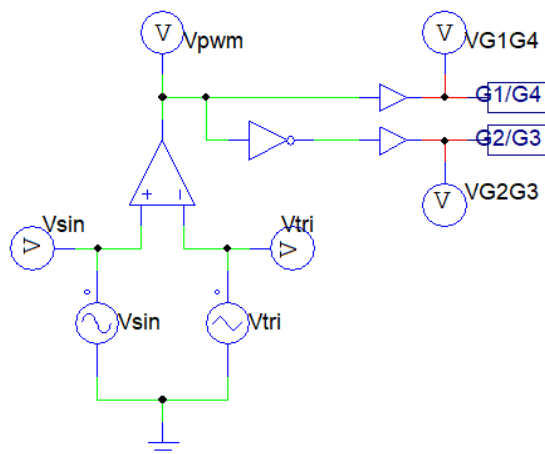
Fonte: Elaborado pelo autor.

O inversor de frequência foi desenvolvido para realizar o acionamento de um motor CA monofásico, conforme item 3.1.3 deste relatório. A frequência da fundamental será variável através de potenciômetro de 30 a 90 Hz. Já a frequência de comutação do inversor será maior ou igual a 1400 Hz (valor considerado para 60 Hz). O sistema apresenta um botão (*ON/OFF*) e LED's de sinalização de motor ligado e desligado.

### 3.4.2 Modelagem no *Software* PSIM

A base do inversor de frequência, a exemplo dos outros circuitos, também foi modelada para simulação através do *software* PSIM. A etapa de comando foi desenvolvida através de um somador que recebe em suas entradas não inversora e inversora uma onda senoidal e uma onda triangular, respectivamente. A saída deste somador será um sinal quadrado modulado, e será enviada para os *gates* de um par de MOSFET's. Outro par de MOSFET's recebe em seus *gates* a saída do somador invertida por uma porta lógica inversora. O circuito de comando modelado através do *software* PSIM pode ser visto figura 50.

Figura 50: Circuito de comando do inversor modelado através do *software* PSIM.

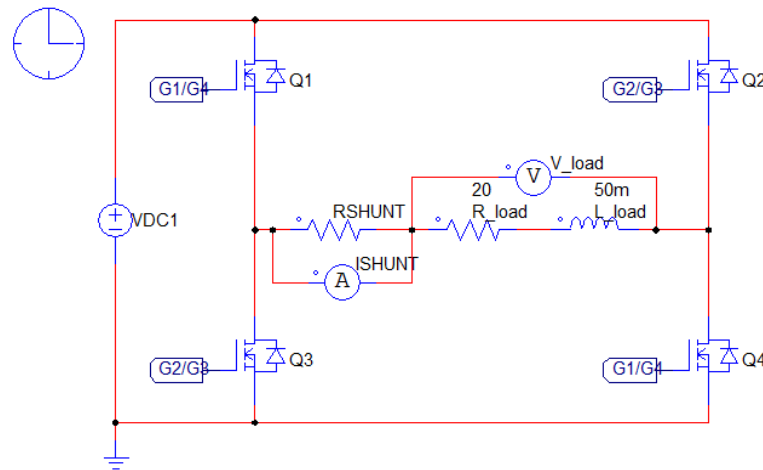


Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa de potência do inversor de frequência contém a fonte de alimentação CC e os quatro MOSFET's ligados em configuração ponte, de modo que cada par de MOSFET's conduz um dos sinais PWM provenientes do circuito de comando. Foram

utilizados como carga um resistor de  $20\ \Omega$  e um indutor de  $50\ \text{mH}$  para simular uma carga indutiva, além de um resistor de shunt de  $1\ \Omega$  para visualização da senoide modulada de saída. O circuito de potência modelado através do *software* PSIM pode ser visto na figura 51.

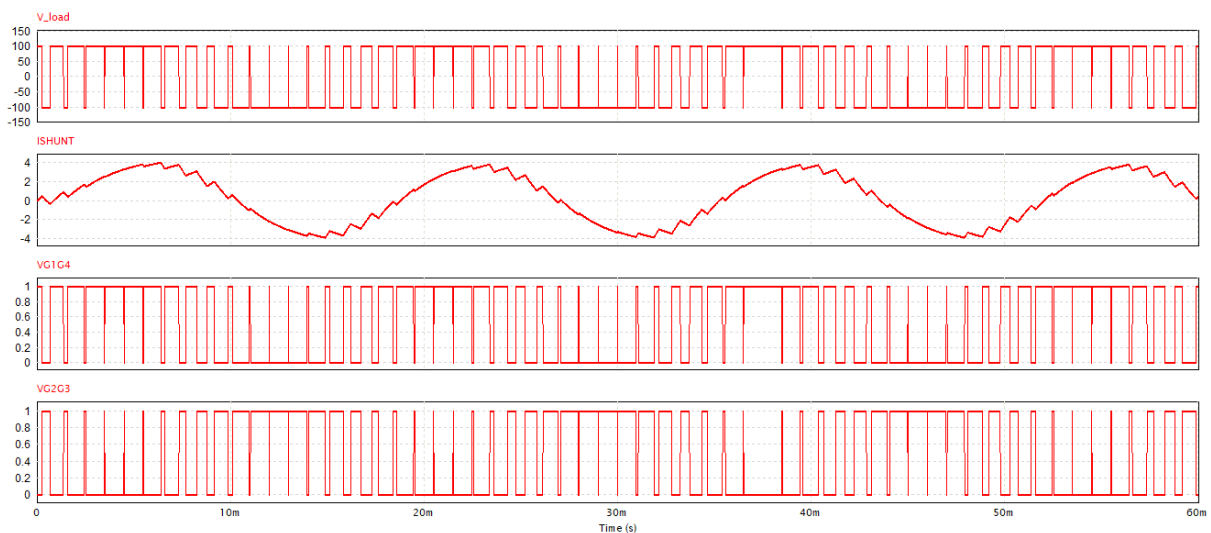
Figura 51: Circuito de potência do inversor modelado através do *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a simulação do circuito, algumas formas de onda de interesse foram plotadas. Podem ser vistos na figura 52 os gráficos da tensão sobre a carga, corrente CA sobre o resistor de shunt e sinais dos *gates* dos MOSFET's.

Figura 52: Formas de onda do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.



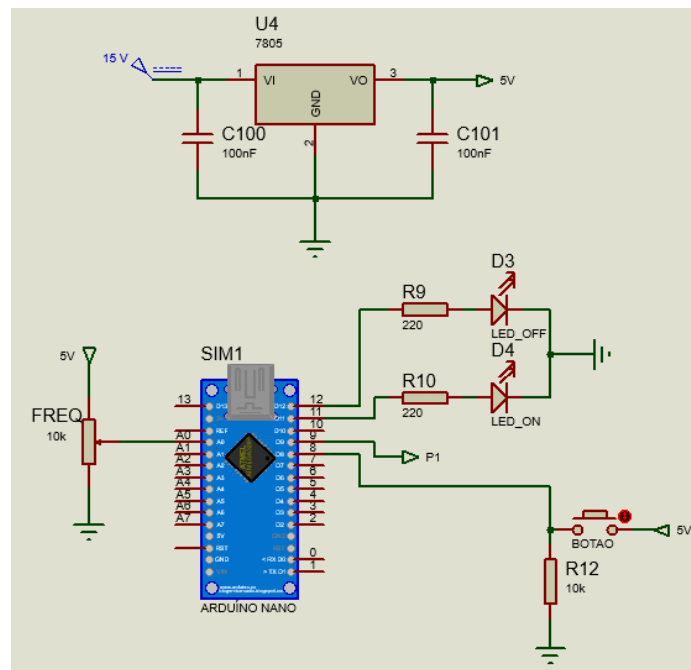
A forma de onda  $V_{load}$  apresenta a tensão sobre a carga. Trata-se de um sinal PWM alternado com *duty cycle* que varia de 0% a 100%. A corrente sobre o resistor de *shunt* pode ser vista através da forma de onda *ISHUNT*. Esta senóide é formada a partir da tensão modulada sobre o resistor em questão, o que faz com que ela não seja perfeita e apresente pequenos “degraus” em sua composição. O sinal *VG1G4* é o sinal PWM quadrado gerado a partir da soma do sinal triangular com a senóide e *VG2G3* é este mesmo sinal invertido. Estes dois sinais chaveiam os MOSFET's para a geração da tensão sobre a carga.

### 3.4.3 Diagrama Esquemático e Montagem em Protoboard

No caso do inversor de frequência, também se optou por utilizar o *software* Proteus apenas para desenho e análise do esquemático do circuito, sem realizar as simulações. O funcionamento foi verificado diretamente na montagem prática.

O microcontrolador utilizado para controle do inversor de frequência foi o Arduino Nano. Ele é responsável por gerar o sinal PWM variável, cuja saída está localizada no pino D9. O Arduino também monitora e controla o botão *ON/OFF* responsável por acionar e desligar o sistema. Este botão está na entrada digital D8 com um resistor de *pull down*. A entrada analógica A0 recebe o potenciômetro de ajuste da frequência. E ainda há dois LED's de sinalização nas saídas digitais D11 e D12, sendo elas, respectivamente, as indicações de motor ligado e motor desligado. Para realizar a alimentação do Arduino, há uma etapa de regulação de tensão de 5 V. Trata-se de um circuito simples com regulador LM7805. A figura 53 apresenta estas etapas do circuito.

