

MEC-SETEC  
INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS - *Campus Formiga*  
Curso de Engenharia Elétrica

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA "CNC  
FIO QUENTE"**

Rodrigo Menezes Sobral Zacaroni

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos  
Co-orientador: Prof Fernando Henrique Polas-  
trini

Formiga - MG

2019

RODRIGO MENEZES SOBRAL ZACARONI

## PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA "CNC FIO QUENTE"

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos  
Co-orientador: Prof Fernando Henrique Polastrini

Formiga - MG

2019

RODRIGO MENEZES SOBRAL ZACARONI

## PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA "CNC FIO QUENTE"

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nota: \_\_\_\_\_

### BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos**  
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga  
Orientador

---

**Prof. Fernando Henrique Polastrini**  
SENAI - Arcos  
Co-orientador

---

**Prof. MSc. Ana Paula Lima dos Santos**  
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga

Formiga, dia 27 de fevereiro de 2019

*Uma máquina pode fazer o trabalho de 50 pessoas comuns. Nenhuma máquina pode fazer o trabalho de uma pessoa extraordinária - Elbert Hubbard*

# Resumo

O trabalho proposto consiste em elaborar um projeto estrutural, mecânico e eletrônico de uma máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) e proceder com a execução da montagem da máquina. O CNC consiste em um sistema que possibilita o controle de máquinas, sendo utilizado principalmente em tornos, centros de usinagem, máquinas de corte/gravação laser, entre outras. Permite o controle simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico (código G). A proposta principal é desenvolver um projeto de uma “CNC fio quente” que será utilizada para corte de Isopor (Poliestireno Expandido (EPS)) e Depron (Poliestireno Extrudado (XPS)). Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados *softwares* Sketchup e AutoCad para realização do projeto estrutural. O projeto eletrônico foi desenvolvido utilizando a plataforma aberta de prototipação eletrônica Arduino carregado com a *firmware* Grbl. Os resultados obtidos foram o projeto estrutural mecânico, o projeto eletroeletrônico e execução da máquina CNC fio quente.

**Palavras-chaves:** Máquinas CNC, Grbl, Arduino, G-code.

# Abstract

The proposed work consists of elaborating a structural, mechanical and electronic design of a CNC machine (Computer Numerical Command) and proceede with the execution of the machine assembly. The CNC consists of a system that allows the control of machines, being used mainly in lathes, machining centers, laser cutting / engraving machines, among others. It allows the simultaneous control of several axes, through a list of movements written in a specific code (code G). The main proposal is to develop a project of a "hot wire CNC" that will be used to cut Styrofoam (Expanded Polystyrene (EPS)) and Depron (Extruded Polystyrene (XPS)). For the development of the work, Sketchup and AutoCad software were used to carry out the structural design. The electronic design was developed using the open Arduino electronic prototyping platform loaded with the Grbl firmware. The results obtained were the mechanical structural design, the electro-electronic design and the execution of the hot wire CNC machine.

**Key-words:** CNC machines, Grbl, Arduino, G-code.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Eixos primários de deslocamento . . . . .	12
Figura 2 – Corte em isopor com fio quente. . . . .	13
Figura 3 – Logomarca da empresa Formilaser. . . . .	14
Figura 4 – Fresadora CNC. . . . .	17
Figura 5 – Eixos de deslocamento do Torno CNC. . . . .	18
Figura 6 – Torno CNC . . . . .	18
Figura 7 – <i>Router</i> CNC. . . . .	19
Figura 8 – <i>Laser</i> CNC. . . . .	20
Figura 9 – Exemplo de um projeto desenvolvido utilizando <i>software</i> AutoCAD®. . . . .	21
Figura 10 – Arquivo CAD carregado em <i>software</i> CAM (Aspire). . . . .	21
Figura 11 – Simulação de percursos no programa CAM (Aspire) da ferramenta de corte em CNC <i>router</i> . . . . .	22
Figura 12 – Arduino UNO . . . . .	24
Figura 13 – Modelo de circuito ponte H. . . . .	25
Figura 14 – Diagrama TB6600HG. . . . .	26
Figura 15 – Motor de Relutância Variável. . . . .	27
Figura 16 – Motor de Passo de Ímã Permanente. . . . .	28
Figura 17 – Motor de Passo híbrido. . . . .	29
Figura 18 – Motor de Passo Unipolar. . . . .	29
Figura 19 – Acionamento por passo completo de única excitação de fase. . . . .	31
Figura 20 – Acionamento por passo completo com excitação dual. . . . .	31
Figura 21 – Acionamento por meio passo. . . . .	33
Figura 22 – Corrente por fase no modo de acionamento por micropasso. . . . .	34
Figura 23 – Modulação por largura de pulso. . . . .	34
Figura 24 – Circuito integrado LM555. . . . .	35
Figura 25 – Circuito PWM com LM555. . . . .	36
Figura 26 – Arduino UNO, <i>Shield</i> CNC e <i>Drivers</i> A4988. . . . .	38
Figura 27 – Fluxograma mostrando a sequência de procedimentos para utilizar o Arduino como controladora CNC. . . . .	39
Figura 28 – Protótipo Mini CNC <i>Plotter</i> . . . . .	40
Figura 29 – Ajuste da tensão $V_{REF}$ para limitar a corrente dos motores de passo. . . . .	42
Figura 30 – Projeto 3D do segundo protótipo. . . . .	43
Figura 31 – Confeção do segundo protótipo de CNC. . . . .	44
Figura 32 – Teste de usinagem em MDF. . . . .	45
Figura 33 – Usinagem de uma placa PCB. . . . .	45
Figura 34 – Modelo referência de uma CNC fio quente. . . . .	46

Figura 35 – Projeto Estrutural CNC fio quente. . . . .	47
Figura 36 – Esquema de conexões do Arduino carregado com Grbl v1.1. . . . .	48
Figura 37 – Ligação dos optoacopladores para evitar ruídos das chaves. . . . .	48
Figura 38 – Projeto da <i>shield</i> CNC no <i>software</i> Fritizing. . . . .	49
Figura 39 – Configuração do modulo HY-DIV268N-5A. . . . .	49
Figura 40 – Controlador PWM. . . . .	50
Figura 41 – Esquema eletroeletrônico do painel de controle. . . . .	50
Figura 42 – Fabricação da estrutura da CNC fio quente. . . . .	53
Figura 43 – Resultado parcial da montagem estrutural da CNC. . . . .	53
Figura 44 – Peças projetadas para impressão 3D. . . . .	54
Figura 45 – Peças obtidas em impressão 3D. . . . .	55
Figura 46 – PCB <i>Shield</i> Arduino. . . . .	55
Figura 47 – Painel Elétrico e de Comando. . . . .	56
Figura 48 – Projeto finalizado. . . . .	58
Figura 49 – Preparação de arquivo em <i>software</i> CAD. . . . .	59
Figura 50 – Obtenção do <i>gcode</i> em <i>software</i> CAM. . . . .	59
Figura 51 – Resultado do primeiro corte realizado em XPS. . . . .	60
Figura 52 – Validação de resultado da letra P. . . . .	60
Figura 53 – Validação de resultado da letra P. . . . .	61
Figura 54 – Validação de resultado da letra E. . . . .	62
Figura 55 – Validação de resultado da letra E. . . . .	63

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros dos <i>drivers</i> de DVD/CD e Disquete. . . . .	40
Tabela 2 – Resolução em função do modo de acionamento selecionado. . . . .	41
Tabela 3 – Material estrutural e mecânico da CNC fio quente. . . . .	51
Tabela 4 – Material Elétrico e Eletrônico da CNC fio quente. . . . .	52
Tabela 5 – Parâmetros para configuração de movimentação da CNC fio quente. . .	56
Tabela 6 – Resolução em função do modo de acionamento selecionado. . . . .	57

# Lista de abreviaturas e siglas

<b>CAD</b>	Desenho Assistido por Computador.
<b>CAM</b>	Manufatura Assistida por Computador.
<b>CN</b>	Controle Numérico Computadorizado.
<b>EIA</b>	<i>Electronic Industries Association.</i>
<b>EPS</b>	Poliestireno Expandido ou Isopor.
<b>MDF</b>	<i>Medium Density Fiberboard</i>
<b>MEC</b>	Ministério da Educação.
<b>MIT</b>	Instituto de Tecnologia de Massachusetts.
<b>PCB</b>	Placa de circuito impresso.
<b>PWM</b>	<i>Pulse Width Modulation.</i>
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus.</i>
<b>XPS</b>	Poliestireno Extrudado

# Sumário

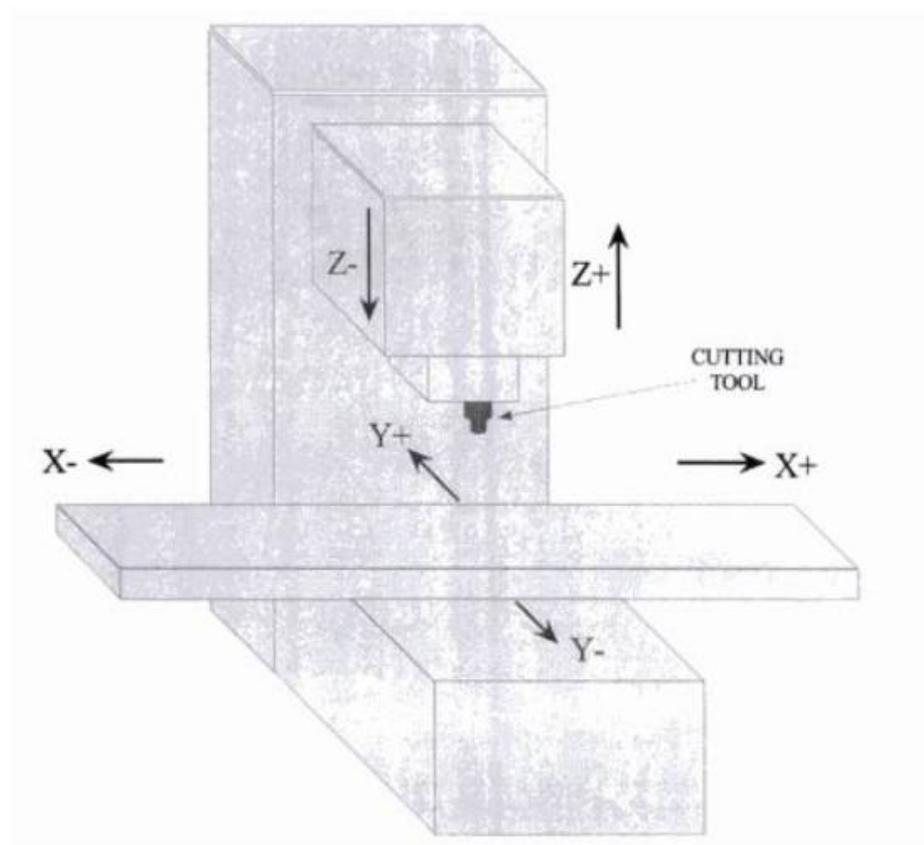
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivo	14
1.3	Estrutura do Trabalho	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	História da CNC	16
2.2	Tipos de CNC	17
2.2.1	Fresadora CNC	17
2.2.2	Torno CNC	17
2.2.3	Router CNC	18
2.2.4	Laser CNC	19
2.3	Softwares CAD e CAM	20
2.4	Linguagem de Máquina (G-Code)	22
2.5	Comunicação computador e CNC	22
2.5.1	Arudino UNO	23
2.5.2	Firmware Grbl	24
2.5.3	Terminal serial - Universal G-conde Sander	24
2.5.4	Driver de Potência	25
2.6	Motor de Passo	26
2.6.1	Tipos de Motores de passo	27
2.6.1.1	Motor de Relutância Variável	27
2.6.1.2	Motor de Imã Permanente	28
2.6.1.3	Motor híbrido	28
2.6.2	Modos de operação	29
2.6.2.1	Alimentação Unipolar	29
2.6.2.2	Alimentação Bipolar	30
2.6.3	Modos de Acionamento	30
2.6.3.1	Passo completo de Única Excitação de Fase	30
2.6.3.2	Passo Completo com Excitação Dual	31
2.6.3.3	Meio Passo	32
2.6.3.4	Micropasso	33
2.7	Ferramenta de Corte	34
2.7.1	Circuito PWM	35
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>37</b>

<b>3.1</b>	<b>Protótipos em escala reduzida</b> . . . . .	<b>37</b>
3.1.1	Protótipo Mini CNC <i>Plotter</i> . . . . .	37
3.1.2	Protótipo CNC <i>Router</i> em MDF . . . . .	42
<b>3.2</b>	<b>CNC fio quente</b> . . . . .	<b>46</b>
3.2.1	Projeto Estrutural Mecânico . . . . .	46
3.2.2	Projeto Eletroeletrônico . . . . .	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Execução do Projeto Estrutural Mecânico</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>4.2</b>	<b>Execução do Projeto Eletroeletrônico</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Entrega da CNC e teste de desempenho</b> . . . . .	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Validação dos Resultados</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversas ferramentas são acionadas por CNC (Comando Numérico Computadorizado ou Controle Numérico Computadorizado, do inglês *Computer Numeric Control*), maximizando os resultados de sistemas produtivos, e melhorando a qualidade e eficácia da linha de produção. A tecnologia CNC permite controle de ferramentas a partir de interfaces computadorizadas. São capazes de confeccionar peças complexas através da extrusão ou deposição de camadas (POLASTRINI, 2016). As ferramentas de corte ou deposição das máquinas CNC's em geral, se movimentam em sistemas de coordenadas ou eixos de deslocamento, podendo ser os eixos X-Y, X-Z ou Y-Z (plano bidimensional - 2D) ou X,Y e Z (plano tridimensional - 3D) conhecidos como eixos lineares primários de deslocamento conforme apresentado na Figura 1 (MADISON, 1996).

Figura 1 – Eixos primários de deslocamento



Fonte: MADISON (1996).

As máquinas CNC recebem instruções de posicionamento e movimentação através da linguagem de máquina comumente conhecida como G-code (POLASTRINI, 2016), este

por sua vez é gerado por um programa CAM (Manufatura Assistida por Computador, do inglês, *Computer-Aided Manufacturing*) que recebe os modelos criados em softwares CAD (Desenho Assistido por Computador, do inglês, *Computer-Aided Design*). O dispositivo responsável por receber o G-code e executar os movimentos de uma CNC, através de seus atuadores (motores), geralmente são circuitos microcontrolados, embarcados com um *firmware* que detém de um conjunto de instruções operacionais para controle da CNC a partir da interpretação do G-code.

Diversas máquinas CNC foram desenvolvidas para corte, gravação, usinagem e impressão, entre as mais conhecidas e utilizadas destacam-se: tornos, fresadoras, *routers*, *lasers* e impressoras 3D. Neste trabalho será empregado o conceito da tecnologia CNC para corte de material com fio quente, uma ferramenta não muito conhecida no universo industrial, porém muito útil para empresas do ramo de artes visuais e decoração. O fio quente é utilizado para corte de EPS (Poliestireno Expandido ou Isopor) ou XPS (Poliestireno Extrudado). A CNC fio quente realiza cortes em blocos de EPS ou XPS (popularmente conhecidos como isopor ou Depron) a partir de um desenho em 2D projetado em *software* de desenho vetorial bidimensional (CAD). A ferramenta de corte utilizada é um fio de tungstênio percorrido por corrente elétrica, que por consequência da passagem desta, dissipa energia na forma de calor, realizando o corte no material, conforme apresentado na Figura 2. Assim, este trabalho consiste na elaboração e execução de um projeto estrutural e eletroeletrônico de uma CNC fio quente, a fim de atender as demandas específicas de uma empresa que trabalha no ramo de comunicações visuais e decoração.

Figura 2 – Corte em isopor com fio quente.



Fonte: Youtube - CMCut 1.0 a CNC FIO QUENTE (2018).

## 1.1 Justificativa

A principal justificativa para desenvolvimento deste trabalho está em atender a uma demanda de mercado, mais especificamente da empresa Formilaser, com sede na cidade de Formiga-MG, a qual necessita realizar trabalhos de corte com fio quente em blocos de EPS ou XPS de maneira automatizada. A empresa Formilaser, com logo presente na Figura 3, atua no mercado prestando serviços de corte à laser, impressão 3D e Router CNC, fabricam caixas, porta-chaves, porta-retratos, tábuas personalizadas, chaveiros, troféus e diversos outros artigos de decoração para festas, casa & decoração, casamento, formatura e artigos religiosos.

Figura 3 – Logomarca da empresa Formilaser.



Fonte: Formilaser (2018).

Outro aspecto a ser destacado está na atividade de um engenheiro electricista que conforme consta no Referencial do Curso de Engenharia Elétrica do Ministério da Educação (MEC), “Em sua atuação, estuda, projeta e especifica materiais, componentes, dispositivos e equipamentos elétricos, eletromecânicos, magnéticos, de potência, de instrumentação, de aquisição de dados e de máquinas elétricas” (BRASIL, 2006, p.2). O mesmo após desenvolver conhecimento em diversas áreas deve estar apto a aplicar os conceitos adquiridos para solucionar problemas, fato realizado e que será apresentado por meio deste trabalho de conclusão de curso.

