

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

Isabella Kobb Fernando Stein

**Desenvolvimento de um tomógrafo de luz
visível para o ensino de conceitos de
tomografia computadorizada em salas de
aula de graduação em física médica**

São Bernardo do Campo - SP

2024

Isabella Kobb Fernando Stein

**Desenvolvimento de um tomógrafo de luz visível para
o ensino de conceitos de tomografia computadorizada
em salas de aula de graduação em física médica**

Trabalho de Graduação III em Engenharia
Biomédica realizado na Fundação Universi-
dade Federal do ABC.

Orientador: Prof. Dr. John Andrew Sims

São Bernardo do Campo - SP
2024

ISABELLA KOBB FERNANDO STEIN

TOMOGRASPI: DESENVOLVIMENTO DE UM TOMOGRAFO DE LUZ VISÍVEL
PARA USO DIDÁTICO, TEÓRICO E PRÁTICO

Dissertação apresentada ao Curso de Bacharel em Engenharia de Biomédica da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para obtenção do Grau de bacharel. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Aprovada em 24 de ABRIL de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Andrew Sims - Orientador
UFABC

Prof. Dr. Daniel Papoti
UFABC

Profª. Drª. Carolina Benetti
UFABC

São Bernardo do Campo
2024

Agradecimentos

Acredito que nem todas as palavras de agradecimento seriam suficientes, mas gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, Aquele provém e detém todas as coisas, a meus pais, Miriam e Pedro e irmã, Jéssica, pelo apoio incondicional e incentivo ao longo de minha jornada acadêmica. Ao meu esposo, Julio que esteve ao meu lado, me incentivou, me ensinou e me ajudou em todos os momentos.

Agradeço também aos meus amigos, em especial Pedro, Rizia e Gabi, colegas de turma e professores. Sou muito grata pelo meu orientador, Dr. John Sims, por toda sua dedicação, paciência e apoio, seus ensinos foram fundamentais para o sucesso deste trabalho, além de servirem de motivação e inspiração. Agradeço, ainda, ao meu parceiro neste projeto, Bruno Murakami, que me propôs este desafio e contribuiu nesta jornada.

Além disso, gostaria de agradecer também ao professor Olavo Luppi, que gentilmente cedeu seu laboratório para que fosse possível desenvolver o projeto. À instituição Universidade Federal do ABC por proporcionar um ambiente acadêmico estimulante e por me fornecer as ferramentas necessárias para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A lógica levará você de A a B. A imaginação levará você a qualquer lugar. Frase atribuída ao grande físico Albert Einstein

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, e a minha família, meu esposo e amigos, que sempre estiveram ao meu lado e me incentivaram em todos os momentos. Em especial dedico aos meus amigos, Lucas e Spaike, que hoje não estão mais comigo, mas foram partes essenciais em minha vida.

Resumo

O desenvolvimento da engenharia tem sido essencial na busca por soluções para os mais diversos desafios ao longo dos séculos, desde a construção civil nas primeiras civilizações, os avanços tecnológicos da revolução industrial e problemas modernos. Atualmente, o ensino de engenharia enfrenta o desafio de adaptar-se às rápidas e imprevisíveis mudanças tecnológicas. A tomografia é uma técnica de diagnóstico por imagem que utiliza cortes para visualizar estruturas internas do corpo humano ou de outros objetos, utilizando radiação ionizante ou não ionizante. A reconstrução tomográfica é um processo que utiliza dados de medições em diferentes ângulos para criar uma imagem tridimensional de um objeto ou região de interesse. Essa técnica é amplamente utilizada em áreas como medicina, engenharia, física e geologia, entre outras. Nesse contexto, o presente projeto objetivou desenvolver um equipamento didático de tomografia computadorizada, com o intuito de proporcionar aos estudantes uma compreensão mais profunda dos conceitos teóricos por trás dessa técnica, por meio de um contato prático. Foi desenvolvido um aparato simples, utilizando como base uma caixa de papelão e outros materiais acessíveis, de modo a possibilitar sua fácil reprodução. Além disso, foi desenvolvido um software para a reconstrução tomográficas das imagens obtidas.

Abstract

The development of engineering has been essential in the search for solutions to the most diverse challenges over the centuries, from civil construction in the first civilizations, the technological advances of the industrial revolution and modern problems. Currently, engineering education faces the challenge of adapting to rapid and unpredictable technological changes. Tomography is an imaging diagnostic technique that uses sections to visualize internal structures of the human body or other objects, using ionizing or non-ionizing radiation. Tomographic reconstruction is a process that uses data from measurements at different angles to create a three-dimensional image of an object or region of interest. This technique is widely used in areas such as medicine, engineering, physics and geology, among others. In this context, the present project aimed to develop didactic computerized tomography equipment, with the aim of providing students with a deeper understanding of the theoretical concepts behind this technique, through practical contact. A simple apparatus was developed, using a cardboard box and other accessible materials as a base, in order to enable easy reproduction. Furthermore, software was developed for tomographic reconstruction of the images obtained.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Geometria de um feixe de raios paralelos - Gonzalez-Woods(1)	14
Figura 2 – Reconstrução da imagem usando dois ângulos. Gonzalez and Woods (2009)	15
Figura 3 – Reconstrução em diferentes angulos. Gonzalez and Woods (2009) . . .	16
Figura 4 – Esquema de montagem	19
Figura 5 – Simulação do Projeto	20
Figura 6 – Protótipo com medidas	20
Figura 7 – Primeira versão do sistema de rotação do objeto	21
Figura 8 – Segunda versão do sistema de rotação do objeto	21
Figura 9 – Versão final do protótipo com as vistas	23
Figura 10 – Esquema de montagem experimental para aquisição das imagens	25
Figura 11 – Montagem experimental para aquisição das imagens	25
Figura 12 – Gráfico de respostas para pergunta 1 - Compreensão dos conceitos de TC	27
Figura 13 – Gráfico de respostas para pergunta 2 - Adição de sessões práticas nas disciplinas que abordam o tema de TC	27
Figura 14 – Gráfico de respostas para pergunta 3 - Compreensão do tema de Re- construção Tomográfica	28
Figura 15 – Gráfico de respostas para pergunta 4 - Dificuldades em compreender TC	28
Figura 16 – Gráfico de respostas para pergunta 5 - Relevância de equipamentos didáticos na graduação	29
Figura 17 – QR Code para acessar o código de reconstrução tomográfica	29
Figura 18 – Imagem cortada em uma região de interesse	30
Figura 19 – Imagem reduzida	30
Figura 20 – Imagens capturadas de 0º a 180º graus	31
Figura 21 – Sinograma na faixa de 100 pixels - Topo da Flor	32
Figura 22 – Algorítimo de Reconstrução	32
Figura 23 – Fluxo dos estágios de processamento das imagens.	33
Figura 24 – Reconstrução em 3D	34
Figura 25 – Sombras na Reconstrução Tomográfica	35
Figura 26 – Incidência de luz em leque	35
Figura 27 – QR Code para acessar o código de reconstrução tomográfica	40

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivos Gerais	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	Ensino de Engenharia	12
3.2	Modelos didáticos	12
3.3	Tomografia Computadorizada	13
3.3.1	Transformada de Radon	13
3.3.2	Reconstrução Tomográfica	14
3.4	Estado da arte	16
4	METODOLOGIA	18
4.1	Procedimento	18
4.1.1	Montagem Protótipo	18
4.1.1.1	Planejamento	18
4.1.1.2	Montagem	18
4.1.1.3	Protótipo 1	19
4.1.1.4	Protótipo 2 - Final	20
4.1.2	Aquisição das imagens	24
4.1.3	Enquete com alunos da UFABC	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Enquete com alunos da UFABC	27
5.2	Reconstrução Tomográfica	29
5.2.1	Processamento da imagem	32
5.2.2	Resultados da Reconstrução Tomográfica	33
5.3	Etapas futuras	35
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da engenharia ocorre há séculos, acompanhando os avanços da sociedade, sendo uma ferramenta essencial na busca por soluções para os mais diversos desafios, como a construção civil desde as primeiras civilizações, e os progressos tecnológicos impulsionados pela revolução industrial. A história da engenharia é uma narrativa de inovação contínua, refletindo as necessidades e aspirações das sociedades ao longo do tempo. Desta forma, a estruturação do ensino de engenharia evoluiu de uma ênfase prática para incluir uma base teórica sólida, para tal apresenta uma diversidade de modelos educacionais, refletindo a natureza dinâmica da disciplina e a necessidade de preparar engenheiros para desafios contemporâneos e futuros.(2)

A descoberta dos chamados Raios-x, no final do século XIX, pelo físico alemão Röntgen (3), revolucionou a medicina de sua época, visto que possibilitou a visualização interna do corpo humano, sem que este precisasse ser aberto. Em 1917, o físico austríaco Johann Radon (4) propôs um método matemático para reconstruir funções a partir de suas projeções (5), mas a tecnologia disponível na época ainda 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 (4, 6). Hounsfield e Cormack receberam o Prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina em 1979 por sua invenção da Tomografia Computadorizada.(3)

A tomografia (do grego *tomos* = cortar, cortar e *graphein* = escrever) consiste em uma metodologia de reconstrução volumétrica, obtida por meio de cortes (fatias), adquiridos em diferentes ângulos(7). A reconstrução tomográfica é um processo que utiliza os 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, 8), seu uso é de estimado interesse, por possibilitar a visualização de estruturas internas do corpo humano ou de outros objetos através do uso de radiação ionizante, ou não ionizante (9, 10).

