



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

SANDRO SILVA MOREIRA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SCANNER TRIDIMENSIONAL BASEADO
NO MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO A LASER UTILIZANDO SOFTWARES LIVRES**

Ilha Solteira

2016

SANDRO SILVA MOREIRA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SCANNER TRIDIMENSIONAL BASEADO
NO MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO A LASER UTILIZANDO SOFTWARES LIVRES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu
Orientador

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Moreira, Sandro Silva.

M838p Projeto e construção de um scanner tridimensional baseado no método de triangulação a laser utilizando softwares livres / Sandro Silva Moreira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
79 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2016

Orientador: Ruis Camargo Tokimatsu
Inclui bibliografia

1. Modelagem tridimensional. 2. Engenharia reversa. 3. Aquisição tridimensional. 4. Scanner 3D.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SCANNER TRIDIMENSIONAL
BASEADO NO MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO LASER UTILIZANDO
SOFTWARES LIVRES

AUTOR: SANDRO SILVA MOREIRA

ORIENTADOR: RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA
MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. CECILIA AMELIA DE CARVALHO ZAVAGLIA

Faculdade de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Prof. Dr. ANDRE LUIZ JARDINI MÚNHOZ

Faculdade de Engenharia Química / UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Ilha Solteira, 06 de dezembro de 2016

DEDICO

A minha amada esposa Eveline Gontijo Moreira por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, pela compreensão e todo incentivo.

As minhas queridas filhas Isabela e Isadora, pela compreensão da minha ausência em longos períodos de estudo e dedicação à essa pesquisa.

Aos meus pais José Moreira e Maria de Fátima, pelos valores transmitidos a mim e minhas irmãs sobre a busca do conhecimento desde a mais tenra idade, sem os quais não poderia ter chegado até aqui.

Aos amigos, alunos e colegas de trabalho da Universidade de Rio Verde - UNIRV

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu, pelos ensinamentos e orientação que foram muito importantes na realização deste trabalho e pelos conselhos que levarei para o resto da vida, transmitindo-os aos que necessitarem.

Ao colega Marcelo Augusto Rozan, que, desde o começo desse trabalho ajudou com a produção de peças através de impressão tridimensional

A Universidade de Rio Verde – UNIRV, nas pessoas do Magnífico Reitor, Prof. Dr. Sebastião Lázaro Pereira e do Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-graduação, Prof. Me. Nagib Yassin, pelo apoio e incentivo ao cumprimento da jornada de estudos.

Aos professores, Dr^a Cecília Amélia Zavaglia, Dr. Amarildo Paschoalini e Dr. Andre Luiz Jardim Munhoz, pelo atendimento ao convite de composição das bancas deste trabalho, pois suas considerações muito contribuíram para a melhoria do mesmo.

Aos professores da FEIS – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, especialmente do Programa MINTER (UNESP/UNIRV) de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Dr. Juno Gallego, Dr. Vicente Afonso Ventrella, Dr. João Batista Aparecido, Dr. José Luis Gasche e Dr. Wyser Yamakami, que não mediram esforços para ministrarem suas aulas e que muito contribuíram na construção do conhecimento necessário para a realização desse trabalho.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” – Isaac Newton

RESUMO

A modelagem tridimensional muito já contribuiu com a indústria do entretenimento e agora tem sido amplamente utilizada na manufatura e criação de novos produtos. A possibilidade de se ter um modelo de um produto a um preço menor e com uma maior rapidez tem feito essa técnica ser cada vez mais aceita em todas as áreas da engenharia. Quando já se tem um modelo real e deseja-se realizar alguma modificação, simulação ou mesmo replicar o produto, a engenharia reversa muito pode contribuir, pois permite a obtenção do modelo tridimensional a partir do objeto real. Os equipamentos de digitalização tridimensional têm um alto custo de investimento, mesmo os de baixa precisão. A comunidade de entusiastas de software e hardware livre busca também distribuir e popularizar o conhecimento compartilhando suas descobertas e contribuindo abertamente com outras iniciativas. Buscamos nesse projeto construir um scanner 3D utilizando software e hardware livre utilizando componentes de baixo custo e fácil aquisição, estabelecendo seus limites técnicos, estimulando assim a adoção de técnicas de engenharia reversa. O processo de calibragem, captura e pós tratamento da nuvem de pontos obtidas foi detalhado na construção de modelos para comparação de dimensões e levantamento de características da superfície do material.

Palavras-chave: Modelagem tridimensional. Engenharia reversa. Aquisição tridimensional.

ABSTRACT

The three-dimensional modeling has contributed much to the entertainment industry and has now been widely used in manufacturing and creating new products. The possibility of having a model of a product at a lower price and a higher speed have made this technique increasingly accepted in all fields of engineering. When there is already a real model and you want to make any changes, simulation or even replicate the product, reverse engineering can greatly contribute, as it allows to obtain three-dimensional model from the real object. The three-dimensional scanning equipment have a high investment cost, even low accuracy. The community of enthusiasts of open source and open hardware also distribute and popularize knowledge sharing his findings and openly contribute to other initiatives. We seek in this study, build a scanner 3D using free software and hardware components using low-cost and easy acquisition, establishing its technical limits, stimulating the adoption of reverse engineering techniques. The calibration, capture and post-treatment process of the cloud of points obtained was detailed in the construction of models for comparison of dimensions and survey of surface characteristics of the material.

Keywords: Three-dimensional modeling. Reverse engineering. Three-dimensional acquisition.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Taxonomia das Técnicas de Reconstrução Tridimensional	17
FIGURA 2 – Aquisição de Dados no Processo de Reconstrução 3D	17
FIGURA 3 – Grid Digital Cúbico	18
FIGURA 4 – Pixel (2D) versus Voxel (3D)	18
FIGURA 5 – Método de aquisição fatiamento de pinos para Implantes Dentários. ..	19
FIGURA 6 – Braço Articulado Digitalizador Microscribe®	20
FIGURA 7 – Máquina de Medição de Coordenadas com cabeça de leitura da Ranishaw ®	21
FIGURA 8 – Equipamento de Ressonância Magnética em Corte	22
FIGURA 9 – Tomografia Computadorizada (Gantry, PC e Esquema Interior do <i>Gantry</i>).....	23
FIGURA 10 – Fatias de Imagens e Modelo Tridimensional Construído com TC	24
FIGURA 11 – Ultrassonografia em 3D-4D	25
FIGURA 12 - Reconstrução Volumétrica 3D de Túneis com Imagens Obtidas por GPR.....	26
FIGURA 13 –Princípio do <i>Time of Flight</i>	27
FIGURA 14 – Cálculo da distância entre objeto e sensor	28
FIGURA 15 – Dispositivo Microsoft Kinect Sensor ®.....	28
FIGURA 16 – Geometria do Processo de Triangulação	29
FIGURA 17 – Projeção de Luz Estruturada	31
FIGURA 18 – Exemplos de Padrões de Luz Estruturada	32
FIGURA 19 – Interferometria (Franjas de Moiré)	33
FIGURA 20 – Formação das franjas de moiré pela sobreposição de retículos de linhas paralelas	34
FIGURA 21– Projeção das Franjas de Moiré sobre um Objeto	35
FIGURA 22– Visão Estéreo e Estimativa de Profundidade	37
FIGURA 23 – Geometria Estéreo.....	38
FIGURA 24 – Envoltória Visual Inferida com um processo de interseção de volumes cônicos definidos pelas silhuetas	40
FIGURA 25 – Aquisição de Formas por Movimentação/Rotação – Proposta de Sistema Automatizado	41

FIGURA 26 – Esquema para aquisição de Forma por Sombreamento	42
FIGURA 27 – Modelo adquirido com a técnica de sombreamento	43
FIGURA 28 – Scanner FabScan	44
FIGURA 29 – Scanner CebScan.....	46
FIGURA 30 – Scanner Atlas 3D	47
FIGURA 31 – Scanner BQ Ciclop	48
FIGURA 32 – Placas ZUM Core (esquerda) e ZUM SCAN (direita)	49
FIGURA 33 – Arduino Uno, Driver A4988 e <i>Shield</i> CNC V3.....	52
FIGURA 34 – Módulo laser com feixe em linha	52
FIGURA 35 – Motor Nema17	53
FIGURA 36 – Câmera Logitech C270	53
FIGURA 37 – Alimentação <i>Shield</i> CNC	54
FIGURA 38 – Esquema de Montagem Eletrônica do Scanner	55
FIGURA 39 – Teste de Componentes Eletrônicos.....	58
FIGURA 40 – Impressão 3D da Estrutura do Scanner	59
FIGURA 41 – Sugestão de Montagem da Estrutura do Scanner.....	59
FIGURA 42 – Fases do processo de Calibragem do Horus	61
FIGURA 43 – Ambiente de Captura do Software Horus	62
FIGURA 44 – Ajuste manual do foco da câmera	63
FIGURA 45 – Ambiente MeshLab.....	64
FIGURA 46 – MeshLab – Cálculo de Normais do Modelo.....	65
FIGURA 47 – MeshLab – Exibição de Normais	66
FIGURA 48 – Construção do Scanner Finalizada.....	68
FIGURA 49 – Objetos utilizados nos testes de digitalização	69
FIGURA 50 – Digitalização de Esfera Metálica.....	70
FIGURA 51 – Comparação de Medidas do Modelo e da Peça Real	70
FIGURA 52 – Comparativo entre esfera metálica real e modelo obtido	71
FIGURA 53 – Modelo melhorado com filtro de suavização	72
FIGURA 54 – Medições de superfície na malha de pontos	72
FIGURA 55 – Objetos com superfície reflexiva e com partes em vermelho	73

LISTA DE SIGLAS

A – Ampère

2D - Bidimensional

3D – Tridimensional

CC – Creative Commons (Criação Comum)

CCD – Charge Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)

CNC - Controle Numérico Computadorizado

FDM – Fusão e Deposição de Material

GPL – General Public License (Licença Pública Geral)

GPR - Ground Penetrating Radar (Radar de Penetração no Solo)

MDF – Medium Density Fiberboard (Fibras de Média Densidade)

MMC - Máquina de Medição de Coordenadas

PLA – Ácido Polilático

PLY – Polygon Format File (Formato de Arquivo Poligonal)

RM - Ressonância Magnética

SLR - Digital Single Lens Reflex

STL – Formato de Arquivo 3D originário da palavra STereoLithography

TC - Tomografia Computadorizada

US – Ultrassonografia

VREF – Valor de Referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL	16
3.2	MÉTODOS COM CONTATO FÍSICO DESTRUTIVO	18
3.2.1	Fatiamento	18
3.3	MÉTODOS COM CONTATO FÍSICO NÃO-DESTRUTIVO	20
3.3.1	Braço Articulado	20
3.3.2	Máquina de Medição de Coordenadas (MMC)	21
3.4	MÉTODOS TRANSMISSIVOS	22
3.4.1	Ressonância Magnética	22
3.4.2	Tomografia Computadorizada	23
3.4.3	Ultrassonografia	24
3.5	MÉTODOS REFLEXIVOS NÃO-ÓTICOS	25
3.5.1	Radar de Penetração no Solo (GPR)	25
3.6	MÉTODOS REFLEXIVOS ÓTICOS ATIVOS	27
3.6.1	Tempo de Voo (Time of Flight)	27
3.6.2	Triangulação	29
3.7	MÉTODOS REFLEXIVOS ÓTICOS PASSIVOS	36
3.7.1	Estereoscopia	36
3.7.2	Silhuetas	39
3.7.3	Movimentação	41
3.7.4	Sombreamento	42
3.8	SCANNERS TRIDIMENSIONAIS OPEN SOURCE	43
3.8.1	Projeto FabScan	44
3.8.2	Projeto CebScan	45
3.8.3	Projeto Atlas 3D	46
3.8.4	Projeto Ciclop	47
3.8.5	Comparativo entre Scanners Open Source	49
4	MATERIAL E MÉTODOS	51
4.1	COMPONENTES ELETRÔNICOS	51
4.2	MONTAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS	53

4.3	SOFTWARE DE CONTROLE DO HARDWARE	56
4.4	ESTRUTURA DO SCANNER 3D	58
4.5	AQUISIÇÃO DE MODELOS.....	60
4.6	PÓS PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6	CONCLUSÕES	74
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A modelagem tridimensional (3D) é um campo que tem sido muito solicitado atualmente, tanto no entretenimento, com jogos e filmes, quanto na indústria, substituindo metodologias já consolidadas por um custo menor de produção e uma reutilização constante. Produzir um modelo tridimensional atualmente é algo bem mais simples, pois há uma infinidade de softwares que auxiliam nessa tarefa.

De acordo com Azevedo e Tavares (2009), o processo de reconstrução tridimensional tem se tornado relevante nas últimas décadas especialmente na área médica e indústria cinematográfica, no entanto temos acompanhado um vasto crescimento de sua aplicação nos campos de engenharia, geologia, astronomia, biologia, etc. Isso tem se tornado mais intenso porque o volume de imagens tem aumentando exponencialmente; equipamentos como tomógrafos, sonares, telescópios, câmeras digitais, além de uma infinidade de sensores tem se tornado cada vez mais acessíveis e presentes no nosso dia-a-dia.

Uma aplicação para essa tecnologia tridimensional nos últimos anos foi a “engenharia reversa”, técnica da qual se parte do objeto final para se obter um modelo 3D, permitindo assim sua modificação e produção.

O processo de engenharia reversa envolve uma leitura do objeto real produzindo sua nuvem de pontos nos eixos “x,y,z” (largura, altura e profundidade) e, através de software específico, geração de sua malha geométrica para reconstrução tridimensional.

Muitas abordagens foram apresentadas nos últimos anos para a tarefa de aquisição e reconstrução 3D; muitos fabricantes apresentam ao mercado suas propostas de produtos, no entanto a um custo que chega a ser proibitivo, dependendo da técnica utilizada e precisão do equipamento.

A busca por um scanner de custo acessível se justifica por permitir a popularização da tecnologia. Definir seu potencial de aplicação na resolução de problemas da engenharia como a extração de informação sobre a superfície do objeto, pode nortear uma nova abordagem na análise de superfícies frágeis. A abordagem por triangulação a laser é objeto desse estudo, pois permite uma grande precisão na superfície do objeto capturado, mesmo tendo dimensões reduzidas.

A comunidade de entusiastas por software livre baseando-se em estudos científicos e as vezes por simples prazer da prática “faça você mesmo” tem apresentado interessantes ideias de aplicação das técnicas de captura a equipamentos de custo mínimo. Por serem essas publicações sempre feitas de modo muito informal, essas informações são encontradas em fóruns de discussão na internet ou mesmo em páginas pessoais conhecidos como blogs; raros exemplos apresentam uma documentação técnica que detalhe a construção sem elevados conhecimentos das técnicas, eletrônica e desenvolvimento de softwares.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para o desenvolvimento da tecnologia nacional de prototipagem rápida demonstrando que é possível se obter modelos tridimensionais de boa qualidade de maneira rápida utilizando um scanner tridimensional de fácil fabricação e simples operação.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os projetos livres propostos para digitalização tridimensional e obter parâmetros de construção scanner 3D
- Realizar a construção de um scanner 3D utilizando câmera e sensores laser de baixo custo e ampla disponibilidade no mercado nacional.
- Automatizar o processo de captura da peça utilizando base giratória com micro-controlador e motor de passo.
- Realizar a configuração e adaptação de softwares de código livre para aquisição de imagens e geração de malha de superfície do objeto.
- Realizar o escaneamento de objetos de diversas dimensões a fim de fornecer os parâmetros de qualidade do scanner obtido.
- Exportar arquivos capturados em formatos compatíveis com softwares de manipulação e impressão 3D.
- Analisar o potencial dos modelos capturados para levantamento de informações sobre a superfície do objeto.

3 REVISÃO DA LITERATURA

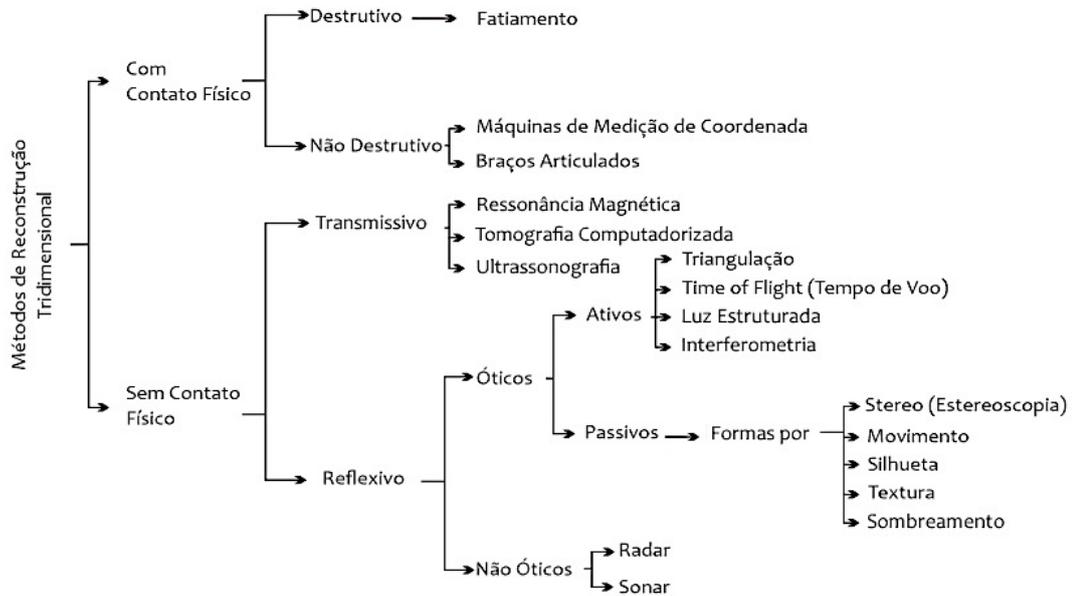
3.1 RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

Segundo Carvalho et al (2005), as várias técnicas são primeiramente categorizadas em emprego do contato físico com o objeto ou sem envolver contato físico. As técnicas de captura baseadas em imagens do objeto, por exemplo, são subdivididas em ativas e passivas. Todas as técnicas empregam um conjunto de hardware e software específicos, que buscam o cálculo da profundidade dos pontos na cena de forma semelhante ao olho humano para definir detalhes de formas e volume do objeto.

Um modelo é uma representação do objeto real ou imaginário e podem ser empregados mapas de profundidade ($Z(x, y)$), malhas de polígonos (*polygon meshes*), equações de curva e superfície, além de vetores, gradientes e inclinação/rotação para sua criação. (FOLEY et al., 1997).

Atualmente, existem vários equipamentos e técnicas que buscam a obtenção de superfícies (perfilometria); alguns baseados em contato físico, algumas vezes destrutivo e sem contato físico; nesse campo, destacam-se os métodos óticos. A figura 1 mostra a taxonomia das técnicas de reconstrução tridimensional com adaptações de técnicas desenvolvidas e aperfeiçoadas nos últimos anos.

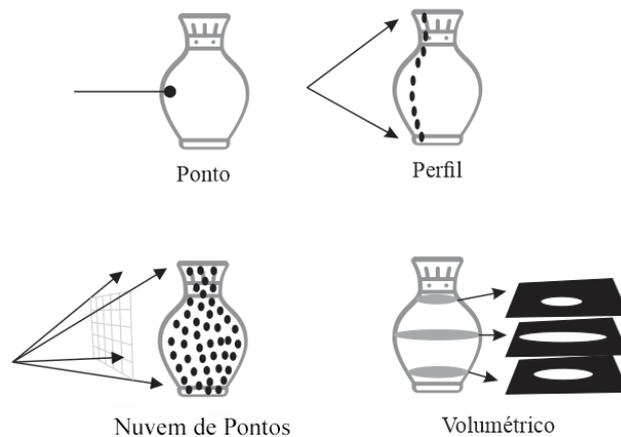
FIGURA 1 – Taxonomia das Técnicas de Reconstrução Tridimensional



Fonte: Adaptado de Azevedo (2012)

Quanto a estruturação dos dados na aquisição, podemos classificar as técnicas de acordo com a figura 2.