## 1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho consiste na entrega de uma máquina CNC fio quente à empresa Formilaser, sediada na cidade de Formiga MG. Para isto, faz-se necessário desenvolver o projeto estrutural mecânico, assim como o projeto eletroeletrônico da máquina CNC fio quente, capaz de realizar cortes de maneira automatizada em blocos de EPS ou XPS. O projeto eletrônico terá por base a plataforma Arduino como controladora da máquina, assim como materiais facilmente encontrados no mercado nacional, o que viabiliza sua confecção em baixo custo. Já o projeto estrutural mecânico será fundamentado no *software* Sketchup e AutoCad, o qual representará de forma virtual o modelo gráfico 3D

da CNC para apresentação à empresa, onde será possível verificar alguns aspectos técnicos e visuais, tais como viabilidade do projeto, dimensionamentos, *design* e posteriormente será utilizado para a confecção de peças e do próprio projeto como um todo. O intuito é que o projeto seja executado e a máquina CNC se torne uma ferramenta versátil e de qualidade, e que por função final atenda a demanda de produção da empresa parceira no desenvolvimento.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é constituída por 5 capítulos, o Capítulo 1, apresenta a introdução sobre a tecnologia CNC, a justificativa e objetivos deste trabalho. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica na qual o trabalho foi embasado. O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento de protótipos em escala reduzida e dos projetos: estrutural mecânico e eletroeletrônico. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na execução dos projetos, teste de desempenho e validação dos resultados obtidos. Por fim o Capítulo 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 História da CNC

A busca por racionalizar e automatizar processos faz parte da evolução humana, desde as civilizações mais antigas o homem desenvolve novas técnicas que visam simplificar todo tipo de trabalho, seja ele físico ou mental. Um exemplo mais comum está no desenvolvimento da calculadora, um tipo de automação do trabalho mental (SENAI/SC, 2006).

Durante a 2ª Guerra Mundial a necessidade de produção em massa e sobretudo precisão, de navios, barcos, aviões, tanques, armas, caminhões etc., associada com a baixa oferta de mão de obra, em consequência da guerra, foram fatores decisivos para evolução da automação. Diante deste cenário, iniciou-se o processo de pesquisa no qual resultou na primeira máquina comandada numericamente por fita de papel furado, uma fresadora de 3 eixos, em 1949 no laboratório de Servomecanismo do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), em parceria com a Força Aérea Norte Americana (*U.S. Air Force*) e a empresa *Parsons Corporation of Traverse City*, em Michigan. Passado um período de testes e ajustes, finalmente em maio de 1953 foi publicado o relatório final do novo processo de Comando Numérico (CN). Peças complexas e de grande precisão empregadas na fabricação de aeronaves da Força Aérea Americana, passaram a ser produzidas de maneira simples e rápida. A partir de 1957 houve nos EUA uma grande corrida na fabricação de máquinas comandadas por CN e devido à falta de padronização de linguagem de comando de máquinas, cada fabricante tinha uma linguagem própria. Em 1958 por intermédio da EIA (*Electronic Industries Association*) devido aos estudos para padronização dos tipos de linguagem, surgiu o tipo de entrada de dados mais utilizado até os dias atuais, via computador. Com a evolução da eletrônica e o surgimento dos circuitos integrados no início da década de 70 surgiram as primeiras máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC), evolução do CN (SENAI/SC, 2006). Com o rápido desenvolvimento da tecnologia CNC devido a padronização da linguagem de máquina, o código G (G-code), houve o surgimento dos primeiros programas CAD e a evolução da tecnologia dos mini-computadores (PROTOPTIMUS, 2018).

Os primeiros controladores eletrônicos eram grandes, maiores até que a própria máquina, consumiam muita energia, falhavam frequentemente e a sua capacidade de cálculo era muito limitada, diferente dos controladores atuais que são pequenos e com uma capacidade de processamento muito superior. Com o passar dos anos houve uma redução nos custos e aumento da capacidade de processamento dos controladores, com isso a tecnologia CNC ganhou cada vez mais espaço nas indústrias (CNC, 2018).

## 2.2 Tipos de CNC

As máquinas CNC são empregadas em diversos setores da indústria, algumas das aplicações mais comuns são: usinagem, corte e injeção de materiais. A seguir serão apresentadas as principais máquinas CNC utilizadas pela indústria e comércio em geral.

### 2.2.1 Fresadora CNC

Uma fresadora, conforme apresenta-se na Figura 4, é uma máquina capaz de transformar um material bruto em uma peça com alguma complexidade geométrica. É constituída por um motor de alta velocidade, um mandril e a fresa (material de corte) que se desloca ao longo do eixo Z e uma mesa base que desloca o material linearmente no plano XY (LYRA, 2010). Desenvolvida para usinar alumínio, aço e até mesmo titânio, devido sua construção que prioriza a força de deslocamento e não velocidade (POLASTRINI, 2016).

Figura 4 – Fresadora CNC.



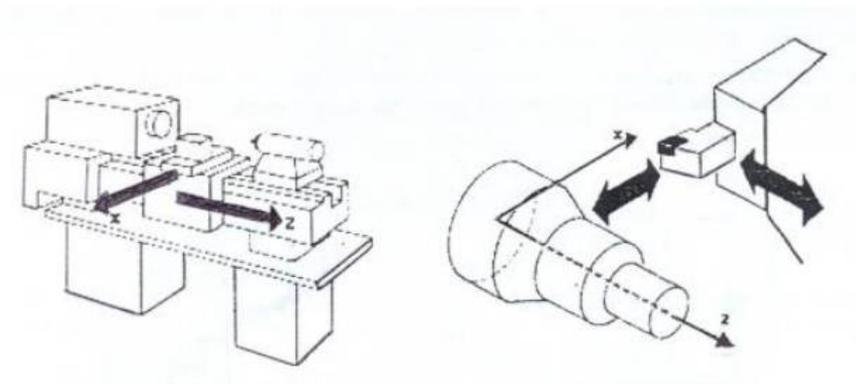
Fonte: Flickr (2016).

### 2.2.2 Torno CNC

Desempenha as mesmas funções de um torno mecânico, em processo de usinagem de peças de revolução ou cilíndricas, porém, de maneira automatizada, onde os movimentos

são controlados por motores e controladoras. A ferramenta de desbaste se desloca em dois eixos lineares, eixo X (determina o diâmetro da peça) e eixo Z (determina o comprimento da peça) conforme ilustrado na Figura 5 (CEETEPS, 2018).

Figura 5 – Eixos de deslocamento do Torno CNC.



Fonte: CEETEPS (2018).

A peça é fixada por castanhas acopladas ao eixo central da máquina, chamado de eixo árvore que é coincidente ou paralelo ao eixo Z, o qual imprime um movimento de rotação na peça a ser usinada, diferentemente do que acontece com a fresadora e a *router* CNC onde a ferramenta de desbaste realiza movimento rotacional (POLASTRINI, 2016). A Figura 6 apresenta um torno CNC.

Figura 6 – Torno CNC



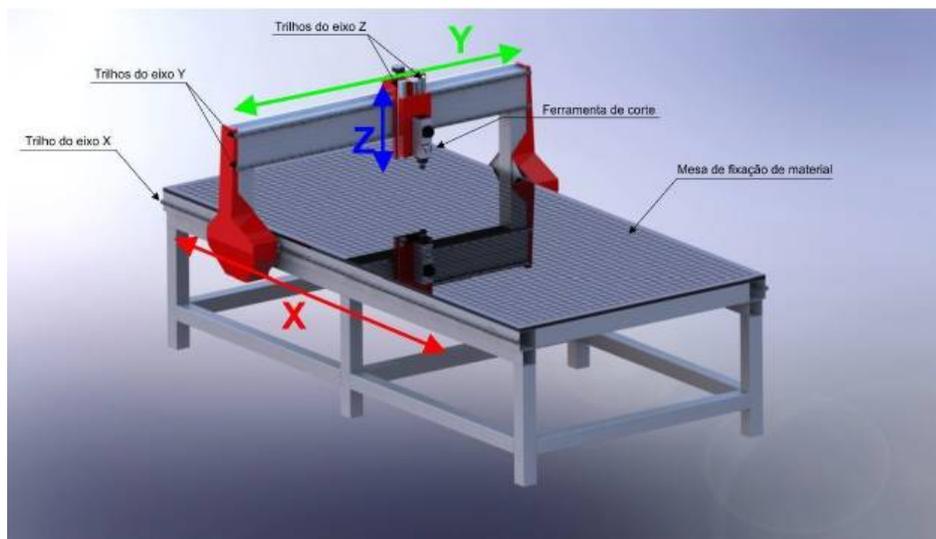
Fonte: www.romi.com (2018).

### 2.2.3 Router CNC

Conforme ilustrado na Figura 7, são máquinas utilizadas para usinagem de materiais não ferrosos, geralmente chapas de madeira, polímeros e ligas de alumínio. Semelhantemente às fresadoras CNC, as *routers* se movimentam em 3 eixos primários de movimentação,

os eixos X-Y (horizontal) que geralmente são eixos de movimentos longos e Z (vertical) de deslocamento reduzido. O material a ser trabalhado é fixado no plano horizontal X-Y, comumente conhecido como mesa de sacrifício, onde o corte do material é realizado por um motor de alta rotação, conhecido como *spindle*, que por sua vez movimenta-se ao longo do eixo Z e as ferramentas de corte são fresas (BORTOLAN, 2017).

Figura 7 – Router CNC.



Fonte: POLASTRINI (2016).

## 2.2.4 Laser CNC

Máquinas CNC de corte a *laser*, do ponto de vista estrutural, são muito semelhantes às CNC *router*s, sendo a principal diferença a inexistência do eixo de deslocamento Z, onde o canhão *laser* é fixo, sendo assim, a CNC *laser* opera com cortes planos, em duas dimensões (plano X-Y) com maior velocidade de corte comparado a CNC *router*, já que a ferramenta não tem contato com o material (POLASTRINI, 2016). A potência do raio *laser* é definida de acordo com a espessura do material a ser cortado, ou se ocorrerá apenas gravação na superfície. Entre os materiais que podem ser cortados estão: chapas de MDF (Placa de fibra de média densidade, do inglês *Medium Density Fiberboard*), madeira, acrílico, polímeros, papel, papelão, etc. Além do corte, pode realizar gravação nos materiais anteriormente citados incluindo vidro, alumínio anodizado ou revestido, ou outros metais maciços desde que devidamente revestidos com uma camada que possa ser gravada. Apesar de possível gravar em alumínio anodizado ou revestido, a cortadora *laser* não pode ser usada para cortar metais, pois a superfície do metal reflete o *laser*, que retorna para os componentes ópticos podendo danificar a cortadora. A seguir a Figura 8 apresenta uma máquina *laser* CNC.

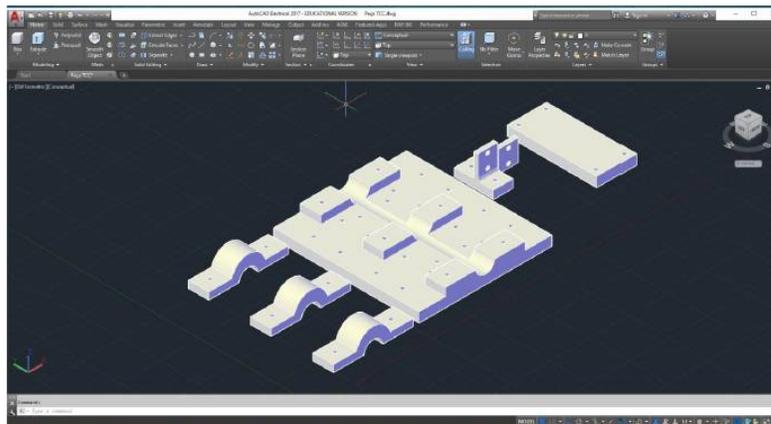
Figura 8 – Laser CNC.



Fonte: [www.indiamart.com](http://www.indiamart.com) (2019).

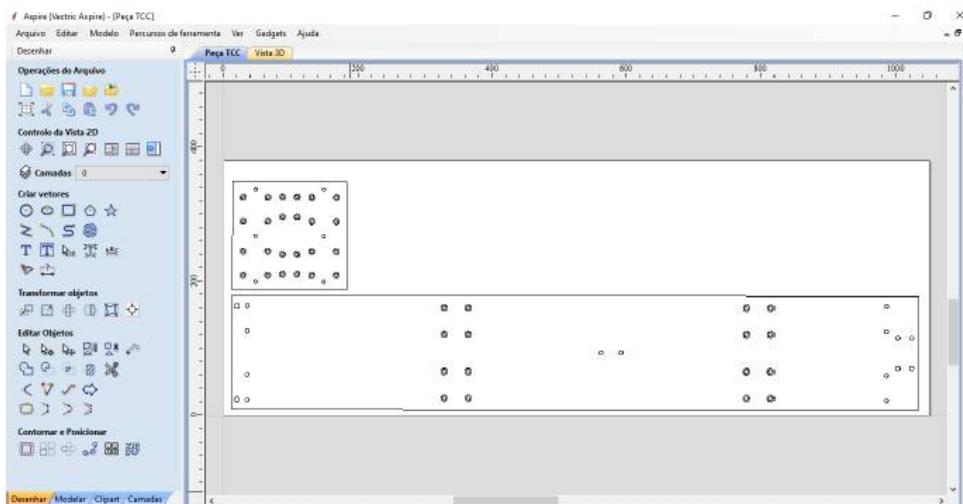
## 2.3 Softwares CAD e CAM

O processo de fabricação de peças utilizando a tecnologia CNC requer inicialmente o auxílio dos *softwares* CAD e CAM, responsáveis pelo elo entre projeto e produção. O CAD é uma ferramenta computacional com interface gráfica muito utilizada por engenheiros, arquitetos e *designers* em suas atividades de desenvolvimento de produtos, *design* industrial ou desenho técnico, nos quais são definidas as informações geométricas do modelamento do desenho bidimensional ou tridimensional, conforme representado pela Figura 9. Existem sistemas CAD para modelagem de chapas metálicas, tubulações, circuitos elétricos, modelamento de formas complexas, desenhos 2D, entre outras aplicações (POLASTRINI, 2016) (FETT, 2010). Existe uma infinidade de *softwares* CAD, para diferentes atividades e propósitos, alguns exemplos de *softwares* com versão gratuita disponível para *download* são: Sketchup, QCAD, LibreCad e DraftSight. Existe também os *softwares* AutoCAD®, SolidEdge® e SolidWorks® que não são gratuitos, porém dentre estes, os dois primeiros são disponibilizados de forma gratuita para estudantes.

Figura 9 – Exemplo de um projeto desenvolvido utilizando *software* AutoCAD®.

Fonte: do próprio autor.

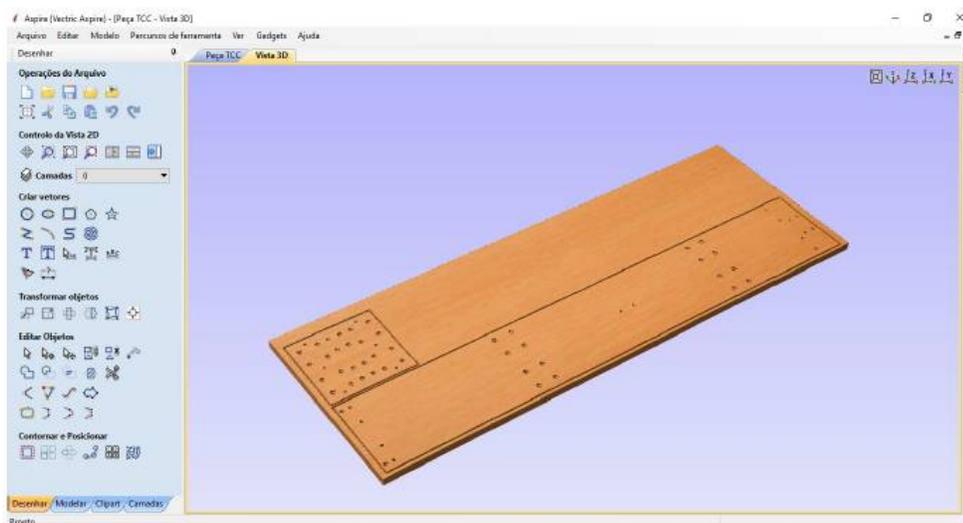
Depois de concebido um projeto em *software* CAD, utiliza-se o *software* CAM para leitura da geometria CAD e conversão das dimensões do desenho em coordenadas G-code. Para isso, é necessário definir alguns parâmetros no programa CAM, tais como: dimensões do material a ser trabalhado; ponto zero da peça (origem); velocidades de avanço; rotação; penetração; e se for o caso, escolha de ferramentas e estratégias de usinagem ou deposição de material. A Figura 10 representa um arquivo CAD carregado em *software* CAM.

Figura 10 – Arquivo CAD carregado em *software* CAM (Aspire).

Fonte: do próprio autor.

Definidos os parâmetros anteriormente citados, é possível simular os percursos da máquina, prever tempo da execução da tarefa e visualizar o resultado final da usinagem, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Simulação de percursos no programa CAM (Aspire) da ferramenta de corte em CNC *router*.



Fonte: do próprio autor.

## 2.4 Linguagem de Máquina (G-Code)

G-Code, uma abreviação de *Geometric Code* é a linguagem universal de programação utilizada para controle de máquinas CNC. O G-code é obtido por meio dos *softwares* CAM. Trata-se de uma linguagem simples e rudimentar, as instruções de movimentação da máquina CNC são enviadas de maneira sequencial, linha a linha, através de um terminal serial que realiza a comunicação entre computador e a controladora da máquina (PEREIRA, 2014). A maioria dos *softwares* CAD disponibilizam um *plugin* CAM para criação de G-code diretamente do próprio *software* CAD, alguns exemplos são o Sketchup®, AutoCad® e Solidworks®.

