

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Bruno Murakami

**Desenvolvimento de um Tomógrafo de Luz
Visível Controlado por um Microcomputador
para Uso Didático**

São Bernardo do Campo - SP

2024

Bruno Murakami

**Desenvolvimento de um Tomógrafo de Luz Visível
Controlado por um Microcomputador para Uso
Didático**

Trabalho de Graduação III em Engenharia
Biomédica realizado na Universidade Federal
do ABC.

Orientador: Prof. Dr. John Andrew Sims

São Bernardo do Campo - SP
2024



CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
TRABALHO DE GRADUAÇÃO III

São Bernardo do Campo, 12 de setembro de 2024.

Para: Coordenador do Trabalho de Graduação da Engenharia Biomédica.

2º. Quadrimestre de 2024

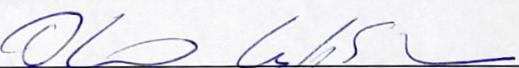
Atribuição de conceito (com banca examinadora, TG III)

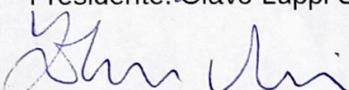
Nome do(a) Orientador(a)	John Andrew Sims
Nome do(a) Aluno(a)	Bruno Murakami
R.A.	11077515
Título do Trabalho	Desenvolvimento de um Tomógrafo de Luz Visível para uso Didático, Teórico e Prático Controlado por um Microcomputador

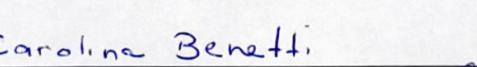
A banca composta pelos membros que subscrevem este documento decidiu atribuir o conceito A ao referido aluno, tendo assim, o mesmo, preenchido os requisitos referentes ao Trabalho de Graduação.

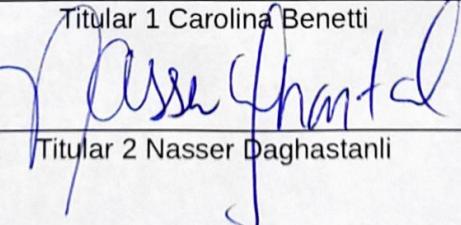
Este conceito será considerado para TGIII somente após a entrega da Versão Final Corrigida à Coordenação de Trabalho de Graduação da Engenharia Biomédica.

A banca foi composta pelos membros:


Presidente: Olavo Luppi Silva


Orientador(a) John Andrew Sims


Titular 1 Carolina Benetti


Titular 2 Nasser Daghistanli

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida, as coisas boas e ruins que sempre se transformam em aprendizados. Agradeço meus pais, Teiji e Silvia, por terem formado a pessoa que sou hoje; ao meu irmão, Julio, por ser um exemplo de persistência e constância; à minha parceira Lena, por querer compartilhar os momentos bons e ruins comigo; aos meus familiares e amigos, por estarem sempre comigo apoiando nos momentos felizes e mais difíceis.

Gostaria de agradecer à meu professor orientador, John, pelo apoio, orientações e toda ajuda nesta etapa de finalização da graduação. Também a minha dupla de trabalho, Isabella, por todas dificuldades e risadas compartilhadas durante a realização do projeto. Deixo meus agradecimentos também ao professor Olavo Luppi Silva, por ceder o espaço em seu laboratório para realização dos estudos e experimentos para que esse trabalho fosse realizado.

“Insanidade é fazer a mesma coisa várias vezes e esperar resultados diferentes”

- Albert Einstein

Resumo

A tomografia é uma técnica de diagnóstico por imagem que pode ser utilizada para visualizar as estruturas internas do corpo humano ou de outros objetos, utilizando radiação ionizante. Ensinar essa modalidade para os estudantes pode ser desafiador. Para resolver esse problema, foi desenvolvido um protótipo educacional para demonstrar a aquisição de múltiplas projeções de um fantoma de teste, utilizando luz no espectro visível, seguido de reconstrução tomográfica. No entanto, verificou-se que as aquisições eram difíceis de realizar, exigindo duas pessoas, demoravam muito tempo e o mesmo resultado seria difícil de reproduzir. Este trabalho de conclusão de curso apresenta um projeto com o objetivo de melhorar a reproduzibilidade e facilitar a realização do experimento. A implementação foi realizada em um microcomputador Raspberry Pi 3, utilizando a linguagem de programação Python para controlar um motor de passo de 12V para a rotação controlada de um objeto, e o módulo Picamera para capturar imagens sequenciais da sombra projetada em uma tela. Foi possível verificar que as modificações facilitaram a geração de dados, permitindo a visualização experimental da técnica de reconstrução tomográfica.

Abstract

Tomography is a diagnostic imaging technique that can be used to visualize the internal structures of the human body or other objects using ionizing radiation. Teaching this modality to students can be challenging. To solve this problem, an educational prototype for demonstrating the acquisition of multiple projections of a test phantom using light in the visible spectrum followed by tomographic reconstruction was developed. However, the acquisitions were found to be difficult to perform, requiring two people, took a long time, and the same result would be difficult to reproduce. This undergraduate final term paper presents a project with the objective of improving reproducibility and the facilitation of conducting the experiment. The implementation was carried out on a Raspberry Pi 3 microcomputer, using the Python programming language to control a 12V stepper motor for controlled rotation of an object, and the Picamera module for capturing sequential images of the shadow, projected on a screen. It was possible to verify that the modifications facilitated data generation, allowing the experimental visualization of the tomographic reconstruction technique.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema de atenuação de feixe de raios X. Fonte: Autor	21
Figura 2 – Gerações de Tomografia Computadorizada. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)	22
Figura 3 – Esquema de aquisição de imagem. (a) e (c) Perfil de absorção a 0º e 90º, respectivamente. (b) e (d) Projeção do Sinal 1-D adquirido. (e) Reconstrução da imagem usando dois ângulos para uma fonte de luz paralela. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)	23
Figura 4 – Esquema de Retroprojeção. (a) Imagem Original. (b) a (e) Reconstrução usando 1, 2, 3, e 4 projeções com distância de 45°. (f) Reconstrução com 32 projeções. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)	24
Figura 5 – Motores de passo de 4, 5, 6 e 8 terminais. Fonte: Timothy G Constantinou (2005).	26
Figura 6 – Distorções em barril e almofada de alfinetes. Fonte: < https://www.learningwithexperts.com/photography/blog/look-out-for-lens-distortion >	26
Figura 7 – Distorções do projeto. Fonte: Autor	27
Figura 8 – Fluxograma do Projeto. Fonte: Autor	28
Figura 9 – Esquema de disposição dos componentes para aquisição de imagem. Fonte: I. K. F. Stein and B. Murakami and J. A. Sims, 2024	29
Figura 10 – Foto da montagem do protótipo. Fonte: Autor	30
Figura 11 – Esquema do Circuito Integrado DRV8825. Fonte: < https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf >	30
Figura 12 – Esquema eletrônico do motor de passo. Fonte: Autor	32
Figura 13 – Montagem do Motor de Passo. Fonte: Autor	33
Figura 14 – Fluxograma do código de aquisição de imagens. Fonte: Autor	34
Figura 15 – Fluxograma de processamento de imagens. (1) Recorte de imagem original. (2) Imagem recortada. (3) Empilhamento das imagens recortadas. (4) Laço para reconstrução dos segmentos a partir da linha n das imagens empilhadas em (3). (5) Empilhamento dos segmentos para formação do volume 3D. Fonte: Autor	35
Figura 16 – Comparação de fotos capturadas após 50 revoluções. Fonte: Autor . .	39
Figura 17 – Subtração entre duas imagens. Fonte: Autor	40
Figura 18 – Velocidades (RPM) para diferentes intervalos entre cada passo. Fonte: Autor	41
Figura 19 – Aquisição da projeção do objeto entre rotações de 9.0º. Fonte: Autor .	42
Figura 20 – Reconstrução dos dados no plano transverso. Fonte: Autor	43

Figura 21 – Comparaço de Reconstruções, Slice 100. Fonte: Autor 44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Modos de Passo do DRV8825. Fonte: < https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf >	31
Tabela 2 – Tabela de custos do projeto	37

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivos Gerais	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Tomografia Computadorizada	21
3.2	Reconstrução Tomográfica	23
3.3	Tipos de Computadores	24
3.4	Modelos Didáticos	25
3.5	Motor de Passo	25
3.6	Artefatos de Captura	26
4	METODOLOGIA	28
4.1	Montagem do Protótipo	28
4.1.1	Circuito Integrado DRV8825	30
4.1.2	Módulo PiCamera v1.3	31
4.1.3	Círculo Eletrônico	32
4.1.4	Montagem do Motor de Passo	33
4.1.5	Verificação de Parâmetros do Motor de Passo	33
4.1.6	Aquisição de Imagens	34
4.2	Reconstrução Computacional	35
5	CUSTOS DO PROJETO	37
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1	Escolha dos Componentes do Projeto	38
6.2	Verificações de Especificações do Motor de Passo	39
6.3	Aquisições das Imagens	41
6.4	Reconstruções	42
6.5	Melhorias Sugeridas e Próximos Passos	44
6.6	Proposta de Experimento	44
6.6.1	Objetivo Proposto	45
6.6.2	Metodologia	45
6.6.3	Passo 1: Seleção e Preparação do Objeto	45
6.6.4	Passo 2: Fixação do Objeto	45

6.6.5	Passo 3: Aquisição das Projeções	45
6.6.6	Passo 4: Reconstrução do Objeto 3D	46
6.6.7	Passo 5: Visualização e Análise dos Resultados	46
6.6.8	Passo 6: Reflexão e Comparaçāo	46
7	CONCLUSĀES	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A descoberta dos chamados Raios X, no final do século XIX, pelo físico alemão Röntgen (1), revolucionou a medicina de sua época, possibilitando a visualização anatomica do corpo humano, sem a necessidade de procedimentos invasivos no corpo. Em 1917, o físico austríaco Johann Radon (2) propôs um método matemático para reconstruir imagens tridimensionais a partir de projeções bidimensionais, mas a tecnologia da época não permitia a aplicação prática desse método. Somente na década de sessenta com as contribuições matemáticas do físico e matemático sul-africano Allan Cormack, Godfrey Hounsfield, um engenheiro elétrico britânico, e o Dr James Ambrose, idealizaram o acoplamento de um computador a cristais sensíveis à radiação sendo assim responsáveis pelo desenvolvimento da tomografia axial computadorizada (TAC), que permitiu a obtenção de imagens tomográficas tridimensionais de alta resolução e teve um impacto significativo na medicina diagnóstica (2)(3). Hounsfield e Cormack receberam o Prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina em 1979 por sua invenção da Tomografia Computadorizada. A tomografia consiste em uma técnica para diagnóstico por imagem em cortes que possibilita a visualização de estruturas internas do corpo humano ou de outros objetos através do uso de radiação ionizante (no contexto médico) ou não ionizante (para usos em outros contextos) (3)(4). A reconstrução tomográfica é um processo que utiliza dados obtidos a partir de medições em diferentes ângulos para criar uma imagem tridimensional de um objeto ou região de interesse. A técnica é amplamente utilizada em áreas como medicina, engenharia, física e geologia, entre outras(4).