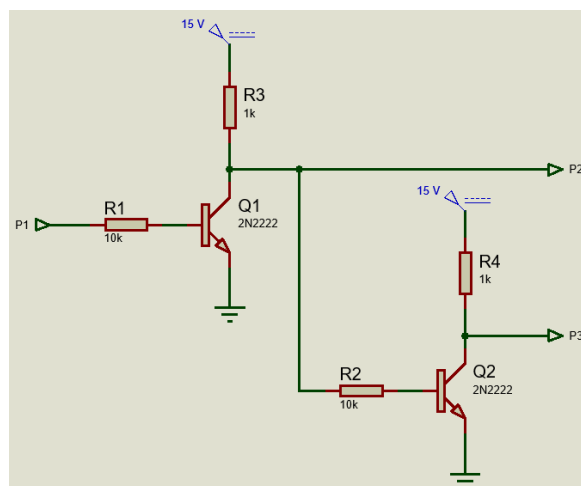
Figura 53: Etapa de controle do inversor de frequência através do Arduino Nano e regulador de 5 V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal PWM gerado pelo Arduino em sua saída D9 passa, ainda, por um estágio de inversão. Trata-se de dois transistores 2N2222 ligados de modo a prover dois sinais de saída, sendo um deles o próprio sinal gerado pelo Arduino amplificado e o outro este mesmo sinal invertido. Esta etapa de inversão dos sinais gerados está sendo exibida na figura 54.

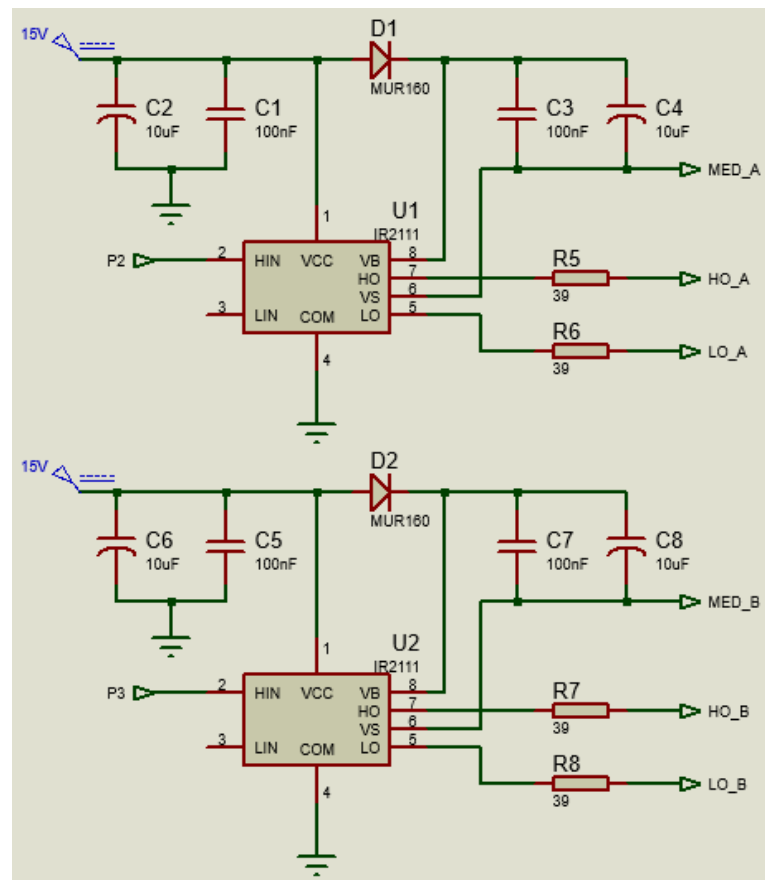
Figura 54: Estágio de inversão dos sinais gerados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sinais gerados passam, então, pelos chamados estágio de acionamento A e B (*bootstrap*), responsáveis por gerar o “tempo morto” necessário entre os acionamentos dos MOSFET’s. Trata-se de dois circuitos idênticos, formados pela ligação típica dos circuitos integrados IR2111, que recebem os sinais gerado e invertido. As saídas destes estágios de acionamento são levadas até a etapa de potência. A figura 55 apresenta este trecho do circuito.

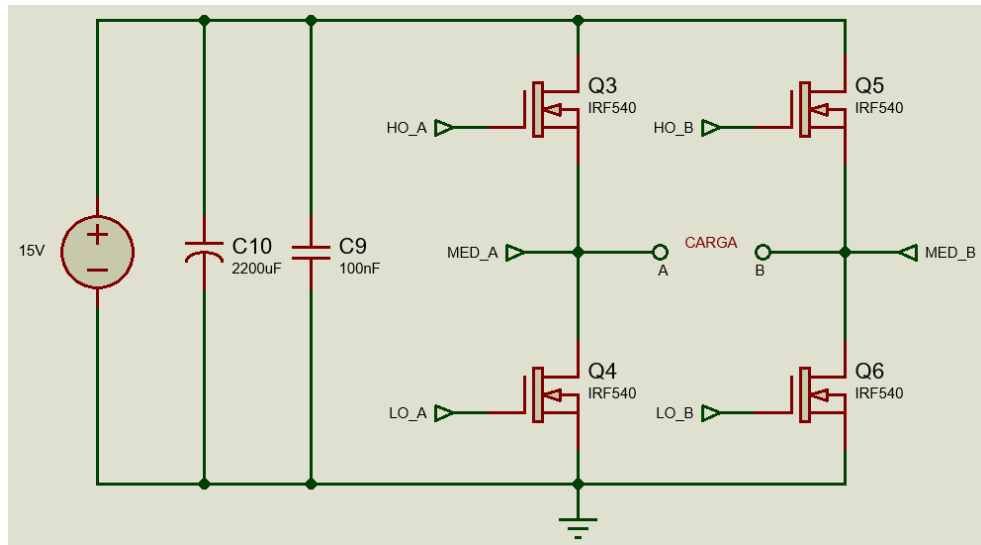
Figura 55: Estágios de acionamento A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, temos a etapa do circuito de potência, composto pelo quatro MOSFET’s IRF540 ligados em ponte, de modo que eles sejam acionados aos pares. O circuito de potência pode ser visto na figura 56.

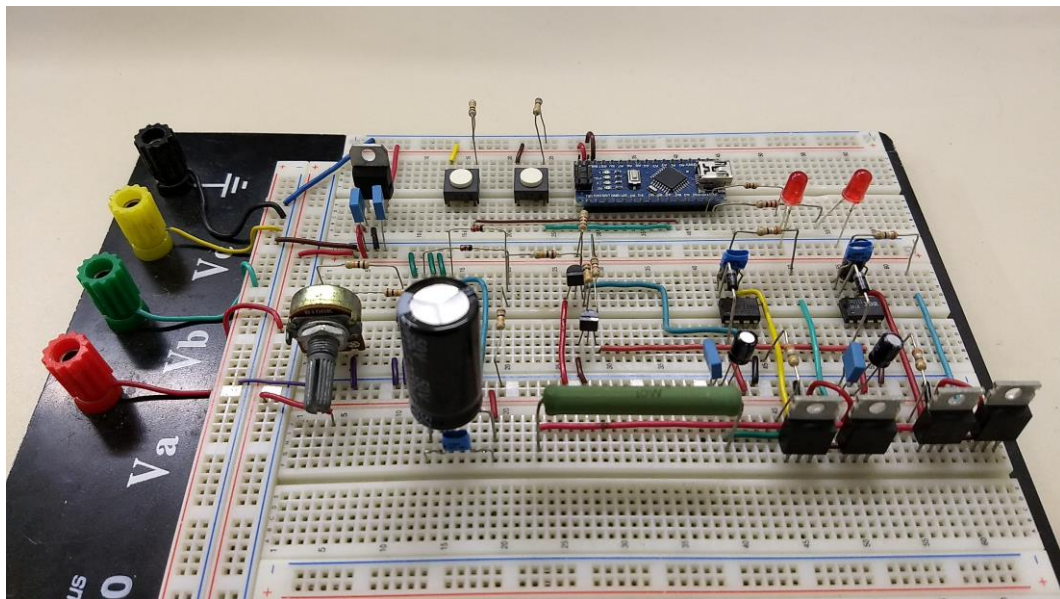
Figura 56: Estágio de potência do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A montagem prática do inversor de frequência foi realizada para certificar a funcionalidade do sistema. Para isso, foi realizada a montagem dos circuitos simulados em protoboard e testes. A figura 57 apresenta uma imagem da montagem do circuito em protoboard.

Figura 57: Montagem do inversor de frequência em protoboard.



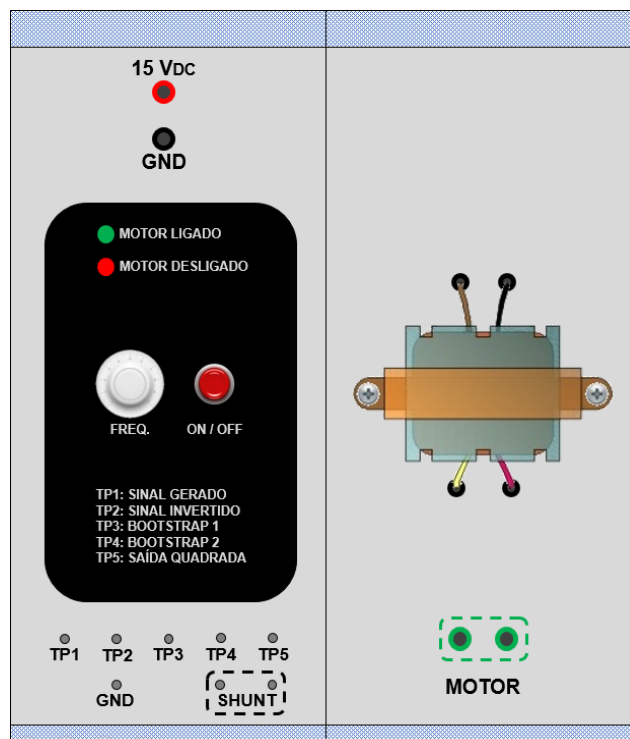
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.4 Montagem Mecânica do Frontal

A exemplo dos demais circuitos, este também foi desenvolvido para ser utilizado nas bancadas de acionamento elétrico do laboratório de potência. Então também é necessária uma estrutura mecânica para acoplar na bancada e terminais de acesso para alimentação do circuito e monitoramento dos sinais de interesse. Neste caso, foi desenvolvida uma placa de acrílico com 2 mm de espessura nas dimensões de 240 mm x 280 mm. As dimensões foram o dobro das demais em função da utilização do transformador elevador de tensão para o motor – 12  $V_{CA}$  para 220  $V_{CA}$ . Foram necessários bornes para alimentação CC e saída. Além disso, foi utilizado um botão para ligar e desligar o circuito, dois LED's de sinalização, um potenciômetro para ajuste da frequência e terminais para o acesso aos sinais gerados (original e invertido), sinais de *bootstrap* (tempo morto entre os acionamentos dos MOSFET's) e sinal de saída em onda quadrada modulada, além do sinal de senoide correspondente sobre o resistor de *shunt*.