Pode-se dizer que o desafio atual no ensino de Engenharia é adaptar os sistemas educacionais para enfrentar mudanças tecnológicas rápidas e imprevisíveis. (11) No curso de graduação em Engenharia Biomédica, oferecido pela Universidade Federal do ABC (São Paulo, Brasil), possui a disciplina de Física Médica I que aborda os princípios físicos das modalidades de raio-x, tomografia computadorizada, medicina nuclear (NM) e ultrassom (US). Embora haja um laboratório contendo instrumentação de US, que pode ser usada para fins pedagógicos, equipamentos de grande porte como Raio-x, NM e CT, que fazem

uso de radiação ionizante, possuem um custo muito elevado, além de um importante fator de risco associado à natureza da radiação utilizada, o que inviabilizaria seu uso para fins educacionais, desta forma não é oportunizado ao estudante um contato prático com estas tecnologias. O equipamento didático desenvolvido neste trabalho utiliza a luz visível como fonte de radiação, uma vez que é de fácil obtenção, segura e visível ao olho humano, tornando o processo mais intuitivo. O objetivo principal de seu desenvolvimento é proporcionar aos alunos uma melhor compreensão das leis físicas envolvidas nos equipamentos médicos e o papel da computação na reconstrução tomográfica.

Este projeto trata do desenvolvimento de um protótipo didático de tomografia computadorizada, estando subdividido nas seguintes seções: objetivos, revisão da literatura, fundamentação teórica, metodologia, resultados e discussões, e anexos. Na próxima seção deste documento podem ser vistos os objetivos geral e específicos do projeto. A fundamentação teórica nos mostra um artigo onde foi desenvolvido um aparato de reconstrução tomográfica de pequeno porte, utilizando uma fonte de luz LED, uma webcam e um processador Raspberry Pi (12). Além de elucidar temas sobre: ensino de engenharia, tomografia computadorizada e reconstrução tomográfica. A parte seguinte aborda a metodologia que será adotada para a execução deste trabalho, assim, nesta seção há o procedimento utilizado para a construção do equipamento didático, a forma de aquisição das imagens e a reconstrução tomográfica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O propósito deste trabalho de graduação é desenvolver um equipamento didático para ensino dos conceitos de tomografia computadorizada e reconstrução tomográfica, de fácil reprodução, além de algoritmos para reconstrução tomográfica de objetos volumétricos.

2.2 Objetivos Específicos

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

- Criar um equipamento didático para ensino dos conceitos de tomografia computadorizada utilizando luz visível
- Avaliar diferentes possibilidades de montagem do aparato experimental a fim de avaliar as interferências e possíveis melhorias do sistema para geração e captação das imagens.
- Desenvolver software de reconstrução tomográfica a partir de múltiplas projeções.
- Analisar erros associados a reconstrução da imagem digitalizada;
- Utilizando um objeto simples, capturar diferentes projeções em múltiplos ângulos, a partir da sua rotação, e realizar a sua reconstrução tomográfica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Ensino de Engenharia

A engenharia tem evoluído ao longo de séculos, acompanhando o progresso da sociedade e desempenhando um papel crucial na resolução de diversos desafios, desde os primórdios da construção civil até os avanços tecnológicos impulsionados pela revolução industrial. A história da engenharia é uma narrativa contínua de inovação, refletindo as necessidades e aspirações das sociedades ao longo do tempo. A estruturação do ensino de engenharia passou de uma ênfase predominantemente prática para incorporar uma base teórica sólida, apresentando uma variedade de modelos educacionais que refletem a natureza dinâmica da disciplina e a necessidade de preparar engenheiros para desafios contemporâneos e futuros.(2) Segundo Barbosa (2014) o ensino de Engenharia tem como finalidade proporcionar uma aprendizagem significativa, contextualizada e orientada para o uso das tecnologias contemporâneas, promovendo habilidades em resolver problemas e conduzir projetos nos diversos segmentos do setor produtivo.(2)

Atualmente, um dos principais desafios no ensino de engenharia consiste na adaptação dos sistemas educacionais às rápidas e imprevisíveis mudanças tecnológicas. (11)Nesse contexto, a busca pelo desenvolvimento de recursos práticos de ensino é cada vez mais crucial, permitindo que os estudantes tenham um contato mais próximo com os conteúdos teóricos aprendidos em sala de aula.

3.2 Modelos didáticos

A proposta do uso de modelos didáticos para o ensino visa possibilitar ao aluno o contato direto com conceitos normalmente apresentados apenas audiovisualmente ou por meio de simulações, limitando a curiosidade e o pensamento científico. Rothe-Neves (2004) mostrou em seu estudo sobre a "*Metodologia para Aulas de Laboratório: Uma Experiência com Circuitos Elétricos*" (13), os benefícios dos modelos didáticos como aprofundar a compreensão dos conteúdos estudados, incentivar e desenvolver a aprendizagem de trabalho em equipe, propiciar uma aproximação com a atuação do aluno processo de abordagem e solução de um problema, além de possibilitar a integração entre diferentes disciplinas.

Uma interessante ferramenta na implementação de modelos didáticos é o *Design thinking*, que consiste em uma metodologia que coloca as pessoas no centro da solução de um problema (14). Tal metodologia muitas vezes associadas aos movimentos *Hands-on* e *Do it Yourself (DIY)* (Faça você mesmo) e tem-se mostrado 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(12).

3.3 Tomografia Computadorizada

Descoberto por Wilhelm Conrad Rontgen em 1895, o raio x tem usos em diversas áreas de tecnologia(4), sendo fundamental na área da saúde para modalidades como a Tomografia computadorizada (TC), radiografia, arco Cirúrgico e Fluoroscopia. Em interação com o corpo humano, os raios x são absorvidos de formas diferentes conforme o tipo de material, justificando sua aplicação para a diagnose do corpo humano. Ossos, por exemplo, atenuam eficientemente o raio x em comparação a um tecido mole devido à presença de elementos pesados como o cálcio(15). O processo de atenuação pode ser entendido com base na Lei de Lambert -Beer (15), conforme a expressão (1), onde:

$$(1) \quad I = I_0 e^{-\mu x}$$

- I = Intensidade de Luz Transmitida
- I_0 = Intensidade de Luz Incidente
- μ = Coeficiente de absorção
- x = espessura do meio absorvente

Desenvolvida na década de 1970, a Tomografia Computadorizada (TC) revolucionou a medicina diagnóstica ao permitir a visualização tridimensional de tecidos e órgãos com alta resolução(4, 6). O método baseia-se na coleta de múltiplas projeções radiográficas em duas dimensões, a partir de diferentes ângulos ao redor do paciente, sendo essas informações processadas computacionalmente para reconstruir imagens detalhadas em cortes transversais. Na TC cada um dos píxeis que formam a imagem representam a média da absorção de radiação pelos tecidos naquela região, sendo descritos em unidades de *Hounsfield* (16). O uso da TC se tornou a modalidade de diagnóstico de imagem padrão para avaliação de traumas, permitindo ao médico realizar posteriormente a reconstrução tridimensional das imagens para o planejamento de intervenções cirúrgicas, avaliando as imagens de diferentes ângulos de projeção(10).

A evolução da tecnologia permitiu diferentes gerações da tomografia computadorizada (10), utilizando diversas 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 e determinar a causa de um fenômeno particular (solução do problema), observando-se o efeito por ele produzido (dados) (17).

3.3.1 Transformada de Radon

Desenvolvida pelo matemático austríaco, Johann Radon, a Transformada de Radon (TR), consiste em uma equação matemática que permite demonstrar funções de $n+1$

dimensões a partir de um conjunto de projeções (5). Este conjunto de projeções forma o que é chamado de Sinograma (1). Na figura 1 pode-se observar a geometria de feixes paralelos, para exemplificar o funcionamento deste método matemático.

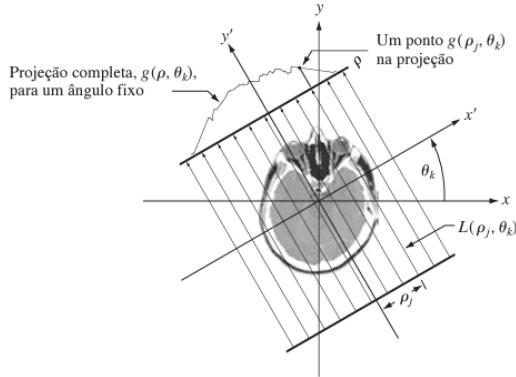


Figura 1 – Geometria de um feixe de raios paralelos - Gonzalez-Woods(1)

Considerando as seguintes representações de uma reta:

$$(2) \quad y = ax + b$$

$$(3) \quad x\cos(\theta) + y\sin(\theta) = \rho$$

Assim a projeção de um ponto da imagem se dará pela integral em linha , ao longo de uma linha arbitrária no plano xy (1). Deste modo a forma generalizada da TR, para valores contínuos será:

$$(4) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x\cos\theta + y\sin\theta - \rho) dx dy$$

3.3.2 Reconstrução Tomográfica

A reconstrução tomográfica é um processo fundamental na tomografia computadorizada (TC), permitindo a criação de imagens tridimensionais detalhadas de estruturas internas do corpo humano ou de objetos. Esse método de imagem é baseado na coleta de múltiplas projeções radiográficas de diferentes ângulos ao redor do objeto em estudo. O processo envolve a utilização de algoritmos matemáticos e computadores para combinar essas projeções e reconstruir cortes transversais precisos do objeto(6, 9).

A história da reconstrução tomográfica remonta ao início do século XX, com propostas teóricas de reconstrução tridimensional a partir de projeções bidimensionais. No entanto, somente na década de 1960, com as contribuições de Allan Cormack e Godfrey Hounsfield, a técnica se tornou viável, com o desenvolvimento da tomografia axial computadorizada (TAC) (4, 6, 16). Essa inovação possibilitou a obtenção de imagens tridimensionais de alta resolução e teve um impacto significativo na medicina diagnóstica. Além de ser utilizada em projetos educacionais para elucidar os princípios da técnica, proporcionando

uma compreensão mais profunda de seu funcionamento. O processo contribui significativamente para avanços na visualização tridimensional de estruturas, possibilitando uma análise mais precisa e detalhada.

As reconstruções utilizadas para fins didáticos utilizam o modelo de tomografia computadorizada de primeira geração, feixes paralelos, por se tratar de processamentos digitais mais simplificados. A partir da segunda geração, são utilizados ajustes previamente modelados decorrentes da própria técnica utilizada para aquisição dos sinogramas, como, por exemplo, diferentes formatos de feixe de raio x e disposição dos sensores.(9, 13)

A figura 2 representa a aquisição de uma amostra que poderia ser um tecido qualquer como de um órgão ou um osso, a diferenciação nos tons de cinza da imagem ocorre em decorrência da diferente constituição química do tecido. Em (a) e (c), são representados capturas de feixes de raio 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 da aquisição do sinal 1D em um plano 2D virtual.