FIGURA 2 – Aquisição de Dados no Processo de Reconstrução 3D

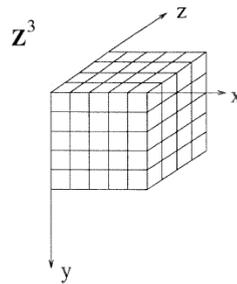


Fonte: Adaptado de Sisgraph (1999)

Os sensores de captura de imagens tridimensionais operam, de modo geral, projetando (na forma ativa) ou adquirindo (na forma passiva) energia eletromagnética em/de um objeto, em seguida, registrando essa energia transmitida ou refletida. O exemplo mais importante de medida de transmissão de energia é a tomografia computadorizada industrial (CT no acrônimo em inglês), que utiliza raios X de alta energia e mede a radiação transmitida pelo objeto.” (SANSONI et al., 2009, p.570).

De acordo com Braga Neto (1994), escolher um esquema de representação tridimensional na reconstrução ou o *grid digital* é essencial, pois consiste exatamente em como serão distribuídos os elementos digitais que compõem a imagem, determinando a topologia digital, seus conceitos de vizinhança e conectividade.

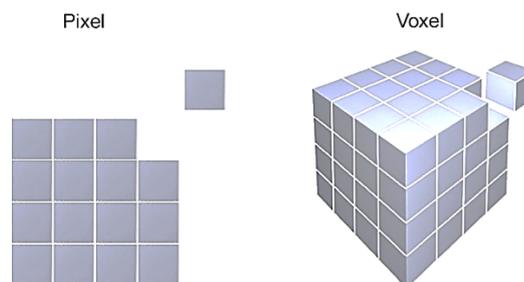
FIGURA 3 – Grid Digital Cúbico



Fonte: Braga Neto (1994)

A figura 3 apresenta um *grid* digital cúbico, uma das possíveis escolhas de representação, também conhecido como modelo “*voxel*”, que segundo Braga Neto (1994) é um acrônimo para *volume elemento*, unidade básica de uma imagem tridimensional, assim como o *pixel* o é para a imagem bidimensional. A figura 4 apresenta um comparativo entre o *pixel* e o *voxel*.

FIGURA 4 – Pixel (2D) versus Voxel (3D)



Fonte: Próprio autor.

3.2 MÉTODOS COM CONTATO FÍSICO DESTRUTIVO

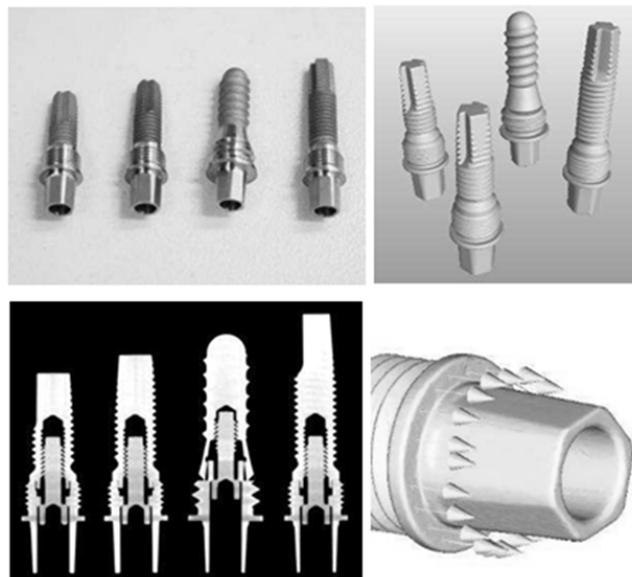
3.2.1 Fatiamento

O Fatiamento é um método destrutivo em engenharia reversa é útil para a

objetos pequenos e complexos pois nela os recursos internos e externos são examinadas. De acordo com Raja e Fernandes (2008), uma fresadora CNC (Controle Numérico Computadorizado) realiza cortes transversais na peça (fatia), e as imagens são capturadas por uma câmara de alta qualidade. O software de digitalização automaticamente converte a imagem digital, detectado pontos e então é renderizado o modelo tridimensional da fatia.

O processo de aquisição de dados de um sistema destrutivo é apresentado na figura 5. A desvantagem deste método é a destruição do objeto. Contudo, a técnica é rápida e precisa: $\pm 0.0127\text{mm}$. A espessura de cada camada é de 0.0127-0.254mm. O método também permite capturar a estrutura interna do objeto. (RAJA E FERNANDES, 2008).

FIGURA 5 – Método de aquisição fatiamento de pinos para Implantes Dentários.



Fonte: Hudák, Živčák e Magin (2016)

Outra das vantagens desse método é quanto ao material aplicável, que podem ser peças feitas em alumínio, plásticos, ferro fundido, aço, cobre e até mesmo a madeira.

3.3 MÉTODOS COM CONTATO FÍSICO NÃO-DESTRUTIVO

3.3.1 Braço Articulado

O digitalizador de braço articulado é um dispositivo montado sobre uma base relativamente pesada e possui articulações que permitem sua movimentação em todas as direções. Em toda a extensão do braço existem sensores que permitem saber a posição da ponta do braço no espaço e assim obter informações que serão utilizadas na reconstrução tridimensional.

Segundo Azevedo (2012), as coordenadas medidas são enviadas a um computador, que constrói a malha geométrica do objeto 3D, conforme mostra a figura 6. A posição real da ponta do braço externo é calculada por goniometria¹, que mede os ângulos entre os braços digitalizador nas articulações.

A precisão desse braço articulado é um de suas grandes vantagens pois é por volta de 0.04mm conforme publicações técnicas de seus fabricantes. Um dos problemas encontrados é quanto a geometria do objeto a ser capturado, pois algumas áreas podem não ser acessíveis pelo sensor do braço. Uma variação dessa técnica emprega um emissor laser na ponta do braço articulado.

FIGURA 6 – Braço Articulado Digitalizador Microscribe®



Fonte: Microscribe (2016)

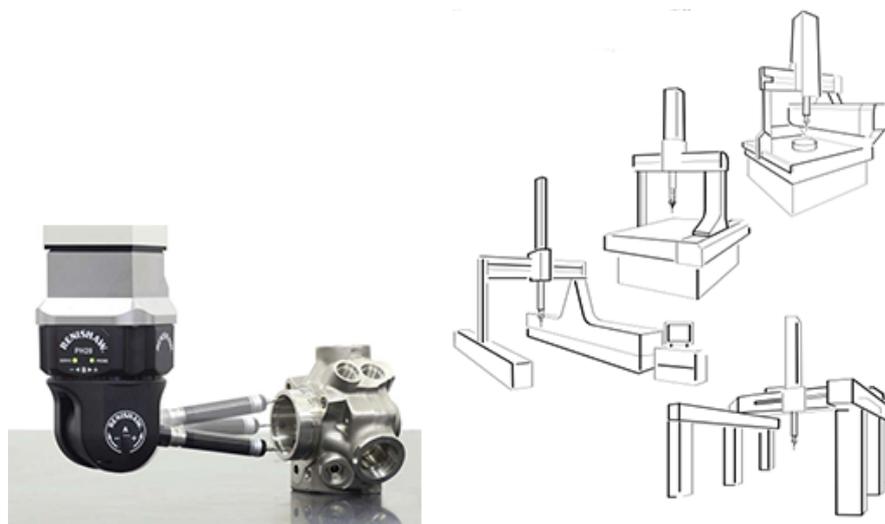
¹ Goniometria - Mensurar objetivamente as amplitudes de movimento articular através do goniômetro.

3.3.2 Máquina de Medição de Coordenadas (MMC)

As máquinas de medição de coordenadas (do inglês, *Coordinates Measuring Machines*) são equipamentos de medição de alta precisão, que podem ser automáticas ou manuais, disponíveis em pequeno, médio e grande porte.

Basicamente, os equipamentos possuem uma base fixa onde o objeto é colocado e um braço extensível com uma sonda articulada (intercambiável) que desliza sobre a superfície do objeto. Segundo Renishaw(s.d.), capturando medidas com margem de erro de apenas um dígito em microns e velocidade de até 500mm/s; quando a ponta da sonda toca a peça e deflete, o refletor é deslocado. A trajetória de retorno alterada do laser é medida por um sensor de posição. A posição exata da extremidade da ponta é conhecida porque o refletor e a esfera da ponta estão muito próximos, conforme ilustra a figura 7.

FIGURA 7 – Máquina de Medição de Coordenadas com cabeça de leitura da Renishaw ®



Fonte: Renishaw (2016)

Devido a sua alta precisão, a indústria automobilística e aeronáutica são seus maiores consumidores, utilizando-a para medições de engrenagens, guias de válvulas, bielas, hélices e blocos de motor. Esses valores de medição são enviados a um computador que, através de software próprio pode reconstruir o modelo tridimensional através da nuvem de pontos. Sua principal desvantagem é o alto custo desses equipamentos, que chegam a custar mais de meio milhão de dólares.

3.4 MÉTODOS TRANSMISSIVOS

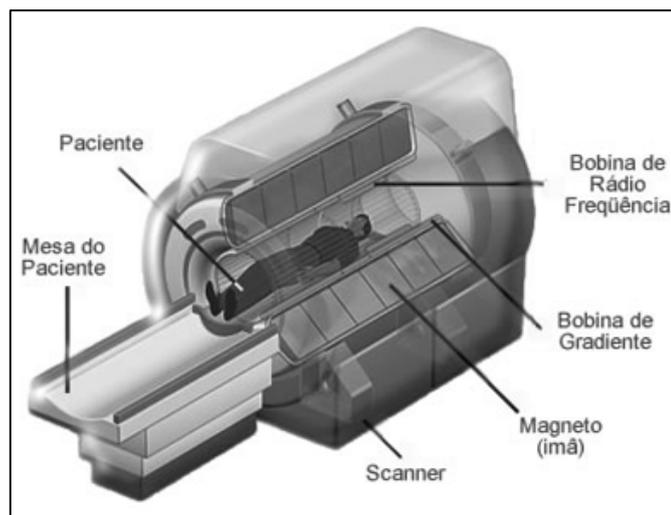
3.4.1 Ressonância Magnética

Segundo Funari (2013), Ressonância Magnética (RM) como é conhecida atualmente começou a tomar forma com pesquisas realizadas na década de 1920, comprovada na década de 1940, mas só foi experimentada na década de 1960, quando surgiu o primeiro espectrômetro de RM para fins analíticos. Desde então, a espectrometria é usada para analisar a configuração molecular do material baseado em seus espectros de RM. No início da década de 1980, quase todos os fabricantes de equipamentos de imagens médicas pesquisaram e produziram *scanners* de RM que produziam imagens.

A RM utiliza campos magnéticos e ondas de rádio para criar imagens transversais de alta qualidade sem utilização de radiação ionizante, segundo Rajas e Fernandes (2008), o que torna o processo mais saudável.

Quando prótons de um determinado objeto, são colocados em um campo magnético forte, enviando pulsos de radiofrequência eletromagnéticos, estes prótons emitem sinais que são recolhidos e processados para construção das imagens transversais, conforme ilustra a figura 8.

FIGURA 8 – Equipamento de Ressonância Magnética em Corte



Fonte: Singapore (2016)

As imagens transversais do objeto alvo são “empilhadas” de modo a formar o cubo tridimensional e se obter assim o modelo 3D.

3.4.2 Tomografia Computadorizada

Segundo Rajas e Fernandes (2008) a tomografia computadorizada (TC) é uma abordagem poderosa para a reconstrução 3D, ela revolucionou o campo do diagnóstico médico desde os anos 1970. É um método transmissivo, não destrutivo, que permite a visualização tridimensional das partes internas de um objeto fornecendo uma grande série de imagens obtidas por meio de raios-X em corte transversal tomada ao redor de um eixo de rotação único.

Em TC, o feixe de raios-X que ultrapassa o material através de inúmeras projeções realizadas em torno do objeto e a porção emergente é captada pelo sistema de detectores e armazenada na memória do computador. (MASCHIO, 1997)

Segundo Garib (2007) durante o exame de TC, no interior do *Gantry*, o tubo de raios-x gira dentro do anel estacionário de receptores, conforme a figura 9.

FIGURA 9 – Tomografia Computadorizada (Gantry, PC e Esquema Interior do *Gantry*)

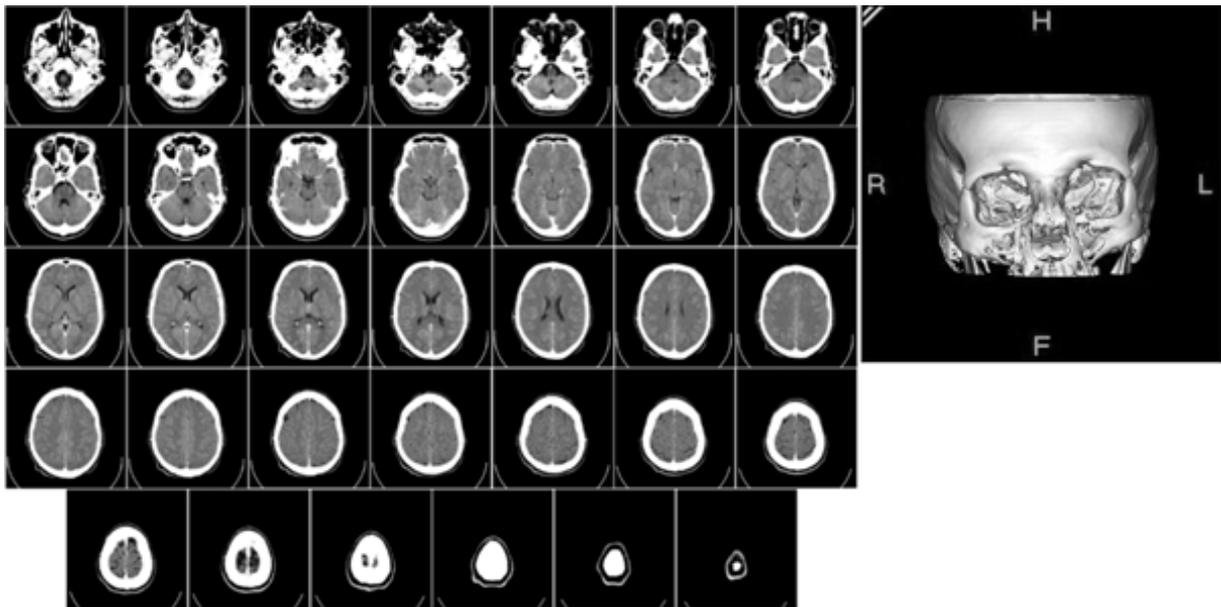


Fonte: Adaptado de Garib (2007)

Ainda de acordo com Garib (2007), os aparelhos modernos de TC apresentam uma tecnologia denominada *multislice* e são capazes de obter de 4 a 16 fatias de imagem a cada giro de 360°, obtendo fatias de 0,5 a 20mm de profundidade (*voxel*), o que diminui o tempo de exposição do paciente aos raios-X.

A figura 10 apresenta uma série de imagens capturadas por uma TC de um crânio humano; a direita, o modelo construído a partir dessas imagens.

FIGURA 10 – Fatias de Imagens e Modelo Tridimensional Construído com TC



Fonte: Adaptado de Newworldencyclopedia (2016)

3.4.3 Ultrassonografia

De acordo com Kealy et Al (2012), o termo ultrassonografia (US) designa ondas sonoras de alta frequência, inaudíveis ao ouvido humano. O ouvido humano consegue captar frequências da ordem de 50 a 20.000 *hertz* (1KHz = 1.000 ciclos por segundo). Na ultrassonografia diagnóstica as frequências normalmente utilizadas são entre 2 e 15 *megahertz* (1MHz = 1 milhão de ciclos por segundo). Essa onda sonora ultrassônica atravessa o objeto em análise até encontrar um obstáculo que reflita parte dessas ondas (eco) ao emissor/receptor denominado transdutor; um computador analisa os sinais emitidos e recebidos e converte em uma imagem bidimensional, em escalas de cinza em um monitor em tempo real.

Os primeiros instrumentos de US que produziam imagens tridimensionais (3D) surgiram em 1991, armazenavam 25 segundos de imagens e levavam horas para construir o modelo. Atualmente, a US 3D captura as imagens e reconstrói o modelo em alguns segundos, além de ter agregado o recurso de produzir um vídeo tridimensional, conhecido como 4D. (BONILLA-MUSOLES; MACHADO, 2005).

FIGURA 11 – Ultrassonografia em 3D-4D



Fonte: Adaptado de Arruda (2012)

A figura 11 apresenta uma imagem tridimensional de um bebê de 37 semanas de gestação. O equipamento de US 3D-4D é praticamente o mesmo que o US bidimensional, basicamente, apenas um novo software de análise de sinais, no entanto esse software possui um alto custo (atualmente, em torno de 15.000 Euros), o que o torna impeditivo a muitos pacientes e pesquisadores.

A US e ressonância magnética tem em comum o fato de não serem invasivas, submetendo o paciente à radiação ionizante como a tomografia, no entanto a US ainda tem uma grande vantagem: produzir imagens em tempo real.

3.5 MÉTODOS REFLEXIVOS NÃO-ÓTICOS

Os métodos de reconstrução tridimensional não óticos não possuem contato físico e utilizam sensores e emissores de ondas eletromagnéticas ou ainda raios X para obtenção das formas de objetos. Esta técnica é utilizada na ressonância magnética, tomografias, sonares e radares.

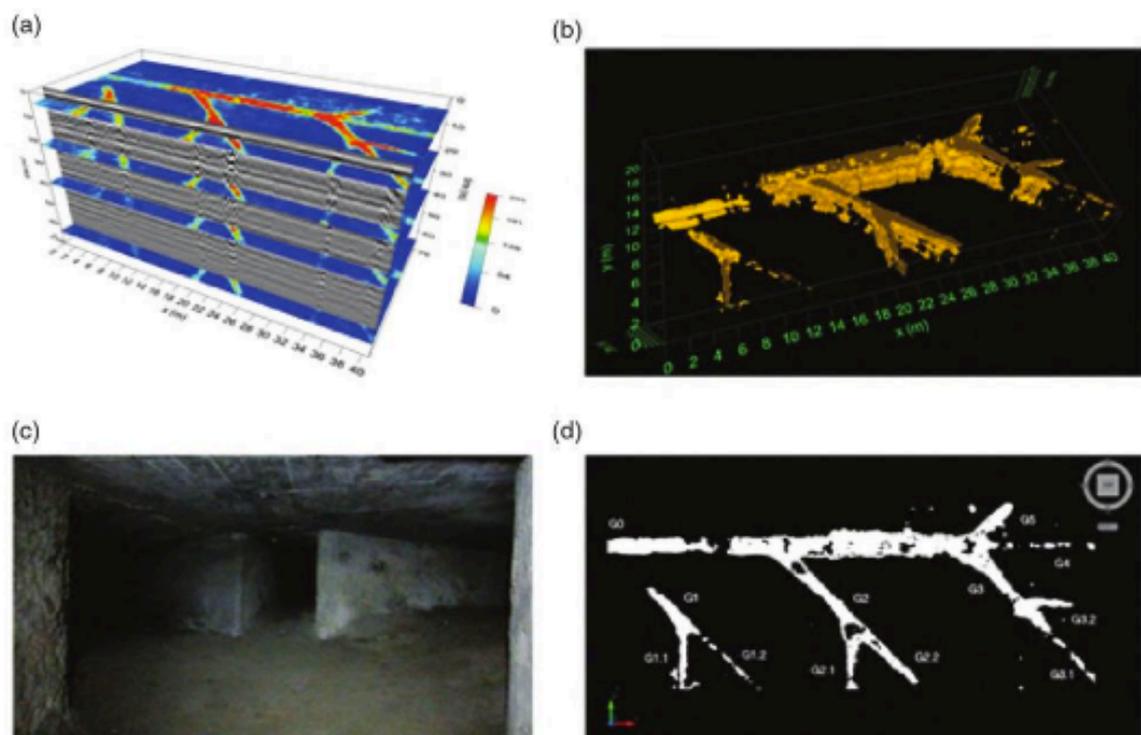
3.5.1 Radar de Penetração no Solo (GPR)

O Radar de Penetração no Solo ou Georradar é mais conhecido pelo acrônimo de GPR (Ground Penetrating Radar), segundo Riviero e Sola (2016) foi proposto e apresentado por Sir Robert Alexander Wattson-Watt em 1935. O radar terrestre ficou popular na década de 1970 e é hoje um equipamento conhecido dos

geólogos, pois tem sido amplamente utilizado para estudos do subsolo. É utilizado para análises de placas tectônicas, definição de espessuras de camadas de gelo, investigação de sítios arqueológicos e até mesmo pelas forças policiais para verificação de existência de túmulos clandestinos.