Trabalhos anteriores realizaram uma pesquisa onde foi verificado que o uso de um dispositivo prático aprimoraria o ensino de modalidades diagnósticas, como tomografia computadorizada ou ressonância magnética, visto a falta de proximidade aos equipamentos (5). Ainda de acordo com esse trabalho, essa abordagem facilitaria tanto no ensino quanto no aprendizado no estudo de física médica, que faz parte do escopo de graduação de engenharia biomédica na Universidade Federal do ABC.

Dando continuidade ao trabalho de pesquisa para fins didáticos, onde foi desenvolvido um protótipo em caixa de papelão e outros materiais acessíveis para aquisição de fotos da projeção da sombra de um objeto em um anteparo opaco, de 0° a 180° de rotação deste objeto. Além disso, foi desenvolvido um processamento em python para a formação de um volume 3D, simulando a reconstrução tomográfica. O trabalho mostrou que é possível adquirir e reconstruir um objeto simples, no entanto a reproduzibilidade do experimento é comprometida devido a algumas dificuldades:

- Existem artefatos gerados pela rotação manual do objeto
- É difícil percorrer manualmente os ângulos, pois a câmera deve ser usada para adquirir as fotos ao mesmo tempo que o objeto é girado em diferentes ângulos

- Outros artefatos foram encontrados no objeto reconstruído, que têm como fontes a iluminação do holofote e a distorção das fotos adquiridas.

Tendo como base um artigo onde foi desenvolvida um aparato de reconstrução tomográfica de pequeno porte, utilizando uma fonte de luz LED, uma webcam e um sistema embarcado Raspberry Pi (6), este trabalho propõe a automatização do processo de aquisição de imagens, com o módulo de captura do Raspberry Pi, e rotação do objeto, utilizando motor de passo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho de graduação tem como objetivo aprimorar o processo de aquisição de imagens do protótipo didático desenvolvido pelo grupo de pesquisa com fins didáticos citado na introdução com intuito de melhorar a reproduzibilidade do experimento e consequentemente sua reconstrução.

2.2 Objetivos Específicos

Para que seja possível alcançar os resultados esperados, os objetivos específicos deste trabalho são:

- montar aparato eletrônico que permitirá a rotação controlada da amostra a ser analisada, utilizando motor de passo;
- integrar a rotação controlada da amostra e captura das imagens em um fluxograma em cascata;
- implementar técnicas de reconstrução tomográfica em python para reconstrução do objeto;
- analisar erros associados a reconstrução;
- analisar a reproduzibilidade do experimento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tomografia Computadorizada

A TC se trata de umas das técnicas grandemente utilizadas na medicina diagnóstica para avaliação morfológica do corpo. Se baseando na sobreposição da imagens geradas por radiação ionizante, a técnica permite a visualização mais detalhada de estruturas internas do corpo se comparado a radiografia convencial. O uso da TC se tornou a modalidade de diagnóstico de imagem padrão para avaliação de trauma, permitindo ao médico realizar a posteriori a reconstrução tridimensional das imagens para o planejamento de intervenções cirúrgicas, avaliando as imagens de diferentes ângulos de projeção(7) .

A evolução da tecnologia permitiu diferentes gerações da tomografia computadorizada (7), utilizando diferentes técnicas de disparo de feixe, como por exemplo a aquisição paralela e a helicoidal. Cada técnica desenvolvida também permitiu a evolução de estudos relacionados com problemas inversos de engenharia, ou seja, quando desejamos compreender a determinar a causa de um fenômeno particular (solução do problema), observando-se o efeito por ele produzido (dados) (8).

Descoberto por Wilhelm Conrad Rontgen em 1895, os raios x tem usos em diversas áreas de tecnologia, sendo fundamental na área da saúde para modalidades como a Tomografia computadorizada, radiografia, arco Cirúrgico e Fluoroscopia. Em interação com o corpo humano, os raios x são atenuados de formas diferentes de acordo com o material, justificando seu para a diagnose do corpo humano. Ossos, por exemplo, atenuam eficientemente os raios x em comparação com tecido mole devido a presença elementos pesados como o cálcio (9). A figura 1 esquematiza a atenuação de feixes de raios x. Essa atenuação segue a seguinte expressão:

$$I = I_0 e^{-\mu x} , \text{ onde:}$$

- I é a intensidade do feixe após a passagem de um meio de espessura x ;
- I_0 é a intensidade inicial do feixe;
- μ é o coeficiente de atenuação lineardo meio
- e é a base dos logaritmos neperianos

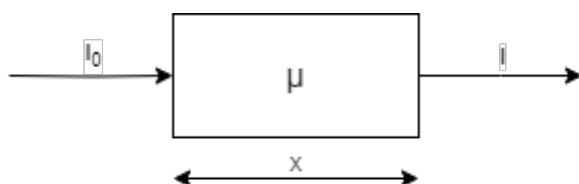


Figura 1 – Esquema de atenuação de feixe de raios X. Fonte: Autor

A geração de imagens associadas ao uso de radiação ionizante tem como base a atenuação variada de acordo com a interação de diferentes tecidos.

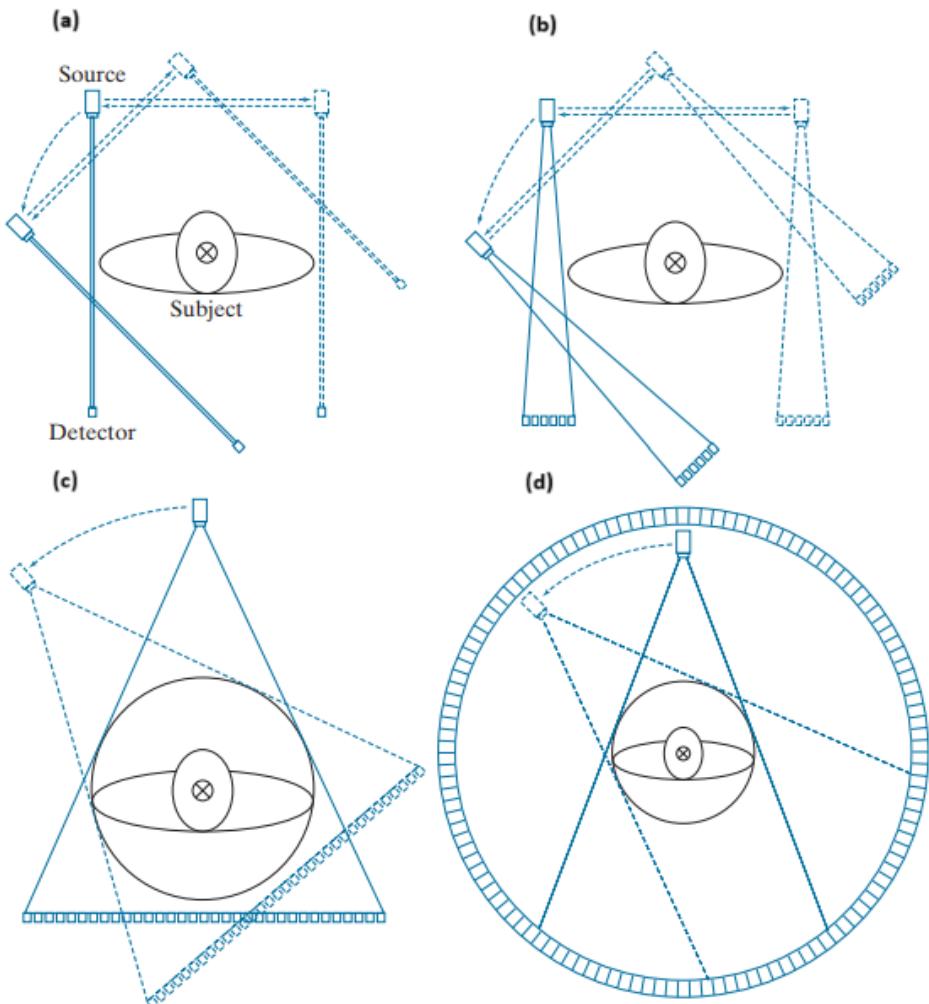


Figura 2 – Gerações de Tomografia Computadorizada. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)

A figura 2 representa as gerações dos equipamentos de tomografia computadorizada ao longo do tempo. Enquanto na primeira e segunda geração era empregado a translação do detector (representado por (a) e (b)), a partir da terceira geração da TC, a translação foi substituída pelo aumento no número de sensores, diminuindo-se a velocidade do exame (10).

A 1^a geração de TC realizava a emissão de feixe paralelo, transladando o emissor e o sensor. A partir da 2^a geração de TC (b), o emissor de feixe de raios x começou a ter geometria de leque, ainda realizando-se a translação do emissor de feixe e do sensor. Na 3^a geração (c), a geometria do feixe evoluiu para leque largo, não necessitando mais o movimento de translação. A partir da 4^a geração (d), vários sensores já eram dispostos, realizando-se apenas a rotação do emissor de feixe.

3.2 Reconstrução Tomográfica

A partir do avanço tecnológico de processamento de dados com computadores mais potentes, foi possível o desenvolvimento das técnicas de reconstrução tomográfica. Os algoritmos de reconstrução utilizadas para fins didáticos se baseiam em feixes paralelos por se tratar de processamentos digitais mais simplificados. A literatura descreve uma forma de reconstruir fontes de feixes em leque para projeções paralelas com o objetivo de minimizar os erros associados a emissão dos feixes com essa geometria (10).

A figura 3 representa a aquisição de uma amostra que poderia ser um tecido qualquer como de um órgão ou um osso. Devido a diferente constituição química do tecido, há a diferenciação nos tons de cinza da imagem gerada. Em (a) e (c), são representados capturas de feixes paralelos de raios x colimados em sensores individuais para cada feixe, sendo o primeiro na horizontal para a direita e o segundo na vertical para cima. Em (b) e (d) verifica-se a projeção do sinal 1D em um plano 2D virtual. Em (e) verifica-se a reconstrução da imagem através da sobreposição dos dados, utilizando-se as duas projeções adquiridas anteriormente em (b) e (d).

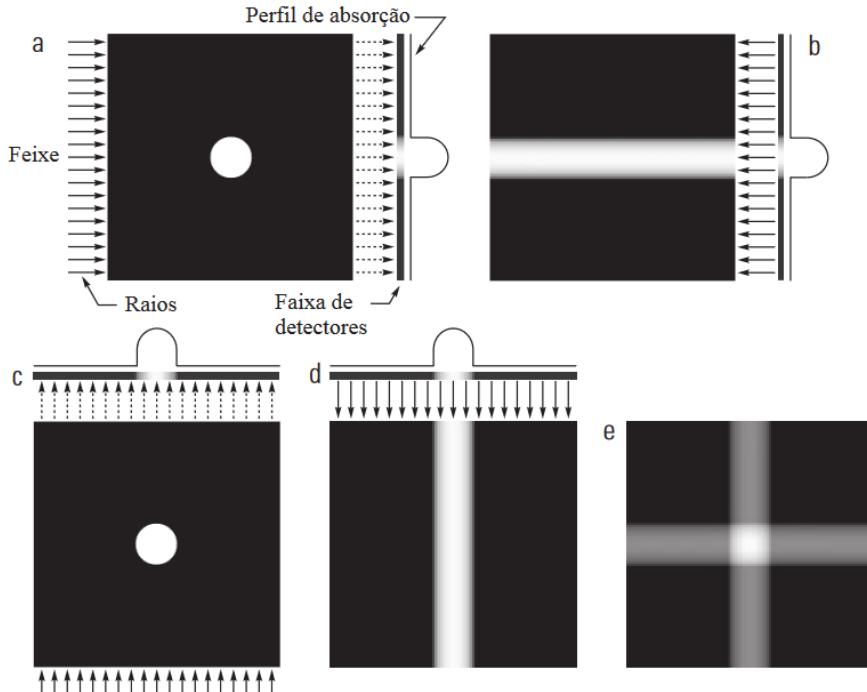


Figura 3 – Esquema de aquisição de imagem. (a) e (c) Perfil de absorção a 0° e 90° , respectivamente. (b) e (d) Projeção do Sinal 1-D adquirido. (e) Reconstrução da imagem usando dois ângulos para uma fonte de luz paralela. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)

É possível verificar o conceito de retroprojeção na figura 4 que de maneira simplificada, forma a base para reconstruções tomográficas. Verifica-se que a projeção do sinal 1-D adquirido, a partir de diferentes ângulos, reconstrói a imagem original quanto mais ângulos

são sobrepostos. Isto se configura a transformada Inversa de Radon para 2-D. No caso da TC, teríamos a reconstrução das imagens transversais da amostra, slice a slice, e o empilhamento de tais reconstruções formariam a imagem em 3-D (10).

