

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Arley Sena do Nascimento**



AUTOMAÇÃO NÃO INVASIVA DE UM MICROSCÓPIO ÓPTICO  
DE BANCADA PARA ANÁLISES AUTOMATIZADAS

RIO DE JANEIRO

2024

Arley Sena do Nascimento

AUTOMAÇÃO NÃO INVASIVA DE UM MICROSCÓPIO ÓPTICO DE BANCADA  
PARA ANÁLISES AUTOMATIZADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Orientador: Daniel Grasseschi

Rio de Janeiro

2024

## CIP - Catalogação na Publicação

N723a Nascimento, Arley  
Automação não invasiva de um microscópio óptico de bancada para análises automatizadas / Arley Nascimento. -- Rio de Janeiro, 2024.  
40 f.

Orientador: Daniel Grasseschi.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Química Industrial, 2024.

1. automação. 2. arduino. 3. microscópio. I. Grasseschi, Daniel, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Arley Sena do Nascimento

AUTOMAÇÃO NÃO INVASIVA DE UM MICROSCÓPIO ÓPTICO DE BANCADA  
PARA ANÁLISES AUTOMATIZADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Químico  
Industrial.

Aprovado em 11 de dezembro de 2024.

---

Daniel Grasseschi, Doutor, UFRJ - IQ

---

Andrea Valdman, Doutora, UFRJ - EQ

---

Ricardo Cunha Michel, Doutor, UFRJ - IQ

Rio de Janeiro  
2024

*Dedico esse trabalho para minha mamãe, Patrícia Pereira de Sena.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a algumas pessoas que foram muito marcantes na minha vida até esse momento. A primeira pessoa e a mais importante para minha vida é minha mãe, Patrícia Pereira de Sena que dedicou sua vida para me formar um homem e correu atrás todos os dias para termos o pão de cada dia na mesa, sendo meu exemplo de resiliência, sem ela eu nada seria. Meus avós Maria das Dores e Antônio Sena que cuidaram de mim e cuidam até hoje, me dando conselhos valorosos e contando suas histórias. Meu Pai Juzey A. Nascimento que despertou em mim todo meu interesse por ciências me levando para trabalhar com ele. E toda minha família que sempre está junto de mim para me apoiar, irmãs, primas, tias e tios vocês sabem quem são. Em especial minha tia madrinha que me ajudou a imprimir todos os documentos para me inscrever na UFRJ faltando poucas horas para eu perder a vaga hahaha.

Fora do ambiente familiar, tiveram algumas pessoas que me ajudaram e sem elas eu jamais conseguiria chegar tão longe. Em ordem cronológica, meus professores Renato Treggia Beninca e Artur Nunes Emilio, que foram quase como segundos pais no meu ensino fundamental, conseguindo despertar mais ainda meu interesse pelas Exatas.

Já dentro do ambiente acadêmico, a primeira pessoa marcante que conhecia foi a Andressa Nakao, ela acolheu minha turma haha e me deu valiosos conselhos e lutou por mim.

O professor João Cajaiba, que me deu a oportunidade de começar a trabalhar com ele no NQTR e conhecer meu orientador Daniel e muitos dos meus amigos, sendo um catalisador para meu desenvolvimento, ensinando muito do que sei hoje tanto na vida pessoal quanto profissional.

E aos meus amigos Ronald Souza e Arthur Coimbra que estão juntos comigo para o que vier, fortalecendo. A minha eterna dupla de lab. Érika Miranda que sempre é um amor de pessoa.

E a minha segunda família na ilha do fundão, a turma da Federação Sul Americana de Krav Maga do professor Hyrlann, que me fez conhecer pessoas incríveis que me inspiram e que mudaram permanentemente para melhor, me tornando uma pessoa forte, não só fisicamente, mas mentalmente também, como o professor Hyrlann, Alline Viana, Vitor Irmãozinho, Hyrlanna e A. Lucas.

E aos meus amigos mais antigos que estão comigo a mais tempo do que sou capaz de lembrar, que acompanham minha trajetória até hoje, e vibram comigo a cada vitória, João Pedro Neres, Luan Saab e Ronny Peterson.





## RESUMO

NASCIMENTO, Arley. **Automação não invasiva de um microscópio óptico de bancada para análises automatizadas**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de automação não invasiva para um microscópio óptico de bancada, visando análises automatizadas e padronizadas. Utilizando componentes como peças impressas em 3D, motores de passo NEMA 17, um Arduino Uno e um Notebook Windows10 com processador I7 e 8GB de memória RAM, a automatização é realizada com o programa Universal Gcode Sender (UGS) em conjunto com o código GRBL para controle CNC da mesa do microscópio. A movimentação da mesa, do tipo CORE XY, é efetuada por dois motores NEMA 17 com torque de 4,2 kgf, permitindo posicionamento preciso. O UGS possibilita o controle da mesa via teclado, mouse, joystick, ou ainda por um QR code, acessível a qualquer dispositivo conectado à internet, garantindo flexibilidade e acessibilidade no manuseio remoto. Um terceiro motor NEMA 17 é dedicado ao eixo Z, permitindo ajustes de foco automatizados. Além disso, o sistema conta com uma câmera USB conectada ao Notebook, que realiza a captura de imagens e vídeos das amostras de forma padronizada, possibilitando análises automáticas e a criação de mapeamentos de superfície sem intervenção humana direta. O projeto permite futura integração com inteligência artificial, ampliando as capacidades de análise autônoma.

Palavras-chave: automação, microscópio óptico, análise automatizada, controle CNC.

## ABSTRACT

NASCIMENTO, Arley. **Automação não invasiva de um microscópio óptico de bancada para análises automatizadas**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The project presents the development of a non-invasive automation system for an optical bench microscope, aimed at standardized and automated analyses. Using components such as 3D-printed parts, NEMA 17 stepper motors, an Arduino Uno, and a Laptop with I7 running Windows 10, the automation is achieved with the Universal Gcode Sender (UGS) software and GRBL code for CNC control of the microscope stage. The stage's movement, using a CORE XY configuration, is controlled by two NEMA 17 motors with a torque of 4.2 kgf, allowing precise positioning. The UGS enables stage control via keyboard, mouse, joystick, or a QR code accessible from any internet-connected device, ensuring flexibility and accessibility for remote handling. A third NEMA 17 motor is dedicated to the Z-axis, allowing automated focus adjustments. In addition, the system includes a USB camera connected to the Laptop, which captures standardized images and videos of samples, enabling automatic analyses and surface mapping without direct human intervention. The project also allows for future integration with artificial intelligence, expanding its autonomous analysis capabilities.

Keywords: automation. optical Microscope. automated analysis. CNC control.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Imagem do microscópio Zeiss
- Figura 2 – Esquema eletrônico de montagem da shield do Arduino uno
- Figura 3 – Imagem do modelo cartesiano modelado
- Figura 4 – Imagem do novo modelo (Core XY) modelado
- Figura 5 – Imagem do modelo cartesiano modelado com eixo Z
- Figura 6 – Imagem cartões de calibração comerciais de microscópio
- Figura 7 – Imagem do UGS com a interface de controle via Wi-Fi e joystick
- Figura 8 – Imagem do código do Arduino Uno
- Figura 9 – Imagem de uma parte do código do grbl
- Figura 10 – Imagem dos tensionadores de correia
- Figura 11 – Engrenagens plásticas internas do motor de passo 28byj-48 de 5 volts
- Figura 12 – Esquema do sistema cartesiano (com as peças e a disposição dos motores e drivers)
- Figura 13 – Esquema do novo sistema de movimentação (Core XY)
- Figura 14 – Imagem dos testes de movimentação com lente de 5x
- Figura 15 – Imagem das medições realizadas com lente de 40x
- Figura 16 - Imagem das modelagens de todos os equipamentos desenvolvidos
- Figura 17 - Imagem dos equipamentos montados e funcionando

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Valore de Deslocamento medidos no Eixo X ( $\Delta x$ )

Tabela 2 – Valore de Deslocamento medidos no Eixo Y ( $\Delta y$ )

Tabela 3 – Tabela de gastos para o projeto core XY

Tabela 4 – Comparação do projeto core XY e os modelos comerciais

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D Trés dimensões

NEMA National Electrical Manufacturers Association (Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos Elétricos, usada como padrão para motores)

Arduino Plataforma de prototipagem eletrônica open-source

Raspberry Pi Computador de placa única, compacto e de baixo custo

UGS Universal Gcode Sender

CNC Computer Numerical Control (Controle Numérico Computadorizado)

GRBL Código-fonte open-source para controle de máquinas CNC

HRTEM Microscópio Eletrônico de Transmissão de Alta Resolução

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta x$  – Deslocamento no eixo X (mm).

$\Delta y$  – Deslocamento no eixo Y (mm).

**f<sub>feed</sub>** – Taxa de alimentação do movimento (mm/s).

$\bar{x}$  – Média dos valores de deslocamento (mm).

$\sigma$  – Desvio padrão dos dados (mm).

$\sigma^2$  – Variância dos dados (mm<sup>2</sup>).

**n** – Número de observações no conjunto de dados.

**e** – Erro observado no deslocamento (mm).

**%E** – Porcentagem de erro relativo (adimensional).

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	18
<b>1.1.1 Justificativa.....</b>	<b>18</b>
1.2 OBJETIVOS.....	19
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>19</b>
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 AUTOMAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ANTIGOS.....	21
2.2 MODELOS DE MOVIMENTAÇÃO (CARTESIANA VS CORE XY).....	21
2.3 FERRAMENTAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS (GRBL, UGS, DRIVERS, ETC.)	22
2.4 ESTUDOS RELACIONADOS.....	23
<b>2.4.1 Artigos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.2 Patentes.....</b>	<b>25</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1 MICROSCÓPIO ÓPTICO ZEISS.....	27
3.2 MODELO CARTESIANO.....	28
3.3 MODELO CORE XY.....	30
3.4 CONTROLE VIA UGS.....	32
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
4.1 LIMITAÇÃO TEÓRICA DE MOVIMENTAÇÃO.....	36
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS.....	37
4.3 IMPLEMENTAÇÃO E AJUSTES FINAIS.....	39
4.4 PRECISÃO E ESTABILIDADE DOS MOVIMENTOS.....	42
4.5 ANÁLISES DE IMAGENS COM AMPLIAÇÕES DIFERENTES.....	42
4.6 ANÁLISES DE CUSTOS.....	42
<b>4.6.1 Custos do Modelo Core XY.....</b>	<b>42</b>
<b>4.6.2 Custos de Mesas Comerciais.....</b>	<b>43</b>
<b>4.6.3 Comparação de Custos.....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>45</b>
5.1 AVALIAÇÃO DO PROJETO.....	45
5.2 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS DE MELHORIAS.....	45

5.3 PROVA DE CONCEITO.....	46
5.4 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	46
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>7 APÊNDICE A – PROJETOS E AUTOMAÇÕES.....</b>	<b>49</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA**

A automação é um dos pilares do avanço científico, permitindo maior eficiência e precisão em atividades que antes dependiam exclusivamente de operação manual, sendo a automação principalmente a revolução da indústria 4.0 algo que vai impactar e já está impactando toda a sociedade que conhecemos, podendo até mesmo gerar novos empregos e acabar com milhares outros, sendo algo que precisa ser tratado com seriedade e atenção. Contudo, uma grande quantidade de equipamentos utilizados em laboratórios, como microscópios ópticos de bancada, permanece sem suporte para automação, seja por falta de verba nas universidades, ou devido à sua antiguidade e design inicial. Isso limita sua aplicabilidade em processos modernos, que exigem maior grau de padronização, rapidez e integração com sistemas digitais.