A técnica de reconstrução tridimensional volumétrica é feita utilizando as imagens produzidas pelo GPR. Na figura 12, conforme Riviero e Sola (2016), o processo é descrito em fases: primeiramente, as imagens são submetidas a um filtro de imagens (entre 68MHz e 822MHz) para remoção do plano de fundo (*background*) e logo após as imagens são empilhadas, formando um cubo. As camadas de imagens que forma o cubo tridimensional são interpoladas com um padrão de cores de 8 Bits, gerando o modelo do que está no subsolo.

FIGURA 12 - Reconstrução Volumétrica 3D de Túneis com Imagens Obtidas por GPR.



Fonte: Riveiro e Sola (2016)

3.6 MÉTODOS REFLEXIVOS ÓTICOS ATIVOS

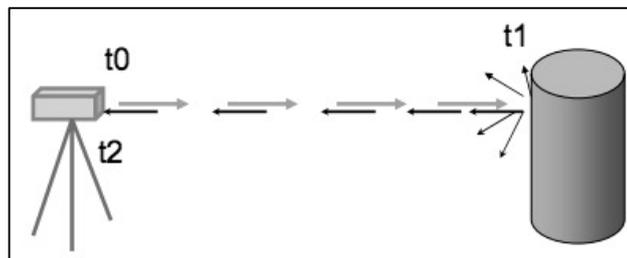
Os métodos de reconstrução tridimensional óticos ativos não possuem contato físico e utilizam câmeras de alta capacidade e emissores de luz (incluindo laser) para obtenção das formas de objetos analisando as imagens capturadas e submetendo-as a um algoritmo específico.

3.6.1 Tempo de Vôo (Time of Flight)

A técnica denominada *Time of Flight* (Tempo de Vôo). É caracterizada pela utilização de um emissor e um detector de luz; basicamente é medido o tempo que a luz leva para se propagar do emissor até o objeto e para sua volta.

Segundo INPE-DSR (2007), a técnica se baseia na medição do tempo entre a emissão e retorno do pulso refletido como mostra a figura 13.

FIGURA 13 –Princípio do *Time of Flight*



Fonte: Inpe-Dsr (2007)

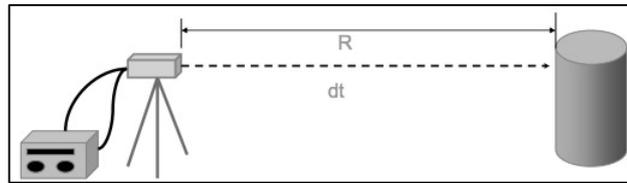
t_0 – O pulso é disparado na direção do objeto;

t_1 – Ao atingir a superfície do objeto, parte do pulso é refletida na direção do sensor;

t_2 – No sensor, são medidos o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno e também a intensidade do retorno;

Para medir a distância entre o sensor e o objeto a partir do tempo calculado entre emissão e retorno.

FIGURA 14 – Cálculo da distância entre objeto e sensor



Fonte: Inpe-Dsr (2007)

Como visto na figura 14, podemos definir a distância ao considerarmos que:

$$\text{Velocidade} = \text{Distância} / \text{Tempo}$$

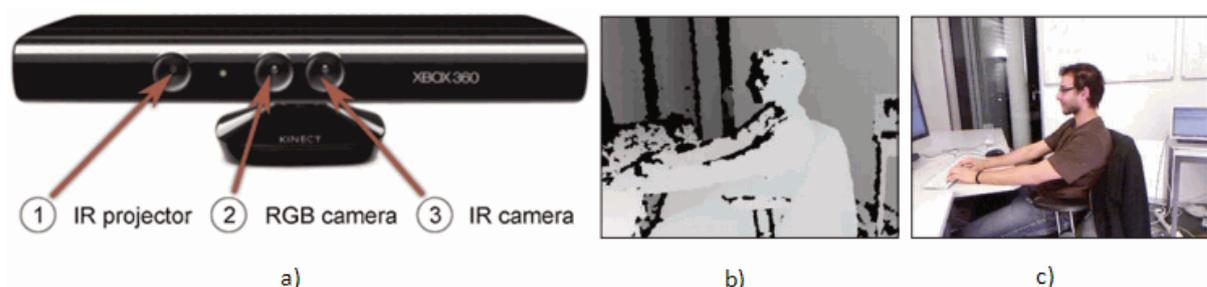
Ou ainda:

$$c = \frac{2 * R}{dt} \quad R = c * \frac{dt}{2} \quad (1)$$

Segundo INPE-DSR (2007) existem duas alternativas para se medir o tempo: o sistema de pulsos e o sistema de onda contínua. O retardo do pulso refletido e captado permite determinar a distância (R). No sistema de ondas contínuas, o intervalo entre a emissão e registro do retorno é determinado calculando a diferença de fase entre a onda de retorno em relação à onda emitida.

A figura 15 apresenta o popular dispositivo Microsoft Kinect Sensor®, utilizado em jogos de videogame e interações com aplicações para computador, esse dispositivo é um ótimo exemplo da utilização da técnica de *Time of Flight*, utilizando um projetor projetor e câmera infravermelho e uma câmera RGB (Red Gren Blue) para captar os movimentos do operador e gerar modelos tridimensionais em tempo real.

FIGURA 15 – Dispositivo Microsoft Kinect Sensor ®



Fonte: Azevedo (2012, p. 22)

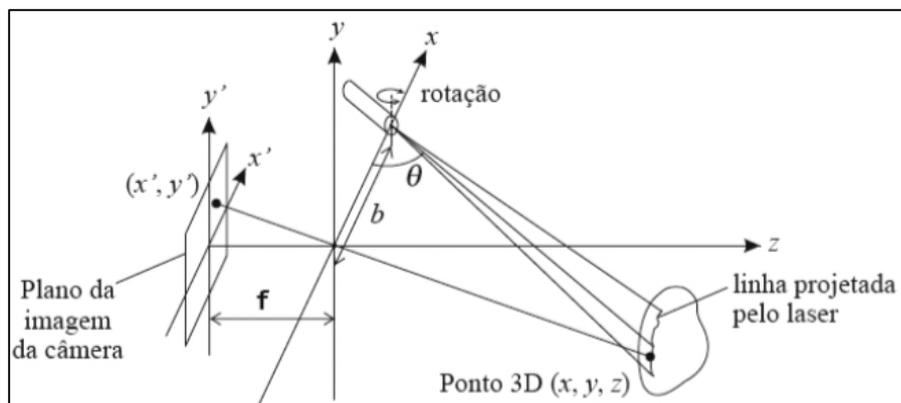
A técnica do tempo de voo tem recomendação de utilização para captação de imagens de objetos de alguns centímetros até cerca de cem metros, dependendo do sensor empregado.

3.6.2 Triangulação

Segundo Gazziri (2011) o processo de aquisição 3D por triangulação é feito através da projeção de um feixe de linha vertical produzida por um emissor laser sobre a superfície do objeto a ser capturado; essa projeção é então capturada pela câmera e a distância até o objeto se dá através de cálculo geométrico.

A figura 16 demonstra como ocorre o processo de aquisição triangulação.

FIGURA 16 – Geometria do Processo de Triangulação



Fonte: Gazziri (2011)

Ainda segundo Gazziri (2011) o centro das lentes está localizado na origem com distância focal f até o plano da imagem sendo a distância entre o projetor e a câmera representado pela linha de base b . A projeção do laser forma o ângulo θ em relação à linha base e o ponto 3D (x, y, z) no espaço real é projetado no pixel da imagem (x', y') .

O valor de θ é conhecido pelo sistema e a distância focal f é determinada pela calibração da câmera. A linha de base b é calculada posicionando-se o laser de maneira que a sua projeção incida no centro do objeto a ser adquirido, apontando para um objeto a uma distância conhecida z_0 .

$$b = \frac{z_0}{\tan\theta} \quad (2)$$

Um ponto (x,y,z) é então projetado na câmera no espaço (x', y') de forma que:

$$x' = \frac{xf}{z} \quad y' = \frac{yf}{z} \quad (3)$$

Inicialmente é feita uma varredura girando-se o laser que estará projetando uma linha vertical, capturando as imagens, armazenando os respectivos valores de θ obtidos pelo sinal de varredura de cada imagem. Determina-se os valores de x' e y' onde o laser foi refletido para cada imagem e então, os pontos nas coordenadas reais são calculados pelas equações abaixo:

$$x = \frac{bx'}{f \cot\theta - x'} \quad y = \frac{by'}{f \cot\theta - x'} \quad z = \frac{bf}{f \cot\theta - x'} \quad (4)$$

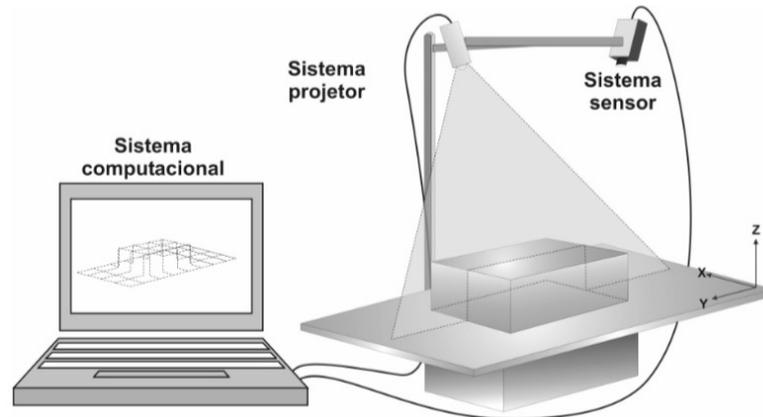
Ainda de acordo com Gazziro (2011), a principal vantagem de se utilizar técnicas de luz estruturada como essa é o baixo custo. No entanto eles tendem a não ser muito precisos porque a resolução do sistema é limitada a resolução do pixel de medida x' e y' .

3.6.3 Luz Estruturada

Segundo Carvalho et al (2005) os primeiros métodos de codificação por luz estruturada foram propostos na década de 80 e aprimorados na década de 90. Para capturar toda a superfície do objeto e não apenas uma linha temos que projetar o laser de várias formas de modo a varrer toda a superfície. Projetar várias linhas ao mesmo tempo utilizando um sistema de correspondência é a base do conceito de “luz estruturada”.

Um padrão de luz contendo é projetado na cena, os planos onde podemos recuperar a geometria com maior precisão é na transição de faixas. A figura 17 apresenta um modelo de montagem de equipamentos para utilização do processo.

FIGURA 2 – Projeção de Luz Estruturada

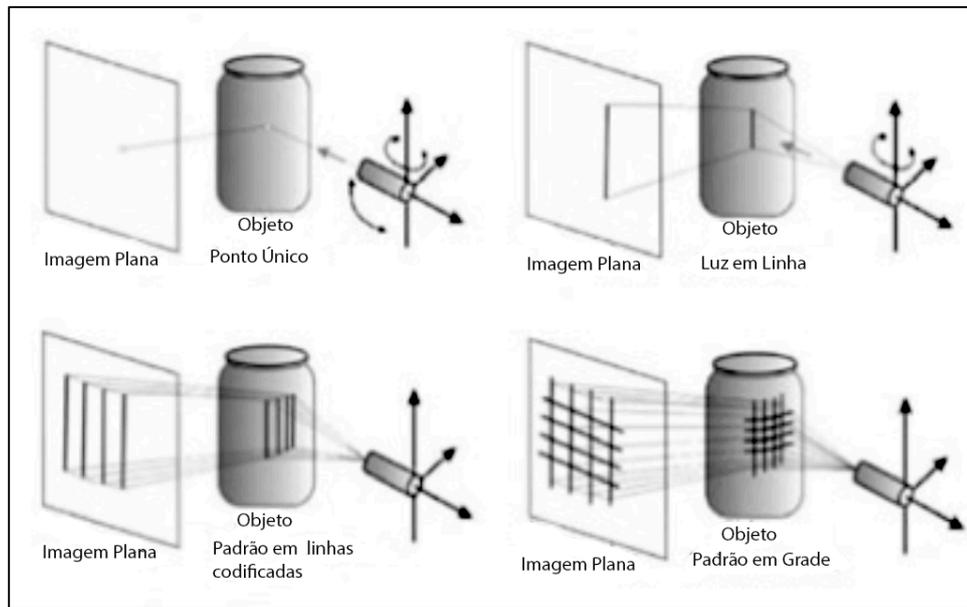


Fonte: Reiss (2007)

Conforme afirma Reiss (2007), com o projetor posicionado a certa distância do sensor fixo e sua orientação em relação ao projetor conhecida é possível determinar a coordenada do ponto por meio de um processo de intersecção, semelhante aos sistemas de Triangulação à Laser ou Estereoscopia. As relações geométricas entre o projetor e o sensor precisam ser conhecidas, então, é necessário um processo de calibração.

Podem ser utilizados diferentes padrões de luz, como linhas, grades, senoidais, círculos. Assim, o projetor simula a segunda câmera no processo e torna a reconstrução tridimensional mais rápida do que o sistema estereoscópico. A figura 18 apresenta exemplos de projeção de padrões de luz estruturada.

FIGURA 18 – Exemplos de Padrões de Luz Estruturada



Fonte: Raja e Fernandes (2008)

De acordo com Paiva (1997), a calibração da câmera permite obter a equação da linha de visão que une um ponto da cena ao centro ótico da lente da câmera. A calibração projetor permite obter a equação do plano de luz/sombra com o código y_p que incide em um ponto da cena. Depois de calibrado o sistema, a determinação das coordenadas x, y, z (3D) de determinado ponto da cena é dado pela intersecção da linha de visão com o plano de luz projetado. Uma das formas de se chegar a esse valor é utilizando o modelo *pinhole*, dado pelas equações:

$$(C_{11} - C_{31} \cdot i) \cdot x + (C_{12} - C_{32} \cdot i) \cdot y + (C_{13} - C_{33} \cdot i) \cdot z = i - C_{14} \quad (5)$$

$$(C_{21} - C_{31} \cdot j) \cdot x + (C_{22} - C_{32} \cdot j) \cdot y + (C_{23} - C_{33} \cdot j) \cdot z = j - C_{24}$$

Em que os parâmetros C_{ij} são determinados na calibração da câmera e ij são coordenadas correspondentes a esse ponto na memória de imagem. A equação do plano com o código y_p é dada por:

$$(P_{11} - P_{21} \cdot y_p) \cdot x + (P_{12} - P_{22} \cdot y_p) \cdot y + (P_{13} - P_{23} \cdot y_p) \cdot z = y_p - P_{14} \quad (6)$$

Utilizando-se as equações 5 e 6, obtemos o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} (C_{11} - C_{31} \cdot i)(C_{12} - C_{32} \cdot i)(C_{13} - C_{33} \cdot i) \\ (C_{21} - C_{31} \cdot j)(C_{22} - C_{32} \cdot j)(C_{23} - C_{33} \cdot j) \\ (P_{11} - P_{21} \cdot y_p)(P_{12} - C_{22} \cdot y_p)(P_{13} - C_{23} \cdot y_p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i - C_{14} \\ j - C_{24} \\ y_p - P_{14} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Que determinam os valores (x,y,z) equivalentes ao ponto tridimensional.

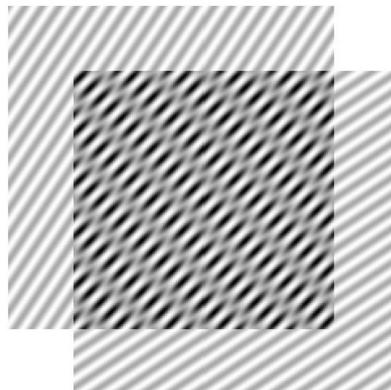
3.6.4 Interferometria (Técnicas de Moiré)

A técnica de interferometria já é bem conhecida no controle dimensional, assim como em medições de nivelamento e deformação, em que padrões de luz estruturada são projetados sobre uma superfície para produzir sombra, conhecida como efeito moiré. (RAJA; FERNANDES, 2008)

Moiré é uma palavra de origem francesa que tem como significado um tecido de seda ondulado. Segundo Lino (2002), se refere a um tecido de seda composto por duas camadas cujo movimento relativo entre elas gera padrões semelhantes a ondas denominadas de franjas de moiré.

Podemos observar o fenômeno moiré quando há difração da luz que passa por duas telas com um pequeno ângulo entre elas, resultando na formação de padrões chamados de franjas de moiré, conforme ilustra a figura Figura 19

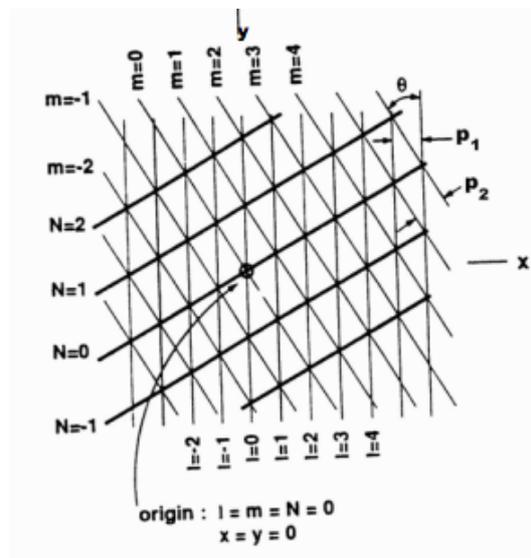
FIGURA 19 – Interferometria (Franjas de Moiré)



Fonte: Próprio autor.

Para Lino (2002), quando essa superposição das camadas ocorre formando um pequeno ângulo de interseção entre as linhas dos retículos, pequeno deslocamento em um dos dois retículos provocará grandes deslocamentos nas franjas de moiré, isto é, o deslocamento será magnificado. E que, considerando que possuem linhas equidistantes, e um deles (retículo R1), que possui linhas paralelas ao eixo “y”, com período “ p_1 ”, é sobreposto pelo outro (retículo R2), com linhas com linhas com período “ p_2 ”, diferente de “ p_1 ”, formando um ângulo θ entre as linhas dos dois retículos. Observa-se o aparecimento de um terceiro retículo (franjas de moiré) formado pela interseção das linhas dos retículos R1 e R2 (Figura 20).

FIGURA 20 – Formação das franjas de moiré pela sobreposição de retículos de linhas paralelas



Fonte: Cloud (1998)

Conforme Coud (1998), um exame da figura 20, mostra que:

$$\text{sen } \varphi = \frac{p_2 \text{ sen } \theta}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \text{ cos } \theta}} \quad (8)$$

onde:

φ = ângulo formado entre as franjas de moiré e o eixo das ordenadas

p_1 = período de R1

p_2 = período de R2

θ = ângulo formado entre as linhas R1 e R2

e ainda:

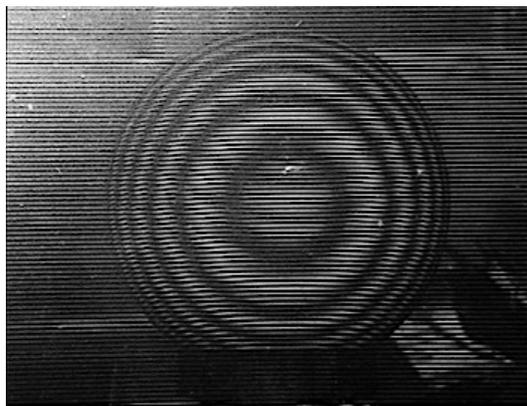
$$p_m = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta}} \quad (9)$$

Onde p_m é o período da franja de moiré.