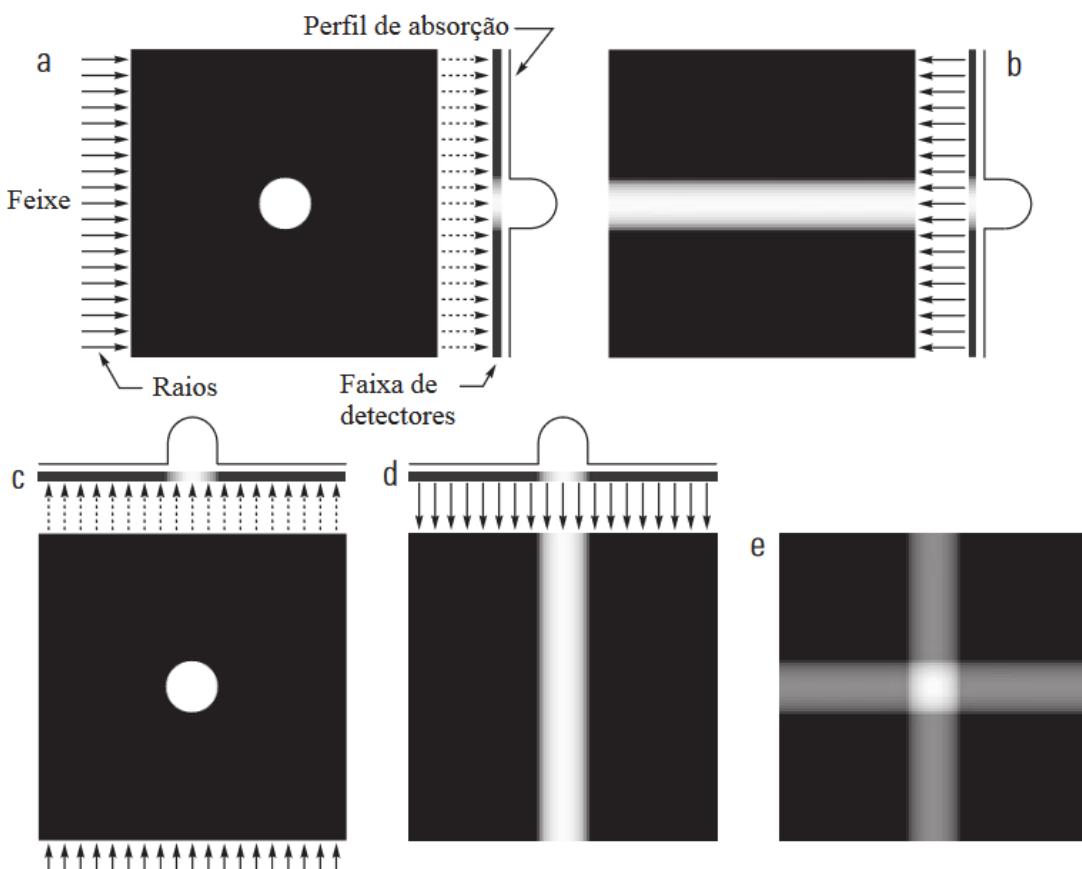


Figura 2 – Reconstrução da imagem usando dois ângulos. Gonzalez and Woods (2009) (a) e (c) Perfil de absorção a 0° e 90° , respectivamente. (b) e (d) Projeção do Sinal 1-D adquirido. (e) Reconstrução da imagem usando dois ângulos. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)

É possível verificar o conceito de retroprojeção na Figura 3 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 (1).

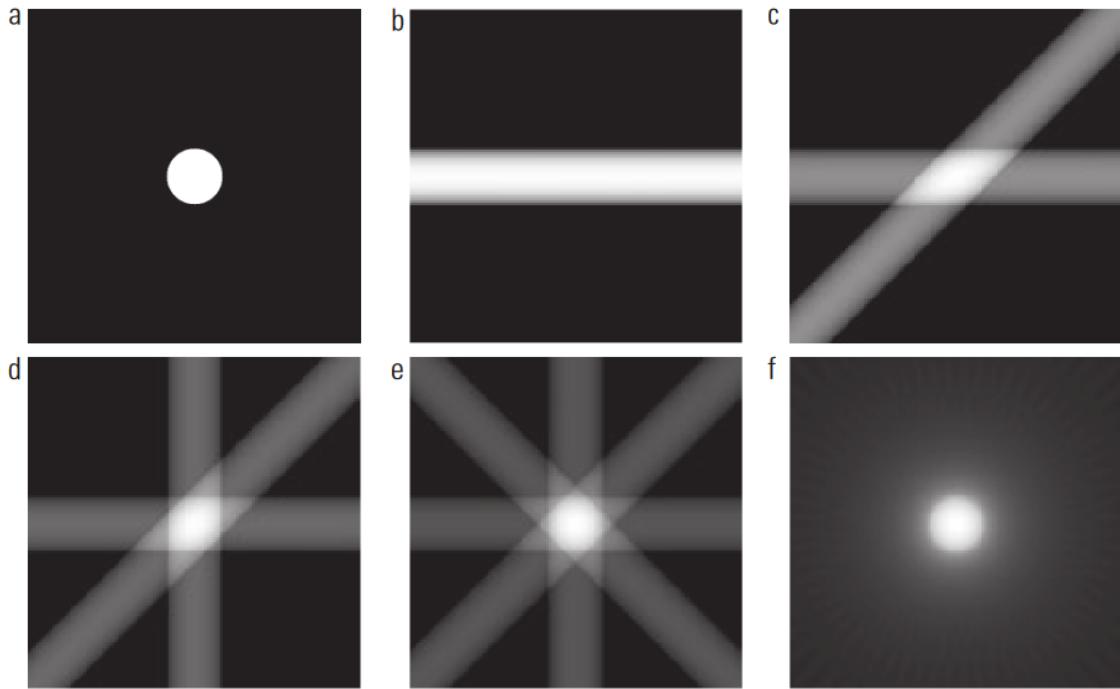


Figura 3 – Reconstrução em diferentes angulos. Gonzalez and Woods (2009)
 (a) Imagem Original. (b) a (e) Reconstrução usando 1, 2, 3, e 4 projeções com distância de 45°.
 (f) Reconstrução com 32 projeções. Fonte: Gonzalez and Woods (2009)

3.4 Estado da arte

Larsson et al. (12) propõe o desenvolvimento de um protótipo de tomografia usando luz visível utilizando componentes de baixo custo e acessíveis, a fim de promover uma experiência prática e direta em todos os aspectos da tomografia, desde o hardware até a análise de dados. Este modelo contém cinco componentes básicos para a criação de um *Kitchen based light tomograph* (KBLT), são eles:

1. uma fonte de luz, que consiste, por exemplo, em raios x, nêutrons ou luz normal;
2. um estágio de rotação;
3. uma amostra de teste;
4. um anteparo
5. um detector.

O artigo também apresenta casos de uso para simular desafios envolvendo tomografia, como amostras de evolução do tempo de imagem. Um de seus objetivos principais é fornecer uma ferramenta útil para usuários de tomografia, cientistas e pesquisadores computacionais, para o aprofundamento em temas relacionados a tomografia em geral.

4 METODOLOGIA

4.1 Procedimento

O desenvolvimento do projeto foi realizado em duas abordagens que avançaram paralelamente até a finalização do protótipo, a montagem do *hardware* do aparato contendo os dispositivos eletrônicos, a base rotatória da amostra, a superfície opaca para projeção da amostra, a fonte de luz, e a elaboração de um *software* para a reconstrução das imagens em três dimensões utilizando a linguagem de programação, Python.

4.1.1 Montagem Protótipo

4.1.1.1 Planejamento

O protótipo do equipamento didático foi provisionado para acomodar os seguintes componentes:

- Lanterna LED
- Plataforma para a amostra
- Fonte de alimentação
- Câmera digital ou Smartphone
- Superfície opaca para projeção de imagem
- *Phantom* de até 10 cm
- Fonte de tensão 12V

A figura 4 apresenta uma esquematização do equipamento didático, de modo que os componentes foram dispostos sobre uma base, que deveria acomodar em uma extremidade uma fonte luminosa (1), apontada longitudinalmente para a amostra e alinhada a frente da superfície opaca. Na outra extremidade foi idealizado uma câmera (4) para captura das imagens, e ao centro foi colocado uma superfície opaca para projeção da sombra (2). Além disso, foi previsto uma base giratória, para posicionar o objeto a ser imageado, possibilitando a sua rotação em ângulos conhecidos.

4.1.1.2 Montagem

Este projeto se objetivou a desenvolver um equipamento didático de baixo custo com materiais simples, valendo-se conceitos de sustentabilidade, reutilizando itens disponíveis, de modo a facilitar a sua reproduzibilidade. Foram realizadas duas montagens distintas, até a versão final.

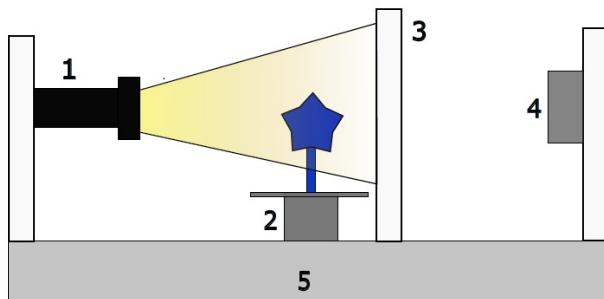


Figura 4 – Esquema de montagem: 1) lanterna; 2) Base giratória e Phantom; 3) Superfície opaca; 4) Câmera; 5) Base

Fonte: Autor

4.1.1.3 Protótipo 1

Neste primeiro protótipo foi utilizado como base uma espuma utilizada, originalmente, como suporte de proteção para transporte de equipamentos eletrônicos. Na Figura 5 abaixo estão as vistas frontal (a), lateral (b) e superior (c). Para a criação do espaço para o papel detector, foi feito um corte retangular na peça vertical de modo a possibilitar a inserção do "*papel detector*", na figura 5a pode-se observar a posição do corte e estrutura. Inicialmente foi utilizada uma folha de papel sulfite, com gramatura de aproximadamente 75 g/m^2 (18), como superfície detectora, porém a sombra projetada apresentava uma baixa resolução, com contornos mal delineados, possivelmente devido à espessura do papel e opacidade. Assim foi substituída por uma folha de papel-manteiga, com gramatura de cerca de 35 g/m^2 (19), apresentando menor espessura e permitindo uma melhor propagação da luz na superfície.