## 2.5 Comunicação computador e CNC

Como a proposta deste trabalho prioriza um projeto acessível e de baixo custo, a controladora escolhida para desenvolvimento do projeto eletrônico será a plataforma Arduino, pelo fato de seu *hardware* e *software* juntarem diversos componentes que facilitam o uso para pessoas que não são especialistas em eletrônica e programação. Além disso, outro aspecto a se destacar, é que seus códigos são amplamente compartilhados na internet, o que contribui para viabilidade do processo de confecção do projeto proposto (LEITE; FONSECA; LIMA, 2016) (ARDUINO, 2018). Neste caso, o foco das pesquisas relacionadas a *firmware* e *terminal serial* para comunicação entre computador e máquina serão relacionados com a plataforma Arduino.

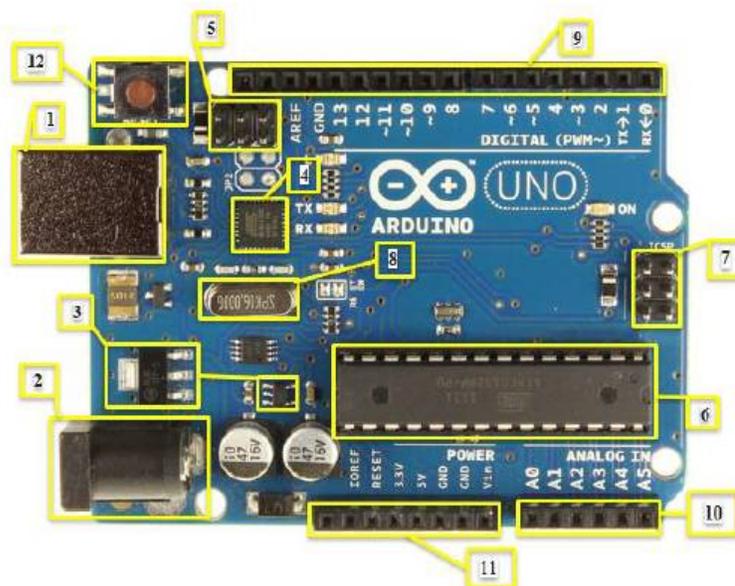
### 2.5.1 Arduino UNO

Existem inúmeras plataformas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores, tais como: Galileo da Intel, os PICs da *Microship* e o mais popular, o Atmega328P, que compõe a plataforma Arduino Uno. Essas plataformas contribuem de maneira significativa para o chamado “Movimento *Maker*”, conhecido como “faça você mesmo”, uma tendência mundial que incentiva a construção de projetos de robótica, automação residencial, impressoras 3D e máquinas CNC em geral entre outros (SILVEIRA, 2016).

O Arduino Uno R3 é uma plataforma popular de prototipagem eletrônica *open-source* de baixo custo, que foi desenvolvida na Itália em 2005 na busca por interação em projetos escolares no *Interaction Design Institute Ivrea* (IDII) – uma antiga escola de *design* italiana e reduzir custos dos sistemas de prototipagem da época (COSTA, 2018). Dentre os componentes da plataforma apresentada na Figura 12, destacam-se:

1. Porta para comunicação USB (*Universal Serial Bus*);
2. Conector jack - alimentação externa de 7 a 12V;
3. Reguladores de tensão - Garante tensão estabilizada de 3,3 e 5V;
4. Microcontrolador ATMEL ATMEGA16U2 - responsável pela comunicação via porta USB do Arduino com o computador;
5. Conector ICSP do ATMEGA16u2;
6. Microcontrolador ATMEL ATMEGA328 – componente principal da placa Arduino Uno;
7. Conector para gravação ICSP do Atmega328;
8. Cristal Oscilador 16MHz;
9. 14 pinos I/O digitais;
10. 6 pinos I/O analógicos;
11. Pinos de alimentação;
12. Botão de *reset*.

Figura 12 – Arduino UNO



Fonte: do próprio autor.

### 2.5.2 *Firmware Grbl*

Em 2009 *Simen Svale Skogsrud* presenteou a comunidade *open source* liberando a primeira versão do Grbl, um *firmware* de alta performance que contém um conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no *hardware* do Arduino, permitindo assim, por exemplo, executar as rotinas de máquinas cartesianas de 3 eixos X-Y-Z. Trata-se de uma ferramenta de interpretação de G-code de alto desempenho para controle de máquinas CNC escrito em linguagem C e por se tratar de uma ferramenta de código aberto o usuário pode realizar as modificações que julgar necessárias para adequar a seus projetos. Amplamente utilizada pelos simpatizantes do “movimento *Maker*” com destaque para os fabricantes de impressoras 3D, *routers* CNC, fresadoras CNC e *lasers* CNC (FERNANDES; CASTANHO; GOMES, 2017) (GRBL, 2018).

### 2.5.3 *Terminal serial - Universal G-code Sander*

É um *software* livre desenvolvido em Java usado para interface com controladores CNC, responsável por transmitir o conjunto de instruções (G-code) que o Grbl deverá executar. Permite acesso as configurações dos parâmetros da máquina CNC tais como: velocidades de deslocamento e aceleração dos eixos X, Y e Z; habilitar sensores de fim de curso; habilitar limites através de *software*; habilitar função *homing*, que leva a ferramenta até os limites estabelecidos pelos sensores fim de curso a fim de identificar o ponto zero da máquina; indicar quantidade de passos necessários para a ferramenta mover 1mm em

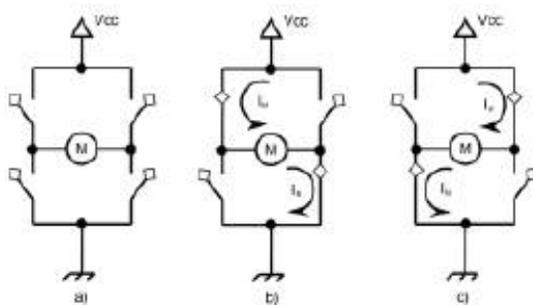
cada eixo; indicar a configuração de micropassos utilizada pelo *driver* de potência, entre outras. Permite a pré-visualização da trajetória da ferramenta antes da execução do código e ajuste do ponto zero da ferramenta (GRBL, 2018).

Existem diversos programas sugeridos no site do github.com, criado por desenvolvedores, que desempenham a mesma função do *Universal Gcode Sander*, sendo eles: bCNC, Easel, GRBLweb, GrblPanel, grblControl, entre outros (GRBL, 2018).

#### 2.5.4 *Driver* de Potência

Um *driver* é um circuito eletrônico responsável amplificar um sinal digital de baixa potência, permitindo ativar ou desativar um atuador que trabalha com maiores níveis de energia. Neste caso, o Arduino compilado com Grbl, recebe via porta USB as linhas de comando do G-code de um computador com o *software* terminal serial, interpreta o G-code e envia sinais através de suas portas digitais a drivers de potência que convertem estes sinais em informação útil para o motor de passo (PAZOS, 2002) (FIEBIG, 2018). A Figura 13 apresenta uma ponte H, sistema de chaveamento responsável por controlar o sentido da corrente aplicada ao motor através dos pares de chaves opostas diagonalmente, tornando possível determinar o sentido de rotação do motor (FIEBIG, 2018).

Figura 13 – Modelo de circuito ponte H.

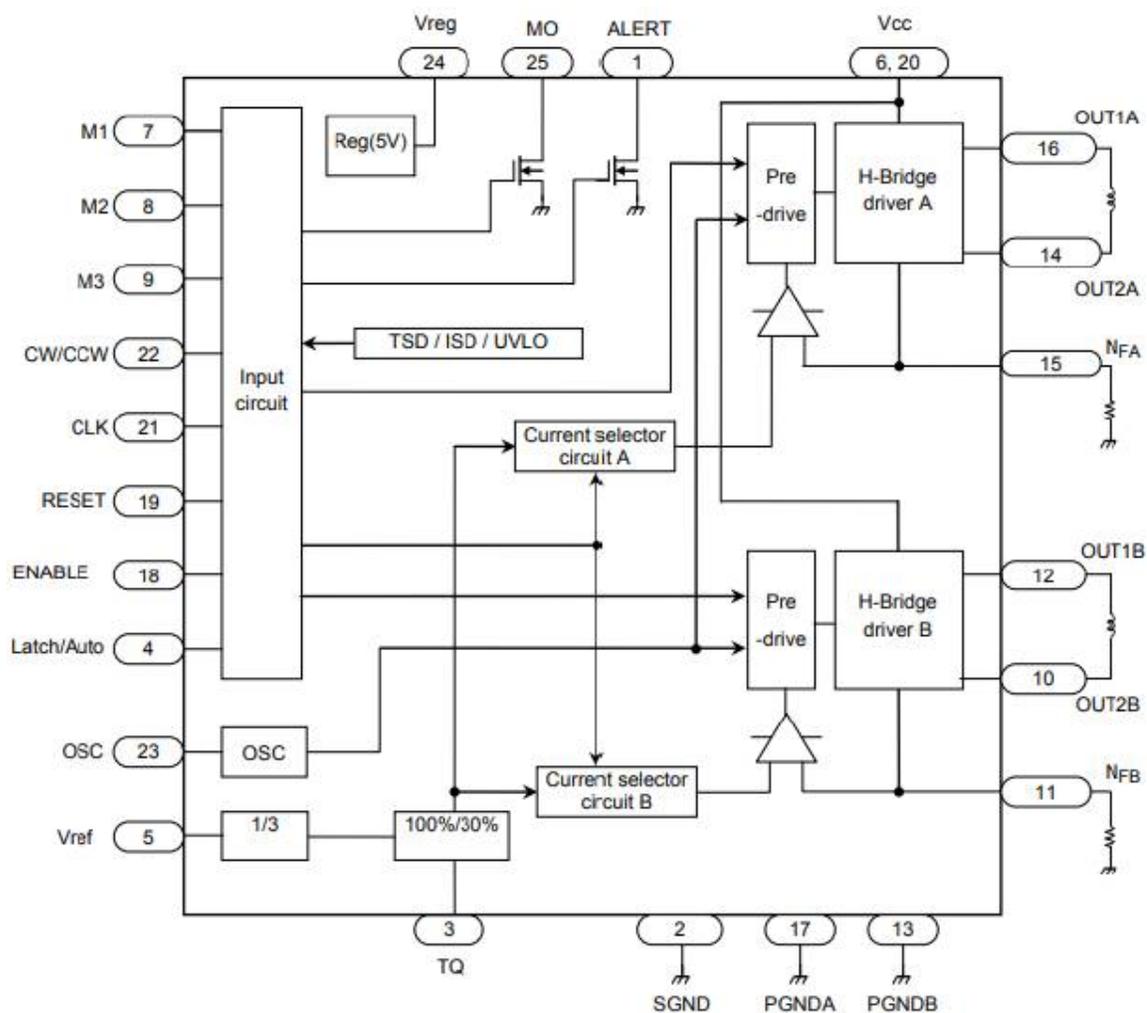


Fonte: athoselectronics.com (2018)

O *driver* de potência escolhido para ser utilizado no projeto da CNC fio quente é baseado no circuito integrado TB6600HG da Toshiba, que possibilita o acionamento de motores por meio de duas pontes H controladas por PWM (Modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation*), permitindo assim, a configuração da largura de pulso de acionamento e configurações de micropasso, podendo obter uma de resolução de até 16 vezes. A configuração de micropassos proporciona ao usuário a opção de alterar, de acordo com suas necessidades, a quantidade de passos para uma revolução do eixo do motor. O TB6600HG suporta tensão máxima de chaveamento de até 50V e corrente máxima de até 5A, ele recebe do Arduino duas informações importantes, a direção e passos

para rotação do eixo e uma terceira informação opcional, que é a de habilitar ou não o driver. A Figura 14 mostra o diagrama eletrônico do TB6600HG (TB6600HG, 2018).

Figura 14 – Diagrama TB6600HG.



Fonte: (TOSHIBA, 2018)

## 2.6 Motor de Passo

São motores muito utilizados em sistemas que requerem movimentos com alta precisão, como: impressoras, *plotters*, *scanners*, *drivers* de disquete, discos rígidos entre outros. A principal diferença entre o motor de passo e os demais motores elétricos é a capacidade de realizar movimentos incrementais precisos e em malha aberta. São definidos como atuadores incrementais eletromagnéticos, a rotação de seu eixo ocorre por incrementos angulares, caracterizando o que se denomina de passo. A cada passo executado, através de pulsos enviados de um driver de potência, o motor de passo realiza um movimento angular

estacionando em uma posição estável e única, caracterizando um movimento discreto. A velocidade de rotação do eixo é definida pela frequência com que esses pulsos são enviados. Entre um passo e outro é mantido a mesma precisão de posicionamento sem que ocorra erros acumulativos (PAZOS, 2002) (CRISTO, 2009) (SOUZA, 2007).

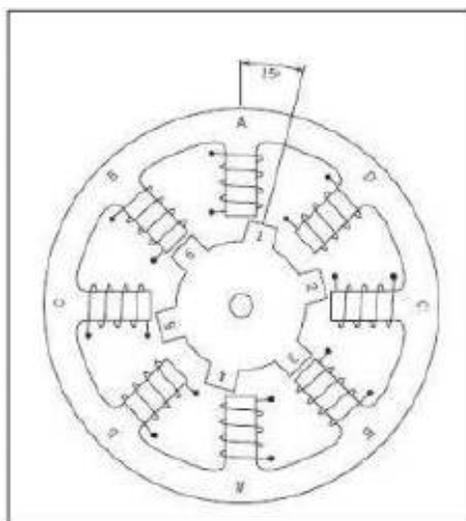
### 2.6.1 Tipos de Motores de passo

Há basicamente três tipos de motores de passo, classificados de acordo com as características de sua estrutura interna, sendo eles: os de relutância variável, os de ímãs permanentes e os híbridos. Destaca-se que os motores híbridos são os mais utilizados em aplicações industriais (SOUZA, 2007). A propósito, este será o tipo de motor utilizado no desenvolvimento deste projeto.

#### 2.6.1.1 Motor de Relutância Variável

É o tipo de motor com características estruturais mais simples e fácil de ser entendida, a Figura 15 apresenta o esquemático deste tipo de motor.

Figura 15 – Motor de Relutância Variável.



Fonte: <http://blog.eletrogate.com>, (2018)

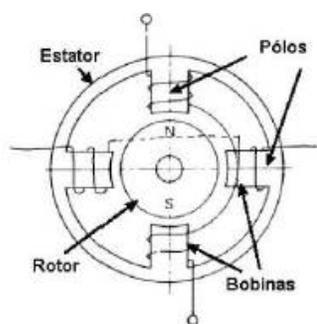
Os pares de dentes do estator com bobinas opostas AA', BB', CC', assim por diante, ao serem excitadas por uma corrente CC criam polos magnetizados que atraem os dentes do rotor multi-dentado, que por sua vez é constituído por ferro doce, um tipo de metal ferro com alto índice de pureza. A rotação ocorre pela magnetização dos polos do estator em sequência, o rotor tende a rotacionar devido à força magnética criada para que o circuito magnético tenha a menor relutância. Não possuem magnetização permanente, ou seja, sem torque de retenção, portanto o rotor gira livremente quando não energizado. Este

tipo de motor geralmente é pequeno e pouco utilizado em aplicações industriais (BRITES; SANTOS, 2008) (SOUZA, 2007).

### 2.6.1.2 Motor de Ímã Permanente

Esse tipo de motor possui um rotor constituído por ímã permanente e estator formado por dentes envoltos por bobinas. Assim como o motor de relutância variável, este também apresenta características estruturais simples e de fácil compreensão. A Figura 16 ilustra um motor de ímã permanente.

Figura 16 – Motor de Passo de Ímã Permanente.



Fonte: <http://labdegaragem.com>, (2018)

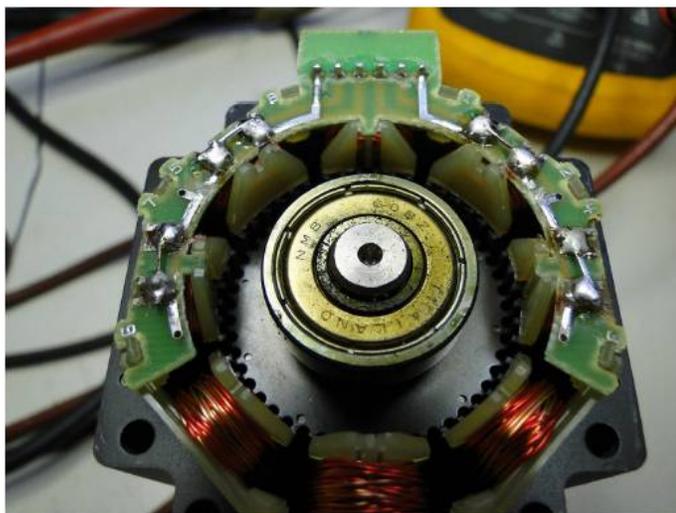
São motores de baixo custo e baixa resolução, tipicamente de 24 a 48 passos por revolução. Seu funcionamento é semelhante ao de relutância variável, diferindo apenas na reação entre os campos magnéticos dos enrolamentos do estator e do rotor. Devido ao material magnético do rotor, o motor de ímã permanente exibe uma melhor característica de torque quando comparado com o motor de relutância variável. Outro aspecto relevante que o diferencia dos motores de relutância variável é a presença de torque residual ou de retenção, quando as bobinas do estator estão desenergizadas. Este tipo de motor geralmente é utilizado em periféricos de computadores, impressoras, *scanners* e etc (BRITES; SANTOS, 2008) (SOUZA, 2007).

### 2.6.1.3 Motor híbrido

Este tipo de motor tem características de motor de relutância variável e ímã permanente, combinando as melhores características de ambos. O rotor é constituído de ímã permanente multi-dentado, provendo um melhor caminho para o fluxo magnético. No estator do motor híbrido, bobinas de duas fases diferentes estão no mesmo polo, sendo assim, cada polo não pertence a apenas uma fase, essa configuração é conhecida como conexão bifilar. Os motores híbridos são mais caros em comparação com os anteriormente apresentados, porém, apresentam melhor desempenho em relação à resolução de passo (100 a 400 passos por revolução), torque e velocidade. Os motores híbridos são os mais

utilizados em máquinas CNC em geral e entre outras aplicações na indústria. A Figura 17 apresenta a estrutura interna de um motor híbrido (BRITES; SANTOS, 2008) (SOUZA, 2007) (CARDOZO, 2012).