São necessários dois retículos, um deles segue o contorno do objeto e é chamado de retículo deformado ou retículo do modelo (Rm) e o outro permanece indeformado e serve como referência, por isso é chamado de retículo indeformado ou de referência (Rr). (LINO, 2002). Sciammarella (1982) classifica os métodos de moiré em 3 grupos: Técnica de Moiré ou Moiré Intrínseca, Moiré de Projeção, também conhecido como Moiré de Sombra e Moiré de Reflexão.

Segundo Lino (2002), o retículo do modelo é projetado obliquamente à superfície do objeto, modulando ou acompanhando a topografia do mesmo. Para se obter a deformação fora do plano, os retículos do modelo (Rm) e de referência (Rr) são a projeção do mesmo retículo, um antes e outro depois do objeto ser deformada. As franjas são formadas pela sobreposição das duas imagens conforme demonstra a figura 21.

FIGURA 21– Projeção das Franjas de Moiré sobre um Objeto



Fonte: Oliveira (2006)

Ainda de acordo com Oliveira (2006), as técnicas de moiré apresentam uma dificuldade na obtenção da forma tridimensional de todo o objeto pois a iluminação

através destas técnicas gera apenas a superfície da área fotografada, e há uma alta probabilidade de surgimento de ruído em regiões limítrofes de objetos de formas esféricas.

3.7 MÉTODOS REFLEXIVOS ÓTICOS PASSIVOS

Os métodos do grupo de reconstrução ótica passiva são empregados em aquisição de modelos superfícies ou estruturas contidas em uma cena. Nesse grupo estão processos de aquisição de modelos utilizando câmeras em aeronaves ou um pequeno objeto em uma cena com a mesma técnica (estereoscopia).

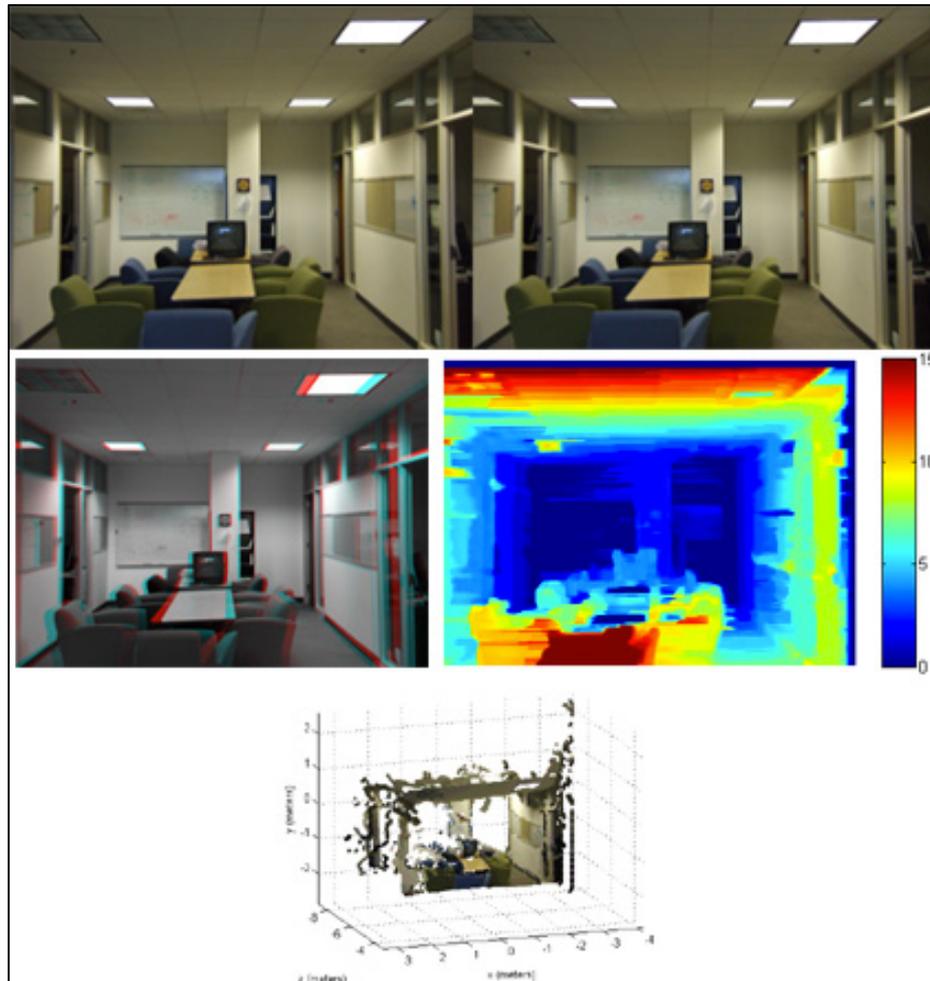
Essas técnicas precisam, normalmente, de menos equipamento sofisticado, no entanto demandam mais processamento computacional. Algoritmos para reconstrução por Textura, Focagem, Movimentação, Silhueta, Sombreamento, Imagens Estéreo estão agrupadas nessa categoria. A seguir são detalhados alguns desses processamentos.

3.7.1 Estereoscopia

A estereoscopia é uma técnica conhecida há anos, pois as fotografias comuns são bidimensionais e já transmitem as informações relativas a largura e altura dos objetos (x , y); para uma reconstrução tridimensional seria necessário apenas mais uma informação: a profundidade (z). Segundo Jose (2008), a chave é encontrar as correspondências entre duas ou mais imagens do mesmo objeto. Nas abordagens utilizando câmeras estéreo, a estratégia está em simular o sistema visual humano, a chamada visão binocular ou estereoscópica.

De acordo com Scharstein (1999) a visão estereoscópica é a inferência geométrica da cena a partir de duas ou mais fotos tiradas simultaneamente de posições ligeiramente diferentes. A informação de profundidade é obtida então por meio da obtenção da disparidade entre pontos correspondentes nas duas imagens. Mesmo quando se há uma grande quantidade de imagens a serem analisadas, elas são sempre analisadas aos pares.

FIGURA 22– Visão Estéreo e Estimativa de Profundidade

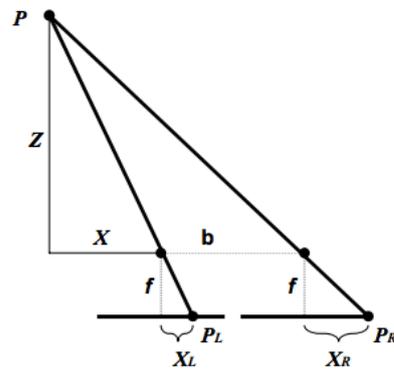


Fonte: Matworks (2016)

Na figura 22, é realizada a reconstrução da cena usando um par de imagens estéreas (topo da figura). Para visualizar a disparidade, as imagens da direita e da esquerda são combinadas em uma nova imagem. Um mapa de disparidade é então montado para então ser renderizada a imagem tridimensional.

Seja um ponto P e suas duas imagens: P_L na imagem da esquerda e P_R na imagem da direita. Seja f a distância focal e b a distância entre as duas câmeras. Considerando que o ponto P tem uma profundidade Z e um deslocamento lateral X (em relação à câmera da esquerda) e ainda P_L está na coordenada X_L e P_R na coordenada X_R como demonstra a figura 23.

FIGURA 23 – Geometria Estéreo



Fonte: Jose (2008)

Conclui-se por semelhança de triângulos que:

$$\frac{X_L}{f} = \frac{X}{Z} \quad (10)$$

$$\frac{X_R}{f} = \frac{X + b}{Z} \quad (11)$$

Para a disparidade d , temos:

$$d = X_R - X_L = \frac{f * b}{Z} \quad (12)$$

Como afirma Jose (2008), a disparidade é diretamente proporcional à distância focal f e a distância entre as câmeras b e que é inversamente proporcional à profundidade Z . Uma vez que a distância focal e a distância entre as câmeras são constantes para um determinado par de imagens, o mapa de disparidades provê uma relação inversa das profundidades da cena em questão.

A principal dificuldade dessa técnica está na definição de pontos correlatos entre as imagens a serem analisadas, uma das maneiras de se encontrar essa correspondência de pontos é a chamada convolução² entre pequenas janelas com pontos significativos entre as imagens; no entanto, a um alto custo computacional.

3.7.2 Silhuetas

O método de reconstrução denominado Forma por Silhueta (*Shape from Silhouette*), segundo Azevedo (2002) é baseado no conceito de envoltória visual (*visual hull*); é um método que busca a obtenção do modelo 3D a partir de várias fotografias, utilizando algoritmos de segmentação de imagem, separando o objeto alvo do fundo (cenário) da fotografia.

Logo, a geometria do objeto é adquirida a partir de fotografias 2D convencionais de diversos ângulos e são empregados algoritmos para se obter o real posicionamento da câmera e a silhueta do objeto em cada uma das fotos.

A ideia de se extrair a forma de um objeto através da silhueta em imagens de diversos ângulos surgiu na década de 1960, quando François Villemé desenvolveu um método que denominou *photo-sculpting* (fotoescultura): 24 fotografias da superfície de um objeto são feitas e projetadas no barro (PAVLIDIS et al., 2007).

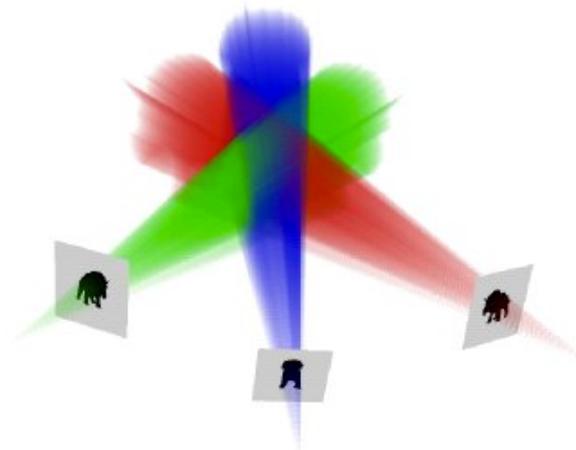
Como na prática não é possível utilizar um número infinito de imagens na reconstrução de uma estrutura, procura-se obter uma aproximação da Envoltória Visual, através de um processo de intersecção de volumes

² Convolução é o nome dado a uma operação matemática entre dois sinais, cuja saída é um terceiro sinal.

cônicos, com base nas restrições impostas pelas silhuetas obtidas e os centros de projeção associados, obtendo-se assim a Envoltória Visual Inferida – Inferred Visual Hull (AZEVEDO, 2002, p. 61)

A figura 24 apresenta o processo de interseção de volumes cônicos definidos pelas silhuetas obtidas nas imagens.

FIGURA 24 – Envoltória Visual Inferida com um processo de interseção de volumes cônicos definidos pelas silhuetas



Fonte: Sisgraph (1999)

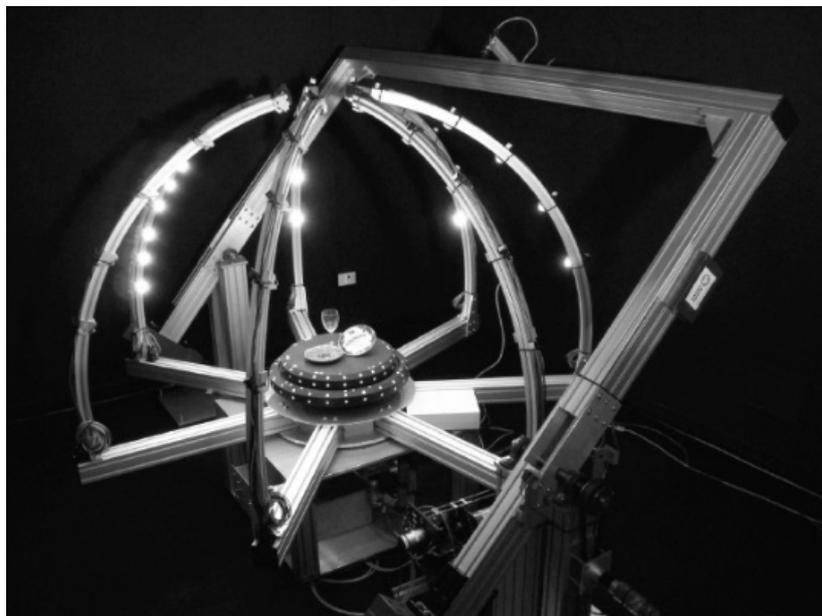
Segundo Carvalho (2005), logo após a determinação das silhuetas é construída uma estrutura de paralelogramos no espaço 3D, baseada na combinação das projeções ortográficas das silhuetas de duas imagens escolhidas de forma arbitrária. No passo posterior, constrói-se uma representação por volumes segmentados, composto por um conjunto de segmentos de reta paralelos a um dos eixos de um sistema de coordenadas local escolhido adequadamente. A estrutura de dados utilizada para representar os volumes segmentados é então organizada de forma hierárquica para facilitar o processo de interseção de segmentos. Após estas etapas, a representação por volumes segmentados é então refinada através de outras silhuetas provenientes de outros pontos de vista.

3.7.3 Movimentação

A técnica de aquisição por “Movimentação” ou “Rotação” é uma técnica que complementa a técnica de aquisição por silhuetas. Basicamente, o objeto é colocado em rotação frente a uma câmera estacionária ou uma câmera que gira em torno de um objeto fixo, várias imagens são capturadas e são submetidas a um processamento para extração da silhueta do objeto e construção do sólido. (SZELISKI, 1990)

Segundo Niem (1994), pode-se construir uma pirâmide tendo como referencia o ponto de foco da câmera e a silhueta extraída de cada imagem, cada pirâmide pode ser considerada uma aproximação do modelo ou, como são comumente chamadas, uma envoltória visual (*visual hulls*).

FIGURA 25 – Aquisição de Formas por Movimentação/Rotação – Proposta de Sistema Automatizado



Fonte: Laboratoire de Vision (2016)

A figura 25 apresenta uma proposta dos pesquisadores Mikhnevich e Hébert do *Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques* da Universidade de Laval, na França, que consiste em uma base giratória e hastes luminosas para captura das imagens e geração da envoltória visual do objeto.

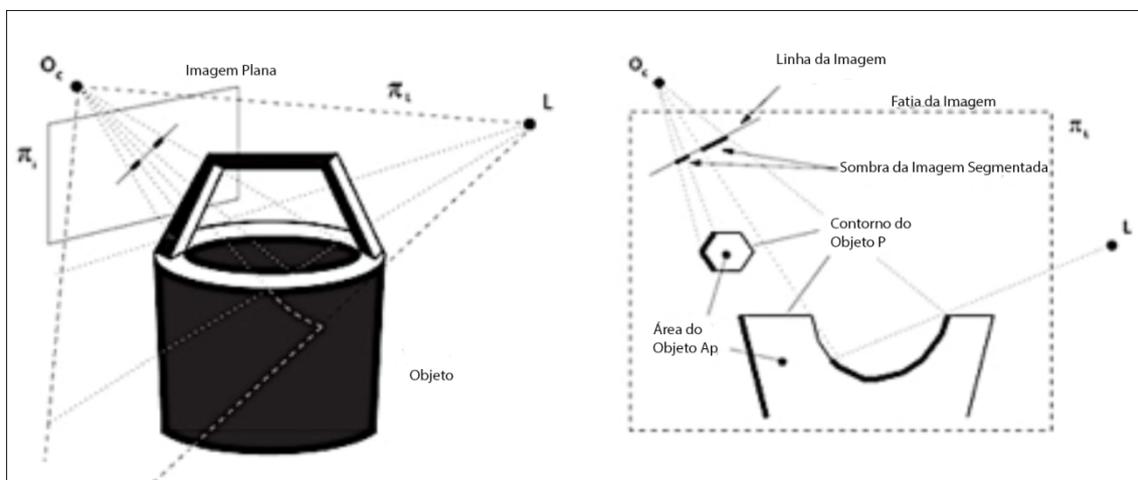
3.7.4 Sombreamento

O método de aquisição por sombreamento (*shape from darkness* ou *shape from shadow*) infere o modelo da cena baseando-se nas informações das sombras projetadas sob a iluminação de uma fonte de luz; pode-se deslocar a fonte de luz em torno do objeto ou mesmo colocar o objeto sobre uma base giratória, mantendo a fonte de luz fixa.

Savarese et al (2001) propõem um sistema que chamaram “*Shadow Carving*” (numa tradução livre, Escultura de Sombra) para obter um modelo tridimensional utilizando a forma de silhuetas e sombra. As silhuetas são usadas para reconstruir a estimativa inicial das formas e as sombras do objeto são utilizadas para esculpir as concavidades.

A figura 26 apresenta o sistema de inferência da forma baseado em sua projeção de sombras.

FIGURA 26 – Esquema para aquisição de Forma por Sombreamento



Fonte: Adaptado de Savarese et al (2001)

De acordo com Savarese et al (2001) a fonte de luz L ilumina um objeto e lança uma sombra sobre algumas áreas em sua superfície e ao se processar a imagem, as sombras são separadas. A principal informação vem das inconsistências entre as sombras que seriam produzidas pela superfície estimada e as sombras observados que são verdadeiramente produzidos pela superfície real. Assim, pode-se remover (esculpir) regiões da estimativa do objeto atual a fim de reduzir as inconsistências e, portanto, de forma incremental calcular melhores estimativas da

forma do objeto. A figura 27 apresenta um resultado de experimento utilizando essa técnica, mostrando três fases de captura do objeto.

FIGURA 27 – Modelo adquirido com a técnica de sombreado



Fonte: Savaresse et al. (2001)

3.8 SCANNERS TRIDIMENSIONAIS OPEN SOURCE

Um novo ideal tem ganhado cada vez mais defensores atualmente com a popularização da internet: O código livre. Nesse tipo de iniciativa os desenvolvedores de hardware e software disponibilizam seus projetos à comunidade de desenvolvedores por todo o mundo para que, de um modo colaborativo o projeto seja mantido, aperfeiçoado e popularizado.

Por trás dos projetos *open source* existe uma filosofia que defende a liberdade para qualquer pessoa modificar aperfeiçoar, compartilhar e em alguns casos até mesmo comercializar.

Projetos de hardware livre também estão indo na mesma direção, componentes eletrônicos, circuitos, máquinas e equipamentos tem sido disponibilizados para que a comunidade faça suas evoluções.

Existe também uma filosofia denominada “DIY” (*Do it Yourself*) literalmente, “faça você mesmo” que tem ganhado cada vez mais seguidores em suas comunidades. Nelas as pessoas são estimuladas a compartilhar projetos de todas as áreas, para que seus membros construam de tudo: artesanato, eletrônicos, móveis, máquinas, pequenos consertos e muitas outras coisas. Muitas boas ideias têm sido compartilhadas nessas comunidades, além de contribuir para a popularização de tecnologias que tem alto custo de investimento.

Alguns projetos desse mundo *open source*/DIY são os scanners tridimensionais por triangulação a laser. Abaixo são apresentadas algumas iniciativas.

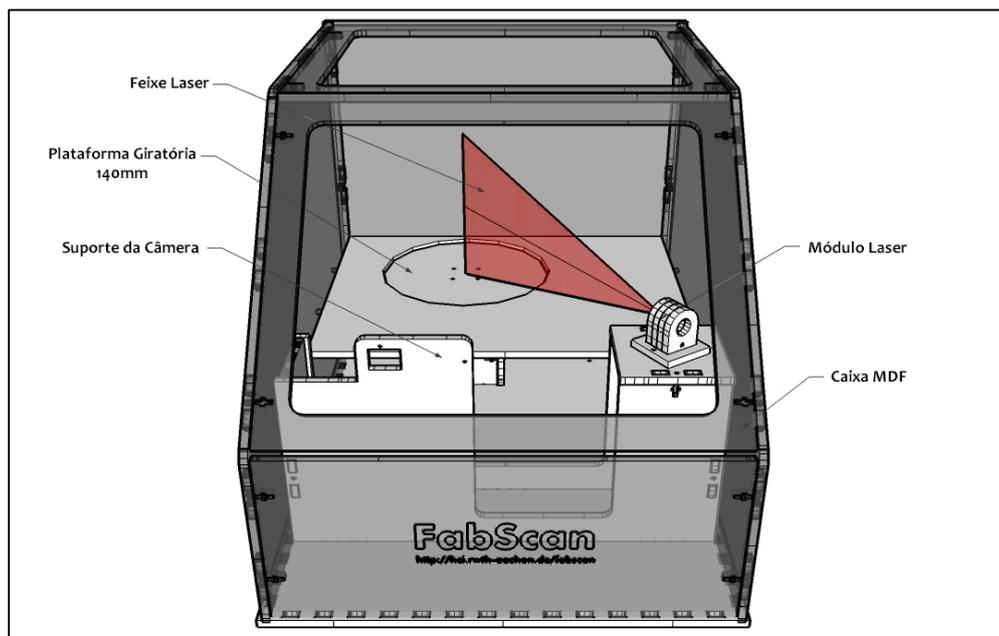
3.8.1 Projeto FabScan

O projeto FabScan surgiu a partir de um trabalho executado por Francis Engelmann, na Alemanha em 2011. O propósito do trabalho segundo Engelmann (2011) foi produzir um scanner 3D de baixo custo, portátil, que fizesse captura do objeto em 360 graus e que fosse de fácil construção, propagando a cultura DIY (Do-It-Yourself).