Na figura 5b e c podemos observar o posicionamento da fonte de luz e aparato giratório. Nesta imagem a lanterna adotada mostrou-se ineficaz para a aplicação neste projeto, visto que possui um foco pequeno em relação ao aparato, sendo meramente ilustrativa. A figura 6 mostra a vista lateral com as medidas reais do aparato montado. Outro fator importante é que a distância entre o objeto, a fonte de luz e o detector podem ser variadas e permitindo ao usuário, por meio da experimentação, observar as limitações e contribuições dos parâmetros escolhidos.

Ao finalizar a montagem notaram-se algumas restrições interessantes, como o tamanho do equipamento, que pareceu pequeno, limitando ao usuário o imageamento de objetos inferiores a 5 cm, além de não possibilitar variações tão interessantes de distância. Desta forma, optou-se pela elaboração de uma nova versão, que será demonstrada a seguir.

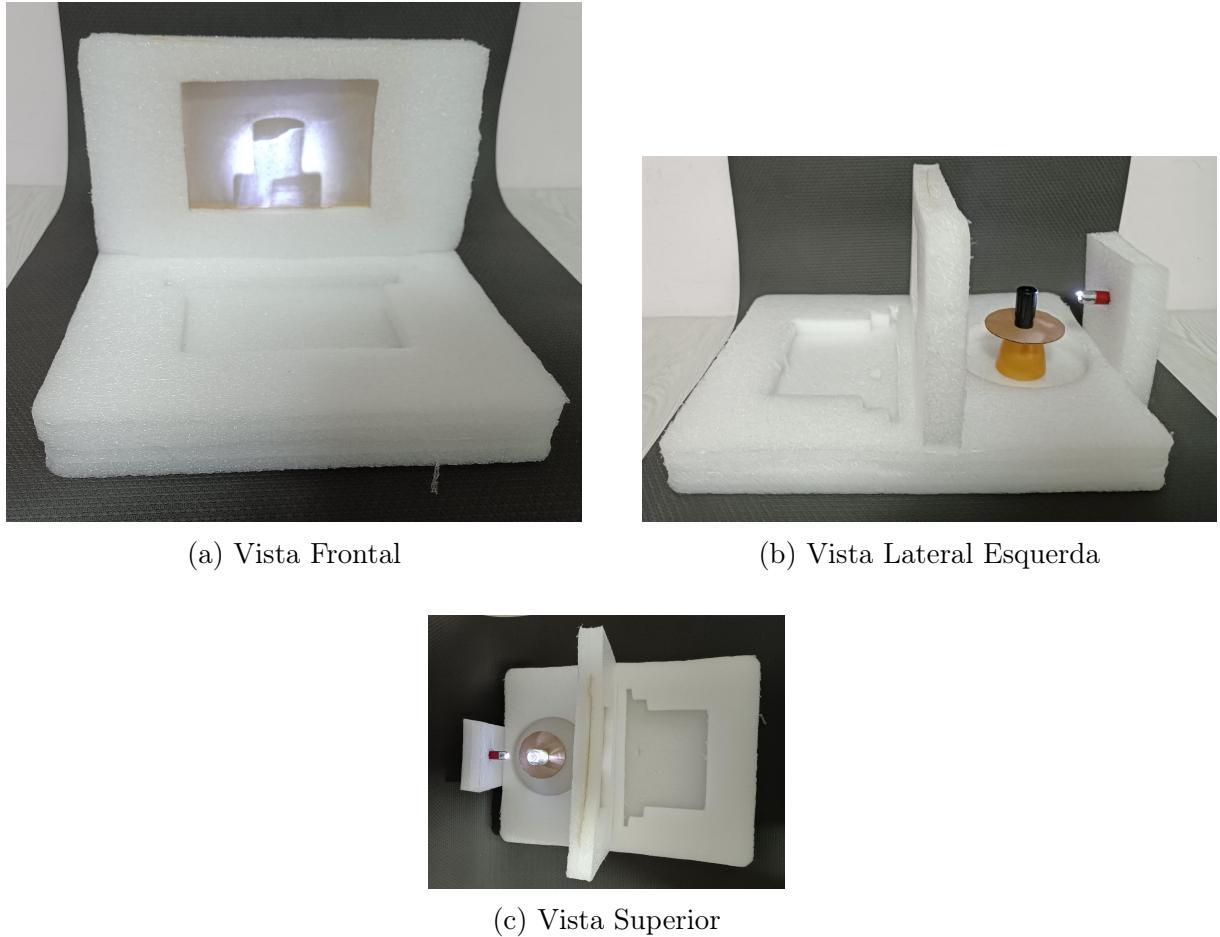


Figura 5 – Simulação do Projeto - Fonte: Autoria Própria

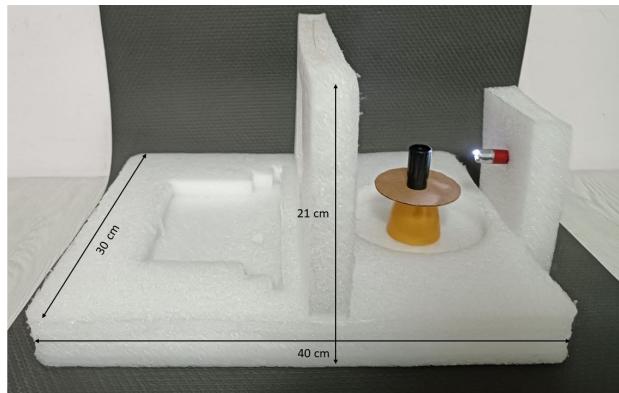


Figura 6 – Protótipo com medidas - Fonte: Autoria Própria

4.1.1.4 Protótipo 2 - Final

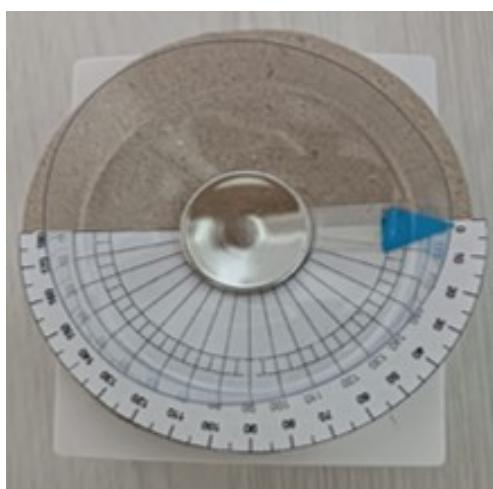
Pensando em construir um protótipo que possibilitasse ao usuário uma experimentação completa, foi elaborado um sistema manual de rotação do objeto a fim de permitir ao usuário a observação da variação angular do objeto no processo de aquisição das imagens, conforme mostra a figura 7. Foi adicionado um indicador para facilitar a observação e manuseio do usuário. Foram realizadas duas versões para este mecanismo, na figura 7 pode-se observar a primeira versão do sistema foi montado utilizando um círculo de

papelão encapado e a impressão de um transferidor na parte superior, esta estrutura foi fixada em uma caixa utilizando um pequeno palito de madeira.



Figura 7 – Primeira versão do sistema de rotação do objeto

No entanto, após teste notou-se que o sistema não era estável, então foi elaborado uma nova versão, conforme a figura 8. Neste modelo foi realizada a montagem colocando um *spinner* sobre uma caixa plástica, originalmente utilizada para interruptores elétricos, e um papel com a impressão dos ângulos. Este sistema mostrou-se mais estável e permite ao usuário melhor controle da rotação do objeto, bem como o posicionamento adequado na base do equipamento.



(a) Vista Superior



(b) Vista Lateral

Figura 8 – Segunda versão do sistema de rotação do objeto

Um dos pilares deste projeto é produzir um equipamento de fácil manuseio e reproduzibilidade, assim o material adotado para a base foi uma caixa de papelão. Na figura 9 pode-se observar as três vistas do protótipo, e seus componentes. A base apresenta dimensões de $565mm \times 460mm$, a altura foi ajustada em 120 mm , ao centro da base foi colocado

uma faixa milimetrada a fim de possibilitar a movimentação dos componentes em distâncias conhecidas. O anteparo foi montado utilizando um suporte de isopor para acomodar a placa com uma tela de $185mm \times 150mm$. Esta tela permite colocar diferentes tipos de papel para serem utilizados como superfície opaca para projeção das imagens. Na base o fundo é removível, possibilitando o armazenamento de fios e componentes eletrônicos.

A lanterna foi posicionada em uma das extremidades do equipamento e na outra foi colocada a câmera, na próxima seção será apresentado maior detalhamento. Todo o sistema foi construído de modo a possibilitar ao usuário a exploração de diversos parâmetros, tornando assim o equipamento versátil e permitindo elucidar diversos conceitos referente ao ensino do processo de aquisição de imagens médicas, sobretudo a tomografia computadorizada que é o foco deste trabalho.