Figura 17 – Motor de Passo híbrido.



Fonte: [www.victortrucco.com](http://www.victortrucco.com), (2018)

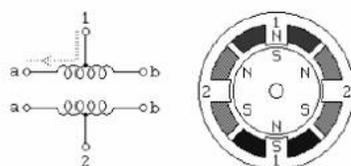
## 2.6.2 Modos de operação

Do ponto de vista da alimentação há dois modos possíveis, sendo eles, alimentação unipolar e bipolar, que serão apresentados a seguir.

### 2.6.2.1 Alimentação Unipolar

São motores que apresentam derivação central em cada enrolamento das bobinas do estator, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Motor de Passo Unipolar.



Fonte: (SOUZA, 2007).

Nesta configuração a alimentação é feita alimentando o terminal central de cada bobina pelo polo positivo da fonte e os extremos são ligados de maneira alternada ao

polo negativo da fonte, desse modo ocorre uma alternância do campo gerado por cada enrolamento do estator. Este modo de operação é geralmente utilizado em motores de relutância variável. A principal vantagem da alimentação unipolar é a simplicidade da implementação de um circuito de chaveamento e a principal desvantagem está no baixo conjugado, pois sempre haverá fluxo de corrente somente na metade de cada bobina (SOUZA, 2007).

### 2.6.2.2 Alimentação Bipolar

A alimentação bipolar ocorre quando, diferentemente da alimentação unipolar, não se utiliza a derivação central das bobinas do motor. Neste caso, a corrente flui através de toda a bobina e de maneira alternada o que ocasiona a alternância de polaridade magnética da bobina, daí o termo bipolar. O controlador para este tipo de alimentação deve ser capaz de alternar a polaridade da tensão nas bobinas de forma sequencial, para isso são utilizados os *drivers* de potência baseados em circuitos em ponte H, conforme já mencionado no subitem 2.5.4 deste trabalho. A principal desvantagem da alimentação bipolar está relacionada à complexidade do circuito de acionamento e sua principal vantagem consiste na maior eficiência de toque, fazendo com que este modo de alimentação seja o mais utilizado atualmente (SOUZA, 2007) (CARDOZO, 2012).

## 2.6.3 Modos de Acionamento

Os motores de passo independentemente do tipo de alimentação, unipolar ou bipolar, podem ser acionados de quatro modos diferentes, sendo eles: passo completo de única excitação, passo completo com excitação dual, meio passo e micropasso (SOUZA, 2007). O modo de acionamento de micropasso foi o escolhido para ser utilizado no projeto.

### 2.6.3.1 Passo completo de Única Excitação de Fase

Neste modo de acionamento somente uma fase do estator é energizada por vez conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Acionamento por passo completo de única excitação de fase.

Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	OFF / -	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	OFF / -	ON / +	

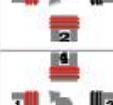
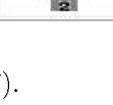
Fonte: (SOUZA, 2007).

Este modo de acionamento consome menos energia quando comparado com os demais e consequentemente produz menor torque, além do mais, pode apresentar problemas de ressonância em baixas velocidades (SOUZA, 2007) (LABORATÓRIO DE GARAGEM, 2012).

### 2.6.3.2 Passo Completo com Excitação Dual

Neste modo de acionamento duas fases são energizadas por vez, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Acionamento por passo completo com excitação dual.

Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	ON / +	
ON / +	OFF / -	OFF / -	ON / +	

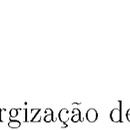
Fonte: (SOUZA, 2007).

Este modo de acionamento o ângulo de passo é o mesmo que no modo anterior, diferindo apenas na posição estacionária. Apresenta poucos problemas de ressonância, produz um torque de 30 a 40% a mais se comparado com o modo de excitação única, porém, consome o dobro de potência da fonte (SOUZA, 2007) (LABORATÓRIO DE GARAGEM, 2012).

### 2.6.3.3 Meio Passo

O modo de operação meio passo é a combinação dos dois modos anteriores de maneira alternada, o que resulta em uma movimentação angular de meio passo. A principal desvantagem deste modo de operação está relacionada ao torque desenvolvido pelo motor, que neste caso é alternado, sendo que sua operação fica limitada ao torque do modo de única excitação por fase. A principal vantagem é a resolução, pois o número de passos necessários para uma revolução é o dobro quando comparado aos modos de operação anteriores. A Figura 21 apresenta a sequência de excitação para o modo de operação de meio passo (SOUZA, 2007).

Figura 21 – Acionamento por meio passo.

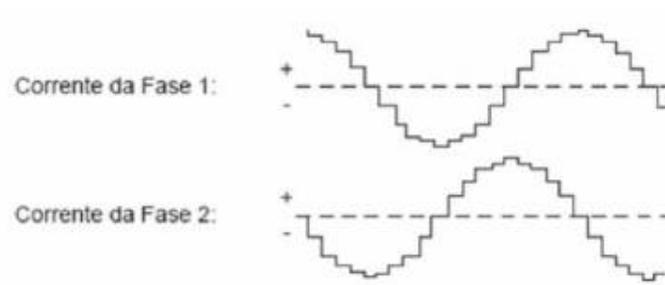
Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	OFF / -	OFF / -	OFF / -	
ON / +	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	ON / +	
OFF / -	OFF / -	OFF / -	ON / +	
ON / +	OFF / -	OFF / -	ON / +	

Fonte: (SOUZA, 2007).

#### 2.6.3.4 Micropasso

O acionamento por micropasso consiste na energização de duas bobinas simultaneamente, semelhantemente ao modo de acionamento por meio passo, no entanto, agora a energização é feita de forma que as correntes sejam desiguais (Figura 22), ou seja, uma bobina apresentará campo magnético mais forte que a outra, logo a posição estacionária do rotor será mais próxima ao polo com maior campo. A principal vantagem deste modo de operação é a resolução e a suavidade de movimento em baixas velocidades (SOUZA, 2007).

Figura 22 – Corrente por fase no modo de acionamento por micropasso.

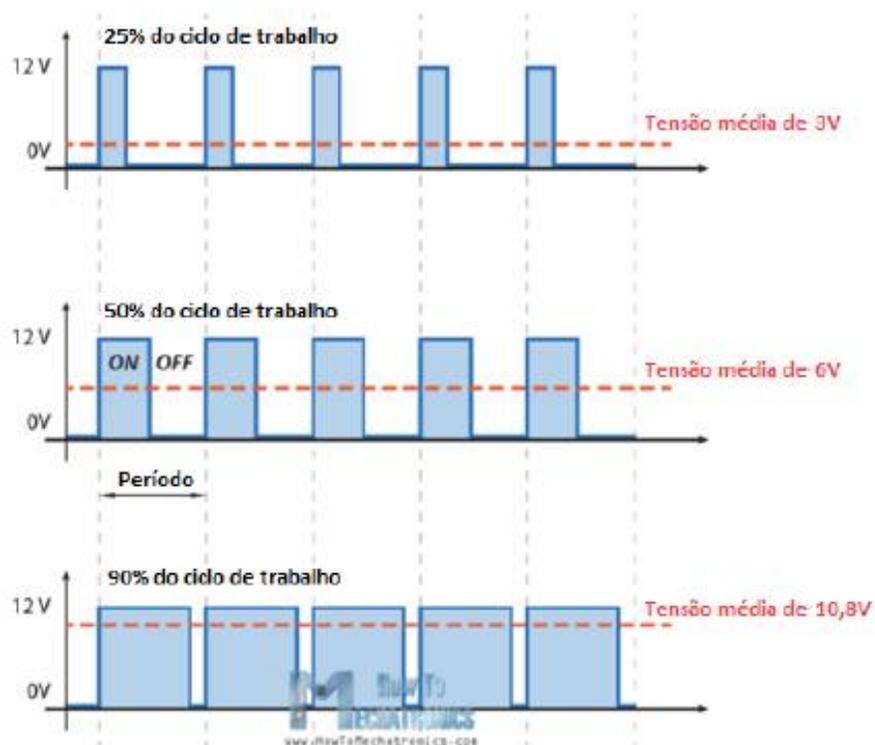


Fonte: (SOUZA, 2007).

## 2.7 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte utilizada para trabalhar com material isopor é um fio de tungstênio percorrido por corrente elétrica, comumente conhecido como fio quente, devido a dissipação de energia em forma de calor (conforme previamente apresentado pela Figura 2). O controle da temperatura do fio quente pode ser realizado por um circuito PWM, método que permite variar a tensão média sobre uma carga através do chaveamento da tensão de alimentação conforme apresenta-se na Figura 23.

Figura 23 – Modulação por largura de pulso.

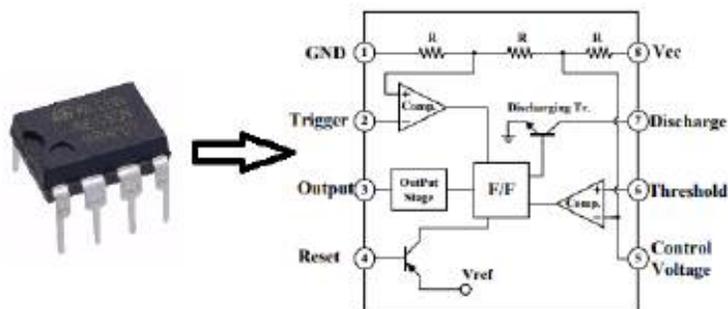


Fonte: adaptado de (HOW TO MECHATRONICS,2018).

### 2.7.1 Circuito PWM

O circuito PWM é constituído por um temporizador LM555 conforme apresentado na Figura 24, operando no modo astável.

Figura 24 – Circuito integrado LM555.



Fonte: adaptado de (SEMICONDUCTOR,2018).

O circuito integrado LM555 dispõe de 8 pinos, sendo eles:

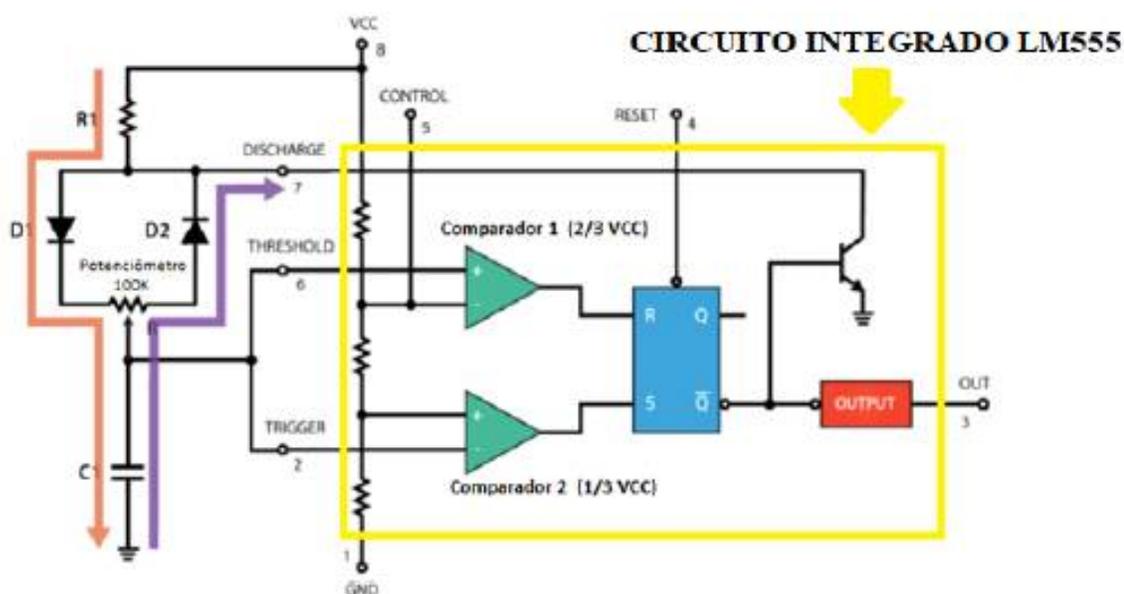
- Pino 1 (GND) - *Ground* DC;
- Pino 2 (*Trigger*) - Quando a tensão nesse pino cai abaixo de  $1/3$  de  $V_{cc}$  o pino de saída vai para nível lógico alto;
- Pino 3 (*Output*) - Pino de saída;
- Pino 4 (*Reset*) - Pino ativo em nível lógico baixo, quando ativo mantém nível lógico baixo na saída;
- Pino 5 (*Control*)- Tensão de controle, aterrado através de um capacitor quando não está em uso;
- Pino 6 (*Threshold*) - Quando a tensão nesse pino ultrapassa  $2/3$  de  $V_{cc}$  o pino de saída vai para nível lógico baixo;
- Pino 7 (*Discharge*) - Realiza descarga do capacitor externo quando o pino de saída está em nível lógico alto, estado em que o capacitor está carregado;
- Pino 8 ( $V_{cc}$ ) - Pino de alimentação  $V_{cc}$ .

Quando o circuito é energizado (Figura 25) o capacitor  $C$  está inicialmente descarregado, dessa forma o pino 2 (*Trigger*) tem tensão abaixo de  $1/3$  de  $V_{cc}$  e o flip flop é ativo pela saída do comparador 2, mantendo o pino 3 (*Output*) em nível alto até que o capacitor seja carregado por  $R1$ ,  $D1$  e o lado esquerdo do potenciômetro. A marcação destacada em

laranja na Figura 25 indica a etapa descrita. Quando a tensão no capacitor ultrapassa  $2/3$  de  $V_{cc}$  o comparador 1 ativa o pino de *reset* do *flip flop*, fazendo com que o pino de saída assumira estado de nível lógico baixo. Este por sua vez, excita a base do transistor fazendo com que o capacitor seja descarregado pelo lado direito do potenciômetro e D2, e a partir de então o ciclo se repete, a marcação destacada em roxo na Figura 25 indica essa etapa (HOW TO MECHATRONICS, 2018) (SIMPLE... 2018).

A largura de pulso do PWM é controlada através da variação da constante de tempo de carga e descarga do capacitor, podendo ser alterada por meio do potenciômetro, a frequência do PWM não é alterada, pois a resistência total não se altera (HOW TO MECHATRONICS, 2018) (SIMPLE... 2018).

Figura 25 – Circuito PWM com LM555.



Fonte: adaptado de (HOW TO MECHATRONICS,2018).

## 3 DESENVOLVIMENTO

É prudente e econômico desenvolver protótipos de um produto antes de executar um projeto, o que possibilita compreender, neste caso, o funcionamento de *softwares* e *hardware* e descobrir o que pode dar certo ou errado, além de agregar conhecimento. Passado a fase de testes em modelos embasados em prototipagens parciais, faz-se necessária a conceitualização do projeto. Nesta etapa são realizadas reuniões para definição dos parâmetros do projeto, tais como, dimensões e *design*, além de organizar os processos e as definições de sua elaboração. Posteriormente passamos para o estágio de desenvolvimento, ou seja, a execução do projeto e validação dos resultados.

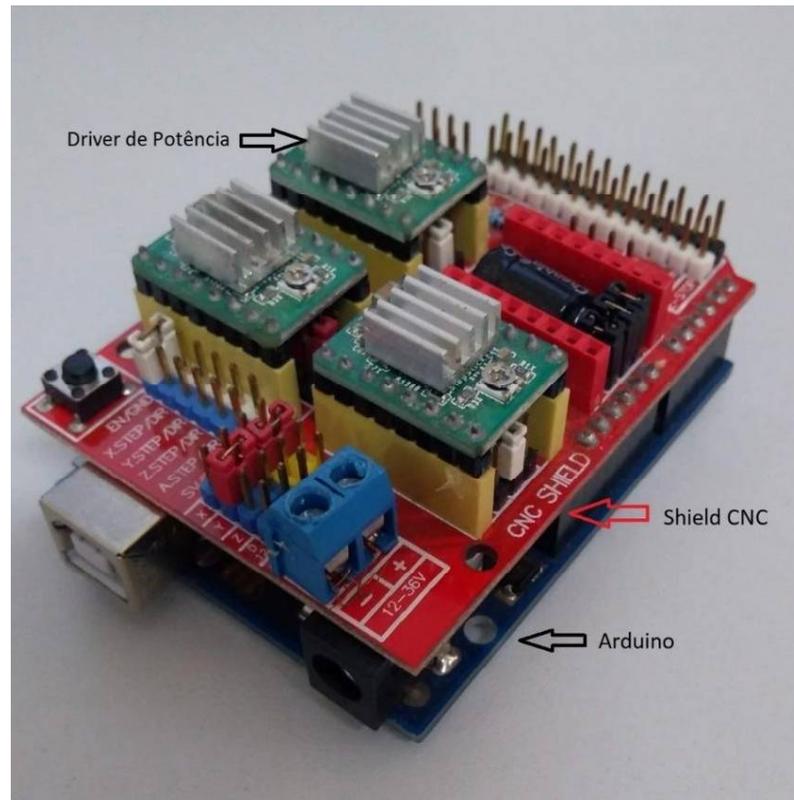
Visto isso, o capítulo que se segue tem por objetivo apresentar o processo de idealização, criação e desenvolvimento do projeto de uma CNC fio quente. Tal processo se dá através de implementação de protótipos em escalas reduzidas de CNCs 3 eixos a fim de realizar testes e obter conhecimento necessário para elaboração do projeto em questão.