O projeto FabScan³ é elaborado com o método de triangulação utilizando um emissor laser motorizado, uma câmera e uma base giratória movida por um motor de passo controlado por *Arduino*TM, unidos no interior de uma câmara de MDF (*Medium Density Fiberboard*), recortada com CNC Laser.

A figura 28 apresenta o esquema idealizado por Engelmann (2011) e que, posteriormente influenciou outros projetos semelhantes.

FIGURA 28 – Scanner FabScan



Fonte: Adaptado de Fablabo (2015)

³ Projeto FabScan - <http://hci.rwth-aachen.de/FabScan>

O projeto passou por uma grande alteração em 2014, sendo removido o motor de passo que controlava o feixe laser, substituída a câmera por uma de melhor resolução e o case MDF ganhou novo design com o intuito de facilitar o manuseio do objeto a ser capturado em seu interior.

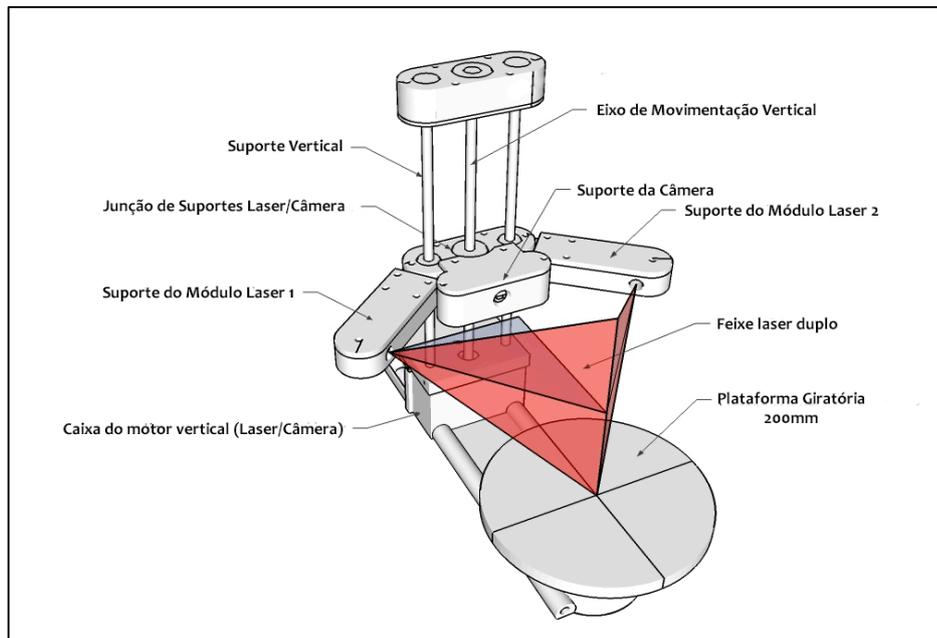
3.8.2 Projeto CebScan

Baseado no projeto FabScan, o projeto CebScan utiliza seus componentes principais com uma abordagem diferente. O CebScan⁴ incorpora dois módulos de laser que convergem na direção do centro do prato giratório. Ele é uma unidade aberta, sem revestimento, permitindo maior liberdade de manobra para a implementação dos temas a serem verificados e definição do raio laser. Além disso, este modelo permite a movimentação vertical do bloco de laser através de um segundo motor de passo.

O projeto foi disponibilizado na internet com todos os esquemas de construção de hardware e software. O corpo do scanner é disponibilizado em arquivos em formato 3D para construção por meio de manufatura aditiva (Impressão 3D) e o controle dos motores, acionamento dos lasers utilizam a plataforma aberta *Arduino*[™] acrescido de uma placa adicional com *drivers* de passo. A figura 29 apresenta o esquema proposto no projeto.

⁴ Projeto Cebscan – Disponível em: <https://github.com/cebbaker/cebscan/tree/Current>

FIGURA 29 – Scanner CebScan



Fonte: Adaptado de Fablabo (2015)

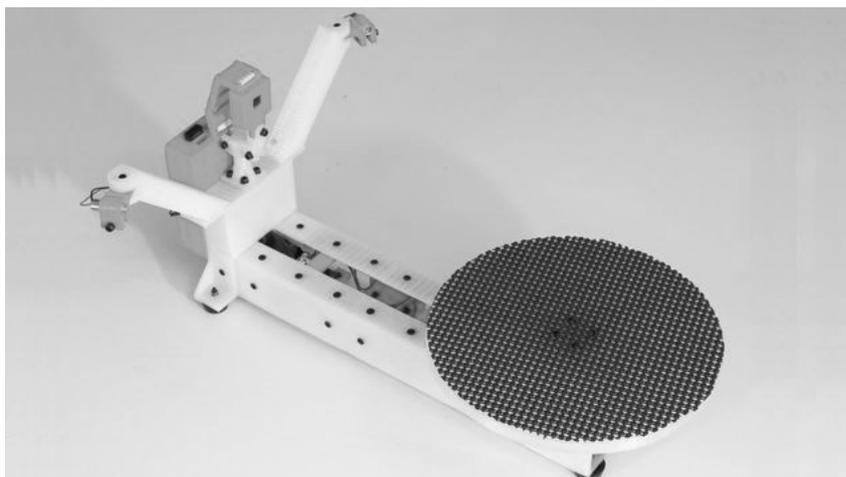
O software de controle básico sobre do Cebscan foi modificado para gerenciar a movimentação vertical do bloco câmera/laser e o duplo feixe laser; também gerencia a desativação do modo “autofocus” da câmera, que é um problema para a digitalização.

3.8.3 Projeto Atlas 3D

O projeto do scanner Atlas 3D⁵ passou por uma campanha de angariação de fundos com a comunidade entusiasta para seu desenvolvimento no final de 2014. O grande diferencial desse projeto é ser implementado sobre uma plataforma *Raspberry PI™* (minicomputador com memória e processador próprio) o que dispensa a necessidade de um computador convencional para controle do scanner e captura de um modelo. O software de controle e processamento é executado diretamente no scanner, que tem uma interface acessível através de um navegador de internet.

⁵ Atlas 3D – Disponível em <http://www.freelss.org>

FIGURA 30 – Scanner Atlas 3D



Fonte: Adaptado de Murobo (2015)

Os mantenedores do projeto Atlas 3D disponibilizam um kit de montagem para venda, contendo todos os componentes eletrônicos necessários e as peças impressas por U\$260.00 (duzentos e sessenta dólares), incluindo a licença do software controlador, acrescido as despesas de frete. No entanto, os esquemas de montagem e arquivos para impressão do chassi estão disponíveis para download.

Outro projeto que surgiu baseado no sucesso do Atlas 3D, foi o Raptor 3D Scanner, com as mesmas características, mas misturando partes do chassi impressas e parte em MDF recortadas a laser.

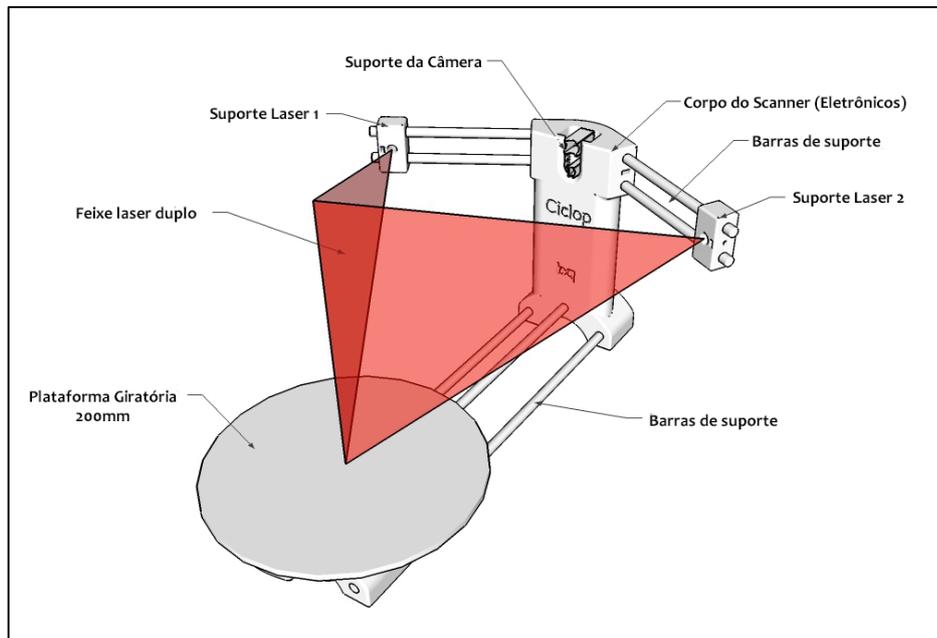
3.8.4 Projeto Ciclop

Segundo Bq (2015) o scanner 3D Ciclop⁶ é um projeto totalmente livre. O Ciclop e o Horus (software de captura) têm licença CC-BY-SA (*Creative Commons*), que permite compartilhamento e reelaboração, mesmo para uso comercial, desde que seja dada a atribuição e GPL (*General Public License*), ou seja, requer que os trabalhos derivados sejam licenciados sob a mesma licença.

Toda a informação sobre o desenho mecânico, a eletrônica e o software estão disponíveis para a comunidade e passam a pertencer ao Patrimônio Tecnológico da Humanidade. A figura 31 apresenta em detalhes as partes do scanner Ciclop.

⁶ BQ Ciclop – Disponível em: <https://www.bq.com/pt/ciclop>

FIGURA 31 – Scanner BQ Ciclop



Fonte: Adaptado de Fablabo (2015)

O Ciclop possui dois emissores lasers e base giratória, como seus ancestrais. O software de controle dos componentes é baseado em *Arduino*[™], mas a BQ criou placas específicas para esse produto. A principal, denominada BQ *ZUM CORE* e uma extensão acoplada a ela, chamada BQ *ZUM SCAN*.

A placa *ZUM CORE* é derivada do *Arduino*[™] UNO (mesmo controlador: Atmel Mega328P) mas contém elementos como conexão *Bluetooth* que não são nativos no UNO, a um custo de 36.90 €. A placa complementar, denominada *ZUM SCAN* é um extensor CNC com o esquema eletrônico disponível, mas vendido somente no kit eletrônico da BQ. O kit eletrônico é composto pelo *ZUM CORE*, *ZUM SCAN*, câmera, lasers e motor a um custo de 159.90 €. Tanto o kit quanto a placa *ZUM CORE* são comercializados de forma exclusiva na Europa.

FIGURA 32 – Placas ZUM Core (esquerda) e ZUM SCAN (direita)



Fonte: Adaptado de Diwo (2015)

O Scanner BQ Ciclop completo pode ser adquirido exclusivamente nas lojas da BQ ou em seus parceiros em Portugal e Espanha, a um custo de 249.00 €.

O software Horus desenvolvido por Jesus Arroyo Torrens, atualmente, engenheiro de software da Bq Labs é disponibilizado sob a licença GPL, tem seu código fonte disponível para download e está disponível para sistemas operacionais Windows™, Linux™ e MacOS™. Ele é o responsável por executar os cálculos geométricos e geração do modelo tridimensional. O diferencial do Horus é contar com uma rotina de auto calibragem do scanner.

3.8.5 Comparativo entre Scanners Open Source

Apesar de apresentarem algumas diferenças no processo de construção e configuração, os modelos de scanners *open source* tem seu funcionamento muito similar, tanto no processo de captura quanto no processo de renderização do modelo. Os componentes necessários para construção são semelhantes, inclusive nos custos, no entanto, alguns são mais difíceis de se adquirir no mercado brasileiro, sendo necessária uma importação, como é o caso das placas da BQ.

Quanto ao tempo de escaneamento, o maior tempo encontrado foi de quinze minutos, e o menor foi 2 minutos, dependendo da qualidade desejada no modelo a ser adquirido. A tabela 1 apresenta um comparativo entre as características dos

scanners *open source* conforme informações divulgadas pelos mantenedores dos projetos.

TABELA 1 – Comparativo entre Scanners Open Source

	FABSCAN	CEBSCAN	ATLAS	CICLOP
Dimensões	400x300x290	451x342xVar	365x274x168	455x340x198
Plataforma Giratória	140	200	177	200
Altura do Laser	151	Variável	143	175
Angulo (Objeto/Câmera/Laser)	33,7°	40,6°	26,8°	30°
Tempo escaneamento	15min	15min	12min	2-8min
Resolução da Câmera	3MP	3MP	5MP	3MP
Controlador	Arduino™	Arduino™	Raspberry™	Zum Core™
Custo Médio no Mercado	-	-	U\$ 249.00	U\$ 277.00

Fonte: Próprio autor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Com a realização da revisão de literatura, foi possível encontrar projetos livres de digitalizadores com o método de triangulação a laser com diversas características e níveis de maturidade. O conjunto das características foram levadas em consideração na escolha, pois, de acordo com o objeto desse trabalho, uma comparação de resultados seria necessária para aplicação do scanner em processos de engenharia reversa.

Dois dos quatro projetos analisados (FabScan e CebScan) não são vendidos totalmente montados, os outros dois (Atlas e Ciclop) tem custos parecidos para importação, embora seus países de origem tenham restrições para exportação principalmente por conter diodos laser.

Ao analisar as resoluções das câmeras dos projetos, constatou-se que o Atlas 3D tem uma câmera com resolução maior, no entanto o software de captura possui uma licença de U\$ 25,00 a ser adquirida e o número de documentação disponível é relativamente baixa.

Assim, o projeto escolhido foi o BQ Ciclop, pois possui uma boa disponibilidade de documentação apesar de ser um produto recente, pois acaba de completar um ano de lançamento.

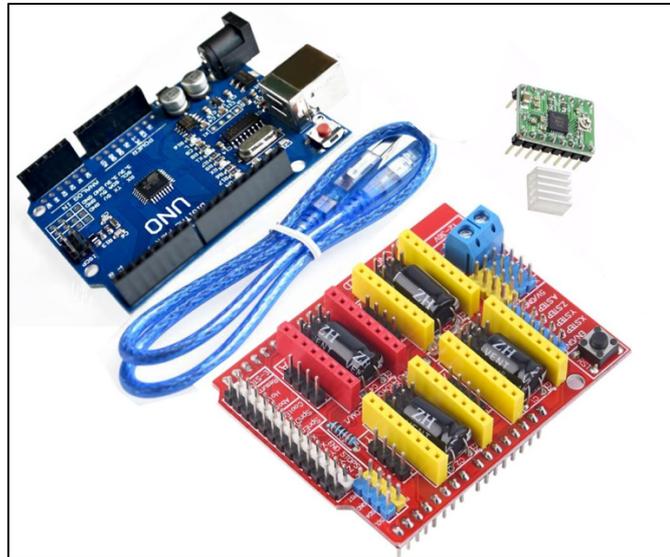
4.1 COMPONENTES ELETRÔNICOS

Como o BQ Ciclop utiliza placas próprias (ZUM CORE e ZUM SCAN) que não são diretamente vendidas para o Brasil pelo sitio da BQ. Por essa razão foi necessário adaptar o firmware do projeto para funcionamento com placa *Arduino™ UNO R3* original, pois é de fácil aquisição nas lojas de eletrônicos no Brasil. Para substituição do ZUM SCAN, que controla o motor de passo e aciona os módulos laser, foi utilizado um SHIELD CNC v3.0 para *Arduino™* com driver de passo A4988, também de fácil aquisição. O custo das placas adquiridas foi de R\$ 100,00 (Cem Reais).

Para alimentação do SHIELD CNC foi necessária a aquisição de uma fonte externa de 12V compatível com o *Arduino* que pode ser encontrada em qualquer loja de eletrônicos por cerca de R\$ 10,00 (Dez Reais)

A figura 33 apresenta as placas utilizadas nesse projeto substituindo as placas ZUM.

FIGURA 33 – Arduino Uno, Driver A4988 e *Shield CNC V3*



Fonte: Próprio autor.

Os dois módulos lasers utilizados nesse projeto foram do modelo 650nm 5mW com tensão de 3-5V com feixe em linha de cor vermelha e foco ajustável, conforme a figura 34. O custo de aquisição de cada módulo foi de R\$ 20,00 (Vinte Reais).

FIGURA 34 – Módulo laser com feixe em linha

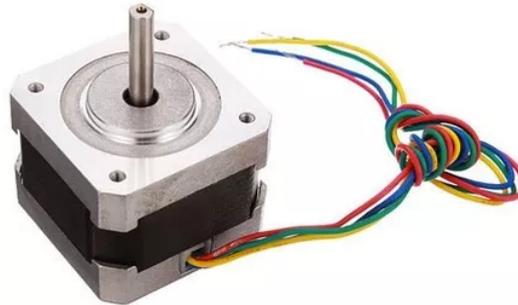


Fonte: Próprio autor.

O motor de passo, responsável por movimentar a plataforma de escaneamento utilizado foi o Nema17 fabricado pela Minibea-Matsushita com torque de 3,7kgf e tensão de 12V 1A. A figura 35 apresenta o motor Nema17 utilizado no projeto e adquirido no mercado nacional por R\$ 40,00 (Quarenta Reais). Existem dezenas de fabricantes e capacidades de torque sendo possível sua substituição por

outro semelhante, desde que haja o ajuste do valor de referência no *driver* de passo A4988.

FIGURA 35 – Motor Nema17



Fonte: Próprio autor.

A câmera utilizada no projeto, responsável por capturar as imagens do objeto colocado sobre a base giratória foi o modelo C270 da fabricante *Logitech* apresentado na figura 36. É uma *webcam* de fácil aquisição no mercado, tem resolução de 3 megapixels e captura vídeos em alta definição (HD). O custo da C270 adquirida para esse projeto foi de R\$ 115,00 (Cento e Quinze Reais).

FIGURA 36 – Câmera Logitech C270



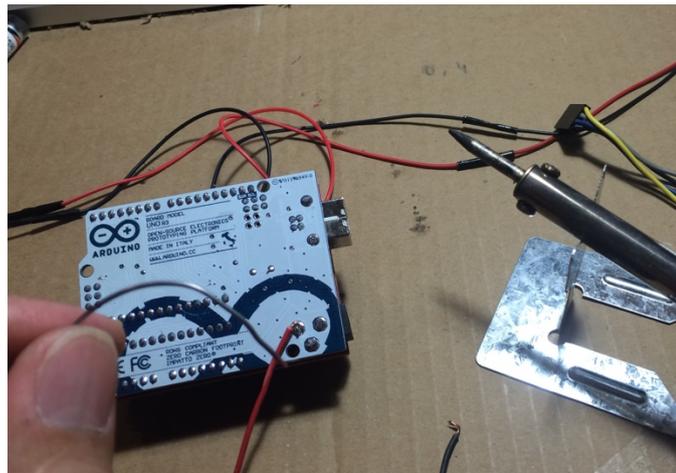
Fonte: Logitech (2016)

4.2 MONTAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

O primeiro passo para montagem dos componentes foi a conexão da placa *Arduino™* Uno com o *Shield* CNC. O motor de passo necessita de uma alimentação

de 12V que será enviada através do *Shield*, no entanto o mesmo não possui conector tipo plug para uma fonte de energia externa (internamente a tensão é de 5V), precisamos então obter essa tensão diretamente do conector do *Arduino™* através de uma soldagem simples de dois fios na parte traseira da placa, conectando os fios aos pinos de alimentação do *Shield*, conforme a figura 37.

