

Scanner 3D para Cálculo de Volume de Objetos

Gabriel de França Picinato* Gustavo Chemin Ribeiro**
Gustavo Padovam Ferreira***

* Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, PR, (e-mail: gabrielpicinato@alunos.utfpr.edu.br).

** Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, PR, (e-mail: gustavochemin@alunos.utfpr.edu.br.)

*** Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, PR, (e-mail: gustavopadovam@alunos.utfpr.edu.br).

Abstract: This paper presents the development of a 3D Scanner system aimed at determining the most effective methodology for calculating the volume of objects. The system employs an infrared sensor to capture the distances from the sensor to the object, subsequently generating a point cloud that represents the object's surface. The proposed methodologies for volume calculation are based on algorithms and geometric computations derived from the collected data. The paper discusses the system's implementation stages, including data acquisition, point cloud processing, and volume calculation. Experimental results are presented to validate the system's efficiency and accuracy across various test scenarios, highlighting its advantages and limitations.

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de Scanner 3D com o intuito de verificar a melhor metodologia encontrada para o cálculo do volume de objetos. O sistema utiliza um sensor infravermelho para capturar as distâncias do sensor ao objeto e posteriormente gerando uma nuvem de pontos que representa sua superfície. As metodologias proposta para o cálculo do volume baseiam-se em algoritmos e cálculos geométricos a partir dos dados obtidos. O artigo discute as etapas de implementação do sistema, incluindo a captura dos dados, processamento da nuvem de pontos e cálculo do volume. Resultados experimentais são apresentados para validar a eficiência e precisão do sistema em diferentes cenários de teste, destacando suas vantagens e desvantagens.

Keywords: 3D Scanner, 3D Modeling, Volume Calculation, Engineering, Computation.

Palavras-chaves: Palavras-chave: Scanner 3D, Modelagem 3D, Cálculo de Volume, Engenharia, Computação.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de digitalização e modelagem 3D emergiu como uma ferramenta revolucionária em muitos campos, destacando-se nas áreas de engenharia, arquitetura, medicina e entretenimento. Essa tecnologia não apenas captura objetos tridimensionais e o ambiente, mas também converte essas informações em um design interativo. Esses modelos fornecem insights e permitem pesquisas, o que incentiva a inovação que substitui os métodos tradicionais.

No contexto deste artigo, o objetivo é utilizar um scanner 3D no processo de cálculo da quantidade do produto, tarefa importante em muitas disciplinas. A apuração de factos é importante para melhorar as práticas contabilísticas, desenvolver métodos de controlo de qualidade, etc. A precisão alcançada com a digitalização 3D supera as limitações dos modelos tradicionais.

O objetivo deste estudo é entender a melhor forma de calcular o volume utilizando o sensor infravermelho Sharp e identificar e analisar os principais problemas que podem

afetar a precisão do cálculo. Além disso, a modelagem 3D oferece uma maneira valiosa de visualizar e manipular objetos em um ambiente digital. Este método não apenas melhora a qualidade e a precisão das medições, mas também expande a aplicação.

Além disso, são apresentados os resultados que podem ser usados para decidir qual método é adequado para os materiais utilizados no projeto..

2. ARTIGOS RELACIONADOS

A ideia de determinar volumes de objetos é um tema bastante discutido ao redor do mundo por diferentes motivações. Assim, diversos estudos já foram conduzidos acerca do assunto, tendo isso em vista, alguns trabalhos foram utilizados como suporte para fundamentar um método para este projeto.

2.1 A comparative analysis of two point cloud volume calculation methods, Li et al. (2019)

Esse artigo traz duas propostas para cálculo do volume de um objeto usando nuvem de pontos e o método das

¹ Reconhecimento do suporte financeiro da Fundação de Apoio a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (FUNTEF-PR)

camadas (ou fatias). O primeiro método abordado utiliza da aproximação de uma área irregular por triângulos, que são formados por dois pontos adjacentes da superfície e pelo centro de gravidade dessa área. Entretanto, o artigo apresenta também algumas limitações relacionadas a esse método, como o cálculo da área de camadas de polígonos acentuadamente côncavos, que deixa de ser totalmente confiável por conta da possibilidade de um dos triângulos englobar uma área que não pertence àquela fatia. Nesse contexto, os autores do artigo apresentam uma nova proposta baseada no método dos determinantes, que utiliza apenas os pontos obtidos da superfície do objeto, independentemente de seu centro de gravidade e superando a problemática da primeira alternativa. Ambos os métodos calculam o volume utilizando duas áreas consecutivas e a diferença de altura entre elas, repetindo o processo até alcançar o topo do objeto.

2.2 Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos, Groetelaars and Amorim (2011)

Esse artigo, por sua vez, apresenta a importância do escaneamento e modelagem 3D a partir de uma nuvem de pontos no âmbito da arquitetura. Os autores defendem que finalidades como medição, visualização tridimensional e animação, por exemplo, podem utilizar o recurso da modelagem 3D usando nuvem de pontos. O artigo ainda cita a importância da filtragem e simplificação de pontos, uma vez que conhecendo o comportamento geral de uma superfície, é possível determinar quais pontos são ou não confiáveis. No contexto deste projeto, o artigo serviu como base de estudo para determinar os processos a serem seguidos para *plotar* uma nuvem de pontos fiel ao objeto escaneado.

2.3 A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data, Bienert et al. (2014)

Finalmente, esse artigo apresenta uma abordagem alternativa para calcular volumes utilizando nuvens de pontos, baseada na utilização de *voxels*, que podem ser entendidos como "pixels tridimensionais". O algoritmo proposto transforma cada ponto da nuvem em um *voxel* para definir uma superfície. Em seguida, o espaço delimitado por esses pontos é preenchido com *voxels* adicionais, permitindo o cálculo do volume total por meio da soma dos volumes individuais dos *voxels*.