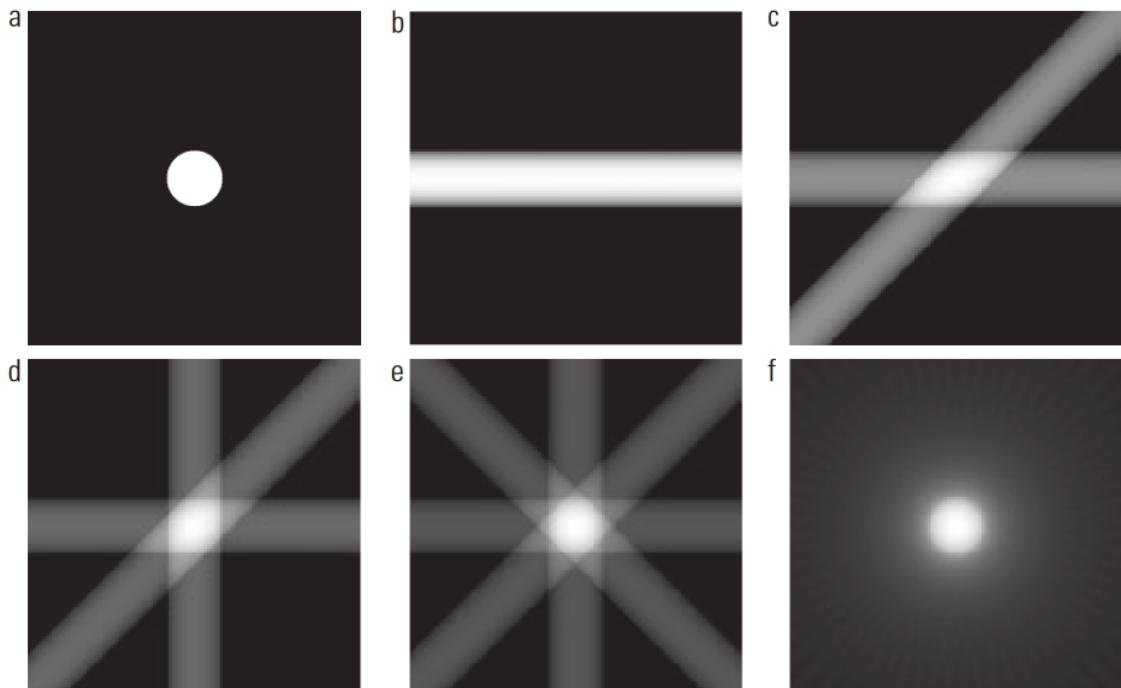


Figura 4 – Esquema de Retroprojeção. (a) Imagem Original. (b) a (e) Reconstrução usando 1, 2, 3, e 4 projeções com distância de 45°. (f) Reconstrução com 32 projeções. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)

3.3 Tipos de Computadores

O avanço tecnológico e principalmente a produção em massa e disponibilidade de computadores para uso civil foi um grande passo para a digitalização de grandes setores econômicos, entre eles, a área da saúde. Em 1972, se iniciou onde hoje é conhecido como Silicon Valley a fabricação de pequenos circuitos digitais integrados ("chip") (11). Antes disso, os únicos computadores presentes nas empresas de médio-grande porte se tratavam de máquinas gigantescas que ocupavam salas inteiras, utilizadas de forma restrita para cálculos específicos para cada máquina.

Os diferentes tipos de computadores devem ser avaliados de acordo com a sua aplicação. Eles podem ser divididos como microcomputadores, minicomputadores ou computadores mainframe. Microcomputadores se tratam dos utilizados no dia-a-dia, como computadores pessoais, raspberry pi ou sistemas embarcados controlados por processadores. A nomenclatura minicomputador designa os antecessores às estações de trabalho (workstation). Computadores mainframe são os grandes servidores que permitem vários acessos simultâneos e possuem grande capacidade de processamento de dados. Apesar

dessa diferenciação, com a alta disponibilidade de diferentes fornecedores e especificações diferentes, os termos microcomputadores e minicomputadores estão cada vez mais difíceis de se definir.

3.4 Modelos Didáticos

A proposta do uso de modelos didáticos alternativos para o ensino possibilita ao aluno o contato direto com conceitos que são normalmente apresentados apenas de forma auditiva ou através de simulações, possibilitando e incentivando a curiosidade e o desenvolvimento do pensamento científico.

Diversas estudos e aplicações realizados elencam os benefícios do uso de modelos didáticos, entre eles aprofundar a compreensão dos conteúdos estudados, incentivar e desenvolver a aprendizagem de trabalho em equipe, propiciar uma aproximação com a atuação do aluno no processo de abordagem e solução de um problema, além de possibilitar a integração entre diferentes disciplinas(12).

O Design thinking “é um modelo de pensamento que coloca as pessoas no centro da solução de um problema”(13). Tal metodologia muitas vezes associadas aos movimentos Hands-on e Do it Yourself (DIY) se mostram muito eficientes no aprendizado ativo do aluno. Nesta linha de pensamento estudos mostram como a prototipagem pode ser efetiva na abordagem de tecnologias normalmente não acessíveis ao público(6).

3.5 Motor de Passo

Motores de passo são motores elétricos consolidados no mercado capazes de alto controle espacial de sua rotação e alto torque. Seu intuito é ser uma solução economicamente viável, com controle intuitivo de sua rotação, tornando-os ideias para aplicações de soluções embarcadas (14).

Motores de passo podem ser classificados principalmente em dois tipos: Motores unipolares e Bipolares. Eles se diferem a partir de sua topologia, a construção do motor e o padrão de passo.

Seu funcionamento se baseia no acionamento cadenciado de polos alternados positivos e negativos. Maior resolução em sua rotação angular está diretamente ligado ao número de pólos presentes no motor.

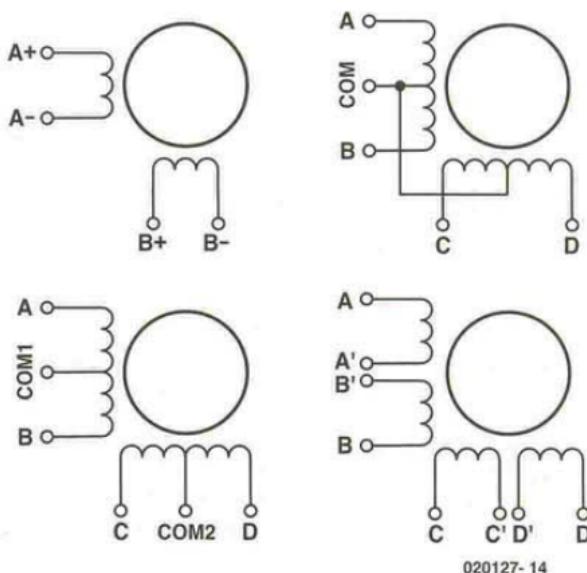


Figura 5 – Motores de passo de 4, 5, 6 e 8 terminais. Fonte: Timothy G Constandinou (2005).

De acordo com a figura 5, verifica-se modelos diferentes de motor de passo, podendo apresentar 4, 5, 6 ou 8 terminais. Além disso, a tensão, resistência e ângulo de passo são parâmetros importantes ao se escolher o modelo do motor para cada aplicação. Tensão e resistência estão relacionados ao torque, consumo de corrente e velocidade máxima de operação(14).

3.6 Artefatos de Captura

A aquisição das imagens para o projeto se assemelha ao processo usado por uma TC de 3^a geração, onde a fonte de radiação é em leque largo. As imagens capturadas podem sofrer algumas distorções devido a lente das câmeras conforme a figura 6.

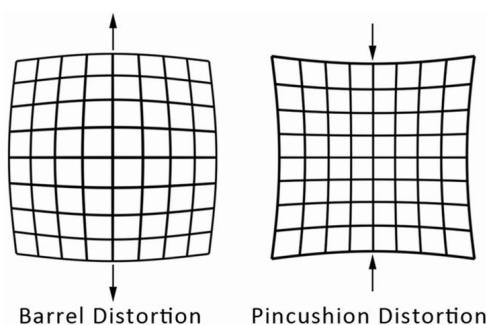


Figura 6 – Distorções em barril e almofada de alfinetes. Fonte: <<https://www.learningwithexperts.com/photography/blog/look-out-for-lens-distortion>>

No projeto, a fonte de luz se assemelha a um formato de cone, onde haveria uma distorção na formação da imagem horizontal e verticalmente, conforme a imagem 7 vista

da maquete do projeto.

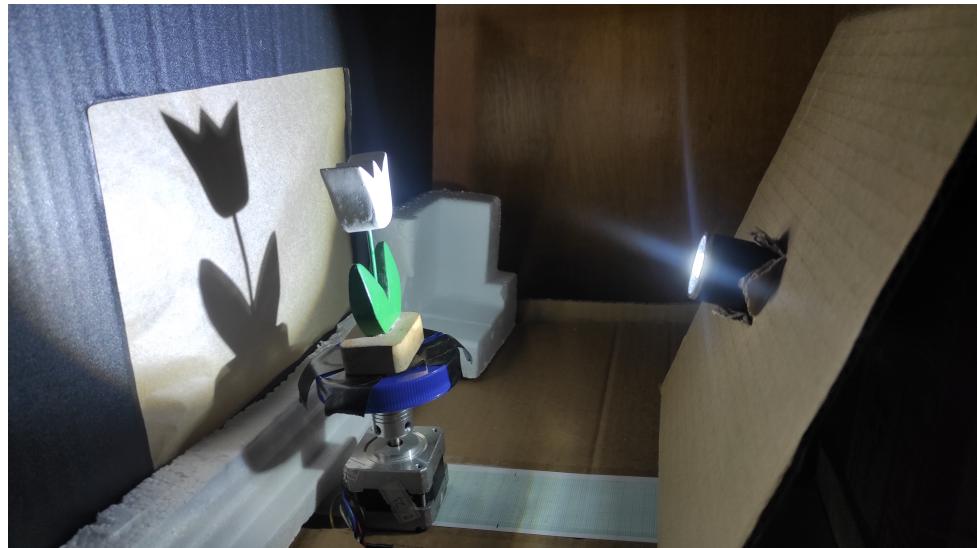


Figura 7 – Distorções do projeto. Fonte: Autor

4 METODOLOGIA

O projeto foi realizado em duas etapas, onde a primeira se tratou da aquisição das imagens e a segunda o processamento das imagens.