Microscópios tradicionais ainda possuem grande valor técnico e econômico, sendo amplamente utilizados para análises diversas em áreas como biologia, química e ciências de materiais (AIDUKAS et al., 2019). Entretanto, a ausência de automação não só restringe sua funcionalidade, como também pode resultar em inconsistências operacionais, como variações na captura de imagens e limitações na análise sistemática de amostras.

Diante desse cenário, surge a necessidade de desenvolver soluções acessíveis que atualizem equipamentos antigos, ampliando suas capacidades sem comprometer sua integridade física ou violar garantias. Este trabalho propõe a automação de um microscópio óptico de bancada por meio de tecnologias de baixo custo, como motores de passo, Arduino Uno com shield CNC e sistemas de movimentação Core XY. A abordagem não invasiva adotada preserva as funcionalidades originais do equipamento enquanto possibilita novos usos.

#### **1.1.1 Justificativa**

A modernização de laboratórios enfrenta desafios como restrições orçamentárias e sustentabilidade, devido a mais de uma década de cortes orçamentários recorrentes nas universidades públicas (G1, 2022). Equipamentos modernos, ainda que altamente funcionais, são frequentemente inacessíveis a instituições de pequeno e médio porte devido ao alto custo. Contudo, mesmo em instituições de grande porte, como a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o acesso a esses equipamentos é limitado. Além do alto custo de aquisição, há também a dificuldade logística de manutenção, agravada pela escassez de serviços técnicos

especializados no Brasil, o que aumenta os desafios para a implementação e o uso contínuo desses equipamentos.

Este projeto oferece uma solução prática para esses problemas ao propor a reutilização de equipamentos antigos com métodos de automação que não interferem em sua estrutura original. A abordagem apresentada é especialmente relevante para laboratórios acadêmicos e institucionais que buscam soluções de baixo custo sem abrir mão de qualidade e inovação.

Ao possibilitar análises automatizadas, o trabalho também contribui para a padronização de resultados experimentais, elemento essencial para o rigor científico. Além disso, a automação facilita a execução de tarefas repetitivas, liberando os pesquisadores para atividades mais complexas e criativas, como testes em triplicata, contagens repetitivas, medidas seriadas, criação de curvas de padronização, entre outros.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Automatizar, de forma não invasiva, um microscópio óptico de bancada para análises automatizadas e reproduzíveis, preservando sua funcionalidade original e garantindo sua integridade estrutural.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de movimentação para os eixos X , Y e Z.
- Integrar componentes de baixo custo, como motores de passo, Arduino Uno, shield CNC e software open-source.
- Avaliar a precisão e a confiabilidade do sistema automatizado em condições experimentais variadas.
- Demonstrar a viabilidade de reaproveitamento de equipamentos antigos para automação moderna.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos principais:

1. **Introdução:** apresentação do problema, objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

2. **Revisão Bibliográfica:** análise de estudos e tecnologias relacionados ao tema, incluindo sistemas de automação e metodologias open-source.
3. **Metodologia:** descrição detalhada dos métodos utilizados no desenvolvimento dos protótipos e testes realizados.
4. **Resultados:** apresentação e análise dos resultados obtidos, comparando os dois modelos desenvolvidos.
5. **Conclusões e perspectivas futuras:** discussão sobre a viabilidade da solução proposta e sugestões para trabalhos futuros.
6. **Referências:** listagem das fontes consultadas para embasar teoricamente o trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AUTOMAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ANTIGOS

A automação de equipamentos antigos é uma prática crescente em diversas áreas da ciência e da engenharia, especialmente devido à necessidade de reduzir custos e prolongar a vida útil de dispositivos que ainda possuem potencial técnico, mas são considerados obsoletos. A modernização de equipamentos laboratoriais é uma estratégia que vai além da simples substituição de partes, e sim, busca transformar a funcionalidade de dispositivos antigos através de tecnologias acessíveis (HASSAN AL-MAEENI et al., 2020).

A utilização de microcontroladores, como o Arduino, e o avanço das impressoras 3D são alguns dos principais fatores que tornam essa abordagem viável. Prabhu e Urban (2020) destacam que a capacidade de imprimir componentes sob demanda e ajustar funcionalidades de forma simples e personalizada faz com que até mesmo equipamentos com anos de uso possam ser atualizados sem a necessidade de um novo investimento massivo em dispositivos modernos.

A aplicação dessas tecnologias permite que equipamentos como microscópios, espectrofotômetros e sistemas de medição possam ser convertidos em plataformas de automação. Esses sistemas podem ser integrados com sensores, atuadores e software avançado, criando soluções de baixo custo, mas com alta performance, para automatizar processos que antes eram realizados manualmente. A sustentabilidade dessa prática também é notável, pois reduz a quantidade de lixo eletrônico gerado e diminui o impacto ambiental associado ao descarte de equipamentos ainda funcionais.

No entanto, os desafios técnicos incluem a integração de novos componentes com os sistemas antigos e a necessidade de calibração fina dos dispositivos automatizados. Soluções de automação acessíveis devem ser projetadas de forma a preservar a integridade dos equipamentos originais, permitindo a adaptação sem a alteração de sua estrutura principal.

### 2.2 MODELOS DE MOVIMENTAÇÃO (CARTESIANA VS CORE XY)

A escolha do modelo de movimentação é fundamental para o desempenho de sistemas automatizados, especialmente em aplicações de alta precisão, como a automação de microscópios e outras ferramentas de laboratório. Os modelos de movimentação mais comuns são o cartesiano e o Core XY, sendo que cada um apresenta vantagens e desvantagens dependendo da aplicação.

**Modelo Cartesiano:** Este modelo utiliza três eixos (X, Y e Z) movidos independentemente, com motores dedicados para cada eixo. O sistema cartesiano é simples de entender e implementar, o que o torna uma escolha popular para muitas aplicações de automação. No entanto, seu maior desafio está no fato de que, à medida que os eixos se movem, o peso das peças móveis aumenta, o que pode gerar maiores forças de atrito e desalinhamentos ao longo do tempo. A precisão dos movimentos também pode ser comprometida quando os eixos precisam carregar estruturas pesadas, o que é um fator limitante em projetos que exigem alta performance.

**Modelo Core XY:** Este modelo é frequentemente preferido para automações de alta precisão devido à sua capacidade de realizar movimentos mais rápidos e suaves. No Core XY, os motores X e Y são combinados de forma que o sistema pode mover-se diagonalmente de forma mais eficiente, utilizando menos energia e reduzindo o peso transportado pelos eixos móveis. Isso resulta em uma maior precisão e menor desgaste mecânico. Esse modelo é ideal para aplicações que exigem movimentos rápidos e precisos, como em sistemas de impressão 3D ou microscopia automatizada.

Embora o Core XY tenha vantagens significativas em termos de desempenho, a sua complexidade de construção e programação pode ser um desafio, especialmente para quem está começando em automação. A escolha entre Cartesiano e Core XY depende da aplicação específica, sendo que o Core XY é mais vantajoso quando se precisa de precisão e rapidez, enquanto o Cartesiano é mais simples e mais barato de implementar.

### 2.3 FERRAMENTAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS (GRBL, UGS, DRIVERS, ETC.)

A automação de sistemas exige uma integração precisa de software e hardware para garantir que o sistema funcione corretamente e com eficiência. No caso de sistemas de controle de movimentação, o GRBL e o Universal Gcode Sender (UGS) são duas das principais ferramentas utilizadas.

GRBL é um firmware open-source, amplamente adotado para controlar sistemas CNC, como fresadoras, impressoras 3D, cortadoras a laser e até máquinas de corte a plasma. Ele interpreta comandos G-code, que são usados para controlar a movimentação de motores de passo. GRBL é eficiente, de baixo custo e fácil de configurar, o que o torna ideal para sistemas que exigem baixo custo e simplicidade.

Em conjunto com o GRBL, o UGS (Universal Gcode Sender) é uma interface gráfica que facilita o controle remoto do sistema. O UGS permite que o usuário se conecte ao dispositivo através de uma interface amigável, seja por Wi-Fi, USB, ou serial, facilitando a operação e a configuração. Além disso, ele é bastante utilizado em ambientes de laboratório, devido à sua versatilidade e compatibilidade com vários dispositivos de controle.

A escolha de drivers de motor é um aspecto crítico para o desempenho geral do sistema. Para máquinas mais simples, como os sistemas cartesianos, o driver A4988 pode ser uma opção válida, sendo um controlador de motor de passo de baixo custo e fácil implementação. Porém, para sistemas mais avançados, como os de Core XY, o DRV8825 oferece uma resolução superior, permitindo micropassos de até 1/32, o que resulta em movimentos mais precisos e suaves.

Além disso, a integração de tecnologias de impressão 3D para criar componentes personalizados e sensores de alta precisão pode aumentar ainda mais a funcionalidade de sistemas automatizados. Por exemplo, a corte a laser e o corte a plasma são amplamente usados para criar peças e estruturas para montagens, permitindo uma customização completa sem os custos de produção industrial.

## 2.4 ESTUDOS RELACIONADOS

### 2.4.1 Artigos

Diversos estudos demonstram como a automação de equipamentos antigos pode beneficiar a ciência. Collins et al. (2020) propõe um microscópio automatizado completamente funcional, open-source, desenvolvido a partir de componentes acessíveis, incluindo impressoras 3D e Arduino. O projeto é uma prova de conceito de como tecnologias baratas e acessíveis podem ser aplicadas para criar sistemas de alta qualidade para automação de microscópios. O OpenFlexure é particularmente interessante, pois ele não só permite a movimentação automatizada de um microscópio, mas também oferece uma plataforma para a educação e pesquisa científica em ambientes com orçamentos limitados.