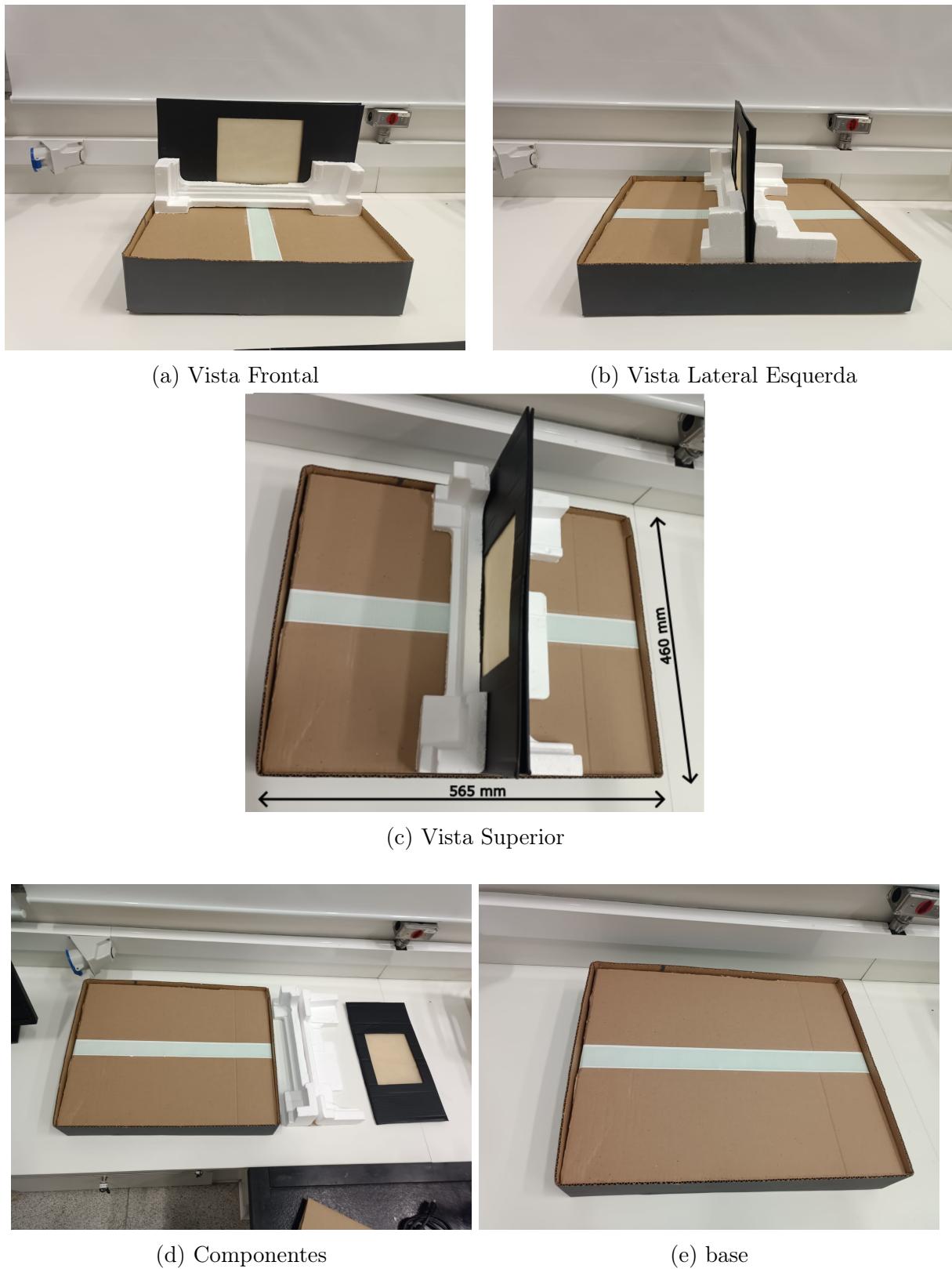


Figura 9 – Versão final do protótipo com as vistas - Fonte: Autoria Própria

4.1.2 Aquisição das imagens

Para a aquisição das imagens foram realizados alguns testes para escolha do tipo de luz, onde se percebeu que o tipo, tamanho e potência luminosa são parâmetros importantes para definição do modelo mais adequado. Quando utilizadas fontes de luz menos pontuais, a exemplo uma *Ringlight*, a sombra do objeto projetada no anteparo apresentava uma baixa qualidade, sendo difícil de definir os contornos, devido à posição variável de origem da luz, produzindo múltiplas linhas geométricas.

Foi adotada uma lanterna de Led, com ajuste de foco, onde foi possível observar que quando ajustada com foco mais fechado a luz de apresentava de forma pouco homogênea em certas regiões do objeto do que outras, podendo dificultar o processo de reconstrução, assim foi ajustado o foco da lanterna para uma abertura maior, de forma que a luz se espalhou de forma mais homogênea por todo o objeto. As figuras 10 e 11 mostram a montagem adotada para aquisição das imagens e a figura 11a mostra o objeto analisado e suas dimensões, onde se pode observar que na extremidade esquerda do equipamento a fonte de luz foi posicionada a 37,5 cm do anteparo e o objeto foi colocado a uma distância de 5 cm, já câmera foi posicionada na outra extremidade a 19 cm de distância.

As imagens foram capturadas com um smartphone posicionado em frente ao anteparo. As capturas foram feitas a cada rotação do mecanismo e foram devidamente identificadas. No total foram obtidas 19 imagens, de 0° a 180° . O objeto escolhido foi uma flor, feita em madeira com dimensões de $89mm \times 37mm$, como podemos observar na figura 11.

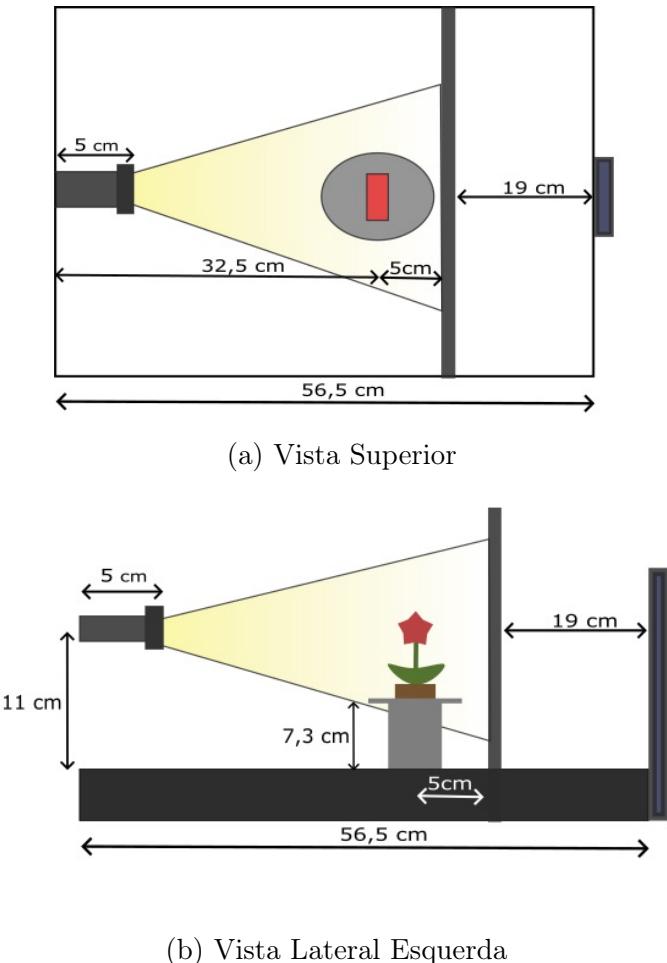


Figura 10 – Esquema de montagem experimental para aquisição das imagens



Figura 11 – Montagem experimental para aquisição das imagens - a) Objeto utilizado e suas dimensões; b) Posicionamento do sistema de montagem para aquisição das imagens

4.1.3 Enquete com alunos da UFABC

Um dos principais objetivos deste projeto concentra-se em elucidar os conceitos de tomografia computadoriza nos cursos de Física Médica 1 e Imagens médicas, oferecidos pela UFABC. A fim de compreender melhor as dificuldades de ensino e aprendizagem no curso de engenharia biomédica na UFABC, bem como avaliar as contribuições de equipamentos didáticos, foi elaborado um questionário, utilizando a plataforma *GoogleForms*, para os estudantes e professores a respeito da metodologia de ensino adotada no curso e o nível de conhecimento a respeito da técnica de tomografia computadorizada. Os resultados desta enquete podem ser observados na seção Resultados e Discussão deste trabalho.

5 Resultados e Discussões

5.1 Enquete com alunos da UFABC

Foi elaborado um formulário na plataforma Google Forms e enviado aos alunos da engenharia biomédica da universidade federal do ABC. No total foram obtidas 20 respostas, sendo 68,4 % de alunos regularmente matriculados, 21,1 % ex-alunos e 10,5 % docentes. Abaixo está representado o resultado das respostas coletadas e análise.

1. Como você avalia a sua compreensão dos conceitos de TC apresentados nas disciplinas de Princípios de Imagens Médicas e Física médica 1?

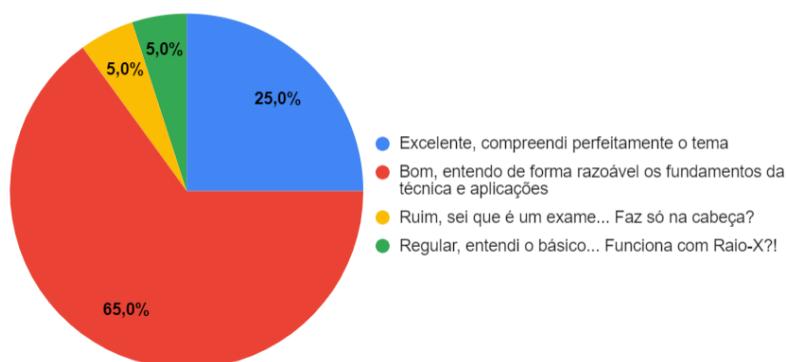


Figura 12 – Gráfico de respostas para pergunta 1 - Compreensão dos conceitos de TC

2. Você considera que a atual explicação teórica da TC na disciplina Física Médica 1 é suficiente, ou você gostaria de adicionar alguma sessão prática de laboratório, onde você tenha a oportunidade de adquirir e reconstruir imagens usando equipamentos didáticos?