O software foi desenvolvido para capturar imagens de uma amostra rotacionada sobre si mesma de acordo com a quantidade de n capturas solicitadas para a formação de um sinograma. A etapa de processamento da imagem realiza a organização dos dados, a geração do segmento a partir da transformada inversa de Radon e o empilhamento dos cortes gerados.

A figura 8 esquematiza generalizadamente o funcionamento do projeto, iniciando-se pela aquisição das fotos pelo Raspberry Pi, o processamento dos dados e a formação da imagem tridimensional.

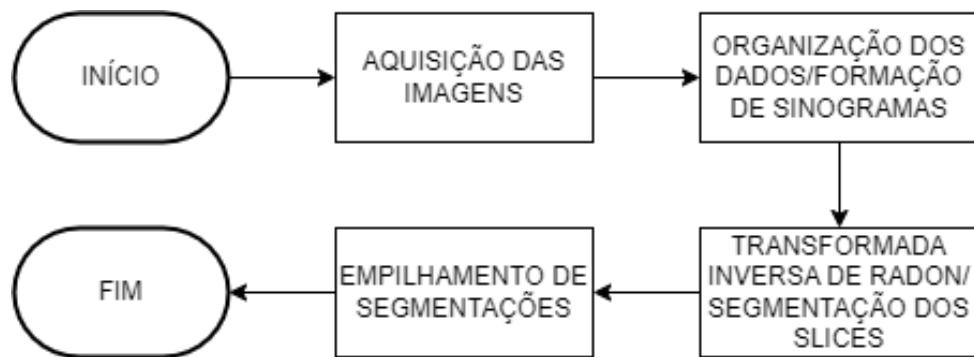


Figura 8 – Fluxograma do Projeto. Fonte: Autor

4.1 Montagem do Protótipo

Em um primeiro momento foi montado um aparato experimental com os componentes da maquete do projeto, junto aos componentes eletrônicos para permitir a automação da aquisição de imagem. Conforme a figura 9, verifica-se a disposição dos itens para realização da captura.

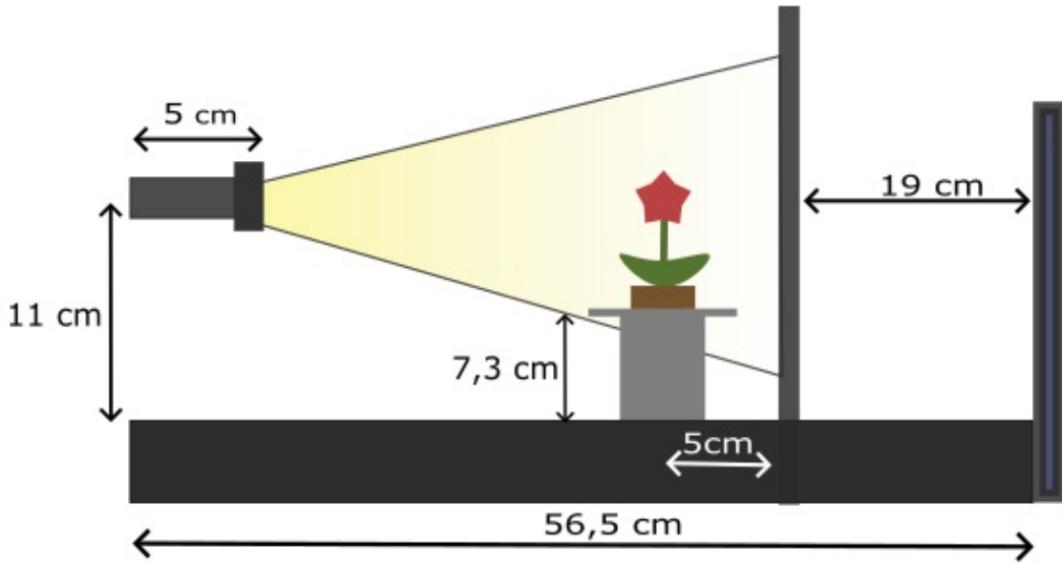


Figura 9 – Esquema de disposição dos componentes para aquisição de imagem. Fonte: I. K. F. Stein and B. Murakami and J. A. Sims, 2024

O hardware do aparato comportou os dispositivos eletrônicos, o motor de passo, o acoplamento, a plataforma da amostra, a superfície opaca para projeção da amostra, a fonte de luz e o próprio Raspberry Pi. Estes componentes são controlados através do sistema embarcado, utilizando a linguagem python para acionamento das portas de entrada e saída (GPIO).

Com o intuito de minimizar artefatos na captura das imagens, foi necessário o cuidado com a disposição dos componentes do aparato. A proximidade da fonte de luz, o alinhamento entre a câmera e a amostra, as vibrações geradas pelo motor de passo são fontes possíveis de artefatos que devem ser minimizadas durante a captura das imagens.

Tendo todos itens devidamente acoplados à base do protótipo, os componentes foram dispostos a fim de possibilitar a captura da sombra projetada da amostra sobre a superfície opaca. Conforme a figura 10, a sombra do objeto formado sobre o anteparo serve como base para a formação do sinograma. Desta forma, a fonte luminosa de LED está disposta apontada para a amostra, alinhada a frente da superfície opaca. Ao outro lado da superfície, o Módulo Picamera v1.3 realiza a captura das imagens.

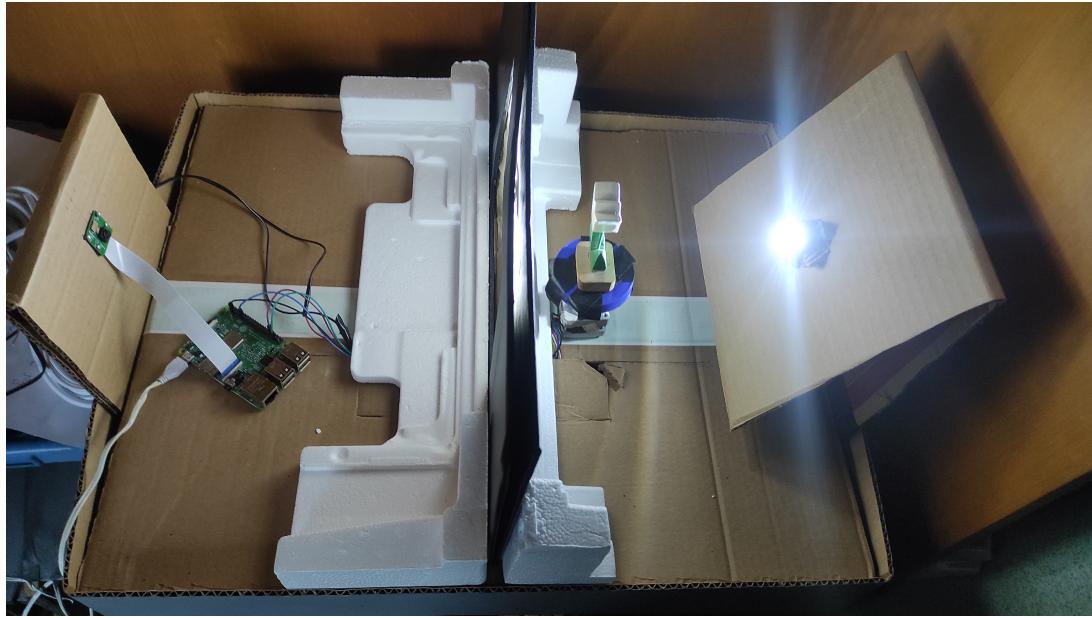


Figura 10 – Foto da montagem do protótipo. Fonte: Autor

4.1.1 Circuito Integrado DRV8825

O circuito integrado DRV8825 se trata de um driver muito utilizado no mercado, principalmente para o controle de motores de passo. As entradas de alimentação do controle de passo são amigáveis tanto para sistemas que fornecem 3,3V (como o raspberrypi) quanto os que fornecem 5v (por exemplo a linha arduino). Os motores de passo controlados pelo DRV8825 podem ter uma alimentação de até 45V e 2,2A, o que torna a reutilização do circuito muito fácil para próximas aplicações, além de seu baixo custo. A figura 11 esquematiza as entradas e saídas do circuito integrado DRV8825 (15).

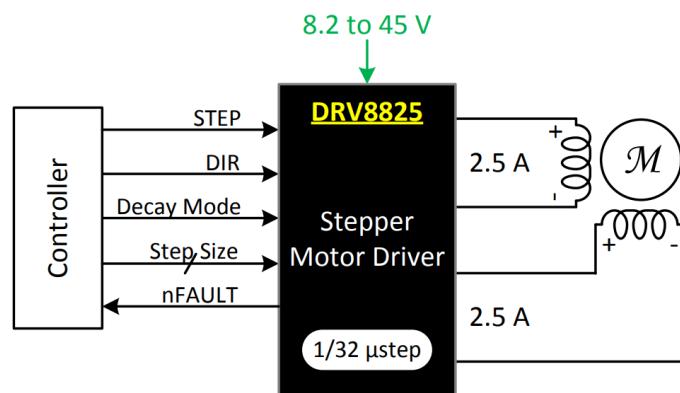


Figura 11 – Esquema do Circuito Integrado DRV8825. Fonte: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>>

O CI realiza a alternância de acionamento interno do motor de passo, o que permite que o rotor rode a ângulos definidos de acordo com a resolução do motor. O controle de

cada passo é feito pela entrada 'STEP' que alterna a polaridade das saídas '1A', '1B', '2A' e '2B' a fim de realizar a rotação controlada do motor. A entrada 'DIR' define o sentido de rotação do motor e assim de alternância das saídas conforme explicado anteriormente.

É possível também aumentar a resolução de cada motor de passo através de um artifício chamado de Microstepping. No CI DRV8825, o microstepping é configurado a partir de entradas, onde seu acionamento pode ser definido a partir de acordo com a tabela 1 abaixo. Desta forma, se torna possível através do CI realizar frações de rotações do motor de passo, realizando até a $\frac{1}{32}$ de rotação de um step.

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps/step
1	0	0	16 microsteps/step
1	0	1	32 microsteps/step
1	1	0	32 microsteps/step
1	1	1	32 microsteps/step

Tabela 1 – Modos de Passo do DRV8825. Fonte: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>>

4.1.2 Módulo PiCamera v1.3

O módulo PiCamera V1.3 é um acessório popular para a placa Raspberry Pi, projetado para capturar imagens e vídeos de alta qualidade. Este módulo usa um sensor de imagem OmniVision OV5647, que oferece uma resolução de 5 megapixels, permitindo a captura de imagens de 2592 x 1944 pixels. A câmera é compacta e leve, com dimensões de cerca de 25 x 24 x 9 mm e um peso de apenas 3 gramas. A conexão com a placa Raspberry Pi é realizada por um conector de fita de 15 pinos, permitindo uma integração direta e simples (16).

Os módulos PiCamera também são suportados por bibliotecas de software, como a biblioteca picamera2 em Python (17), o que torna o desenvolvimento de aplicações ainda mais acessível. A biblioteca permite que iniciantes aprendam conceitos de programação e eletrônica de forma prática, desenvolvendo projetos criativos e interativos. Isso estimula a curiosidade e o aprendizado em áreas como ciência da computação, robótica e mecatrônica.