O grande benefício desse projeto é o custo reduzido. Um microscópio convencional pode custar milhares de dólares, enquanto o OpenFlexure oferece uma solução de baixo custo, com um preço estimado de menos de \$500 para o sistema completo, dependendo dos componentes usados. Essa economia de custos é possível devido à utilização de peças impressas em 3D, drivers de motor simples e software open-source.

No entanto, um dos desafios enfrentados pelo OpenFlexure é a estabilidade estrutural. Como as peças são impressas em 3D, a precisão da montagem depende da qualidade das impressões e do alinhamento das partes, o que pode afetar a qualidade das imagens geradas. Além disso, a calibração do sistema é um aspecto crítico, especialmente quando se trata de microscopia de alta resolução.

Outro trabalho relevante, Brown et al. (2019) detalha a construção de um microscópio portátil e 3D impresso que é capaz de realizar detecção de moléculas individuais. A principal inovação aqui é a estabilidade estrutural alcançada através do uso de materiais e design de alta precisão. A estabilidade é garantida pela utilização de montagens e componentes personalizados, impressos em materiais de alta rigidez, e pela implementação de motores de passo de alta precisão, que garantem movimentos controlados e consistentes durante as varreduras.

A análise de custo desse sistema de microscopia é interessante. Comparado com microscópios comerciais de alta resolução, o custo de construção deste microscópio portátil é uma fração do valor. Enquanto microscópios comerciais que realizam detecção de moléculas podem custar milhares de dólares como o HRTEM Titan Themis da empresa Thermo Fisher Scientific podendo chegar a \$4 milhões com todos os acessórios, a versão 3D impressa e portátil tem um custo estimado de menos de \$1000, dependendo dos componentes eletrônicos e materiais escolhidos.

Isso torna o microscópio acessível para pesquisadores e laboratórios com orçamento limitado, especialmente em países em desenvolvimento, onde a capacidade de adquirir equipamentos caros pode ser restrita. O uso de tecnologias de baixo custo como impressoras 3D e sensores de baixo custo permite democratizar o acesso a tecnologias avançadas.

O estudo de (HATIBOGLU; AKIN, 2004, p. 471) descreve o desenvolvimento de um estágio motorizado simples e de baixo custo, projetado para ser usado com microscópios ópticos convencionais, ele não especifica qual microscópio foi utilizado, apenas diz que foi um microscópio óptico padrão. A principal inovação deste trabalho é a capacidade de automatizar movimentos em dois eixos (X e Y) utilizando servo-motores controlados por um chip controlador e um software de processamento de imagem baseado em Java. Esse sistema é particularmente interessante porque resolve o problema de acessibilidade a tecnologias de automação para microscópios, um campo que frequentemente exige equipamentos caros e difíceis de integrar.

A estabilidade do sistema é garantida pela escolha cuidadosa de componentes, como servo-motores de baixo custo e o uso de um software que permite o controle preciso dos

movimentos do estágio. A precisão dos movimentos, que é fundamental para realizar análises de imagens sem sobreposição ou distorções, foi testada e mostrou um erro inferior a 1 mm na direção perpendicular, o que é considerado um desempenho satisfatório para o tipo de aplicação proposto. Embora o sistema apresente algumas limitações, como a sobreposição de imagens causada por imprecisões no comprimento do passo, isso não compromete sua utilidade para a maioria das aplicações em microscopia.

A análise de custo-benefício deste estágio motorizado é um dos pontos fortes do estudo. O estágio desenvolvido é extremamente acessível, custando uma fração do preço de sistemas comerciais similares. Sistemas motorizados convencionais de alta precisão para microscópios podem custar como o da empresa Thorlabs que são por volta de R\$ 15mil para um sistema simples que movimenta em 3 eixos, mas este estágio automatizado tem um custo estimado de menos de \$200, dependendo dos materiais utilizados. Isso torna a solução uma alternativa viável para laboratórios com orçamento restrito, especialmente em países com menos recursos financeiros.

Ao comparar com microscópios comerciais que já possuem estágios motorizados, a principal vantagem desse sistema está no custo reduzido, mas também na flexibilidade de ser integrado a qualquer microscópio existente, sem a necessidade de substituir o equipamento completo. Para laboratórios acadêmicos ou de pesquisa com limitações orçamentárias, essa tecnologia oferece uma solução prática e eficaz para automatizar a aquisição de imagens e facilitar a análise de amostras em alta resolução.

#### **2.4.2 Patentes**

A automação de microscópios tem se mostrado uma solução viável para ampliar o acesso, a eficiência e a precisão de análises ópticas. Dentre os avanços mais significativos, destaca-se a integração de sistemas de controle remoto, permitindo que um ou mais usuários acessem e operem o equipamento de maneira simultânea e em locais distintos. Sistemas como o descrito na patente (HONG, 2016) apresentam uma abordagem robusta e inovadora, utilizando uma combinação de hardware e software para fornecer controle remoto completo de componentes mecânicos e ópticos.

Este sistema integra uma unidade de controle central no microscópio, a qual gerencia movimentos de eixos (X, Y e Z), ajuste de foco, controle de magnificação e intensidade da iluminação. As funcionalidades são acessadas remotamente por meio de dispositivos como computadores, smartphones e tablets conectados a uma unidade de servidor de imagem

(imaging server unit). A unidade de servidor processa as imagens capturadas pelo microscópio, disponibilizando-as em tempo real para os usuários, além de receber e processar comandos para operar o equipamento.

Além de proporcionar mobilidade e acessibilidade, o controle remoto do microscópio descrito na patente oferece a possibilidade de colaboração em tempo real entre múltiplos usuários, como pesquisadores ou alunos, o que é especialmente útil em ambientes acadêmicos ou laboratoriais. Este conceito reforça a aplicabilidade de tecnologias não invasivas para modernizar instrumentos laboratoriais sem a necessidade de modificações permanentes ou destrutivas nos equipamentos originais. A integração desse tipo de sistema exemplifica como soluções tecnológicas podem ser adaptadas para otimizar equipamentos tradicionais de microscopia, alinhando-se com as propostas do presente trabalho.

Um exemplo significativo de avanço no campo da automação e controle remoto de equipamentos ópticos é descrito na patente (ZEINEH, 2011), desenvolvida por Jack A. Zeineh e licenciada para Carl Zeiss Microscopy GmbH. O sistema propõe um método inovador de navegação remota em amostras microscópicas, com foco na transmissão otimizada de imagens digitais em diferentes níveis de detalhe.

O sistema se destaca pela aplicação de uma técnica de **compressão e transmissão progressiva**, que organiza os dados capturados pela câmera em componentes digitais representando detalhes crescentes. Essa abordagem prioriza a eficiência no uso de largura de banda e permite transmissões em tempo quase real, mesmo em redes de baixa capacidade, como PSTN e ISDN.

Essa tecnologia é amplamente aplicável em telepatologia que é uma técnica capaz de analisar amostras médicas à distância, permitindo que médicos especializados possam analisar pacientes que estão geograficamente em locais distantes, onde profissionais de saúde podem realizar diagnósticos remotos com alta precisão. No contexto deste trabalho, a navegação remota e a transmissão progressiva de imagens poderiam ser integradas ao sistema de automação do microscópio desenvolvido, ampliando a capacidade de controle remoto e análise detalhada de amostras biológicas. Além disso, a metodologia discutida demonstra potencial para futuras implementações de inteligência artificial, viabilizando diagnósticos mais rápidos e precisos em ambientes laboratoriais automatizados.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho visa demonstrar a automação não invasiva de um microscópio óptico de bancada, utilizando uma estrutura baseada em motores de passo, com controle via Arduino Uno e uma shield CNC, além da utilização do software UGS para controle remoto via Wi-Fi e joystick. O trabalho foi desenvolvido em duas etapas principais: a adaptação de um modelo cartesiano, baseado em eixos X, Y e Z, e a implementação de um novo modelo utilizando o sistema Core XY para a movimentação dos eixos.

### 3.1 MICROSCÓPIO ÓPTICO ZEISS

Para a automação do microscópio, foi utilizado um microscópio óptico trinocular da marca **Zeiss**, não foi possível encontrar o modelo exato do microscópio devido as placas de identificação não existirem mais, e a empresa tem muitos modelos parecidos, logo não foi possível identificar com precisão qual o modelo, porém é um modelo convencional amplamente reconhecido por sua qualidade óptica e precisão. Este microscópio é capaz de realizar observações tanto por **reflexão** quanto por **transmitância**, permitindo uma ampla gama de aplicações em análise de amostras.

O microscópio Zeiss utilizado possui **ajuste de foco fino e grosso**, permitindo a realização de ajustes de precisão para o foco da imagem, essencial para a observação detalhada de amostras em diferentes profundidades. O sistema de foco fino permite ajustes mais sutis, ideais para a observação de detalhes minuciosos, enquanto o foco grosso facilita a movimentação inicial e a busca por uma área de interesse na amostra.

- **Lentes e Acessórios**

O microscópio é compatível com até **cinco lentes de objetivas**, como pode ser visto na figura 1, proporcionando flexibilidade na escolha da ampliação necessária para as análises. As lentes acopladas no momento incluem:

- **Lente de 5x:** Para ampliações menores, proporcionando um campo de visão maior.
- **Lente de 10x:** Oferecendo uma ampliação intermediária para observações mais detalhadas.
- **Lente de 40x:** Para ampliações significativas, permitindo o estudo de detalhes mais finos nas amostras.
- **Lente de 100x para óleo:** Utilizada para observações em altíssima ampliação, permitindo a visualização de estruturas microscópicas com precisão, com o auxílio de óleo de imersão para melhorar a qualidade da imagem e reduzir a dispersão da luz.

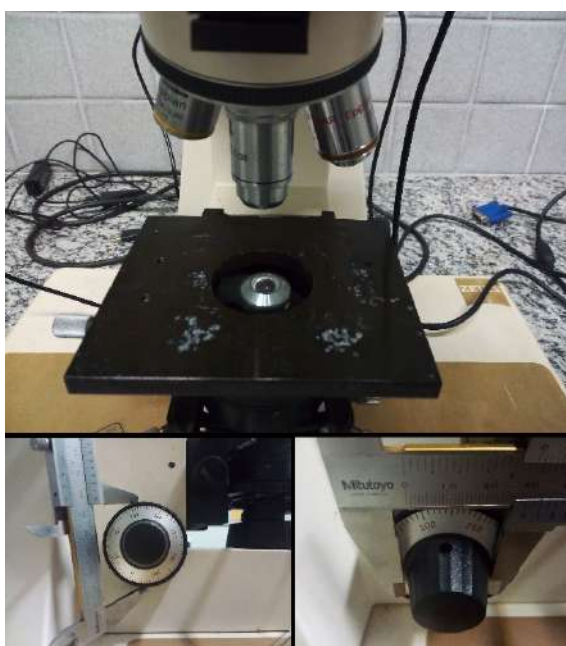
Além dessas lentes, o microscópio apresenta **um encaixe vazio**, que pode ser utilizado para adicionar uma lente de ampliação adicional, se necessário, conforme as exigências do experimento.