Tendo em vista essas informações, foi desenvolvido o croqui da parte frontal da placa do dispositivo com suas identificações, conforme mostra a figura 58.

Figura 58: Croqui da parte frontal da placa do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a produção da placa de acrílico e dos adesivos frontais, o conjunto foi montado com os bornes de entrada e saída, botão de acionamento, potenciômetro, terminais do tipo olhal para acesso e medição dos sinais e transformador. A placa frontal do inversor de frequência montada pode ser vista na figura 59.

Figura 59: Placa frontal do inversor de frequência.



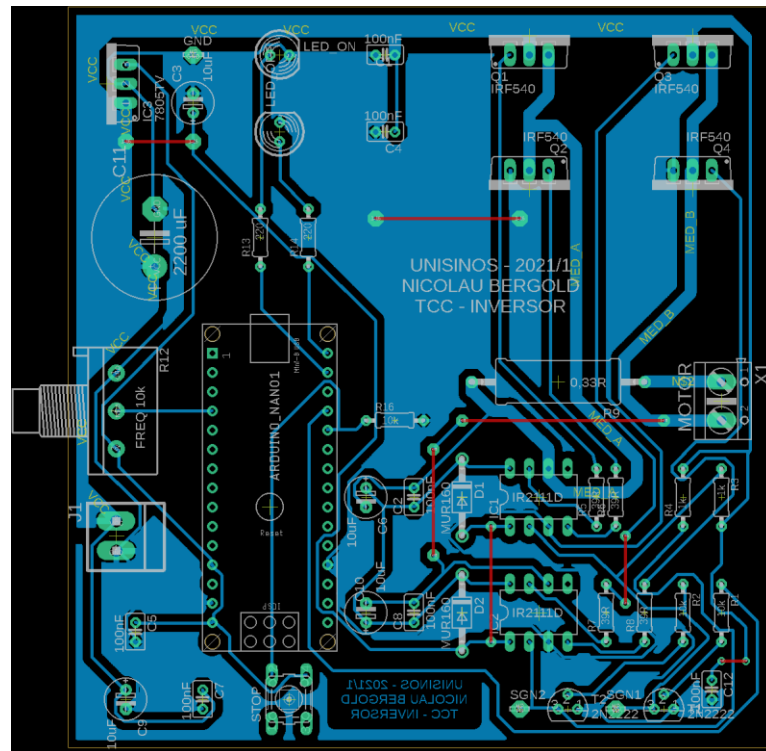
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.5 Desenvolvimento da Placa no *Software Eagle*

Após a confirmação do funcionamento do circuito do inversor de frequência através da montagem prática em protoboard, ele foi desenvolvido no *software Eagle* para elaboração do *layout* da placa de circuito impresso. O esquemático do circuito no *software Eagle* pode ser visto no apêndice C deste relatório. Foi realizado, então,

o roteamento do esquemático para desenvolvimento da placa de circuito impresso, cujo *layout* pode ser visto na figura 60.

Figura 60: Placa de circuito impresso do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.6 Firmware do Arduino

O programa (*firmware*) desenvolvido para controle do inversor de frequência é composto por uma entrada digital que recebe o sinal do botão responsável por acionar e desligar o motor; uma entrada analógica que recebe o sinal do nível de tensão do potenciômetro que determina a frequência da fundamental (entre 30 e 90 Hz); duas saídas digitais que recebem os dois LED's de sinalização (motor ligado e motor desligado); e a saída responsável pela geração do sinal PWM. Lembrando novamente que a entrada analógica do Arduino Nano é de 10 bits, ou seja, possibilita quantizar de 0 até 1023, sendo 0 (zero) o nível mais baixo de sinal (GND - 0 V) e 1023 o nível mais alto de sinal (5 V). O Arduino Nano não produz sinal analógico verdadeiro, mas o simula através de PWM. Essas saídas analógicas

simuladas através de PWM são de 8 bits e, portanto, podem realizar a contagem de 0 até 255, sendo 0 (zero) o nível mais baixo de sinal (GND - 0 V) e 255 o nível mais alto de sinal (5 V).

O programa se inicia colocando o valor 0 na saída PWM (0 V), para garantir que ela comece em nível baixo, ou seja, sem tensão na carga. Também é ativado o LED de indicação do motor desligado. Em seguida, ele fica em espera aguardando o pressionamento do botão de acionamento do sistema. Ao pressionar o botão, o LED indicativo de motor desligado é desativado e o LED de motor ligado é ativado. O programa entra no modo de geração do sinal PWM e permanece até que o botão seja pressionado novamente. A frequência do sinal é lida através do potenciômetro presente na entrada analógica. O nível baixo (0 V) representa a frequência de 30 Hz e o nível alto (5 V) representa a frequência de 90 Hz. Esta frequência, em Hz, é calculada dividindo-se o valor lido na entrada analógica por 102,3, multiplicando-se esse resultado por 6 e, por fim, soma-se 30.

Após isso, é calculado o período equivalente à frequência dividido por 24 ciclos (em microssegundos). Também é calculado o passo de incremento do período para cada um dos 12 ciclos dos dois laços 'for' consecutivos. A variável de incremento do período do sinal PWM dentro dos laços 'for' é zerada para que o primeiro laço seja iniciado.

No primeiro laço 'for' ocorre o incremento do nível alto do sinal PWM. São realizados 12 ciclos e, a cada ciclo, o tempo em nível alto é incrementado de acordo com o passo calculado. Ao final desse laço, terá se passado metade do período (12 dos 24 ciclos) e o nível alto do sinal PWM estará no máximo, isto é, terá ido de um *duty cycle* de 0% para 100%.

Em seguida, entra em ação o segundo laço 'for'. Neste laço ocorre o decremento do nível alto do sinal PWM. São realizados outros 12 ciclos e, a cada ciclo, o tempo em nível alto é decrementado de acordo com o passo calculado. Ao final desse laço, terá se passado a outra metade do período (os 12 ciclos restantes do total de 24) e o nível alto do sinal PWM estará no mínimo outra vez, isto é, terá ido de um *duty cycle* de 100% para 0%.

O sistema fica repetindo a geração do sinal PWM, sempre monitorando a frequência do sinal obtida através do potenciômetro presente na entrada analógica. Caso o valor do potenciômetro seja alterado, os novos parâmetros são calculados e



a saída PWM é atualizada. Isto acontece até que ocorra um novo pressionamento do botão para desativar o sistema.

Ao pressionar o botão para desligar a saída, é colocado o valor 0 na saída PWM (0 V) para garantir que ela permaneça em nível baixo. O LED indicativo de motor ligado é desativado e o LED de motor desligado é ativado. Desta forma, o sistema volta ao seu estado inicial, aguardando um novo pressionamento do botão para reiniciar.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

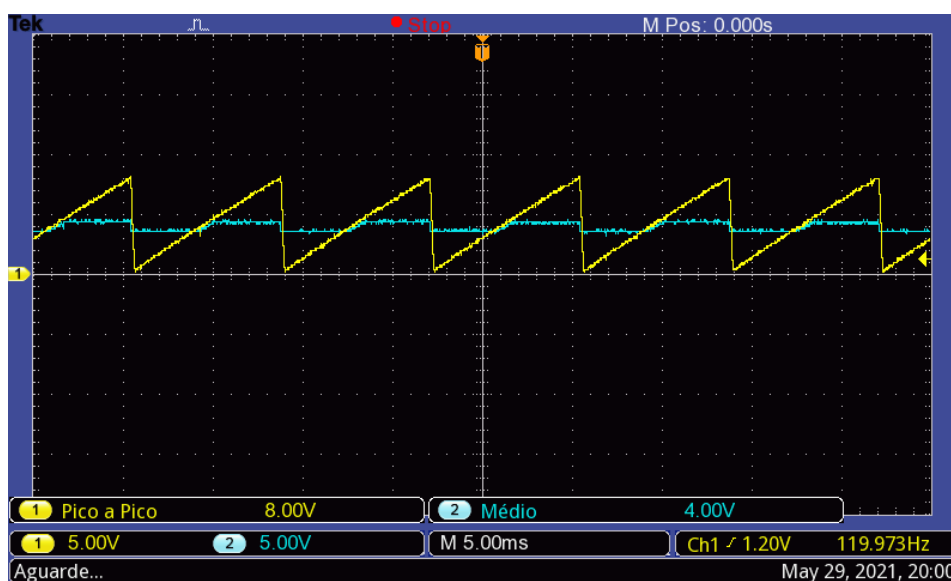
Os circuitos foram modelados com sucesso através do *software* PSIM e foi realizada a simulação parcial dos circuitos no *software* Proteus. Além disso, os *layouts* dos circuitos foram desenvolvidos através do *software* Eagle para a confecção das placas de circuito impresso, que funcionaram perfeitamente.