Além disso, suas ferramentas permitem que sejam exploradas funcionalidades como análise e processamento de imagens. Assim, a biblioteca é uma excelente ferramenta no processo de ensino e educação, incentivando a experimentação em ambientes acadêmicos.

4.1.3 Circuito Eletrônico

A figura 12 esquematiza a montagem do circuito referente ao acionamento do motor de passo. Foi utilizado o circuito integrado DRV8825, por ser um driver consolidado no mercado e seu baixo custo. Vale ressaltar que para esta aplicação, não foi implementado as entradas de microstepping, referentes as portas "MS1", "MS2"e "MS3, mas que poderia ser utilizado para diminuição das vibrações do motor ou para aquisição de uma rotação com maior resolução (alcançando teoricamente até 6400 passos por revolução, sem considerar as limitações do motor).

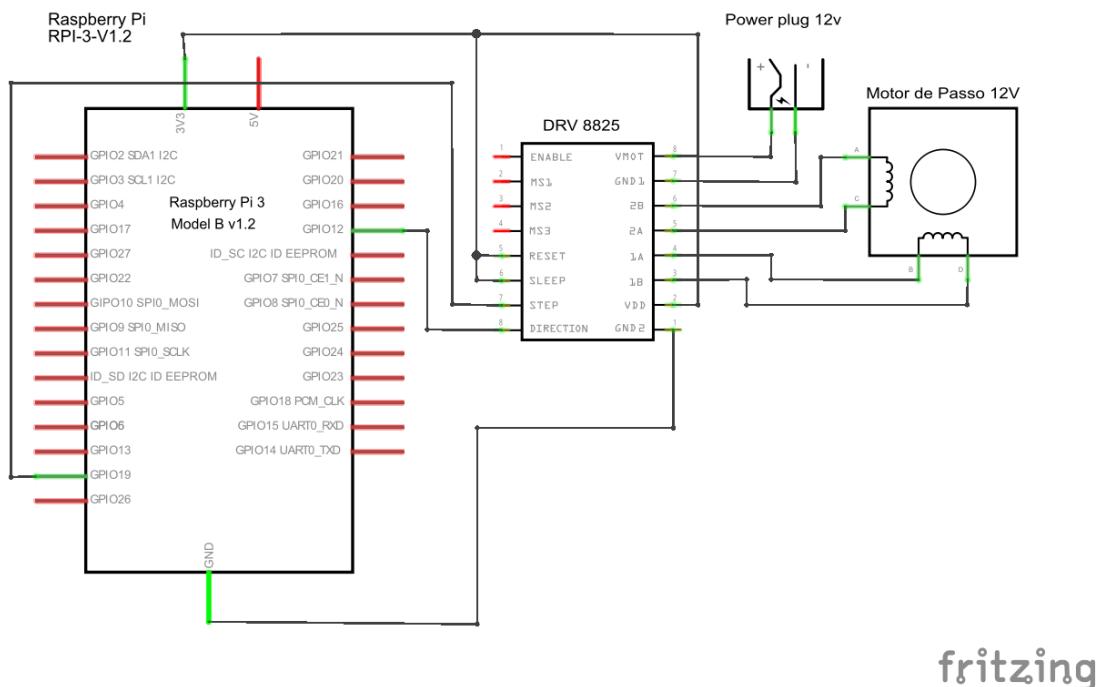


Figura 12 – Esquema eletrônico do motor de passo. Fonte: Autor

A alimentação do CI DRV8825 foi realizada a partir das saídas fornecidas pelos recursos do Raspberry Pi 3, no caso as portas de saída de 3,3 v. Foram também usadas as portas de saída GPIO19 para o controle do passo, na entrada "STEP", e a saída GPIO12 para o controle da direção de rotação do motor, na entrada "DIRECTION".

A alimentação do CI e a alimentação do motor de passo são distintos. Apesar de serem realizadas no mesmo driver, formam circuitos separados e são alimentados separadamente. A alimentação do motor de passo é realizado pelas entradas "VMOT"e "GND1"onde uma fonte de alimentação de 12v é conectada.

Os fios onde devem ser alimentados as bobinas do motor de passo são conectados nas saídas "1A", "1B", "2A"e "2B"do CI DRV8825, onde a partir do acionamento de cada passo, o motor realiza o acionamento sequenciado de cada bobina.

4.1.4 Montagem do Motor de Passo

Para a montagem do motor de passo, foi utilizado um acoplamento visível na figura 13, onde foi necessário para acoplar a plataforma ao motor. Para prender o motor à caixa de papelão, a plataforma ao acoplamento e ao objeto, foi utilizado fita isolante adesiva. Apenas o seu uso foi suficiente para evitar que houvesse vibrações tanto do objeto quanto do próprio motor.

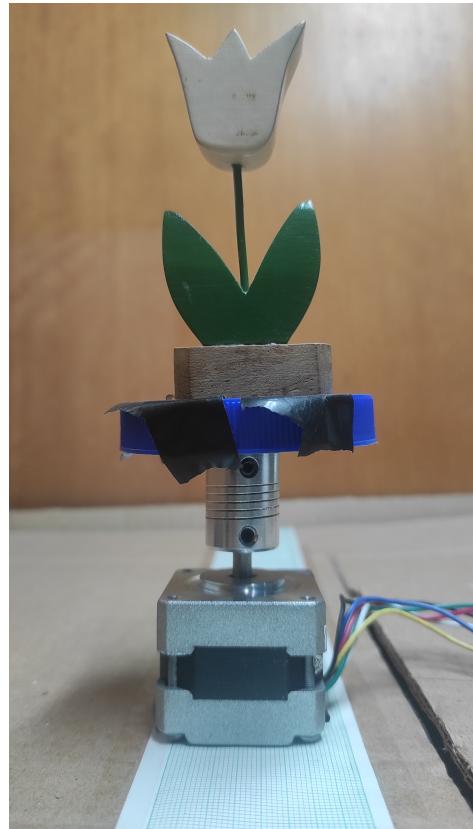


Figura 13 – Montagem do Motor de Passo. Fonte: Autor

4.1.5 Verificação de Parâmetros do Motor de Passo

De acordo com as especificações do motor, o ângulo de passo corresponde a $1,8^\circ$ de rotação. Ou seja, o acionamento de 200 passos levaria a uma revolução ou 360° de rotação.

A resolução de um motor de passo refere-se ao número total de passos que ele pode executar em uma rotação completa. Esse parâmetro é crucial para aplicações que exigem controle de posição exato, pois define a quantidade de incrementos disponíveis para o movimento. A resolução é inversamente proporcional ao ângulo de passo conforme a fórmula:

$$R = \frac{360^\circ}{\theta_s}$$

Onde:

- R é a resolução (número de passos por rotação).
- θ_s é o ângulo de passo em graus.

Para verificação da resolução do motor, foram realizados testes onde o motor foi rotacionado por 20, 50 e 100 revoluções, onde foi verificado a posição do objeto antes e após as revoluções. Além disso, foi calculado a velocidade média em rotações por minuto (RPM), seguindo o seguinte cálculo:

$$RPM = \frac{\text{Revoluções}}{\text{Tempo em Minutos}}$$

4.1.6 Aquisição de Imagens

A figura 14 esquematiza o funcionamento do código do controle do processo de aquisição das imagens que foi implementado em python utilizando as bibliotecas "RPi.GPIO" para acionamento das entradas e saídas das portas do RaspberryPi e "picamera2" para a captura das imagens. O motor de passo realiza a rotação de 180º (equivalente a 100 passos) dividido por n paradas ("ROTATE CW"), onde a cada parada, o Módulo Picamera v1.3 captura uma imagem. Após n capturas, a amostra rotaciona no sentido oposto ("ROTATE CCW") para sua posição inicial conforme o fluxograma.

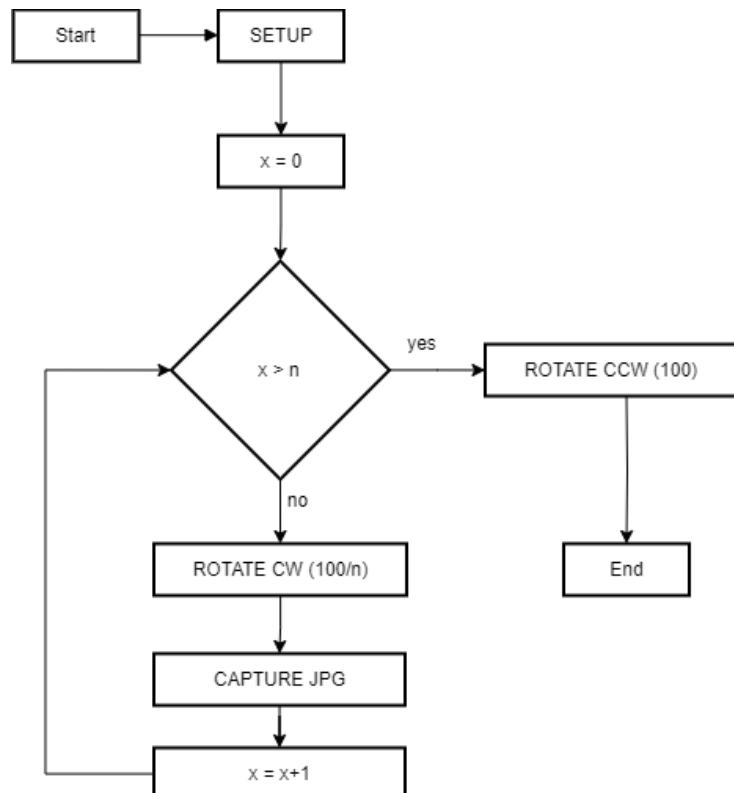


Figura 14 – Fluxograma do código de aquisição de imagens. Fonte: Autor

O código para controle da rotação do motor de passo sincronizado com a captura da imagem pelo módulo PiCamera v1.3 pode ser encontrado nas referências (18).

4.2 Reconstrução Computacional

A reconstrução foi realizada via Jupyter Notebook utilizando-se linguagem python. A figura 15 demonstra o esquema simplificado de seu processo computacional. As fotos retiradas podem ser identificadas como matrizes de duas dimensões no processamento de imagens (1). Neste caso, cada matriz gerada de dimensões (x,y) sob diferentes ângulos de rotação de amostra será recortado de acordo com a área de interesse gerando novas matrizes de dimensões (b,a) (2). Após o empilhamento das imagens recortadas (3), a criação dos sinogramas utiliza a n -ésima linha do volume. Utiliza-se a transposição dos dados para geração do sinograma. A formação de cada segmento de dimensões (a,a) é possível pela transformação inversa de radon do sinograma. O processo é repetido por todas as n linhas da altura da imagem (4) e o empilhamento de cada segmento forma o volume tridimensional de dimensões (a,a,a) (5).