- **Sistema de Ajuste e Conectividade**

O nosso microscópio Zeiss também possui um conjunto de **lentes de ajuste**, que permitem ao usuário personalizar a qualidade da imagem, corrigindo distorções e ajustando o contraste para obter melhores resultados nas observações. Além disso, o microscópio tem **suporte para conexão de câmeras**, tanto na parte superior (para observações por cima) quanto no ocular, possibilitando a captura de imagens ou vídeos das amostras para análises posteriores.

O sistema de conectividade para câmeras é uma característica crucial para a automação, já que permite integrar a captura de imagens ao sistema de controle automatizado, facilitando a análise e documentação das amostras analisadas durante os experimentos.

**Figura 1 – Imagem do microscópio Zeiss**



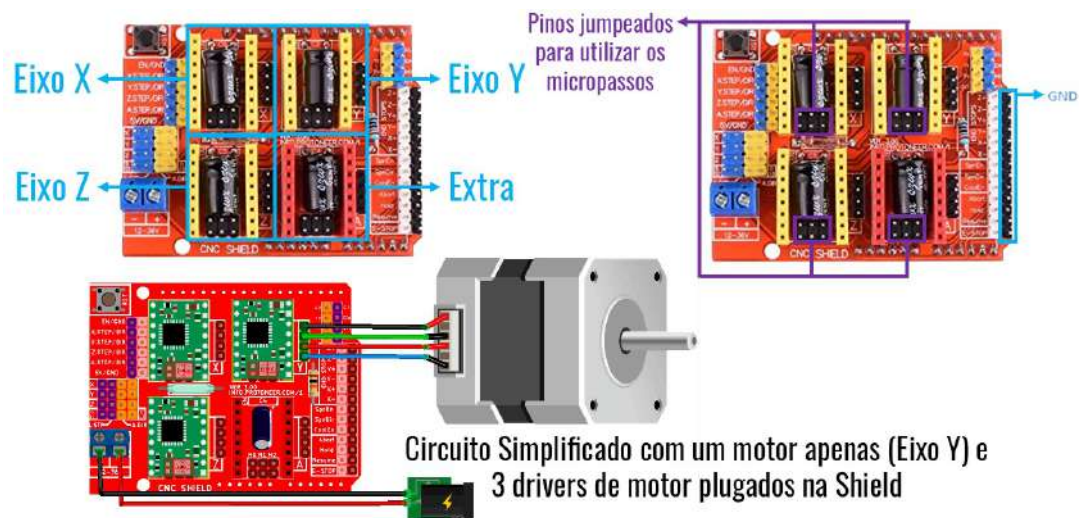
Fonte: elaboração própria.

### 3.2 MODELO CARTESIANO

Para a movimentação dos eixos, foi utilizado um Arduino Uno e um shield para Arduino Uno chamado de “CNC shield”, sendo uma placa vermelha que pode ser encaixada sobre o Arduino Uno, facilitando o encaixe de até 4 motores de passo na estrutura, assim como todos os pinos de apoio para fim de curso, sensores, saídas de 3.3V e 5V e GND para conexão de telas ou botões, sendo um sistema totalmente “plug and play”, sendo alimentado por uma fonte 12V

genérica de 1A, como pode ser visto na Figura 2, foram usados três drivers A4988, que possuem capacidade para dar micropassos de até 1/16 do passo original do motor.

**Figura 2 – Esquema eletrônico de montagem da shield do Arduino uno**



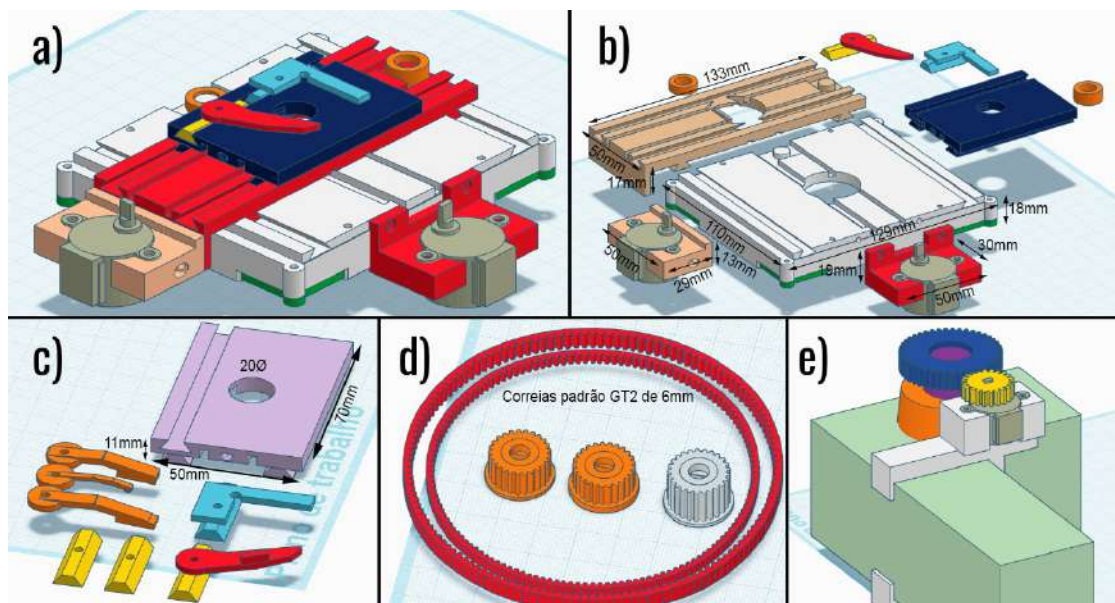
Fonte: elaboração própria.

A movimentação era realizada com a ajuda de trilhos plásticos e correias de TPU flex, impressas em 3D.

A estrutura mecânica foi projetada utilizando o site de modelagem 3D “Tinkercad”. A modelagem inicial incluiu os seguintes elementos principais:

A base foi projetada para acomodar os trilhos e carrinhos lineares dos eixos X e Y, garantindo movimentos estáveis e precisos. Foram utilizados perfis retangulares e conectores projetados para impressão 3D, possibilitando ajustes e modificações durante os testes iniciais. Para o movimento linear, foram utilizados motores de passo 28BYJ-48, e neles foram conectadas engrenagens compatíveis com correias GT2, totalmente impressas em PLA. Correias GT2 em TPU Flex e tensionadores em PLA, foram empregadas para transferir o movimento dos motores aos carrinhos, o modelo pode ser visto na Figura 3. O eixo Z utilizou o ajuste original do microscópio óptico, adaptado com um motor de passo 28BYJ-48, que oferece torque suficiente para movimentar o suporte da lente objetiva. Uma engrenagem foi projetada para acoplar o motor ao ajuste fino do microscópio, garantindo movimentos delicados e compatíveis com as necessidades de foco.

**Figura 3 – Imagem do modelo cartesiano modelado**



Fonte: elaboração própria.

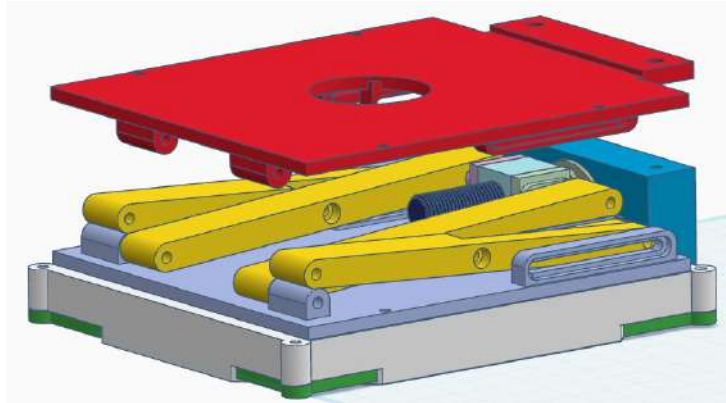
### 3.3 MODELO CORE XY

O sistema Core XY usa os motores NEMA 17 de 4,2 kgf para os eixos X e Y e foram usados rolamentos lineares de aço duro de 8 mm de diâmetro e eixos de 4 mm de diâmetro, substituindo os trilhos plásticos. As correias de movimentação foram trocadas por correias GT2, comercialmente adquiridas, que são mais rígidas e duráveis, em vez das correias de TPU flex impressas em 3D como pode ser visto na figura 4.

O sistema de controle foi modificado para suportar a movimentação no formato Core XY. Para isso, foi utilizado o software GRBL, que foi adaptado para esse novo sistema de movimentação como pode ser visto na figura 9. O Arduino Uno com sua shield CNC foi configurado para controlar os motores de forma mais eficiente, utilizando três drivers DRV8825, que têm a capacidade de fornecer micropassos de até 1/32 do passo original do motor.

O motor do eixo Z também foi atualizado, agora sendo controlado por um motor NEMA 17 de 4,2 kg-força, fixado em uma base mais robusta para garantir a estabilidade do foco. Foram utilizados 4 eixos metálicos de 8mm de diâmetro e aproximadamente 16cm e 4 rolamentos lineares de 8mm para movimentar o novo carrinho único do modelo Core XY. Além disso foram utilizados 4 eixos metálicos de 4mm de diâmetro com aproximadamente 16cm para

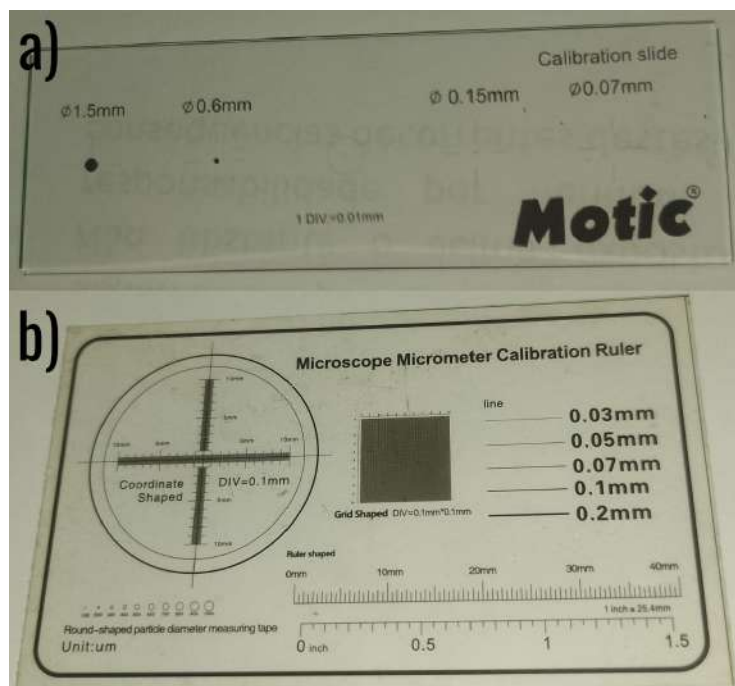




Fonte: elaboração própria.