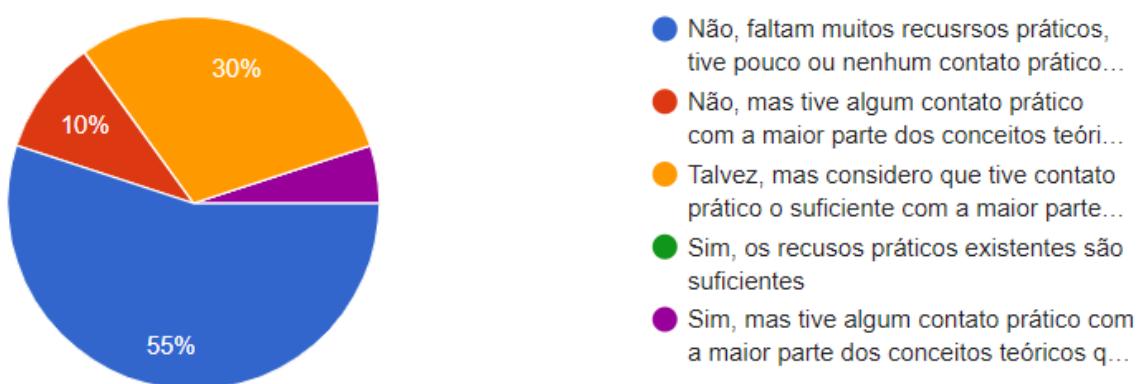


Figura 13 – Gráfico de respostas para pergunta 2 - Adição de sessões práticas nas disciplinas que abordam o tema de TC

3. Você comprehende bem os conceitos de Reconstrução tomográfica?

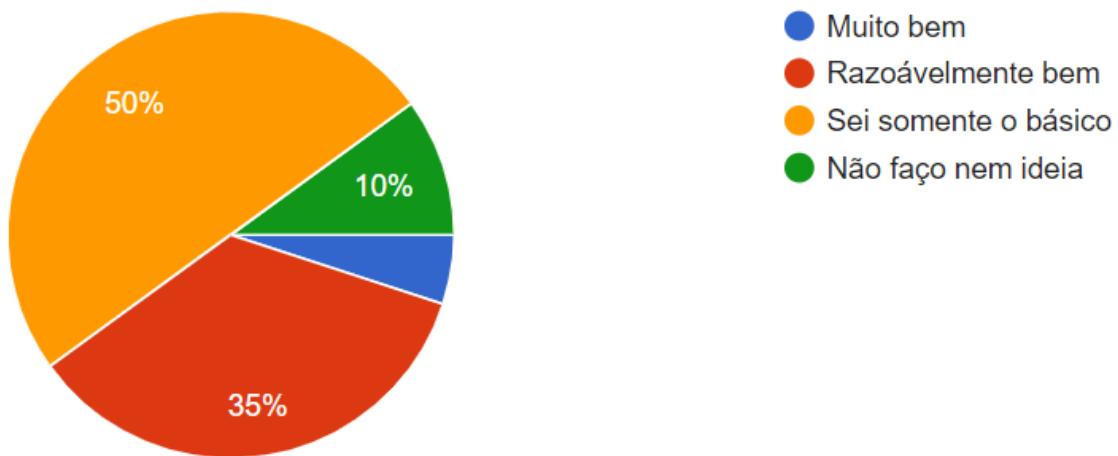


Figura 14 – Gráfico de respostas para pergunta 3 - Compreensão do tema de Reconstrução Tomográfica

4. Você considera que teve dificuldades em compreender os conceitos envolvendo Tomografia Computadorizada?

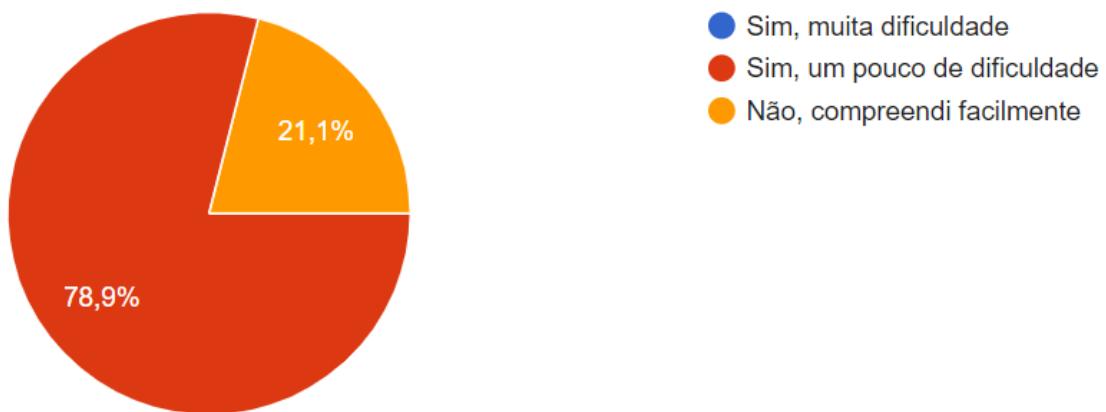


Figura 15 – Gráfico de respostas para pergunta 4 - Dificuldades em compreender TC

5. Você acredita que se tivesse um contato mais próximo, com equipamentos didáticos, você compreenderia melhor o tema?



Figura 16 – Gráfico de respostas para pergunta 5 - Relevância de equipamentos didáticos na graduação

Os questionamentos mostrados acima tinham como finalidade principal mapear as dificuldades dos estudantes na compreensão dos conteúdos em torno da Tomografia computadorizada, bem como verificar se há interesse por parte da comunidade acadêmica em ter um contato prático por meio de equipamentos didáticos. Neste sentido, com base nas respostas podemos notar que muitos estudantes apresentaram algum tipo de dificuldade na aprendizagem do tema, conforme demonstrado na pergunta 4, onde 78,9% admitiram ter algum tipo de dificuldade no tema. Apesar de mais da metade dos entrevistados demonstrar um bom entendimento dos conceitos de TC, como se pode notar na figura 12, todos os participantes concordaram que o contato com equipamentos didáticos que aproximem os conceitos teóricos da prática facilitariam e trariam melhor compreensão do tema.

5.2 Reconstrução Tomográfica

A reconstrução tomográfica foi realizada por meio de um algoritmo escrito em Python, que pode ser acessado por meio do link ou QR code a seguir: Trabalho de Graduação - I.Kobb.



Figura 17 – QR Code para acessar o código de reconstrução tomográfica

Com as imagens capturadas por meio da rotação da amostra, de 0° até 180° graus, em passos de 10° graus, foi formada uma matriz de três dimensões, sendo elas definidas pelo eixo x, eixo y e o grau de rotação do objeto. Foi realizado um pré-tratamento das imagens, de modo que foram convertidas para escalas de cinza, além disso, as fotos possuíam, originalmente, 4000×3000 píxeis, a fim de facilitar o processamento, foram cortadas em uma região de interesse, todas no mesmo local, reduzindo seu tamanho para 1550×1550 , conforme a figura 18.

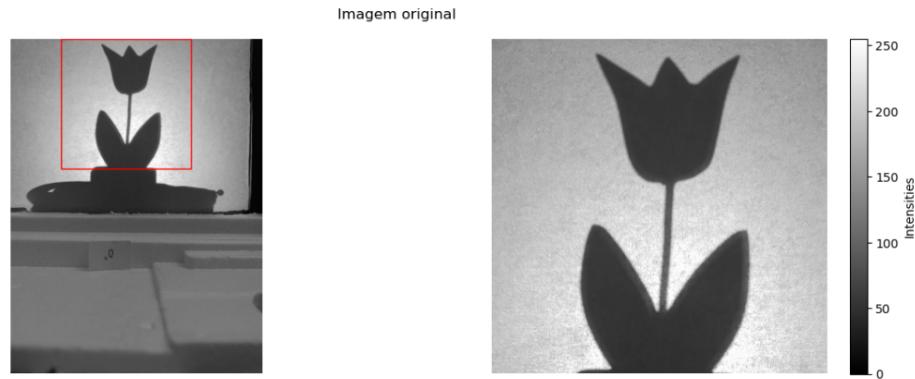


Figura 18 – Imagem cortada em uma região de interesse

Mesmo com a redução do tamanho, por meio do corte, o volume de dados a serem processados ainda era muito extenso, exigindo um elevado tempo computacional para o processamento das imagens, desta forma foi necessário reduzir a resolução da imagem por meio de uma redução da matriz da dimensão da matriz de dados em 50 %. Como se pode notar na figura 19 a olho nu não é possível notar perdas muito significativas para a visualização da imagem, bem como seus contornos e formas, mas é importante ter em mente que esta redução pode acarretar distorções no processo de reconstrução tomográfica, no entanto, como o propósito deste trabalho é produzir uma ferramenta didática, torna-se aceitável este tipo de limitação, sendo interessante até mesmo a sua análise, no futuro. A figura 20, mostra todas as projeções capturadas, já devidamente seccionadas e reduzidas.