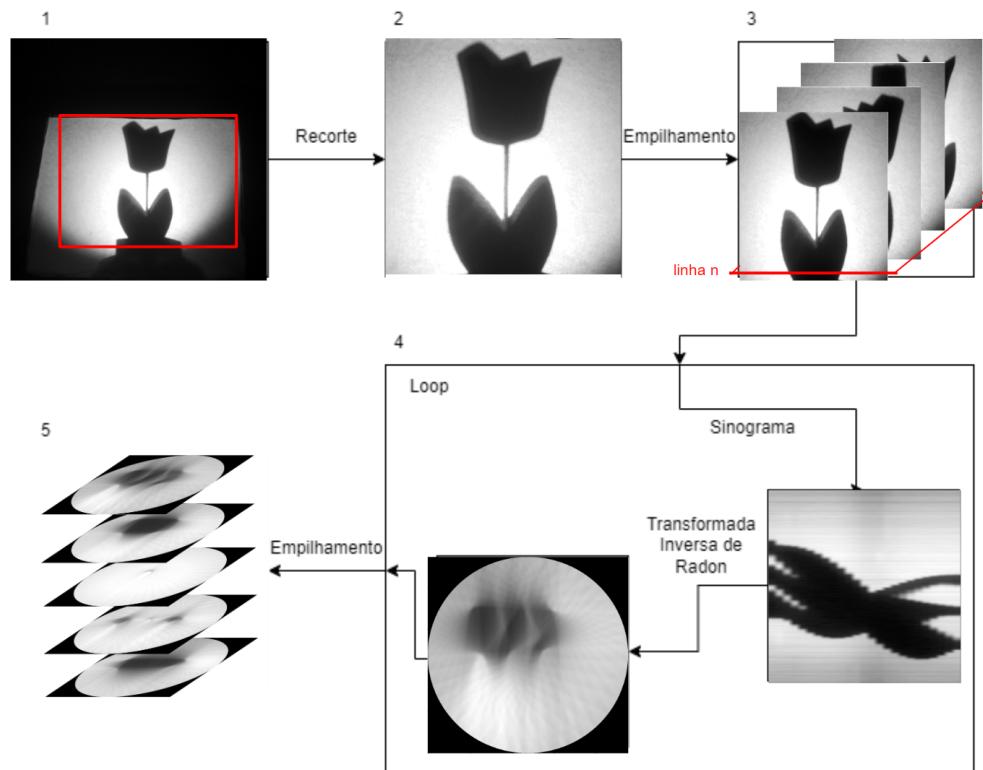


Figura 15 – Fluxograma de processamento de imagens. (1) Recorte de imagem original. (2) Imagem recortada. (3) Empilhamento das imagens recordas. (4) Laço para reconstrução dos segmentos a partir da linha n das imagens empilhadas em (3). (5) Empilhamento dos segmentos para formação do volume 3D. Fonte: Autor

Vale ressaltar que há diferença do processo de reconstrução no aparato desenvolvido

em relação a tomografia computadorizada para uso clínico. O aparato realiza a aquisição de todos slices de uma vez em relação a altura do objeto a ser reconstruído, enquanto a tomografia realiza a aquisição de fatia por fatia.

O código para reconstrução das imagens pode ser encontrado nas referências (18).

5 CUSTOS DO PROJETO

A tabela 2 apresenta os principais custos relacionados aos componentes do projeto, envolvendo valores estimados do minicomputador Raspberry Pi 3, os gastos com os componentes eletrônicos e o motor de passo. Gastos como fios de cobre, a base em papelão e o anteparo para superfície lisa onde é projetado a sombra do objeto, além do próprio objeto para projeção da sombra foram agrupados e estimados num valor médio no item "Outros gastos".

Componente	Descrição	Valor (R\$)
Raspberry Pi 3	Minicomputador de placa única	R\$399,99
Motor de Passo 12V	Motor para controle preciso de movimento	R\$52,82
Módulo Picamera v1.3	Câmera para Raspberry Pi	R\$47,40
Fonte 12V	Fonte de alimentação	R\$40,00
Outros gastos	Base do protótipo, fios de cobre, papel opaco, objeto para projeção da sombra, fita isolante, parafuso	R\$20,00
Circuito integrado DRV8825	Driver de motor de passo	R\$16,20
Lanterna LED	Lanterna com LED de alta potência	R\$12,99
Acoplamento de Motor de 5mm	Acoplamento para eixo de motor	R\$12,26
Protoboard	Placa de prototipagem	R\$9,40
Total		R\$611,06

Tabela 2 – Tabela de custos do projeto

Cada item listado na tabela foi selecionado para garantir a eficiência e a funcionalidade do sistema proposto. O total de custos do projeto foi de R\$ 611,06, onde o Raspberry Pi concentra aproximadamente $\frac{2}{3}$ do custo do projeto. Os itens listados na tabela são de fácil acesso para estudantes o que permitiria a reprodução do projeto em seu local de estudo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Escolha dos Componentes do Projeto

Foi escolhido como sistema embarcado o Raspberry Pi 3 por possibilitar a automação do processo de aquisição das imagens e armazenamento das imagens capturadas, visto que o minicomputador possui um módulo específico para câmera digital que seria possível ser acoplado. O controle da rotação do motor de passo pode ser realizado através de outros sistemas embarcados que possibilitem o acionamento sequencial de saídas/outputs (por exemplo, o arduino).

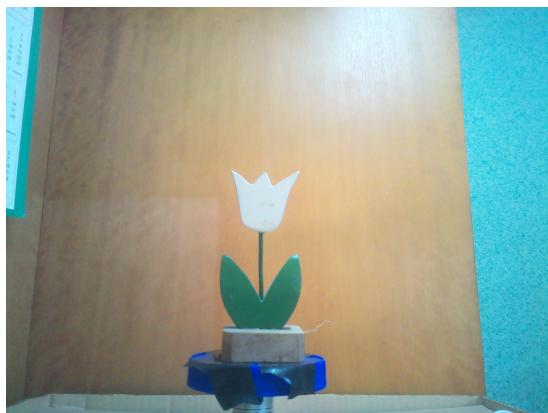
Para melhor simular o sistema de uma tomografia computadorizada seria interessante o uso de uma fonte de luz colimada. O uso de fontes de luz LED comuns, como foi o caso do projeto, produz um artefato na projeção da sombra do objeto no anteparo, gerando distorções nas sombras projetadas. Apesar disso, por se tratar de um projeto de caráter experimental, a decisão da escolha desse led foi devido ao baixo custo do componente. Estudos posteriores poderiam abordar o assunto com maior detalhamento, sugerindo formas de linearizar a fonte de luz ou de realizar tratamentos de dados a fim de corrigir tais distorções.

O circuito integrado DRV8825 é uma solução eficiente e de baixo custo, estabelecida no mercado para controle do motor de passo, conforme explicado na capítulo "Fundamentação teorica". Outras alternativas do CI poderiam ser propostas, como o circuito ULN2003 ou a ponte H L298N, porém em detrimento de algumas características. O circuito ULN2003 é uma solução interessante para projetos educacionais, com menor custo que a DRV8825. No entanto, não possui a funcionalidade de microstepping, além de possuir um circuito que não suporta motores de maiores potências. O circuito L298N permite o acionamento de motores de alta potência. Porém, semelhante ao ULN2003, não permite o possuir implementado o acionamento de microstepping. Além disso, não possui um circuito capaz de controlar sua corrente de saída do motor.

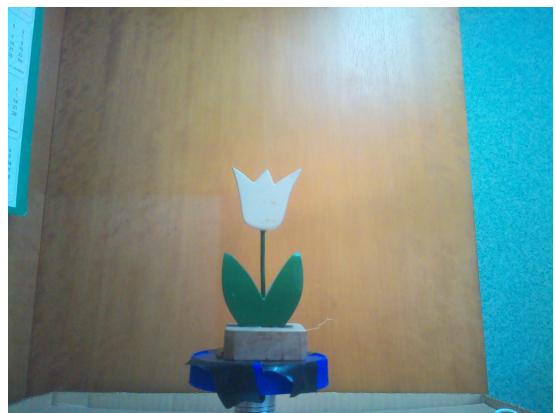
A fim de suprir a necessidade de torque para a rotação do objeto, é necessário um dimensionamento do motor de acordo com o peso e dimensões do objeto a ser rotacionado. No caso da aplicação deste projeto, por se tratar de um peso muito inferior a 1kg (aproximadamente 21g), se torna livre a escolha do motor em relação ao fornecimento de torque, podendo se atentar a outros parâmetros como resoluções de passos maiores, menor tensão na alimentação, a escolha de um motor bipolar de 4 fios, a fim de diminuir custos.

6.2 Verificações de Especificações do Motor de Passo

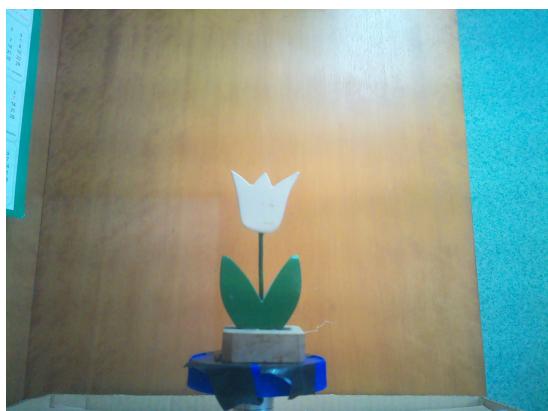
A figura 16 dispõe quatro fotos comparando a posição do objeto antes e depois de 50 rotações para verificação da precisão dos passos do motor. Pressupõe-se que caso haja um erro associado com cada passo do motor, o acumulo dos erros poderá ser verificado através de uma disposição diferente do objeto ao fim das rotações.



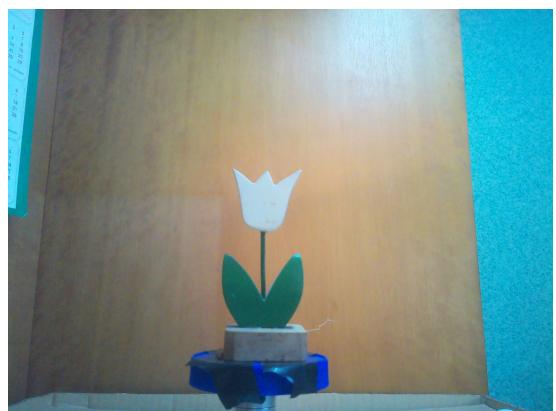
(a) Foto para referência



(b) Foto após 50 rotações



(c) Foto após 100 rotações



(d) Foto após 150 rotações

Figura 16 – Comparaçāo de fotos capturadas aps 50 revoluções. Fonte: Autor

Para melhor verificar a diferença, a figura 17 ilustra a subtração das imagens em (c) e (d) da figura acima, onde verificamos apenas alguns ruídos relacionados a captura pelo módulo Picamera V1.3.



Figura 17 – Subtração entre duas imagens. Fonte: Autor

Com a realização do teste, foi constatado a presença de um artefato de oscilação do motor, onde devido a alta potência gerada pelas bobinas, o motor de passo se deslocou horizontalmente pela superfície. Para evitar o artefato, algumas medidas podem ser tomadas como a implementação de microstepping, a diminuição da corrente fornecida através do potenciômetro no driver DRV8825, a implementação de amortecedores de vibração, entre outras formas.

Para o teste, como era de interesse que se evitasse somente o deslocamento do motor, este foi preso à superfície de papelão utilizando fita isolante adesiva. Após este ajuste, verificou-se que não houve uma diferença significativa entre as imagens antes e depois das rotações, o que demonstra a precisão e acurácia do motor de passo.

Nota-se que o intervalo de tempo entre cada passo possui um limite onde deve ser respeitado os parâmetros de cada fornecedor. Para o bom funcionamento do motor de passo, foi determinado experimentalmente que o menor intervalo entre cada passo para rotação de um objeto de 21g foi de 0.003 segundos.