Foram utilizados cartões de calibração comerciais da empresa Motic para executar os testes de movimentação, acurácia e precisão do microscópio, a imagem dos mesmos pode ser observada na figura 6.

**Figura 6 – Imagem cartões de calibração comerciais de microscópio**



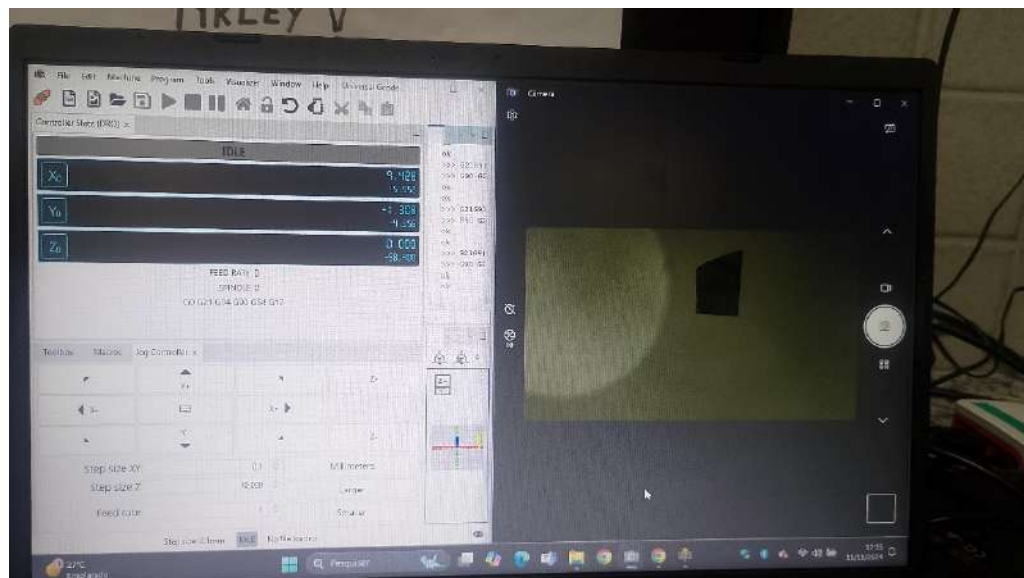
Fonte: elaboração própria.

### 3.4 CONTROLE VIA UGS

Para o controle do sistema, foi utilizado um notebook simples de escritório com Windows 10, processador I7 e 8GB de memória ram, o software Universal Gcode Sender (UGS) foi instalado e configurado, que foi adaptado para funcionar via Wi-Fi e com o controle

remoto através de um joystick, configurações essas nativas do próprio software, sendo necessário para a conexão via Wi-Fi um aparelho conectado no mesmo Wi-Fi, bastando colocar o IP local disponibilizado pelo software ou lendo seu QR-code, e para o joystick é necessário configurar o que cada botão do joystick vai executar. A interface de controle permitiu a movimentação dos eixos com precisão, possibilitando a realização de varreduras manuais para a captura de imagens do microscópio que podem ser vistas na figura 7. No computador ficou conectado o Arduino Uno via porta USB, a câmera via USB e um Joystick via USB, sendo o Arduino responsável pelas movimentações, a câmera transmitindo o vídeo em tempo real e o joystick sendo a interface principal por onde o usuário manda os comandos para o Arduino.

**Figura 7 – Imagem do UGS com a interface de controle via Wi-Fi e joystick**



Fonte: elaboração própria.

Para a programação do Arduino, foi utilizado o software Arduino IDE 1.8, e o código utilizado foi o grbl-master 09 de 2021 (GRBL, 2021) que pode ser visto na figura 8.

**Figura 8 – Imagem do código do Arduino Uno**

```

grblUpload | Arduino 1.8.13
Arquivo  Editar  Sketch  Ferramentas  Ajuda
Verificar

grblUpload
/*****
This sketch compiles and uploads Grbl to your 328p-based Arduino!

To use:
- First make sure you have imported Grbl source code into your Arduino
  IDE. There are details on our Github website on how to do this.

- Select your Arduino Board and Serial Port in the Tools drop-down menu.
  NOTE: Grbl only officially supports 328p-based Arduinos, like the Uno.
  Using other boards will likely not work!

- Then just click 'Upload'. That's it!

For advanced users:
If you'd like to see what else Grbl can do, there are some additional
options for customization and features you can enable or disable.
Navigate your file system to where the Arduino IDE has stored the Grbl
source code files, open the 'config.h' file in your favorite text
editor. Inside are dozens of feature descriptions and #defines. Simply
comment or uncomment the #defines or alter their assigned values, save
your changes, and then click 'Upload' here.

Copyright (c) 2015 Sungeun K. Jeon
Released under the MIT-license. See license.txt for details.
*****/

#include <grbl.h>

// Do not alter this file!

```

Fonte: elaboração própria.

Para grbl-master 09 foram feitos dois ajustes no código “config.h” que pode ser visto na figura 9, que foram compatibilizar ele com o nosso Arduino Uno e também habilitar o modo Core XY, para alterar o modo de movimentação da máquina.

**Figura 9 – Imagem de uma parte do código do grbl**

```

/*
config.h - compile time configuration
Part of Grbl

Copyright (c) 2012-2015 Sungeun K. Jeon
Copyright (c) 2009-2011 Simen Svale Skogsrud

Grbl is free software: you can redistribute it and/or modify
it under the terms of the GNU General Public License as published by
the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
(at your option) any later version.

Grbl is distributed in the hope that it will be useful,
but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
GNU General Public License for more details.

You should have received a copy of the GNU General Public License
along with Grbl. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
*/

// This file contains compile-time configurations for Grbl's internal system. For the most part,
// users will not need to directly modify these, but they are here for specific needs, i.e.
// performance tuning or adjusting to non-typical machines.

// IMPORTANT: Any changes here requires a full re-compiling of the source code to propagate them.

#ifndef config_h
#define config_h
#include "grbl.h" // For Arduino IDE compatibility.

// Default settings. Used when resetting EEPROM. Change to desired name in defaults.h
#define DEFAULTS_GENERIC

// Serial baud rate
#define BAUD_RATE 115200

// Default cpu mappings. Grbl officially supports the Arduino Uno only. Other processor types
// may exist from user-supplied templates or directly user-defined in cpu_map.h
#define CPU_MAP_ATMEGA328P // Arduino Uno CPU

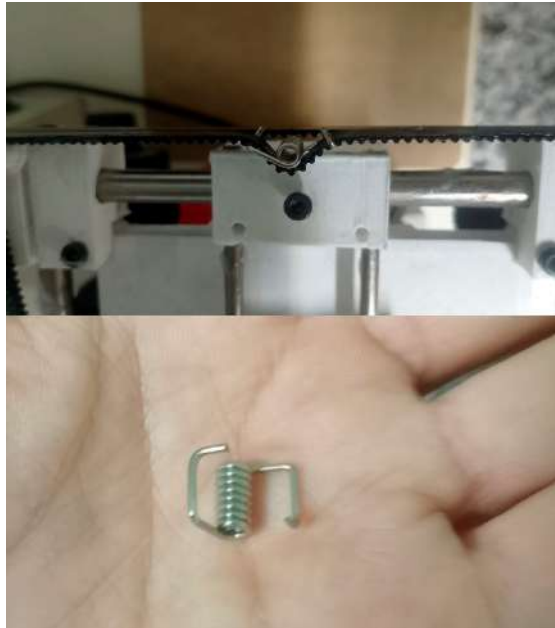
// Enable CoreXY kinematics. Use ONLY with CoreXY machines.
// IMPORTANT: If homing is enabled, you must reconfigure the homing cycle #defines above to
// #define HOMING_CYCLE_0 (1<<X_AXIS) and #define HOMING_CYCLE_1 (1<<Y_AXIS)
// NOTE: This configuration option alters the motion of the X and Y axes to principle of operation
// defined at (http://corexy.com/theory.html). Motors are assumed to be positioned and wired exactly as
// described, if not, motions may move in strange directions. Grbl requires the CoreXY A and B motors
// have the same steps per mm internally.
#define COREXY // Default disabled. Uncomment to enable.

```

Fonte: elaboração própria.

Foram adicionados 4 tensionadores de correias para retirar as folgas nas duas correias da estrutura core XY que podem ser vistas na figura 10.

**Figura 10 – Imagem dos tensionadores de correia**



Fonte: elaboração própria.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 LIMITAÇÃO TEÓRICA DE MOVIMENTAÇÃO

Para determinar a precisão mínima dos movimentos dos eixos X e Y, foi necessário calcular o limite teórico de deslocamento baseado nas características do sistema de acionamento utilizado. O sistema é composto por motores NEMA 17, que possuem um passo de 1,8 graus por movimento, e drivers DRV8825, que são capazes de dividir esse passo em até 1/32 (micro-passo), permitindo maior resolução nos movimentos.

Além disso, as engrenagens utilizadas possuem 16 dentes e um diâmetro de 11 mm, o que impacta diretamente no deslocamento linear do sistema. Para calcular a movimentação mínima teórica de cada eixo, consideramos a circunferência da engrenagem, que é dada pela Equação (1):

$$C = \pi \cdot d \quad (1)$$

Onde C é a circunferência e d é o diâmetro da engrenagem. Substituindo o diâmetro de 11 mm, na equação (2):

$$C = \pi \cdot 11 \text{ mm} = 34,56 \text{ mm} \quad (2)$$

Com o motor NEMA 17 dando um passo de 1,8 graus e o driver DRV8825 dividindo esse passo em 32, cada movimento do motor gera um deslocamento linear de 0,0017mm, como pode ser visto na equação 3:

$$\text{Movimentoporpasso} = \frac{C}{360} \cdot 1,8^\circ \cdot \frac{1}{32} = 0,0017 \text{ mm} \quad (3)$$

Ou seja, o sistema teórico é capaz de mover o eixo por incrementos de aproximadamente 0,0017 mm por movimento. Este valor representa o limite mínimo teórico de movimentação do sistema. Em quanto o sistema antigo com os drivers de motor A4988 era de 0,0034mm, logo foi possível dobrar a resolução mínima de movimentos com o driver DRV8825.