### 3.1 Protótipos em escala reduzida

Com o objetivo de obter conhecimento sobre a eletrônica responsável pelo controle da CNC, inicialmente foi idealizado um protótipo de uma “Mini CNC *Plotter*” utilizando Arduino, *drivers* de CD-ROM e de disquete. Posteriormente foi desenvolvido um segundo protótipo, desta vez de uma *router* CNC, com o objetivo de obter conhecimento na área de *design* e projeto estrutural utilizando para tal o *software* Sketchup, assim como consolidar os conhecimentos adquiridos no primeiro protótipo.

#### 3.1.1 Protótipo Mini CNC *Plotter*

Para a montagem da estrutura mecânica da mini CNC *plotter*, foram utilizados *drivers* de CD/DVD para os eixos X e Y e um *driver* de disquete para o eixo Z, os quais foram retirados de sucatas de computadores. A eletrônica da Mini CNC consiste na utilização dos próprios motores de passo dos *drivers*, fonte AT (empregada em computadores antigos) e a plataforma Arduino (carregada com o *firmware* Grbl). Destaca-se também a CNC Shield V3, componente responsável por promover uma melhor operabilidade e conseqüentemente evitar falhas. A CNC *Shield* V3, apresentada na Figura 26, é uma placa de circuito que se conecta a plataforma Arduino proporcionando uma fácil conexão com os *drivers* de potência, fonte externa, chaves fim de curso e botões.

Figura 26 – Arduino UNO, *Shield* CNC e *Drivers* A4988.

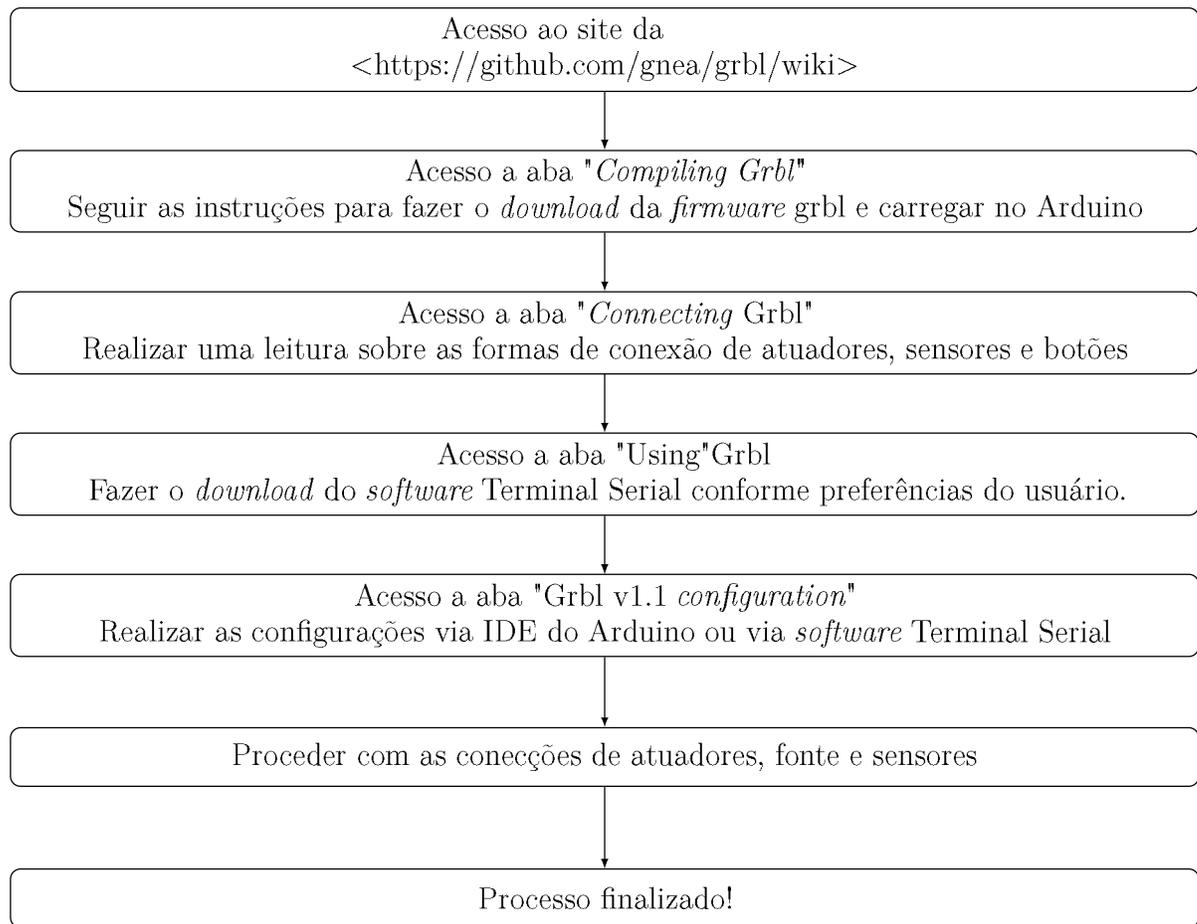
Fonte: do próprio autor.

No desenvolvimento deste protótipo foram utilizados *drivers* de potência pololu A4988. Este possui limitação de corrente ajustável, proteção contra sobrecorrente e sobretensão e cinco resoluções diferentes de *microstep*, podendo ser: passo completo, 1/2 passo, 1/4 de passo, 1/8 de passo e 1/16 de passo. Pode operar com tensões entre 8 e 35 V e corrente máxima de 2 A, e sendo projetado para se conectar ao CNC *Shield* V3 (A4988... 2018).

O *software* terminal serial utilizado foi o *Universal GcodeSender*, responsável pela comunicação entre computador e Arduino. Inicialmente faz-se necessário atualizar os parâmetros de configuração da máquina CNC que será controlada. Um tutorial completo e detalhado para baixar e carregar no Arduino a *firmware* Grbl, baixar instalar o *software* terminal serial e proceder com a parametrização e configurações de uma CNC são apresentados detalhadamente no site da *GitHub*<sup>1</sup>. A figura 27 exemplifica a sequência dos procedimentos adotados, seguindo as informações e ferramentas disponíveis no site.

<<https://github.com/gnea/grbl/wiki>>

Figura 27 – Fluxograma mostrando a sequência de procedimentos para utilizar o Arduino como controladora CNC.

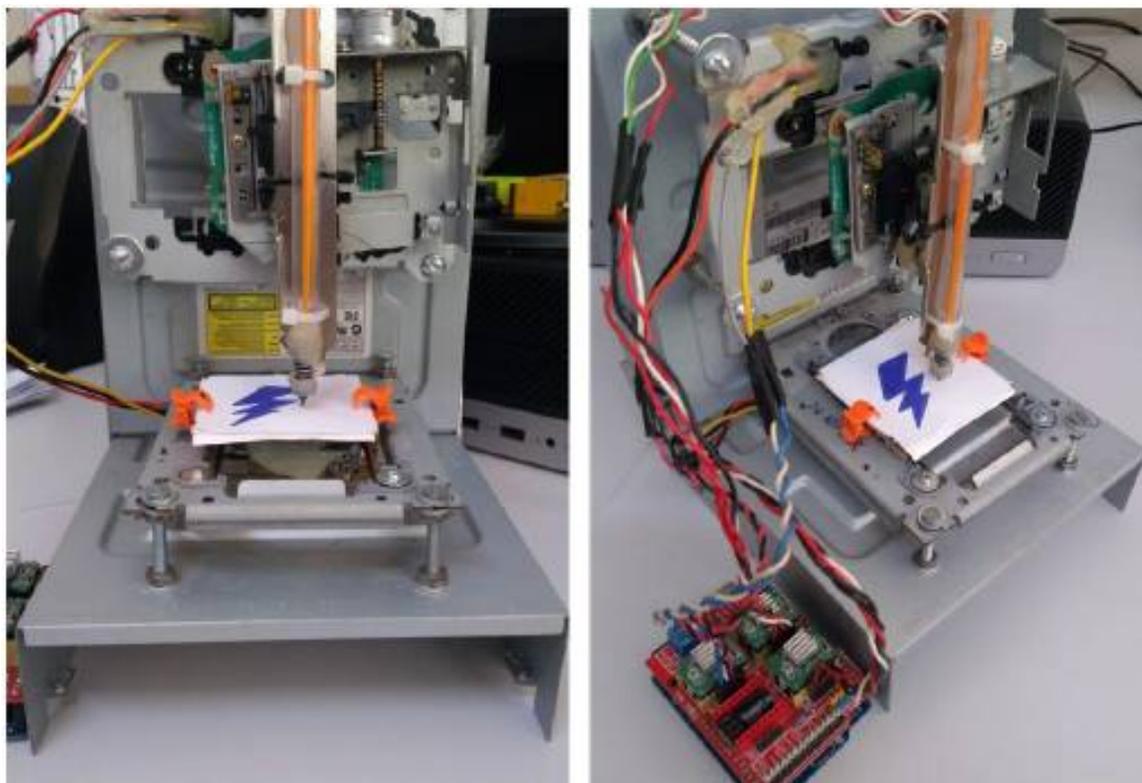


Fonte: do próprio autor

A Figura 28 apresenta o protótipo da Mini CNC *plotter* finalizado. A estrutura mecânica do protótipo foi idealizada a partir de dois modelos encontrados nos sites da *instructables*<sup>2</sup>, e *arduino by myself*<sup>3</sup>.

---

<https://tinyurl.com/y7rwhpye>  
<https://tinyurl.com/ycxysr2l>

Figura 28 – Protótipo Mini CNC *Plotter*.

Fonte: do próprio autor.

Para proceder com as configurações do protótipo foi necessário utilizar o *datasheet*<sup>4</sup> dos motores de passo do *driver* de DVD, de onde se obteve os parâmetros da Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos *drivers* de DVD/CD e Disquete.

Parâmetro	Valor
Passo do fuso Eixo Z	2mm/revolução
Passo do fuso Eixo X e Y	3mm/revolução
Número de passos por revolução (X,Y,Z)	20
Corrente máxima (X,Y,Z)	0,5 A

Fonte: do próprio autor.

<sup>4</sup> Folha de especificações que resume o desempenho e outras características técnicas de um produto. O *datasheet* dos motores de passo para *drivers* <<https://tinyurl.com/oplj79w>>

De posse das informações da Tabela 1, podemos calcular o número de *steps* por revolução em função da configuração de *microstep* selecionada na CNC *shield*, e conseqüentemente obtemos a resolução da máquina por meio da Equação (3.1) conforme demonstrado na Tabela 2.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{Passo do fuso}}{\text{Número de passos por revolução}} \times \text{Modo de acionamento} \quad (3.1)$$

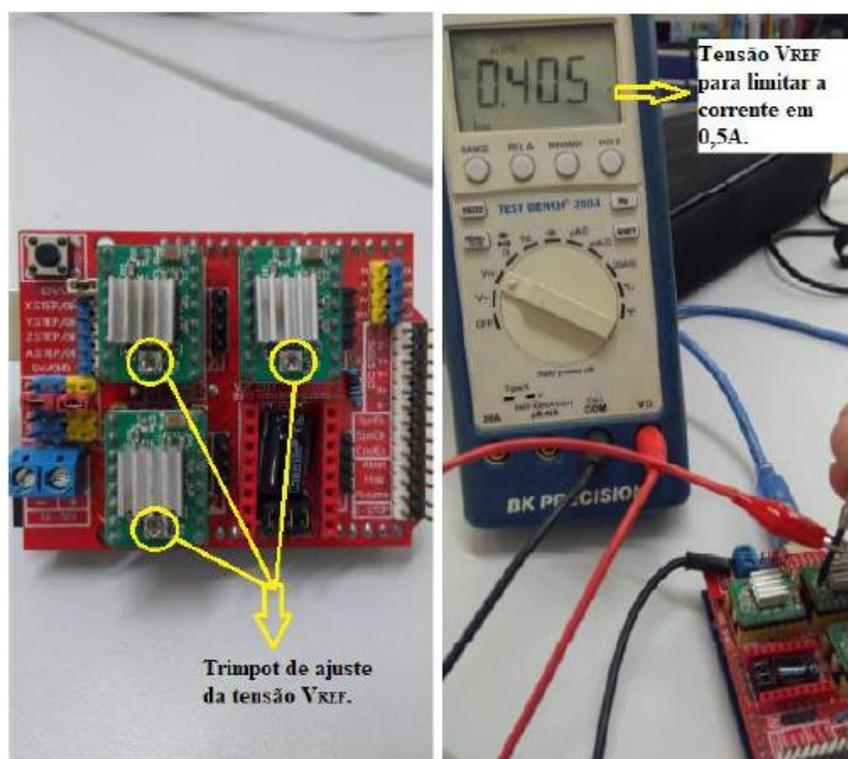
Tabela 2 – Resolução em função do modo de acionamento selecionado.

Modo de Acionamento	Resolução	
	Eixo Z [mm/step]	Eixo X e Y [mm/step]
Passo completo (1)	0,1	0,15
1/2 step	0,05	0,075
1/4 step	0,025	0,0375
1/8 step	0,0125	0,01875
1/16 step	0,00625	0,009375

Fonte: do próprio autor

Para configurar a limitação de corrente nos *drivers* A4988 é necessário ajustar a tensão sob o pino de  $V_{REF}$  do mesmo, que no caso do A4988 essa medição é obtida sobre o *trimpot* de ajuste de limitação de corrente. Utiliza-se a Equação (3.2) para calcular o valor de tensão de referência  $V_{REF}$  a ser configurada (ALLEGRO A4988, 2009-2014). Conforme ilustrado na Figura 29.

$$V_{REF} = 0,8 \times I_{MAX} \quad (3.2)$$

Figura 29 – Ajuste da tensão  $V_{REF}$  para limitar a corrente dos motores de passo.

Fonte: do próprio autor.

A construção deste protótipo possibilitou validar experimentalmente a eficácia do Arduino como controladora CNC. Serviu como ferramenta de testes de *softwares* CAD/CAM e Terminal Serial, além de contribuir para obtenção de conhecimento e experiência sobre a tecnologia CNC de maneira geral.

### 3.1.2 Protótipo CNC Router em MDF

A fim de obter conhecimento e experiência com desenvolvimento de projetos em 3D utilizando o *software* Sketchup, foi idealizado um segundo protótipo, de uma CNC router de baixo custo e acessível que possibilite sua confecção utilizando poucas ferramentas, tais como furadeira e serra tico tico. Para isso, a estrutura será confeccionada em madeira MDF, corrediças telescópicas utilizadas como guias lineares dos eixos X-Y-Z, barra roscada utilizada como fuso, acoplamento flexível para eixo e motor de passo, mancais kfl08 para os fusos, retífica de mão como ferramenta de desbaste e por fim, motores de passo de 10 kgf.cm<sup>2</sup> como atuadores. Com relação ao projeto eletrônico, este permanecerá o mesmo utilizado no primeiro protótipo apresentado, sendo necessária apenas alterações de configuração. O projeto estrutural deste protótipo encontra-se disponível para *download*

na página de modelos 3D do Skeetchup, o 3D Warehouse<sup>5</sup>, com o nome “CNC de baixo custo em MDF”. A Figura 30 apresenta o projeto que já foi baixado no 3D Warehouse por 363 usuários.

Figura 30 – Projeto 3D do segundo protótipo.



Fonte: do próprio autor.

Com o objetivo de validar a viabilidade do protótipo com relação aos aspectos estruturais e eletrônico, foi realizada a montagem do projeto na prática, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Confeção do segundo protótipo de CNC.



Fonte: do próprio autor.

Finalizada a montagem e do protótipo foram realizados alguns testes de usinagem em MDF e placa de fenolite conforme visto nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Teste de usinagem em MDF.



Fonte: do próprio autor.

Figura 33 – Usinagem de uma placa PCB.



Fonte: do próprio autor.

O desenvolvimento deste protótipo foi de suma importância para a obtenção de conhecimento e experiência em modelagem 3D utilizando o *software* Skecthup. Existem diversos materiais gratuitos na internet que auxiliam no aprendizado de modelagem 3D com Skecthup, os quais podemos citar: MODELAGEM COM SKETCHUP 2015<sup>6</sup> e *Up – Treinamento e Desenvolvimento Profissional*<sup>7</sup>.

<sup>6</sup>

<<https://tinyurl.com/ybml4qjk>>

<sup>7</sup>

<<https://tinyurl.com/yc4ocna6>>

## 3.2 CNC fio quente

Finalizado os testes em protótipos de escala reduzida, a próxima etapa foi o desenvolvimento do projeto da CNC fio quente, sendo esta a finalidade deste trabalho. Os tópicos subsequentes deste capítulo têm por objetivo descrever o processo de idealização e criação do projeto, apresentando o modelo em 3D do projeto estrutural e o projeto eletrônico.

### 3.2.1 Projeto Estrutural Mecânico

O projeto estrutural da CNC foi idealizado de acordo as necessidades e preferências da empresa Formilaser. É importante salientar que o presente trabalho não tem como objetivo criar um modelo exclusivo ou inédito, tão pouco desenvolver um projeto estrutural detalhado apresentando cálculos mecânicos complexos, mas sim atender a uma demanda da empresa. Sendo assim, em reunião com o gerente e proprietário da empresa, foi escolhido um modelo de referência de uma CNC fio quente presente no mercado nacional, conforme ilustrado na Figura 34, o qual servirá de referência para modelagem 3D do projeto estrutural.

Figura 34 – Modelo referência de uma CNC fio quente.



Fonte: ferrmaq.negocio.site (2018).

O projeto estrutural foi desenvolvido no *software* Sketchup, baseado no modelo de referência e desenvolvido de acordo com especificações de dimensionamento definidas pela empresa Formilaser, para o qual obteve-se uma área útil de corte de 1330 x 740 mm conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Projeto Estrutural CNC fio quente.