A figura 18 abaixo demonstra os resultados dos dados adquiridos para a verificação da velocidade do motor em Rotações/Revoluções por Minuto (RPM) para intervalos de 0,02, 0,008 e 0,003 segundos entre o acionamento de cada passo. Os testes foram realizados para 20, 50 e 100 revoluções.

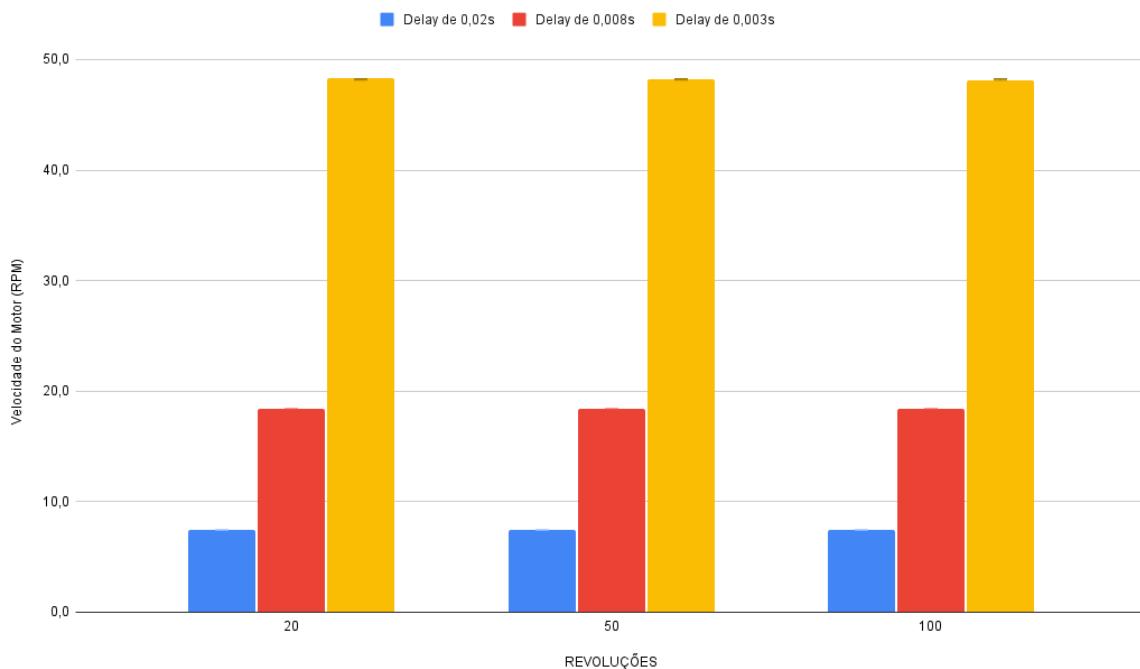


Figura 18 – Velocidades (RPM) para diferentes intervalos entre cada passo. Fonte: Autor

Os resultados mostram que as média de velocidade foram $7,437 \pm 0,001 RPM$, $18,4309 \pm 0,004 RPM$ e $48,200 \pm 0,064 RPM$ para intervalos de 0,02, 0,008 e 0,003 segundos entre o acionamento de cada passo. Verifica-se que a diminuição do intervalo entre cada passo aumenta o desvio padrão da velocidade do motor. Mesmo assim, para o caso onde o desvio padrão adquirido foi maior, este valor representa apenas 0,13% da média.

Em um projeto educativo, tais procedimentos se mostram importantes para verificação do bom funcionamento dos equipamentos que estão sendo trabalhados. Fomentar testes de verificação são importantes para instigar o caráter investigativo e a precisão nos dados adquiridos pelo experimento.

6.3 Aquisições das Imagens

Com a montagem do motor e do módulo Picamera v1.3, algumas imagens foram adquiridas para a geração dos sinogramas. A figura 19 expõe uma das aquisições realizadas onde foram realizadas 20 capturas entre 0° e 180° com 9.0° entre cada captura.

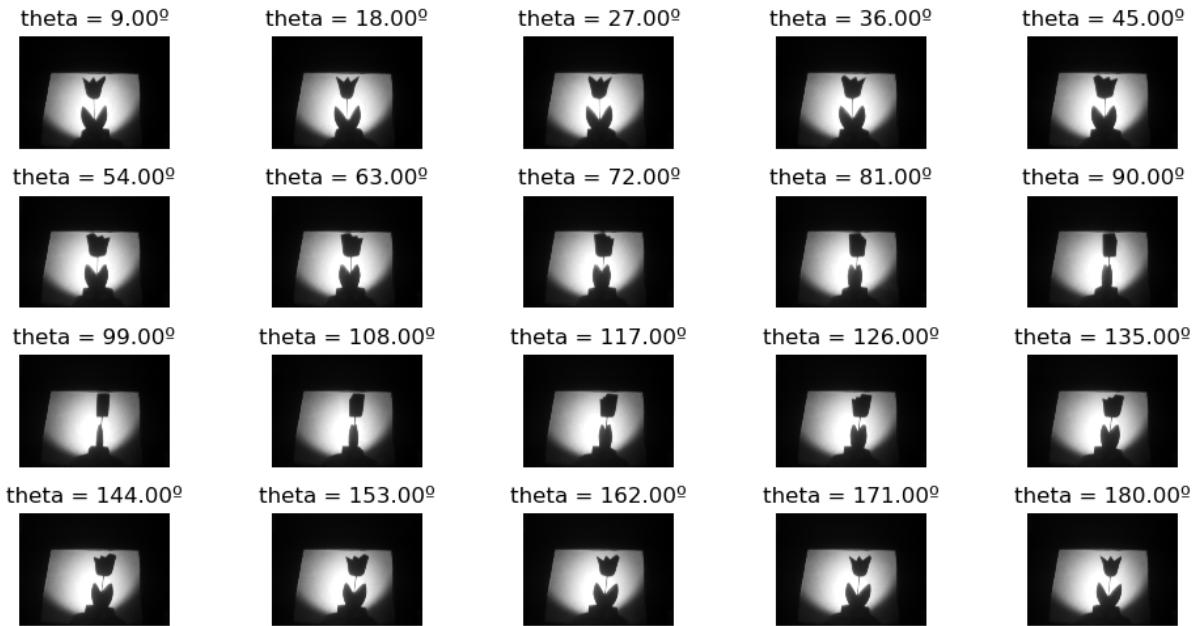


Figura 19 – Aquisição da projeção do objeto entre rotações de 9.0° . Fonte: Autor

As imagens adquiridas foram satisfatórias conforme o planejado, realizando a rotação do objeto de forma precisa devido ao uso do motor de passo. De acordo com a resolução fornecida pelo fabricante, seria possível realizar a aquisição das imagens com rotações de 1.8° entre cada captura, ou seja, um total de 200 capturas sem considerar o uso de microstepping. A aquisição se mostrou de fácil realização, sendo necessário a transferência posterior das imagens para um computador para realização das reconstruções.

O aumento do número de capturas para a formação do sinograma tende a melhorar significativamente a geração das imagens de segmentação devido o uso de mais ângulos para a transformada inversa de radon. No entanto, se for considerado a aplicação em uma tomografia que utiliza radiação ionizante, existe a preocupação da exposição do paciente a grandes doses de radiação. Neste sentido, a criação de técnicas e tecnologias devem ter como objetivo a diminuição da exposição dessas altas doses expostas ao paciente.

6.4 Reconstruções

Existe uma relação direta entre a qualidade dos dados adquiridos e o resultado da reconstrução das imagens ao final do processamento. Este fato exalta a importância de uma aquisição com o menor valor de artefatos externos e da padronização nos processo de aquisição. O posicionamento dos pacientes em uma aquisição de TC influencia na qualidade da geração das imagens. Claro que, todavia, existem recursos computacionais e tecnológicos que objetivam a diminuição desses artefatos.

Em um projeto educacional, pontos como os destacados acima podem ser levantados por alunos que desenvolvem e se habituam com as técnicas envolvidas. Além de reforçar

os pontos básicos da técnica, como a transformada inversa de radon e o processamento computacional, surgem questionamentos em relação a engenharia do protótipo: questões como a centralização do objeto na aquisição; otimização do número de capturas para uma reconstrução, pensando na diminuição de doses de radiação recebida por um paciente; técnicas computacionais para otimizar as reconstruções, visto que tais processamentos geram matrizes com grandes volumes de armazenamento etc.

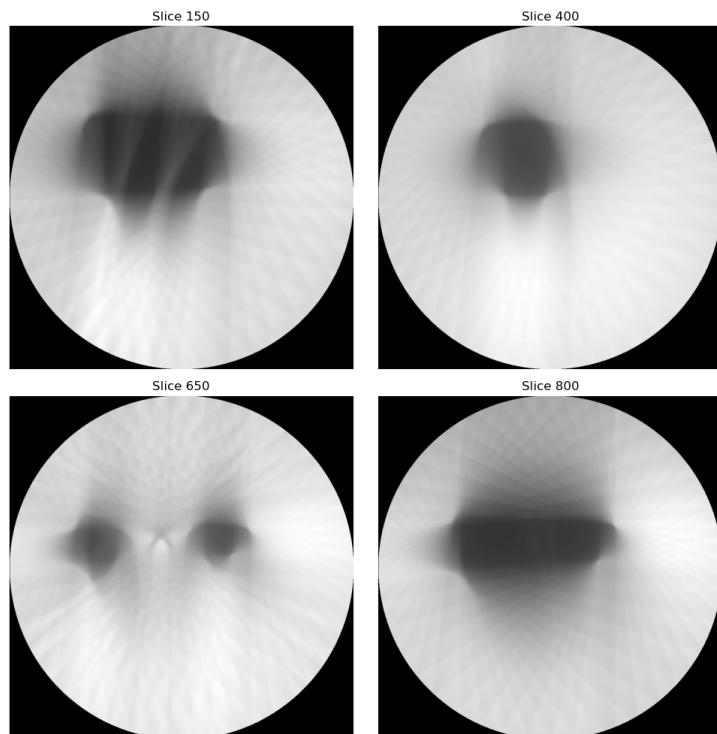


Figura 20 – Reconstrução dos dados no plano transverso. Fonte: Autor

Diferentes abordagens de processamento podem ser realizadas após a aquisição das imagens pelo hardware contruído. Através das imagens capturadas e do processamento das imagens realizadas em python, utilizando o processo descrito na metodologia, foi possível reconstruir as imagens no plano transverso em diferentes alturas do objeto, conforme a figura 20 . Tal reconstrução se assemelha a técnica do "Multiplanar Reformulation/Reconstruction (ou MPR)", onde os dados adquiridos de um plano podem ser convertidos em outro plano através de processamento computacional.

Com a automação das aquisições das imagens, o processo de captura foi facilitado. A figura 21 compara a reconstrução de um slice no topo do objeto para $n = (2, 4, 5, 10, 20, 25)$, onde n é o número de capturas realizado. O aumento de ângulos na formação do segmento melhora significativamente a resolução de sua formação.