Um parâmetro crucial para essa técnica é o *voxel size* (tamanho do *voxel*), que define a dimensão da aresta de cada *voxel*. A escolha adequada do *voxel size* depende do espaçamento entre os pontos da nuvem. Para nuvens de pontos mais densas, *voxels* menores são suficientes para obter uma estimativa precisa do volume. Por outro lado, para nuvens com pontos mais espaçados, *voxels* maiores são necessários para garantir o fechamento efetivo da superfície e uma medição volumétrica adequada.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta para o desenvolvimento do scanner 3D é sintetizada no fluxograma e diagrama de blocos

ilustrados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Essa metodologia foi concebida para calcular volumes aproximados de objetos regulares com boa precisão. O sistema é constituído por uma mesa giratória e um sensor de distância, responsável por capturar as coordenadas polares dos pontos na superfície do objeto. O processo inicia-se com o scanner registrando dados em uma altura fixa enquanto a mesa completa uma rotação. Após cada rotação, uma haste eleva gradualmente o sensor, permitindo a captura de uma nova camada de dados a uma altura ligeiramente superior. Esse ciclo é repetido até que o scanner alcance o topo do objeto. Inicialmente, o volume foi estimado utilizando o "método das camadas", que calcula a área de cada seção transversal e o volume entre seções consecutivas. Em seguida, foi avaliada uma abordagem alternativa baseada em *voxels*, visando aprimorar a precisão dos resultados. Ao final de cada revolução, os dados são utilizados para gerar uma nuvem de pontos tridimensional, proporcionando uma representação espacial detalhada do objeto.

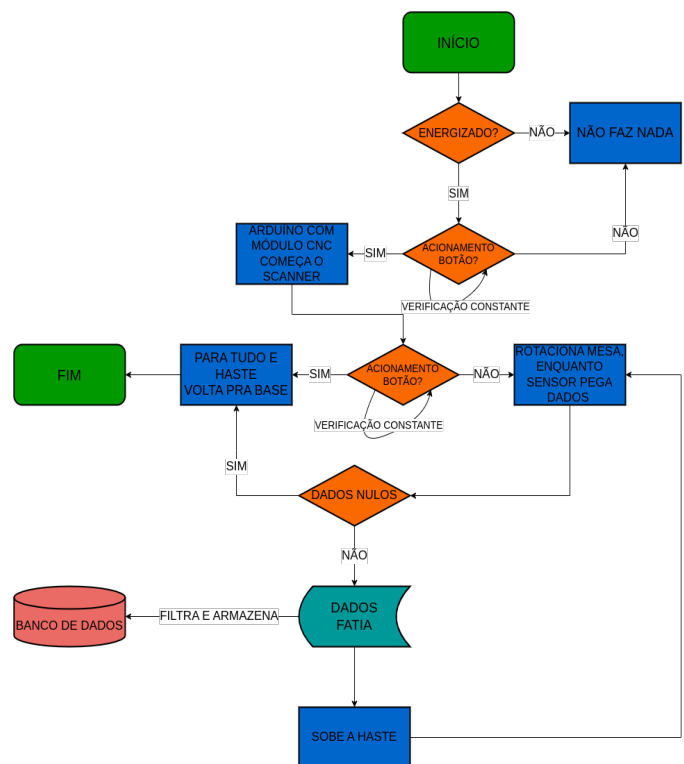


Figura 1. Fluxograma. Fonte: Autoria Própria

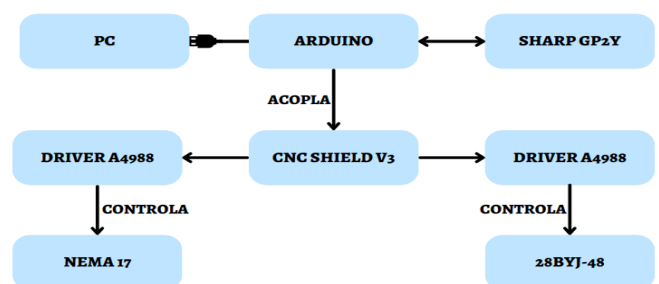


Figura 2. Diagrama de Blocos. Fonte: Autoria Própria

3.1 Hardware

Para o conjunto do scanner como um todo, foram utilizados diversos componentes eletrônicos, incluindo sensores, motores e um microcontrolador. Nos subitens a seguir, serão detalhadas com mais precisão as especificações técnicas e as funcionalidades desses componentes no contexto do projeto.

3.1.1. Arduino UNO

O *Arduino Uno*, apresentado na Figura 3, é uma placa de prototipagem eletrônica muito popular, usada por iniciantes e especialistas. Ele tem um microcontrolador que permite controlar *LEDs*, motores, sensores, entre outros. Sua popularidade se deve à facilidade de uso, graças à linguagem de programação simplificada baseada em *C/C++*. Na ocasião proposta, ele permite controlar os motores, o sensor e ainda fornece os dados necessários ao computador via comunicação serial.

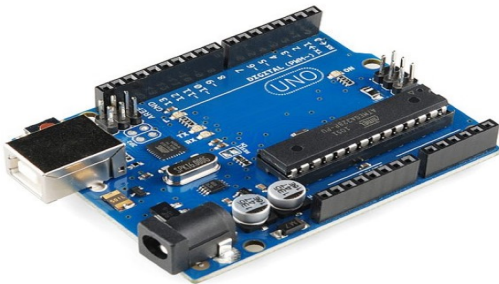


Figura 3. *Arduino UNO*. Fonte: Arduino e Cia.