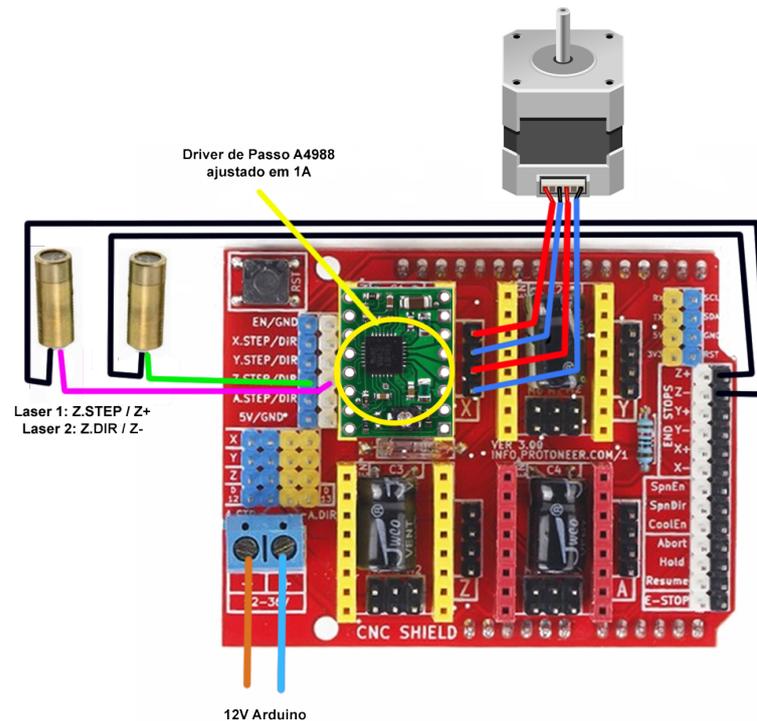
FIGURA 37 – Alimentação Shield CNC



Fonte: Próprio autor.

A conexão dos demais componentes no *Shield* (acoplado ao *Arduino*) seguiu o esquema detalhado na figura 38.

FIGURA 38 – Esquema de Montagem Eletrônica do Scanner



Fonte: Próprio autor.

O driver A4988 foi inserido no *slot* X e ajustado para 1A (um ampere). Para ajuste da tensão do driver A4988, foi utilizado um amperímetro para medir a tensão no pino “ref” e calculado a corrente resultante sobre os resistores. A tensão medida é relacionada com a corrente através da equação 10 apresentada abaixo, conforme manual do driver A4988:

Limite de corrente é dado pelo VREF (Valor de referência) dividido pelo produto de 8 (oito) pelo resistor. Nesse modelo de A4988, estão presentes o resistor R100, que equivale a 0.1Ω. Ainda segundo informações do *datasheet* (informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante), a operação de tensão do motor deve ser em 70% de sua capacidade para melhores resultados no motor de passo, ou seja, em *full step*, 70% do limite.

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= (V_{Ref} / (8 * 0,1)) * 0,7 & (10) \\
 V_{Ref} &= (I_{max} / (8 * 0,1)) * 0,7 \\
 V_{Ref} &= (1 * 0,8) * 0,7 \\
 V_{Ref} &= 0,56
 \end{aligned}$$

Logo, para ajuste no limite de tensão do motor para 1A: **VRef = 0,56v**. Girando o mini potenciômetro na base do driver foi possível o ajuste correto, pois o mesmo vem de fábrica ajustado para 1.25A.

Nos primeiros testes do circuito eletrônico do projeto foi constatado que o motor de passo operava ainda com uma velocidade muito alta (mesmo com o ajuste de corrente) e por essa razão perdia-se alguns passos e havia um movimento brusco da bandeja giratória. Para solucionar esse problema, o CNC Shield foi ajustado para que o motor trabalhasse em modo *Microstepping*. ou seja, o tamanho do passo e velocidade foram reduzidos, mudando seu modo de operação de *Full Step* (padrão) para *Sixteenth Step* (depois de passar pelo teste do *Half Step*, *Quarter Step*, *Eighth Step* sem melhoras visíveis); isso foi feito acrescentando-se *jumper's* nos pinos “MS1”, “MS2” e “MS3” localizados embaixo do conector do driver A4988.

4.3 SOFTWARE DE CONTROLE DO HARDWARE

O software responsável por controle do hardware, que vai acionar os feixes laser e a plataforma giratória, conhecido como *firmware* é desenvolvido em linguagem C, no ambiente de desenvolvimento do Arduino, que é de uso livre e está disponível para sistemas operacionais Windows, MacOS e LinuxOS.

Embora o *firmware* disponibilizado pelo projeto Ciclop, denominado Horus FW⁷, segundo o fabricante seja compatível com controlador Arduino, o mesmo está programado para interagir com a placa ZUM SCAN, ou seja, pode-se substituir o ZUM CORE que é derivado do Arduino, no entanto o ZUM SCAN é necessário.

Por essa razão, algumas alterações no projeto do *firmware* Horus foram necessárias e propostas por Swindon Maker⁸ em março de 2015 no repositório *Github*. A alteração proposta por Swindon no entanto se mostrou ineficiente para a atual versão do software Horus Scanner Manager 0.1.2.4, por essa razão, foram feitas as alterações no arquivo “CPU_MAP.h” conforme destaques no quadro 1.

⁷ Horus FW - <https://github.com/bqlabs/horus-fw>

⁸ Horus 3D Scanner Firmware CNC Shield - <https://github.com/swindonmakers/horus-fw>

QUADRO 1 – Trecho de código fonte alterado no arquivo CPU_MAP.h

```

#ifdef CPU_MAP_ATMEGA328P_CNCV3 // Arduino Uno for CNC Shield V3

// Serial port pins
#define SERIAL_RX USART_RX_vect
#define SERIAL_UDRE USART_UDRE_vect

// Define laser pulse output pins. NOTE: All laser pins must be on the same port.
#define LASER_DDR DDRD
#define LASER_PORT PORTD
#define LASER1_BIT 4 // Uno Digital Pin 4 Driver Z-STEP
#define LASER2_BIT 7 // Uno Digital Pin 7 Driver Z-DIR
#define LASER3_BIT 4 // Uno Digital Pin 4
#define LASER4_BIT 7 // Uno Digital Pin 7
#define LASER_MASK ((1<<LASER1_BIT)|(1<<LASER2_BIT)) // All step bits

// Define step pulse output pins. NOTE: All step bit pins must be on the same
port.
#define STEP_DDR DDRD
#define STEP_PORT PORTD
#define X_STEP_BIT 2 // Uno Digital Pin 2
#define STEP_MASK (1<<X_STEP_BIT) // All step bits

// Define step direction output pins. NOTE: All direction pins must be on the
same port.
#define DIRECTION_DDR DDRD
#define DIRECTION_PORT PORTD
#define X_DIRECTION_BIT 5 // Uno Digital Pin 5
#define DIRECTION_MASK (1<<X_DIRECTION_BIT) // All direction bits

// Define stepper driver enable/disable output pin (all axis)
#define STEPPERS_DISABLE_DDR DDRB
#define STEPPERS_DISABLE_PORT PORTB
#define STEPPERS_DISABLE_BIT 0 // Uno Digital Pin 8
#define STEPPERS_DISABLE_MASK (1<<STEPPERS_DISABLE_BIT)

// Define probe switch input pin.
#define PROBE_DDR DDRC
#define PROBE_PIN PINC
#define PROBE_PORT PORTC
#define PROBE_BIT 5 // Uno Analog Pin 5
#define PROBE_MASK (1<<PROBE_BIT)

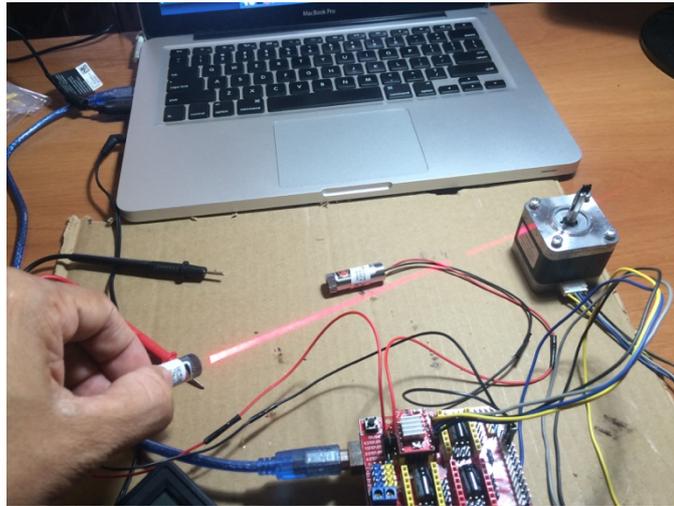
#endif

```

Fonte: Próprio autor.

Após carregar o *firmware* alterado para a memória do Arduino™, os testes de acionamento do motor e laser puderam ser executados através do software *Horus Scanner Manager*. A figura 39 apresenta os testes iniciais de funcionamento dos componentes eletrônicos do projeto.

FIGURA 39 – Teste de Componentes Eletrônicos



Fonte: Próprio autor.

4.4 ESTRUTURA DO SCANNER 3D

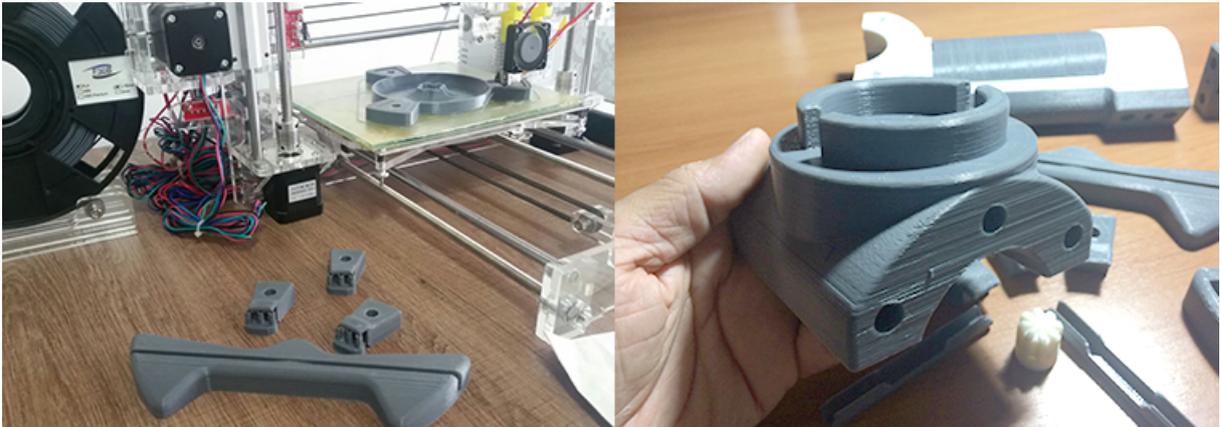
A BQ Labs, mantenedora do projeto Ciclop disponibilizou os arquivos com os modelos propostos para impressão 3D. Os arquivos são disponibilizados em uma comunidade de entusiastas de impressão 3D denominada Thingiverse⁹.

Com a disponibilização dos modelos originais para livre alteração pela comunidade, foram surgindo diversas variantes do projeto 3D do Ciclop com o intuito de se utilizar menos filamento PLA para impressão ou mesmo sua substituição total ou parcial por esquadrias de alumínio, madeira, substituição de algumas peças por outros modelos para acoplamento de modelos de câmeras diferentes, luzes de led para iluminar o objeto e muitas outras ideias são discutidas pelos usuários da Thingiverse.

A figura 40 apresenta a impressão do modelo original proposto pela BQ em impressora 3D, (FDM - Fusão e Deposição de Material) utilizando filamento PLA (Poli Ácido Láctico), para utilização neste projeto.

⁹ BQ Ciclop 3D Parts - <http://www.thingiverse.com/thing:740357>

FIGURA 40 – Impressão 3D da Estrutura do Scanner



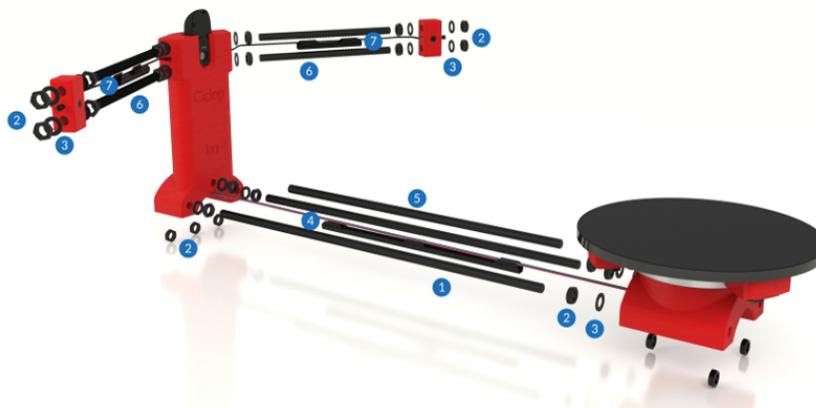
Fonte: Próprio autor.

As demais partes da estrutura do projeto são ferragens como barras roscadas M3 cortadas em 2 partes de 400mm e 1 de 292mm, 28 porcas M8, 18 arruelas M8, 3 parafusos M8x30mm, 7 parafusos M3x10mm e 3 porcas M3. Também foi necessária a utilização de um rolamento modelo 16040 (200x310x34mm).

A plataforma giratória consiste em um disco de 200mm que pode ser impresso em 3D como as demais, no entanto, nesse projeto foi feita em MDF de 6mm cortado a laser.

A montagem da estrutura seguiu as orientações¹⁰ do projeto BQ Ciclop conforme a figura 41. Entre a lente da câmera e o centro da plataforma giratória, é necessária uma distância de, pelo menos 30cm.

FIGURA 41 – Sugestão de Montagem da Estrutura do Scanner



Fonte: Adaptado de BQLABS (2015)

¹⁰ - https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/01_Ciclop_QSG_Structure_EN.pdf

4.5 AQUISIÇÃO DE MODELOS

Para aquisição de modelos, foi utilizado o software Horus 3D Scanner Manager, na versão 0.1.2.4. A instalação é compatível com ambientes Windows, Linux e MacOS e possui uma rotina de auto calibragem do scanner.

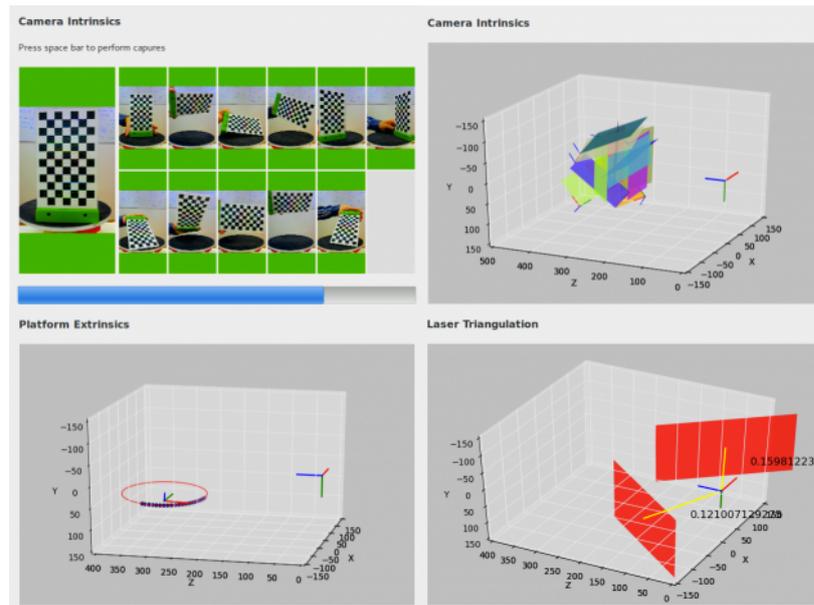
O processo de calibragem envolve um padrão de xadrez disponibilizado junto aos arquivos 3D do projeto Ciclop. A Câmera detecta o padrão de linhas e colunas e o software aciona os lasers esquerdo e direito alternadamente enquanto gira a plataforma nos sentidos horário e anti-horário.

Após o processo de autocalibragem o scanner está pronto para ser utilizado acionando-se a função SCAN. O modelo é exibido em tempo real na tela do Horus. O software possui três ambientes de trabalho: Controle, Calibração e Escaneamento.

No ambiente de controle, é possível configurar detalhes da câmera, como brilho, contraste e saturação, pontos importantes para ajuste da luminosidade do ambiente de operação do scanner; controle dos emissores laser, testes do motor e console de execução de comandos *GCode*.

No ambiente de calibragem, é possível acionar os comandos de ajuste do sistema, ajustando imagem, padrão de calibragem, laser, triangulação e opções sobre as dimensões da plataforma giratória. Cada opção possui um assistente e opções de inserção manual dos valores, conforme apresenta a figura 42.

FIGURA 42 – Fases do processo de Calibragem do Horus



Fonte: BQLABS (2015)

As condições de iluminação são de suma importância no processo de autocalibragem, pois em demasia ou insuficiência leva a erros nos valores de triangulação e cálculos da matriz de rotação e vetor de translação imprecisos, levando o modelo a não ter muita precisão. Vários experimentos de calibragem manual em ambientes diferentes foram realizados no intuito de obtermos melhores resultados.

Para um melhor resultado, uma calibragem manual foi necessária no painel *Calibration Workbench*. O item *Pattern Settings* é indicado para configuração do padrão de calibragem do scanner (painel quadriculado contendo 7 linhas e 12 colunas em preto e branco), os valores utilizados nesse item foram *Square width: 13*, *Pattern row: 6* e *Pattern Columns: 11*. É necessário informar o valor da distância da base do padrão de calibragem e o topo do primeiro quadro preto, conforme orienta o processo de autocalibragem do Horus.

A configuração *Camera Intrinsics* é um processo que captura 12 fotografias pressionando a barra de espaço do teclado quando os quadros se tornarem verdes em cada foto necessária para definição de alcance da câmera.

A configuração *Laser Triangulation* define o ângulo entre o feixe laser e a câmera do scanner, processo essencial para obtenção do modelo. Os valores encontrados após a calibragem podem ser aceitos ou rejeitados; tanto o valor do

laser direito quanto o esquerdo devem apresentar valores menores que 0.1 para um melhor resultado; se isso não ocorrer, deve-se experimentar outras fontes de iluminação ao refazer a calibragem.

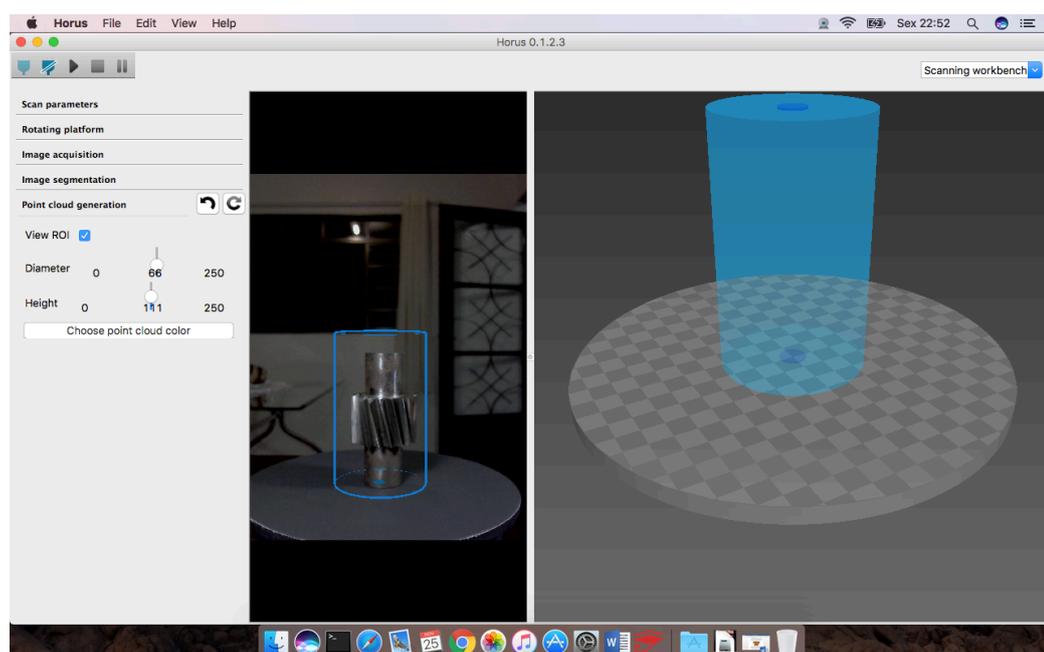
O último ajuste é a altura da plataforma giratória, que é feito na opção *Platform Extrinsic*s. Esse processo é automático o scanner definirá a altura baseado no padrão de calibragem.