Após a conclusão dos protótipos, eles foram testados e validados na prática nos laboratórios da Unisinos. Os resultados podem ser observados a seguir.

### 4.1 Retificador Controlado Monofásico em Ponte

O circuito desenvolvido do retificador monofásico foi testado utilizando-se uma lâmpada como carga para melhor visualização dos sinais de interesse. O dispositivo funcionou conforme esperado e algumas formas de onda de interesse foram registradas. Na figura 61 temos, por exemplo, em amarelo, a rampa gerada pelo TCA785 a partir do capacitor externo ligado em seu pino 10. Já em azul temos o sinal de controle que entra no pino 11 do TCA785. Este sinal pode ser excursionado por toda a extensão da rampa. O ponto onde o sinal de controle e a rampa se cruzam é o ângulo de disparo do pulso.

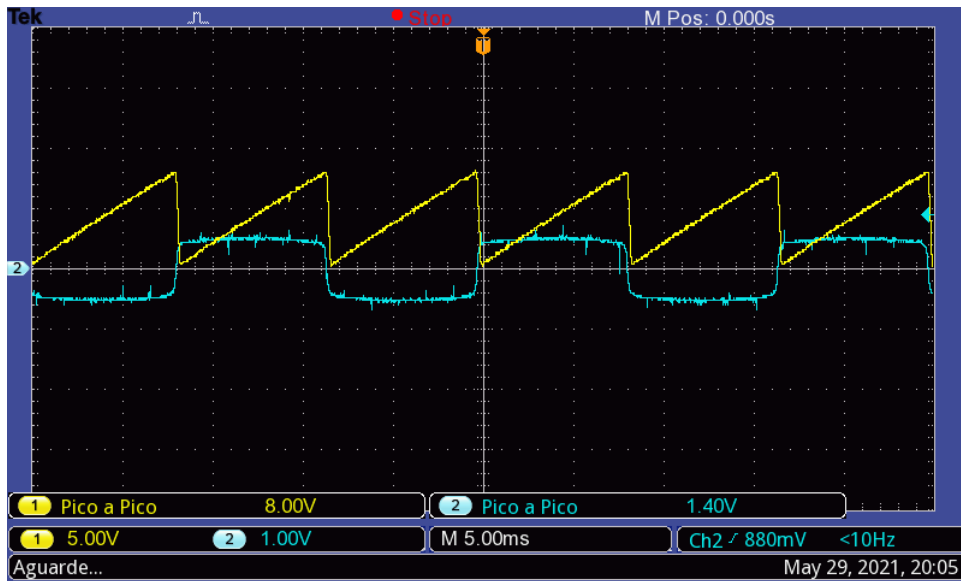
Figura 61: Sinal da rampa (amarelo) e sinal de controle (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 62 apresenta, em azul, o sinal de sincronismo obtido a partir da rede de alimentação alternada através de um resistor de alto valor ligado ao pino 5 do TCA785. Um comparador interno detecta a passagem por zero da tensão de alimentação e informa ao registrador de sincronismo. O sinal em amarelo trata-se da rampa gerada a partir do capacitor externo ligado ao pino 10, o qual é carregado por uma corrente determinada pela resistência variável ligada ao pino 9.

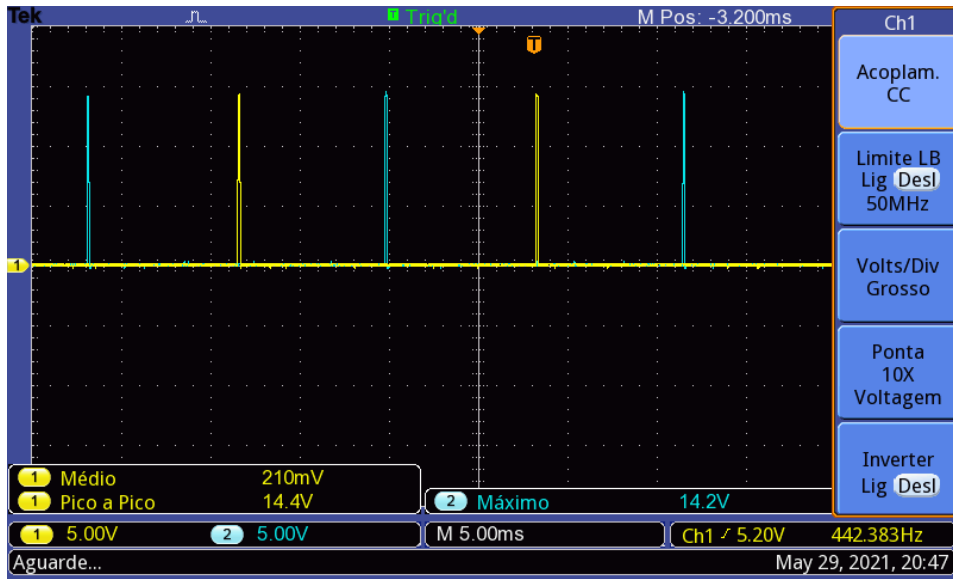
Figura 62: Sinal da rampa (amarelo) e sinal de sincronismo (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 63 apresenta os trens de pulsos provenientes dos pinos 14 (amarelo) e 15 (azul) do TCA785, defasados 180° entre si. Dependendo do nível da tensão de controle V11, o ângulo de disparo pode ser deslocado numa faixa de 0° a 180°.

Figura 63: Pulsos provenientes dos pinos 14 e 15 do TCA785.

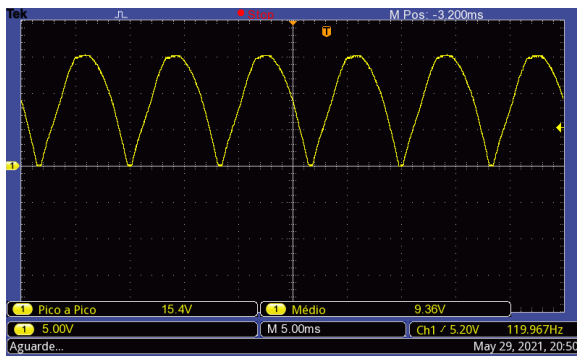


Fonte: Elaborado pelo autor.

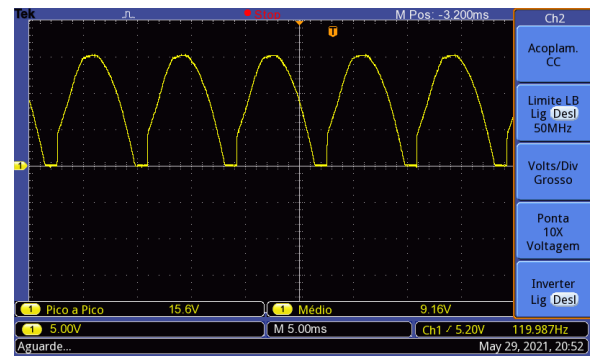
Na figura 64 observa-se as formas de onda sobre a carga para os ângulos aproximados de  $0^\circ$  (tensão máxima),  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$  (tensão nula). A partir dessas medições, foi elaborada a tabela 1, que apresenta os ângulos de disparo e os respectivos valores de tensão média observados sobre a carga.

Figura 64: Formas de onda sobre a carga para diferentes ângulos de disparo.

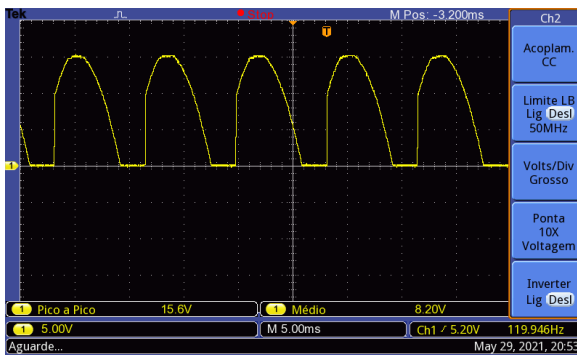
(a) Ângulo de disparo de  $0^\circ$ .



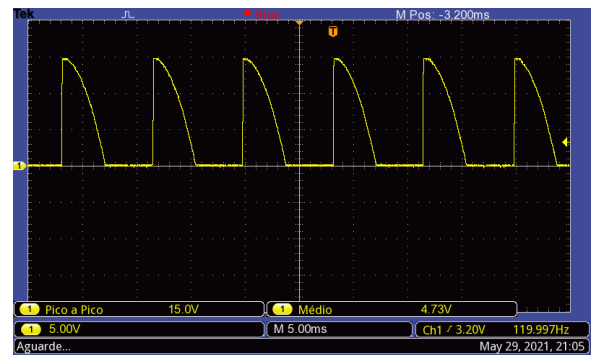
(b) Ângulo de disparo de  $30^\circ$ .



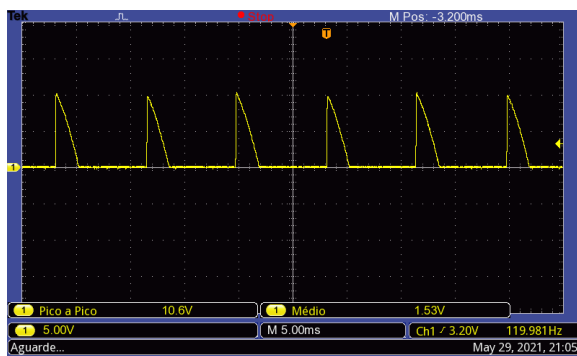
(c) Ângulo de disparo de  $60^\circ$ .