3.1.2. Shield para Arduino - CNC V3

O *Shield CNC V3* (Figura 4) para *Arduino* é uma placa de expansão projetada para simplificar o controle de motores de passo. Compatível com o *Arduino Uno*, esta placa suporta drivers de motor, como o *A4988* (conforme mostrado na Figura 5), proporcionando um controle preciso e eficiente dos motores. Sua instalação é direta e descomplicada, e a robustez e durabilidade da placa a tornam uma solução prática e confiável para projetos de automação como esse.

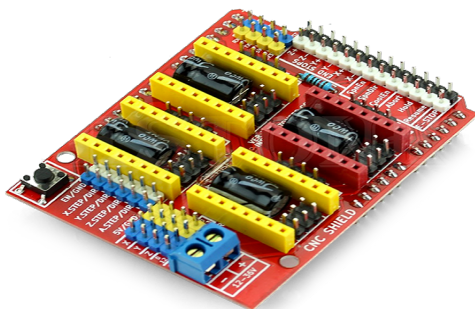


Figura 4. *Shield CNC V3*. Fonte: RoboCore.

3.1.3. Driver de Motor de Passo A4988

O *Driver A4988* (Figura 5) é um módulo de controle essencial para operar motores de passo bipolares, como o *NEMA 17* (Figura 7) e o *28BYJ-48* (Figura 6), que apesar de ser unipolar, pode ser modificado para operar como um motor bipolar. O driver permite o controle preciso do movimento do motor e a subdivisão dos seus passos, garantindo um movimento mais suave e preciso. Além disso, integra recursos de proteção contra sobrecorrente e superaquecimento, por meio do dissipador (também mostrado na Figura 5), aumentando a segurança e a longevidade do sistema.

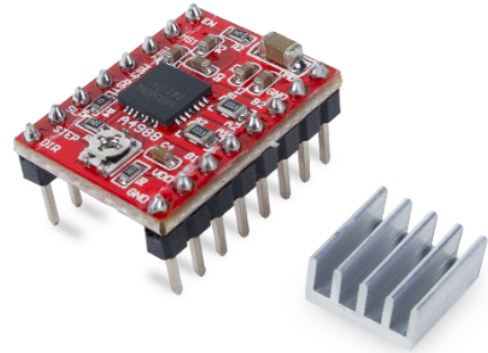


Figura 5. *Driver A4988*. Fonte: RoboCore.

3.1.4. Motor de Passo 28BYJ-48

O *Motor de Passo 28BYJ-48* (Figura 6) é conhecido devido à sua simplicidade e baixo custo. Este motor possui uma engrenagem interna que reduz a velocidade e aumenta o torque, tornando-o ideal para aplicação proposta nesse projeto. Um desafio importante foi adaptar o motor *28BYJ-48* para ser compatível com o *Shield CNC*, uma vez que este não foi projetado para esse motor. Para isso, realizamos uma modificação no motor, convertendo-o de unipolar para bipolar ao cortar a trilha entre o ponto médio da bobina e o terra. Essa alteração permitiu que o motor fosse utilizado com drivers de motores bipolares, como o *A4988*, utilizado neste projeto. Essa modificação foi crucial para integrar o motor ao sistema, mantendo a eficiência e a funcionalidade desejadas.

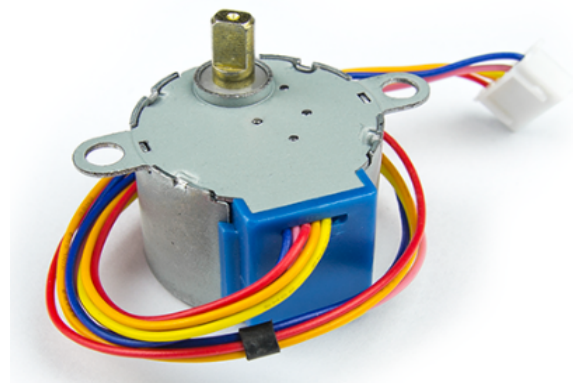


Figura 6. *Motor de Passo 28BYJ-48*. Fonte: RoboCore.

3.1.5. Motor de Passo NEMA 17

O *Motor de Passo NEMA 17*, demonstrado na Figura 7, possui um torque de retenção de 4,2 Kgf.cm. Este motor é capaz de fornecer força suficiente para a movimentação da *Haste Elevadora* (Figura 11). O motor é compatível com uma variedade de drivers, como o *A4988* (Figura 5), e sua construção robusta garante desempenho confiável, obtendo um equilíbrio entre força e precisão.

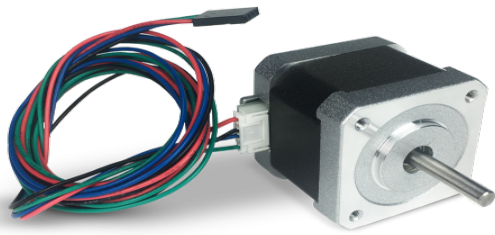


Figura 7. NEMA 17. Fonte: RoboCore.

3.1.6. Sensor Sharp GP2Y0A02YK0F

O *Sharp GP2Y0A02YK0F*, ilustrado na Figura 8, é um sensor de distância infravermelho que mede distâncias de 20 cm a 150 cm. O *Sharp* emite um feixe de luz infravermelha que reflete nos objetos e retorna ao sensor, calculando o tempo de detecção e com isso gerando uma saída analógica proporcional à distância. Conhecido por sua precisão razoavelmente boa, com variação de $\pm 5\%$, imunidade à luz ambiente e custo benefício. Perante aos gastos do projeto, foi o escolhido para a funcionalidade proposta.