#### 4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS

Os testes realizados com os dois modelos – cartesiano e CORE XY – destacaram as diferenças fundamentais em termos de eficiência, precisão e robustez. O modelo cartesiano, projetado com trilhos e peças impressas em 3D, apresentou dificuldades em manter movimentos lineares precisos devido ao atrito gerado pelas peças, à elasticidade das correias impressas em TPU flex e ao torque insuficiente dos motores utilizados.

A movimentação era realizada com a ajuda de trilhos plásticos e correias de TPU flex, impressas em 3D. No entanto, problemas de atrito foram identificados, principalmente devido à falta de uma superfície lisa nas peças impressas e ao desgaste das correias de TPU, que apresentavam propriedades elásticas e flexíveis, por isso quando o motor gira, a correia que é elástica, estica e perde a sincronia com a engrenagem do motor, e como a engrenagem do motor é de um polímero muito mais duro (PLA), acabava por lixar a correia de TPU. Como resultado, os motores de passo não conseguiam movimentar corretamente os eixos, o que causava falhas no controle de posição, especialmente quando o carrinho travava e os motores giravam em falso, devido ao estiramento das correias.

Outro desafio do modelo cartesiano foi o motor utilizado para o eixo Z, que possuía uma caixa de redução com engrenagens de plástico como pode ser visto na figura 11. Isso impossibilitava a geração manual de torque e, quando o motor travava, os dentes das engrenagens eram quebrados, tornando o motor inutilizável. Além disso, o sistema não possuía a modularidade necessária para permitir melhorias significativas.

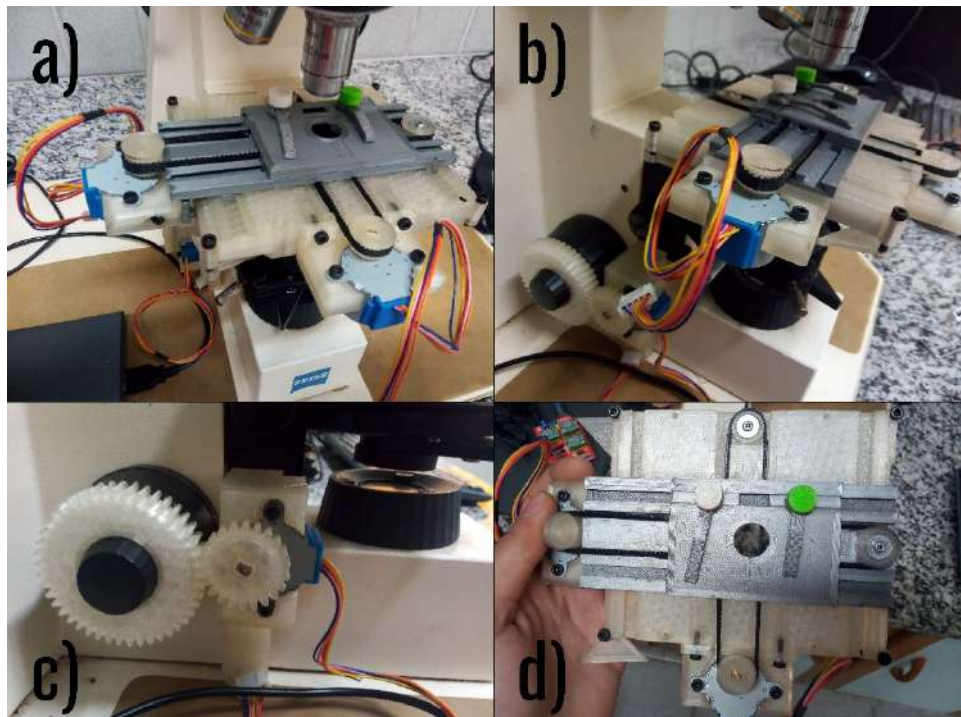
**Figura 11 – Engrenagens plásticas internas do motor de passo 28byj-48 de 5 volts**



Fonte: elaboração própria.

Durante os testes, foi observado que o movimento nos eixos X e Y apresentava elevada incerteza na posição o que causava erros de repetibilidade na movimentação. Quando o carrinho se movia, ele não retornava ao ponto exato de origem, o que resultava em uma precisão muito baixa para as análises. O modelo completo montado pode ser visto na figura 12.

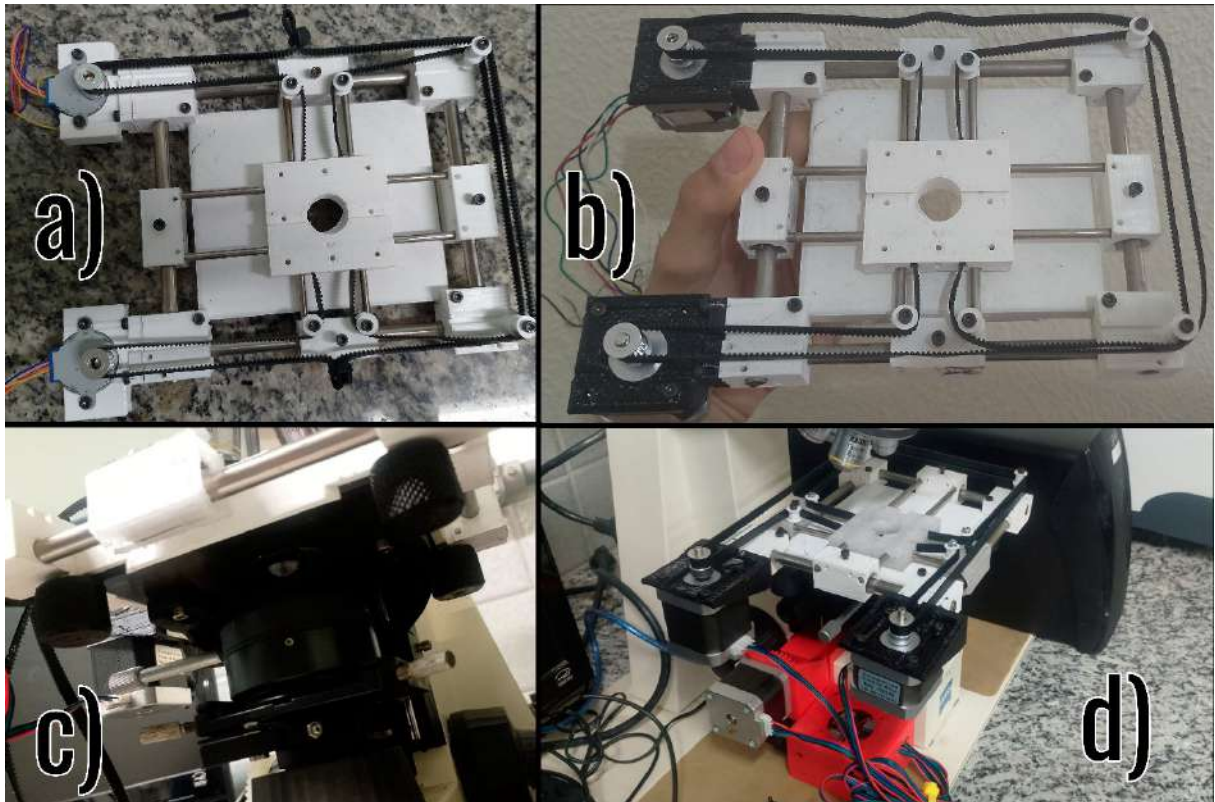
**Figura 12 – Esquema do sistema cartesiano (com as peças e a disposição dos motores e drivers)**



Fonte: elaboração própria.

Por outro lado, o modelo CORE XY, com correias GT2 comerciais e rolamentos lineares em eixos de aço endurecido, ofereceu maior estabilidade e um movimento mais fluido. Além disso, o uso de motores NEMA 17, fixos na estrutura possibilitou maior força e redução de vibrações. A modularidade do modelo CORE XY permitiu ajustes e melhorias, que não eram viáveis no modelo cartesiano, tornando-o mais eficiente e adequado para análises microscópicas como pode ser visto na figura 13.

**Figura 13 – Esquema do novo sistema de movimentação (Core XY)**



Fonte: elaboração própria.

#### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO E AJUSTES FINAIS

Após a montagem do novo modelo Core XY, foram realizados testes para avaliar a precisão da movimentação dos eixos X e Y. A primeira série de testes foi conduzida utilizando lentes de ampliação de 5x e 10x, com um feed rate de 10,000 (dez mil) mm/s. Para a calibração dos movimentos, foram utilizados cartões de calibração comerciais de microscópio, e as imagens foram analisadas com o software ImageJ como pode ser visto na figura 14 e figura 15,

os dados das medidas obtidas podem ser observados nas tabelas 1 e tabela 2, sendo para o eixo X e eixo Y respectivamente.

**Tabela 1 – Medidas de Deslocamento medidos no Eixo X ( $\Delta x$ )**

Ampliação	Feed Rate (mm/s)	Movimento Esperado (mm)	Alguns dos Valores Medidos (mm)	Média ( $\bar{x}$ ) (mm)	Desvio Padrão ( $\sigma$ ) (mm)	Variância ( $\sigma^2$ ) (mm <sup>2</sup> )	Erro Médio (e) (mm)	Porcentagem de Erro Relativo (%E)	Número de medidas realizadas (n)
10x	10,000	1	0.8, 0.9, 0.9, 1.0, 1.1, 1.0, 1.1, 1.2, 0.9	0.98	0.12	0.0144	-0.011	-1.11%	50
40x	1	0.1	0.022, 0.045, 0.057, 0.046, 0.078, 0.092, 0.105, 0.093	0.067	0.03	0.0009	-0.033	-33.00%	50

**Tabela 2 – Medidas de Deslocamento medidos no Eixo Y ( $\Delta y$ )**

Ampliação	Feed Rate (mm/s)	Movimento Esperado (mm)	Alguns dos Valores Medidos (mm)	Média ( $\bar{x}$ ) (mm)	Desvio Padrão ( $\sigma$ ) (mm)	Variância ( $\sigma^2$ ) (mm <sup>2</sup> )	Erro Médio (e) (mm)	Porcentagem de Erro Relativo (%E)	Número de medidas realizadas (n)
10x	10,000	1	0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 0.9, 0.8, 1.2, 1.4, 0.9	0.89	0.38	0.1444	-0.11	-11.00%	50
40x	1	0.1	-0.029, -0.008, 0.121, -0.015, -0.006, 0.108, -0.011, 0.119	0.035	0.06	0.0036	-0.065	-65.00%	50