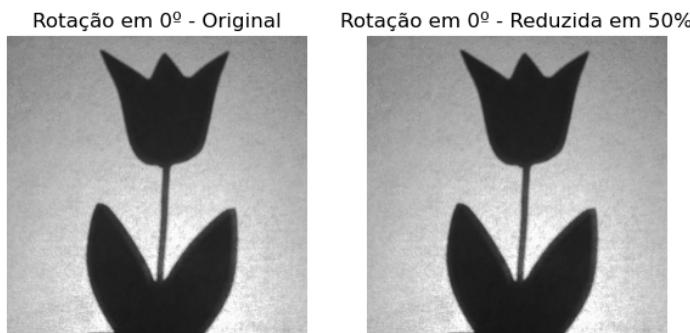
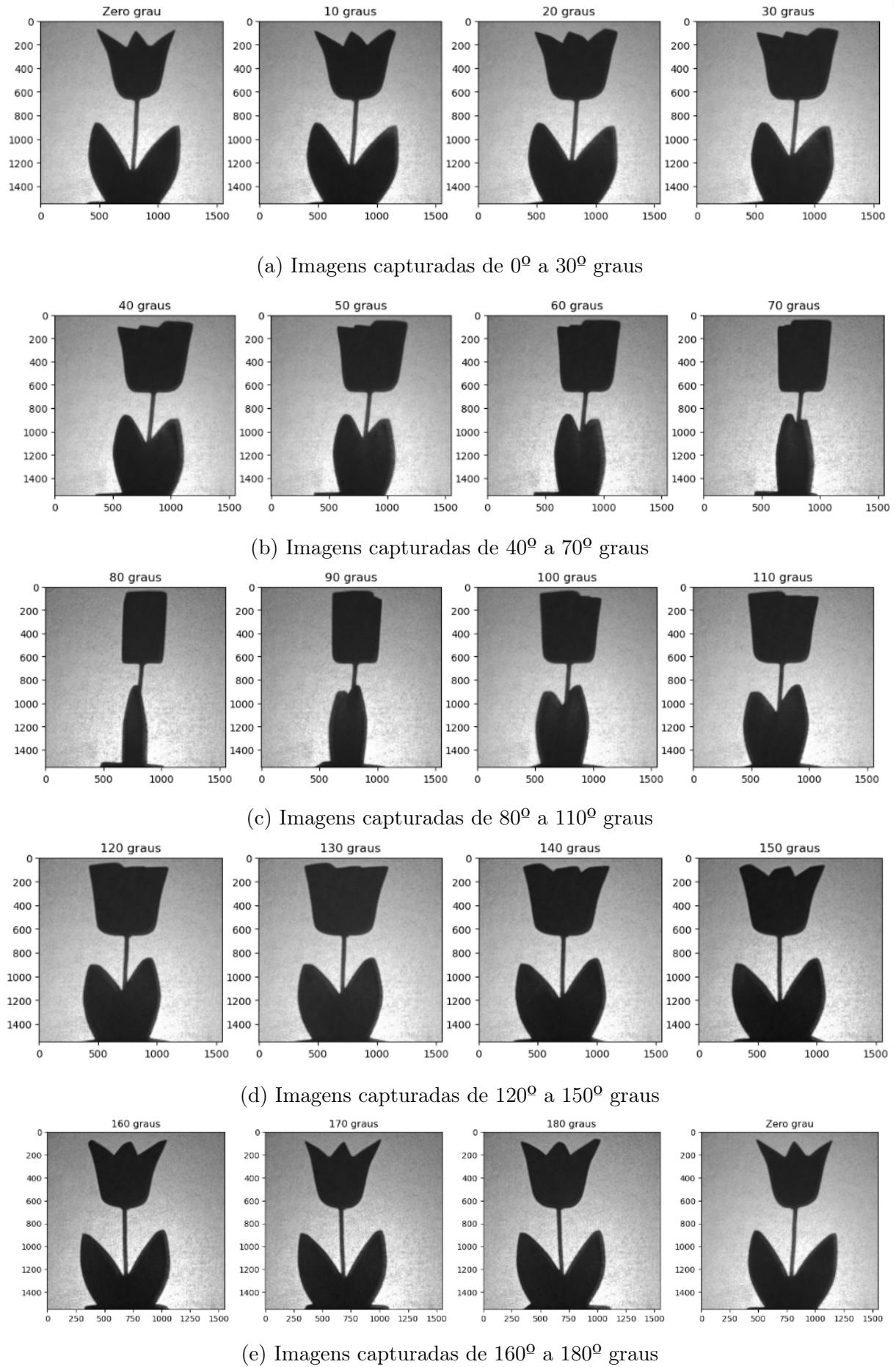


Figura 19 – Imagem reduzida

Figura 20 – Imagens capturadas de 0° a 180° graus

5.2.1 Processamento da imagem

Finalizado o pré-processamento das imagens, foi iniciado o processo de reconstrução tomográfica em si, realizada linha por linha, conforme mostra o algoritmo na figura 22, onde S é a matriz do sinograma, com tamanho de 775×19 . A figura 21 mostra um exemplo de sinograma, na faixa de 100 pixels, associado ao topo da flor.

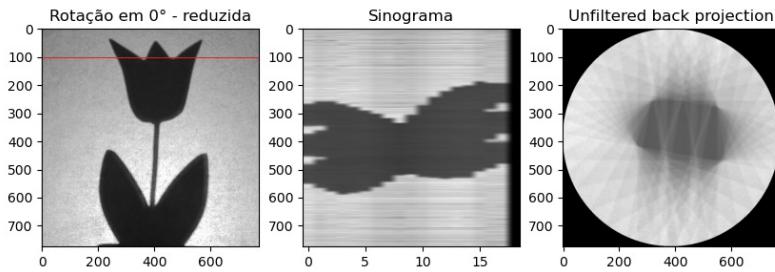


Figura 21 – Sinograma na faixa de 100 pixels - Topo da Flor

Duas matrizes 3D populadas com valores nulos, cada uma de tamanho $775 \times 775 \times 775$ voxels, foram criadas para manter os volumes reconstruídos para casos filtrados e não filtrados. Cada linha r das imagens possui a mesma quantidade de linhas de elementos das imagens originais, formando um conjunto de imagens, R , retirando a linha r de cada uma das 19 imagens. V_r representa a r -ésima fatia do volume reconstruído. A reconstrução filtrada e não filtrada produz, cada uma, uma única fatia do objeto 3D. À medida que cada fatia é calculada, ela é armazenada na matriz 3D relevante. Neste trabalho foi aplicado o filtro *Ramp*, onde é realizada a remoção de componentes de baixa frequência na imagem, que tendem a causar desfoco. A filtragem aplica um filtro de rampa no domínio da frequência 1D a cada coluna do sinograma.

Algoritmo 1: Algoritmo de Reconstrução	
Dados:	19 imagens de tamanho (775x775)
Resultado:	Reconstrução volumétrica
<hr/>	
for	Cada imagem, R , definida por coluna r de 0 ate 774
do	
	Construa S de R ;
	Reconstrução da fatia V_r utilizando a Transformada de Radon em S com e sem filtro;
	Armazene as fatias V_r na matriz tridimensional
end	

Figura 22 – Algorítimo de Reconstrução

A figura 23 apresenta os estágios do processo de reconstrução rotulados de a a h. Na caixa pontilhada é mostrado como foram construídas as matrizes do sinograma, para a transformada inversa do Radon. Para construir um sinograma para a linha r , os valores da escala de cinza da linha r de cada imagem foram alocados como colunas de uma nova matriz, as 19 projeções criam 19 colunas na matriz para a linha r , e um vetor com os ângulos, que também é necessário para a transformação.

Finalizado o processo de reconstrução, utilizando o *software 3D Slicer* foi obtida a visualização em 3D do objeto reconstruído, para tal foi plotado o histograma da reconstrução e identificado um limite para segmentação de volume, encontrando os valores de escala de cinza de *voxel* menores que 0. A máscara binária 3D foi salva no formato .nrrd para importação para o *3D Slicer*. Foram removidos alguns pequenos volumes não conectados à flor principal, criando uma nova máscara com os voxels da classe principal. Por fim foi exportado um arquivo .nrrd para .stl no *3D Slicer* e aberto no software Blender para visualização. O volume tridimensional final foi impresso em 3D, em parceria com o projeto PISA (plataforma de imagem na Sala de Autópsia), utilizando de uma impressora 3D, feita em filamentos de plástico ABS, com o apoio do Dr Khalil (FM USP).

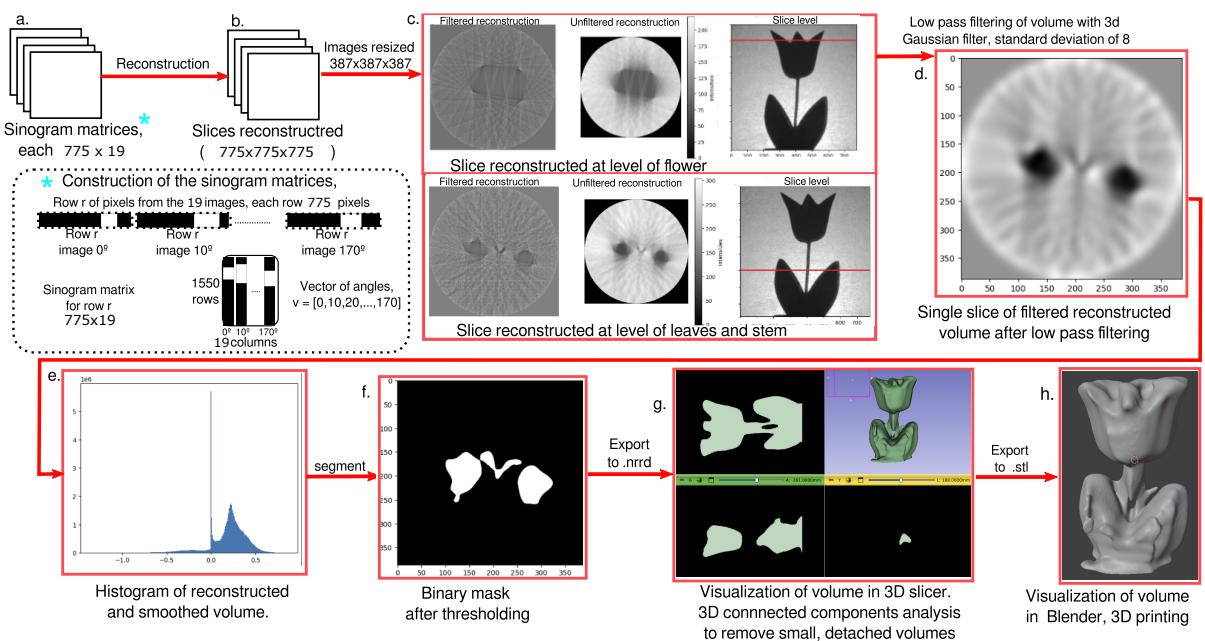


Figura 23 – Fluxo dos estágios de processamento das imagens.