É importantes salientar que uma mudança na opção *Camera Intrinsic*s exige a recalibragem dos itens *Laser Triangulation* e *Platform Extrinsic*s.

No ambiente de escaneamento, uma projeção da plataforma giratória é apresentada e, é sobre ela que o modelo tridimensional vai sendo apresentado no processo de captura.

No ambiente de captura, *Scanning Workbench*, é possível exibir o painel de controle, a visão da câmera em tempo real de captura e o modelo tridimensional sendo capturado. No painel de controle, é possível ajustar opções de qualidade do processo para obter textura ou apenas nuvem de pontos, assim como acionar um ou ambos os lasers. A opção *Point Cloud Generation* mostrada na figura 43, exibe um controle de diâmetro e altura da área de captura da plataforma, evitando assim que sejam capturados itens que não são necessários, diminuindo índice de ruídos (pontos alheios) alheios ao objeto pretendido.

FIGURA 43 – Ambiente de Captura do Software Horus



Fonte: Próprio autor.

Após o término da captura, que pode levar de 2 a 15 minutos, dependendo da precisão escolhida, o modelo em formato PLY (*Polygon File Format*) é gerado através da opção *File* e *Save Model*. Esse formato é facilmente importado em softwares de manipulação de objetos tridimensionais.

Para uma melhor qualidade da imagem capturada pela câmera, a distância focal foi ajustada abrindo-se a câmera e regulando a objetiva manualmente conforme a figura 44.

FIGURA 44 – Ajuste manual do foco da câmera



Fonte: Próprio autor.

4.6 PÓS PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS

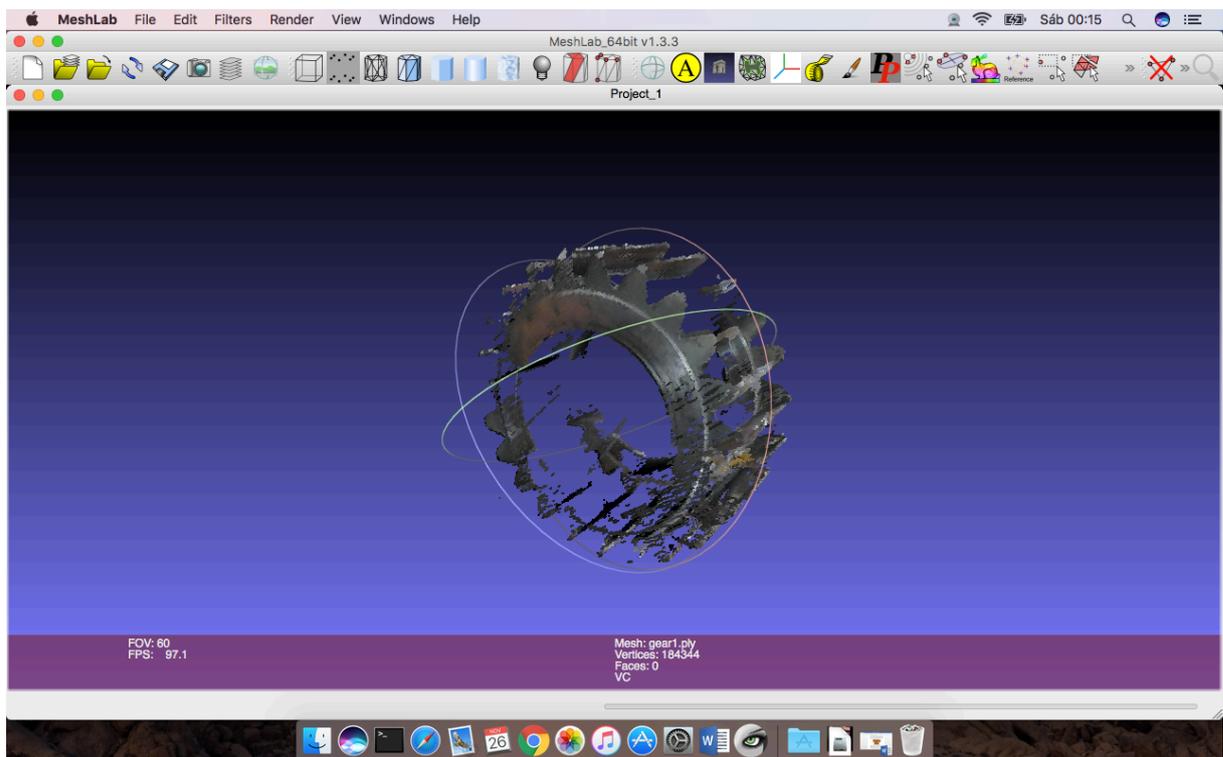
Após a captura da nuvem de pontos faz-se necessário um processamento da malha, nessa etapa, foi utilizado o software livre denominado MeshLab¹¹. O MeshLab possui filtros de limpeza automática, incluindo a remoção de vértices não referenciados ou duplicados, além de arestas nulas.

Primeiramente é necessário abrir o MeshLab e importar a nuvem de pontos gerada pelo Horus, através da função *File > Import Mesh*, (importar malha) seleciona-se o arquivo e clica-se *Open* (Abrir). A nuvem de pontos do arquivo é exibida na área de modelagem do MeshLab; se a nuvem foi gerada a partir da textura do objeto a nuvem apresenta cores, do contrário apenas uma cor cinza no

¹¹ - <http://meshlab.sourceforge.net>

objeto é exibida. A nuvem de pontos importada pode conter imperfeições causadas por má iluminação no processo de captura ou simplesmente ruídos que não fazem parte do objeto; uma opção de seleção de vértices (*select vertexes*) está disponível para seleção e exclusão através da opção *Delete Selected Vertex* (eliminar vértices selecionados). A figura 45, apresenta o ambiente do MeshLab exibindo uma nuvem de pontos capturada pelo Horus.

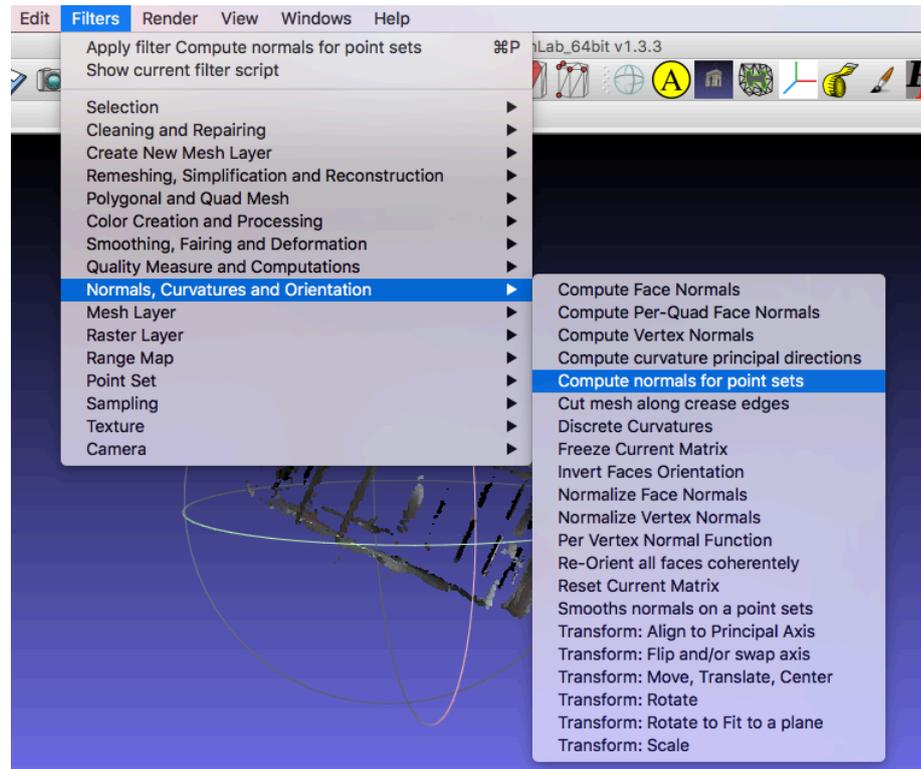
FIGURA 45 – Ambiente MeshLab



Fonte: Próprio autor.

Após a limpeza da nuvem de pontos, é possível utilizar um dos métodos mais comuns na reconstrução de objetos tridimensionais por malha, que toma como entrada os pontos para cálculo dos vetores normais, através da opção *Filters > Normals, Curvatures and Orientation > Compute Normals for point sets*, conforme apresenta a figura 46.

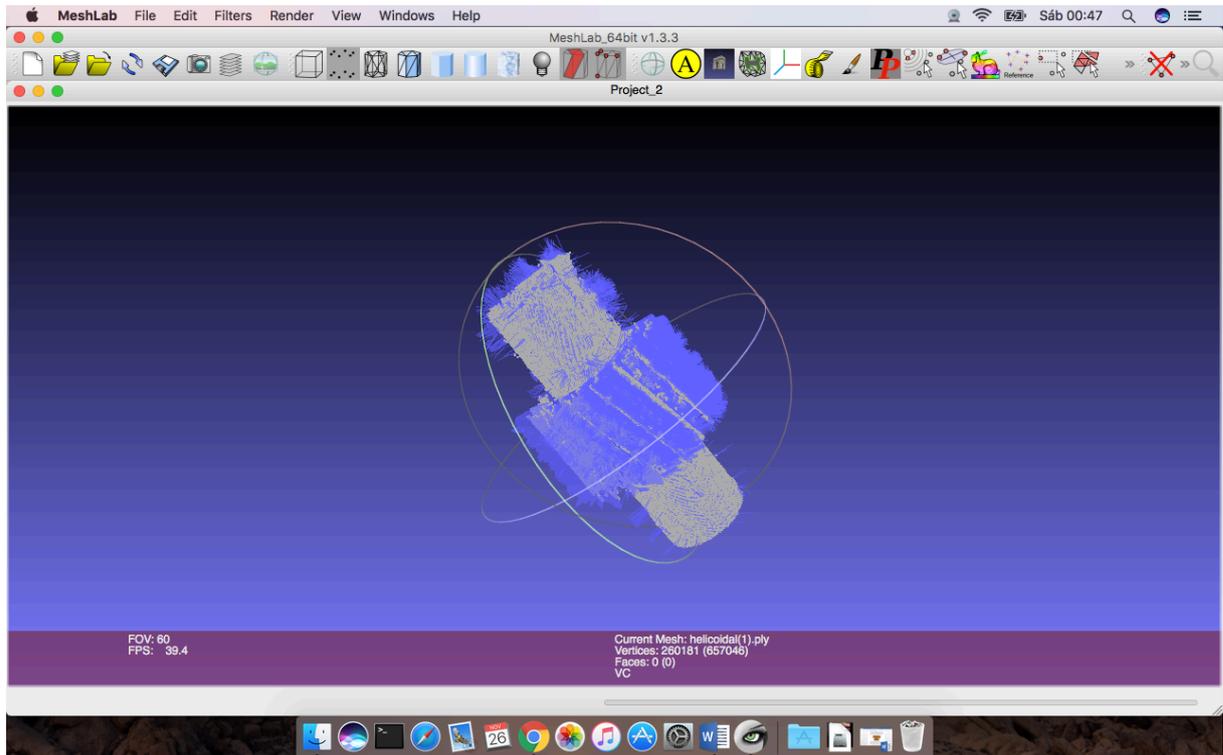
FIGURA 46 – MeshLab – Cálculo de Normais do Modelo



Fonte: Próprio autor.

Na janela apresentada pelo software, são exibidos parâmetros para o cálculo; após alguns testes de valores, constatou-se que os números 10, 50 ou 100 para o campo *Neighbour Number* (número de vizinhos) tiveram o melhor resultado. Após a aplicação do cálculo, podemos verificar os normais no item *Render > Show Normal/Curvature*. São exibidas linhas azuis nos vértices indicando os valores dos vetores normais do modelo pretendido. Se essas linhas que representam os normais estiverem viradas no sentido oposto ao exterior do objeto, é necessário recalcular os normais variando a quantidade de vizinhos dos vértices, de modo a se encontrarem o máximo possível na região externa da nuvem. A figura 47, apresenta um modelo exibindo os marcadores de normais.

FIGURA 47 – MeshLab – Exibição de Normais



Fonte: Próprio autor.

Após o cálculo dos normais, a malha está pronta para reconstrução do modelo, através da opção *Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction > Surface Reconstruction: Poisson*.

Na janela de configuração da reconstrução, são apresentadas as opções de profundidade da *Octree (Octree Depth)*, também conhecida como “árvore de oito”, da divisão do solucionador (*Solver Divide*) e os valores situam-se entre 6 e 12, sendo 12 o mais alto grau de exatidão e por essa razão, pode levar vários minutos, dependendo do computador em utilização.

Após a reconstrução, são exibidas duas camadas no MeshLab: a nuvem de pontos e o modelo reconstruído; é possível a exibição/omissão das camadas através da opção *View > Show Layer Dialog*, clicando nos ícones dos olhos presentes na linha de cada camada.

Para exportação do modelo construído, deve-se acionar a opção *File > Export Mesh* e optar pelo formato “STL”, que é padrão nos softwares de fatiamento de impressão tridimensional.

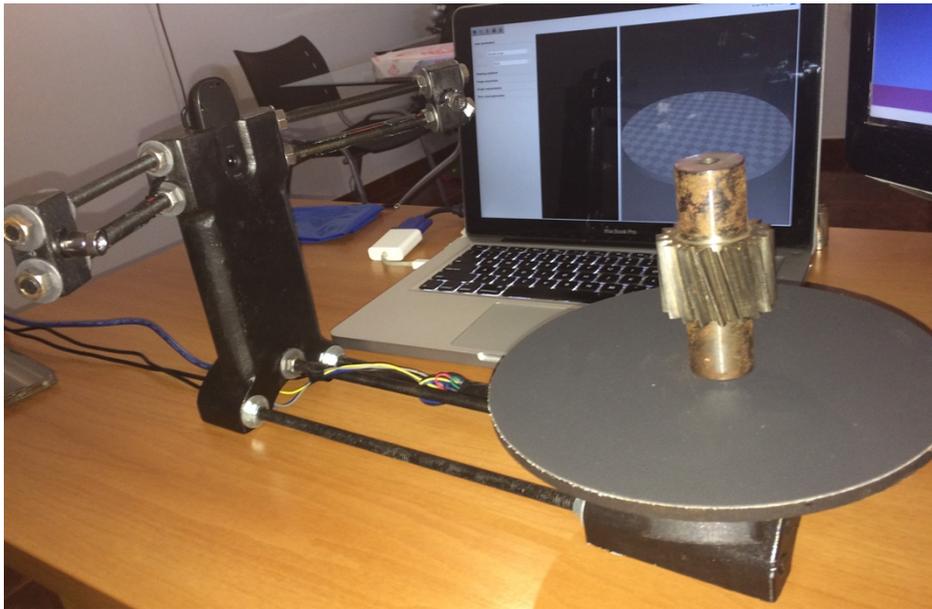
O MeshLab ainda permite várias opções como unir várias nuvens de pontos, capturadas de diversos ângulos do objeto. Para tal, importa-se todas as nuvens

necessárias e aciona-se a opção *Edit > Align* (Editar > Alinhar); no painel de alinhamento, pode-se alinhar as malhas fixando a primeira (*Glue Mesh Here*) e utilizando a opção *Point Based Gluering* (colagem baseada em pontos), que aparece na janela. A colagem baseada em pontos apresenta duas camadas (fixada e a ativa) lado a lado para que se escolha pontos em comum (pares); melhores resultados foram encontrados com a escolha de mais de quatro pares em cada camada em relação a camada fixada. Após concluir o alinhamento (que pode ser repetido até obter o resultado desejado) clica-se em *Process* (processar). A união definitiva das camadas de nuvens é realizada a partir do menu *Filters > Mesh Layer > Flatten Visible Layers*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o término da construção do scanner como apresentado na figura 48, foram iniciados os testes de funcionamento, com várias condições de iluminação e opções de calibragem.

FIGURA 48 – Construção do Scanner Finalizada



Fonte: Próprio autor.

Muitos são os fatores que podem influenciar diretamente o processo de digitalização, mas a principal preocupação deve ser as condições de iluminação do ambiente.

A baixa luminosidade prejudica o processo de calibragem pois os limites e texturas do objeto ficam ocultos da câmera, assim como uma iluminação direta no objeto prejudica sua captura. Se a aquisição estiver sendo feita sem as cores, apenas textura, os emissores lasers iluminam a área no momento da digitalização, então não há necessidade de iluminação adicional, mas a possibilidade de ruídos (pontos sem importância coletados ao redor do objeto) se torna maior.

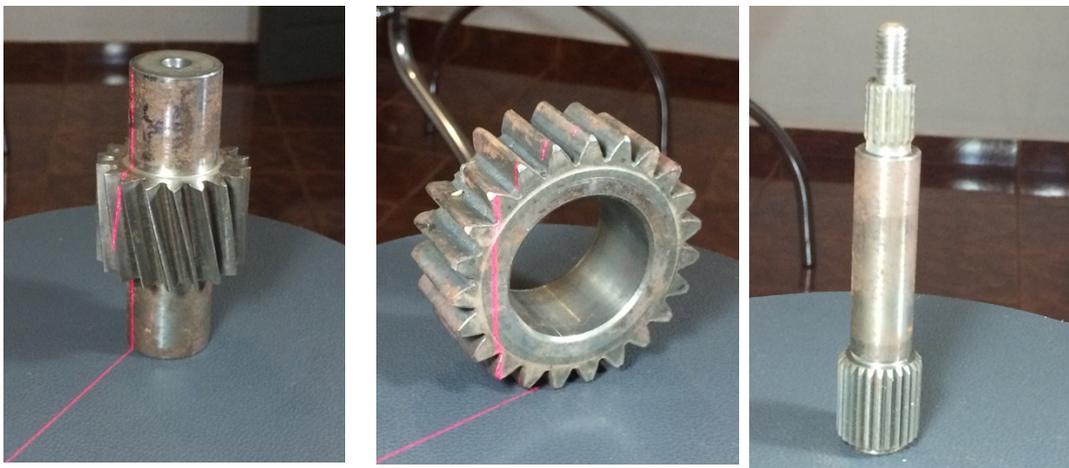
Também é importante destacar que o material do objeto a ser capturado pode interferir no resultado final. Se a superfície é demasiadamente reflexiva os feixes laser são refletidos e ofuscam a câmera, dessa forma, o processo se torna

mais difícil de se obter precisão. Assim, os objetos foscos, livres de reflexão, tem os melhores resultados.

Há ainda que se destacar um problema quanto a cor, pois os feixes de laser são na cor vermelha e o software detecta essa cor para digitalização. Se a superfície a ser digitalizada for vermelha, existe uma tendência a acontecer erros de captura. Nesse caso, a melhor opção é diminuir a saturação no momento da captura para tentar reduzir o problema.

Foram digitalizadas peças de diversos tamanhos como apresentadas na figura 49, para se determinar a capacidade de detalhamento do scanner.