Figura 8. Sharp GP2Y0A02YK0F. Fonte: Piscoaled.

3.2 Software

Nesta seção, explora-se as principais ferramentas de *software* empregadas no desenvolvimento do projeto.

Para controlar o Arduino e programar os componentes eletrônicos, utilizamos o *Arduino IDE*, na versão 2.3.2. Este ambiente de desenvolvimento integrado não apenas permite a escrita, compilação e envio do código diretamente para a placa Arduino, mas também simplifica a comunicação com os motores instalados na mesa e na haste, além de integrar-se ao sensor para a coleta de dados. O uso do monitor serial foi essencial para acompanhar e verificar as informações recebidas em tempo real.

Além disso, a coleta e análise dos dados obtidos via comunicação serial foram realizadas com o *PyCharm Projects*. Este ambiente de desenvolvimento *Python* oferece uma interface intuitiva e poderosa para a escrita e depuração dos códigos necessários. Os dados extraídos do Arduino foram submetidos a scripts específicos para filtrar as informações, calcular o volume do objeto escaneado e plotar a nuvem de pontos, resultando em uma visualização detalhada. Essa integração eficaz entre o hardware e o software foi fundamental para a realização das análises e para o sucesso do projeto.

3.3 Estruturas e Funcionamento

Nesta seção, é discorrido sobre as estruturas formadas pelos elementos descritos anteriormente, e como, ao serem combinados, constituem uma estrutura única com funcionamento coerente.

3.3.1. Caixa com Arduino, Shield CNC e Drivers

A caixa foi projetada com um foco especial na organização e proteção dos componentes. Ela garante que o *Arduino*, o *Shield CNC* e os *drivers* de motor de passo estejam montados e conectados de forma eficiente, oferecendo uma solução compacta que reduz a complexidade do cabeamento e protege os componentes contra danos físicos. Essa abordagem não apenas melhora a estética do sistema, mas também facilita a manutenção e evita problemas relacionados a cabos soltos ou danificados (ver Figura 9).

Para uma gestão eficiente da energia, a caixa é equipada com entradas de alimentação separadas para o *Arduino* e para o *Shield CNC*. Isso assegura que cada componente receba a energia necessária de maneira adequada, contribuindo para um desempenho mais estável e confiável.

Além disso, um botão integrado na caixa é responsável por gerenciar o estado do sistema com base em uma lógica de máquina de estados. Quando todos os componentes estão energizados e funcionando, o botão avalia o estado atual do sistema. Se o sistema estiver parado, pressionar o botão faz com que ele mude para o estado "executando". Por outro lado, se o sistema estiver em execução e o botão for pressionado, o estado será alterado para "parado", e a haste retornará automaticamente à posição base. Para uma compreensão mais visual e clara do funcionamento deste processo, consulte o fluxograma ou o diagrama de blocos apresentado nas Figuras 1 e 2 respectivamente.

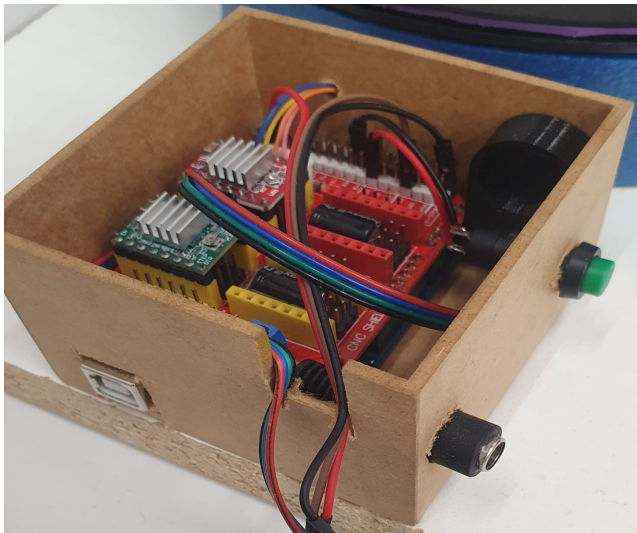


Figura 9. Caixa compacta. Fonte: Autoria Própria.

3.3.2. Funcionamento da Mesa Giratória

A mesa giratória representa o componente central do projeto, a modelagem foi baseada no modelo de Hassan (2017), sendo acionada por um motor de passo 28-BYJ-48. Este motor é controlado através de um driver A4988, que está integrado a um módulo CNC Shield V3. O módulo CNC Shield V3 é conectado a um microcontrolador Arduino UNO, permitindo a operação precisa e coordenada da mesa.

A estrutura mecânica da mesa é composta por uma engrenagem acoplada ao motor de passo, que proporciona o movimento rotacional. Acima da engrenagem, há uma tampa projetada para se encaixar perfeitamente, garantindo a proteção e estabilidade do sistema. Rolamentos são incorporados na construção da mesa para assegurar um movimento suave, minimizando o atrito e maximizando a precisão da rotação. A configuração e os componentes da mesa estão ilustrados na Figura 10, oferecendo uma visão mais ampla da montagem do sistema.