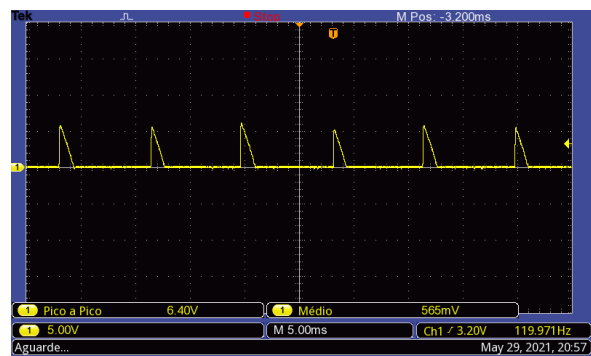
(d) Ângulo de disparo de  $90^\circ$ .



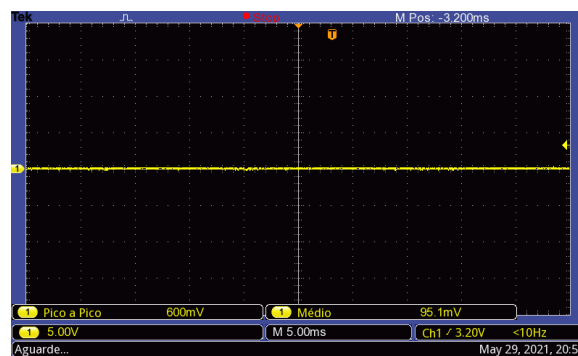
(e) Ângulo de disparo de  $120^\circ$ .



(f) Ângulo de disparo de  $150^\circ$ .



(g) Ângulo de disparo de  $180^\circ$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1: Ângulo de disparo x tensão média sobre a carga.

Ângulo de Disparo	Tensão Média Sobre a Carga
0°	9,36 V
30°	9,16 V
60°	8,20 V
90°	4,73 V
120°	1,53 V
150°	565 mV
180°	95,1 mV

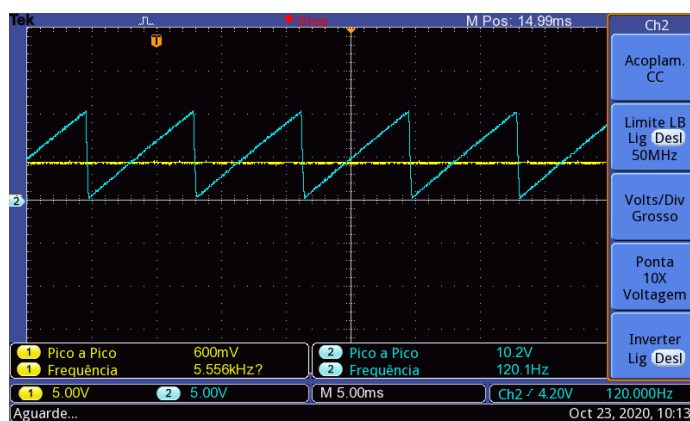
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores medidos encontram-se dentro do esperado de acordo com o nível de tensão aplicado na entrada do circuito.

#### 4.2 Softstarter

O circuito desenvolvido da *softstarter* foi testado utilizando-se uma lâmpada como carga para melhor visualização dos sinais de interesse. O dispositivo funcionou conforme esperado e algumas formas de onda de interesse foram registradas. Na figura 65 temos, por exemplo, em azul, a rampa gerada pelo TCA785 a partir do capacitor externo ligado em seu pino 10. Já em amarelo temos o sinal de controle que entra no pino 11 do TCA785. Este sinal pode ser excursionado por toda a extensão da rampa. O ponto onde o sinal de controle e a rampa se cruzam é o ângulo de disparo do pulso.

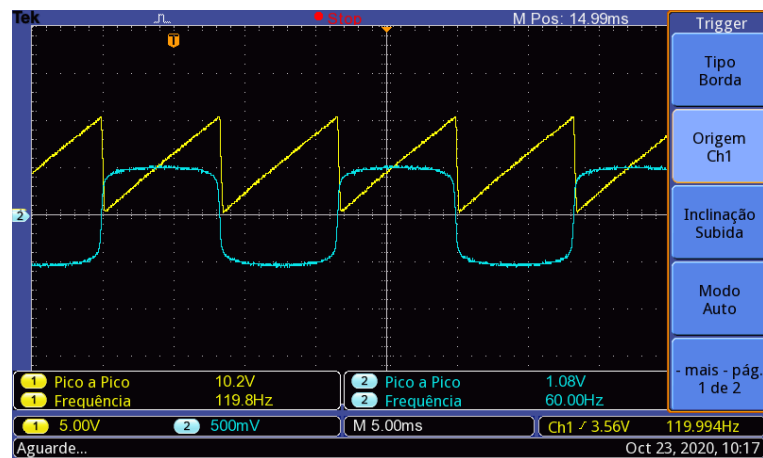
Figura 65: Sinal da rampa (azul) e sinal de controle (amarelo).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 66 apresenta, em azul, o sinal de sincronismo obtido a partir da rede de alimentação alternada através de um resistor de alto valor ligado ao pino 5 do TCA785. Um comparador interno detecta a passagem por zero da tensão de alimentação e informa ao registrador de sincronismo. O sinal em amarelo trata-se da rampa gerada a partir do capacitor externo ligado ao pino 10, o qual é carregado por uma corrente determinada pela resistência variável ligada ao pino 9.

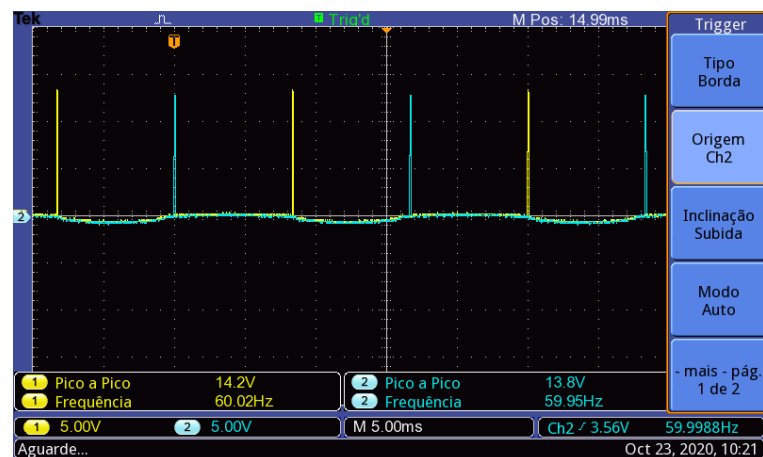
Figura 66: Sinal da rampa (amarelo) e sinal de sincronismo (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 67 apresenta os trens de pulsos provenientes dos pinos 14 (amarelo) e 15 (azul) do TCA785, defasados 180° entre si. Dependendo do nível da tensão de controle  $V_{11}$ , o ângulo de disparo  $\alpha$  (*alpha*) pode ser deslocado numa faixa de 0° a 180°.

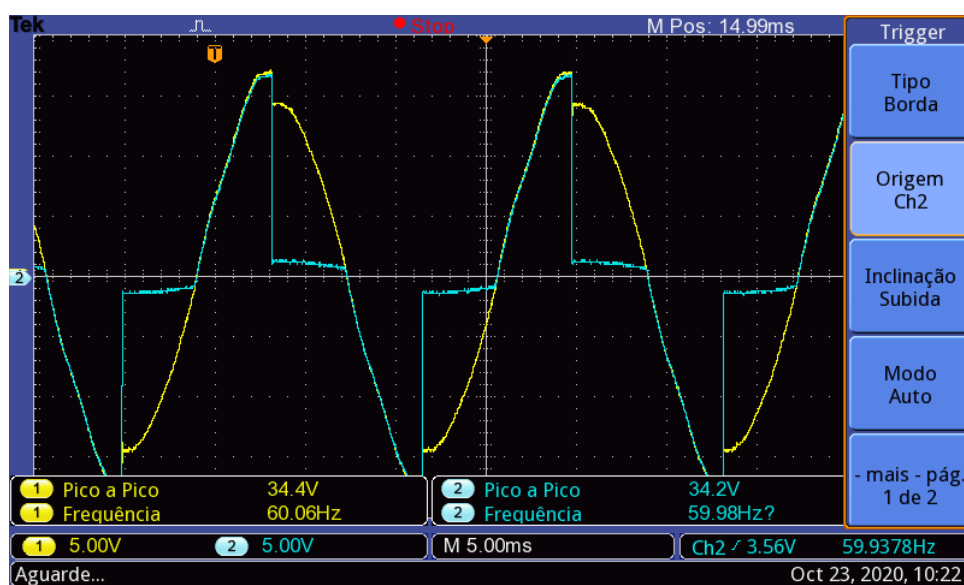
Figura 67: Pulsos provenientes dos pinos 14 e 15 do TCA785.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 68 nos mostra as formas de onda sobre o TRIAC, em azul, e sobre a carga, em amarelo, para um ângulo de disparo de, aproximadamente,  $90^\circ$ . É possível observar uma pequena queda no nível de tensão sobre a carga decorrente da potência dissipada sobre ela.

Figura 68: Formas de onda sobre o TRIAC (azul) e sobre a carga (amarelo) para um ângulo de disparo aproximado de  $90^\circ$ .