Fonte: do próprio autor.

O projeto completo encontra-se disponível para *download* na página de modelos 3D do Skeetchup, o 3D Warehouse<sup>8</sup>.

### 3.2.2 Projeto Eletroeletrônico

O projeto eletrônico consiste no desenvolvimento de um *shield* Arduino para CNC 2 eixos, que será responsável pela organização dos componentes e ligações com sensores fim de curso, *drivers* de potência e botões. Além de especificar e dimensionar os dispositivos eletrônicos que irão compor todo o sistema, tais como: fonte DC, *drivers* e controlador PWM para controle da temperatura do fio quente.

Para desenvolvimento da shield CNC foi utilizado o software *open-source* Fritzing<sup>9</sup>, destinado a criação de esquemas e diagramas eletrônicos, prototipagem e *layout* de placas de circuito impresso (PCB) que se encaixam na plataforma Arduino, *shield*. O Fritzing possibilita ao usuário desenvolver seus projetos através de um esquemático eletrônico idealizado no *protoboard*, o que facilita o processo de criação do diagrama eletrônico. Sendo assim, com o objetivo de facilitar as ligações entre Arduino e os periféricos, de acordo o esquema de ligações ilustrado na Figura 36, referente ao passo 3 do fluxograma (Figura 27), foi iniciado o projeto de uma *shield* CNC 2 eixos.

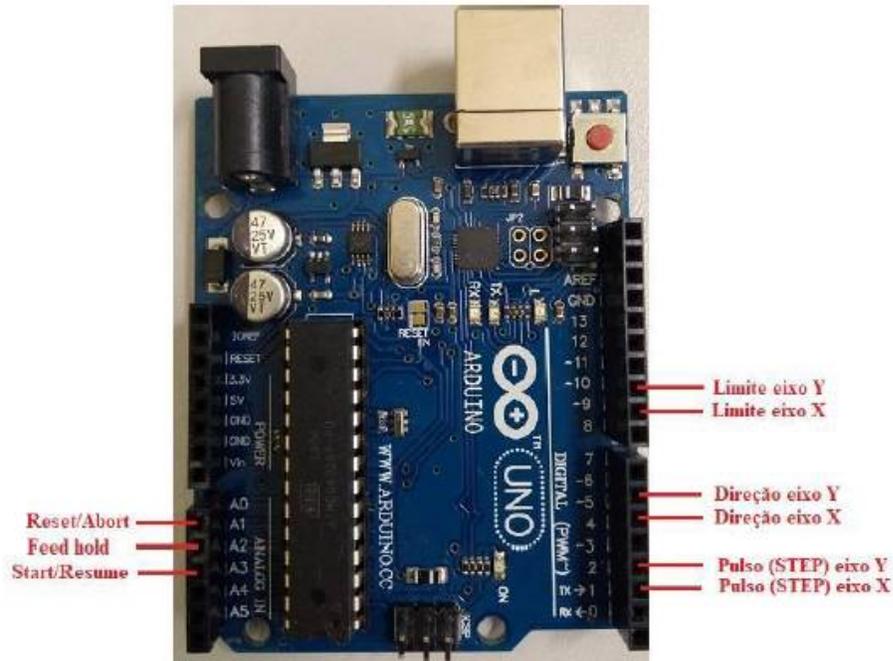
<sup>8</sup>

<sup>9</sup>

<<http://fritzing.org/home/>>

<<https://tinyurl.com/y9nwjssg>>

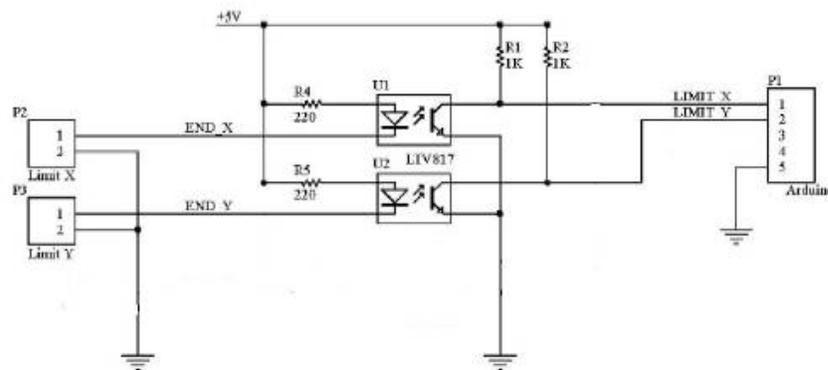
Figura 36 – Esquema de conexões do Arduino carregado com Grbl v1.1.



Fonte: do próprio autor.

A fim de evitar que os ruídos gerados pela atuação das chaves fim de curso cheguem até os pinos de entrada do Arduino, foram utilizados optoacopladores na configuração apresentada na Figura 37 de forma a isolar estes ruídos. O circuito foi adaptado do modelo apresentado no site da github na aba “*Wiring Limit Switches*”<sup>10</sup>.

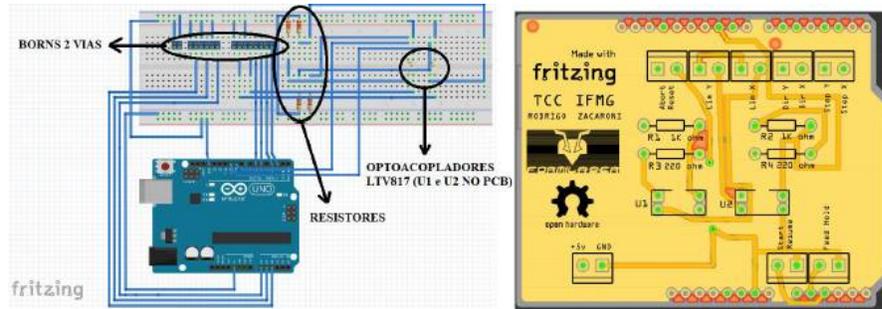
Figura 37 – Ligação dos optoacopladores para evitar ruídos das chaves.



Fonte: adaptado de (GRBL,2018).

A Figura 38 ilustra o projeto da PCB, o qual efetivamente utilizou-se para confecção da PCB no desenvolvimento prático do projeto.

Figura 38 – Projeto da *shield* CNC no *software* Fritzing.



Fonte: adaptado de (GRBL,2018).

O módulo HY-DIV268N-5A, que contém o *driver* de potência TB6600 será utilizado para acionamento dos motores de passo Nema 23 de 10Kgf.cm<sup>2</sup>. Este *driver* controla motores de passo com corrente de 0,2 a 5A por bobina, sendo suficiente para suprir a corrente máxima de 2A por fase do motor escolhido. O ajuste de limitação de corrente e de micropasso é realizado pelo acionamento das chaves de 1 a 6 conforme ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Configuração do modulo HY-DIV268N-5A.

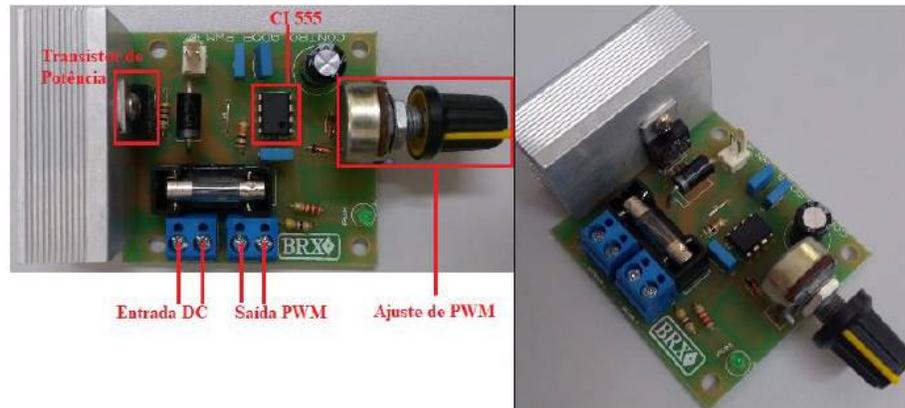


Fonte: do próprio autor.

O sistema constituído pelos *drivers* de potência e motores de passo será alimentado por uma fonte 24V<sub>DC</sub> e 10A. Para controle da temperatura do fio quente será utilizado um controlador PWM com capacidade de corrente de saída de até 10A que será alimentado separadamente por uma fonte AT 300W. A opção de utilizar uma fonte dedicada ao controle de temperatura do fio de tungstênio está no fato de a alimentação máxima do circuito PWM ser de 16VDC (VCC máximo do CI 555) impossibilitando a utilização da fonte de 24VDC para alimentação do circuito PWM. O princípio de funcionamento

do circuito de controle PWM já foi anteriormente discutido na seção 2.7.1. A Figura 40 apresenta a placa de circuito do controlador PWM, facilmente encontrada no mercado nacional<sup>11</sup>.

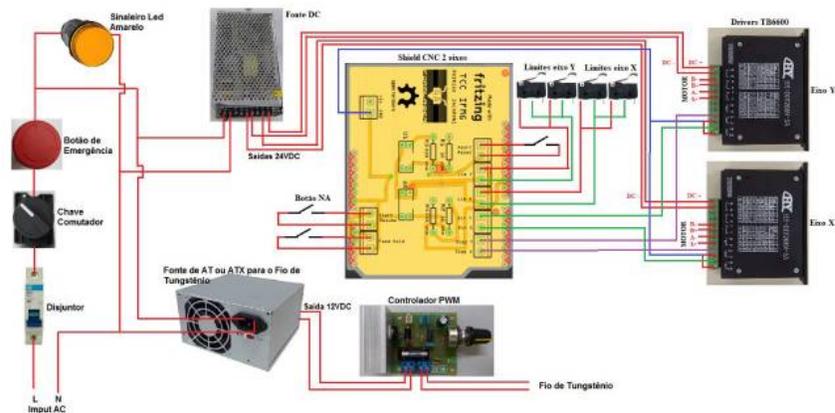
Figura 40 – Controlador PWM.



Fonte: do próprio autor.

A Figura 41 apresenta o esquema eletroeletrônico utilizado para a montagem de um painel de comandos da CNC.

Figura 41 – Esquema eletroeletrônico do painel de controle.



<<https://tinyurl.com/ybqatvpn>>).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado o processo de execução do projeto estrutural e eletroeletrônico, custo total do projeto e os resultados obtidos.

Finalizado o projeto da CNC fio quente e de posse dos componentes mecânicos, eletrônicos e elétricos, conforme listados nas Tabelas 3 e 4, necessários para a execução, iniciou-se a fabricação da máquina CNC em questão.

Tabela 3 – Material estrutural e mecânico da CNC fio quente.

Item	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Acoplamento flexível para motor de Passo 5 x 8 mm	1 un	13,50
2	Correa gt2	3 m	65,85
3	Fuso Trapezoidal TR8 com flarige	1 m	123,75
4	Guia linear - 16mm	2pçs de 1m	150,00
5	Guia linear apoiada - 20mm	2pçs de 1,5m	570,00
6	Madeira MDF 15mm para mesa	0,8m2	60,00
7	Mancal kf08	1 un	26,75
8	Mão de obra – soldagem (Serralheira)	-	150,00
9	Metalon 30 x 50 mm	16 m	128,00
10	Pillow Block 16mm	4 un	110,49
11	Pillow Block aberto 20mm	4 un	179,99
12	Polia Gt2 10mm	1 un	14,38
13	Rolamento 608-zz	2 un	2,00
14	Suporte L para motor de passo Nema 23	1 un	20,79
15	Suporte para eixo linear 16mm	4 un	55,43
16	Suporte reto para motor de passo Nema 23	1 un	17,99
<b>Total</b>			<b>1763,17</b>

Fonte: do próprio autor

Tabela 4 – Material Elétrico e Eletrônico da CNC fio quente.

Item	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Arduino Uno rev3	1 un	53,49
2	Botão de emergência 22mm 1NF	1 un	16,08
3	Botão pulsador preto 22mm	3 un	18,00
4	Cabo flexível 1,00 mm preto	10 m	6,10
5	Cabo PP 2x1,00 mm preto	10 m	13,60
6	Cabo PP 3x1,5 mm preto	3 m	7,62
7	Cabo PP 4x1,00 mm preto	5 m	12,40
8	Chave comutadora	1 un	17,51
9	Conector Make 4 vias	6 un	30,00
10	Confecção Shield Arduino – PCB	10 un	48,00
11	Controlador PWM – 10A	1 un	39,00
12	Disjuntor unipolar 16A	1 un	6,99
13	<i>Driver</i> HY-DIVTB268N – 5A	2 un	192,98
14	Fio de tungstênio 0,17mm	5 m	28,99
15	Fonte AT 300W	1 un	23,90
16	Fonte DC 24V – 10A	1 un	49,99
17	Interruptor fim de curso	4 un	59,32
18	Motor de Passo Nema 23 10kgf.cm <sup>2</sup>	2 un	218,00
19	Plugue macho 2P+T 10A preto	1 un	3,46
20	Prensa cabos nylon 1/2”	6 un	21,30
21	Prensa cabos nylon 3/4”	1 un	3,41
22	Quadro 400x300x200	1 un	104,35
23	Sinaleiro led amarelo 22mm 220V	1 un	7,68
24	Terminal ilhós 1,00 mm	50 un	4,50
<b>Total</b>			978,00

Fonte: do próprio autor

## 4.1 Execução do Projeto Estrutural Mecânico

Conforme projeto descrito no item 3.2.1, procedeu-se com a montagem da estrutura mecânica da CNC tendo como referência as especificações de dimensionamento previamente definidas. Foi utilizado como material estrutural metalon 30 x 50 mm, cuja execução do serviço de corte montagem e soldagem das peças foi realizado por uma empresa de serralheria contratada. Algumas das etapas de fabricação são apresentadas na Figura 42.

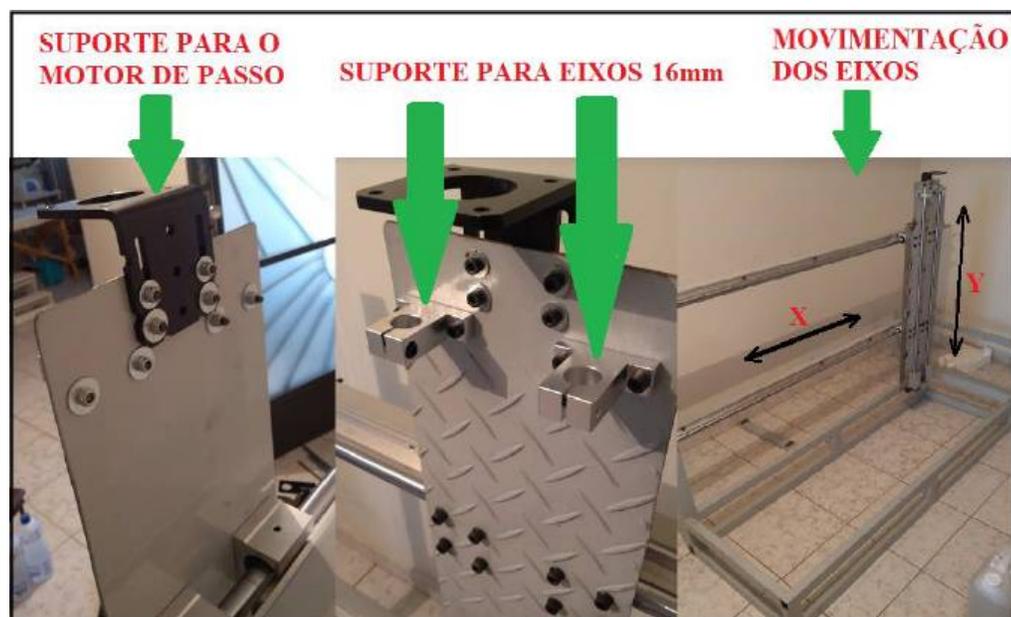
Figura 42 – Fabricação da estrutura da CNC fio quente.



Fonte: do próprio autor.

A fim de obter um bom acabamento e proteção contra ferrugem, foi realizada a pintura da estrutura. Posteriormente, foram fixadas as guias lineares referente ao eixo de X de deslocamento da máquina. Instalou-se o suporte para o eixo de deslocamento Y que por sua vez desliza livremente no eixo X. No suporte para o eixo Y foram fixadas as guias lineares do eixo de deslocamento Y da máquina. A Figura 43 apresentada o resultado do processo de montagem descrito.

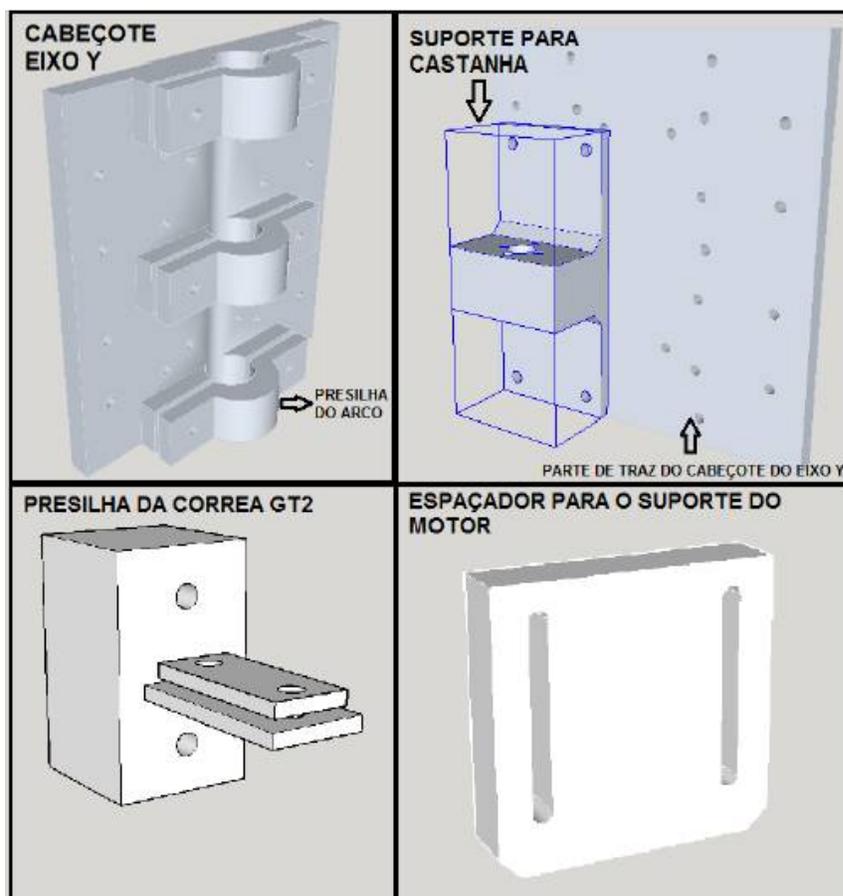
Figura 43 – Resultado parcial da montagem estrutural da CNC.