Figura 10. Mesa Giratória. Fonte: Autoria Própria

3.3.3. Funcionamento da Haste Elevadora

Assim como a mesa giratória, a haste elevadora é controlada por um motor de passo, porém a haste é com um NEMA 17 com torque de 4,2 Kgf.cm, que é acionado por

um driver A4988 conectado a um módulo CNC Shield V3. O motor está acoplado a um fuso trapezoidal por meio de uma presilha, garantindo uma conexão firme entre ambos. O movimento rotacional do motor é transformado em movimento linear por uma castanha acoplada ao fuso, permitindo que o sensor Sharp GP2Y0A02YK0F seja elevado ou abaixado. O sensor está fixado ao fuso por uma placa plástica, a qual é guiada por duas hastes metálicas lisas localizadas nas laterais. Essas hastes, equipadas com rolamentos lineares, facilitam o movimento vertical suave do sensor, conforme ilustrado na Figura 11. Seu formato foi baseado em NevonProjects (2024).

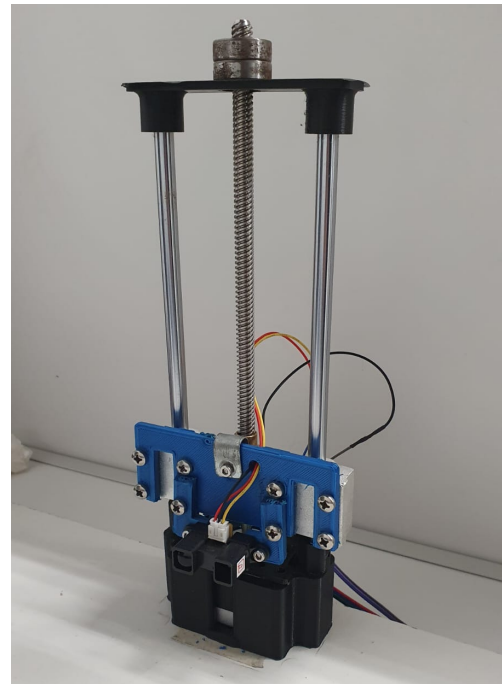


Figura 11. Haste Elevadora. Fonte: Autoria Própria

3.4 Aquisição e Transmissão de Dados do Sensor para o Computador

A aquisição de dados pelo sensor de distância é sincronizada com o movimento da mesa, sendo realizadas 211 medições de distância por revolução. A cada aproximadamente 1,7° de rotação da mesa, o sensor captura uma medição. Essa precisão é garantida pelo uso de um motor de passo com micropassos, proporcionando alta acurácia nas medições.

Os dados coletados são transmitidos do Arduino para o computador via comunicação serial. Durante essa transmissão, o Arduino converte as leituras do sensor na distância entre a superfície do objeto e o centro da mesa. Além das medições, o microcontrolador também envia sinais específicos para indicar quando uma revolução completa foi realizada ou quando uma revolução inteira passou sem que fossem obtidas medições válidas suficientes, indicando o fim da superfície do objeto.

3.5 Processamento dos Dados

Após a aquisição, os dados são armazenados em uma lista no computador para posterior processamento. Para

melhorar o cálculo do volume e a plotagem de pontos é aplicado um filtro de mediana nos dados coletados. Esse filtro funciona dividindo os dados em grupos de um tamanho predeterminado - no presente caso, 5 elementos - e para cada grupo, calcula-se a mediana.

Em seguida, cada valor dentro do grupo é comparado com a mediana. Se a diferença entre o valor e a mediana ultrapassar um determinado limiar, geralmente um percentual da própria mediana (nesse projeto, 30%), o valor original é substituído pela mediana. Caso contrário, o valor é mantido. Esse procedimento, ajuda a minimizar os ruídos e as emissões não condizentes providas da imprecisão do sensor. Ao final, todos esses dados são armazenados num arquivo ply.

3.6 Cálculo do Volume

Para este projeto, foram abordadas duas metodologias para estimação de volumes: método das camadas, Li et al. (2019), e o método da voxelização, Bienert et al. (2014).

3.6.1. Método das Camadas

Essa abordagem baseia-se na aproximação das áreas das diferentes camadas por meio de triângulos, onde o volume total é estimado pela soma dos troncos de cone formados entre áreas consecutivas. Esse método proporciona uma estimativa eficiente para objetos com geometria bem definida, no entanto, para objetos irregulares o método se mostrou pouco eficiente.

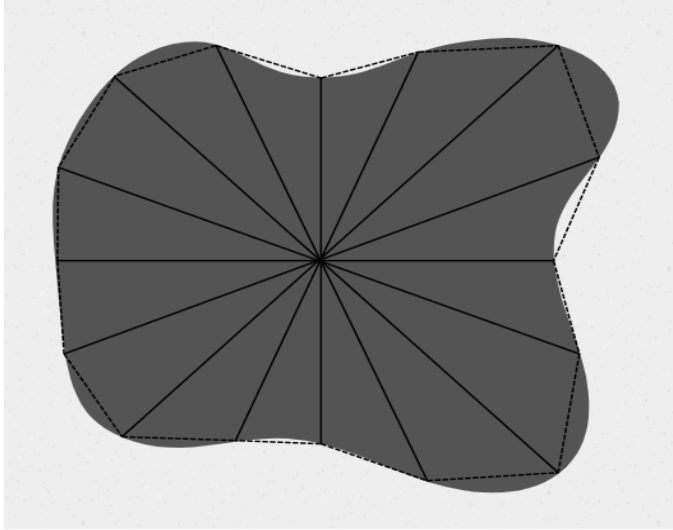


Figura 12. Aproximação da área de uma camada. Fonte: Autoria Própria

A Figura 12 representa a área aproximada de uma camada - compreendida entre as linhas tracejadas - e a área real dessa camada, em cinza escuro. No exemplo da figura, é representada uma área com 16 medidas tomadas, naturalmente, com o aumento do número de medidas, a precisão tende a aumentar também.

$$S_j = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{r_i \cdot r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{n}\right)}{2} \right) + \frac{r_0 \cdot r_n \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{n}\right)}{2}, \quad (1)$$

a equação (1) descreve o cálculo da área de uma camada, onde r_i representa a distância radial da superfície ao centro da mesa e n o número de disparos feitos pelo sensor a cada revolução.

$$V = \sum_{j=0}^{m-1} \left(\frac{S_j + S_{j+1}}{2} \cdot h \right), \quad (2)$$

por sua vez, a equação (2) possibilita o cálculo do volume total do objeto utilizando a área média de duas camadas consecutivas (S_j e S_{j+1}) e a altura (h) entre essas camadas. Onde m representa o número de camadas totais do objeto.