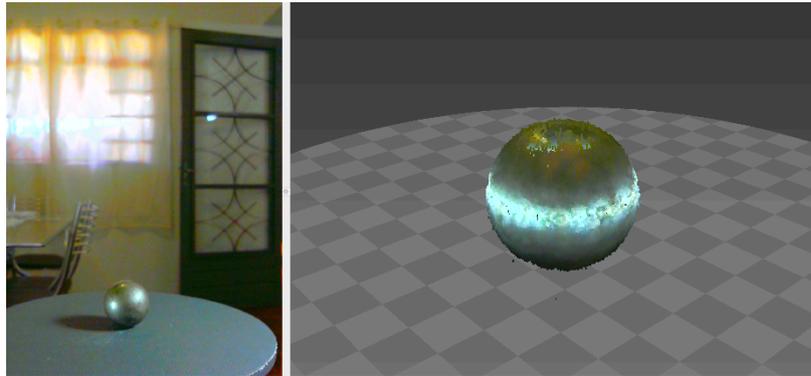
FIGURA 49 – Objetos utilizados nos testes de digitalização



Fonte: Próprio autor.

A engrenagem helicoidal (esquerda), engrenagem (centro) e eixo (direita) foram escolhidas por apresentarem geometrias variadas e complexas, permitindo definição do grau de precisão do modelo digitalizado. Também foi utilizada uma esfera metálica nos testes por se tratar de uma geometria simples, mas que pode causar problemas na reflexão dos feixes laser, conforme pode ser visto na figura 50.

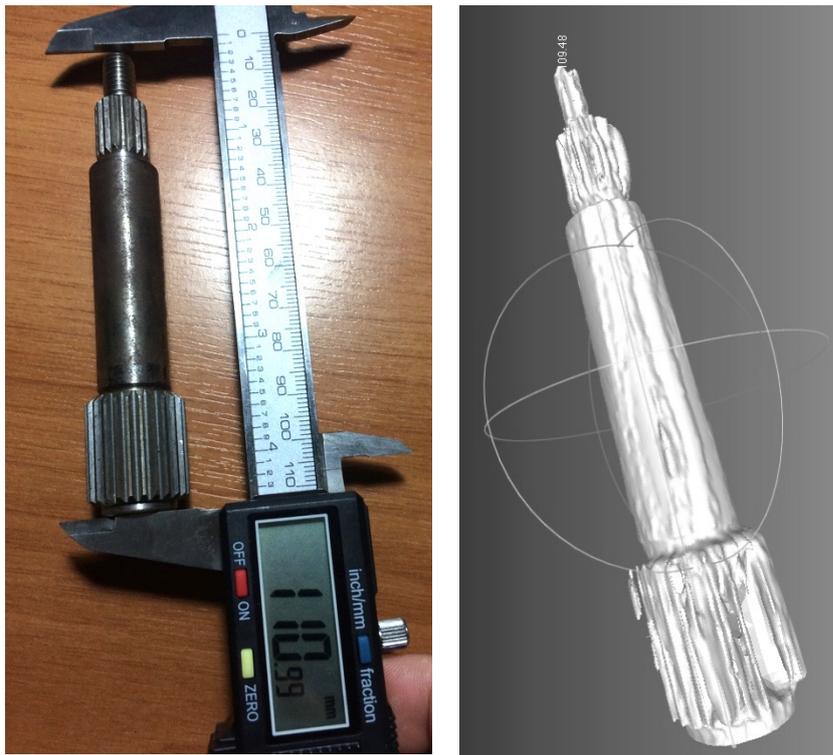
FIGURA 50 – Digitalização de Esfera Metálica



Fonte: Próprio autor.

Após digitalização dos objetos e posterior reconstrução do modelo no software MeshLab, uma medição foi realizada no modelo do eixo para uma comparação com as medidas da peça real, conforme a figura 51.

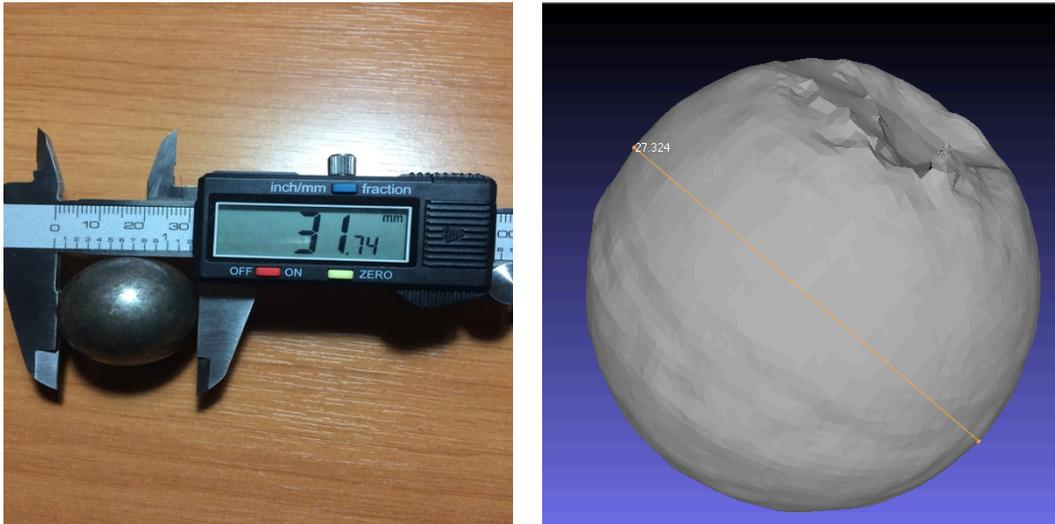
FIGURA 51 – Comparação de Medidas do Modelo e da Peça Real



Fonte: Próprio autor.

O eixo real possui um tamanho de 110,99mm e no modelo o tamanho encontrado foi de 109,49mm. A esfera metálica apresentada na figura 52, também foi digitalizada, modelada e medida apresentando resultados semelhantes.

FIGURA 52 – Comparativo entre esfera metálica real e modelo obtido



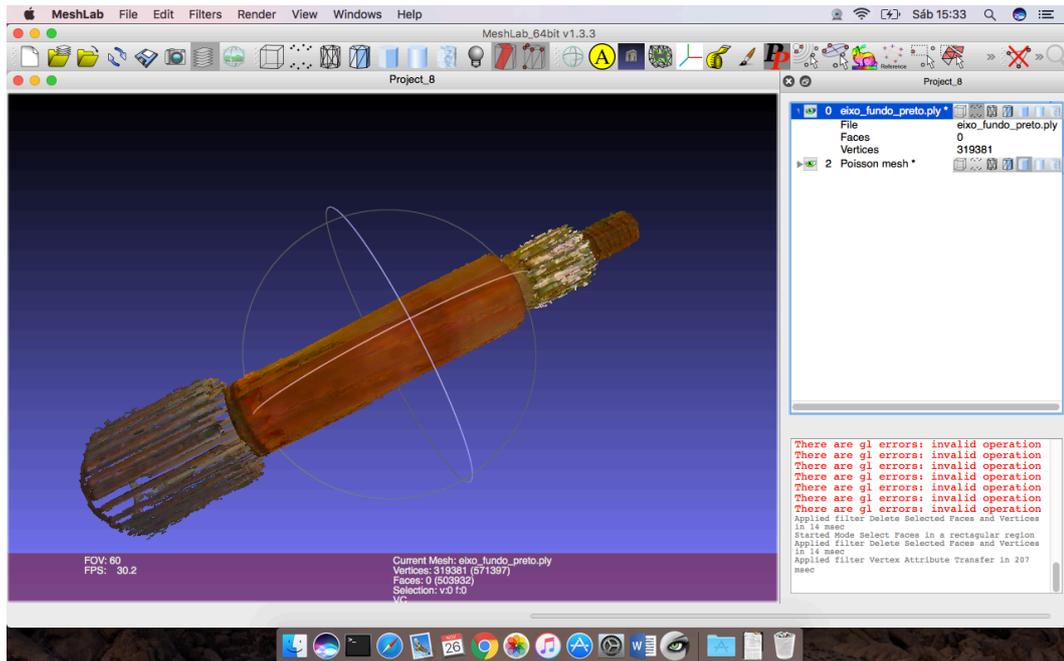
Fonte: Próprio autor.

O diâmetro real da esfera é de 31,74mm, enquanto o valor encontrado no modelo foi de 27,32mm.

As engrenagens submetidas ao teste foram capturadas duas ou três vezes sendo colocadas em posições diferentes na plataforma rotatória do digitalizador. As nuvens de pontos encontradas foram unidas no MeshLab e alinhadas por intermédio de 4 pares cada. No entanto, devido a condições de iluminação alguns pontos não foram capturados em nenhuma malha, causando problemas no processo de reconstrução. Essas peças carecem de um tratamento em software de modelagem adequado para reconstrução dos espaços (buracos) na superfície do sólido obtido no MeshLab.

O software MeshLab possui diversos filtros que podem melhorar a qualidade do modelo obtido a partir da nuvem de pontos, a figura 53 apresenta um modelo do eixo digitalizado e melhorado com o uso do filtro de suavização *Taubin*. (*Taubin Smooth*) que aplica um algoritmo de suavização nas faces selecionadas de acordo com os parâmetros fornecidos pelo usuário.

FIGURA 53 – Modelo melhorado com filtro de suavização

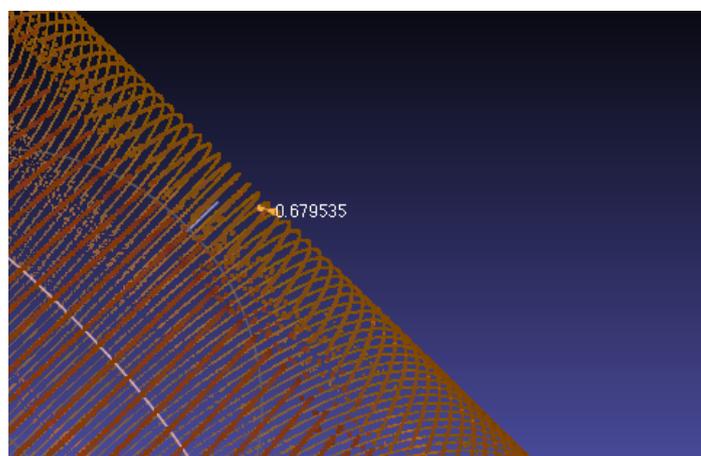


Fonte: Próprio autor.

Nesse modelo apresentado na figura 53, também foi aplicado o artifício de transferência das cores dos vértices para a malha construída, obtendo-se assim um modelo colorido, em vez do tradicional cinza.

Quanto ao relevo da superfície, vários testes foram realizados, ajustes de focos e iluminação, no entanto a medição de relevo só pode ser realizada na nuvem de pontos, pois a reconstrução do modelo através dos cálculos de normais, preenche os espaços entre os pontos e mascara a distância encontrada. A figura 54 apresenta a malha obtida no corpo do eixo capturado nos testes do digitalizador.

FIGURA 54 – Medições de superfície na malha de pontos



Fonte: Próprio autor.

Apesar de ser uma possível forma de se encontrar uma rugosidade da superfície, não é muito precisa porque depende diretamente da capacidade do sensor CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) da câmera utilizada no processo e do operador demarcar os pontos para medição. No exemplo acima a distância entre os níveis dos pontos capturados foi de aproximadamente 0,68mm.

A fim de analisar o impacto da superfície polida (reflexiva) e escuras, foram realizados testes em objetos comuns apresentados na figura 55 e os resultados são de uma precisão aceitável, no entanto, alguns pontos são equivocados na superfície de cerâmica polida (duas alças) causando problemas na forma. Na parte direita da figura 55 é apresentada uma lata de refrigerante em cor escura, com partes em vermelho e partes reflexivas; nesse teste o modelo também sofreu uma deformação dando a impressão de “lata amassada”, quando na verdade o que aconteceu foi uma reflexão da luz do laser.

FIGURA 55 – Objetos com superfície reflexiva e com partes em vermelho



Fonte: Próprio autor.

Ajustes na iluminação e saturação da câmera tendem a melhorar a qualidade da nuvem de pontos obtida.

6 CONCLUSÕES

O scanner proposto nesse estudo foi construído com um custo total de R\$ 590 (quinhentos e noventa reais), mostrando assim que é possível a popularização tecnologia de digitalização tridimensional no país. As aplicações para o scanner são as mais diversas em vários setores da indústria e educação.

Também teve-se intuito de analisar a qualidade dos modelos obtidos a fim de se extrair características da superfície do objeto digitalizado; concluiu-se que alguns dados podem ser visualizados, no entanto, há uma limitação técnica quanto à resolução da câmera utilizada nesse equipamento e o software necessário. Os testes realizados mostram aumento de qualidade e apontam o indício de que mais detalhes podem ser obtidos com a utilização de uma câmera de melhor resolução, com lentes específicas de acordo com a distância do objeto pretendido. Também, a construção de um software adequado a essa medição de superfície, pois as funções existentes nos softwares utilizados nesse estudo são de difícil utilização para esse propósito.

Uma das dificuldades encontradas nesse projeto foi a reunião de todas as informações necessárias tanto para construção do scanner quanto para operação dos softwares de captura e pós processamento de malha de pontos, pois nem todas as comunidades de softwares e hardware livres possuem uma boa documentação, ficando assim muitas informações retidas com seus membros. Muita pesquisa foi realizada diretamente com essas pessoas a fim de se obter suas experiências na resolução de problemas relacionados a componentes e softwares.

O presente estudo busca então torna-se um compêndio dessas experiências de usuários e informações técnicas de construção e configuração e operação de um scanner tridimensional pelo método de triangulação a laser, para que o mesmo possa ser reproduzido sem maiores complicações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade desse trabalho, algumas sugestões são indicadas a seguir:

- Implantação de circuito de iluminação com lâmpadas LED próximas à câmera para amenizar o impacto do excesso ou ausência de luz no objeto capturado;
- Substituição do modelo da câmera utilizada no projeto por um modelo SLR (*Digital Single Lens Reflex*) e objetiva com curta distância focal, para melhor detalhamento da superfície;
- Criação de software para análise das imagens e detecção automática da diferença de nível entre os pontos da malha obtida, evidenciando assim uma rugosidade da superfície de forma mais precisa;
- Substituição do controlador ARDUINO por um mini computador do tipo RASPBERRY PI, permitindo assim que o scanner seja operado remotamente ou mesmo apenas conectando um monitor, teclado e mouse diretamente ao scanner, pois o mesmo já teria todos os softwares necessários e previamente configurados.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, K. A emoção da ultrassonografia em 4D. **Diário de Cuiabá**, Cuiabá, Ed. 13229, 2012.
- AZEVEDO, T; TAVARES, J; PAZ, M. **Reconstrução tridimensional de estruturas anatómicas externas utilizando métodos volumétricos**. Porto: Universidade do Porto, 2009.
- AZEVEDO, T; TAVARES, J; PAZ, M. **3D object reconstruction using computer vision: reconstruction and characterization applications for external human anatomical structures**. 2012. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Informática) - Universidade do Porto, Porto, 2012.
- BQLABS. **Assembly of the disc and structure**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://static-qraders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/01_Ciclop_QSG_Structure_EN.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- BONILLA-MUSOLES, F; MACHADO, L.E. **3D-4D ultrasound in obstetrics**. Madrid: Médica Panamericana, 2005.
- BRAGA NETO, U. M. **Reconstrução volumétrica e análise de imagens tridimensionais por morfologia matemática**. 1994. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1994.
- CARVALHO, P. et al. **Fotografia digital**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005. (Colóquio Brasileiro de Matemática, 25; Publicações Matemáticas).
- CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- DIWO. **Do it with others**; [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <<http://diwo.bq.com/en>>. Acesso em: 01 ago. 2016.
- ENGELMANN, F. **FabScan affordable 3D laser scanning of physical objects**. Aachen: RWTH Aachen University, 2011. 90 p.
- FABLABO. **Réalisation d'un Scanner 3D à balayage laser**. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://fablabo.net/wiki/Scanner_DIY#MakerScanner>. Acesso em: 01 ago. 2016.
- FOLEY, J. D. et al. **Computer graphics: principles and practice**. 2. ed. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1997.
- FUNARI, M. B. G. et al. **Princípios básicos de diagnóstico por imagem**. Barueri: Manole, 2013.

GARIB, D. G. et al. Tomografia computadorizada de feixe cônico (Cone Beam): entendendo este novo método de diagnóstico por imagem com promissora aplicabilidade na ortodontia. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, v.12, n.2, p. 139-156, abril 2007.

GAZZIRO, M. **Scanner 3D**. São Paulo: Editora Biblioteca 24 Horas, 2011. 19 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Departamento de Sensoriamento Remoto - DSR. **Curso de Sensoriamento Remoto por LIDAR (LIDAR Remote Sensing)**. [S. l.], 2007. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

HUDÁK, R.; ŽIVČÁK, J.; MAGIN, R. L. Applications of metrotomography in biomedical engineering. [S. l.]: IntechOpen, 2016. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/biomedical-engineering-technical-applications-in-medicine/applications-of-metrotomography-in-biomedical-engineering>>. Acesso em: 24 jun. 2016.

INSTRUMENTIC. **Scanners 3D**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <<http://www.instrumentic.info/pt/hardware/scanner-3d.html>>. Acesso em: 16 jun. 2016.

JOSE, M. A. **Reconstrução tridimensional de baixo custo a partir de par de imagens estéreo**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KEALY, J. K. et al. **Radiologia e ultrassonografia do cão e do gato**. São Paulo: Elsevier Brasil, 2012.

LABORATOIRE DE VISION. **Visual hull**. Quebec: Université Laval, 2016. Disponível em: <<http://vision.gel.ulaval.ca/~visualhull>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

LINO, A. C. L. **Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

LOGITECH. **HD Webcam C270**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.logitech.com/pt-br/product/hd-webcam-c270>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

MATWORKS. **Stereo vision in matlab**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/discovery/stereo-vision.html>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

MICROSCRIBE. **3D digitizers**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.3d-microscribe.com/MX%20Page.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

MUROBO. **E-Commerce**. [S. l.], 2015. Disponível em: <<http://store.murobo.com>>. Acesso em: 29 jul. 2016.

NEWWORLDCYCLOPEDIA. **Computed tomography**. [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Computed_tomography>. Acesso em: 25 jun. 2016.

NIEM, W. Robust and fast modelling of 3D natural objects from multiple views. **SPIE Proceedings, Image and Video Processing II**, Bellingham, v. 2182, p. 388-397, 1994.

OLIVEIRA, B. S. **Imagens tridimensionais por meio da técnica de moiré: uma nova proposta**. 2006. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

PAIVA, A. C. R. **Aquisição de informação tridimensional com luz estruturada codificada**. 1997 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1997.

PAVLIDIS, G. et al., **Methods for 3D digitization of cultural heritage**. Journal of Cultural Heritage, Issy les Moulineaux, v. 8, n. 1, p. 93-98, 2007.

REISS, M. L. L. **Reconstrução tridimensional digital de objetos à curta distância por meio de luz estruturada**. 2007. 256 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, 2007.

RENISHAW. **CMM probes, software and retrofits**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.renishaw.com/en/hardware--31248>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

RIVEIRO, B; SOLLA, M. **Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure**. Boca Raton: CRC Press, 2016. 179 p.

SANSONI, et al. State-of-the-art and applications of 3d imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine and criminal investigation. **Sensors**, Basel, v. 9, n. 1, p. 568-601, 2009.

SAVARESE, S.; RUSHMEIER, H.; BERNARDINI, F.; PERONA, P. **Shadow carving**. In: INT. CONF. ON COMPUTER VISION, 2001, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: [s. n.], 2001. p. 2

SCIAMMARELLA, C. A. Holographic moire, an optical tool for the determination of displacements, strains, contours, and slopes of surfaces. **Opt. Eng.**, Bellingham, v. 21, n. 3, p. 213447 DOI 10.1117/12.7972929, 1982.

SINGAPORE. **Singapore sports and orthopaedics clinic**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.orthopaedics.com.sg/treatments/magnetic-resonance-imaging-mri>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

SISGRAPH99. **Course on 3D photography**. [S. l.], 1999. Disponível em: <<http://www.cs.cmu.edu/~seitz/course/SIGG99/notes.html>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

SZELISKI, R. **Shape from rotation**. Cambridge: Digital Equipment Corporation; Cambridge Research Lab, 1990. (Technical Report Series)