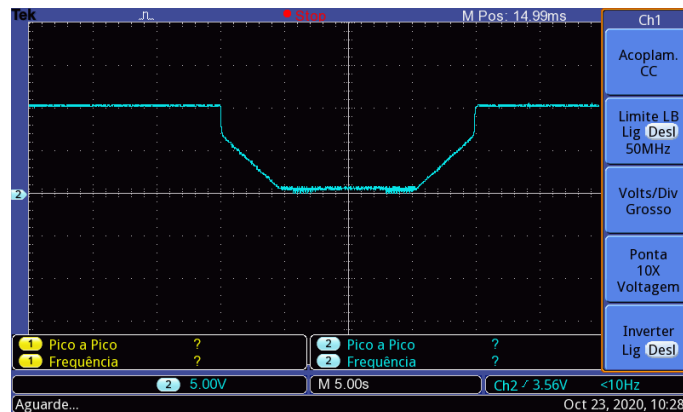


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 69 traz as rampas de partida e parada suaves. O sinal começa em nível alto ( $\sim 10$  V - ângulo de disparo de  $180^\circ$ , isto é, sem tensão na carga) e, ao pressionar o botão de acionamento, ele cai para cerca de 6,7 V, valor equivalente a um ângulo de disparo de  $120^\circ$ . Isto forma uma tensão de pedestal de cerca de 3,3 V ( $\sim 60^\circ$ ). Na sequência, o valor da tensão vai sendo reduzido, formando a rampa de aceleração até o 0 V de acordo com o tempo ajustado no potenciômetro. No caso da figura, este tempo estava ajustado para 5 segundos. Ao final deste ciclo, tem-se 0 V na saída (ângulo de disparo de  $0^\circ$  - tensão máxima na carga). O sistema permanece nesse estado até que o botão seja pressionado outra vez, fazendo com que se inicie a rampa de desaceleração, que cresce de acordo com o tempo do respectivo potenciômetro (que, na figura em questão, também estava ajustado para 5 segundos). Essa rampa cresce até cerca de 6,7 V, onde se tem uma nova tensão de pedestal de cerca de 3,3 V e o sinal volta a nível alto (sem tensão na carga).



Figura 69: Rampas de partida e parada suaves com tensão de pedestal de, aproximadamente, 2V.

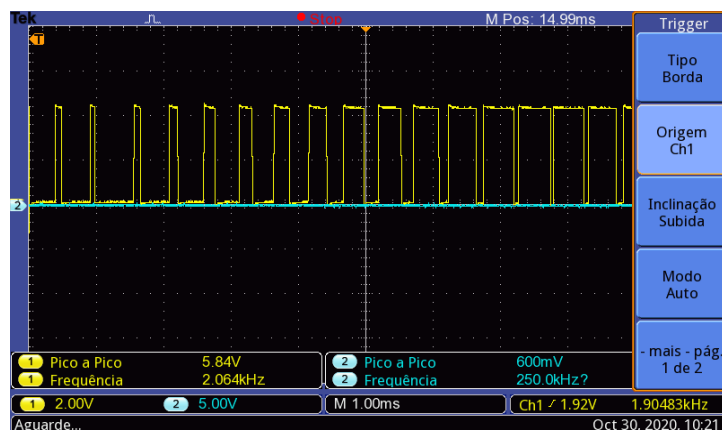


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Conversor CC-CA (Inversor de Frequência)

O circuito desenvolvido do inversor de frequência também foi testado utilizando-se uma lâmpada como carga para melhor visualização dos sinais de comando e potência. O dispositivo funcionou conforme esperado e algumas formas de onda de interesse foram registradas. A figura 70 apresenta o sinal modulado gerado pelo microcontrolador do Arduino Nano. A largura do sinal vai sendo ajustada de acordo com a frequência selecionada no potenciômetro. O sinal vai de um *duty cycle* de 100% até 0% e, em seguida, retorna ao 100%, tudo de acordo com a frequência escolhida.

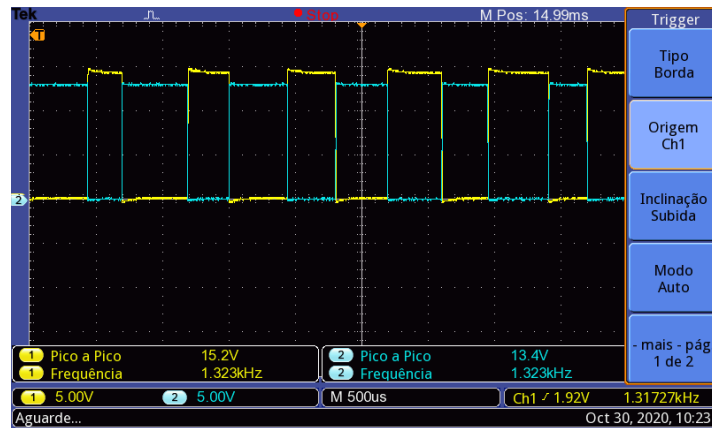
Figura 70: Sinal modulado gerado pelo Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 71 traz o sinal modulado gerado pelo Arduino amplificado (em amarelo) e este mesmo sinal invertido (em azul). A inversão do sinal gerado é necessária para gerar, no acionamento dos MOSFET's, os semiciclos positivo e negativo do sinal de saída.

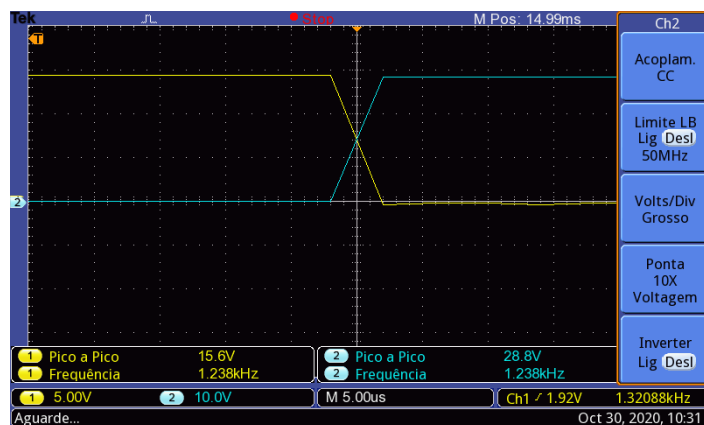
Figura 71: Sinal modulado gerado (amarelo) e invertido (azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 72 mostra os sinais de uma das etapas de *bootstrap*, responsável por gerar o tempo "morto" entre os acionamentos dos MOSFET's, evitando, assim, que um MOSFET seja acionado antes do outro ser desligado, o que ocasionaria um curto-circuito e possíveis danos decorrentes disto ao circuito. Na imagem em questão, o sinal de acionamento de um MOSFET (amarelo) é desligado e, somente neste momento, o MOSFET seguinte (azul) é acionado.

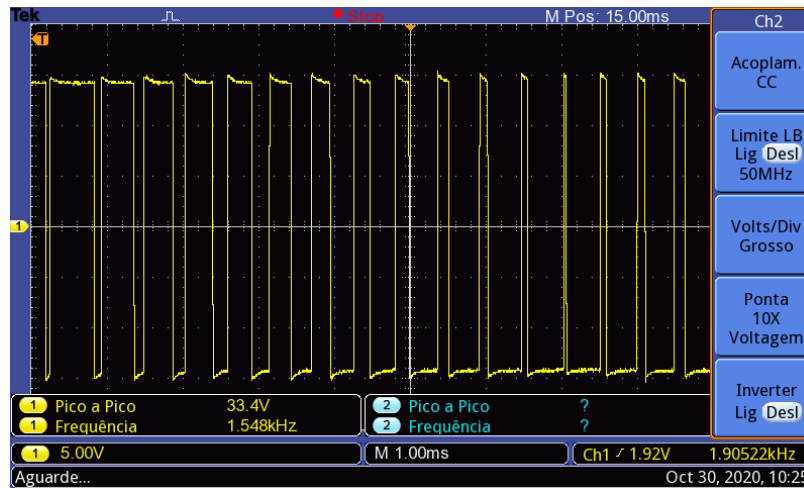
Figura 72: Tempo "morto" entre os acionamentos dos MOSFET's.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 73 mostra a saída PWM do inversor de frequência, gerada através do acionamento dos MOSFET's aos pares. É possível observar que a largura do sinal vai sendo ajustada de acordo com a frequência, aumentando e diminuindo seu *duty cycle*.

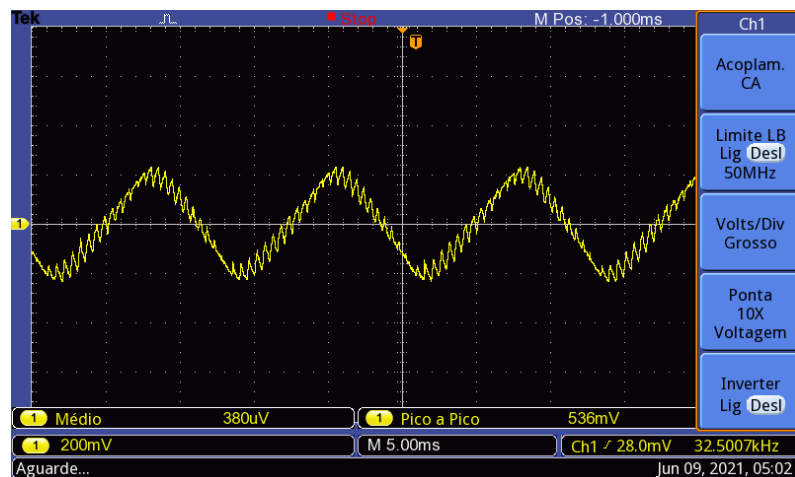
Figura 73: Saída PWM do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, temos a forma de onda da corrente sobre a carga representada na figura 74. Foi realizada a medição de corrente de uma carga indutiva composta por um resistor de 10 ohms em série com um indutor de 8 mH a partir de um sinal de tensão obtido sobre o resistor de shunt de 0,33 ohms, em série com essa carga.

Figura 74: Forma de onda observada sobre o resistor de *shunt*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 2 traz alguns valores de frequência e seus respectivos valores da velocidade observados no motor, medições realizadas com o auxílio de um tacômetro.

Tabela 2: Frequência x velocidade do motor.