3.6.2. Método da Voxelização

Nesse método alternativo, os pontos da nuvem são transformados em *voxels*, como mostra a Figura 13. Dependendo do tamanho das arestas dos *voxels*, é possível fechar uma superfície com eles, para este projeto, o parâmetro *voxel size* (tamanho do *voxel*) usado foi de 1.55, escolhido experimentalmente com base nos resultados obtidos. Uma vez que a superfície está fechada, é feito o preenchimento dela com outros *voxels* (Figura 14), e assim é calculado o volume total, somando cada volume individual.

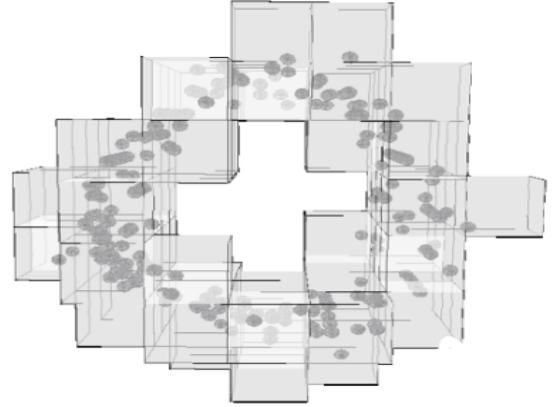


Figura 13. Transformação dos pontos em *voxels*. Fonte: Bienert et al. (2014)

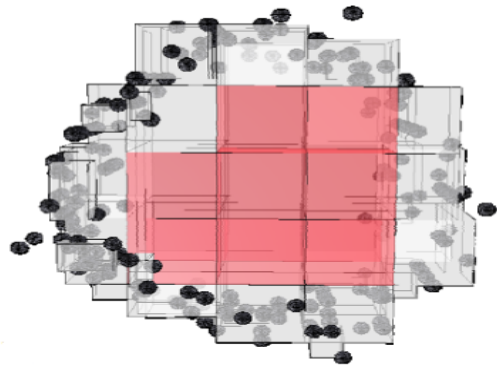


Figura 14. Preenchimento do colume com *voxels*. Fonte: Bienert et al. (2014)

3.7 Plotagem da Nuvem de Pontos

A plotagem da nuvem de pontos foi realizada utilizando a biblioteca *Open3D* do *Python*. As coordenadas cilíndricas foram transformadas em coordenadas cartesianas e adicionadas a uma lista de pontos, a qual foi *plotada* na tela a cada revolução da mesa. O processo seguiu a metodologia descrita por Groetelaars and Amorim (2011).

Como anteriormente mencionado, os dados são retirados de um arquivo *PLY* que foi salvo depois do fim do escaneamento do objeto, esse arquivo possui os pontos da nuvem, os quais são novamente retrabalhados para uma melhor visualização.

Ao dizer retrabalhado, refere-se na utilização de métodos para eliminação de pontos *outliers*, método de media móvel e interpolação. Inicialmente, os *outliers* foram removidos com o uso da biblioteca *UniformFilter* (2024) para garantir que a nuvem de pontos representasse fielmente o objeto escaneado, eliminando dados que poderiam introduzir distorções na visualização final. Em seguida, foi aplicado um filtro de média móvel em cada uma das dimensões (x, y, z), com o objetivo de suavizar a nuvem de pontos, reduzindo variações bruscas entre pontos adjacentes e resultando em uma representação mais uniforme. Para lidar com áreas onde havia lacunas ou fatias abertas na nuvem de pontos, foi utilizada uma técnica de interpolação. Nesta etapa, pontos nas fatias inferior e superior da nuvem foram emparelhados, e pontos intermediários foram gerados para preencher as lacunas, criando uma nuvem de pontos mais coesa e contínua. Essas técnicas, aplicadas de maneira sequencial, resultaram em uma nuvem de pontos de alta qualidade, ideal para análise detalhada e uma visualização mais apresentável.

Um comparativo dos pré e pós-processamentos mencionados nessa seção, é ilustrado nas Figuras 15 e 16 respectivamente.