**Figura 14 – Imagem dos testes de movimentação com lente de 5x**

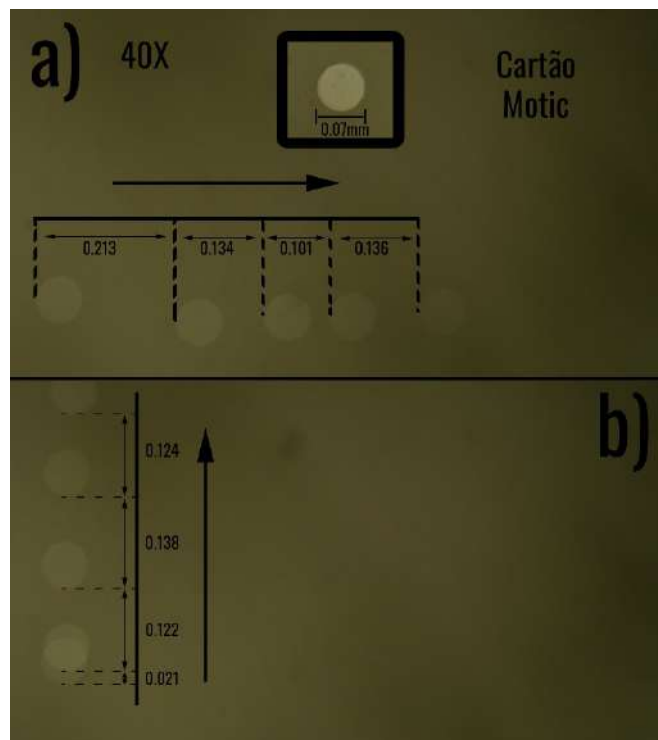




Fonte: elaboração própria.

Os testes de movimentações mais precisos foram feitos usando o menor círculo disponível no cartão de calibração da Motic, sendo o círculo de 0,07mm, que é invisível a olho nu, sendo visível apenas com a lente de 40x de ampliação, onde foi possível observar os movimentos lineares no eixo X e Y, além de verificar se a movimentação está no mesmo plano, pois caso perca o foco, pode indicar que durante a movimentação o objeto pode estar subindo ou descendo, saindo do ponto focal pode ser visto na figura 15.

**Figura 15 – Imagem das medições realizadas com lente de 40x**



Fonte: elaboração própria.

#### 4.4 PRECISÃO E ESTABILIDADE DOS MOVIMENTOS

A precisão dos movimentos foi analisada em diferentes configurações de feed rate, com medições realizadas para deslocamentos de 1 mm e 0,1 mm. Os resultados demonstraram que o modelo CORE XY apresentou variações significativamente menores, indicando maior precisão e controle.

No modelo cartesiano, as medições apresentaram desvios consideráveis devido ao atrito e à elasticidade das correias, enquanto no CORE XY os deslocamentos foram mais próximos do valor esperado, mesmo em altas ampliações, como as lentes de 40x. Os micropassos oferecidos pelos drivers DRV8825 no modelo CORE XY também contribuíram para movimentos mais controlados e suaves, principalmente em baixas velocidades.

#### 4.5 ANÁLISES DE IMAGENS COM AMPLIAÇÕES DIFERENTES

As análises das imagens coletadas utilizaram cartões de calibração e o software ImageJ. Com ampliações de 5x e 10x, o modelo CORE XY demonstrou melhor alinhamento e uniformidade nas imagens, enquanto o cartesiano frequentemente apresentava distorções devido a movimentações imprecisas.

Para ampliações de 40x, o CORE XY, mesmo com ampliação máxima, manteve uma qualidade de imagem consistente, destacando-se pela estabilidade proporcionada pelos motores NEMA 17 e pela robustez estrutural.

#### 4.6 ANÁLISES DE CUSTOS

Este tópico aborda a análise de custos envolvidos na construção do modelo Core XY desenvolvido neste projeto e compara os resultados com os valores de mesas motorizadas comerciais disponíveis no mercado. Para essa comparação, foram analisados produtos de duas empresas de renome na área, **Thorlabs** e **Holmarc**, sendo utilizado como referência principal o modelo **XY-MR-50-150** da Holmarc, que possui deslocamento Core XY semelhante ao sistema desenvolvido.

##### 4.6.1 Custos do Modelo Core XY

A tabela 3 detalha os custos dos componentes utilizados na construção do modelo Core XY, incluindo peças impressas em 3D, componentes eletrônicos, e acessórios mecânicos.

**Tabela 3 – Tabela de gastos para o projeto core XY**

Componentes	Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Motor de Passo Nema 17 4,2Kgf	Motores de passo responsáveis pelo Eixo X,Y e Z	3	100	300
Driver DRV8825	Driver dos motores de passo	3	23	69
Correia GT2 5M	Correias para os eixos X e Y	1	63	63
Polias GT2 16 dentes	Polias para os motores do eixo X e Y	2	7	14
Arduino Uno	Microcontrolador	1	54	54
Shield CNC	Shield para conectar os motores e drivers	1	25	25
Rolamento linear 8mm	Rolamento para hastes de 8mm	4	6	24
Eixo metálica 8mm x 1M	Hastes para estabilidade estrutural	1	87	87
Eixo metálica 4mm x 50cm	Hastes para transferência de movimento	1	50	50
Filamento PLA 1Kg	Filamento para imprimir a estrutura	1	100	100
Filamento PETG 1Kg	Filamento para imprimir peças de alto desempenho	1	100	100
Fonte 12V	Fonte para alimentar motores e arduino	1	30	30
<b>Custo Total</b>				916,00

Além dos componentes, foi necessário tempo de montagem e testes. Estima-se que o tempo total para desenvolvimento foi de aproximadamente 40 horas. Caso fosse considerada a mão de obra especializada, os custos poderiam aumentar, mas o objetivo do projeto é permitir uma construção acessível.

#### 4.6.2 Custos de Mesas Comerciais

##### Thorlabs

Na Thorlabs, mesas motorizadas similares apresentam preços que variam de **US\$ 1.200,00** a **US\$ 3.000,00**, dependendo das especificações e deslocamentos disponíveis.

Convertendo para reais (cotação média de R\$ 5,00 por dólar), os valores ficam entre **R\$ 6.000,00** e **R\$ 15.000,00**, sem considerar impostos de importação ou frete.

### **Holmarc**

O modelo **XY-MR-50-150**, da Holmarc, foi utilizado como referência por possuir deslocamento Core XY. Seu preço médio é de **₹ 140.000,00** (cerca de **R\$ 8.800,00**, considerando uma cotação de ₹ 1 = R\$ 0,063), também sem incluir impostos e custos adicionais.

Além do custo do equipamento, deve se lembrar que como esses equipamentos são originários de países Europeus ou dos Estados Unidos, existe uma questão logística importante para ser levada em consideração tanto para a aquisição do equipamento, quanto para conseguir peças de reposição ou suporte técnico.

### **4.6.3 Comparação de Custos**

A tabela abaixo resume a comparação entre o modelo Core XY e os produtos comerciais:

**Tabela 4 – Comparação do projeto core XY e os modelos comerciais**

Item	Modelo Core XY	Thorlabs	Holmarc (XY-MR-50-150)
<b>Custo Total (R\$)</b>	916,00	6.000,00 a 15.000,00	8.800,00
<b>Deslocamento (mm)</b>	Personalizável	Variável	50 x 50 ou 150 x 150
<b>Customização</b>	Alta	Baixa	Baixa
<b>Suporte Técnico</b>	Limitado	Alto	Médio
<b>Disponibilidade</b>	Imediata	Sob encomenda	Sob encomenda

O modelo Core XY apresenta uma economia de mais de **90%** em relação às opções comerciais, mesmo considerando o custo de montagem e desenvolvimento. Apesar de produtos como os da Thorlabs e Holmarc oferecerem maior robustez e suporte técnico, a solução desenvolvida no presente projeto destaca-se pela flexibilidade, custo acessível e possibilidade de personalização. Além disso, o sistema proposto atende plenamente aos requisitos para aplicações laboratoriais, especialmente em cenários de orçamento limitado.

A análise evidencia que soluções open-source e personalizadas, como a apresentada neste trabalho, são alternativas viáveis e economicamente vantajosas frente a equipamentos comerciais de alto custo.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 5.1 AVALIAÇÃO DO PROJETO

O projeto demonstrou a viabilidade de automatizar um microscópio óptico de bancada de maneira não invasiva, utilizando tecnologias acessíveis e de baixo custo. A transição do modelo cartesiano para o CORE XY foi crucial para superar os desafios iniciais relacionados à precisão e à estabilidade dos movimentos. A implementação de correias comerciais GT2, rolamentos lineares e motores NEMA 17 proporcionou avanços significativos em termos de qualidade estrutural e operacional, garantindo um desempenho mais confiável.

Embora o modelo cartesiano tenha cumprido seu papel como protótipo inicial, suas limitações estruturais e funcionais destacaram a necessidade de uma abordagem mais robusta, já que vários problemas de projeto foram surgindo durante o desenvolvimento do mesmo, onde tínhamos a opção de tentar reestruturar o modelo cartesiano, com correias comerciais e motores melhores, porém foi escolhido começar um projeto novo corrigindo todos erros que foram aprendidos no modelo cartesiano. A adoção do CORE XY não apenas aprimorou a precisão dos movimentos, mas também possibilitou maior modularidade e potencial de expansão, alinhando-se aos objetivos do projeto.

### 5.2 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS DE MELHORIAS

Apesar das melhorias no modelo CORE XY, algumas limitações foram identificadas:

- **Resolução nas movimentações:** Embora o uso dos DRV8825 tenha melhorado significativamente a precisão, pequenos desvios ainda foram detectados, especialmente em movimentações repetitivas com altas ampliações.
- **Calibração inicial:** A calibração dos eixos para alcançar o alinhamento ideal exigiu ajustes manuais demorados.
- **Integração de rotinas automáticas:** O sistema ainda não conta com uma programação robusta para varreduras automáticas, o que limita a automação plena.

Como perspectivas de melhoria, propõe-se o desenvolvimento de rotinas automáticas para análises, integrando inteligência artificial para interpretação das imagens capturadas. Além disso, o uso de motores com resoluções ainda maiores e a implementação de sensores adicionais para feedback em tempo real e sensores de fim de curso, podem refinar a precisão e a confiabilidade do sistema como fim de curso por infravermelho.

### 5.3 PROVA DE CONCEITO

Este trabalho demonstra que equipamentos antigos podem ser modernizados com soluções tecnológicas econômicas e facilmente replicáveis. A utilização de plataformas open-source, como GRBL e UGS, combinadas com peças impressas em 3D e componentes eletrônicos acessíveis, destaca a acessibilidade e a sustentabilidade desse tipo de abordagem.