Fonte: do próprio autor.

Algumas peças foram fabricadas através de impressão 3D sendo elas: o cabeçote para fixação do arco do fio quente; o suporte para castanha, que por sua vez é a peça que possibilita o movimento do cabeçote ao longo do fuso, eixo Y; a presilha para a correia GT2 que possibilita a movimentação ao longo do eixo X; e um espaçador para o suporte do motor de passo do eixo Y. A Figura 44 identifica estes componentes no projeto e a Figura 45 apresenta estas peças fabricadas.

Figura 44 – Peças projetadas para impressão 3D.



Fonte: do próprio autor.

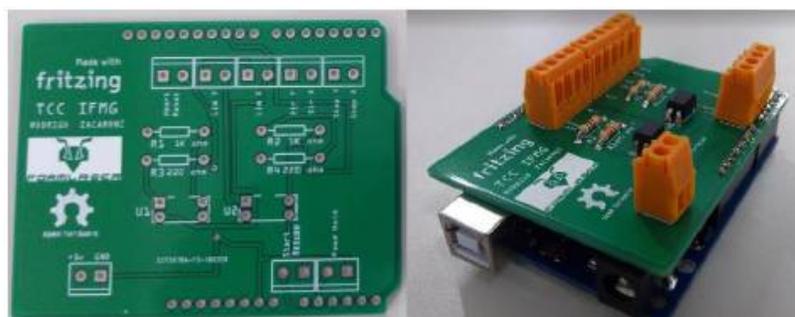
Figura 45 – Peças obtidas em impressão 3D.



Fonte: do próprio autor.

## 4.2 Execução do Projeto Eletroeletrônico

Para execução do projeto eletroeletrônico, as ações foram baseadas no que foi desenvolvido no tópico 3.2.2. Inicialmente foi providenciada a confecção e montagem da PCB *shield* Arduino apresentada na Figura 46. A confecção da PCB foi realizada em empresa parceira da plataforma Fritzing, a JLCPCB, sendo esta localizada no exterior, mais precisamente em Singapura. O valor pago em 10 peças da PCB foi de 12 USD incluído o valor de frete para o Brasil, motivo considerado suficiente para justificar a confecção no mercado externo.

Figura 46 – PCB *Shield* Arduino.

Fonte: do próprio autor.

O painel elétrico e de comando da CNC foi montado conforme anteriormente visto

no projeto estrutural, Figura 35. As conexões elétricas foram realizadas segundo o que foi desenvolvido no projeto eletroeletrônico, conforme Figura 41, o resultado da montagem do painel encontra-se presente na Figura 47.

Figura 47 – Painel Elétrico e de Comando.



Fonte: do próprio autor.

Finalizada a montagem do painel, trabalhou-se nas configurações do Arduino. Para configuração do parâmetro “mm/step”, eixos primários X e Y, é necessário conhecer a distância percorrida ao longo de cada eixo primário de movimentação da máquina em relação a uma revolução do eixo do motor de passo. A Tabela 5 apresenta os parâmetros do fuso e polia GT2 necessários para o cálculo da resolução da máquina CNC.

Tabela 5 – Parâmetros para configuração de movimentação da CNC fio quente.

Parâmetro	Valor
Passo da polia GT2 – Eixo X	40mm/revolução
Passo do fuso – Eixo Y	8mm/revolução

Fonte: do próprio autor

Com a Equação (3.1) presente no item 3.1.1 e Equação (4.1) pode-se determinar a resolução para os eixos Y e X respectivamente. A Tabela 6 apresenta as variações possíveis de resolução em função do modo de acionamento selecionado no *driver* de potência.

$$Resolução = \frac{Num. \text{ de dentes} \times \text{passo da polia}}{Num. \text{ de passos por revolução}} \times \text{Modo de acionamento} \quad (4.1)$$

Tabela 6 – Resolução em função do modo de acionamento selecionado.

Modo de Acionamento	Resolução	
	Eixo X [mm/step]	Eixo Y [mm/step]
Passo completo (1)	0,222...	0,044
1/2 step	0,111...	0,022
1/4 step	0,0555	0,011
1/8 step	0,0278	0,0055
1/16 step	0,0014	0,0028

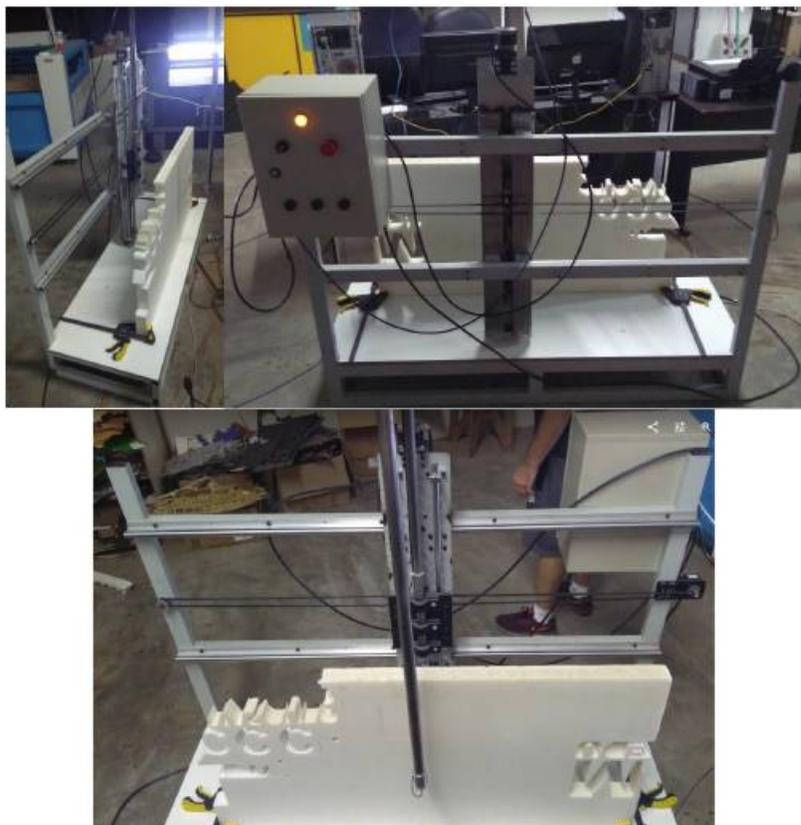
Fonte: do próprio autor

As resoluções obtidas pelos modos de acionamentos 1/16 para eixo X e 1/8 para o eixo Y proporcionaram à CNC movimentos suaves, sem trepidações e ruídos desagradáveis, tal configuração foi realizada seguindo os passos descritos anteriormente no Fluxograma da Figura 27 presente no item 3.1.1 deste trabalho.

### 4.3 Entrega da CNC e teste de desempenho utilizados

Depois de finalizada a montagem de todo o projeto da CNC fio quente e as configurações do Arduino, realizou-se a entrega da CNC para a empresa Formilaser. A Figura 48 apresenta o projeto finalizado.

Figura 48 – Projeto finalizado.

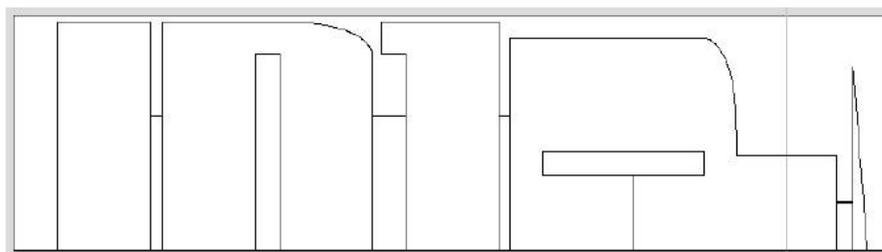


Fonte: do próprio autor.

Foram realizados alguns testes de corte em um bloco de XPS de 5mm de espessura repetidas vezes até se obter o melhor resultado de corte. Concluiu-se nesta etapa de calibração que a melhor configuração de velocidade de corte é a 80mm/min em ambos os eixos de movimentação e um ajuste de PWM da tensão de alimentação do fio de tungstênio em aproximadamente 20% do curso total do potenciômetro, que é de 1 volta.

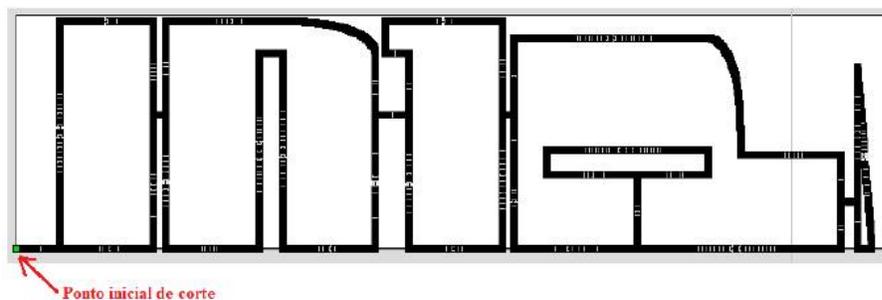
Finalizado os testes e realizados ajustes, a empresa Formilaser realizou o primeiro serviço que gerou receita para empresa utilizando a CNC fio quente. Em seguida será descrito o passo a passo para realizar o corte do material XPS do referido serviço.

Passo 1 – Preparar o arquivo em *software* CAD de modo que as peças que serão cortadas estejam todas interligadas, no intuito de formar um único percurso de contorno, sem discontinuidades. Isso é necessário para que a ferramenta de corte não estrague peças já cortadas devido ao deslocamento do fio quente do ponto final de corte de uma peça para o ponto inicial de outra. A Figura 49 ilustra o processo descrito neste passo.

Figura 49 – Preparação de arquivo em *software* CAD.

Fonte: do próprio autor.

Passo 2 – Criar o arquivo *gcode* em *software* CAM, utilizando o arquivo previamente preparado no *software* CAD. Nesta etapa, é importante definir o ponto inicial de corte da peça o mais próximo possível do ponto zero da máquina, caso contrário o deslocamento da ferramenta de corte até o ponto inicial causará o desperdício de matéria prima, cortando material de maneira desnecessária. A Figura 50 ilustra o processo descrito.

Figura 50 – Obtenção do *gcode* em *software* CAM.

Fonte: do próprio autor.

Passo 3 – Carregar o arquivo G-code no *software* terminal serial, definir ponto zero da ferramenta de corte, preparar o material a ser trabalhado, prendendo-o de forma a ficar alinhado perpendicularmente ao fio quente, ajustar a temperatura do fio de tungstênio. Por fim, permitir o envio dos comandos em código G, quando a máquina inicializará o processo de corte. A Figura 51 apresenta o resultado final do trabalho realizado pela CNC.

## 4.4 Validação dos Resultados

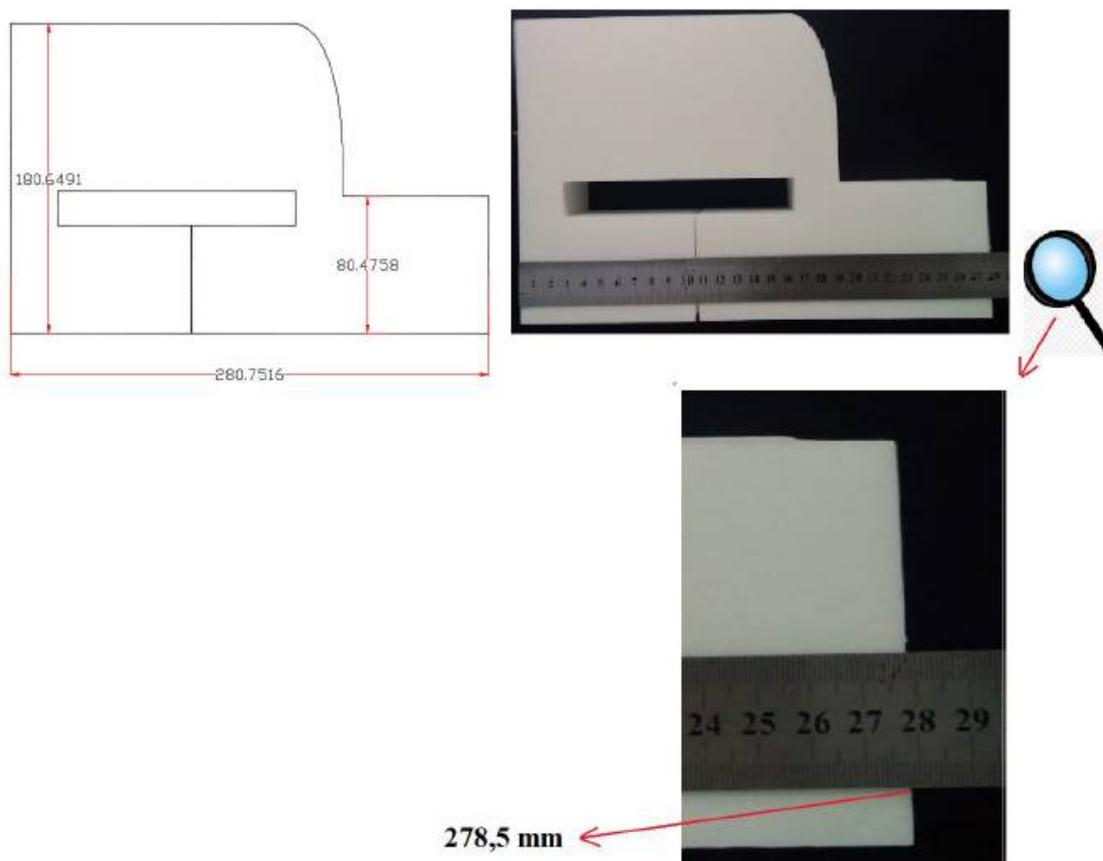
Com o objetivo de avaliar os resultados de precisão do corte realizado pela CNC, foram escolhidas de forma aleatória algumas letras apresentadas na Figura 51, a fim de compararmos as dimensões da peça real em relação ao arquivo virtual ou desenho técnico com as dimensões de projeto. As Figuras 52, 53, 54 e 55 apresentam tais comparações.

Figura 51 – Resultado do primeiro corte realizado em XPS.



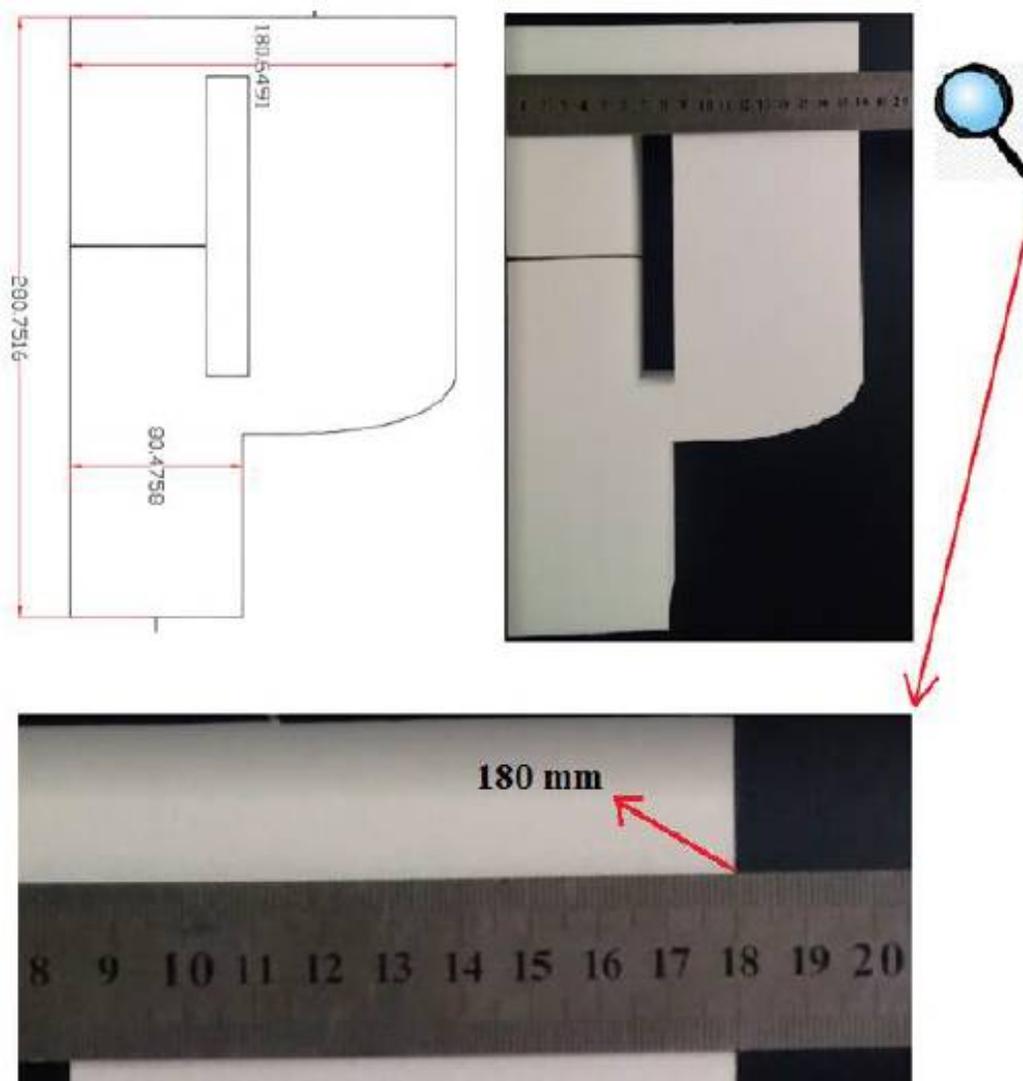
Fonte: do próprio autor.