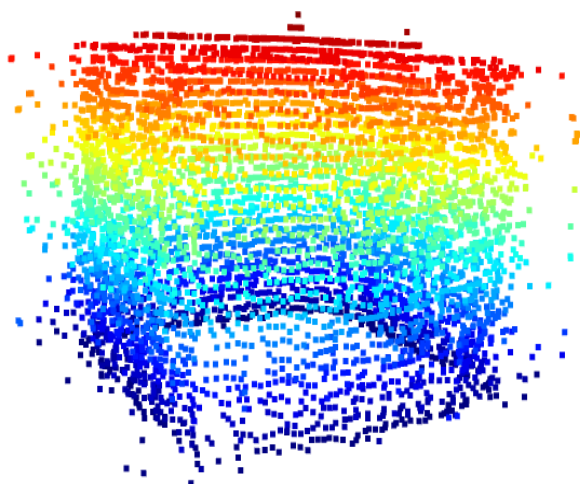


Figura 15. Cubo pré-processamento. Fonte: Autoria Própria

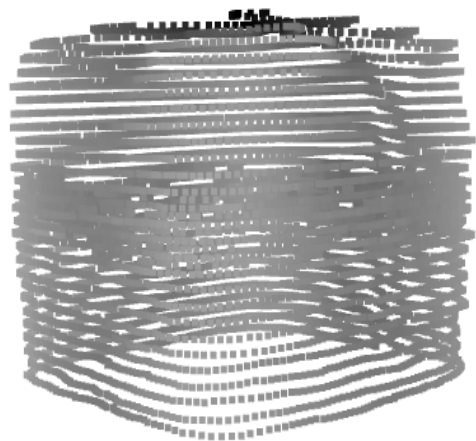


Figura 16. Cubo pós-processamento. Fonte: Autoria Própria

4. RESULTADOS

A fim de realizar uma validação dos métodos propostos, foi promovida uma seção de testes comparando o volume calculado e o volume real de diferentes objetos em variadas condições.

Com isso, os experimentos foram divididos com base no formato dos objetos, na cor e no brilho de seu revestimento externo, que influenciam na precisão da leitura dos dados pelo sensor, e, consequentemente, no cálculo do volume, mostrado na Subseção 3.6.

Para isso, foram feitas medidas com um cilindro de 5 cm de raio e 11.6 cm de altura, um cubo de 11 cm de aresta e uma pirâmide quadrada com 12 cm x 12 cm e 14.7 cm de altura, cada um com uma variedades de cores de revestimentos de papel camurça, um material pouco refletível, como preto, verde e branco, além do uso do papel laminado, um material de alta refletividade.

Na Tabela 1 são mostrados os dados obtidos com o cilindro e os seus respectivos materiais de revestimento externo pelo método das camadas, já na Tabela 2, são mostrados os resultados dos mesmos objetos e superfície, porém com o uso do método da voxelização.

Tabela 1. Cilindro - Camadas

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	873,24 cm ³	911,06 cm ³	95,85%
Camurça Verde	798,6 cm ³	911,06 cm ³	87,66%
Camurça Branco	820,14 cm ³	911,06 cm ³	90,02%
Laminado Verde	89,45 cm ³	911,06 cm ³	9,82%

Tabela 2. Cilindro - Voxelização

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	934,69 cm ³	911,06 cm ³	97,41%
Camurça Verde	890,01 cm ³	911,06 cm ³	97,69%
Camurça Branco	856,49 cm ³	911,06 cm ³	94,01%
Laminado Verde	127,45 cm ³	911,06 cm ³	13,99%

As Tabelas 3 e 4 mostram os resultados dos mesmos métodos, porém para um cubo. Nesse caso, o material refletivo

não foi mais testado, uma vez provada a ineficiência do sensor com esse tipo de superfície.

Tabela 3. Cubo - Camadas

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	1506,82 cm ³	1331 cm ³	86,79%
Camurça Verde	1566,08 cm ³	1331 cm ³	82,34%
Camurça Branco	1513,14 cm ³	1331 cm ³	84,96%

Tabela 4. Cubo - Voxelização

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	1225,15 cm ³	1331 cm ³	92,05%
Camurça Verde	1295,81 cm ³	1331 cm ³	97,36%
Camurça Branco	1303,36 cm ³	1331 cm ³	97,92%

Outro objeto estudado foi uma pirâmide. A escolha desse poliedro foi feita com a finalidade de estudar o comportamento do *scanner* na ponta da pirâmide, onde a faixa horizontal para tomada de medidas é consideravelmente pequena, por conta dessa finalidade, não foram considerados diferentes revestimentos nesse objeto. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos com a pirâmide nos métodos das camadas e da voxelização, respectivamente.

Tabela 5. Pirâmide - Camadas

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	561,15 cm ³	705,60 cm ³	79,53%

Tabela 6. Pirâmide - Voxelização

Material	Calculado	Teórico	Precisão
Camurça Preto	692,64 cm ³	705,60 cm ³	98,16%

Por fim, realizamos um escaneamento de um objeto côncavo e irregular, referenciado na Figura 17. Escolhemos esse teste para avaliar a capacidade de medir o volume de um objeto que seria difícil de quantificar com métodos convencionais, em contraste com os objetos previamente testados, os quais era possível adquirir o cálculo do volume teórico.

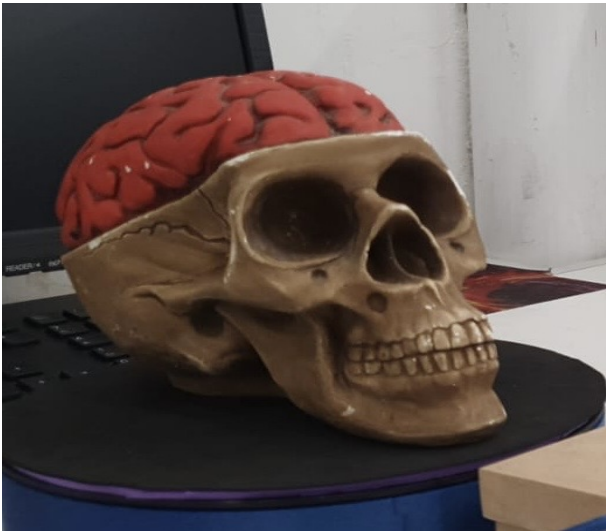


Figura 17. Crânio. Fonte: Autoria Própria

Na tabela 7, estão sendo apresentados os dados referentes às medições do volume pelo método de camadas e também pelo método da voxelização.