O projeto também reforça a aplicabilidade de sistemas CORE XY para aplicações em que precisão e estabilidade são essenciais, oferecendo uma alternativa viável para contextos de pesquisa científica e educação. Além disso, a integração com ferramentas de análise de imagens, como o ImageJ, possibilita o uso do sistema para estudos mais avançados, ampliando suas funcionalidades.

### 5.4 PERSPECTIVAS FUTURAS

Para o futuro, algumas melhorias e expansões estão planejadas, como:

- **Automação de rotinas de análise:** A implementação de varreduras automáticas permitirá análises mais eficientes e reprodutíveis, otimizando o uso do microscópio para aplicações científicas.
- **Integração com inteligência artificial:** Desenvolver algoritmos capazes de analisar e interpretar automaticamente as imagens capturadas abrirá novas possibilidades, como a identificação de padrões e a classificação de amostras.
- **Aprimoramento da resolução:** O uso de drivers de motor com resoluções ainda maiores, combinado com sensores de feedback, pode aumentar a precisão e reduzir desvios em movimentações repetitivas.
- **Expansão modular:** Incorporar novos módulos, como iluminação controlada e ajustes de foco motorizados mais precisos, pode ampliar as capacidades do sistema para aplicações mais específicas.

Em suma, o projeto confirma que a automação de equipamentos antigos pode ser realizada de maneira prática e eficiente, destacando-se como uma solução promissora para modernização de laboratórios e democratização do acesso a tecnologias avançadas.

## 6 REFERÊNCIAS

AL-MAEENI, Sara Salman Hassan; KUHNHEN, Christopher; ENGEL, Bernd; SCHILLER, Michael. Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 88, n. July 2019, p. 369-374, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.064. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.064>.

AIDUKAS, Tomas; ECKERT, Regina; HARVEY, Andrew R.; WALLER, Laura; KONDA, Pavan C. Low-cost, sub-micron resolution, wide-field computational microscopy using open-source hardware. *Nature Scientific Reports*, [S.l.], v. 9, p. 17919, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43845-9>.

BIBI, Sagida; KAUR, Randip; HENRIKSEN-LACEY, Malou; McNEIL, Sarah E.; WILKHU, Jitinder; LATTMANN, Eric; CHRISTENSEN, Dennis; MOHAMMED, Afzal R.; PERRIE, Yvonne. Microscopy imaging of liposomes: From coverslips to environmental SEM. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 417, n. 1-2, p. 138-150, 2011. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2010.12.021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.12.021>.

BROWN, James W. P.; BAUER, Arnaud; POLINKOVSKY, Mark E.; BHUMKAR, Akshay; HUNTER, Dominic J. B.; GAUS, Katharina; SIERECKI, Emma; GAMBIN, Yann. Single-molecule detection on a portable 3D-printed microscope. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-13617-0. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-13617-0>.

COLLINS, Joel T.; KNAPPER, Joe; STIRLING, Julian; MDUDA, Joram; MKINDI, Catherine; MAYAGAYA, Valeriana; MWAKAJINGA, Grace A.; NYAKYI, Paul T.; SANGA, Valerian L.; CARBERY, Dave; WHITE, Leah; DALE, Sara; LIM, Zhen Jieh; BAUMBERG, Jeremy J.; CICUTA, Pietro; MCDERMOTT, Samuel; VODENICHARSKI, Boyko; BOWMAN, Richard. Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope. *Biomedical Optics Express*, v. 11, n. 5, p. 2447, 2020. DOI: 10.1364/boe.385729.

D'Ambrosio, Michael V.; BAKALAR, Matthew; BENNURU, Sasisekhar; REBER, Clay; SKANDARAJAH, Arunan; NILSSON, Lina; SWITZ, Neil; KAMGNO, Joseph; PION, Sébastien; BOUSSINESQ, Michel; NUTMAN, Thomas B.; FLETCHER, Daniel A. Point-of-care quantification of blood-borne filarial parasites with a mobile phone microscope. *Science Translational Medicine*, v. 7, n. 286, 2015. DOI: 10.1126/scitranslmed.aaa3480.

GRBL. **GRBL: G-code Interpreter for Arduino**. Versão grbl-master 09. Disponível em: <https://github.com/grbl/grbl>. Acesso em: set. 2021.

HATIBOGLU, C. U., AKIN, S. "A new computerized moving stage for optical microscopes", *Computers and Geosciences*, v. 30, n. 5, p. 471-481, 2004. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.008. .

HIEMENZ, J. "3D PRINTING WITH FDM: How it Works". *Stratasys, Inc*, v. 1, p. 1-5, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Normas de Apresentação Tabular*. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv23907.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022.

IRWIN, J. L.; PEARCE, Joshua M.; ANZALONE, Gerald; OPPLIGER, D.. The reprop 3-D printer revolution in STEM education. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2014. DOI: 10.18260/1-2--23175.

PRABHU, G. R. D., URBAN, P. L. "Elevating Chemistry Research with a Modern Electronics Toolkit". *Chemical Reviews*, v. 120, n. 17, p. 9482–9553, 2020. DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c00206.

SHIMANOVICH, Klimentiy; BOUHADANA, Yaniv; KELLER, David A.; RÜHLE, Sven; ANDERSON, Assaf Y.; ZABAN, Arie. Four-point probe electrical resistivity scanning system for large area conductivity and activation energy mapping. *Review of Scientific Instruments*, v. 85, n. 5, p. 10-16, 2014. DOI: 10.1063/1.4873353.

TAKAHASHI, Yasufumi; MURAKAMI, Yumi; NAGAMINE, Kuniaki; SHIKU, Hitoshi; AOYAGI, Shigeo; YASUKAWA, Tomoyuki; KANZAKI, Makoto; MATSUE, Tomokazu. Topographic imaging of convoluted surface of live cells by scanning ion conductance microscopy in a standing approach mode. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 12, n. 34, p. 10012-10017, 2010. DOI: 10.1039/c002607g.

**UFRJ poderá fechar as portas após corte de verbas do governo federal, diz reitora da instituição.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/06/15/ufrj-podera-fechar-as-portas-apos-corte-de-verbas-do-governo-federal-diz-reitora.ghtml>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Sistema de Bibliotecas e Informação. *Manual para elaboração e normalização de trabalhos acadêmicos 2022.pdf*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1WwXcjugPpsWWS8Vo6UWltWHLi9l2l6R0/view>. Acesso em: 30 ago. 2022.

KR20160097965A. Remote controlled microscope system. Inventor: Keiji Kataoka. Depositante: Olympus Corporation. Data de publicação: 23 ago. 2016. Disponível em: <https://worldwide.espacenet.com>. Acesso em: 29 nov. 2024.

ZEINEH, Jack A. *System and method for remote navigation of a specimen*. Patente dos Estados Unidos, n. 7,916,916 B2, 29 mar. 2011. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US7916916B2>. Acesso em: 29 nov. 2024.

## 7 APÊNDICE A – PROJETOS E AUTOMAÇÕES

Ao longo da graduação, diversos projetos de automação foram desenvolvidos com o objetivo de aplicar os conhecimentos adquiridos e solucionar desafios práticos em áreas relacionadas à química e engenharia. Entre os principais equipamentos projetados e construídos como pode ser visto na figura 16 e figura 17, destacam-se:

1. **Reator para Eletrólises:** Sistema projetado para realizar eletrólises com monitoramento em tempo real da temperatura, integrado a uma funcionalidade de geração automática de gráficos, permitindo análises dinâmicas da variação de temperatura e tensão ao longo do tempo.
2. **Spin Coater para Filmes Finos:** Equipamento desenvolvido para a deposição uniforme de filmes finos, utilizado principalmente em aplicações de painéis solares e recobrimentos. Sua construção envolveu modelagem 3D e impressão de peças em PLA, além da integração de motores para controle de velocidade e precisão na aplicação dos filmes.
3. **Controlador de Rampas de Aquecimento:** Sistema automatizado para controle térmico, capaz de realizar até oito rampas de aquecimento distintas, com sensores de temperatura de alta precisão, abrangendo uma faixa de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este equipamento foi fundamental para experimentos que demandavam condições térmicas controladas e reproduzíveis.

Todos os projetos foram desenvolvidos com o uso de tecnologias como modelagem 3D (Fusion 360, SolidWorks, Blender e Tinkercad), impressão 3D de estruturas, e componentes eletrônicos programáveis, como Arduinos, ESP8266 e ESP32. Esses sistemas contribuíram significativamente para aprimorar as capacidades experimentais em laboratórios, destacando a integração entre engenharia e química aplicada.

**Figura 16 – Imagem das modelagens de todos os equipamentos desenvolvidos**



Fonte: elaboração própria.

A figura acima, apresenta as principais modelagens feitas durante o período da graduação, (a) Reator SparkGraphe e acessórios, (b) Automação do microscópio óptico, (c) Porta amostras sob medida, (d) Adaptador de lâmpadas LED e UV para microscópio, (e) Fonte externa para etiquetadora, (f) Coletor de amostras,(g) Placas personalizadas,(h) Medidor de ângulo de contato submerso V2,(i) Porta cubeta para RAMAN,(j) Adaptador de tubos de Quartzo para forno,(k) Spin Coater e acessórios,(l) Controlador de potência de motores,(m) Caixa abafadora acústica,(n) Tampas personalizadas,(o) Encaixe para vedação para vácuo,(p) Estante para tubo de ensaios sob medida,(q) Mini coluna para ensaios EOR,(r) Kit espátulas para alunos,(s) Escudo de segurança para o laser RAMAN no microscópio,(t) Estante para sensor RAMAN e seu Laser,(u) Medidor de ângulo de contato submerso V1,(v) Tampa para vedação de balões reacionais sob medida,(w) Placa com rampa de aquecimento Manta 193,(x) Indicador luminoso de condutividade elétrica.

**Figura 17 – Imagem dos equipamentos montados e funcionando**



Fonte: elaboração própria.

Alguns dos aparelhos que foram construídos, (a) Automatização do microscópio óptico, (b) Placa com rampa de aquecimento Manta 193, (c) Reator SparkGraphe e acessórios, (d) Spin Coater e acessórios, (e) Controlador de potência para motores, (f) Porta amostras personalizado, (g) Placas personalizadas, (h) Mini coluna para ensaios EOR, (i) Adaptador de tubos de Quartzo para forno, (j) Placa de aquecimento reparada e melhorada, (k) Estante coletadora de amostras, (l) Caixa abafadora acústica, (m) Estante motorizada para sensor RAMAN e seu Laser, (n) Porta

lâmpadas para microscópio,(o) Adaptador para laser RAMAN no microscópio,(p) Fonte para etiquetadora.