<b>Frequência aproximada</b>	<b>Velocidade do motor</b>
30 Hz	936 rpm
60 Hz	1824 rpm
90 Hz	2727 rpm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores medidos encontram-se dentro do esperado. A rotação do motor medida para uma frequência aproximada de 60 Hz, por exemplo, foi de 1824 rpm, enquanto o valor nominal declarado nas especificações do motor seria de 1740 rpm para essa frequência. Essa pequena diferença (< 5%) é perfeitamente aceitável e explicada pela exatidão do tacômetro, tolerâncias dos componentes utilizados e a própria base de cálculo utilizada no programa. Para os demais valores de frequência observou-se uma linearidade nas velocidades medidas.

O apêndice D deste relatório traz algumas fotos dos ensaios em bancada dos três dispositivos desenvolvidos no decorrer deste projeto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho de conclusão de curso trouxe um grande fortalecimento dos conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia Elétrica. Tendo como referência a revisão bibliográfica descrita no trabalho e os resultados obtidos, é possível concluir que o trabalho elaborado atingiu os objetivos propostos.

Foi realizado, com sucesso, o desenvolvimento dos sistemas propostos para acionamento de cargas e motores. O retificador controlado monofásico em ponte, a *softstarter* e o conversor CC-CA (inversor de frequência) funcionaram dentro das especificações propostas. Foram projetados dispositivos de baixo custo e de fácil utilização como alternativa para o acionamento de motores, principalmente em aplicações no âmbito acadêmico.

Os sistemas foram todos modelados no *software* PSIM. O retificador controlado monofásico em ponte foi simulado no *software* Proteus, onde foi possível observar suas formas de onda de saída antes mesmo da montagem prática do circuito. Já os esquemáticos da *softstarter* e do inversor de frequência foram desenhados no Proteus para fins de análise e seu funcionamento foi comprovado diretamente na prática.

Os protótipos foram construídos em placas acrílicas compatíveis com o padrão das bancadas didáticas WEG presentes no laboratório de máquinas elétricas da Unisinos. Os dispositivos de acionamento ainda foram desenvolvidos em placas de circuito impresso. Pode-se afirmar que todos os circuitos foram testados e validados com êxito.

É possível perceber, assim como foi no decorrer do curso, a importância de uma atividade prática na consolidação dos conhecimentos adquiridos em sala de aula, pois pode-se realizar as análises com uma maior clareza do que está sendo feito. Saindo do âmbito da teoria, somos capazes de avaliar como aquilo que é estudado será aplicado e confirmamos a eficácia dos métodos aprendidos.

Enfim, é possível afirmar que os objetivos específicos deste trabalho foram atendidos em sua totalidade, e os questionamentos relacionados ao tema definido foram respondidos.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao finalizar o desenvolvimento do trabalho é possível perceber algumas oportunidades que podem ser exploradas na elaboração de trabalhos futuros. Algumas propostas estão listadas a seguir:

- Implementação de um display para melhor visualização dos valores parametrizados na *softstarter* e no inversor de frequência. Também é possível explorar mais a inserção dos valores inseridos pelo usuário, tornando este processo digital em vez de analógico (através de potenciômetros) e mais aberto a escolha de valores de tempo e frequência, por exemplo.
- Projetar uma alimentação CC de 12 V a 15 V interna nos circuitos da *softstarter* e do retificador controlado monofásico, a fim de eliminar a alimentação CC externa e entrar nos circuitos apenas com a alimentação CA da rede elétrica.
- Verificar possíveis desvios na medição das frequências selecionadas no inversor de frequência e realizar correções se necessário.
- Desenvolver dispositivos de proteção contra falta de energia ou curto-circuito nas saídas dos sistemas.
- Aprimorar os circuitos e utilizar componentes para trabalhar em potências mais elevadas, atendendo o acionamento de cargas maiores.
- Explorar o uso de outro tipo de microcontrolador na *softstarter* e no inversor de frequência a fim de reduzir tamanho e custos;
- Desenvolver outros tipos de dispositivos para complementar o conjunto, como um retificador controlado trifásico e placa para testes de tiristores e TRIAC's, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K. SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. / Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku; tradução: José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. - 5. ed. - Dados eletrônicos. - Porto Alegre: AMGH, 2013.

**Arduino Nano**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Acesso em 20/10/2019.

**Bancadas didáticas para treinamento**. Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Painéis-Elétricos/Bancadas-Didáticas/Bancadas-Didáticas-para-Treinamentos/Bancadas-Didáticas-para-Treinamentos/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_LEARNING\\_WORKBENCHES\\_FOR\\_TRAINING](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Painéis-Elétricos/Bancadas-Didáticas/Bancadas-Didáticas-para-Treinamentos/Bancadas-Didáticas-para-Treinamentos/p/MKT_WDC_BRAZIL_LEARNING_WORKBENCHES_FOR_TRAINING)>. Acesso em 20/10/2019.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. – 6. ed. – Florianópolis: Ed. Do Autor, 2006.

INTERNATIONAL RECTIFIER CORP. – IR2111, **Datasheet IR2111**. Disponível em: <[https://www.digchip.com/datasheets/download\\_datasheet.php?id=435321&part-number=IR2111](https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=435321&part-number=IR2111)>. Acesso em 24/11/2019.

**Módulo Didático (Kit educacional) de Eletrônica de Potência**. Disponível em: <<https://www.zilocchi.com.br/produtos/modulos-didaticos/eletronica-de-potencia/eletronica-de-potencia/>>. Acesso em 02/12/2019.

**Power Electronics**. Disponível em: <<https://www.delorenzogloball.com/power-electronics/>>. Acesso em 02/12/2019.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência** / Muhammad H. Rashid; tradução Leonardo Abramowicz; revisão técnica Carlos Marcelo de Oliveira Stein. – 4. ed. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

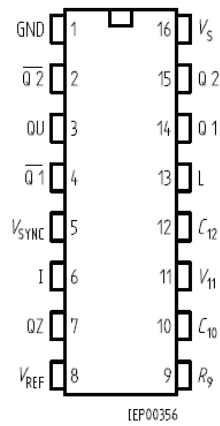
SIEMENS - TCA785, **Datasheet TCA785**. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>>. Acesso em: 22 de setembro de 2019.

**Sistemas Unificados de Eletrônica de Potência**. Disponível em: <<http://eletronica.datapool.com.br/categorias/eletroeletronica/eletronica-de-potencia-e-industrial/sistemas-unificados/>>. Acesso em 02/12/2019.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley** / Stephen D. Umans; tradução: Anatólio Laschuk. - 7. ed. - Dados eletrônicos. - Porto Alegre: AMGH, 2014.

## ANEXO A – PINAGEM DO TCA785

Figura 75: Pinagem do TCA785.



**Pin Configuration**  
(top view)

### Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	QU	Output U
4	$\overline{Q1}$	Output 1 inverted
5	$V_{SYNC}$	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	QZ	Output Z
8	$V_{REF}$	Stabilized voltage
9	$R_9$	Ramp resistance
10	$C_{10}$	Ramp capacitance
11	$V_{11}$	Control voltage
12	$C_{12}$	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	$V_s$	Supply voltage

Fonte: Datasheet TCA785.



**ANEXO B – PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DAS BANCADAS WEG**

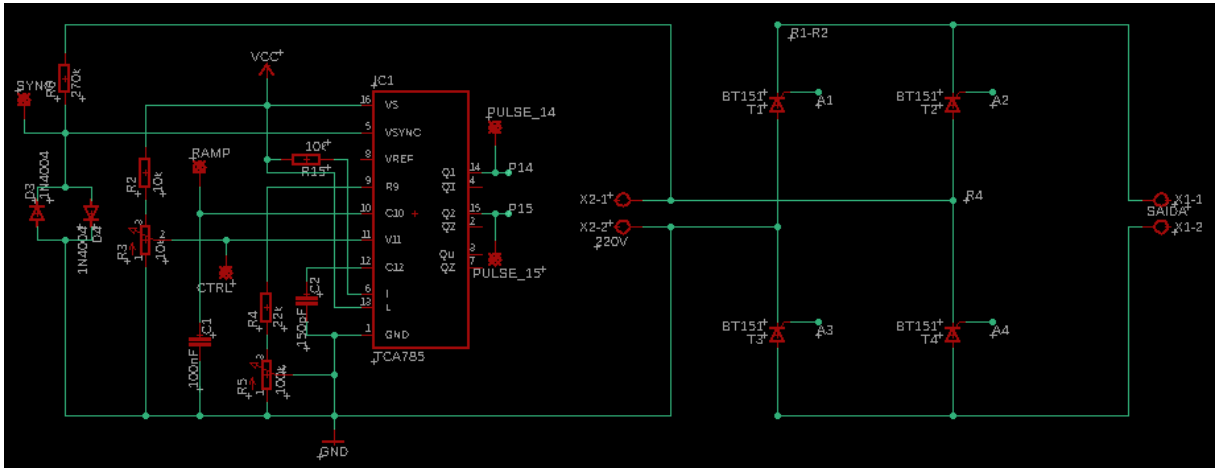
Figura 76: Placa de identificação das bancadas WEG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