5.2.2 Resultados da Reconstrução Tomográfica

Realizada a transformada de *Radon* inversa obteve-se a reconstrução tomográfica do objeto em 3 dimensões. Na figura 24 abaixo pode-se observar a reconstrução de algumas fatias do objeto, onde se pode notar o resultado da imagem sem a presença de filtros e também utilizando um filtro "*ramp*". Ao lado de cada cadeia de imagens foi demonstrado a região do objeto onde foi extraída a reconstrução. Nas projeções obtidas sem o uso de filtros pode-se notar que as regiões mais escuras são aquelas relacionadas diretamente ao objeto, mas também é notável um baixo contraste ao longo de toda a imagem, observa-se ainda uma elevada presença de ruídos, em decorrência do número reduzido de projeções utilizadas, além do processo de redução da imagem, mencionado anteriormente. É perceptível na figura 24 a presença de algumas sombras, em especial na figura 24dd, e evidenciado por meio de setas vermelhas na figura 25.

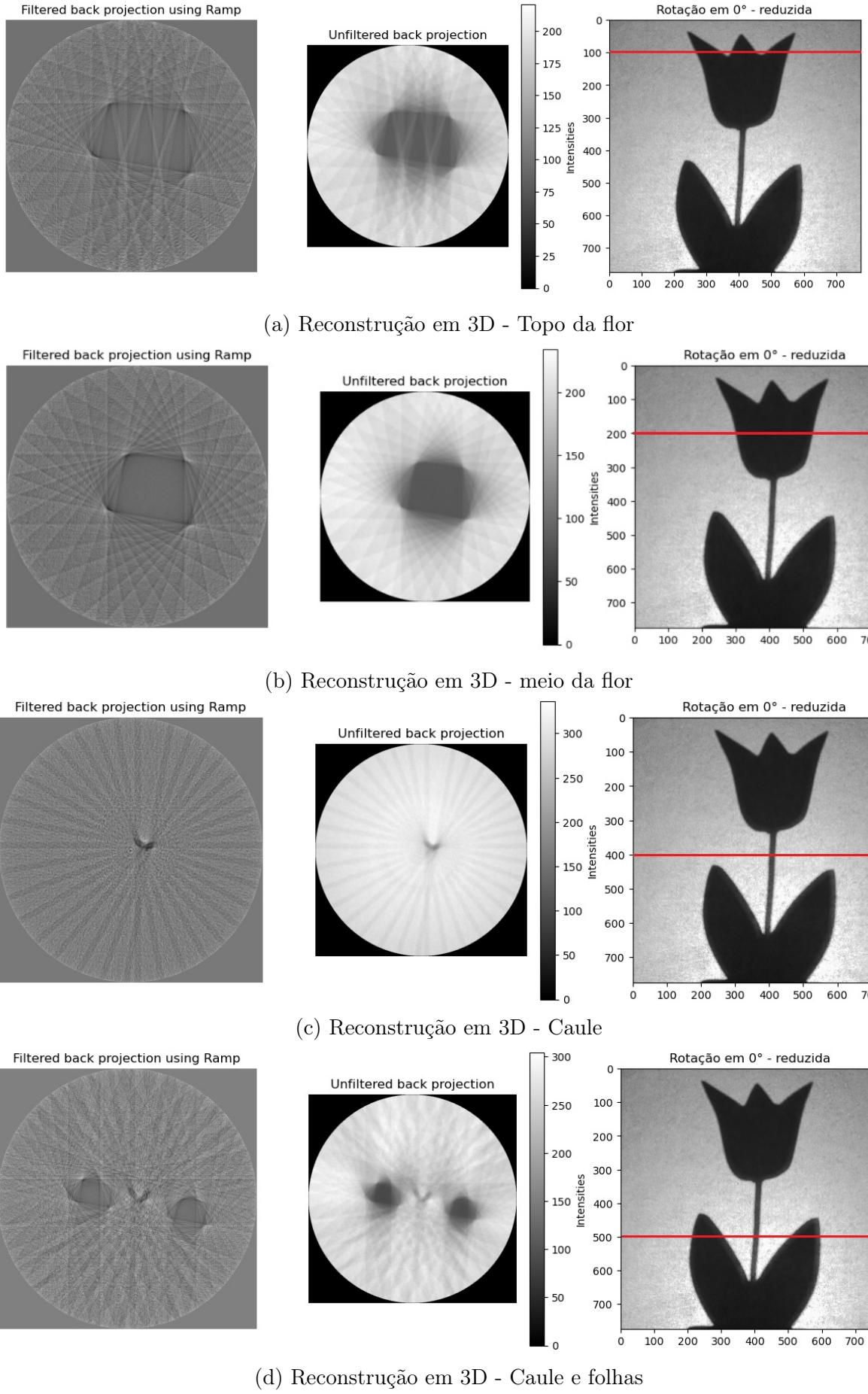


Figura 24 – Reconstrução em 3D

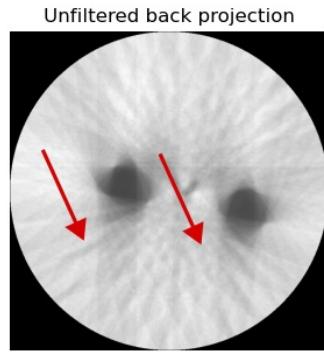


Figura 25 – Sombras na Reconstrução Tomográfica

Outro fator importante de ser pontuado é o fenômeno da amplificação, diretamente relacionado com a fonte de luz, já que o feixe de luz é distribuído em leque, conforme esquema mostrado na figura 26, e não raios paralelos, gerando distorções na projeção da sombra no anteparo, mudando as dimensões reais do objeto. Para tentar minimizar este efeito, o objeto foi posicionado tão perto quanto possível da superfície opaca.

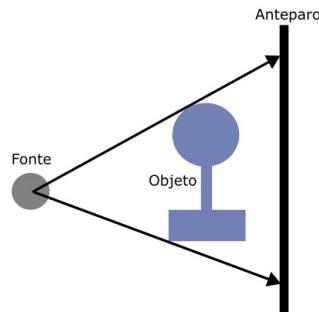


Figura 26 – Incidência de luz em leque

5.3 Etapas futuras

No futuro esperamos utilizar um Raspberry Pi (RPi) para controlar o ângulo de rotação do objeto e adquirir imagens para um determinado conjunto de ângulos, além de criar um link wi-fi entre o RPi e um notebook para serem carregadas sem a necessidade do uso do cartão de memória. Gostaríamos também de desenvolver um software para tornar o processo de reconstrução tomográfica mais transparente, para possibilitar ao aluno uma compreensão mais aprofundada desse processo. Gostaríamos de realizar a colimação da fonte de luz, de modo que apenas raios quase paralelos fossem adquiridos. Além disso, seria interessante a realização de estudos considerando diferentes objetos, com diversos níveis de opacidade a fim de elucidar melhor o processo de atenuação no processo de reconstrução tomográfica, como ocorre de fato na TC e em exames de Raio-x. Devido

à natureza deste tipo de trabalho, a partir de seu uso em sala de aula, diversas outras aplicações e desafios podem ser criados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste projeto foi possível compreender a necessidade do uso de equipamentos didáticos como ferramenta para o ensino de engenharia. O equipamento didático desenvolvido neste projeto, construído utilizando materiais de fácil obtenção e luz visível, mostrou-se eficaz para abordar os conceitos de TC de forma prática, além de elucidar aos usuários o processo de reconstrução tomográfica por meio do desenvolvimento de um software capaz de criar reconstruções em 3 dimensões a partir de projeções obtidas em 2 dimensões. Além disso, com os resultados obtidos no processamento da imagem, também foi possível avaliar a limitações da técnica e erros associados.

Referências

- 1 GONZALEZ, R. C. *Digital image processing*. [S.l.]: Pearson education india, 2009.
- 2 BARBOSA, E. F.; MOURA, D. d. Metodologias ativas de aprendizagem no ensino de engenharia. In: *Anais International Conference on Engineering and Technology Education, Cairo, Egito*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 13, p. 110–116.
- 3 NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2023. *Wilhelm Conrad Röntgen – Biographical*. 2023. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/biographical/>>. Acesso em: 05/06/2023.
- 4 CARVALHO, A. C. P. *História da tomografia computadorizada*. 2018. <<http://imaginologia.com.br/dow/upload%20historia/Historia-da-Tomografia-Computadorizada.pdf>>. Acesso em: 28/06/2023.
- 5 RADON, J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Physische Klasse*, v. 69, p. 262–277.
- 6 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.
- 7 KAK, A. C.; SLANEY, M. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press. 1988. <<https://www.cin.ufpe.br/~tg/2012-2/lgrc.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2023.
- 8 CARR, J. J. *Biomedical Equipment: Use, Maintenance, and Management*. [S.l.]: Prentice Hall, 1992.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 SILVA, L. P.; CECÍLIO, S. A mudança no modelo de ensino e de formação na engenharia. *Educação em Revista*, n. 45, p. 61–80, jun. 2007. ISSN 0102-4698. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-46982007000100004&lng=pt&tlang=pt>.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 GONSALES, P. et al. Design thinking e a ritualização de boas práticas educativas. *São Paulo: Instituto Educadigital*, 2018.

- 15 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.
- 16 HOUNSFIELD, G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *British Journal of Radiology*, v. 46, n. 552, p. 1016–1022, 01 2014. ISSN 0007-1285. Disponível em: <<https://doi.org/10.1259/0007-1285-46-552-1016>>.
- 17 MARGOTTI, F. *Problemas Inversos*. 2023. <<https://fabiomargotti.paginas.ufsc.br/pesquisa/problemas-inversos/>>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- 18 CHAMEX. *Produtos CHAMEX - A4 75*. 2024. <<https://www.chamex.com.br/produtos/>>. Acesso em: 01 maio 2024.
- 19 DISTRIBUIDORA, S. P. *Papel Manteiga, Cristal ou Vegetal*. 2024. <<https://www.saopaulodistribuidora.com.br/produto/papel-manteiga-cristal-ou-vegetal#:~:text=Gramatura%3A%2035g%2Fm2.>> Acesso em: 01 maio 2024.

ANEXOS

Código em Python



Figura 27 – QR Code para acessar o código de reconstrução tomográfica