Tabela 7. Crânio

Volume Camadas	Volume Voxelização
1065, 11cm ³	1333, 64cm ³

Após todo o processamento de dados adquiridos do escaneamento do Crânio, além de todo o tratamento de filtragem já mencionado no artigo, o resultado da nuvem de pontos do respectivo objeto é representado pela Figura 18.

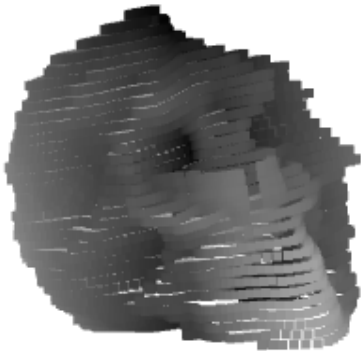


Figura 18. Nuvem de Pontos do Crânio. Fonte: Autoria Própria

5. CONCLUSÃO

Dessa forma, com base nos resultados e nas análises realizadas ao longo do artigo, foi constatado que o cálculo do volume por meio do Scanner 3D é significativamente influenciado por diversos fatores que impactam a execução dos procedimentos. Entre esses fatores, destacam-se a imprecisão e a alta variação dos dados captados pelo sensor, especialmente em função dos diferentes tipos de superfícies e revestimentos presentes. Tanto o Método das Camadas (Subseção 3.6.1) quanto o Método da Voxelização (Subseção 3.6.2) foram avaliados para contornar essas limitações.

Os testes realizados, conforme descrito na Seção 4, revelam que o cilindro apresentou ótimo desempenho em termos de precisão, o que pode ser atribuído à sua forma circular e distância radial constante, facilitando a interpretação dos dados. O cubo, embora também tenha gerado resultados positivos, apresentou dificuldades nas transições entre as faces, onde o sensor teve desempenho inferior. A pirâmide, por sua vez, trouxe desafios adicionais, pois o sensor perdeu precisão ao se aproximar do topo, devido à redução da área da superfície conforme a altura do objeto.

Em relação aos materiais de revestimento, o papel camurça mostrou-se eficaz para a captação de dados, uma vez que sua baixa refletividade diminuiu a variação entre as medições consecutivas, auxiliando na aplicação do filtro de mediana (Subseção 3.5). Em contraste, o papel laminado se mostrou ineficaz, com reflexões exageradas que resultaram em leituras distorcidas, com medições até duas vezes

maiores que a realidade. Quanto às cores, a variação foi menos significativa, mas a cor preta obteve os melhores resultados, seguida pelo branco e verde, com desempenhos similares.

Por fim, o método de voxelização demonstrou ser mais preciso do que o Método das Camadas, especialmente para objetos com superfícies irregulares e complexas. A representação volumétrica por voxels permitiu maior detalhamento na aproximação, o que foi especialmente útil ao lidar com as limitações do sensor Sharp GP2Y. Contudo, o sensor apresentou instabilidade para medições contínuas, comprometendo a precisão dos cálculos. Uma solução para esse problema seria a substituição do sensor Sharp GP2Y por um sensor de medição a laser mais confiável, como o LIDAR-Lite V3, que possui maior precisão e confiabilidade, sendo amplamente utilizado em drones.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da FUNTEF-PR (Fundação de Apoio a Universidade Tecnológica Federal do Paraná), que tornou viável a realização desse projeto, devido a extrapolação da previsão inicial dos gastos. Além disso, agradecimento ao *Laboratory of Statistical Signal Processing & Inverse Problems* (LASSIP), no qual possibilitou alguns materiais, apoio e estrutura para a realização desse projeto. Em especial gostaríamos de agradecer alguns integrantes do LASSIP: Daniel Santin, aluno da UTFPR que nos apoiou no processo de impressão 3D das partes do projeto; Vitor Hugo, aluno da UTFPR que nos deu a ideia da utilização do *Shield CNC*, uma virada de chave essencial para o projeto; Tatiana Prado, mestre da UTFPR que nos indicou caminhos de suavização da plotagem de nuvem de pontos.

REFERÊNCIAS

- Bienert, A., Hess, C., Maas, H.G., and von Oheimb, G. (2014). A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, 101–106. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-101-2014. URL <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5/101/2014/>.
- Groetelaars, N. and Amorim, A. (2011). Tecnologia 3d laser scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos 3d laser scanning technology: characteristics, processes and point cloud tools. URL https://www.researchgate.net/publication/275962667_Tecnologia_3D_Laser_Scanning_caracteristicas_processos_e_ferramentas_para_manipulacao_de_nuvens_de_pontos_3D_Laser_Scanning_Technology_characteristics_processes_and_point_cloud_tools.
- Hassan, O. (2017). 3d printed arduino rotating table with 28byj-48 stepper motor. URL <https://www.instructables.com/3D-Printed-Arduino-Rotating-Table-With-28BYJ-48-St/>.
- Li, B., Wei, J., Wang, Ma, B., and Xu, M. (2019). A comparative analysis of two point cloud volume calculation methods. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 3227–3246. doi:10.1080/01431161.2018.1541111. URL <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1541111>.
- NevonProjects (2024). 3d scanner machine using arduino. URL <https://nevonprojects.com/3d-scanner-machine-using-arduino/>. Accessed: 2024-08-31.
- UniformFilter, S. (2024). scipy.ndimage.uniform_filter1d. URL https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.ndimage.uniform_filter1d.html.