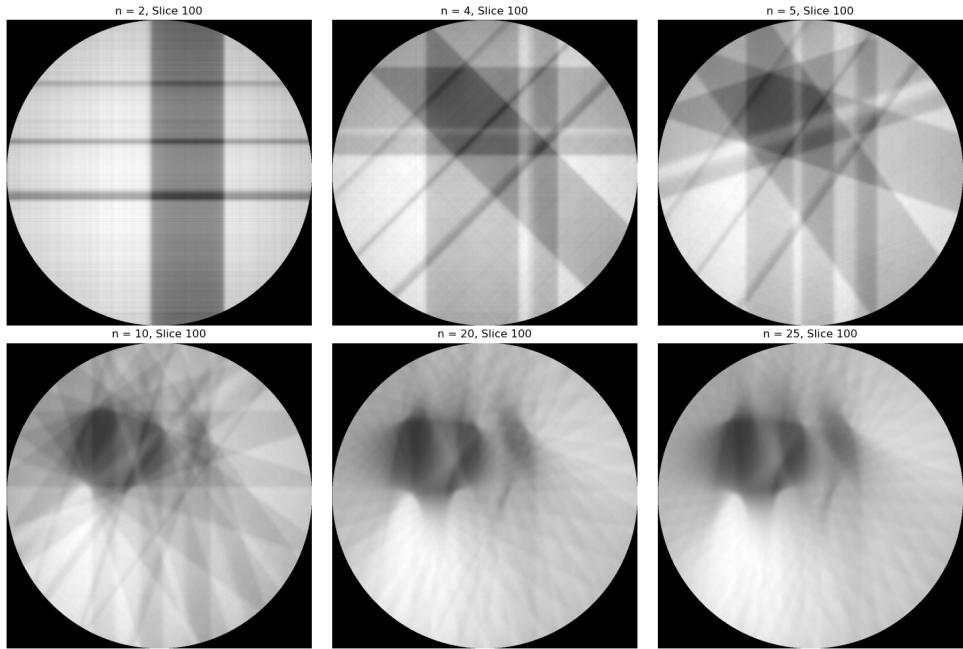


Figura 21 – Comparaçāo de Reconstruções, Slice 100. Fonte: Autor

6.5 Melhorias Sugeridas e Próximos Passos

Existem muitas abordagens que poderiam ser tomadas para melhoria do projeto. Em geral, as melhorias poderiam ser realizadas no âmbito do processo de aquisição ou no processamento das imagens.

Em relação ao processo de aquisição das imagens, um ponto direto que poderia ser abordado seria a troca da fonte de luz por uma fonte colimada ou de maior intensidade. Também, o projeto viria muito a se beneficiar com uma base móvel de cada componentes, seja uma plataforma criada em acrílico, madeira ou através de impressão 3D.

Sobre o processamento das imagens, poderiam ser estudados técnicas com o fim de melhoria na geração das imagens ou técnicas complementares ao processo de aquisição. Tendo sido abordado a retroprojeção neste trabalho, desenvolvimentos futuros poderiam se basear em técnicas de reconstruções iterativas.

6.6 Proposta de Experimento

A seguir, foi proposto um experimento para ser aplicado a alunos de graduação com o uso do aparato desenvolvido neste trabalho em matérias relacionadas as modalidades de processamento de imagens médicas. O experimento visa explorar o processo de reconstrução 3D de um objeto a partir de suas projeções bidimensionais. Utilizando técnicas de tomografia computacional (TC), este estudo permite a análise das capacidades e limi-

tações dos métodos de reconstrução, além de consolidar os conhecimentos em relação a modalidade.

6.6.1 Objetivo Proposto

O objetivo principal deste experimento é reconstruir um modelo 3D de um objeto com base nas projeções obtidas em diferentes ângulos e analisar a precisão dessa reconstrução comparando-a com o objeto real. É sugerido o uso de processamento em python ou em linguagem que esteja mais familiarizado. Ao fim do experimento, o aluno deve conseguir documentar os aprendizados adquiridos em relação a reconstrução tridimensional.

6.6.2 Metodologia

Os passos a seguir descrevem o procedimento experimental para alcançar os objetivos propostos.

6.6.3 Passo 1: Seleção e Preparação do Objeto

Os alunos devem selecionar dois objetos, um mais simples e outro com contornos mais completos. O objeto simples deve conter contornos simétricos como um peão de xadrez, que possuam simetria rotacional. O objeto mais complexo deve projetar uma sombra forte e interessante, contendo uma silhueta que proporcione projeções variadas e detalhadas para análise mais robusta, ou que permita a passagem de luz.

6.6.4 Passo 2: Fixação do Objeto

O objeto selecionado deve ser fixado na plataforma para garantir que não se move durante o processo de aquisição das projeções. Isso assegura a consistência e precisão das imagens obtidas. Deslocamentos tanto do objeto quanto do motor devem ser evitados, pois poderiam afetar a qualidade das projeções e a precisão da reconstrução 3D.

6.6.5 Passo 3: Aquisição das Projeções

A captura das projeções do objeto devem ser realizadas em diferentes ângulos. Dois conjuntos de ângulos sugeridos para as projeções são:

- passos de 18,0 graus por projeção;
- passos de 1,8 graus por projeção.

Ao fim desta etapa, o aluno deve obter um conjunto completo de dados para a reconstrução, permitindo a análise da influência da resolução angular na qualidade da reconstrução 3D.

6.6.6 Passo 4: Reconstrução do Objeto 3D

Utilizando o software fornecido em python, o aluno deve trabalhar para completar o código necessário para a transformação inversa de Radon e criar uma máscara binária a partir das imagens; ou seja, a reconstrução tridimensional a partir das projeções adquiridas e gerar uma representação digital do objeto. Dentro do código podem ser fornecidos as principais bibliotecas relacionadas a transformada de radon, além da estrutura básica para importação e exportação dos dados.

6.6.7 Passo 5: Visualização e Análise dos Resultados

O modelo 3D deve ser reconstruído utilizando uma ferramenta adequada, como a biblioteca matplotlib em python ou o software Blender. O aluno deve identificar e anotar os artefatos presentes, ou seja, as discrepâncias entre a geometria do objeto original e a imagem produzida, avaliando a precisão da reconstrução 3D e entendendo os possíveis erros ou limitações do processo.

6.6.8 Passo 6: Reflexão e Comparação

O aluno deve neste passo consolidar o aprendizado obtido e situar o método atual no contexto das técnicas de TC existentes. Em um primeiro parágrafo, refletir sobre o que foi aprendido com o experimento, abordando a eficácia das técnicas de reconstrução e as dificuldades encontradas. Em outro parágrafo, comparar o método utilizado com as gerações anteriores de tomografia computacional discutidas em aula, destacando semelhanças e diferenças.

7 CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido apresentou-se viável para a geração de dados de forma prática e fácil manipulação posterior. Sua capacidade de automatizar a rotação de um objeto e a captura das imagens facilita o processo de geração de dados, o que seria uma dificuldade realizar de maneira manual. Com isso, a metodologia permite ao aluno focar no processamento dos dados gerados, assim se atentando às técnicas empregadas de processamento dos dados.

Apesar disso, outras dificuldades surgem com a aplicação desta metodologia, como a necessidade de um bom posicionamento do objeto a ser capturado, a fixação correta do motor para que não haja deslocamentos, o alinhamento da fonte de luz com o objeto e o anteparo para formar uma projeção correta sem deformidades.

A aquisição de imagens final do protótipo se mostrou relativo ao cuidado tomado pelo condutor das capturas no momento da aquisição. Apesar da automação da rotação dos objetos e da captura facilitarem o processo de aquisição de imagens, o protótipo ainda possui variáveis definidas pelo condutor do experimento no momento da aquisição.

Após a realização deste projeto, o maior aprendizado obtido foi uma maior familiaridade com o processo de aquisição de imagens de uma tomografia computadorizada, além da proximidade com o processo como um todo. Noções como o posicionamento de um paciente na tomografia e o impacto gerado no volume reconstruído final, além de uma noção muito maior do processamento dos dados de uma tomografia computadorizada. Desta forma o protótipo se mostrou eficaz na geração de conhecimentos e na proximidade da técnica.

Ao fim do projeto, o protótipo pode ser utilizado em ambiente educacional para o ensino de matérias como imagens médicas ou matérias relacionadas a equipamentos médico-hospitalares.

Referências

- 1 NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2023. *Wilhelm Conrad Röntgen – Biographical*. 2023. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/roentgen/biographical/>>. Acesso em: 05/06/2023.
- 2 CARVALHO, A. C. P. *História da tomografia computadorizada*. 2018. <<http://imaginologia.com.br/dow/upload%20historia/Historia-da-Tomografia-Computadorizada.pdf>>. Acesso em: 28/04/2018.
- 3 CHARAMBA, L. *Reconstrução de Imagens Tomográficas com uso de GPU*. 2012. <<https://www.cin.ufpe.br/~tg/2012-2/lgrc.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2023.
- 4 GORDON, R.; BENDER, R.; HERMAN, G. T. Algebraic reconstruction techniques (art) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography. *Journal of theoretical Biology*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 471–481, 1970.
- 5 STEIN, I. K. F.; MURAKAMI, B.; SIMS, J. A. Development of a visible light tomograph for teaching computed tomography concepts in undergraduate medical physics classrooms. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, XXIX*. Ribeirão Preto, Brasil: [s.n.], 2024.
- 6 LARSSON, E.; GÜRSOY, D.; HALL, S. A. Kitchen-based light tomography-a diy toolkit for advancing tomography-by and for the tomography community. *Tomography of Materials and Structures*, Elsevier, v. 1, p. 100001, 2023.
- 7 MUNRO, P. R. *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT, by Thorsten M. Buzug: Scope: textbook and reference. Level: graduate and practising scientist/engineer*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2010.
- 8 MARGOTTI, F. *Problemas Inversos*. 2023. <<https://fabiomargotti.paginas.ufsc.br/pesquisa/problemas-inversos/>>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- 9 OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. Física para ciências biológicas e biomédicas. In: *Física para ciências biológicas e biomédicas*. [S.l.: s.n.], 1986. p. 49–53.
- 10 GONZALEZ, R. C. *Digital image processing*. [S.l.]: Pearson education india, 2009.
- 11 CARR, J. J. *Biomedical Equipment: Use, Maintenance, and Management*. [S.l.]: Prentice Hall, 1992.
- 12 ROTHE-NEVES, M.; SILVA, O. F.; BARREIROS, J. A. L. Metodologia para a construção de protótipos didáticos para os cursos de controle e automação de sistemas. In: *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. COBENGE*. [S.l.: s.n.], 2004.
- 13 GONSALES, P. et al. Design thinking e a ritualização de boas práticas educativas. *São Paulo: Instituto Educadigital*, 2018.
- 14 ROY, T. S.; KABIR, H.; CHOWDHURY, M. Simple discussion on stepper motors for the development of electronic device. v. 5, p. 1089–1096, 02 2014.
- 15 INSTRUMENTS, T. *DRV8825 - Stepper Motor Controller IC*. 2012. Accessed: 31-Jul-2024. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/driv8825.pdf>>.

- 16 Raspberry Pi Foundation. *Camera Documentation*. n.d. Accessed: 2024-08-01. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>>.
- 17 Raspberry Pi Foundation. *Picamera2 Manual*. n.d. Accessed: 2024-08-01. Disponível em: <<https://datasheets.raspberrypi.com/camera/picamera2-manual.pdf>>.
- 18 SIMS, J. *Medical Physics - Image Experiments: README*. 2024. Acessado em: 17 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://github.com/johnandsims/MedicalPhysics-ImageExperiments/blob/Version5/README>>.