Figura 52 – Validação de resultado da letra P.



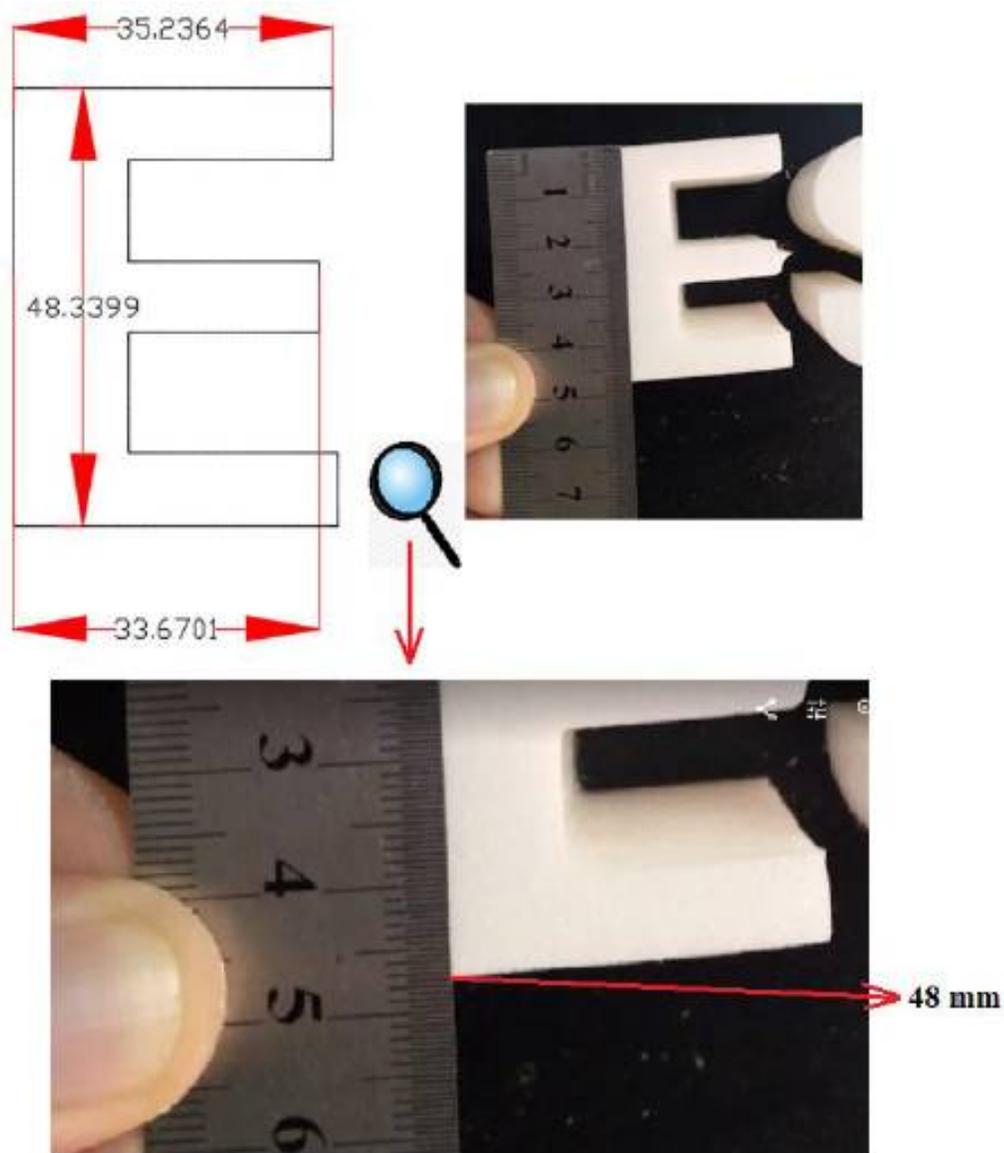
Fonte: do próprio autor.

Figura 53 – Validação de resultado da letra P.



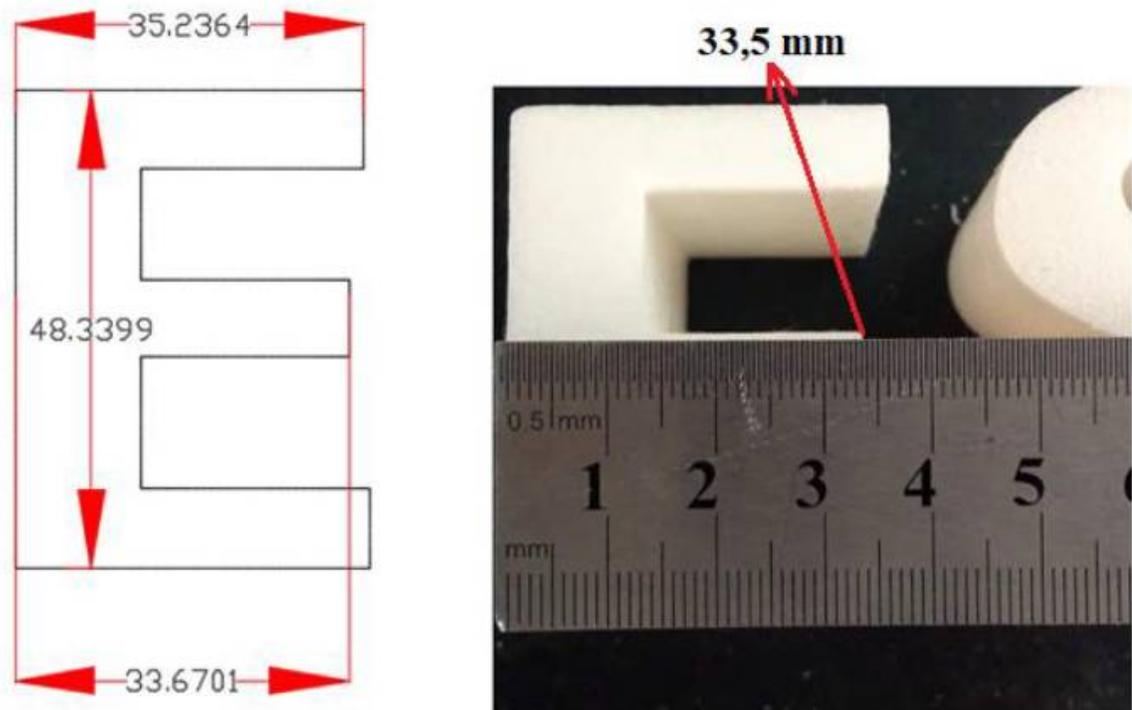
Fonte: do próprio autor.

Figura 54 – Validação de resultado da letra E.



Fonte: do próprio autor.

Figura 55 – Validação de resultado da letra E.



Fonte: do próprio autor.

Analisando os resultados obtidos podemos verificar um erro percentual médio aproximado foi de 0,69%. Este resultado foi calculado utilizando a Equação (4.2) considerando as amostras obtidas nas Figuras 52, 53, 54 e 55.

$$Erro\%_{med} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{D_{projeto_n} - D_{real_n}}{D_{projeto_n}} \right| \right) \times 100 \quad (4.2)$$

$Erro\%_{med}$  = erro percentual médio;

$D_{projeto_n}$  = dimensão de projeto;

$D_{real_n}$  = dimensão real da peça depois de cortada na CNC.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho mostrou que o microcontrolador Arduino, apesar de muito utilizado na confecção de máquinas CNC 3 eixos, também pode ser utilizado para controle de ferramentas em 2 eixos, para tanto, basta desconsiderar a utilização do controle do eixo Z. Além disso, pode-se notar que, apesar de ser uma plataforma de prototipagem barata, o Arduino é uma ferramenta muito poderosa, podendo ser utilizado para o desenvolvimento de máquinas de alta complexidade e precisão. Destaca-se também que, pelo fato de o Arduino ser uma ferramenta *open source* e mundialmente utilizada por estudantes, entusiastas, inventores, hobistas e pesquisadores, existe uma grande quantidade de material disponível na *web*, o que facilitou o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Com relação ao projeto mecânico e estrutural desenvolvido neste trabalho, destaca-se o quão poderoso e útil são os *softwares* livres de desenvolvimento CAD e CAM, dando destaque especial ao *software* Sketchup, no qual foi desenvolvido o projeto. Apesar do foco principal deste trabalho não ser o projeto mecânico e estrutural, onde não foram desenvolvidos as análises e cálculos mecânicos complexos que certamente um engenheiro mecânico o faria, o senso crítico e o mínimo conhecimento em mecânica e física adquiridos no curso de engenharia elétrica foram colocados em prática, e os resultados foram satisfatórios. Há de se destacar que os protótipos desenvolvidos foram de grande importância para o sucesso obtido. Além do mais, é importante ressaltar que se trata de um projeto técnica e economicamente viável e de fácil implementação, podendo ser executado por qualquer pessoa que tenha o mínimo de conhecimento técnico em eletroeletrônica e mecânica. Com relação ao fator econômico, a empresa desembolsou o equivalente a 1/3 do valor de uma máquina semelhante no mercado brasileiro.

Através dos resultados obtidos podemos concluir que a integração organizada do processo de idealização, projeto e execução da máquina CNC serviu para obtenção dos ótimos resultados alcançados. Como planejado, a CNC fio quente se mostrou uma ferramenta versátil e de qualidade, motivo de satisfação por parte da empresa parceira Formilaser.

Conforme descrito no item 1.1 deste trabalho, os projetos e a execução da montagem da CNC fio quente representam atividades que estão de acordo com as que um engenheiro electricista deve desempenhar em sua atuação como profissional da área. Fato este que valida o trabalho aqui apresentado.

## 6 REFERÊNCIAS

**A4988 Stepper Motor Driver Carrier.** 2018. Disponível em:  
<<https://www.pololu.com/product/1182>>. Acesso em: 29 out. 2018.

ARDUINO (Org.). **What is Arduino?** 2018. Disponível em:  
<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 08 out. 2018.

BORTOLAN, Felipe. **SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO POR PINHÃO E CREMALHEIRA PARA ROUTER CNC DE GRANDE DESLOCAMENTO E BAIXO CUSTO, VOLTADO AO CORTE DE MADEIRA.** 2017. 139 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BRASIL. **Constituição (2006). Lei nº 5.194/66, de janeiro de 2006. Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia: REFERENCIAL DO CURSO DE AGRONOMIA.** Brasília, DF: Secretaria de Educação Superior, Disponível em: <[portal.mec.gov.br/dmdocuments/referenciais.pdf](http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/referenciais.pdf)>. Acesso em: 01 outubro 2018.

BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. **Motor de Passo.** 2008. Universidade Federal Fluminense, Centro Tecnológico, Escola de Engenharia Curso de Engenharia de Telecomunicações, Programa de Educação Tutorial Grupo PET-Tele. Disponível em:  
<<https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2018.

CARDOZO, William Schroeder. **Controle de Motores de Passo em Malha Fechada Aplicado a um Manipulador Robótico.** 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:  
<<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1ak1rC8PGKRFeOoR2yY-1Dq-uvi2gdr7Z>>. Acesso em: 18 out. 2018.

CEETEPS (Org.). **PROGRAMADOR DE TORNO CNC ENCO MODELO**

**120.** Elaborado por Lauro Gomes. Disponível em:  
<<http://www.etelg.com.br/paginaete/downloads/mecatronica/torno%20cnc-120.pdf>>.  
Acesso em: 04 out. 2018.

**CNC, Guia do Estudante. Oque é CNC ?** Disponível em:  
<[https://guiadoestudantecnc.webnode.com/products/oque-e-cnc-/?utm\\_source=copyutm\\_medium=pasteutm\\_campaign=copypasteutm\\_content=https%3A%2F%2Fguiadoestudantecnc.webnode.com%2Fproducts%2Foque-e-cnc-%2F](https://guiadoestudantecnc.webnode.com/products/oque-e-cnc-/?utm_source=copyutm_medium=pasteutm_campaign=copypasteutm_content=https%3A%2F%2Fguiadoestudantecnc.webnode.com%2Fproducts%2Foque-e-cnc-%2F)>. Acesso em:  
19 set. 2018.

**COSTA, Fabio. História do Arduino – como surgiu esta incrível plataforma de prototipagem eletrônica.** 2018. Disponível em:  
<<https://bussoladigital.net/arduino/historia-do-arduino/>>. Acesso em: 07 out. 2018.

**CRISTO, Edinara Filipiak de. Implementações e Técnicas de controle de motor de passo em aplicações CNC,** Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

**FERNANDES, Felipe Domeni da Silva; CASTANHO, Gabriel Martin; GOMES, Leandro de Oliveira. FRESA CNC CONTROLADA POR MICROCONTROLADOR.** 2017. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., Curitiba, 2017.

**FETT, Marcos. ANÁLISE DOS SISTEMAS CAD/CAM E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA NÁUTICA DE EMBARCAÇÕES DE RECREIO.** 2010. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Design Industrial, Centro de Artes – Ceart, Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, Florianópolis, 2010. Disponível em:  
<<file:///C:/Users/rodrigo.zacaroni/Downloads/S07%20TCC%20Analise%20sistemas%20CADCAM.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2018.

**GRBL.** 2018. Disponível em: <<https://github.com/gnea/grbl/wiki>>. Acesso em: 08 out. 2018. **HOW TO MECHATRONICS (Org.). How To Make a PWM DC Motor Speed Controller using the 555 Timer IC.** 2018. Disponível em:  
<<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electronics/how-to-make-pwm-dc-motor-speed-controller-using-555-timer-ic/>>. Acesso em: 23 out. 2018.

**LEITE, Saulo Joel Oliveira; FONSECA, Wellington da Silva; LIMA, Diorge de Souza.**

**CULTURA MAKER: IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO NA EDUCAÇÃO E PREPARAÇÃO PARA CURSOS DE ENGENHARIA.**

2016. Disponível em:

<<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/3/anais/anais/161254.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2018.

LYRA, Pablo Vinícius Apolinário. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática.** 2010. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MADISON, James. **CNC MACHINING: basic Theory, Production Data, and Machining Produces.** New York: Industrial Press Inc., 1996.

NMB MAT: **Datasheet Motor de Passo PL15S-020.** Disponível em:

<<http://robocup.idi.ntnu.no/wiki/images/c/c6/PL15S020.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2018.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas ROBÓTICA.** Na: Axcel Books do Brasil Ltda., 2002. 377 p.

PEREIRA, Pedro Miguel Gonçalves da Costa. **DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO DE SOFTWARE QUE CONVERTA CÓDIGO G NUMA LINGUAGEM DE ALTO NÍVEL INTERPRETÁVEL POR UM CONTROLADOR ABERTO DA NI.** 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrônica Industrial e de Computadores, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2014.

POLASTRINI, Fernando Henrique. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA CNC DE BAIXO CUSTO COM SOFTWARE E HARDWARE ABERTOS.** 2016. 113 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica., Instituto Federal Minas Gerais – Campus Formiga, Formiga, 2016. PROTOPTIMUS. Máquinas CNC: A história do Comando Numérico Computadorizado. Disponível em: <<http://www.proptimus.com.br/maquinas-cnc-historia-comando-numeric-computadorizado/>>. Acesso em: 19 set. 2018.

SEMICONDUCTOR, Fairchild. LM555. 2002. Disponível em:

<<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/LM555.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2018.

SENAI/SC (Santa Catarina) (Org.). **TECNOLOGIAS APLICADAS E COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO**. Florianópolis: Senai/sc, 2006. Disponível em: <<https://pt.calameo.com/read/00517872446a70499f08a>>. Acesso em: 20 set. 2018.

SILVEIRA, Sérgio. **DESENVOLVIMENTO DE UM KIT EXPERIMENTAL COM ARDUINO PARA O ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO**. 2016. 275 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (mnpef), Programa de Pós-graduação em Ensino de Física., Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Araranguá, 2016.

**SIMPLE (AND DIRTY) PULSE WIDTH MODULATION (PWM) WITH 555 TIMER**. Disponível em: <<https://www.instructables.com/id/Simple-and-dirty-Pulse-Width-Modulation-PWM-Wi/>>. Acesso em: 23 out. 2018.

SOUZA, Marco Antonio Alves de. **IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA CONTROLADOR DE MOTOR DE PASSO EM MALHA FECHADA UTILIZANDO TECNOLOGIA BASEADA EM CONTROLADOR DIGITAL DE SINAIS**. 2007. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica Com ênfase em Eletrônica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1ak1rC8PGKRFeOoR2yY-1Dq-uvi2gdr7Z>>. Acesso em: 18 out. 2018.

**TB6600HG**: Datasheet. Datasheet. 2018. Disponível em: <<file:///C:/Users/rodrigo.zacaroni/Downloads/TB6600HGdatasheeten20160610.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.