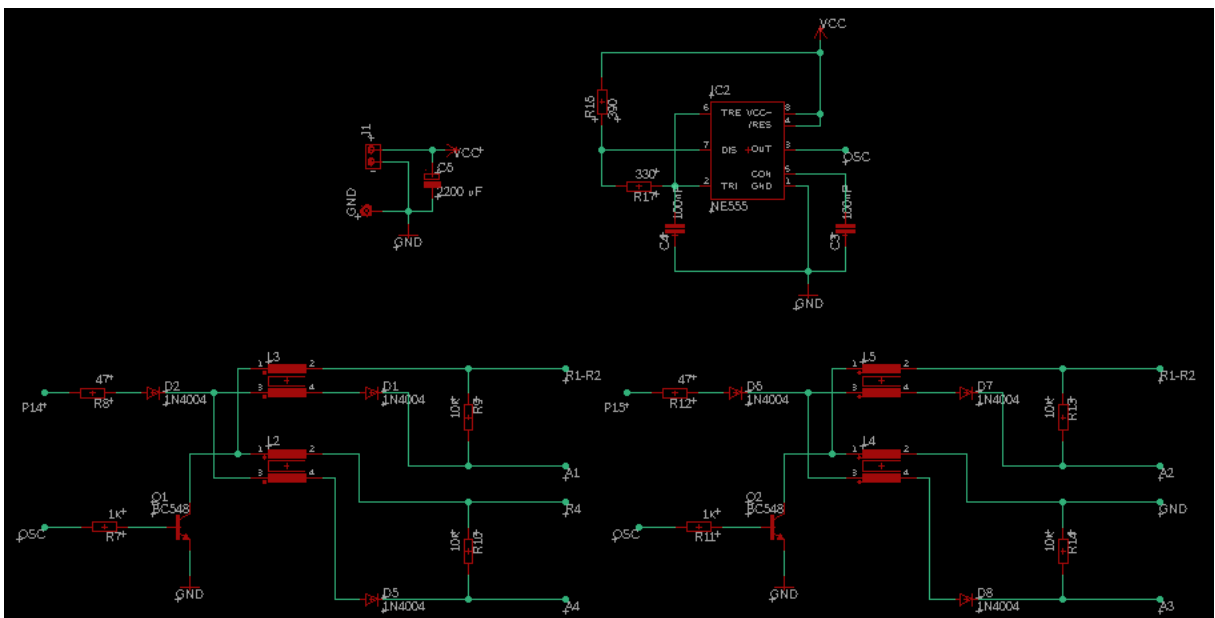
## APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO RETIFICADOR CONTROLADO NO SOFTWARE EAGLE

Figura 77: Etapa de controle e etapa de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

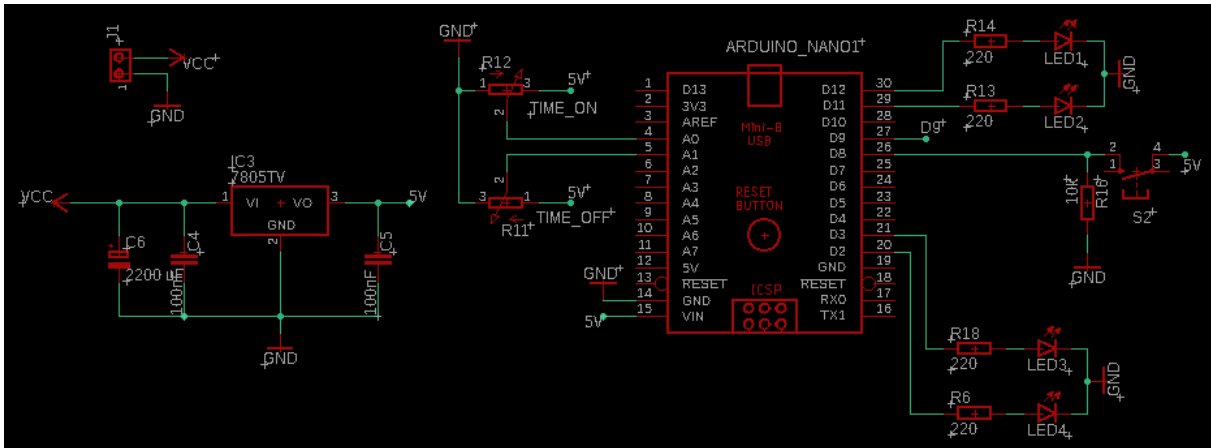
Figura 78: Etapa de entrada de sinal, gerador de alta frequência e acoplamento magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

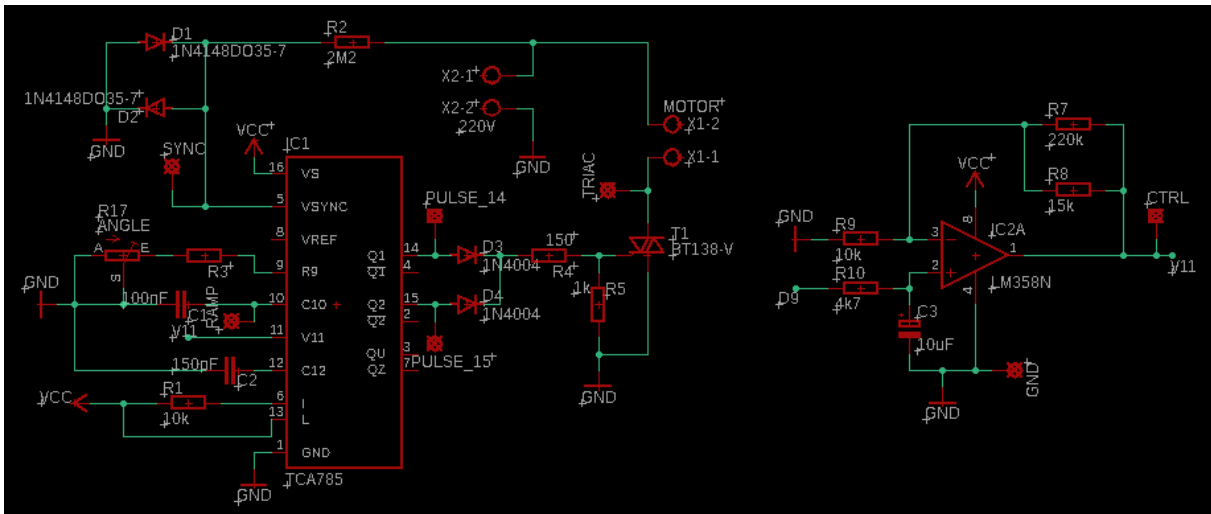
**APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DA *SOFTSTARTER* NO *SOFTWARE EAGLE***

Figura 79: Etapas de entrada de alimentação e Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

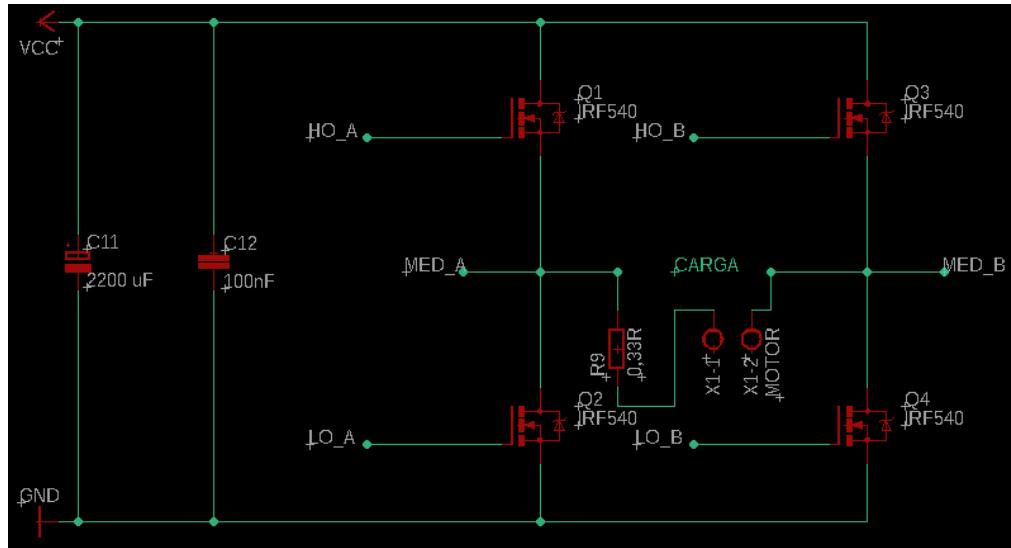
Figura 80: Etapas de controle via TCA785 e amplificador.



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 83: Etapa de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE D – FOTOS DOS ENSAIOS EM BANCADA

Figura 84: Vista traseira dos dispositivos em bancada (placa do retificador controlado à esquerda, *softstarter* ao centro e inversor de frequência à direita)



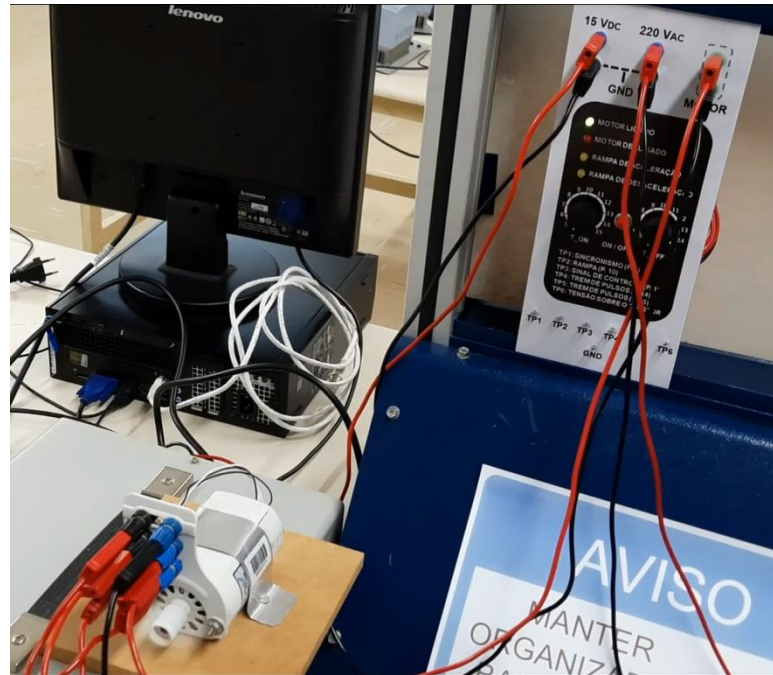
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 85: Ensaio do retificador controlado monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 86: Ensaio da *softstarter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 87: Ensaio do inversor de frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.